

Fakultät 6 Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung  
Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau

**Maria Loebjinski**

Bewertung der Tragfähigkeit von  
Holzkonstruktionen beim Bauen im Bestand

Ein Beitrag zur substanzschonenden Erhaltung  
von bestehenden Gebäuden

**DISSERTATION**

**Heft 19**

---

# ***Bewertung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen beim Bauen im Bestand***

## ***Ein Beitrag zur substanzschonenden Erhaltung von bestehenden Gebäuden***

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
genehmigte Dissertation

*vorgelegt von*

*M. Sc.*

***Maria Loebjinski***

*aus Perleberg/ Brandenburg*

Gutachterin/Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak  
Gutachterin/Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder  
Gutachterin/Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug  
  
Tag der Disputation: 26.07.2021

---







---

*Alles Bauen hat mit Holz begonnen.*

*(Robert von Hálasz, 1905-2004)*

*Aus: Vorwort zu „Holzbau-Taschenbuch“, 1. Auflage, Ernst und Sohn, Berlin, 1943*

---



---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus dem Interesse an den Grundsätzen des probabilistisch fundierten Bemessungskonzeptes der Eurocodes, seiner Umsetzung im Holzbau sowie der Anwendung der Prinzipien auf das Bauen im Bestand. Durch die tiefergehende Beschäftigung mit der Problematik und der Entwicklung fundierter Lösungsansätze soll ein Beitrag zur substanzschonenden Erhaltung bestehender Holzkonstruktionen geleistet werden.

Die Arbeit entstand im Zeitraum 2016-2021 an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg und wurde im Rahmen eines Promotionsstipendiums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, sowie durch ein Abschlussstipendium des Gleichstellungsbüros der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg gefördert. Die Verfasserin möchte sich nachdrücklich für die materielle, sowie ideelle Förderung beider Institutionen bedanken.

Großer Dank für die wissenschaftliche Betreuung, proaktive Förderung und fachliche Unterstützung gilt meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Rug und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Pasternak. Herzlichen Dank möchte ich den Kollegen am Lehrstuhl für Stahl und Holzbau an der BTU für den Austausch, die wissenschaftliche Diskussion und das kollegiale Klima aussprechen.

Ein besonderer Dank gilt zudem Herrn Dr.-Ing. D. Steinbrecher, der mir ein besonders guter Lehrer war und immer ein offenes Ohr für meine zahllosen Fragen hatte.

Lieben Dank meiner Familie, meinen Eltern, meiner Schwester, meinen Großeltern, die meine Ziele auch in schweren Phasen unterstützten, meine Begeisterung aufnahmen und teilten. Vielen Dank zudem an alle Freunde, Korrekturleser und Motivatoren für eure Unterstützung und aktive Hilfe.

Der größte Dank gilt dir Marvin, für alles - vor allem die Schokolade!

---





# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>i</b>
<b>I. Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>II. Verzeichnis über verwendete Formelzeichen .....</b>	<b>v</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielstellung .....	2
1.3 Struktur der Arbeit und angewendete Methoden.....	2
<b>2. Bewertung bestehender Holzkonstruktionen – Stand der Normung und Forschung .....</b>	<b>4</b>
2.1 Einführung & Überblick.....	4
2.2 Richtlinien in Deutschland .....	6
2.3 Nationale Normen in Europa .....	10
2.4 Internationale Normen, Richtlinien & pränormative Arbeit zur Bewertung von (Holz)Konstruktionen im Bestand .....	20
2.5 Zusammenfassung und Untersuchungsbedarf .....	31
<b>3. Das Bemessungskonzept mit Grenzzuständen – Sicherheitstheoretische Grundlagen .....</b>	<b>33</b>
3.1 Einführung – Die Tragwerkszuverlässigkeit als Maß für die Sicherheit der Bauwerke.....	33
3.2 Grundlegende Begriffe.....	34
3.3 Mathematische Definition der Tragwerkszuverlässigkeit.....	38
3.4 Lösungsverfahren zur Ermittlung der Tragwerkszuverlässigkeit .....	43
3.5 Normative Umsetzung des Bemessungskonzeptes mit Grenzzuständen.....	50
<b>4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand.....</b>	<b>58</b>
4.1 Grundlagen zur Modellierung von Einwirkungen .....	58
4.2 Modellierung ständiger Einwirkungen.....	66
4.3 Modellierung von veränderlichen Einwirkungen – Nutzlasten.....	71
4.4 Modellierung von veränderlichen Einwirkungen – Schneelasten .....	79
4.5 Modellierung von veränderlichen Einwirkungen – Windlasten .....	82
4.6 Modellunsicherheiten auf der Einwirkungsseite .....	85
4.7 Zusammenfassung statistischer Parameter .....	87

<b>5.</b>	<b>Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand .....</b>	<b>88</b>
5.1	Bewertung von Holzbauteilen im Bestand.....	88
5.2	Tragverhalten von Bauteilen aus Vollholz .....	99
5.3	Probabilistische Modellbildung für den Materialwiderstand mit Berücksichtigung der Aktualisierung von Widerstandsparametern.....	109
5.4	Modellunsicherheiten auf der Widerstandsseite .....	133
5.5	Zusammenfassung und statistische Parameter .....	134
<b>6.</b>	<b>Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes .</b>	<b>136</b>
6.1	Grundlegendes und Zielstellung .....	136
6.2	Übersicht betrachteter Beanspruchungen für Bauteile im Bestand aus Holz .....	137
6.3	Grenzzustandsfunktionen und Bemessungsparameter.....	137
6.4	Probabilistische Parameter der Basisvariablen.....	141
6.5	Ergebnisse zum impliziten Sicherheitsniveau der Normung im Holzbau bei Standardbeanspruchungsfällen .....	142
6.6	Zusammenfassung .....	167
<b>7.</b>	<b>Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand .....</b>	<b>169</b>
7.1	Zielstellung .....	169
7.2	Zielzuverlässigkeitsindex für Konstruktionen im Bestand .....	170
7.3	Vereinfachte Verfahren zur Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten.....	178
7.4	Anpassung des Materialbeiwertes unter Einbeziehung einer in situ bestimmten Referenzeigenschaft.....	188
7.5	Probabilistische Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für ausgewählte Beanspruchungsfälle .....	193
7.6	Zusammenfassung der Kalibrierungsergebnisse und Vorschlag modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für die Praxis.....	218
7.7	Verifizierung der Kalibrierungsergebnisse .....	220
<b>8.</b>	<b>Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen.....</b>	<b>229</b>
8.1	Einordnung in aktuelle normative Entwicklungen.....	229
8.2	Stufenkonzept zur Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen im Bestand ....	230

8.3	Die Bewertungsschritte im Detail .....	231
8.4	Illustrative Darstellungen zur Tragfähigkeitsüberprüfung mit dem vorgeschlagenen Stufenkonzept .....	235
<b>9.</b>	<b>Erkenntnisse und Ausblick.....</b>	<b>252</b>
9.1	Erkenntnisse.....	252
9.2	Forschungsausblick .....	254
<b>III.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>IV.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XX</b>
<b>V.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XXXVIII</b>
<b>10.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>1</b>
10.1	Zusammenstellung zur Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten .....	1
10.2	Beispiele zur Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden.....	7
10.3	Beispielrechnungen zum Eigengewicht von Decken- und Dachkonstruktionen .....	14
10.4	Formelmäßige Zusammenhänge zur Berücksichtigung des Effekts der Langzeitbelastung ..	18
10.5	Methoden der Parameterschätzung auf Grundlage von Versuchsdaten .....	20
10.6	Literaturstudie zum Variationskoeffizienten der Festigkeit .....	28
10.7	Anderson-Darling-Test für Versuchsdaten.....	39
10.8	Auswertung von Versuchsergebnissen mit einem Stochastischen Modell der Sortierung ....	43
10.9	Sensitivitätsanalysen.....	50
10.10	Herleitung von Lastverhältnissen und Wichtungsfaktoren für Belastung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast für tragende Dachbauteile.....	85
10.11	Umfangreiche Kalibrierungsergebnisse .....	87
10.12	Verifizierung der Kalibrierungsergebnisse .....	96

## I. Abkürzungsverzeichnis

ARGEBAU	Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz
CC	Versagensfolgeklasse (consequence class)
CEN	European Committee for Standardization
CIB	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
DASTb	Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau
det	deterministisch
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnikverein
DIN	Deutsche Industrienorm
EXP	Exponentialverteilung
fib	International Federation for Structural Concrete
GAM	Gammaverteilung
GUM	Gumbelverteilung
IABSE	International Association for Bridge and Structural Engineering
JCSS	Joint Committee on Structural Safety
JRC	Joint Research Centre
KL	Knowledge Level
JCSS	Joint Committee on Structural Safety
LH	Laubholz
LN	logarithmische Normalverteilung
N	Normalverteilung
NH	Nadelholz
ONR	Richtlinie des Österreichischen Normungsinstitut ON
PMC	Probabilistic Model Code
RC	Zuverlässigkeitsklasse
RILEM	Réunion internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
TBW	Teilsicherheitsbeiwert
WB	Weibullverteilung
za	zerstörungsarm
zf	zerstörungsfrei

## II. Verzeichnis über verwendete Formelzeichen

### Häufig verwendete griechische Buchstaben

$\alpha$	Sensitivitätsfaktor, Dachneigungswinkel, Koeffizient der Bodenrauigkeit
$\beta$	Zuverlässigkeitsindex
$\varepsilon$	Exzess
$\xi$	Böenkoeffizient
$\gamma$	Wichte
$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
$\gamma_F$	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen allgemein
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
$\gamma_{Rd}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit auf Widerstandsseite
$\gamma_{Sd}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit auf Einwirkungsseite
$\theta$	Modellunsicherheit
$\kappa$	Lastkonzentrationsfaktor
$\lambda$	Erneuerungsrate, Auftretensrate
$\mu$	Erwartungswert
$\mu_i$	i-tes zentrales Moment einer Zufallsvariablen, Formbeiwert von Dächern
$\nu$	Reynoldszahl
$\bar{v}_G$	Luftgeschwindigkeit in der Gradientenhöhe
$\rho$	Korrelationskoeffizient, Rohdichte, Luftdichte
$\rho_0$	Korrelationsradius, Darr-Rohdichte
$\sigma$	Standardabweichung, Spannung
$\tau$	Messfehler
$\omega$	Feuchte

### Häufig verwendete lateinische Buchstaben

$A$	(Querschnitts)Fläche, belastete Fläche
$A_0$	Bezugsfläche
$a$	Regressionsparameter, Parameter der Gumbelverteilung, Bauteilabmessung
$b$	Regressionsparameter, Bauteilabmessung
$C$	Koeffizienten zur Modellierung der Schneelast
$cov$	Kovarianz
$d$	Korrelationslänge, (Bauteil-)Abstand

**II. Verzeichnis über verwendete Formelzeichen**

---

$E$	Elastizitätsmodul, Einwirkung
$E[x]$	Erwartungswert der Variablen $x$
$F(x)$	(Verteilungs-)Funktion der Variablen $x$
$f(x)$	(Verteilungsdichte-)Funktion der Variablen $x$
$f_k$	charakteristischer Wert der Festigkeit
$f_c$	Druckfestigkeit
$f_m$	Biegefestigkeit
$f_t$	Zugfestigkeit
$G$	ständige Einwirkung, Eigengewicht
$g_k$	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkung
$h$	Bauteilabmessung
$i(x,y)$	Einflussfläche eines Lasteffekts
$k$	Beiwert entsprechend Index
$LA_G$	Lastanteil der ständigen Last an der Gesamtlast
$LA_Q$	Lastanteil der veränderlichen Last an der Gesamtlast
$LA_{Q1}$	Lastanteil der veränderlichen Last 1 am Gesamtanteil veränderlicher Lasten
$L(y,x,t)$	zeitlich räumlich zufällige Lastintensität
$L_{equ}(t)$	Skalierungsvektor
$l(x,y,L_{equ}(t))$	standardisiertes Lastbild
$M$	Sicherheitsmarge
$m_i$	$i$ -tes Moment einer Zufallsvariablen, Mittelwert
$N$	Nutzlast
$N^+$	Niveaureuzungen
$n$	Anzahl
$n_p$	Präsenzzeit
$n_r$	Lastwechselzahl
$n_{erf}$	erforderliche Stichprobenanzahl
$P$	Vertrauensniveau
$P_f$	Versagenswahrscheinlichkeit
$P_s$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$P_u(X)$	Unterschreitungswahrscheinlichkeit
$Q$	veränderliche Einwirkung
$q_k$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung
$R$	Widerstandsvariable entsprechend Index
$r$	Niveauwert, Umrechnungsfaktor bei Schneelasten

$S$	Variable des Lasteffekts, Schneelast
$s$	Standardabweichung einer Stichprobe
$T$	Testgröße
$T_r$	Zeitabstand, in denen ein Niveauwert $r$ überschritten wird
$T_{ref}$	Bezugszeitraum („reference period“)
$t_n$	Erneuerungszeitpunkt
$U$	Zufallsgröße im Raum standardisierter Zufallsgrößen
$U(x,y)$	Zufallsfeld mit den Variablen $x$ und $y$
$Var[x]$	Varianz der Variablen $x$
$V$	Variationskoeffizient
$v^+$	Niveaureizungsrate
$W$	Windlast
$W(x,y)$	stochastisches Feld mit den Variablen $x$ und $y$
$X$	Zufallsvariable
$x$	Realisation einer Zufallsvariablen
$x_k$	charakteristischer Wert
$\bar{x}$	Mittelwert einer Stichprobe
$x_{meas}$	in situ gemessene Variable
$Z$	mit Fehlern behaftete Messgröße
$z$	Bauwerkshöhe bei der Ermittlung der Windlast
$z_d$	Bemessungsparameter
$z_G$	Gradientenhöhe

### Häufig verwendete Indizes

$G$	ständige Einwirkung
$d$	Bemessungswert
$k$	charakteristischer Wert
$N$	Nutzlast
$Q$	veränderlichen Einwirkung
$R$	Festigkeit
$S$	Schneelast
$t$	Zielwert
$W$	Windlast
$O$	Mindestwert





# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Mit den im Jahr 2012 bauaufsichtlich eingeführten *Eurocodes*, welche als Bemessungsgrundlage für den Nachweis der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit dienen, gelten auch in Deutschland Normen nach europäischem Maßstab. In diesen ist die Bemessung mittels Grenzzuständen verankert und für alle Fachplaner innerhalb der Bundesrepublik in der Anwendung bauaufsichtlich verpflichtend [1]. Als Vorlage für die bauaufsichtliche Einführung der Normen in den Bundesländern dient die *Musterliste der Technischen Baubestimmungen* [2]. Für die praktische Bemessung wurde das semi-probabilistische Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten eingeführt. Somit soll ein festgelegtes theoretisches Zielzuverlässigkeitsniveau erreicht werden, welche eine akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit beinhaltet. Laut *DIN 1055-100:2001-03* [3] wurden die meisten Teilsicherheitsbeiwerte anhand von Vorgängernormen kalibriert. Dem Bemessungskonzept liegt demnach ein umfangreiches probabilistisches Modell zugrunde, zur Berücksichtigung des gewachsenen Wissenstandes sind zudem empirisch gewachsene Elemente vorhanden.

Mit Blick auf die aktuellen Normen (Stand: 2021), wird deutlich, dass in der Bemessung ausschließlich Annahmen für den Entwurf und die Errichtung von Neubauten zugrunde gelegt werden, der Bestandsbau findet derzeit normativ keine Beachtung. Im Neubau sind eine Reihe unbekannter Einflussgrößen vorhanden. Dazu zählen Unsicherheiten über die tatsächliche Materialbeschaffenheit, die Fehlerfreiheit der Ausführung, mögliche Änderungen der Belastung durch Nutzungsänderungen, sowie sichtbare und verdeckte Schädigungen.

Im Bestandsbau hingegen kann das Tragwerk in situ überprüft und Last- und Materialparameter aktualisiert werden. Zudem hat sich das Tragverhalten gewissermaßen in der Vergangenheit bewährt, was jedoch nicht mit einer pauschalen Tragfähigkeit für die Zukunft ohne notwendige Überprüfung gleichgesetzt werden darf. Angesichts der grundlegenden Unterschiede, welche sich im Vergleich der Bemessungssituation von Neu- und Altbauten finden, stellt dieser Sachverhalt die Praxis vor bisher nicht gelöste Herausforderungen. Dazu zählen die Berücksichtigung des verfügbaren Informationsstandes in der Tragfähigkeitsüberprüfung mittels praxisorientierter Methoden, die Bestimmung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des verbauten Holzes und damit die Festlegung charakteristischer Werte für die Bewertung, sowie die Anpassbarkeit der Tragfähigkeitsüberprüfung an einzelne, kritische Beanspruchungen zur Optimierung des Nachweises. Die fortschreitende technische Entwicklung ermöglicht es, mittels zerstörungsfreier bzw. zerstörungsarmer Techniken Festigkeitseigenschaften des Altholzes in bestehenden Konstruktionen zu ermitteln und auch verdeckte Schäden zu erkennen. Die Berücksichtigung dieser in der Tragfähigkeitsüberprüfung wird so möglich.

Es stellt sich die Frage, ob bei Berücksichtigung aktualisierter Informationen und Reduktion der Unsicherheiten die Teilsicherheitsbeiwerte für den Neubau auch für Bauteile im Bestand gelten. Weiter ist

## **1. Einleitung**

---

zu hinterfragen ob der gleiche Zielzuverlässigkeitsindex für probabilistische Berechnungen und Kalibrierungen wie im Neubau anzuwenden ist. Untersuchungen hierzu liegen für den Holzbau bisher nicht vor. Nur mittels einheitlicher, normativer Vorgaben kann dieses Potential in der Überprüfung von Bestandskonstruktionen zielführend praktisch genutzt werden. Die Anpassung des Berechnungskonzeptes für bestehende Konstruktionen ermöglicht die Erschließung von Tragwerksreserven und bildet damit eine bessere Voraussetzung für die substanzschonende Erhaltung.

### **1.2 Zielstellung**

Zur Tragfähigkeitsüberprüfung und substanzschonenden Erhaltung bestehender Holzkonstruktionen ist die Entwicklung eines angepassten Bemessungskonzeptes nötig. Zur Wahrung der praktischen Anwendbarkeit wird dieses in Form angepasster Teilsicherheitsbeiwerte angestrebt, welche auf probabilistischer Grundlage modifiziert werden. Dabei werden bestehende Anpassungen auf der Einwirkungsseite nach europäischem Vorbild in die Kalibrierung einbezogen und die Modifikation auf der Widerstandsseite durchgeführt. Die Möglichkeit und der Umfang aktualisierter Informationen aus einer Bestandsaufnahme in situ wird berücksichtigt. Das Zielzuverlässigkeitsniveau wird für den Bestandsbau diskutiert und ein Bereich für einen Zielwert zur Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte vorgeschlagen.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines modifizierten, praxisorientierten Bemessungskonzeptes für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen im Bestand. Die Betrachtungen gelten für Querschnittsnachweise von Holzbauteilen in historischen Konstruktionen. Die Verwendung der Modifikationen setzt eine detaillierte Bestandsaufnahme in situ sowie die Einhaltung ausgewiesener Anwendungsvoraussetzungen voraus.

### **1.3 Struktur der Arbeit und angewendete Methoden**

Kapitel 2 beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand nationaler und europäischer Normen und Richtlinien zur Bewertung von Konstruktionen im Bestand mit speziellem Fokus auf den Holzbau. Vorhandene Anpassungen des Berechnungskonzeptes für Bestandsbauten werden dargestellt und der Untersuchungsbedarf aufgezeigt.

Anschließend behandelt Kapitel 3 Grundlagen des Bemessungskonzeptes der europäischen Normung für den Entwurf und die Bemessung von Konstruktionen (Eurocodes) und die zugrundeliegende mathematische Definition der Tragwerkszuverlässigkeit. Lösungsverfahren zur Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit werden erläutert.

Die in dieser Arbeit einbezogene Einwirkungen und deren probabilistische Modellierung werden in Kapitel 4 dargestellt. Die Festlegung der Parameter der Extremwertverteilung für Nutzlasten erfolgt

basierend auf einer eigenen Modellierung und Approximation der Verteilung unter Nutzung von Literaturangaben. Zur Modellierung von Wind- und Schneelasten kommen vereinfachte stochastische Modelle zur Anwendung.

Des Weiteren wird in Kapitel 5 auf die Modellierung des Tragwiderstandes von Bauholz und auf Möglichkeiten der Parameteraktualisierung im Bestandsbau eingegangen. Eine umfassende Literaturstudie wird durchgeführt und Methoden zur Verbesserung des Modells werden betrachtet.

Mittels probabilistischer Zuverlässigkeitsberechnungen in Kapitel 6 erfolgt die Analyse und Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus, welches mit den geltenden Teilsicherheitsbeiwerten für Querschnittsnachweise unter relevanten Lastkombinationen erreicht wird. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt in Hinblick auf die geltenden normativen Festlegungen.

Nach einer Diskussion zu Anpassungsmöglichkeiten des Zielzuverlässigkeitsindex für den Bestandsbau in Kapitel 7 wird das Optimierungspotential des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  für den Materialwiderstand des Bauholzes bei definierten Belastungen und Beanspruchungen untersucht. Methoden mit festen Sensitivitätsfaktoren werden vergleichend angewendet und anschließend probabilistische Kalibrierungen mit der *First Order Reliability Method (FORM)* mit Hilfe des Programms *MATLAB* der Firma *MathWorks* durchgeführt. Die Ableitung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für den Bestandsbau mit Holz in unterschiedlichen Beanspruchungssituationen und Empfehlungen sowie Anwendungsgrenzen für die Praxis erfolgt auf Grundlage dieser Berechnungen. Eine Verifizierung der Ergebnisse erfolgt mittels *Monte Carlo Simulation* sowie mit der *First Order Reliability Method*.

Für die Anwendung der modifizierten Teilsicherheitsbeiwerte wird in Kapitel 8 ein Praxiskonzept erarbeitet und die Anwendung an Beispielen demonstriert.

Die Struktur der Arbeit wird in Abb. 1.1 schematisch dargestellt.

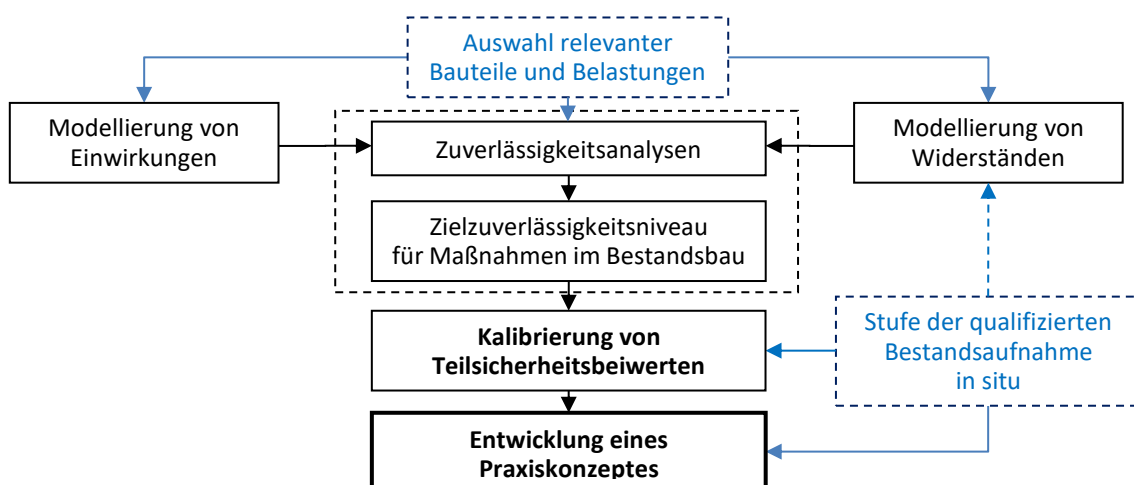


Abb. 1.1: Struktur der Arbeit – schematische Darstellung

## 2. Bewertung bestehender Holzkonstruktionen – Stand der Normung und Forschung

### 2.1 Einführung & Überblick

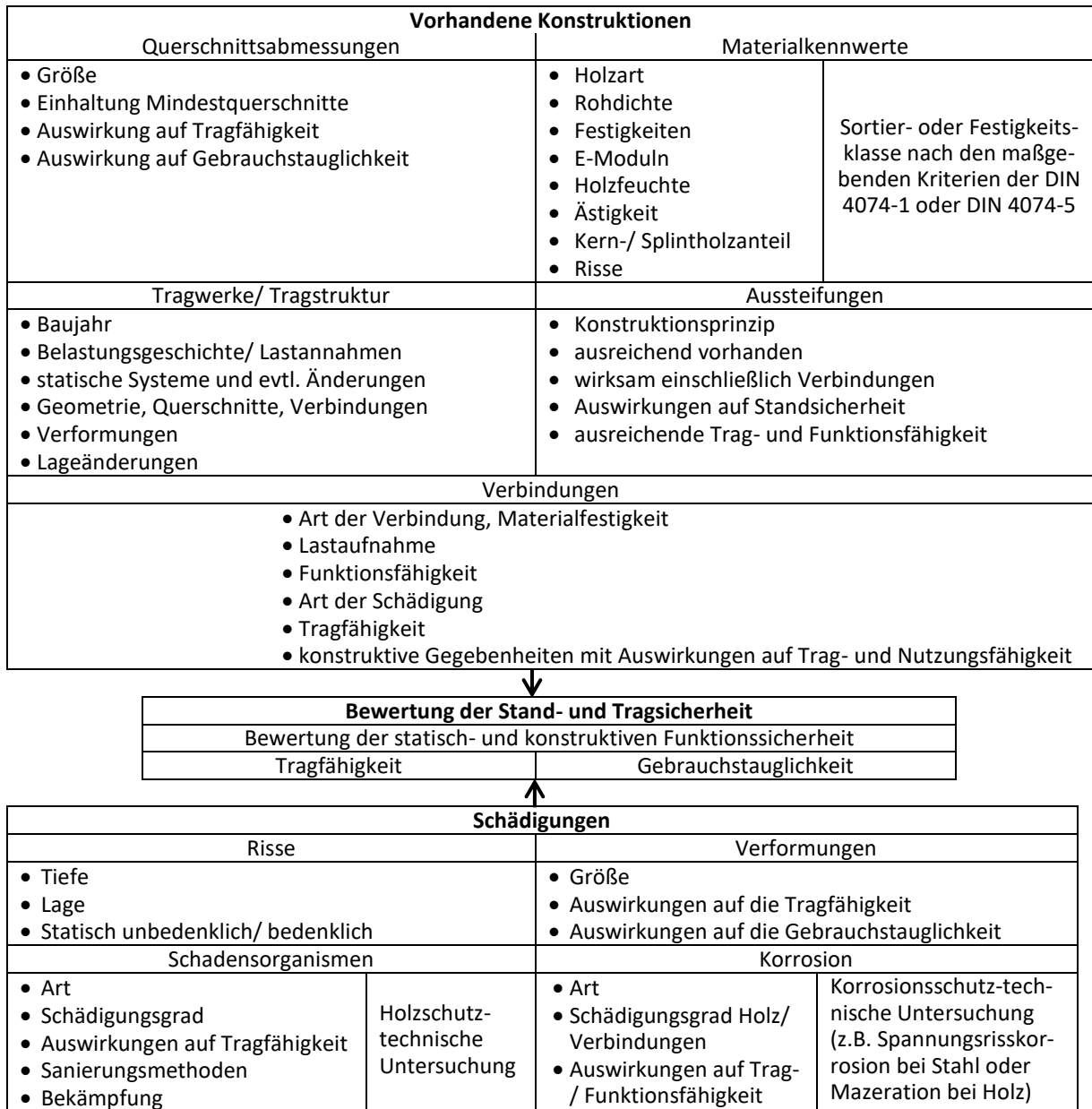
Laut §3, Abs. 1 der *Musterbauordnung (MBO)* sind „[bauliche] Anlagen [...] so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“ [4]. Nach §85a, Abs. 1 Satz 1 *MBO* [4] werden diese Anforderungen durch die *Technischen Baubestimmungen* konkretisiert, welche nach Satz 2 zu beachten sind. Das *Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt)* stellt eine Muster-Liste der bauaufsichtlich eingeführten *Technischen Baubestimmungen (Muster-Verfahrensordnung Technische Baubestimmungen, MVV TB)* bereit, welche kontinuierlich aktualisiert wird. Diese dient den Landesregierungen als Vorlage zur bauaufsichtlichen Einführung von Normen. Zum Sicherheitskonzept für die Bemessung und Nachweis von Holzkonstruktionen gelten die im jeweiligen Bundesland bauaufsichtlich eingeführten *Technischen Baubestimmungen*. Diese Regelwerke beziehen sich aktuell ausschließlich auf die Konstruktion und Bemessung von Neubauten.

Nach einem Bericht des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg beliefen sich die Baugenehmigungen für Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden in den Jahren 2008-2017 auf ca. 22-28% der Gesamtbaugenehmigungen [5]. Laut des *Bundes Deutscher Zimmerer* [6] sind sogar 60% der Projekte dem Bauen im Bestand zuzuordnen. Insgesamt sind derzeit insgesamt ca. 1,3 Mio. Kulturdenkmäler in Deutschland vorhanden [7]. Viele davon verfügen über historische Bausubstanz in Holzbauweise. Nutzung, Erhaltung und Verstärkung von Bestandskonstruktionen sind demnach zentrale Aufgaben im Bauwesen. Aus verschiedenen Gründen kann es zur Notwendigkeit der Überprüfung einer bestehenden Konstruktion kommen, siehe Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Gründe für eine Neubewertung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen in Anlehnung an *Návarová* [8] und *Cruz et al.* [9]

Kategorie	Spezifizierung
Zweifel bezüglich der Tragfähigkeit durch	Schädigungen; Bei Holz: chemisch, biologisch, mechanisch
	Starke Verformungen
	Risse
	Schlechte Qualität des Materials
	Mangelhafte Bemessung
Höhere Lasten durch	Aufbauten, Anbauten, Umbauten
	Nutzungsänderungen
	Energetische Modernisierungen
	Außergewöhnlich Belastungen
Eingriffe in die Tragstruktur durch	Änderung eines Bauteils/ der Konstruktion
Geforderte regelmäßige Überprüfung	z.B. wie in <i>VDI 6200:2010</i>
Verlängerung der geplanten Lebenszeit des Tragwerks	

Durch eine qualifizierte Bestandsaufnahme können Informationen gewonnen werden, die die Unsicherheiten in der Überprüfung der Tragfähigkeit einer Bestandskonstruktion verringern. Zudem ist sie Voraussetzung zum Ausschluss sicherheitsgefährdender Schädigungen. Um die Eigenschaften des Holzes im Bestand in der Berechnung berücksichtigen zu können, muss die Konstruktion nach den einzelnen Aspekten umfassend bewertet werden, siehe Abb. 2.1 aus *Lißner & Rug* [10].



**Abb. 2.1: Einzelaspekte für die Beurteilung der Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in Altbauten aus *Lißner & Rug* [10]**

Die folgende Darstellung nationaler und internationaler Normen kann sich aufgrund der bezeichneten Normungslücke nicht ausschließlich mit dem Holzbau beschäftigen. Fachübergreifende Regelwerke werden dargestellt, um den Normungsstand im Holzbau kritisch einzuordnen und Entwicklungspotential aufzuzeigen.

## 2.2 Richtlinien in Deutschland

### 2.2.1 DAfStb Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“ (2000)

Die Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“ aus dem Jahre 2000 [11] ermöglicht eine Anpassung von Teilsicherheitsbeiwerten für Betonbauwerke im Bestand. Die Werte dürfen angewendet werden, wenn die charakteristischen Werte der ständigen Einwirkungen und der Festigkeitswerte durch Untersuchungen bekannt sind. Dann kann  $\gamma_G = 1,15$  (ständige Einwirkung, Ursprungswert Grundkombination  $\gamma_G = 1,35$ ),  $\gamma_C = 1,40$  (Beton, Ursprungswert Grundkombination  $\gamma_C = 1,5$ ) und  $\gamma_S = 1,10$  (Betonstahl, Ursprungswert Grundkombination  $\gamma_S = 1,15$ ) angenommen werden [11]. Weitere Absenkungen sind ebenfalls möglich, diese muss im Einzelfall begründet werden.

### 2.2.2 Richtlinie ARGEBAU (2008)

Konstruktionen, die unter Anwendung früherer Baubestimmungen/ -genehmigungen errichtet wurden, genießen Bestandsschutz auch, wenn sich das betreffende Recht in der Zwischenzeit geändert hat (siehe *Lißner & Rug* [12]). Der Bestandsschutz bleibt bestehen, wenn sich die Nutzung nicht geändert hat, keine Schäden am Tragwerk auftreten und keine Eingriffe in die Tragkonstruktion stattfinden [12]. Bei Gefahr für Leben und Gesundheit kann dieser Grundsatz durch die Bauaufsichtsbehörde durchbrochen werden. Zudem dürfen nur Maßnahmen durchgeführt werden, die die Standsicherheit nicht gefährden. Die *Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU)* verdeutlicht in dem Hinweisblatt vom 07.04.2008, „dass unter Wahrung des baurechtlichen Bestandsschutzes nur solche Maßnahmen am Bestand durchgeführt werden dürfen, welche die ursprüngliche Standsicherheit der baulichen Anlage auch weiterhin nicht gefährden“ [13, S. 1].

In der Richtlinie der ARGEBAU heißt es: „Die Anwendung aktueller Technischer Baubestimmungen für die Bemessung und Ausführung beschränkt sich auf die unmittelbar von der Änderung berührten Teile von baulichen Anlagen. Die Aufnahme der weiter zu leitenden Lasten aus eigenständigen neuen Teilen von baulichen Anlagen (z.B. Anbau, Aufstockung) darf zunächst mit den ursprünglichen bautechnischen Vorschriften nachgewiesen werden. Ist die Lastaufnahme nur mit zusätzlichen Verstärkungen möglich, so sind diese mit den aktuellen Technischen Baubestimmungen nachzuweisen“ [13, S. 1-5]. Wenn bestehende Teile des Gebäudes von den Änderungen betroffen sind, ist zu prüfen, ob auch auf diese die aktuellen Technischen Baubestimmungen anzuwenden sind. Sind Verstärkungen und/ oder Instandsetzungen notwendig, sind diese nach den aktuellen Technischen Baubestimmungen nachzuweisen.

Die Resultate der Bestandsaufnahme sind nach zu dokumentieren. Wie dies zu erfolgen hat, ist nicht festgelegt. *Pasternak & Brettschneider* [14] schlagen eine Inspektionsrichtlinie abhängig von den Schadensfolgen vor und zeigen die Anwendung beispielhaft für die Inspektion des Tropical Island bei Berlin.

### 2.2.3 VDI 6200:2010

Die VDI-Richtlinie „*Standsicherheit von Bauwerken. Regelmäßige Überprüfung*“ [15] soll die Richtlinie der *ARGEBAU* [13] vertiefen und ergänzen. Nach der Richtlinie der *ARGEBAU* tragen Eigentümer oder Verfügungsberechtigte des Bauwerks die Pflicht zur regelmäßigen Instandhaltung, damit Leben, Gesundheit und natürliche Lebensgrundlagen nicht gefährdet werden. Die sich dadurch ergebenden Aufgaben sollen an qualifizierte Ingenieure übergeben werden. Als wichtigste Grundlage der regelmäßigen Überprüfung wird die Bauwerksdokumentation festgelegt und dazu auf das *DBV Merkblatt „Bauwerksbuch: Empfehlungen zur Sicherheit und Erhaltung von Gebäuden“* verwiesen. Die Richtlinie verweist auf die Schadensfolgeklasse CC und die Robustheitsklasse RC, wie sie in *DIN EN 1990:2010-12, Anhang B* [16] definiert sind. Anhand dieser Einstufung werden Zeitintervalle für die regelmäßige Überprüfung festgelegt, diese Festlegungen gelten für Neu- und Bestandsbauten (Tab. 2.2). Bei den ausgewiesenen Abschnitten handelt es sich um Abschnitte innerhalb der Richtlinie [15].

Tab. 2.2: Zeitintervalle für die regelmäßige Überprüfung (Anhaltswerte) aus *VDI 6200:2010* [15]

Schadensfolgeklasse nach <i>DIN EN 1990:2010-12 Anhang B</i>	Begehung gemäß Abschnitt 10.1.1	Inspektion gemäß Abschnitt 10.1.2	Eingehende Überprüfung gemäß Abschnitt 10.1.3
CC 3	1 bis 2 Jahre	2 bis 3 Jahre	6 bis 9 Jahre
CC 2	2 bis 3 Jahre	4 bis 5 Jahre	12 bis 15 Jahre
CC 1	3 bis 5 Jahre	Nach Erfordernis	

Bei der Erstprüfung müssen die erforderlichen Unterlagen gesichtet oder ggf. (wenn als notwendig bewertet) neu erstellt werden. Materialgüten und geltende Normen aus dem Errichtungszeitraum sind einzubeziehen. Zudem ist zu prüfen, ob Nutzungsänderungen mit Einfluss auf die Standsicherheit stattgefunden haben. Abnutzungserscheinungen und Stellen möglicher Materialermüdung sollen untersucht werden. Sind Baugrundverformungen nicht auszuschließen, so sind bei der Errichtung (Neubau) bzw. Erstüberprüfung (Bestandsbau) Messpunkte zu setzen und einzumessen. Dokumentationslisten für die Prüfung von Konstruktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Werkstoffe werden bereitgestellt. Ständige Lasten sollen durch Aufmaß genau bestimmt werden, veränderliche Lasten können ggf. durch Nutzungseinschränkungen verringert werden. Die regelmäßige Überprüfung erfolgt laut *VDI 6200* in drei Stufen (Begehung, Inspektion und eingehende Überprüfung), siehe Tab. 2.2. Details zu den Schritten werden in Tab. 2.3 zusammengefasst. An diese Bewertungsschritte können sich weitergehende Untersuchungen anschließen, die die Sicherheit des Bauwerks quantifizieren. Zudem sind Details zur Planung und Ausführung enthalten.



2. Bewertung bestehender Holzkonstruktionen – Stand der Normung und Forschung

Tab. 2.3: Übersicht zu den Stufen der Überprüfung aus VDI 6200:2010 [15]

Details zur Bewertung	Stufe		
	Begehung durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten	Inspektion durch eine fachkundige Person	Eingehende Überprüfung durch eine besonders fachkundige Person
Anforderungen an die Personen	-	Bauingenieure/Architekten, mindestens 5 Jahre Aufstellung von Standsicherheitsnachweisen, techn. Bauleitung & vergleichbare Tätigkeiten; davon mindestens 3 Jahre Aufstellung von Standsicherheitsnachweisen	Bauingenieure, mindestens 10 Jahre Aufstellung von Standsicherheitsnachweisen, techn. Bauleitung & vergleichbare Tätigkeiten; davon mindestens 5 Jahre Aufstellung von Standsicherheitsnachweisen & 1 Jahr techn. Bauleitung; Erfahrung mit vergleichbaren Konstruktionen: Massiv-, Stahl-, Holzbau
		Bauingenieure/ Architekten mit mindestens 3 Jahren Erfahrung mit vergleichbaren Konstruktionen	Prüfingenieure/ Prüfsachverständige für Standsicherheit für Massiv-, Stahl-, Holzbau Mitarbeiter von Prüfämtern, die bauaufsichtliche Prüfaufgaben im Bereich Standsicherheit wahrnehmen
Detailgrad der Bewertung	Besichtigung auf offensichtliche Mängel	Visuelle Überprüfung i.d.R. ohne techn. Hilfsmittel	Eingehende Überprüfung, ggf. mit technischen Hilfsmitteln, auch schwer zugänglicher Bereiche - Schwachstellenanalyse
Zusätzliches	Beachtung von Einflüssen, die die Standsicherheit zukünftig gefährden könnten	-	Bewertung der Relevanz von eventuell aufgedeckten Schwachstellen bzgl. der Standsicherheit - ggf. Sicherheitsanalyse
Dokumentation	Dokumentation von Mängeln/Schäden an tragenden Bauteilen	Dokumentation der Ergebnisse, notwendiger Maßnahmen im Bauwerksbuch	Dokumentation der Ergebnisse im Bauwerksbuch
Information des Eigentümers	Begehung durch Eigentümer selbst	Erforderliche Maßnahmen sind dem Eigentümer mitzuteilen	Information des Eigentümers bei unzureichender Restsicherheit
Weitere Informationen	Checkliste Anforderungen an diese Stufe in Anhang C der Richtlinie	Checkliste mit Mindestanforderungen in Anhang D der Richtlinie	-

### 2.2.4 Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (2011)

Die Bewertung des Bauwerkszustandes ist laut der Richtlinie [17] des *Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung* die Voraussetzung für die Nachrechnung bestehender Straßenbrücken. Dafür sind zunächst die verfügbaren Unterlagen zu prüfen (Ausführungs- und Bestandspläne, Unterlagen bereits erfolgter Nachrechnungen, Gutachten zu Untersuchungen, Ausführungsunterlagen von Instandsetzungsmaßnahmen). Die Bewertung des Bauwerkszustandes erfolgt nach *DIN 1076* („*Bauwerkprüfung*“), welche für Ingenieurbauwerke (z.B. Brücken, Tunnel, Lärmschutzbauwerke und weitere) gilt. In der Richtlinie findet eine Unterscheidung in vier Stufen der Nachweisführung statt:

- Stufe 1: Nachrechnung nach aktuellem Regelwerk,
- Stufe 2: Zusätzliche, ergänzende Regelungen der Richtlinie,
- Stufe 3: Einbeziehung der am Bauwerk ermittelten Messergebnisse,
- Stufe 4: Einbeziehung wissenschaftlicher Methoden der Nachweisführung [17, S. 11].

Für die Stufe 2 werden modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Betonbrücken ausgewiesen: ständige Einwirkungen  $\gamma_G = 1,2$ , Stützenabsenkung  $\gamma_{G,set} = 1,0$ , Betonstahl  $\gamma_S = 1,05$ , Spannstahl  $\gamma_S = 1,1$ .

### 2.2.5 DBV Merkblatt (2013)

Der *Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV)* veröffentlichte im Jahre 2013 ein Merkblatt zur Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten für Stahlbetonbauten [18]. Darin werden die wichtigsten Erkenntnisse der vorangegangenen Forschungen zusammengefasst. In diesem Merkblatt wird die qualifizierte Bestandsaufnahme in drei Schritte unterteilt:

#### 1. Sichtung vorhandener Unterlagen und Ortsbesichtigung

Die Stufe umfasst die Sammlung von Informationen bezüglich der Bauteilabmessungen, des statischen Systems und der Einwirkungen sowie zu möglichen Schwachstellen. Dadurch wird ein Überblick über das Tragwerk und seinen Zustand gewonnen. Auch die Nachbarbebauung soll in Augenschein genommen werden.

#### 2. Ermittlung der Geometrie und der Tragstruktur

Beim Vorliegen von Bestandsplänen sind diese auf Konsistenz mit dem realen Tragwerk zu überprüfen. Die Bewehrung sowie die Betonüberdeckung können mit zerstörungsfreien Methoden überprüft werden, für die Überprüfung der Bewehrungsdurchmesser werden Sondieröffnungen benötigt.

#### 3. Ermittlung des Zustandes der tragenden Bauteile

Nach DBV Merkblatt sollen verschiedene Untersuchungsverfahren je nach Untersuchungsziel und Anspruch kombiniert werden. Bauteilparameter wie Abmessungen, Querschnittswerte und Bewehrungsanordnung sind nur für die maßgebenden Bemessungsschnitte zu ermitteln. Die Werte müssen jedoch für das gesamte Tragwerk repräsentativ sein.

Das Merkblatt enthält modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für die Bewertung von Stahlbetonkonstruktionen im Bestand. Dabei wird keine Modifikation auf der Einwirkungsseite vorgenommen. Dies darf laut Aussage im Merkblatt bei Anwendung der ausgewiesenen Teilsicherheitsbeiwerte auch nicht erfolgen, da in der probabilistischen Optimierung die Sicherheitsbeiwerte als Eingangsgrößen der Iteration direkt berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Optimierung ebenso, siehe Kap. 7. Durch Modifikation der Sicherheitsbeiwerte können Tragfähigkeitsreserven von 10-20% nutzbar gemacht werden [18]. Voraussetzungen zur Anwendung der Werte sind:

- Das Bauwerk ist für die übliche Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgelegt,
- Das Tragwerk wird seit Inbetriebnahme mindestens 5 Jahre bestimmungsgemäß genutzt,
- Das Tragwerk ist in schadensfreiem Zustand,
- Anzusetzen sind Eigenlasten, vorwiegend ruhende Nutzlasten, Einzellasten, ggf. Wind- und Schneelasten,
- Die Lastverhältnisse liegen im Bereich  $1,0 \geq g_k / (g_k + q_k) \geq 0,5$ ,
- Die Bauteile lassen sich den Festigkeitsklassen C12/15 bis C50/60 zuordnen,
- Die Grenzabmaße nach *DIN EN 13670/ DIN 1045-3* werden eingehalten.

Die Werte nach Tab. 2.4 werden ausgewiesen (ständige Bemessungssituation). Die Hervorhebungen sind aus dem Merkblatt übernommen und sind die üblicherweise angenommenen Werte.

Tab. 2.4: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{C,mod}$  abhängig vom Variationskoeffizienten der Betondruckfestigkeit  $V_{R,C}$  und des Bewehrungsstahls  $V_{R,S}$  aus DBV Merkblatt 2013 [18]

Beton	$V_{R,C}$	$\gamma_{C,mod}$
Ständige und vorübergehende Bemessungssituation <sup>a)</sup>	$\leq 0,20$	1,20
	0,25	1,25
	<b>0,30</b>	<b>1,30</b> <sup>e)</sup>
	0,35	1,40 <sup>c), d)</sup>
	0,40	1,50 <sup>c), d)</sup>
Betonstahl	$V_{R,S}$	$\gamma_{C,mod}$
Ständige und vorübergehende Bemessungssituation <sup>a)</sup>	0,06	1,05
	0,08	1,10
	<b>0,10</b>	<b>1,10</b> <sup>e)</sup>

<sup>a)</sup> nicht für vertikale Bauteile der Gebäudeaussteifung

<sup>c)</sup> Erhöhung von  $\gamma_{C,mod}$  um:

20 % bei bewehrten Biegebauteilen für den Nachweis von  $V_{Rd,max}$

20 % bei unbewehrten Bauteilen für den Nachweis Biegung mit Längskraft

40 % bei unbewehrten Bauteilen für die Nachweise zentrischer Druck und für Querkraft nach 12.6.3  
DIN EN 1992-1-1:2011-01

<sup>d)</sup> für zentrisch gedrückte, nicht stabilitätsgefährdete Bauteile: Längsbewehrungsgrad  $\rho_l > 0,01$

<sup>e)</sup> Annahmen für Grundlagenermittlung und Entwurfsplanung ohne Bauteilprüfungen

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden

Diese Sicherheitsbeiwerte dürfen nicht für die Gebäudeaussteifung herangezogen werden, da sie teilweise auf einem im Stahlbetonbau großen Anteil ständiger Einwirkungen basieren, die in diesem Lastfall günstig wirken können [18]. Des Weiteren werden Regelungen zur Ermittlung des Bauwerkszustandes und der maßgebenden Bauteilparameter zusammengestellt. Dazu gehören Regelungen zur qualifizierten Bestandsaufnahme, zur Ermittlung von Bauteilparametern und Einwirkungen sowie zur Ermittlung von Widerstandsgrößen. Dabei werden ebenfalls Annahmen für eine probabilistischen Bemessung angegeben (beispielsweise Verteilungsfunktionen und Variationskoeffizienten) [18].

## 2.3 Nationale Normen in Europa

### 2.3.1 Schweizer Normenreihe SIA 269

#### Allgemeines

Die Arbeit an der Schweizer Normenreihe SIA 269 zum Umgang mit bestehenden Tragwerken begann Brühwiler [19] zufolge Ende des Jahres 2004. Die Anforderungen an Tragwerke ändert sich aufgrund sich verändernder Umgebungsbedingungen. Dazu zählen höhere Nutzlasten, außergewöhnliche Einwirkungen Wiederherstellungen und Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Tragwerken [20]. Die sinnvolle Anwendung der aktuell geltenden Normen auf Bestandsgebäude führte Brühwiler [19] zufolge häufig zu unangemessenen Maßnahmen. Unter anderem die ISO 13822 in ihrer Fassung aus dem Jahre 1999 diente als Grundlage für die Reihe SIA 269. Differenziert werden muss bei Bestandsbaunormen zwischen Normen, die sich auf das Bauwerk als Gesamtes beziehen, in der Schweiz SIA 469, und Normen, die sich auf das Tragwerk als Teil des Bauwerks im Bestand beziehen, in der Schweiz SIA 269 [20]. Hier wird auf die für diese Arbeit wichtigsten Teile eingegangen: SIA 269:2011 - Grundlagen, SIA 269/1:2011 - Einwirkungen, SIA 269/5:2011 – Holzbau.

### ***SIA 269:2011: „Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken“***

Die SIA 269 ist die grundlegende Norm zur Erhaltung von Tragwerken. Sie wird durch bauweisenspezifische Teile ergänzt. Wichtiger Bestandteil ist die Definition von Fachbegriffen für den Umgang mit Bestandsgebäuden. An dieser Stelle sollen drei zentrale Begriffe herausgegriffen werden: *Aktualisierung, Verhältnismäßigkeit von Erhaltungsmaßnahmen, Erhaltungswert.*

Die SIA 269:2011 definiert die *Aktualisierung* als „Prozess, um vorhandene Kenntnisse mit neuen Informationen zur ergänzen“ [21, S. 6]. Hier zeigt sich der große Vorteil der Nutzbarkeit von Informationen aus dem bestehenden Tragwerk. Mit dem Grundsatz der *Verhältnismäßigkeit von Erhaltungsmaßnahmen* wird die „Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen von Erhaltungsmaßnahmen mit dem Ziel des effizienten Mitteleinsatzes“ beschrieben [21, S. 7]. Der *Erhaltungswert* ist nach SIA 269/2011 der „materielle [...] und immaterielle [...] Wert eines Bauwerks gemäß Merkblatt SIA 2017“ [21, S. 6]. Nach Brühwiler [20] setzt sich der materielle Wert aus den Komponenten funktioneller Wert, Nutzungswert und Wert der Bausubstanz zusammen. Der kulturelle Wert besteht aus Situationswert, historisch-kulturellem Wert, ästhetischem Wert und eventuellem emotionalem Wert [20].

Von den enthaltenen Regelungen darf abgewichen werden, wenn Theorie oder Versuche dies ausreichend begründen. Mit dieser Bestandsbaunorm werden folgende Ziele verfolgt:

- Erfüllung der Anforderungen der Nutzer,
- Erfüllung gesetzlicher Anforderungen,
- Gewährleistung von Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit,
- Bewahrung des Erhaltungswertes,
- Ausschöpfung des Potentials des Bauwerks.

Zunächst müssen Erhaltungswert des Bauwerks und Restnutzungszeit bestimmt werden. Der Nachweis der Tragsicherheit von Bestandsgebäuden darf deterministisch oder probabilistisch erbracht werden. Dazu werden Einwirkungen, Baustoff-/ Baugrundeigenschaften, Tragwerksmodelle/ geometrische Größen und Tragwiderstände/ Verformungsvermögen für das bestehende Tragwerk aktualisiert. Für Widerstandsgrößen wird auf die entsprechenden speziellen Normen der Reihe SIA 269 [21] verwiesen. Nach SIA 269:2011 [21] werden neue Tragwerksteile nach Neubaunorm, Teile des bestehenden Tragwerks nach der Reihe SIA 269 nachgewiesen. Davon kann bei veränderlichen Einwirkungen abgewichen werden, da es sinnvoll sein kann, bestehende Tragwerksteile z.B. gegen erhöhte Nutzlasten nachzuweisen [20]. Ständige Einwirkungen hingegen werden immer nach der Normung für den Bestandsbau nachgewiesen [20]. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgt nach Abschnitt 3.3.1 der SIA 269 nicht rechnerisch, sondern über die Zustandserfassung mit Berücksichtigung der Erfahrung der Nutzer [21]. Zudem sollte im Bestand von „Überprüfungssituation“ und „Überprüfungswert“ anstelle von „Bemessungssituation“ und „Bemessungswert“ gesprochen werden, um Alt- und Neubau begrifflich deutlich voneinander zu unterscheiden [21] [22]. Diesem Vorschlag folgend wird in Kap. 7.2 dieser Arbeit ein „Überprüfungslevel“ für bestehende Konstruktionen eingeführt.

2. Bewertung bestehender Holzkonstruktionen – Stand der Normung und Forschung

Die Überprüfung von Bestandsgebäuden soll nach SIA 269:2011 [21] stufenweise vertiefend erfolgen. Sie teilt sich in die generelle und die detaillierte Überprüfung. Ersteres gilt für das gesamte Tragwerk und alle Bauteile, deren Versagen Folgen für Personen, Sachgüter und die Umwelt hätte. Eine detaillierte Überprüfung wird nötig, wenn einzelne Tragwerksteile der generellen Überprüfung nicht standhalten. Weiter werden die Tätigkeiten und Schritte der Zustandserfassung, Zustandsbeurteilung und Maßnahmenempfehlung beschrieben. Die Zustandserfassung bildet die Grundlage für Zustandsbeurteilung und Maßnahmenempfehlung. Der Ablauf wird in Tab. 2.5 nach SIA 269:2011 dargestellt.

Tab. 2.5: Schrittweise Verfahren bei der Überprüfung aus SIA 269:2011 Anhang A [21]

Generelle Überprüfung Ziff. 6.1.3*		Detaillierte Überprüfung Ziff. 6.1.4*	
<b>Grundlagen</b>		<b>Grundlagen</b>	
Studium der Bauwerksakten		Ergebnisse der generellen Überprüfung	
Aktualisierung Nutzungsvereinbarung	Ziff. 3 u 4*	Ergänzendes Studium der Bauwerksakten	
Aktualisierung Projektbasis	Ziff. 3 u 4*	Aktualisierung der Nutzungsvereinbarung	Ziff. 3 u 4*
		Aktualisierung Projektbasis	Ziff. 3 u 4*
<b>Zustandserfassung</b> Ziff. 6.2*		<b>Zustandserfassung</b> Ziff. 6.2*	
<ul style="list-style-type: none"> <li>visuelle Kontrollen</li> <li>einfache, i.d.R. zerstörungsfreie Untersuchungen</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>vertiefende Untersuchungen relevanter Teile</li> <li>messtechnische Untersuchungen</li> <li>Laborprüfungen</li> </ul>	
<b>Tragwerksanalyse und Nachweise</b> Ziff. 5*		<b>Tragwerksanalyse und Nachweise</b> Ziff. 5*	
überschlägige deterministische Nachweise	Ziff. 5.2*	deterministische Nachweise	Ziff. 5.2*
		probabilistische Nachweise	Ziff. 5.3*
<ul style="list-style-type: none"> <li>Beurteilung des Tragwerkskonzeptes</li> <li>Mechanismen und Art des möglichen Tragwerksversagens</li> <li>Erkennen maßgebender Bereiche des Tragwerks</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>i.d.R. nur maßgebende Teile eines Tragwerkes</li> <li>verfeinerte Tragwerksanalyse</li> <li>vertiefende Ermittlung von Einwirkungen und Auswirkungen</li> </ul>	
<b>Zustandsbeurteilung</b> Ziff. 6.3*		<b>Zustandsbeurteilung</b> Ziff. 6.3	
<ul style="list-style-type: none"> <li>quantitativ</li> <li>empirisch</li> <li>Prognose der Zustandsentwicklung</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>quantitativ</li> <li>empirisch</li> <li>Prognose der Zustandsentwicklung</li> </ul>	
<b>Maßnahmenempfehlung</b> Ziff. 4.6*		<b>Maßnahmenempfehlung</b> Ziff. 4.6*	
<ul style="list-style-type: none"> <li>detaillierte Überprüfung</li> <li>Überwachung und Instandhaltung</li> <li>sichernde Sofortmaßnahme</li> <li>Instandsetzung, Veränderung, Ersatz</li> <li>usw.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>weitere detaillierte Überprüfung</li> <li>Überwachung und Instandhaltung</li> <li>sichernde Sofortmaßnahme</li> <li>Instandsetzung, Veränderung, Ersatz</li> <li>usw.</li> </ul>	
* Verweis auf Ziffern innerhalb der Norm			

Anhang B und Anhang C enthalten Anforderungen an die Tragsicherheit (Zielzuverlässigkeitsniveaus) und Hinweise zur Berechnung der Überprüfungswerte. Nach Brühwiler [20] ist eine klare Aussage zur

Tragsicherheit bzw. zu erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen und eine Prognose der Zustandsentwicklung die wichtigsten Ergebnisse der Überprüfung. Nachweise werden in der Schweiz anhand des Erfüllungsgrades  $\eta$  erbracht, wobei der Quotient aus stabilisierenden Größen durch destabilisierenden Größen größer oder gleich eins sein soll [21].

Die Norm gibt abgeminderte Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen bei der semi-probabilistischen Berechnung von Bestandsgebäuden an (Tab. 2.6). Der Grenzzustand Typ 1 bezieht sich auf die Gesamtstabilität, Typ 2 auf den Widerstand des Tragwerks oder eines seiner Teile, Typ 3 auf den Tragwiderstand des Baugrundes [23]. Voraussetzung für die Anwendung der angepassten Teilsicherheitsbeiwerte ist die Aktualisierung der Lastwerte. Der Wert darf nach SIA 269:2011 [21] angewendet werden, wenn die Aktualisierung der Einwirkungen nach SIA 269/1:2011 [24] durchgeführt wird.

Tab. 2.6: Aktualisierte Lastbeiwerte für den Nachweis der Tragsicherheit aus SIA 269:2011 [21]

Einwirkungen	Lastbeiwert	Grenzzustand		
		Typ 1	Typ 2	Typ 3
Ständige Einwirkungen (inkl. Erdauflasten)				
- ungünstig wirkend	$\gamma_{G,sup,act}$	1,05 <sup>1)</sup>	1,20 <sup>1)</sup>	1,00
- günstig wirkend	$\gamma_{G,inf,act}$	0,95 <sup>1)</sup>	0,90 <sup>1)</sup>	1,00

<sup>1)</sup>  $G_{k,act}$  wird entweder mit  $\gamma_{G,sup,act}$  oder mit  $\gamma_{G,inf,act}$  multipliziert, je nachdem, ob die Gesamtwirkung günstig oder ungünstig ist.

### SIA 269/1: „Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen“

Teil 1 der SIA-Reihe SIA 269/1 enthält Regelungen zur Aktualisierung von Einwirkungen beim Bauen im Bestand. Dazu gehören die folgenden:

#### Eigenlasten und Auflasten

Zur Aktualisierung dieser Lasten sind die maßgebenden geometrischen Größen zu bestimmen. Die Methode zur Bestimmung dieser Größen wird nicht allgemein festgelegt, sondern abhängig vom benötigten Detaillierungsgrad gewählt. Die Eigenlasten neuer Tragwerksteile (Umbau, Erweiterung) sind nach Neubaunorm SIA 261 zu behandeln. Eigenlasten werden als Mittelwerte bestimmt, Auflasten ebenso. Die mögliche Entfernung von Auflasten muss auf ihre Auswirkungen hin (entstehende abhebende Lasten) untersucht werden. [24]

#### Schnee

Schneelasten dürfen beim Vorliegen von Messreihen in entsprechender Qualität und deren Auswertung aktualisiert werden. Außerdem können die Beiwerte (bzgl. Dachform, Expositionsbeiwerte, thermischer Beiwert) zur Ermittlung der charakteristischen Schneelast bei langjährigen objektspezifischen Informationen aktualisiert werden. Schneelasten dürfen reduziert werden, wenn entsprechende Sicherheitsmaßnahmen vorhanden sind [24].

#### Wind

Analog zur Schneelast darf zur Bestimmung der Windlast der Staudruck aktualisiert werden, wenn Messreihen in entsprechender Qualität und Auswertungen vorliegen. Druck- und Kraftbeiwerte zur Ermittlung der charakteristischen Werte dürfen mittels Windkanalversuchen aktualisiert werden. [24]

### Temperatur

Die charakteristischen Werte aus Temperaturänderungen dürfen aktualisiert werden, wenn Messreihen und deren Auswertung in angemessener Qualität und dokumentierte objektspezifische Informationen vorhanden sind. [24]

### Gebäudenutzung

Zunächst werden die Nutzungsklassen für bestehende Gebäude eingeschränkt (nur Kategorie A-D, sowie F und G). Die Nutzlasten dürfen durch Sicherheitsmaßnahmen begrenzt werden. Diese Einschränkungen müssen im Überwachungsplan und in den Nutzungsanweisungen eingeführt werden. [24]

### **SIA 269/5: „Erhaltung von Tragwerken – Holzbau“**

Die SIA 269/5 [25] enthält Regeln für Holzkonstruktionen im Bestand. In den Grundsätzen wird festgehalten, dass zwischen altem und neuem Holz kein Unterschied hinsichtlich Festigkeits- und Steifigkeits-eigenschaften vorhanden ist, sofern das Holz nicht geschädigt ist. Schädigungen sind beim Tragverhalten zu berücksichtigen. Bei der Analyse sind besonders folgende Punkte zu beachten [25]:

- mögliche Art und Richtung der Kraftübertragung bei Verbindungen,
- Nachgiebigkeit von Verbindungen,
- Exzentrizität bei Kraftübertragung und -weiterleitung,
- Einfluss von Bauvorgängen (Bau- und Belastungsgeschichte) und baulichen Veränderungen.

Wie bei Neuholz wird die Spannungs-Dehnungs-Beziehung als linear angenommen. Bei Druckbeanspruchung oder bei Stahlteilen darf elastisch-plastisches Verhalten unterstellt werden. Voraussetzungen sind ausreichende Verformungsfähigkeit und ausreichende Tragwerksreserven. [25]

Die Werte für Festigkeiten und Steifigkeiten dürfen durch visuelle Überprüfung festgestellt bzw. aus Korrelation der Werte untereinander abgeleitet werden. Vollholz darf in eine Festigkeitsklasse nach SIA 265 (Neubaunorm) eingeordnet werden. In der Berechnung sind die Festigkeits- und Steifigkeitswerte nach dieser Norm anzuwenden und gelten dann als aktualisierte Werte. Die Werte dürfen auch mit speziellen Hilfsmitteln bestimmt werden. Dazu wird auf Anhang C verwiesen, welcher Techniken zur Zustandserfassung bei Holzbauteilen enthält. [25]

*Fuhrmann* [26] betont, dass bei der Einordnung des Holzes in eine Festigkeitsklasse zur Aktualisierung der Festigkeitswerte sich nicht nur auf die Angaben in den Bauwerksakten gestützt werden sollte. Grund ist das häufige Vernachlässigen der visuellen Sortierung. Bezüglich der Festigkeitssortierung wurde nach *Fuhrmann* [26] um das Jahr 2011 zur *DIN 4074-1:2008-12* gewechselt. Zum Nachweis der Tragsicherheit sollen die geometrischen Abmessungen direkt am Tragwerk ermittelt und in Hinblick auf die Ausgleichsfeuchte, die sich in der Restnutzungsdauer einstellt, angepasst werden.

Nach SIA 269/5 [25] kann der Tragwerkswiderstand gemäß SIA 265 ermittelt werden. Nach *Fuhrmann* [26] beziehen sich die Festigkeits- und Steifigkeitswerte in dieser Norm auf Nennquerschnitte. Wenn

die Abmessungen also die festgelegten Toleranzen überschreiten, müssen sie direkt berücksichtigt werden und sind nicht wie in *SIA 164* implizit enthalten.

In *SIA 265* werden keine eigenständigen Werte für  $\gamma_M$  angegeben, sondern ein Verhältnis  $\gamma_M/\eta_M$ . Durch den Faktor  $\eta_M$  erfolgt die Umrechnung von der Kurzzeittragfähigkeit auf die Langzeittragfähigkeit [26, S. 105]. Da der Teilsicherheitsbeiwert von diesem Umrechnungsfaktor abhängig ist, fehlen nach *Fuhrmann* [26] für einen aktualisierten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,act}$  die entsprechenden Grundlagen. Ungünstige Abweichungen von charakteristischen Festigkeitswerten und stärkere Unschärfen im Sicherheitskonzept sollen durch eine Erhöhung des Widerstandsbeiwertes  $\gamma_M$  berücksichtigt werden. Dabei werden keine konkreten Zahlenwerte vorgegeben. Unsicherheiten, die aus einem beschränkten Kenntnisstand resultieren, sollen mittels Sensitivitätsanalyse einbezogen werden. [25]

Bei dem beschriebenen System mit Nutzung von Verhältniswerten anstelle von getrennten Faktoren für den Teilsicherheitsbeiwert und den Beiwert zur Berücksichtigung der Lastdauer ist eine Erhöhung (bzw. geringere Abminderung) der Festigkeitswerte bei maßgebenden Lasten mit kurzer Lasteinwirkungsdauer nicht vorgesehen. Aus diesem Grund darf nach *SIA 269/5* bei maßgebender Windlast mit dem Faktor  $\eta_t = 1,10$  der Festigkeitswert erhöht werden. [25] [26]

Der Einfluss der Feuchtigkeit wird mit dem Faktor  $\eta_w$  berücksichtigt. Dies wurde in der *SIA 269/5* [25] für den Bestandsbau nicht geändert, die Feuchtigkeit ist jedoch anhand der realen Bedingungen einzuschätzen [26]. Zudem werden Hinweise zur Kriechverformung gegeben. Das erste Drittel der Gesamtverformung sei nach ca. einer Woche, das zweite Drittel nach etwa einem Jahr und die gesamte Kriechverformung nach etwa 30 Jahren erreicht [25]. Spezielle Regelungen für zimmermannsmäßige Holzverbindungen wurden nach *Fuhrmann* aufgrund ihrer großen Vielfalt nicht in die *SIA 269/5* aufgenommen [26]. Ferner sind spezielle Hinweise zu einigen Bestandteilen der schrittweisen Beurteilung nach *SIA 269* (siehe Tab. 2.5) enthalten. Aspekte zur Beurteilung des Zustands des Tragwerks, der Bauteile und der Verbindungen sind:

- Holzart/ Holzprodukt, evtl. Aufbau,
- Querschnittsabmessungen und Bauteilgeometrie,
- Strukturstörungen des Holzes (Festigkeitsklasse),
- Verklebungen, Art des Klebstoffs, Zustand der Verklebung,
- Holzfeuchte,
- biologische Schädigungen,
- mechanische Schädigungen und Risse,
- Verformungen der Bauteile.

Erhaltungsmaßnahmen werden wie folgt geregelt:

- lokale Instandsetzung/ Verstärkung einzelner Bauteilbereiche bzw. einzelner Verbindungen,
- Instandsetzung, Verstärkung oder Ersatz eines ganzen Bauteils,
- Ergänzung des Tragwerks mit zusätzlichen Bauteilen oder Konstruktionen.



In Anhang C werden drei Kenntnisstände über das Holztragwerk definiert: beschränkt, normal, umfassend, welche nach Fuhrmann [26] eine praxisgerechte Zustandsbeurteilung ermöglicht. Wie im *JRC Report* [27] (siehe Kap. 2.4.6) sind auch in der *SIA 269/5* [25] Kenntnisstände sowie die Einteilung nach Geometrie, konstruktive Einzelheiten und Baustoffeigenschaften enthalten. Eine Anlehnung dieses Berichts an die *SIA 269* liegt somit nahe. Zusätzlich werden technische Hilfsmittel, wie beispielsweise Bohrwiderstandsmessung und Ultraschall-Laufzeitmessung beschrieben. Typische Schäden und Mängel werden zusammengestellt. Anhang D enthält Richtwerte zur Nutzungsdauer von Hölzern und Dauerhaftigkeitsklassen von verschiedenen Holzarten. [25]

### 2.3.2 Italienische Normen

#### UNI 11138:2004

In der italienischen Norm mit dem englischen Titel „*Cultural Heritage. Wooden Artefacts. Load bearing structures of buildings – Criteria for the preliminary evaluation, design and execution of works*“ [28] werden Anforderungen an die Bestandsaufnahme und das grundlegende Vorgehen beschrieben. Die Schritte der einleitenden (preliminary) Bestandsaufnahme sind in Tab. 2.7 mit ihren wichtigsten Bewertungsbestandteilen dargestellt.

Tab. 2.7: Schritte der Bestandsaufnahme aus *UNI 11138:2004* [28]

Schritt der Bestandsaufnahme	Bestandteile des Bewertungsschritts
<b>1. Historische Analyse</b>	- Historische Ereignisse des Gebäudes - Strukturelle Typologie und deren Entwicklung - Traumatische Ereignisse - Recherche historischer Dokumente - Datierung des Materials
<b>2. Charakterisierung des Materials</b>	- Verweis auf <i>UNI 11118</i> (Bestimmung der Holzart) & <i>UNI 11119</i> (Bewertung des Zustandes, Festigkeitssortierung) - Bei Anwendung indirekter Testmethoden sollen immer mehrere Methoden zum Einsatz kommen
<b>3. Geometrische Charakterisierung</b>	- Struktur als Ganzes und Verbindungen im Speziellen - Bei Verformungen ist darauf zu achten, ob sie aus dem Material oder den Lasten resultieren
<b>4. Charakterisierung der Schädigung</b>	- Interaktionen zwischen Schädigungen und Umweltbedingungen sind zu beachten (Stichwort Micro-Klima) - Schädigungen können aus Änderungen ständiger Lasten oder aus außergewöhnlichen Lasten resultieren, dies ist zu identifizieren
<b>5. Strukturelle Analyse</b>	- Die Analyse der statistischen Kondition und der vorhandenen Spannungen ist immer Pflicht - Inhalt: allg. statisches System, detailliertes System einzelner Einheiten (Dach, Decken), detaillierte Modelle einzelner Bauteile, detaillierte Modelle von Verbindungen
<b>6. Präsentation der Resultate</b>	- Katalog von zu präsentierender und zusätzlicher Resultate

Folgendes soll bei der Planung von Interventionsmaßnahmen berücksichtigt werden [28]:

- a) Beachtung des speziellen Ziels und der individuellen Notwendigkeit jeder Maßnahme in Relation der gefundenen Indikatoren (Tab. 2.7),
- b) Der Ort der Interventionsmaßnahme,
- c) Das zu verwendende Material,

- d) Die Anwendungsmethodik mit einer Beschreibung von benötigten technischen Hilfsmitteln,
- e) Eine erste Bewertung der Effektivität der Maßnahmen,
- f) Die Kontrollmaßnahmen während der Durchführung und am Ende der Interventionsmaßnahmen, sowie periodisch erfolgende Maßnahmen.

Beim Umgang mit bestehenden Konstruktionen, bei denen ein kulturelles Interesse besteht, kann eine Bewertung mit angepassten Sicherheitsfaktoren erfolgen. Eine mögliche Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Lasten wird hervorgehoben. Zudem werden Anforderungen an die Inhalte und die Durchführung des Interventionsprojektes und zur periodischen Inspektion festgehalten. [28]

### **UNI 11119:2004**

Die UNI 11119:2004 mit dem englischen Titel „*Cultural Heritage. Wooden artefacts. Load-bearing structures – On site inspections for the diagnosis of timber members*“ [29] definiert Ziele der Bestandsaufnahme wie folgt:

- a) Holzart oder -klassifizierung,
- b) Bestimmung der Holzfeuchtigkeit,
- c) Einteilung in eine biologische Risikoklasse nach UNI EN 3335-1 und UNI EN 3335-2,
- d) Bestimmung von Geometrie und Morphologie des Holzbauteils mit Bestimmung der Position und der Größe der wichtigsten Fraßgänge, Fäulnis und Schädigungen,
- e) Bestimmung von Position, Form und Größe der kritischen Bereiche,
- f) Festigkeitssortierung des Holzbauteils als Ganzes oder der kritischen Zonen.

Die drei Ausgangsanforderungen für die Bestandsaufnahme, welche sicherstellen sollen, dass die Daten der Bestandsaufnahme in angemessener Qualität und Quantität erhoben werden können, sind nach [29]: a) Zugänglichkeit, b) Sauberkeit, c) Ausleuchtung. Für die Festigkeitssortierung im Bestand werden angepasste Grenzwerte definiert. Diese werden in Kap. 5.1.2 dieser Arbeit beschrieben.

### **2.3.3 Österreichische Richtlinie ONR 24009:2013**

In der österreichische Richtlinie ONR 24009:2013 „*Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Hochbauten*“ [30] wird festgelegt, dass bei Veränderungen neue Tragwerksteile nach Neubaunorm und bestehende Tragwerksteile nach dieser ONR zu bemessen sind. Als „*Vertrauensgrundsatz*“ wird festgelegt, dass von einer Berücksichtigung der zum Errichtungszeitpunkt geltenden Normen und Richtlinien ausgegangen werden kann, wenn nichts Gegenteiliges bewiesen wird. Ist das Tragwerk also frei von Bauschäden und konstruktiven Mängeln, hat es sich bewährt. In der Bestandserhebung sind alle relevanten Informationen zu verwenden, dazu gehören auch die Erfahrungen der Nutzer. Bestandsgebäude können in verschiedene Klassen (Schadensfolge-, Versagensfolgeklasse, Bedeutungskategorie) eingeordnet werden, wie es auch für Neubauten nach EN 1990 bekannt ist.

Nach Absatz 4.5.1.3 der *ONR 24009:2013* [30] ist der Nachweis nach der zum Errichtungszeitpunkt gültigen Norm möglich [30]. Die bevorzugte Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit nach *ONR 24009:2013* [30] ist der Nachweis nach aktuellem Normenstand. Eine Reduktion der Zielzuverlässigkeit ist dabei nur für außergewöhnlich Einwirkungen und Erdbeben zulässig [30]. Die Bewertung des Tragwerks soll anhand der aktuellen geometrischen und statischen Bedingungen erfolgen. Es sind die wirklichen Nutzverhältnisse zu beachten. Ständige, klimatische und seismische Einwirkungen dürfen auf Grundlage neuerer Erkenntnisse spezifiziert werden. Die nachzuweisende Zuverlässigkeit der Bauwerke soll mindestens der in den aktuellen Regelwerken verankerten Sicherheit entsprechen. Mindestabmessungen, Mindestgüten von Werkstoffen und konstruktive Ausführungen die vom aktuellem Normenstand abweichen sind unbedenklich, wenn keine Schädigungen am Tragwerk festzustellen sind. Ein Tragwerk darf experimentell statisch oder dynamisch bewertet werden, wenn der rechnerische Tragfähigkeitsnachweis nicht erbracht werden kann.

Nach *ONR 24009:2013 Anhang A Abschnitt A.1* [30] dürfen die Teilsicherheitsbeiwerte für Beton und Stahl auf Widerstandsseite auf  $\gamma_{S,red1} = 1,05$  und  $\gamma_{C,red1} = 1,45$  abgemindert werden. Dabei sind die Festlegungen der *ÖNORM EN 1992-1-1* und die Festlegungen zum Stichprobenumfang nach *ONR 24009:2013 Abschnitt A.1* zu beachten.

Wenn an mindestens 30 Stellen eine Varianz der Druckfestigkeit des Betons von weniger als 10% nachgewiesen werden kann, darf der Wert  $\gamma_{C,red2} = 1,35$  verwendet werden, wenn die Vorgaben nach *ÖNORM EN 1992-1-1:2011 Abschnitt A.2.2 Satz (1) und Satz (2)* erfüllt sind. *ÖNORM EN 1992-1-1:2011 Abschnitt A.2.2(1)* legt fest, dass geometrische Daten verminderte Abweichungen aufweisen oder am fertigen Tragwerk aufgemessen werden, *Abschnitt A.2.2(2)* enthält die zitierte Festlegung zur Begrenzung der Varianz. Ist nur *Satz (2)* des Abschnitts erfüllt, darf  $\gamma_{C,red3} = 1,40$  verwendet werden.

### **2.3.4 Niederländische Norm NEN 8700:2011-12**

In den Niederlanden gibt es seit dem Jahre 2009 eine Norm für bestehende Konstruktionen. Die neueste Auflage stammt aus dem Jahre 2011. Enthalten sind Regeln zur Zuverlässigkeitstheorie, zur Bestandsaufnahme und zur Anpassung des Sicherheitskonzeptes für bestehende Tragwerke. Die Norm enthält Mindestwerte und Zielwerte für die Zuverlässigkeit.

Nach *Scholten & Vrouwenvelder* [31] liegen der Norm drei grundlegende Annahmen zugrunde: 1) Das Sicherheitskonzept für den Neubau kann auch im Bestandsbau angewendet werden; 2) Aufgrund ökonomischer Überlegungen kann die Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau reduziert werden; 3) Basierend auf verringerten Referenzperioden können veränderliche Lasten reduziert werden.

Für die Aktualisierung von Lasten wird nach *Stauder* [27] auf die *NEN 8701:2011* verwiesen, wobei diese in der Regel ebenso wie für neue Tragwerke anzunehmen ist. Für die Aktualisierung von Wider-

standsgrößen wird auf *EN 1990:2010-12 Anhang D* verwiesen [27]. Es sind angepasste Zielzuverlässigkeiten für den Bestandsbau und abgesenkte Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite für Bauten im Bestand vorgegeben, siehe Tab. 2.8. Es wird in Ziel- und Mindestzuverlässigkeit unterschieden. Auch die angepassten Teilsicherheitsbeiwerte werden abhängig von der Schadensfolgeklasse angegeben. Es wird eine Unterscheidung in Wind als dominante und nicht dominante Einwirkung getroffen.

Nach *Scholten & Vrouwenvelder* [31] wird die *NEN 8700:2020-12* in Verbindung mit den Eurocodes angewendet und diese um die Belange des Bestandsbaus erweitern. Dementsprechend handelt es sich bei den ausgewiesenen Schadensfolgeklassen um jene, welche in *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B* [16] definiert werden.

Tab. 2.8: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite aus *NEN 8700:2011-12*, zitiert nach *Vrouwenvelder & Scholten* [32]

Faktoren Zielzuverlässigkeit (Reparatur)				
Versagensfolge- klasse nach <i>EN 1990:2010-12</i>	Lastkombination			
	Ständige Lasten		Führende veränderliche Last außer Wind	Veränderliche Last, Wind repräsentierend
	Ungünstig wirkend	Günstig wirkend		
	$\gamma_{Gj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}$	$\gamma_{Q,1}$	$\gamma_{Q,1}$
CC 1a/b	1,15	0,90	1,10	1,20
<b>CC2</b>	<b>1,30</b>	<b>0,90</b>	<b>1,30</b>	<b>1,40</b>
CC3	1,40	0,90	1,50	1,60
	$\xi \cdot \gamma_{Gj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}$	$\gamma_{Q,1}$	$\gamma_{Q,1}$
CC 1a/b	1,05	0,90	1,10	1,20
<b>CC2</b>	1,15	0,90	1,30	1,40
CC3	1,25	0,90	1,50	1,60
Faktoren Mindestzuverlässigkeit				
Versagensfolge- klasse nach <i>EN 1990:2010-12</i>	Lastkombination			
	Ständige Lasten		Führende veränderliche Last außer Wind	Veränderliche Last, Wind repräsentierend
	Ungünstig wirkend	Günstig wirkend		
	$\gamma_{Gj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}$	$\gamma_{Q,1}$	$\gamma_{Q,1}$
CC 1a/b	1,10	0,90	1,05	1,10
<b>CC2</b>	<b>1,20</b>	<b>0,90</b>	<b>1,15</b>	<b>1,30</b>
CC3	1,30	0,90	1,30	1,50
	$\xi \cdot \gamma_{Gj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}$	$\gamma_{Q,1}$	$\gamma_{Q,1}$
CC 1a/b	1,00	0,90	1,05	1,10
<b>CC2</b>	1,10	0,90	1,15	1,30
CC3	1,20	0,90	1,30	1,50

Tab. 2.9: Mindestwerte für den Zuverlässigkeitsindex aus *NEN 8700:2010-12*, zitiert nach *Scholten & Vrouwenvelder* [31]

Minimumwerte für den Zielzuverlässigkeitsindex (Reparatur)			
Versagensfolgeklasse nach EN 1990:2010-12	Minimale Referenzperiode	$\beta$	
		Wind nicht dominant	Wind dominant
CC 3	15 Jahre <sup>b</sup>	3,8	3,3 <sup>a</sup>
<b>CC 2</b>	<b>15 Jahre<sup>b</sup></b>	<b>3,3</b>	<b>2,5<sup>a</sup></b>
CC 1	15 Jahre	2,8	1,8

<sup>a</sup> Hier wird das untere Limit durch Personensicherheit gesetzt.

<sup>b</sup> Normalerweise wird die verbleibende Standzeit und damit eine Referenzperiode von 30 Jahren empfohlen.

Minimum Werte für die Mindestzuverlässigkeit			
Versagensfolgeklasse nach EN 1990:2010-12	Minimale Referenzperiode	$\beta$	
		Wind nicht dominant	Wind dominant
CC 3	15 Jahre	3,3 <sup>a</sup>	3,3 <sup>a</sup>
<b>CC 2</b>	<b>15 Jahre</b>	<b>2,5<sup>a</sup></b>	<b>2,5<sup>a</sup></b>
CC 1b <sup>b</sup>	15 Jahre	1,8	1,1 <sup>a</sup>
CC 1a <sup>b</sup>	1 Jahr	1,8	0,8

<sup>a</sup> Hier wird das untere Limit durch Personensicherheit gesetzt.

<sup>b</sup> Unterscheidung zwischen Klasse 1a (Verlust menschlichen Lebens außer Frage) und 1b (gering)

## 2.4 Internationale Normen, Richtlinien & pränormative Arbeit zur Bewertung von (Holz)Konstruktionen im Bestand

### 2.4.1 Grundlegendes zur Entwicklung von Normen

Zur Bewertung der Tragfähigkeit von Bestandskonstruktionen ist eine Normung zu entwickeln, die das Vorgehen standardisiert und damit haftungsrechtliche Sicherheit schafft. Nach *Turkstra* [33] sind folgende generelle Anforderungen an eine Norm zu beachten:

- Anwendung von Verfahren, die eine konsistente Bestimmung der Sicherheit zulassen
- Bereitstellung eines gut definierten Formates zur Nutzung für Entscheidungen
- Reduzierbarkeit auf nötige Vereinfachungen

Dies gilt analog für Normen für den Bestandsbau. *Holický & Diamantidis* [34] fassen Anforderungen an eine zu entwickelnde Bestandsbaunorm nach den Forderungen des *JCSS* wie folgt zusammen:

- *Anwendbarkeit* auf den typischen Bewertungsfall
- *Kompatibilität* mit der Normung für neue Konstruktionen
- *Flexibilität* durch Einbeziehbarkeit in situ gewonnener Informationen
- *Einfachheit der Nutzung* zur guten Handhabbarkeit für Ingenieure

Nach *Steiger & Köhler* [35] sollte eine Bestandsbaunorm so strukturiert sein, dass die Anwendung des Wissens aus der Neubemessung von Tragwerken bei der Nachrechnung bestehender Tragwerke anwendbar ist. Eine Anpassung der Berechnung auf die speziellen Gegebenheiten im Bestand soll durch Bauzustandserfassung erfolgen. Die Formalisierung der qualitativen Einschätzung des Tragwerks ist von Bedeutung zur Verbesserung der Bewertung. Verwiesen sei hier auch auf die Ausführungen von *Melchers* [36] zur Berücksichtigung eines zufriedenstellenden Tragwerksverhaltens durch Bayes'sche Aktualisierung des Materialwiderstands mittels Belastungstests.

*Ellingwood* [37] benennt folgende Minimalanforderungen an ein genormtes Vorgehen zur Standsicherheitsbewertung bestehender Konstruktionen:

- Festlegung genereller Anforderungen für ein akzeptables Komponenten- und Systemtragverhalten basierend auf der Zuverlässigkeitstheorie
- Anforderungen an die Datensammlung durch Inspektion und zerstörungsfreier Prüfung
- Empfehlung statistischer Methoden zur Analyse und Synthese gewonnener Daten
- Eine zuverlässigkeitsbasierte, aber deterministisch handhabbare Bewertung der Tragfähigkeit, Belastungstests oder andere Maßnahmen zur Sicherherstellung ausreichender Sicherheit

### 2.4.2 JCSS/RILEM Report “Probabilistic Assessment of Existing Structures” (2001)

In dem Bericht des *Joint Committee on Structural Safety (JCSS)* [38], wird ein dreiphasiger Prozess der qualifizierten Bestandsaufnahme beschrieben. Das Schema ist bereits bei *Schneider & Schlatter* [39] zitiert nach *SIA 562:1964*, enthalten. Nach *Schneider & Schlatter* (1995) ist die Aktualisierung der Informationen wichtiger Bestandteil der Phase II.

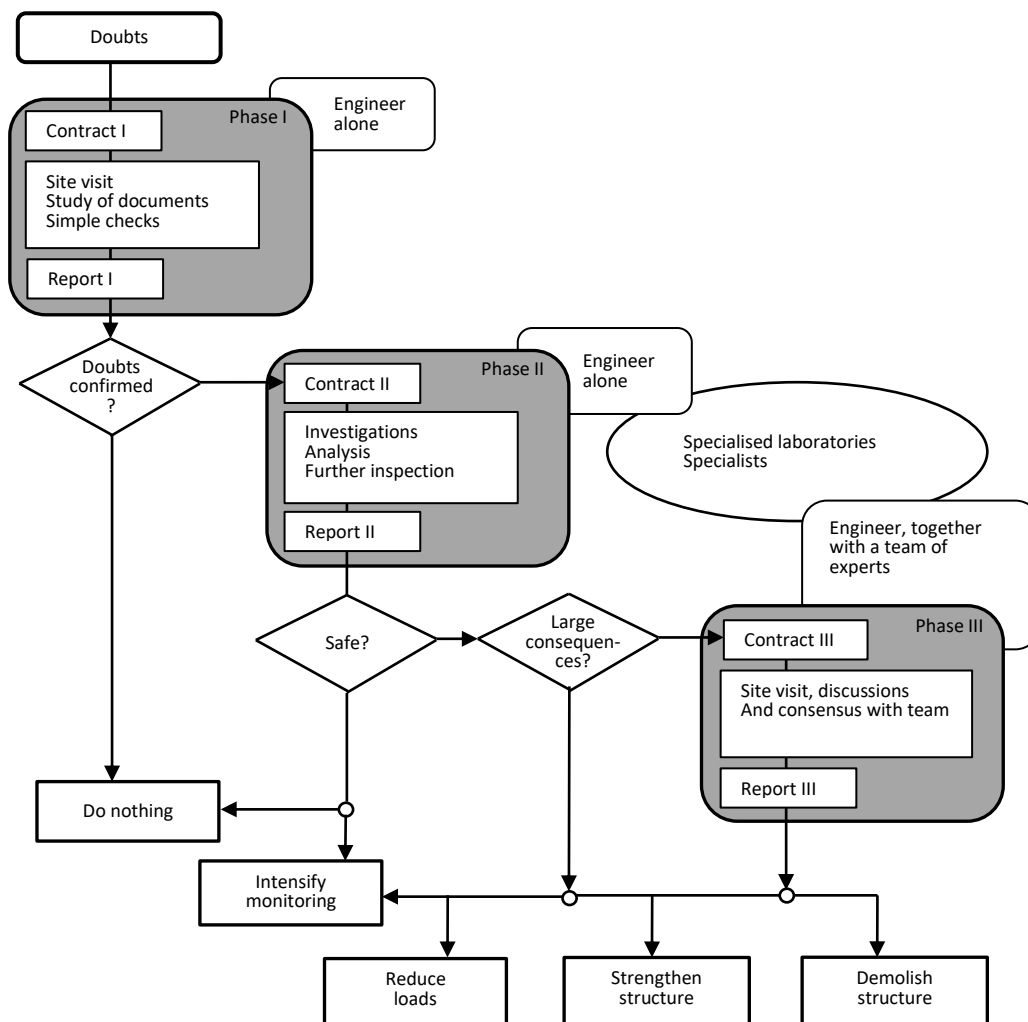


Abb. 2.2: Illustration des Dreiphasenansatzes aus *Diamantidis* [38] und *Schneider & Schlatter* [39]

Der Eigentümer eines Bauwerks ist für dessen Sicherheit verantwortlich. Sollten sich Zweifel bezüglich der Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit ergeben, sollte ein erfahrener Ingenieur hinzugezogen werden. Dieser ist verantwortlich für die Beurteilung des Bauwerks und für die Empfehlung von Maßnahmen. Die endgültige Entscheidung bezüglich dieser Maßnahmen obliegt dem Eigentümer. [38]

### 2.4.3 ISO 13822:2010

Die ISO 13822 „Bases for design of structures – Assessment of existing structures“ [40] gibt Regelungen zur Bestandsaufnahme bei bestehenden Konstruktionen vor. Sie basiert auf den Prinzipien der Zuverlässigkeitsanalyse und beruht auf ISO 2394 [41]. Die Ziele der Bewertung sind das Erreichen eines angemessenen Sicherheitsniveaus, die weitere Erfüllung der entsprechenden Funktion, sowie spezieller Anforderungen. Die Norm gibt den generellen Rahmen und Schritte der Bestandsaufnahme vor.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme sollen Informationen über Einwirkungen und Umgebungseinflüsse, Materialeigenschaften, Eigenschaften der Konstruktionen und die Dimensionen gewonnen werden. Die wichtigsten Punkte für die Analyse betreffen nach ISO 13822:2010 [40] die Einwirkungen, die Materialeigenschaften und die Eigenschaften des Baugrundes, die Dimensionen der Konstruktion und die Bodengeometrie, sowie die Modellunsicherheiten. Die Bewertung einer bestehenden Konstruktion darf auf Grundlage des Tragwerksverhaltens in der Vergangenheit erfolgen.

Konstruktionen dürfen als sicher gegen planmäßige Einwirkungen bewertet werden, wenn:

- eine sorgfältige Begutachtung keinen Beweis für signifikante Beschädigungen, Überlastung oder Schädigungen zeigt,
- das strukturelle System inkl. kritische Details und deren Kraftweiterleitung überprüft wird,
- die Konstruktion über eine ausreichend lange Zeit ein befriedigendes Tragverhalten gegenüber Umwelteinflüssen und Nutzung gezeigt hat,
- die vorhergesagte Tragfähigkeitsabnahme unter Berücksichtigung der aktuellen Tragfähigkeit und geplante Instandhaltungsmaßnahmen ausreichende Dauerhaftigkeit sicherstellt,
- keine Änderungen vorgenommen wurden, die so lange wirken, dass sie die Einwirkungen auf das Tragwerk signifikant erhöhen oder seine Dauerhaftigkeit herabsetzen und keine Änderungen dieser Art geplant sind.

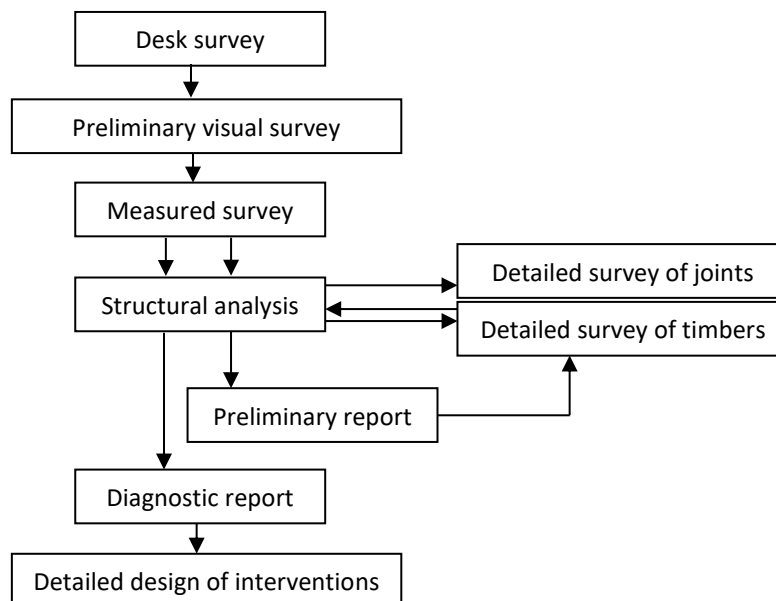
### 2.4.4 Fédération internationale du béton (Fib) bulletin no. 80 (2016)

Die Bekanntmachung mit dem Titel „Partial factor methods for existing concrete structures“ [42] beschäftigt sich mit angepassten Nachweisformaten für die Bewertung bestehender Konstruktionen in Stahlbetonbauweise. Als Methoden zur Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte werden die *Design Value Method (DVM)* und die *Adjusted Partial Safety Factor Method (APFM)* beschrieben. Erstere beinhaltet die Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten mit festen Sensitivitätsfaktoren und festgelegten Zielzuverlässigkeitsindices. Letztere beschreibt eine Anpassung der Sicherheitsbeiwerte unter Zugrundelegung vordefinierte Werte für die Teilsicherheitsbeiwerte. Die Methoden werden in Kap. 7.3 dieser Arbeit angewendet.

### 2.4.5 DIN EN 17121:2019-10

Die DIN EN 17121:2019-10 „Erhaltung des kulturellen Erbes – Historische Holzkonstruktionen – Leitlinien für die Bewertung vor Ort“ [43], erarbeitet durch den CEN/TC 346, ist die erste Norm zur Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand. Die Arbeitsergebnisse der COST Action IE0601 („Wood Science for Conservation of Cultural Heritage“), sowie der FP1101 („Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures“) dienten als Grundlage zur Erarbeitung der EN 17121 im CEN/TC346 [44]. Im Rahmen der Cost Action IE0601 wurde ein Bericht [9] veröffentlicht, die Hintergrundinformationen zur Norm enthält. Der Fokus der Norm liegt auf denkmalgeschützten Konstruktionen, die generellen Prinzipien sind jedoch auf auch andere Konstruktionen in Holzbauweise anwendbar. Zudem schließt der Anwendungsbereich Bauteile aus Holz in historischen Konstruktionen ein [9]. Eine Anwendung auf Holzwerkstoffe und Brettschichtholz, sowie auf Bauten in Blockbauweise und leichte Ständerkonstruktionen wird ausgeschlossen [43].

Die Bewertung wird, wie auch in SIA 269, in eine vorläufige und eine detaillierte Überprüfung unterteilt. Der Prozess der Bestandsaufnahme wird mit Abb. 2.3 nach Cruz et al. [9] beschrieben. Die Grafik ist nicht Teil der DIN EN 17121, gibt aber den beschriebenen Ablauf der Bestandsaufnahme graphisch wieder.



**Abb. 2.3: Benötigte Schritte für die Bestandsaufnahme und die Planung von Interventionsmaßnahmen bei historischen Holzkonstruktionen aus Cruz et al. [9]**

In [9] wird betont, dass das Vorgehen zwar einen linearen Prozess vermuten lässt, dass jedoch häufig ein iteratives Vorgehen nötig ist. Außerdem ist dieses immer als ganzheitlicher Prozess zu verstehen. Als Gründe für eine vorläufige Bewertung werden Laständerungen, Schäden durch Insekten, Fäule oder andere Ursachen wie Brand, mechanische Beschädigungen/ übermäßige Belastungen, maßgebliche Eingriffe in die Tragkonstruktion in der Lebensdauer und die Sicherstellung des ausreichenden Widerstands gegen extreme klimatische oder seismische Ereignisse genannt (siehe Absatz 4.1.1 der DIN



*EN 17121:2019-10* [43]). Der letztgenannte Punkt wurde dabei im Vergleich zum Hintergrundartikel [9] ergänzt. Voraussetzungen für die Bestandsaufnahme sind (siehe *DIN EN 17121:2019-10 Absatz 4.1.4* [43]) Sicherheit, Zugänglichkeit, Ausleuchtung, Sauberkeit, wie auch in *UNI 11119:2004* [29].

Der Artikel [9] unterstreicht die Unterscheidung zwischen Bestandskonstruktionen und Konstruktionen des kulturellen Erbes in der Bewertung. Zwar seien die Techniken der Bestandsaufnahme grundlegend dieselben, der kulturelle Wert denkmalgeschützter Konstruktionen rechtfertige möglicherweise jedoch den Einsatz größerer Aufwendungen. Interventionen sollten auf ein Minimum beschränkt und Verstärkungsmaßnahmen bei Konstruktionen mit kulturhistorischem Wert ein letztes Mittel sein. Nach *DIN EN 17121:2019-10 Absatz 4.6* [43] dürfen in der strukturellen Analyse die Lastkombinationen nach *EN 1990* gebildet werden. Bei Reduktion von Unsicherheiten dürfen andere Einwirkungskombinationen gebildet werden. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung eines geeigneten Sicherheitsniveaus. Die Norm greift damit in den Anwendungsbereich der *DIN EN 19909:2010-12* [16] ein. Bei Annahme der *DIN CEN/TS 177440:2020-10* [45] (siehe Kap. 2.4.6) und bautechnischer Einführung wäre die Normenreihe um eine Unternorm für den Bestandsbau erweitert.

Nach der vorläufigen Untersuchung schließt sich eine Messuntersuchung an, welche mindestens die Anordnung und Vermaßung der tragenden Bauteile und Verbindungen umfasst. Die Bestandsaufnahme sollte zerstörungsfrei sein. Ausnahme dazu sind kleine Testkörper zur Bestimmung der Holzart und biologischer Schädigungen. Diese Probennahmen sollten sich nicht auf das Tragverhalten und auch nicht auf andere Eigenschaften (z. B. historisch oder ästhetisch) auswirken. Zerstörungsfreie Prüfungen sind als zusätzliche Mittel zur Festigkeitsbewertung zugelassen.

Eine Festigkeitssortierung der verbauten Hölzer in situ ist notwendig, um die Bauteile nach *DIN EN 1995-1-1* bewerten zu können [43]. Die dafür geltenden Grundsätze entstammen nach [9] der *UNI 11119:2004* (siehe auch Kap. 2.3.2 dieser Arbeit.). Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung und Bewertung von Holzverbindungen, siehe *DIN EN 17121:2019-10 Absatz 5.7.1* [43].

Die Bewertung von Verbindungen, die im Artikeln [9] ein eigenständiger Hauptteil war, wurde in *DIN EN 17121:2019-10* [43] in den Absatz der detaillierten Überprüfung inkludiert. In *Anhang A* der *DIN EN 17121:2019-10* [43] werden Werkzeuge zur zerstörungsfreien Holzprüfung beschrieben.

#### **2.4.6 Technical Specification DIN CEN/TS 17440:2020-10 und Vorarbeiten**

Die Entwicklung der *TS 17440:2020* erfolgte in mehreren Schritten. Zur Darstellung dieser Entwicklung wird zunächst auf den *JRC Science and Policy Report 2015*, anschließend auf den 2<sup>nd</sup> *Code Draft "Assessment of Existing Structures"* und schließlich auf die *FprCEN/TS 17440:2020* eingegangen.

## ***CEN/TC/250 WG2 – JRC Science and Policy Report (2015)***

Der Bericht des Joint Research Centre "New European Technical Rules for the Assessment and Retrofitting of Existing Structures" [27] bildet eine Zusammenfassung aktueller Regelungen zum Bestandsbau der CEN Mitgliedsländer und schafft einen ersten Rahmen für eine zukünftige europäische Normung für Konstruktionen im Bestand. Ausgearbeitet wurde der Bericht im Rahmen von Arbeiten des CEN TC250/WG2. Im ersten Teil („Policy Framework“) werden die aktuellen Anforderungen an das Bauwesen und die damit einhergehende verstärkte internationale Vernetzung, auch im Bereich Bauen im Bestand, beschrieben. Der zweite Teil („Existing National Regulations and Standards in Europe“) widmet sich dem aktuellen Stand der Normung der einzelnen Mitgliedsländer zum Bauen im Bestand. Die Studie im Teil 2 des Berichts zeigt, dass nur in wenigen Mitgliedsländern konkrete Vorschriften zum Bestandsbau vorhanden sind. In Ländern mit erhöhter seismischer Aktivität sind spezielle Regelungen vorhanden. Beispielhaft sei Spanien benannt, das nach Aussage im Bericht eine Anpassung des Berechnungskonzeptes für Bestandsbauten plant. Demnach ist geplant, die Teilsicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten, vom Verhältnis charakteristischer Wert/Mittelwert und davon, ob die betrachtete Variable dominant oder nicht dominant wirkt, anzugeben. Der Teilsicherheitsbeiwert soll in einen Faktor für das Modell und einen für die Basisvariable (Einwirkung, Widerstand) unterteilt werden. Nach EN 1990:2010-12 ist dies zwar generell vorgesehen, aus Gründen der Vereinfachung erfolgt jedoch eine Zusammenfassung zu einem Faktor. Der Ausweis des Modellfaktors soll abhängig von der betrachteten Schnittkraft erfolgen.

Der dritte Teil des Berichtes unterbreitet Vorschläge für eine einheitliche Normung für das Bauen im Bestand. Drei grundlegende Ziele der Bewertung und Instandsetzung von bestehenden Tragwerken werden definiert:

- *Sicherheitsniveau*, welches angemessene Sicherheit für den Nutzer und dritte Parteien gewährleistet und mit den Anforderungen der Prinzipien der Eurocodes vereinbar ist,
- Weiterhin gegebene *Leistungsfähigkeit*, die die Nutzbarkeit spezieller Konstruktionen (Krankenhäuser, Kommunikationsgebäude, wichtige Brücken) auch unter Erdbeben und anderen vorhersehbaren Risiken gewährleistet,
- *Gebrauchstauglichkeit*, wie vom Auftraggeber gefordert (Erscheinung, Komfort, Funktionalität).

Diese Kriterien sollen auf dem akzeptierten Risiko für Personen und ökonomischen Kriterien inkl. Umweltaspekten basieren. In einigen Fällen sollten auch kulturelle und soziale Aspekte einbezogen werden. Die Bestandsaufnahme wird als Entscheidungsprozess verstanden, der alle Zweifel hinsichtlich dem Tragverhalten ausräumen und über die effektivsten Interventionsmaßnahmen entscheiden soll. Dabei sollen die Kosten der gesamten Lebenszeit der Konstruktion berücksichtigt werden. Das Vorgehen der Bestandsaufnahme aus dem Bericht wird in Abb. 2.4 dargestellt.

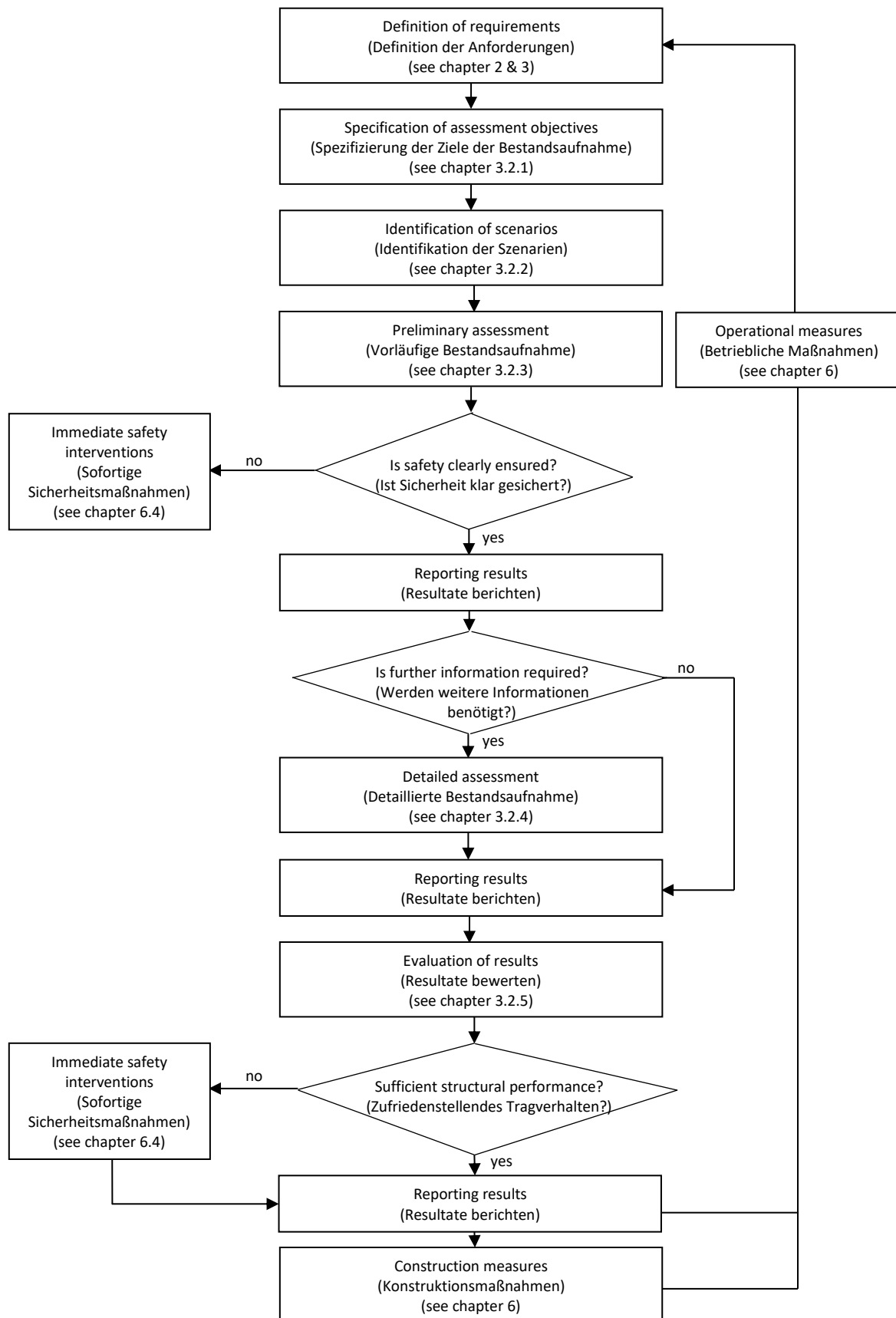


Abb. 2.4: Generic procedure of assessment and retrofitting of existing structures aus JRC Science and Policy Report [27] (Kapitelverweise beziehen sich auf Kapitel im zitierten Bericht)

Im Anhang B des Berichtes wird vertiefend auf Wissenslevel zu bestehenden Konstruktionen eingegangen. Details dazu enthält Tab. 2.10

Tab. 2.10: Wissenslevel (*Knowledge Level - KL*) bei bestehenden Konstruktionen aus *JRC Science and Policy Report 2015* [27]

Information bezüglich	Wissenslevel		
	KL1 – Limitiert	KL2 – Normal	KL3 – Umfassend
<b>Geometrie</b>	Komplette visuelle Prüfung vor Ort	Komplette visuelle Prüfung vor Ort	Erschöpfende visuelle Prüfung vor Ort
	<u>Oder</u> allgemeine Zeichnungen & ausreichende Begutachtung vor Ort	<u>Oder</u> allg. Zeichnungen inkl. Modifikationen & bessere visuellen Prüfung vor Ort (Unterschiede zw. Zeichnungen & der Konstruktion: evtl. präzise Ergänzung v. Dimensionen)	<u>Oder</u> erschöpfende Zeichnungen wie gebaut, komplettiert mit einer ausreichenden Begutachtung vor Ort (bei Abweichungen zw. Zeichnungen & Konstruktion: Inspektion der kritischsten Elemente um die Korrektheit der Zeichnungen sicherzustellen)
<b>Detaillierung</b>	Simulierte Bemessung mit Bestimmung der kritischen Elemente	Erhöhte Inspektion in situ	Erschöpfende Inspektion in situ
		<u>Oder</u> detaillierte Konstruktionszeichnungen (in diesem Fall evtl. limitierte Untersuchung der kritischen Punkte in situ zur Verifizierung der Unterlagen)	<u>Oder</u> erschöpfende Zeichnungen wie gebaut, in diesem Fall Inspektion der kritischsten Elemente
<b>Material</b>	Wenn kein Testbericht vorliegt sorgfältige Schätzung in Übereinstimmung mit der Normung für Bestandsgebäude, vor Ort Tests der kritischsten Komponenten	Komplette Prüfung vor Ort	Erschöpfende Prüfung
		<u>Oder</u> Spezifizierung der Bemessung der bestehenden Konstruktion (evtl. zusätzlich limitierte Untersuchungen in situ)	<u>Oder</u> durch Konstruktions-testbericht kombiniert mit limitierter Prüfung in situ

Für die Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten müssen Kenntnisse über die charakteristischen Werte vorliegen. Diese dürfen, wenn die Unsicherheiten gering sind oder eine Aktualisierung aus in situ gewonnenen Daten nicht möglich ist, aus den Konstruktionsunterlagen bestimmt werden. Sonst sollen die Werte durch Aktualisierung der Information bestimmt werden. Da die Anzahl der Tests in der Regel schon aus ökonomischen Gründen limitiert ist, sollen Vorinformationen einbezogen werden, um ein aktualisiertes Modell zu erhalten. Zudem wird darauf hingewiesen, dass der *Nationale Anhang* Empfehlungen für angepasste Teilsicherheitsbeiwerte abhängig vom Wissenslevel ausgeben sollte [27].

Im Report wird festgehalten, dass zerstörungsfreie Testmethoden nur in Kombination mit zerstörenden Methoden durchgeführt werden sollten und zerstörungsfreie Methoden an zerstörenden Methoden kalibriert werden müssen. Es sind zudem ggf. Übertragungsfaktoren von den Testergebnissen zur Abbildung des repräsentativen Materialverhaltens anzuwenden. Der Bericht legt fest, dass in der Regel eine Lognormalverteilung mit einem Konfidenzniveau von  $P = 1 - \alpha = 75\%$  angemessen ist. Zudem wird darauf hingewiesen, dass spezielle Regelungen zu Bestandsgebäuden die materialspezifischen Eurocodes *EN 1991* bis *EN 1997* und *EN 1999* in Zukunft ergänzen werden [27].

Als Interventionsmaßnahmen bei nicht zufriedenstellendem Ergebnis der strukturellen Analyse werden folgende Punkte zusammengetragen:

2. Bewertung bestehender Holzkonstruktionen – Stand der Normung und Forschung

- Nutzungseinschränkung und Einschränkung der verbleibenden Nutzungszeit,
- Begrenzung der Nutzlasten,
- Monitoring des Tragverhaltens,
- Permanentes oder periodisches Monitoring des Nutzungsverhaltens,
- Vergleich der im Monitoring ermittelten Werte mit den Grenzwerten,
- Installation von automatischer Warnungs- und Sicherheitstechnik,
- Vorbereitung von Notfallmaßnahmen,
- Entwurf von Notfallanordnungen,
- Einführung von Evakuierungsplänen.

Des Weiteren sind Hinweise zur probabilistischen Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten enthalten. Ebenso sind abgeminderte Zielzuverlässigkeiten für den Bestand und abgeleitete modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte enthalten [27]. Die Sensitivitätsfaktoren sind mit  $\alpha_E = -0,7$  und  $\alpha_R = 0,8$  identisch mit den in *DIN EN 1990:2010-12* [16] angegebenen Werten. Der Variationskoeffizient für das Material wird mit  $V_m = 0,05$  angegeben, für die ständige Einwirkung mit  $V_g = 0,05$ . Die Werte erscheinen gering. Für die veränderliche Last wurde die Schneelast als Beispiel mit  $T_0 = 1a$  und  $T_{ref} = 50a$  gewählt [27]. Das Verhältnis zwischen Mittelwert und charakteristischem Wert beträgt  $\mu_{q,t0}/q_k = 0,4$  ( $T_{ref} = 1 J.$ ), der Variationskoeffizient  $V_{q,t0} = 0,5$ . Die Indizes der ausgewiesenen Teilsicherheitsbeiwerte weisen darauf hin, dass keine Modellunsicherheit enthalten ist. Der Indizes „fav“ steht für günstig wirkende Last. Es fällt auf, dass die angesetzte Zuverlässigkeit den Mindestwerten der *NEN 8700:2011-12* entsprechen.

Tab. 2.11: Teilsicherheitsbeiwerte für Materialwiderstand aus *JRC Science and Policy Report* [27]

Consequence class <sup>1</sup>	$\beta$		$\gamma_m$	
	wn	wd	wn	wd
0	1,8	0,8	0,99	0,95
1	1,8	1,1	0,99	0,96
2	2,5	2,5	1,02	1,02
3	3,3	3,3	1,05	1,05

<sup>1</sup>Nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B*

Note: wn – wind not dominant; wd – wind dominant

Tab. 2.12: Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Last aus *JRC Science and Policy Report* [27]

Consequence class <sup>1</sup>	$\beta$		$\gamma_{g,fav}$		$\gamma_{g,unfav}$	
	wn	wd	wn	wd	wn	wd
0	1,8	0,8	0,97	0,99	1,06	1,03
1	1,8	1,1	0,97	0,98	1,06	1,04
2	2,5	2,5	0,96	0,96	1,09	1,09
3	3,3	3,3	0,95	0,95	1,12	1,12

<sup>1</sup>Nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B*

Note: wn – wind not dominant; wd – wind dominant

Tab. 2.13: Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Last ( $T_{ref} = 50 J.$ ) aus *JRC Science and Policy Report* [27]

5	$\beta$		$\gamma_q$	
	wn	wd	wn	wd
0	1,8	0,8	1,25	1,01
1	1,8	1,1	1,25	1,03
2	2,5	2,5	1,40	1,11
3	3,3	3,3	1,61	1,16

<sup>1</sup>Nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B*

Note: wn – wind not dominant; wd – wind dominant

## ***CEN/TC205 WG2 – “Assessment of Existing Structures” 2<sup>nd</sup> Code Draft***

Laut dem Normenentwurf [46] kann die Zielzuverlässigkeit basierend auf Sicherheitsaspekten und ökonomischen Aspekten gewählt werden, die Prinzipien der *ISO 2394* sollen angewendet werden. Des Weiteren werden Bezüge zur *ISO 13822* [40] hergestellt. Die Bemessung soll nach *EN 1990*, ggf. mit aktualisierten Variablen, erfolgen. Die Korrektheit vorliegender Informationen kann im Normalfall durch visuelle Inspektion und einfache Mittel sichergestellt werden. Vorhandene Unterlagen dürfen verwendet werden, Maße sollten durch einzelnen Probemessungen abgesichert werden. Hinweise zur Aktualisierung verschiedener Lasttypen werden gegeben. Der Umfang der nötigen Materialinspektion hängt nach Aussage im Dokument von der Bestandsaufnahmestufe und dem Einfluss des Materials auf die Tragfähigkeit ab. Unterschiede zwischen altem und aktuellem Sicherheitskonzept sollen berücksichtigt werden. Charakteristische Werte sollen anhand von Informationen in situ bestimmt und mit den statistischen Methoden von *EN 1990* einbezogen werden. Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen dürfen durch nationale Regelungen bestimmt, Teilsicherheitsbeiwerte auf der Materialseite durch die materialspezifischen Normen bestimmt werden.

Probabilistische Methoden sollen angewendet werden, wenn die semi-probabilistische Methode und die Aktualisierung der charakteristischen Werte aus Messungen und Vorinformationen bereits durchgeführt wurde und probabilistische Methoden von den nationalen Behörden akzeptiert wurde. Eine Beurteilung aufgrund des Tragverhaltens in der Vergangenheit kann erfolgen, wenn die quantitative Analyse keine sinnhaften Resultate erbrachte und es durch die nationalen Behörden akzeptiert wurde. *Anhang A* enthält das beschriebene Flussdiagramm zu Bestandsbewertung (Abb. 2.4), *Anhang B* Informationen zum Bayesian Updating. In *Anhang C* wird auf Zuverlässigkeit und Teilsicherheitsbeiwerte eingegangen. Unter anderem wird festgehalten, dass die Zielzuverlässigkeit für Bestandsbauwerke aufgrund erhöhter relativer Kosten der Sicherheitsmaßnahmen geringer sein kann, als für Neubauten. Des Weiteren kann der Bezugszeitraum der Bewertung kürzer als die erwartete Restnutzungsdauer sein (C.3.2 Anm. 1 & 2). In *Anhang D* heißt es, dass bei Denkmälern ggf. eine geringere Zuverlässigkeit akzeptiert werden können, da es sonst zu unverhältnismäßigen Maßnahmen kommen kann.

## ***Technische Spezifikation DIN CEN/TS 17440:2020-10***

### ***„Bewertung und Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken“***

Im Januar 2020 wurde der Normentwurf in die *Technical Specification FprCEN/TS 17440:2020* [47] überführt. Diese kann laut Anwendungsbereich ergänzend oder zusätzlich zu *DIN EN 1990* verwendet werden. Im Oktober 2020 wurde die *TS* als *Technische Spezifikation DIN CEN/TS 17440:2020-10* [45] durch das DIN eingeführt. Die *DIN CEN/TS 17440:2020* [45] unterscheidet grundsätzlich zwei Bewertungsverfahren: die Bewertung mittels Berechnung und die Bewertung basierend auf der Leistung in der Vergangenheit. Bei einer Kombination aus neuen und zu erhaltenden Tragwerksteilen sollen die

neuen Tragwerksteile nach *EN 1990* bemessen werden, die zu erhaltenden Bauteile nach der *TS*. Ein gegebenenfalls kulturhistorischer Wert der Konstruktion soll gesondert berücksichtigt werden.

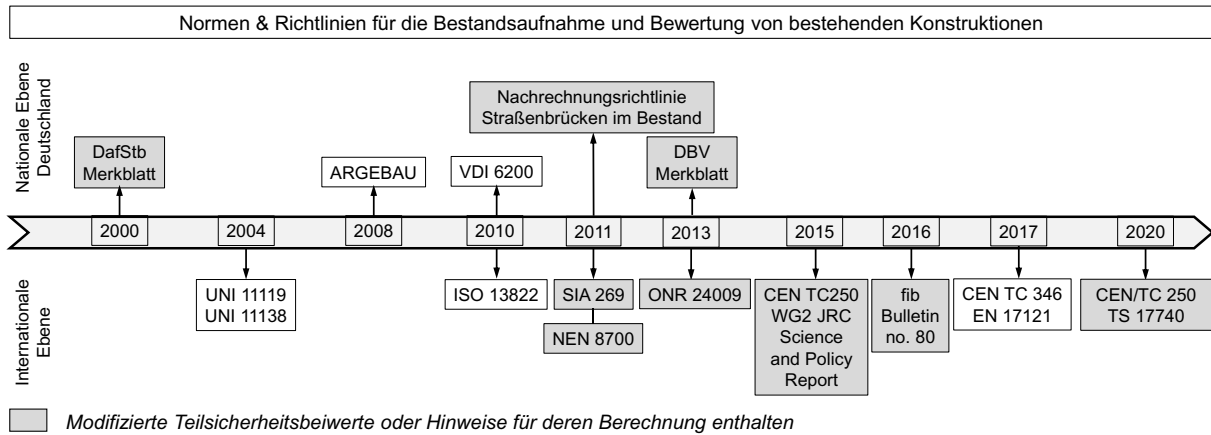
Der Bewertungsprozess soll stufenweise und schrittweise vertiefend erfolgen. Er wird in *Anhang A* dargestellt und ist an den Ablauf in Abb. 2.4 angelehnt. Der Bewertungsprozess teilt sich, wie auch in *SIA 269*, in eine vorangehende und eine detaillierte Bewertung. Zentral ist die Forderung nach der Definition von Bewertungszielen, die unter anderem die einzubeziehenden Maßnahmen, Bewertungssituationen, Grenzzustände und annehmbare Risiken berücksichtigen. Weiter wird festgeschrieben, dass eine Bestandsaufnahme durchgeführt werden muss, um die für „die Zuverlässigkeit des Tragwerks maßgeblichen Aspekte zu aktualisieren“ ([45], Absatz 5.5.2(1), S. 18). Es handelt sich um die zwingende Formulierung („muss“). Der Fokus der Bestandsaufnahme liegt auf den die Tragfähigkeit bestimmenden Bauteile. Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme sollen unter Zuhilfenahme statistischer Methoden bewertet werden. Die Variablen dürfen basierend auf Vorinformationen aktualisiert werden. Diese sind nach Absatz 7.1(2) die ursprünglichen Bemessungsvorschriften, Vorschriften und Normen aus der Zeit der Errichtung, sowie Daten der Hersteller und Literatur zu den verbauten Produkten. Basierend auf Vorinformationen dürfen die Basisvariablen nach Absatz 7.1(4) aktualisiert werden. Die Probennahme am Tragwerk sollte auf für die Bewertung signifikante Variablen und repräsentative Stellen konzentriert werden. Auf ein „statistisch signifikante und repräsentative Basis“ ist zu achten [Absatz 7.1(6), S. 24]. Ständige Lasten müssen auf den geometrischen Daten und den Werkstoffwichten basieren. Nutzlasten dürfen nach *DIN EN 1991-1-1* angenommen werden. Schneelasten dürfen reduziert werden, wenn Maßnahmen zur Reduktion der Last über die Restnutzungsdauer ergriffen werden. Windlasten dürfen basierend auf aktualisierten ortsspezifischen Daten gewonnen werden. Zudem muss die Tragfähigkeitsbewertung auf „realistischen Werkstoff- oder Produkteigenschaften des tatsächlichen Tragwerks basieren“ [Absatz 7.4.1.1(1), S. 28]. Verschlechterungen müssen berücksichtigt werden. Die Werte dürfen konservativ auf den in der ursprünglichen Bemessung festgelegten Eigenschaften, auf der Dokumentation während der Bauarbeiten oder aus Prüfungen am Tragwerk basierend angenommen werden.

Grenzzustände sind nach *DIN EN 1990* zu prüfen. Es darf eine Bewertung mit Teilsicherheitsbeiwerten, das Verfahren mit Beurteilungswerten, probabilistische Verfahren oder Risikobewertungsverfahren zur Anwendung kommen, siehe Absatz 9.2(1). Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Im Verfahren mit Beurteilungswerten darf der Nachweis über die Bestimmung der Bemessungswerte (ohne Teilsicherheitsbeiwerte) erfolgen. Die inhaltliche Aufteilung der Anhänge ist analog dem 2<sup>nd</sup> *Code Draft* verblieben.

Die *TS 17440:2020* [45] schafft ein Rahmenwerk zur Bewertung von Tragwerken im Bestand, unabhängig von der Bauweise, das die Prinzipien und das Vorgehen der Bestandsbewertung festhält, sowie Gestaltungsfreiräume für die nationalen Gremien offen lässt.

## 2.5 Zusammenfassung und Untersuchungsbedarf

Vor allem in den letzten zehn Jahren wurden vermehrt Richtlinien und Regelwerke zur Überprüfung von Bestandskonstruktionen erarbeitet, wie Abb. 2.5 aus [48] verdeutlicht.



**Abb. 2.5: Ausgewählte Regelwerke zum Bauen im Bestand – chronologische Darstellung, überarbeitet aus Loebjinski, Linke, Rug & Pasternak [48]**

In Tab. 2.14 werden die in diesem Kapitel beschriebenen Dokumente kurz zusammengefasst, sowie kurz die Forschungsarbeit einiger richtungweisenden Institutionen erfasst.

**Tab. 2.14: Nationale und internationale Normen und Richtlinien zur Bewertung von Bestandstragwerken**

Nationale Dokumente: Normen & Regelungen		
Deutschland	Richtlinie ARGEBAU 2008 [13]	- Alte Bauteile dürfen bei Änderungen nach alten Normen nachgewiesen werden, neue Bauteile nach neuen Vorschriften
	DBV Merkblatt 2013 [18]	- Bewertung von Stahlbetonkonstruktionen im Bestand - modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Festigkeitswerte
Schweiz	SIA 269:2011 [21]	- Normenreihe mit materialspezifischen Teilen zur Bewertung von Konstruktionen im Bestand - Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Einwirkungen
Österreich	ONR 24009:2013 [30]	- Bewertung von Konstruktionen im Bestand - Neukalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten gestattet
Italien	UNI 11119:2004 [29]	- Bewertung von bestehenden Konstruktionen aus Holz
	UNI 11138:2004 [28]	- Keine Anpassung der rechnerischen Bewertung
Niederlande	NEN 8700:2015	- Bewertung von Konstruktionen im Bestand - Angepasstes Ziel- und Mindestzuverlässigkeitsniveau, angepasste Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite
Internationale Dokumente: Normen, Regelungen & prä-normative Arbeit		
	ISO 13822:2010 [40]	- Bewertung von Konstruktionen im Bestand
	CEN/TC250 WG2	- Ziel-/ Mindestzuverlässigkeit für Bestandskonstruktionen
	JRC Science and Policy Report 2015 [27]	- Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für definierte Parameter
	Fédération internationale du béton (Fib) bulletin 80 2016 [42]	- Methoden zur Aktualisierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Stahlbetonkonstruktionen im Bestand
	DIN EN 17121:2019-12 [43] (CEN/TC 346)	- Erste Norm zur Bewertung bestehender Holzkonstruktionen - Fokus auf denkmalgeschützte Konstruktionen
	DIN CEN/TS 17440:2020-10, Assessment of Existing Structures [45]	- Allgemeines zu Überprüfung, Bewertung und Aktualisierung - Bewertungsschritte, Ebenen der quantitativen Bewertung
<i>Die Übersicht stellt eine Zusammenfassung der betrachteten Dokumente ohne Anspruch auf Vollständigkeit dar</i>		

Tab. 2.15 stellt angepasste Teilsicherheitsbeiwerte für das Bauen im Bestand nach den dargestellten Normen und Regelwerken zusammen. Es werden die Werte, die der Schadensfolgeklasse CC 2 bzw.



2. Bewertung bestehender Holzkonstruktionen – Stand der Normung und Forschung

Zuverlässigkeitsklasse RC 2 (nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B*) entsprechen, ausgewiesen. Die meisten Regelwerke auf nationaler und internationaler Ebene empfehlen eine Abminderung des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Einwirkungen. Der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen wird in manchen Regelwerken angepasst. International ist u.a. im *JRC Science and Policy Report* [27] ein Vorschlag zu finden. Für die Materialseite sind in Deutschland einige Regelwerke zum Stahlbetonbau vorhanden (in der Tabelle durch Schattierung hervorgehoben).

Tab. 2.15: Vergleich modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für Bestandsbauten aus *Loebjinski, Rug & Pasternak* [49]

Norm/ Regelwerk	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_M$
<i>DAfStb</i> (2000) [11]	1,15	-	Beton: 1,40 Stahl: 1,10
<i>Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung</i> (2011) [17]	1,20	-	Betonstahl: 1,05 Spannstahl: 1,10
<i>SIA 269:2011</i> [21]	1,20	-	-
<i>NEN 8700:2011-12</i> <sup>1</sup> [50]	1,30 (Rekonstruktion)  1,20 (Minimumlevel)	Führend, außer Wind 1,30 (Rekonstruktion) 1,15 (Minimumlevel)  Wind 1,40 (Rekonstruktion) 1,30 (Minimumlevel)	-
<i>ONR 24009:2013</i> [30]	-	-	Beton: 1,45 Stahl: 1,05  Beton: 1,40 <sup>1</sup> Beton: 1,35 <sup>1,2</sup> (1) Varianz Druckfestigkeit an min. 30 Stellen < 10% (2) vermin. geom. Abweichungen bzw. geom. Daten am Tragwerk ermittelt
<i>DBV Merkblatt</i> (2013) [18]	-	-	Beton: $V_{R,c}$ $\gamma_{c,mod}$ ≤0,20    1,20 0,25    1,25 0,30    1,30 0,35    1,40 0,40    1,50 Stahl: $V_{R,s}$ $\gamma_{c,mod}$ 0,06    1,05 0,08    1,10 0,10    1,10
<i>Joint Research Centre: Science and Policy Report</i> (2015) [27]	1,09	1,40 Führend (Schnee) 1,11 Begleitend (Schnee)	1,02

Anm.:  $V_{R,c}$  – Variationskoeffizient der Betondruckfestigkeit,  $V_{R,s}$  – Variationskoeffizient der Stahlfestigkeit

Für den Bestandsbau mit Holz sind derzeit keine angepassten Teilsicherheitsbeiwerte in der Literatur vorhanden. Auch für die Einwirkungsseite können die angepassten Werte derzeit nur materialabhängig verwendet werden. Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind deshalb Untersuchungen zu Anpassungsmöglichkeiten der Teilsicherheitsbeiwerte für das Bauen im Bestand mit Holz. In den folgenden Kapiteln wird dazu zunächst auf Grundlagen des Bemessungskonzeptes und zur Modellierung von Einwirkung und Widerstand eingegangen. Anschließend wird das Optimierungspotential bei Anwendung der geltenden Bemessungsvorschriften untersucht, sowie Anpassungsvorschläge unterbreitet.

## 3. Das Bemessungskonzept mit Grenzzuständen – Sicherheitstheoretische Grundlagen

### 3.1 Einführung – Die Tragwerkszuverlässigkeit als Maß für die Sicherheit der Bauwerke

Im Jahre 1926 schlug *Dr.-Ing. Max Mayer* [51] vor, das geltende Konzept der zulässigen Spannungen durch das Konzept mit Grenzzuständen zu ersetzen. Die weitere Umsetzung des Konzeptes und die Aufnahme in die Normung zur Bemessung von Konstruktionen fand in Deutschland erst Jahrzehnte später, statt. Ein Problem für die Umsetzung wahrscheinlichkeitstheoretischer Verfahren war nach *Schneider & Schlatter* [39] vor allem der Mangel an entsprechender Computertechnologie, der bis in die 70er Jahre vorhanden war. Auch in einem Bericht der *Deutschen Bauakademie* von 1969 [52] wurde dem probabilistischen Konzept in Hinblick auf die Entwicklung der Computertechnik großes Potential beigemessen. Die *Methode der zweiten Momente* stellte sich später als zu ungenau heraus, die *Monte Carlo Methode* dagegen brachte nach *Rackwitz* [53] zu viel numerischen Aufwand mit sich. Aus diesem Grund mussten Näherungslösungen (*FORM*, *SORM*) entwickelt werden.

Die Einführung eines Bemessungskonzeptes mit Grenzzuständen wurde indes in verschiedenen Bereichen weiter vorangetrieben. So wurde nach *Ellingwood* [54] im Jahre 1969 in Amerika durch das *American Iron and Steel Institute* und das *American Institute of Steel Construction* die Forschung zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes mittels Grenzzuständen von Stahlbauten vorangetrieben. Das Konzept wurde auch in Deutschland und osteuropäischen Ländern schon zu dieser Zeit thematisiert, wie die Veröffentlichung „*Sicherheit der Baukonstruktionen*“ von *Murzewski* [55] aus dem Jahre 1974 zeigt. Die Teilsicherheitsbeiwerte waren  $\gamma_{M,Stahl} = 1,15$  und  $\gamma_{M,Beton} = 1,5$ . Die vielfältigen Aktivitäten, auch durch Organisationen wie *CEB*, *CIB*, *fib*, *IABSE* und *RILEM*, sollten durch Gründung des *Joint Committee on Structural Safety (JCSS)* im Jahre 1971 koordiniert werden [56]. Zudem sollte die Entwicklung des Wissens durch diese Organisation vorangetrieben werden. So wurde das Hintergrundwissen für einige Normen und Regelwerke, darunter *ISO*-Dokumente, *Eurocodes*, *CEB* bzw. *ECSS* Regelwerke, zusammengetragen. Ab dem Jahre 1990 wurde die Aufgabe der Entwicklung einer einheitlichen Bemessungsnorm durch das *CEN* (Europäisches Komitee für Normung) übernommen, siehe *Rug* [57]. Durch die Zusammenarbeit im *RGW* (Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe) begannen die Bemühungen zur Entwicklung einer Bemessungsnorm unter Anwendung der Methode der Grenzzustände in der DDR schon deutlich eher. Die Einführung des Bemessungskonzeptes mit Grenzzuständen erfolgte bereits im Jahre 1980 in der DDR, siehe [57].

Durch eine Initiative des NABau-Ausschuss Berlin e.V. wurde im Jahre 1981 die Ausarbeitung „*Die Grundlagen zu Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen*“ (*GruSiBau*) [58] in Deutschland erstellt. Dies stellte einen wichtigen Schritt zur Entwicklung eines einheitlichen statistisch

fundierten Bemessungskonzeptes dar, in welches sowohl nationale als auch internationale Erfahrungen einfließen. Hier werden bereits verschiedene Grenzzustände definiert und der Sicherheitsindex zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit, auch mit Werten hinterlegt, festgelegt. Zudem wird das Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten eingeführt. Mit dem Fall der Mauer mussten die Bestrebungen zunächst eingestellt werden [57].

Der *Probabilistic Model Code* des JCSS (erste Fassung im Jahre 2000) [59] [60] [61] stellt einen weiteren wichtigen Meilenstein in der Vereinheitlichung des Sicherheitskonzeptes mit Grenzzuständen dar. Hier werden international anerkannte Regeln für die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit zusammengestellt und wichtige Grundannahmen für die Berechnung festgelegt.

Die in Westdeutschland geltende Holzbaunorm in dieser Zeit war die *DIN 1052*. Mit der *E DIN 1052:2004* erschien ein Normenentwurf, der, im Gegensatz zur Vorgängernorm der *DIN 1052:1988*, das Bemessungskonzept mit Grenzzuständen inkludierte. Die *DIN 1052:2004* wurde im Jahre 2009 bauaufsichtlich eingeführt und war ein zentraler Schritt zur angestrebten europäischen Normung basierend auf dem Bemessungskonzept mit Grenzzuständen [57]. In Gesamtdeutschland wurde die Bemessung nach dem Konzept der Grenzzustände im Jahre 2012 eingeführt [57].

## 3.2 Grundlegende Begriffe

### 3.2.1 Zufallsvariable

Nach Plate ist eine „*eindimensionale Zufallsvariable*  $x$  [...] eine Funktion, die in einem vorgegebenen Ereignisraum  $S$  jedem möglichen Elementarereignis eines Experimentes  $\xi$ , eine reale Zahl  $x_i$  zuordnet“ [62, S. 62]. Zudem ist laut Spaethe „[...] ein zufälliges Ereignis  $A$  [...] ein Ereignis, das in Abhängigkeit vom Zufall eintritt oder nicht eintritt“ [63, S. 13]. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Überschreitens festgelegter Grenzzustände werden im Bauwesen Einwirkungs- und Widerstandsgrößen als zufällige, wahrscheinlichkeitstheoretisch verteilte Größen modelliert. Auch Modellungenauigkeiten bzw. -unsicherheiten können als Zufallsgrößen modelliert werden.

Zufallsvariablen werden bei unveränderten Testereignissen ermittelt (sowohl praktisch als auch theoretisch). Dabei muss ihnen eine Wahrscheinlichkeit  $P\{x < X_i\}$  zugeordnet werden können [67]. Zufallsvariablen stellen somit jedes denkbare Ergebnis eines Versuches dar. Die Menge aller möglichen Realisierungen beschreibt die Gesamtheit [62]. In der Statistik werden diskrete und stetige Zufallsgrößen unterschieden. Nach Spaethe [63, S. 18] heißt eine Zufallsgröße „[...] diskret, wenn sie nur endlich viele Werte annehmen kann“. Die Verteilungsfunktion diskreter Zufallsgrößen ist

$$F_x(x) = \sum_{x_i \leq x} p_i \quad (3.1)$$

mit

$$\sum_i p_i = 1 \quad (3.2).$$

Dagegen heißt eine Zufallsgröße „[...] stetig, wenn sie bei einem Versuch jeden Zahlenwert aus einem oder mehreren vorgegebenen Intervallen der Zahlenachse annehmen kann“ [63, S. 18]. Dabei gilt für die Verteilungsfunktion

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(u) du \quad (3.3)$$

mit

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x) dx = 1 \quad (3.4)$$

Und mit der Verteilungsdichte  $f_x(x)$  nach Gl. (3.5)

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (3.5).$$

### 3.2.2 Wahrscheinlichkeitsbegriff

Angenommen sei eine hypothetische Stichprobe, welche die Werte  $x_i$  enthält, wobei die Reihenfolge der Werte zufällig ausgewählt wurde, der Index  $i$  ist ganzzahlig. Für jeden Wert dieser Stichprobe kann die absolute Auftretenshäufigkeit durch Auszählen der Werteanzahl in festgelegten Klassen bestimmt werden. Die graphische Darstellung ergibt ein Histogramm. Für die relative Häufigkeit wird die Anzahl aus der betrachteten Stichprobe durch den gesamten Stichprobenumfang geteilt. Die relative Häufigkeit ist somit ein Maß für die Wahrscheinlichkeit. Für kleinere Stichproben stellt sie jedoch nur eine grobe Schätzung dar [62]. Die Genauigkeit nimmt somit mit der Anzahl der Stichproben zu. Die Wahrscheinlichkeit kann nach Gl. (3.6) als Grenzprozess definiert werden, siehe z. B. Plate [62]:

$$P\{x_i < X\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_x}{n} = P_u(X) \quad (3.6)$$

Dabei sind  $n-n_x$  die Menge der Werte von  $x_i$ , die größer oder gleich  $X$  sind und  $P_u(X)$  die sogenannte Unterschreitungswahrscheinlichkeit. Aus der Definition ergibt sich, dass eine Wahrscheinlichkeit nur zwischen 0 und 1 liegen kann. Die Nichtnegativität von Wahrscheinlichkeiten sowie die Zuordnung eines Wertes  $\leq 1$  werden durch die ersten beiden Axiome der Statistik festgehalten.

### 3.2.3 Versagenswahrscheinlichkeit

Im Rahmen der Systemanalyse im Allgemeinen handelt es sich beim Versagen um einen Zustand, bei dem der festgelegte Zweck durch ein System nicht erfüllt wird. Für Bauwerke meint dies analog das Nichterfüllen eines bestimmten geforderten Zwecks. Dies muss nicht nur die Zerstörung beinhalten, auch das Unmöglichwerden einer bestimmungsgemäßen Nutzung ist eingeschlossen.

Bei der Versagenswahrscheinlichkeit handelt es sich um einen zentralen Begriff bei der Betrachtung der Tragwerkszuverlässigkeit im Bauwesen. Sie stellt nach *Fischer* [64, S. 131] das „Maß für die Sicherheit von Tragkonstruktion[en]“ dar. Ein Tragwerk kann sich nach *Spaethe* [63] in zwei Zuständen befinden: Versagen oder Nicht-Versagen. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird mit  $P_f$  bezeichnet. Der Versagenszustand wird erreicht, wenn in einem gewählten Bezugszeitrahmen der Grenzzustand überschritten wird [63]. Die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_s$  ist das Gegenereignis zur Versagenswahrscheinlichkeit. Damit ergibt sich

$$P_f + P_s = 1 \quad (3.7)$$

Für ein System mit statistisch verteilten Einwirkungs- und Widerstandsgrößen lässt sich die Versagenswahrscheinlichkeit nach *Faber & Stewart* [65] wie folgt bestimmen:

$$P_f = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx \quad (3.8)$$

Demzufolge handelt es sich um die Verteilungsfunktion des Widerstandes multipliziert mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Einwirkung. Diese Beziehung kann jedoch nur angewendet werden, wenn Einwirkung und Widerstand statistisch unabhängig sind. Da jedoch selten nur zwei Basisvariablen vorliegen, ist die Versagenswahrscheinlichkeit durch das folgende n-dimensionale Integral nach *Faber & Stewart* [65] allgemein bestimmt durch

$$P_F = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x^*) dx \quad (3.9)$$

Dabei ist  $f_x(x^*)$  die gemeinsame Verteilungsdichtefunktion des Vektors der statistisch verteilten Basisvariablen und  $x^*$  der Vektor der Basisvariablen. Die Integration erfolgt über den Versagensbereich.

Es ist zu beachten, dass die Versagenswahrscheinlichkeit keinen realen Wert abbildet, siehe beispielsweise [66] [67]. Der Wert stellt laut *Schneider & Schlatter* [39] vielmehr eine Art *Grad des Vertrauens* des Ingenieurs in das zu beurteilende Versagen dar. Der Wert ist stark geprägt vom Wissensstand des Beurteilenden, bezieht jedoch menschliches Versagen (grobes menschliches Fehlverhalten) nicht ein [39]. *Spaethe* [63] führt den Begriff der *operativen Versagenswahrscheinlichkeit* ein, um hervorzuheben, dass menschliches Fehlverhalten nicht erfasst werden kann. Es ist *DIN EN 1990:2010-12* zu zitieren: „Die Versagenswahrscheinlichkeit und der zugehörige Zuverlässigkeitsindex (siehe C.5<sup>1</sup>) sind lediglich operative Werte, die nicht die wirklichen Versagensraten ausdrücken, sondern nur für die Kalibrierung der Normen und für Vergleiche der Zuverlässigkeitsniveaus verschiedener Tragwerke verwendet werden“ [16, S. 86].

Die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit ist mit Herausforderungen behaftet. Dies begründet sich dadurch, dass die Erfassung von Schadensstatistiken bei Bauwerken schwierig ist. Bauwerke sind in der Regel Unikate und damit schwer vergleichbar. Zudem tritt Tragwerksversagen, glücklicherweise,

<sup>1</sup> Gemeint ist Anhang C.5 der vorgenannten Norm

nicht häufig auf. In Verbindung mit langen Nutzungsdauern ergeben sich große Zeiträume für die Sammlung statistischer Daten. *Spaethe* [63] hebt hervor, dass sich in diesen Zeiträumen die Technik oftmals weiterentwickelt hat, was die Vergleichbarkeit erschwert.

Bei der Versagenswahrscheinlichkeit handelt es sich um eine zeitabhängige Größe. Demzufolge sind für die Aufgabenstellung passende Bezugszeiträume für die Analyse zu wählen. Es bieten sich die Referenzzeiträume wie  $T_{ref} = 1a$  oder auch die Nutzungsdauer an [63].

### **3.2.4 Nutzungsdauer**

Bei der Nutzungsdauer handelt es sich um den Zeitraum, für den die zukünftige Nutzung des Tragwerks geplant ist, für den nach *Spaethe* [63, S. 67] „Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten sind“. Nach *DIN EN 1990:2010-11* [16] ist der Begriff als „angenommene Zeitdauer, innerhalb der ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass jedoch eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist“ definiert. Für Gebäude und gewöhnliche Tragwerke wird nach *DIN EN 1990:2010-12* ein Zeitraum von 50 Jahren angenommen. Die Nutzungsdauer eignet sich als Bezugszeitraum für zuverlässigkeitstheoretische Betrachtungen, siehe [63].

Von der Nutzungsdauer abzugrenzen ist die Lebensdauer. Diese beschreibt nach *Spaethe* [63] den Zeitrahmen vom Beginn der Nutzung bis hin zum Versagen bzw. Abriss. Aufgrund der Ungewissheit des Versagenszeitpunktes handelt es sich ebenfalls um eine Zufallsgröße. Die Nutzungsdauer ist demnach eine Planungsgröße, bei der Lebensdauer handelt es sich dagegen um die tatsächliche Dauer der Existenz des Bauwerks.

### **3.2.5 Basisvariable**

Zu den Basisvariablen gehören laut *DIN EN 1990:2010-12* [16] Einwirkungen und Umgebungseinflüsse, Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen, sowie geometrische Angaben. Einwirkungen unterteilen sich in ständige, veränderliche und außergewöhnliche.

Basisvariablen werden nach *Der Kiureghian & Ditlevsen* [68] so bezeichnet, da angenommen wird, dass sie direkt aus Beobachtungen bestimmt werden können, also empirische Daten zu ihnen vorliegen. Die Untermodelle (sub-models) zur Beschreibung der Variablen sind jedoch nie perfekt, enthalten Idealisierungen und Fehler [68]. Die Parameter der Basisvariablen werden somit durch die Anpassung der Untermodelle an die beobachteten Daten bestimmt.

*Schneider & Schlatter* [39] unterscheiden drei Typen von Basisvariablen: Umweltvariablen, Bauwerksvariablen und Nutzungsvariablen. Weiter grenzen sie sogenannte Bemessungsvariablen ab. Dabei handelt es sich um die Basisvariablen, die bei der Bemessung von Tragwerken einbezogen werden und mit mindestens zwei Parametern (z. B. Mittelwert und Standardabweichung) definiert sind.

Bei diesen Eingangsparametern in die sicherheitstheoretische Berechnung handelt es sich um Zufallsgrößen. Widerstandsgrößen und ständige Einwirkungen ergeben sich unter anderem aus Baumaterialien, deren Eigenschaften durch ihre Produktion als Massengüter statistisch erfasst und durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt werden können. Veränderliche Einwirkungen wiederholen sich, können somit ebenfalls erfasst und durch statistische Verteilungen abgebildet werden.

### 3.3 Mathematische Definition der Tragwerkszuverlässigkeit

#### 3.3.1 Grundlegendes

Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  bezeichnet im Konzept mit Grenzzuständen das Sicherheitsmaß. Er beschreibt, dass mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die Funktion eines Tragwerks über eine gewisse Zeit erfüllt wird [69]. Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und der Sicherheitsindex  $\beta$  stehen in der Beziehung nach Gl. (3.18), S. 42. Pottharst [67] definiert fünf Anforderungen an ein Sicherheitsmaß:

1. Anwendbarkeit für alle Baustoffe, Konstruktionssysteme und Belastungsarten,
2. Definierbarkeit durch verfügbare Daten der Einflussgrößen (Mittelwert, Variationskoeffizient)
3. Transparenz der einzelnen Unsicherheitsquellen,
4. Mit ihm Herleitbarkeit der einzelnen Sicherheitsbeiwerte für die Praxis,
5. Unabhängigkeit von der analytischen Definition der Grenzzustände.

Spaethe [63] bezeichnet die Festlegung eines angemessenen Sicherheitsniveaus als gesellschaftliches Optimierungsproblem. Ist es zu hoch, folgt daraus ein hoher materieller Aufwand. Bei zu geringen Werten kommt es zu einer Vielzahl von Schadensfällen u. Eine Möglichkeit der Bestimmung des Sicherheitsniveaus ist die Nachrechnung bestehender Normen, da sich bei deren Entwicklung über die Zeit ein akzeptables Sicherheitsniveau eingestellt hat. Nach Reid [66] werden höhere Risiken akzeptiert, wenn sie freiwillig übernommen werden. Zudem werden sie als nicht so schlimm empfunden, wie aufgezwungene.

#### 3.3.2 Entwicklung der mathematischen Definition des Sicherheitsindex

Basler [70] entwickelte im Jahre 1960 ein Näherungsverfahren zur Bewertung der Tragwerkszuverlässigkeit, bei dem die zufälligen Veränderlichen nur durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben werden können. Er führt den Variationskoeffizienten  $V_z$  als Sicherheitsmaß der Bemessung ein:

$$V_z = \frac{S_T}{z_0} \quad (3.10)$$

mit  $S_T$  dem Streumaß und  $z_0$  dem von ihm mit „Sicherheitszone“ bezeichnetem Mittelwert. Zur Berücksichtigung statistisch nicht erfassbarer Unsicherheiten wird ein zusätzlicher deterministischer Sicherheitsfaktor vorgeschlagen [67]. Pottharst et al. [67] zufolge wurde dieses Sicherheitsmaß aus Mangel an Kenntnissen über die tatsächliche Verteilung der Basisvariablen gewählt.

Cornell [71] definierte die Tragwerkszuverlässigkeit, hier bezeichnet als  $\beta_c$  reziprok dazu als:

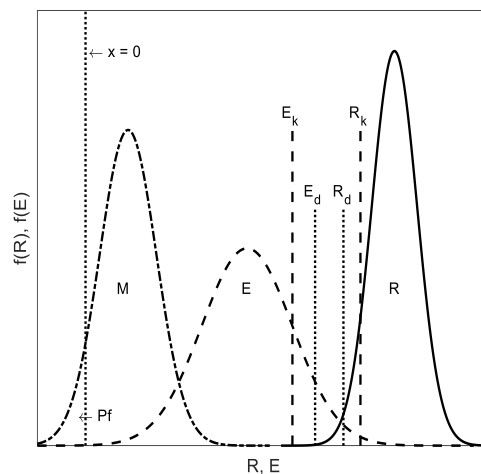
$$\beta_c = \frac{\overline{R - S}}{\sqrt{\text{Var}[R - S]}} = \frac{m_z}{\sigma_z} \quad (3.11)$$

Bei diesem Sicherheitsmaß sollen *Pottharst et al.* [67] zufolge Streuungen von Materialeigenschaften, Bauausführung und Prüfverfahren einzeln erfasst und in einem gemeinsamen Variationskoeffizienten zusammengeführt werden. Diese Definition gibt nach *Schneider & Schlatter* [39] Aufschluss darüber, wie oft die Standardabweichung zwischen Nullpunkt und Mittelwert einer Zufallsvariablen passt und bewertet damit den Sicherheitsabstand. Bei dieser Definition des Zuverlässigkeitsindex ist der Wert nur von Mittelwert und Standardabweichung einer Basisvariablen abhängig [72]. Es erfolgt somit keine Abbildung der Bemessungssituation, er ändert sich somit mit der Formulierung der Grenzzustandsfunktion. Dies ist nach *Pottharst et al.* [67] problematisch, da zu viele Einflussgrößen unberücksichtigt bleiben. Die Autoren schlagen deshalb die Verwendung des Sicherheitsmaßes nach *Hasofer & Lind* [73] vor. Diese Definition des Sicherheitsindex erlaubt die Einbeziehung mehrerer Basisvariablen und verschiedener Grenzzustände.

Grundannahme für diese Definition des Sicherheitsindex ist, dass ein Tragwerk grundsätzlich als sicher einzuschätzen ist, wenn der Widerstand im betrachteten Grenzzustand größer als die entsprechende Einwirkung ist. Daraus ergibt sich die Sicherheitsmarge  $M$  zu:

$$M = R - E \geq 0 \quad (3.12)$$

Mit  $R$  als Widerstands- und  $E$  als Einwirkungsgröße (oft auch als  $S$  bezeichnet, Abb. 3.1).



#### Legende

M	Sicherheitsmarge	$P_f$	Versagenswahrscheinlichkeit
E	Einwirkung	R	Widerstand
$E_k$	Charakteristischer Wert der Einwirkung	$R_k$	Charakteristischer Wert des Widerstands
$E_d$	Bemessungswert der Einwirkung	$R_d$	Bemessungswert des Widerstands
$f(E)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Einwirkung E	$f(R)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Widerstands R

Abb. 3.1: Einwirkung und Widerstand im eindimensionalen Fall

*Turkstra* [33] betont, dass bei dieser Formulierung  $R$  und  $E$  unabhängig sein sollen. Die Fläche unter der Kurve  $M$  links von  $x = 0$ , entspricht der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$ . Die Ermittlung dieser Versagenswahrscheinlichkeit ist für die tägliche Ingenieurpraxis zu aufwendig. Aus diesem Grund gibt die



### 3. Das Bemessungskonzept mit Grenzzuständen – Sicherheitstheoretische Grundlagen

Normung Teilsicherheitsbeiwerte vor, mit denen Quantilwerte der zugrundeliegenden Verteilungen der Variablen, charakteristische Werte genannt, erhöht (Einwirkungen) bzw. abgemindert (Widerstände) werden. Sie werden in Abb. 3.1 mit  $R_k$  bzw.  $E_k$  bezeichnet. Die so bestimmten Bemessungswerte  $E_d$  bzw.  $R_d$  werden nach der Forderung

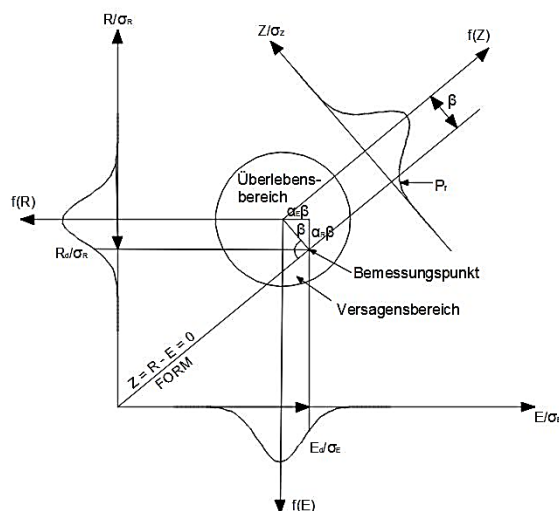
$$\frac{E_d}{R_d} \leq 1 \quad (3.13)$$

verglichen, sodass der im probabilistischen Modell geforderte Mindestabstand zwischen Einwirkung und Widerstand eingehalten wird. Die Teilsicherheitsbeiwerte sind somit definiert als

$$\gamma_M = \frac{R_k}{R_d} \quad (3.14)$$

$$\gamma_F = \frac{E_d}{E_k} \quad (3.15)$$

wobei  $\gamma_M$  der Sicherheitsbeiwert für den Widerstand und  $\gamma_F$  der Sicherheitsbeiwert für die Einwirkung ist, da die Forderung besteht, dass Sicherheitsbeiwerte größer bzw. gleich eins sein sollen. Die charakteristischen Werte  $E_k$  und  $R_k$  sind abhängig von der Verteilungsfunktion der Variablen und vom gewählten Quantil. Die Bemessungswerte  $E_d$  und  $R_d$  werden abhängig vom Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  und vom Wichtungsfaktor  $\alpha_i$  der betrachteten Variablen bestimmt. In Abb. 3.2 werden die Variablen auf den Achsen des Koordinatensystems aufgetragen. Bei Einbeziehung weiterer Variablen erweitert sich die Problematik um die entsprechenden Achsen, sodass ein n-dimensionales Problem entsteht.



#### Legende

E	Einwirkung	R	Widerstand
$E_d$	Bemessungswert der Einwirkung	$R_d$	Bemessungswert des Widerstands
$\sigma_E$	Streuung der Einwirkungsvariablen	$\sigma_R$	Streuung der Widerstandsvariablen
$\beta$	Sicherheitsindex	$\alpha_i$	Sensitivitätsfaktor
Z	Grenzzustand		

Abb. 3.2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit Grenzzustandsgerade, Zuverlässigkeitsindex, Wichtungsfaktoren aus Pertermann, Puthli, Ummenhofer & Vrouwenvelder [74]

Die Grenzzustandsfunktion grenzt den Überlebensbereich vom Versagensbereich ab. Sie ist eine Funktion von Grundvariablen mit zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichten [62]. Durch diese auch als *Wirkungsfunktion* bezeichnete Funktion ergibt sich der Sicherheitsabstand  $z$  nach Plate [62] zu

$$z = g(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n) \quad (3.16)$$

Für diese Hyperebene gibt es nach Fischer [75] drei Abstraktionsstufen:

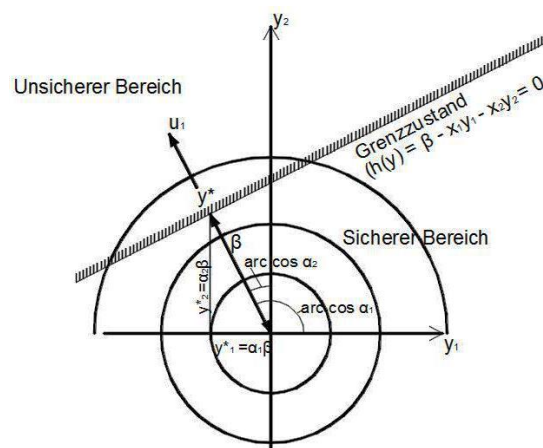
- 1) Die Funktion ist nichtlinear, die Komponenten können stochastisch voneinander abhängen, die Verteilungsfunktionen der Komponenten sind beliebig,
- 2) Die Funktion ist linear, Komponenten sind stochastisch abhängig und normalverteilt,
- 3)  $g(X) = R - S$ ,  $R$  ist der Vektor der Widerstandsvariablen und  $S$  (bzw.  $E$ ) der Vektor der Einwirkungsvariablen.

Drei Fälle sind zu unterscheiden: Ist  $g < 0$  tritt Versagen ein, ist  $g > 0$  versagt das System nicht, ist  $g = 0$  liegt die Funktion genau auf der Grenzfläche. Für ausschließlich normalverteilte Zufallsgrößen kann der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  einfach mit Gl. (3.17) bestimmt werden

$$\beta = \frac{m_R - m_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (3.17)$$

Dabei sind  $m_R$  bzw.  $m_E$  die Mittelwerte der Widerstands- bzw. Einwirkungsgröße und  $\sigma_R$  bzw.  $\sigma_E$  die Standardabweichungen der Widerstands- bzw. Einwirkungsgröße.

In den Bemessungsproblemen des Bauwesens liegen in der Regel nicht nur Normalverteilungen vor. Die Berücksichtigung anderer Verteilungen geschieht durch das Ersetzen der Verteilungen durch im Bemessungspunkt äquivalente Normalverteilungen [39]. Dazu werden nach *Hasofer & Lind* [73] alle Basisvariablen in den Standardnormalraum transformiert, siehe Abb. 3.3. Geometrisch gesehen ist der Sicherheitsindex nun der Abstand der Grenzzustandsfunktion vom Koordinatenursprung [73]. Weiter wird das Koordinatensystem gedreht, sodass die ursprüngliche x-Achse (jetzt  $\eta$ -Achse) senkrecht auf der Grenzzustandsfunktion steht [67]. Durch diese Formulierung des Sicherheitsindex wird er unabhängig von der Formulierung der Grenzzustandsfunktion [73]. Diese Definition des Sicherheitsindex stellt heute die Grundlage für die Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen dar [39].



**Legende**

$u_i$	Variable im standardisierten Raum	$h(y)$	Grenzzustand im standardisierten Raum
$y^*$	Richtungsvektor im standardisierten Raum	$\beta$	Sicherheitsindex
$x_i$	Variable im Ursprungsraum	$\alpha_i$	Sensitivitätsfaktor

**Abb. 3.3: Verteilungsdichten und Gleichung des Grenzzustandes im Raum standardisierter Zufallsgrößen (y-Raum) im zweidimensionalen Fall aus *Spaethe* [63]**

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und der Sicherheitsindex  $\beta$  stehen in der Beziehung

$$P_f = \varphi(-\beta) \quad (3.18)$$

Diese Beziehung gilt nach *Spaethe* [63] nicht bei Anwendung der FOSM Methode (siehe Kapitel 3.3.4), jedoch ab Zuverlässigkeitstheorien der zweiten Ebene (siehe Abschnitt 3.4).

### 3.3.3 Sensitivitätsfaktor

Die Bezeichnung der Sensitivitätsfaktoren stammt von *Paloheimo & Hannus* [76]. Diese drücken den Streuungsanteil der betrachteten Variablen an der Gesamtstreuung aus. Somit legen sie den Bemessungspunkt fest, siehe [67]. Sensitivitätsfaktoren sind geometrisch gesehen die Richtungswinkel zwischen dem kürzesten Abstand der Grenzzustandsfunktion und dem Lot auf die entsprechende Koordinatenachse. Sie geben nach *Rackwitz & Zilch* [69] das Maß der Empfindlichkeit des Sicherheitsniveaus bei Änderung der Streuung der Basisvariablen an. Die Summe der quadrierten Werte ergibt eins

$$\sum \alpha_i^2 = 1 \quad (3.19)$$

Liegt der Wert nahe eins, hat die Basisvariable einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit, bei einem Wert nahe null ist sie kaum von Bedeutung. Dies gilt für unabhängige Variablen, siehe *Spaethe* [63].

### 3.3.4 Umrechnung des Zuverlässigkeitsindex auf verschiedene Bezugszeiträume

Die Umrechnung des Zuverlässigkeitsindex unter Berücksichtigung einer Abhängigkeit zwischen den Jahren ist nach *Holický et al.* [77] nach Gl. (3.20) bestimmt

$$\Phi(\beta_{t,n}) = [\Phi(\beta_{t,1})]^{n/k} \quad (3.20)$$

Hier sind  $n$  die Referenzperiode und  $k$  die Spanne der unabhängigen Jahre ( $n < k$ ,  $k = 1$  steht für statistisch unabhängige Variablen,  $n = k$  beschreibt vollständige Abhängigkeit). Diese Herangehensweise ist nach [77] vereinfacht, genauer wäre die Aufstellung von Korrelationsmatrizen. In der Regel fällt die Bewertung und Quantifizierung der temporären Abhängigkeit jedoch schwer, da sie von der Dominanz der Lasten abhängt. Sind ständige Lasten dominant, sollte aufgrund ihrer Konstanz über die Zeit ein Einfluss zwischen den Jahren berücksichtigt werden. Eine Änderung der ständigen Last in einem Jahr hat geringen Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit in einem anderen Jahr. Resultiert die dominierende Beanspruchung aus veränderlichen Einwirkungen, muss kein Zeiteffekt berücksichtigt werden, da die Extremwerte der veränderlichen Lasten aus den Jahresmaxima gewonnen werden.

Bei diesem Ansatz wird nach *Spaethe* [63] die Widerstandsseite als zeitlich konstant oder annähernd deterministisch angenommen und veränderliche Lasten dominieren das Zuverlässigkeitsproblem, Für die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich nach [63]

$$P_F(t_n) = 1 - (1 - P_F(t_1))^{n/k} \quad (3.21)$$

### 3.4 Lösungsverfahren zur Ermittlung der Tragwerkszuverlässigkeit

#### 3.4.1 Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse

DIN EN 1990:2010-12 [16] gibt folgenden Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden (Abb. 3.4).

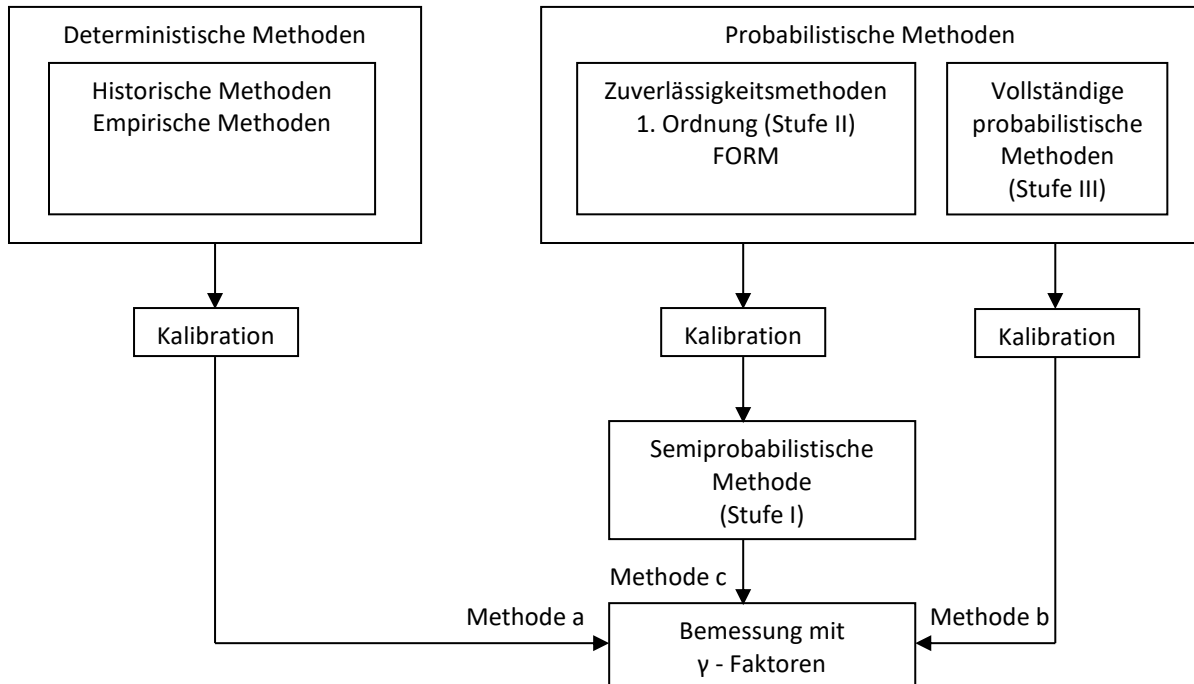


Abb. 3.4: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden, aus DIN EN 1990:2010-12 Anhang C [16]

Laut DIN EN 1990:2010-12 [16] beruhen die Eurocodes auf der deterministischen Methode, Zuverlässigkeitsmethoden höherer Ordnung wurden zur Weiterentwicklung der Normung verwendet. Tab. 3.1 nach Glowienka [72] fasst Details zusammen, siehe auch Spaethe [63] oder Steck [78].

Tab. 3.1: Einordnung probabilistischer Verfahren aus Glowienka [72]

Stufe	Berechnungsmethode	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Grenzzustandsfunktion	Sicherheitsmaß; Ergebnis
1. semi-probabilistisch	Kalibrierung	nicht verwendet	-	Teilsicherheitsfaktoren
2. probabilistische Näherungsverfahren	FOSM	ausschließlich Normalverteilung	Lineare Approximation	Approximative Versagenswahrscheinlichkeit
	FORM, SORM	alle Typen	Lineare/ quadratische Approximation	
3. probabilistisch exakte Verfahren	numerische Integration und Monte Carlo Simulation	alle Typen	beliebig	theoretische exakte Versagenswahrscheinlichkeit
4. probabilistische Optimierung	Siehe Ebene 2 und 3	alle Typen	beliebig unter Einbeziehung ökonomischer Daten	stochastisch optimierte Konstruktionen

#### 3.4.2 Stufe 1 – Semi-probabilistische Verfahren

Die Stufe 1 umfasst deterministische bzw. semi-probabilistische Berechnungsmodelle, die die Versagenswahrscheinlichkeit nur indirekt einbeziehen [62]. Die Bemessung mittels Teilsicherheitsbeiwerten ist das derzeit in DIN EN 1990:2010-12 [16] für jeden Ingenieur festgehaltene Konzept der üblichen Tragwerksbemessung.

Im Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten werden die Sicherheitsnachweise für jeden Grenzzustand geführt. Die Teilsicherheitsbeiwerte überführen die charakteristischen Werte, die hier als Quantil- bzw. Fraktilwerte definiert sind, in die verwendeten Bemessungswerte (Designwerte). Mittels dieser Werte wird das System so bemessen, dass die festgelegten Grenzwerte nicht überschritten werden [62]. Ziel-Versagenswahrscheinlichkeiten werden somit über die verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt [62]. Teilsicherheitsbeiwerte können

- a) mit festen Sensitivitätsfaktoren aus Bemessungs-/charakteristischem Wert (Anhang Kap. 10.1.1)
- b) unter Berücksichtigung von Versuchen (Anhang Kap. 10.1.2)
- c) mittels probabilistischer Optimierung (Anhang Kap. 10.1.3)

bestimmt werden. Nach *Plate* [62] ist ein Nachteil der Bemessungsstufe 1, dass die Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte oft schwer nachvollziehbar ist, da sie zumeist in Normungsausschüssen festgelegt werden. Die zugrundeliegenden Annahmen und Entscheidungen sind zumeist nicht für die Öffentlichkeit zugänglich. Weiter werden nach diesem Bemessungskonzept Lastkombinationen festgelegt, die schon zuvor in der Literatur für Kritik gesorgt haben, beispielsweise [79]. Weiter kann durch dieses System nach *Plate* [62] keine Aussage über die tatsächliche Gefährdung getroffen werden.

### 3.4.3 Stufe 2 – Probabilistische Näherungsverfahren

#### **First Order Second Moment Method (FOSM, Momentenmethode)**

Beim Vorliegen weniger Informationen über eine Verteilung eignet sich nach *Fischer* [64] die Momentenmethode zur Bestimmung der Tragwerkszuverlässigkeit. Hierbei wird nach *Spaethe* [63] davon ausgegangen, dass nur Erwartungswert und Varianzen bekannt sind. Diese Daten werden anhand einer vorhandenen Stichprobe geschätzt [72]. Das Sicherheitsmaß ist der Sicherheitsindex bzw. eine operative Versagenswahrscheinlichkeit [63]. Die Bezeichnung impliziert, dass in der verwendeten Versagenswahrscheinlichkeit nur die theoretisch berechenbaren Anteile vorhanden sind. Sie ist an das theoretische Modell (unter anderem an die Verteilungsfunktion der Basisvariablen) gebunden [63]. Aufgrund dessen, dass in der Momentenmethode nur die ersten beiden Momente als ermittelbar angenommen werden, bezieht sich auch das Sicherheitsmaß nur darauf [63]. Den verwendeten Parametern wird eine Normalverteilung unterstellt [64]. Zur Anwendung kam hier zunächst der Sicherheitsindex nach *Cornell* [71]. Dabei wird die Grenzzustandsfunktion als linear angenommen. Ist die Funktion nicht linear, wird sie im Erwartungswert durch Taylorreihenentwicklung linearisiert. Die Linearisierung mittels Taylorreihenentwicklung erfolgt durch partielles Ableitung im Bemessungspunkt. Unter Verwendung nur der ersten Terme der Reihe wird eine Tangente (linearisierte Funktion) an den Bemessungspunkt angelegt. Die Methode kann nur bei dem ausschließlichen Vorliegen von Normalverteilungen angewendet werden. Außerdem ist sie nicht fehlerfrei, der Fehler steigt mit zunehmender Größe der Versagenswahrscheinlichkeit, sowie mit stärker von der Normalverteilung abweichenden Verteilungstypen, an [72].

Nach *Plate* [62] ist die Methode nur anwendbar, wenn die Nichtlinearität der Grenzzustandsfunktion gering ist oder der Versagenspunkt nahe zum Mittelwert liegt. Weiter wird die Linearisierung der Tangentialebene um den Mittelwert durchgeführt [62]. Es muss sich dabei jedoch nicht um den Punkt mit der größten Versagenswahrscheinlichkeit handeln.

Die Methode hat nach *Dolinski* [80] weitere Nachteile. Eine Fehlerabschätzung sei kaum möglich. Um dies zu lösen schlägt der Autor ein Verfahren zur Definition oberer und unterer Grenzen für die Versagenswahrscheinlichkeit vor, in dem der wahre Wert enthalten sein soll. Die Grenzen sollen so nah wie möglich aneinander liegen. Das Verfahren ist jedoch nur für den zweidimensionalen Fall anwendbar. Weiter sei das Verfahren von der Anordnung der Variablen abhängig.

### **First Order Reliability Method (FORM)**

In den Bemessungsproblemen des Ingenieurbaus liegen in der Mehrzahl der Fälle nicht nur Normalverteilungen vor. Die *First Order Reliability Methode (FORM)* wurde als Lösungsmethode entwickelt. Das Verfahren wird unter anderem in *Spaethe* [63], *Plate* [62] oder *Schneider & Schlatter* [39] beschrieben. Nicht normalverteilte Variablen werden im Bemessungspunkt durch äquivalente Normalverteilungen substituiert. Da eine geeignete Approximation insbesondere im Bereich kleiner bzw. großer Argumente der Verteilungen ( $x$ -Werte) von Bedeutung ist, wird diese Approximation *Tail Approximation* (oder auch *Rackwitz-Fießler-Algorithmus*) genannt [39]. Die Basisvariablen werden in den Standardnormalraum transformiert, da hier alle Zufallsgrößen unabhängig, standardisiert und normalverteilt sind. Dazu muss im Verlauf der Iteration für jeden neuen Wert des approximierten Bemessungspunktes eine neue Normalverteilung bestimmt werden. Die Funktion des Grenzzustandes teilt, in Form einer Hyperfläche, bei der die Anzahl der Dimensionen von der Anzahl der Variablen bestimmt wird, den Versagensbereich vom Überlebensbereich ab. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist die Fläche dieses Versagensbereiches. Diese die Grenzzustandsfunktion (Hyperfläche) wird im Bemessungspunkt durch die Tangentialhyperebene ersetzt. Der Bemessungspunkt ist der Punkt auf der Grenzzustandsebene, der dem Koordinatenursprung am nächsten liegt. Die Grenzzustandsgleichung muss dazu im Bemessungspunkt stetig und mindestens einmal differenzierbar sein.

Bei dieser iterativen Berechnung müssen die Startkoordinaten des wahrscheinlichsten Versagenspunktes geschätzt werden, dafür bieten sich die Mittelwerte an. Anschließend wird die Grenzzustandsfunktion partiell nach den standardisierten Variablen abgeleitet, daraus die Richtungen und die Werte der einzelnen Koordinatenpunkte in Abhängigkeit vom Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  bestimmt und die neuen Koordinaten des wahrscheinlichsten Versagenspunktes berechnet. Weichen die Werte zu stark von den Startwerten ab, muss die Berechnung mit den zuletzt ermittelten Koordinaten neu durchgeführt werden. Ein mathematischer Beweis, dass der Punkt auf der Grenzzustandsfunktion mit dem kürzesten Abstand zum Koordinatenursprung auch der mit der größten Auftretenswahrscheinlichkeit ist, ist bei

3. Das Bemessungskonzept mit Grenzzuständen – Sicherheitstheoretische Grundlagen

Plate [62] zu finden. Der Betrag des Abstandes wird auch mit  $\delta$  bezeichnet, da  $\beta$  je nach Lage des Koordinatenursprungs positiv und negativ sein kann, somit wird

$$\delta = |\beta| \tag{3.22}$$

Der Zuverlässigkeitsindex kann nach Spaethe [63] berechnet werden mit

$$\delta = \frac{h(y^{(k)}) - \sum_{j=1}^m y_j^{(k)} \frac{\partial h}{\partial y_j} \Big|_{y=y^{(k)}}}{\left( \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial h}{\partial y_j} \Big|_{y=y^{(k)}} \right)^2 \right)^{1/2}} \tag{3.23}$$

$h(y^{(k)})$  ist der Wert der Grenzzustandsfunktion im Iterationsschritt  $k$  (Standardnormalraum),  $y_j^{(k)}$  der Richtungsvektor der Variablen im Standardnormalraum. Die Sensitivitätsfaktoren  $\alpha_i$  können nach Spaethe [63] nach Gl. (3.24) berechnet werden.

$$\alpha_i^{(k)} = \frac{-\frac{\partial h}{\partial y_i} \Big|_{y=y^{(k)}}}{\left( \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial h}{\partial y_j} \Big|_{y=y^{(k)}} \right)^2 \right)^{1/2}} \tag{3.24}$$

Abb. 3.5 stellt das Vorgehen zur First Order Reliability Method schematisch dar.

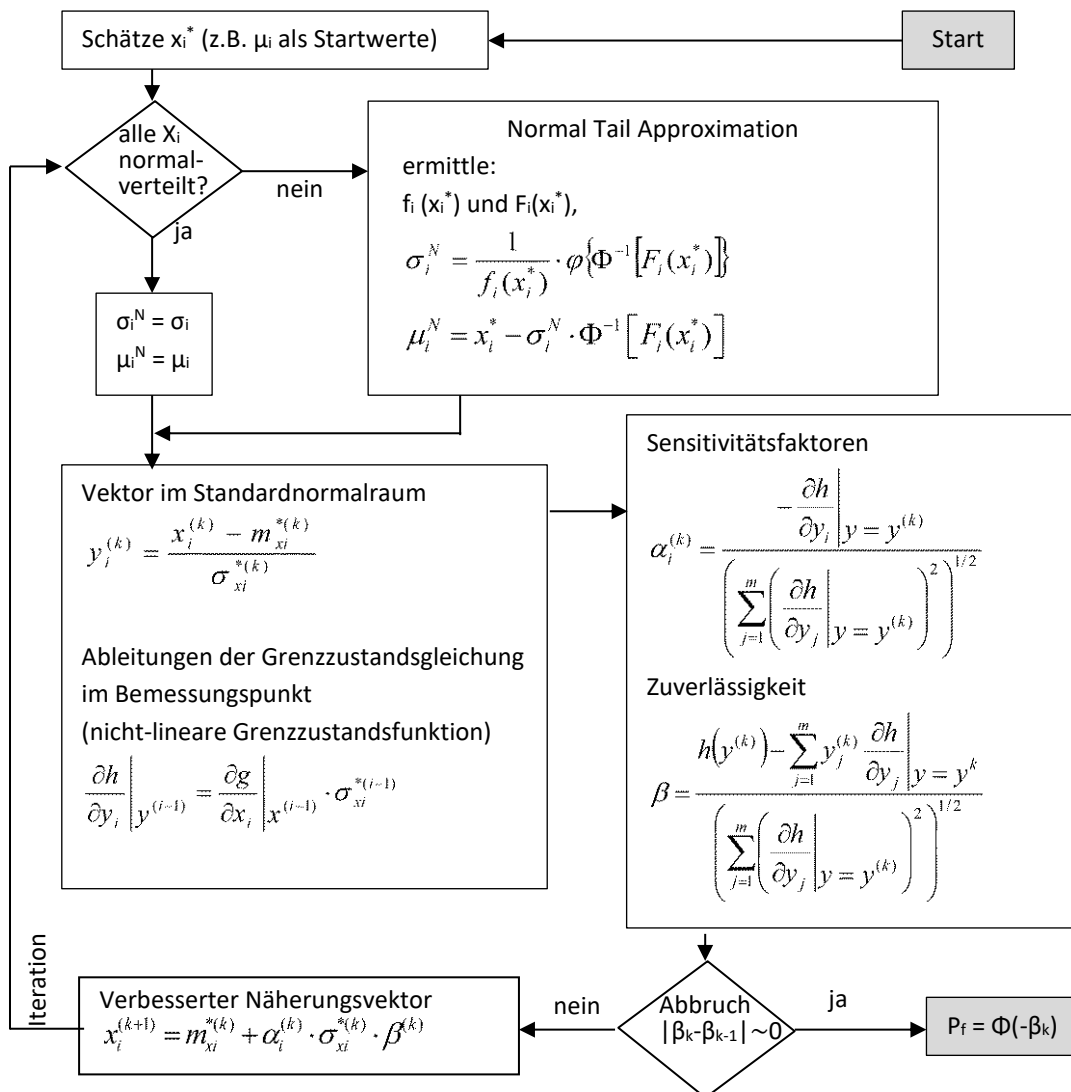


Abb. 3.5: Ablauf zur iterativen Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  in Anlehnung an Schneider & Schlatter [39] Ein Berechnungsbeispiel als Handrechnung wird in Anhang 10.2.1 (S. 7 ff.) vorgestellt.

### First Order Reliability Method – alternative Berechnung

Die Transformation der Variablen in den Standardnormalraum kann auch innerhalb der Grenzzustandsfunktion unter Berücksichtigung der Verteilungsfunktion der Variablen erfolgen, siehe zum Beispiel *JCSS PMC Part 1* [59]. Es ist zu beachten, dass abweichend zur Darstellung in Abb. 3.3 die Achsen des Koordinatensystems im Standardnormalraum mit  $u_i$  bezeichnet sind.

Die Grenzzustandsfunktion im Standardnormalraum lautet dann

$$g_u(u) = g(\mu_{X_1} + \sigma_{X_1}u_1, \dots, \mu_{X_n} + \sigma_{X_n}u_n) \quad (3.25)$$

mit den normalisierten Variablen ( $U_i \sim N(0,1)$ )

$$U_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (3.26)$$

Zur Bestimmung der Parameter der Tangentialhyperebene wird die Grenzzustandsfunktion partiell nach den Variablen  $u_i$  abgeleitet:

$$a_i = \frac{\partial g_u(u)}{\partial u_i} \quad (3.27)$$

Daraus kann der Sicherheitsindex  $\beta$  durch

$$\beta = \min_{g_u(u)=0} \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (3.28)$$

bestimmt werden. Der verbesserte Näherungsvektor bestimmt sich dann aus

$$u_i^{(k+1)} = a_i^{(k)} \cdot \lambda^{(k)} \quad (3.29)$$

wobei

$$\lambda^{(k)} = \frac{(a_1^{(k)} \cdot u_1^{(k)} + a_2^{(k)} \cdot u_2^{(k)}) - g(x)^{(k)}}{(a_1^{(k)})^2 + (a_2^{(k)})^2} \quad (3.30)$$

Die Sensitivitätsfaktoren ergeben sich mit

$$\alpha_i = \frac{1}{\beta} \cdot u_i \quad (3.31)$$

Ein Berechnungsbeispiel als Handrechnung wird in Anhang 10.2.2 (S. 10 ff.) gezeigt.

### Berücksichtigung korrelierter Eingangsgrößen

Insbesondere Festigkeitseigenschaften eines Materials müssen als korrelierte Zufallsvariablen betrachtet werden. Dazu werden aus der Korrelationsmatrix die Elemente der Transformationsmatrix mittels *Choleski Triangulation* bestimmt. Dann ist nach *Sørensen* [81] für drei korrelierte Variablen:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & 0 & 0 \\ T_{21} & T_{22} & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} & T_{31} \\ 0 & T_{22} & T_{32} \\ 0 & 0 & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{12} & 1 & \rho_{23} \\ \rho_{13} & \rho_{23} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Die Transformation der Variablen  $Y$  zu unabhängigen, normalisierten Variablen erfolgt dann zu

$$Y = TU \quad (3.33)$$

Auf jede Variable wird die entsprechende Zeile der Transformationsmatrix angewendet und so Unabhängigkeit rechnerisch erreicht.



### **Second Order Reliability Method (SORM)**

Bei der *Second Order Reliability Method* wird die *First Order Reliability Method* um die Berücksichtigung der Nichtlinearität (Krümmung) der Grenzzustandsfunktion erweitert. Dies geschieht durch Einbeziehung der quadratischen Glieder der Grenzzustandsfunktion durch zweites partielles Ableiten. Bei starker Krümmung der Grenzzustandsfunktion oder sehr starker Abweichung der Verteilung der Basisvariablen von der Normalverteilung kann eine Betrachtung mittels *SORM* nötig werden, da die Ergebnisse nach *Spaethe* [63] sonst zu ungenau sind. Die Grenzzustandsfunktion ergibt sich nach [63] zu:

$$h(y) = h(y^*) + (y - y^*)^T \cdot \bar{V}h(y^*) + \frac{1}{2}(y - y^*)^T \cdot B_y \cdot (y - y^*) = 0 \quad (3.34)$$

$B_y$  ist die Matrix der zweiten und gemischten Ableitungen von  $h(y)$  (standardisierter Raum, an der Stelle des Bemessungspunktes). Details können beispielsweise in [63] nachgelesen werden.

Für übliche Ingenieuraufgaben ist die *First Order Reliability Method* ausreichend, da die Grenzzustandsfunktionen nicht stark gekrümmt sind.

### **3.4.4 Stufe 3 – Probabilistisch exakte Verfahren**

#### **Monte-Carlo-Methode**

Bei der Monte-Carlo-Methode wird die Versagenswahrscheinlichkeit nicht wie bei *FORM* oder *SORM* angenähert, sondern direkt aus einer simulierten Stichprobe berechnet [72]. Nach *Schneider & Schlatter* [39] handelt es sich hierbei bei Vorliegen geeigneter Software um die verständlichste und Ingenieuren am besten zugänglichste Methode. Wichtigster Bestandteil dieser Methode sind generierte Zufallszahlen  $x_i$  die stochastisch unabhängig und in Form einer genügend großen Stichprobe vorliegen müssen. Weiter müssen diese Zufallszahlen mögliche Realisierungen der Zufallsgröße  $X_i$  sein. Die Häufigkeitsverteilung der Zufallsvariablen muss nach *Spaethe* [63] gegen eine vorgegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F_{xi}$  konvergieren.

Bei dieser Methode muss eine große Anzahl an Daten verarbeitet werden. Vor allem wenn Grenzzustandsgleichungen komplex sind, entstehen große Rechenzeiten. Dies ist nach *Glowienka* [72] mit der im Bauwesen angestrebten geringe Versagenswahrscheinlichkeit und der damit einhergehenden hohen Anzahl nötiger Versuche verbunden.

Zufallszahlen werden von Zufallsgeneratoren erzeugt. Zur Bestimmung der Tragwerkszuverlässigkeit werden Programme verwendet, welche die Zufallszahlen mittels sogenannter Rekursionsformeln generieren. Die erzeugten Zufallszahlen besitzen dadurch nur eine begrenzte Zufälligkeit, da die letzte erzeugte Zufallszahl zur Generierung einer weiteren verwendet wird. Dadurch entsteht eine gewisse Periodizität. Sie werden deshalb auch Pseudozufallszahlen genannt. Nach *Spaethe* erfolgt die Erzeugung von Zufallszahlen immer in zwei Schritten: 1. Erzeugung, 2. Transformation. Die erzeugten Variablen  $r$  sind im Intervall  $[0,1]$  gleichverteilt. Anschließend werden sie in die gesuchten  $x_i$  transformiert.

Diese Transformation bildet aus den gleichverteilten Zufallszahlen, Zufallszahlen anderer Verteilungsfunktionen. Die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich bei Anwendung der Monte-Carlo-Methode zu

$$P_f = \frac{x}{N} \quad (3.35)$$

mit der Anzahl der Versagensereignisse  $x$  und der Anzahl der Gesamtversuche  $N$ . Der Variationskoeffizient der Versagenswahrscheinlichkeit ist für kleine  $P_f$  nach *Schneider & Schlatter* [39]

$$V_{P_f} = \frac{1}{\sqrt{x \cdot P_f}} \quad (3.36)$$

mit  $x$  der Gesamtzahl der Realisationen. Ob die generierten Zufallszahlen im Versagensbereich liegen, wird durch Einsetzen in die Grenzzustandsgleichung geprüft.

In der Literatur sind weiterentwickelte Verfahren der *Monte-Carlo-Simulation* zu finden, bei denen die Realisationen im interessierenden Bereich gehäuft werden („Importance Sampling“ Methoden). Weiterführende Hinweise können z.B. dem *JCSS Probabilistic Model Code* [59] entnommen werden.

Ein Berechnungsbeispiel zur *Monte Carlo Methode* wird in Anhang 10.2.3 (S. 11 ff.) dargestellt.

### **Numerische Integration**

Auch mit numerischer Integration lassen sich Versagenswahrscheinlichkeiten probabilistisch exakt bestimmen. Hier wird nach *Glowienka* [72] das mehrdimensionale Integral

$$P_f = \int \dots \int_{g(x_1, \dots, x_n)} f_x(x_1, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (3.37)$$

exakt berechnet. Die Berechnung kann nur numerisch erfolgen, es sei denn es liegt vollständige Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsfunktionen aller Basisvariablen vor. Sind die Variablen normalverteilt und ist die Grenzzustandsfunktion linear, kann nach *Fischer* [64] eine analytische Berechnung durchgeführt werden. Diese Voraussetzungen sind jedoch in den wenigsten Fällen erfüllt. Eine genaue Kenntnis aller Basisvariablen ist kaum denkbar. Weiter können nur wenige Basisvariablen als normalverteilt modelliert werden. Eine analytische Lösung ist somit kaum möglich.

Wie auch bei der *Monte-Carlo-Methode* liegt bei der numerischen Integration der Nachteil darin, dass der Berechnungsaufwand überproportional mit der Variablenanzahl zunimmt [72]. Demzufolge ist die Anwendung dieser Methode nur dann effizient, wenn wenige Basisvariablen zu betrachten sind (nach *Fischer* [64]  $\leq 5$ ). Außerdem stellen die im Bauwesen angestrebten kleinen Wahrscheinlichkeiten nach *Hohenbichler* [82] ein Problem für diese Berechnungsweise dar.

### **3.4.5 Stufe 4 – Probabilistische Kostenoptimierung**

Bei probabilistischer Optimierung ist die Berücksichtigung von Konstruktions- und Versagenskosten möglich. Das Konzept kann beispielsweise bei *Drvin* [83] oder *Klingmüller & Bourgund* [84] nachgelesen werden. Weitere Informationen finden sich auch bei *Plate* [62], *Baravalle* [85], *Sýkora et al.* [86] und *Holický et al.* [77].

Die Gesamtkosten bestehen aus Konstruktionskosten und Versagenskosten. Die erwarteten Gesamtkosten  $E[C_{tot}](h)$  können nach Köhler [87] mit dem Zusammenhang

$$E[C_{tot}](z_d) \approx C_{constr}(z_d) + E[C_{f,ULS}](z_d) = [C_0 + C_I z_d] + [C_{constr}(z_d) + H]P_f(z_d) \quad (3.38)$$

abgebildet werden. Dabei ist  $z_d$  der Bemessungsparameter,  $C_{constr}(z_d)$  sind die Konstruktionskosten in Abhängigkeit vom Bemessungsparameter,  $E[C_{f,ULS}]$  die Versagenskosten,  $C_0$  die Errichtungskosten,  $C_I z_d$  die Kosten der Veränderung des Bemessungsparameters, welche einen Anstieg der Zuverlässigkeit zur Folge hat,  $C_{constr}(z_d)+H]P_f(z_d)$  die Versagenskosten in Abhängigkeit von der Versagenswahrscheinlichkeit und  $E[C_{tot}](z_d)$  die erwarteten Gesamtkosten in Abhängigkeit vom Bemessungsparameter. Die Versagenskosten setzen sich in diesem Modell aus den Konstruktionskosten und den Kosten für die Schädigung von Menschen, multipliziert mit der Versagenswahrscheinlichkeit, zusammen. Die Quantifizierung der Kosten für die Verletzung von Leib und Leben ist neben dem Problem der Quantifizierung natürlich auch ein moralisches Problem. Ein Beispiel zur Anwendung des Konzeptes findet sich in Anhang 10.2.4 (S. 12).

Die Modellierung der zu erwartenden Kosten stellt im Rahmen der Ableitung von Sicherheitselementen eine Herausforderung dar, da jede Bemessungssituation gesondert berücksichtigt werden muss. Bei bestehenden Konstruktionen wird der Anstieg der Konstruktionskostengerade im Vergleich zum Neubau stärker. Damit verschiebt sich das Optimum nach links. Somit kann häufig nur durch eine umfassende, finanziell intensive Verbesserung einer bestehenden Konstruktion das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie im Neubau erzielt werden, siehe auch *Diamantidis & Bazzurro* [88].

### 3.5 Normative Umsetzung des Bemessungskonzeptes mit Grenzzuständen

#### 3.5.1 Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1990:2010-12 und

#### *DIN EN 1995-1-1:2010-12 bzw. DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08*

Für die Ingenieurpraxis werden in der Normung Teilsicherheitsbeiwerte festgelegt. Der Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen  $\gamma_F$  ist nach Gl. (3.39)

$$\gamma_F = \gamma_f \cdot \gamma_{sd} \quad (3.39)$$

mit  $\gamma_f$  dem Sicherheitsbeiwert für Unsicherheiten der repräsentativen Werte der Einwirkungen und  $\gamma_{sd}$  dem Sicherheitsbeiwert für Modellunsicherheiten bei den Einwirkungen und Auswirkungen der Einwirkungen. Der Teilsicherheitsbeiwert für Widerstandsgrößen  $\gamma_M$  ist nach Gl. (3.40)

$$\gamma_M = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd} \quad (3.40)$$

mit  $\gamma_m$  dem Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Unsicherheit der Baustoffeigenschaften und  $\gamma_{Rd}$  dem Sicherheitsbeiwert für Modellunsicherheit bei den Bauwerkswiderständen.

Auf **Einwirkungsseite** wird der Teilsicherheitsbeiwert allgemein mit  $\gamma_f$  oder  $\gamma_F$  bezeichnet. Der Index mit kleinem Buchstaben bezieht nach *DIN EN 1990:2010-12* „die Möglichkeit einer ungünstigen Abweichung der Einwirkung gegenüber den repräsentativen Werten“ ein [16, S. 21]. Das große  $F$  im Index

berücksichtigt Modelunsicherheiten und Größenabweichungen [16]. Die Werte für Deutschland sind der *DIN EN 1990/NA:2010-12* [89] zu entnehmen. Sie sind von der Art des Nachweises abhängig (Lagesicherheit, Versagen des Tragwerks/ der Gründung, Baugrundversagen), in welcher Bemessungssituation gerechnet wird und ob die Einwirkung stabilisierend oder destabilisierend wirkt. Die charakteristischen Werte der Einwirkungen werden mit diesen Faktoren multipliziert, um die entsprechenden Designwerte zu erhalten.

Nach *Spaethe* [63] erfasst der Lastfaktor die natürlichen Streuungen der Lasten in Form entsprechender Verteilungen, Ungenauigkeiten im stochastischen Lastmodell und Abweichungen von den normalen Nutzungsbedingungen. Für ständig wirkende Lastanteile werden zwei Faktoren festgelegt, ein Wert  $> 1$  für ungünstig wirkende und ein Wert  $\leq 1$  für günstig wirkende Lasten. Veränderliche Lasten werden nicht berücksichtigt, wenn sie entlastend wirken. Da es sich bei den anzusetzenden Einwirkungen um Extremwerte handelt, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass beim Wirken mehrerer veränderlicher Einwirkungen alle mit ihrem Maximalwert auftreten. Aus diesem Grund werden die nicht führenden Einwirkungen bei Lastkombinationen mittels Kombinationsbeiwerten  $\psi_i$  abgemindert [16].

Laut *DIN EN 1990:2010-12 Abschnitt A1.3.1, Tab. A1.2(A)* können „im Sonderfall [...] die Werte  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  in  $\gamma_g$  und  $\gamma_q$  und die Werte  $\gamma_{sd}$  für die Modellunsicherheit aufgeteilt werden. In den meisten Fällen kann für  $\gamma_{sd}$  ein Wert im Bereich von 1,05 bis 1,15 verwendet werden, wobei diese Festlegung im *Nationalen Anhang* geändert werden kann“ [16, S. 48]. Im deutschen *Nationalen Anhang* [89] wird von der Möglichkeit der Aufteilung in Einzelfaktoren nicht Gebrauch gemacht.

Der Materialfaktor  $\gamma_M$  berücksichtigt Unsicherheiten infolge der Streuungen der Material- und Bodeneigenschaften, also auf **Widerstandsseite**. Dieser Faktor kann nach *Spaethe* [63] in Teilfaktoren aufgeteilt werden, die Einflüsse, wie Streuung der Festigkeit und der Umrechnungsfaktoren, Genauigkeit des Modells, Vorankündigung des Bruches, Qualitätssicherungs- und Kontrollmaßnahmen und Versagensfolgen berücksichtigen. Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe, Bauprodukte und Bauteile werden in den werkstoffspezifischen Normen festgelegt. Für Holzbauteile beträgt der Faktor zur Berücksichtigung der Festigkeitsstreuungen nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] bzw. *DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08* [91] bzw. *DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08* [91]  $\gamma_M = 1,3$ , lediglich beim Plattennachweis für Nagelplatten ist  $\gamma_M = 1,25$ . Geometrische Angaben sind nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] als charakteristische Werte zu verwenden. Die Norm enthält Hinweise zur Berechnung der Bemessungswerte bei verschiedenen Verteilungsfunktionen. Nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C, Absatz C.3* [16] gilt für die Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte Folgendes: „(2) Prinzipiell können Zahlenwerte für Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte auf folgende Weise bestimmt werden:

- a) durch Kalibrierung an der bisherigen Erfahrung;

ANMERKUNG Die meisten Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte in den derzeit verfügbaren Eurocodes sind auf diese Weise entstanden

- b) durch statistische Auswertung von Versuchsergebnissen oder Messungen (Dieses ist im Rahmen probabilistischer Vorgehensweisen erforderlich.).“ [16, S. 86]

Eine Kombination beider Verfahren ist zulässig, dabei sollen die Kalibrierungen an repräsentativen Tragwerken durchgeführt werden und darauf geachtet werden, dass der Zielzuverlässigkeitsindex möglichst gut angenähert wird [16]. Wie Unterpunkt a) zeigt, wurden Teilsicherheitsbeiwerte vor allem anhand von Erfahrungen kalibriert.

Die Anzahl der verwendeten Sicherheitsbeiwerte in einer Normung beeinflusst die Optimalität der Bemessung. Abb. 3.17 nach *Spaethe* [63] stellt die Abnahme des relativen Materialverbrauchs bei wachsender Flexibilität des Normformates dar.

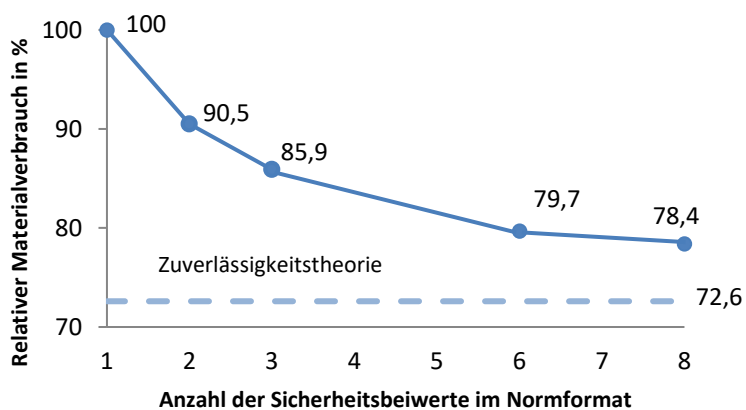


Abb. 3.6: Abnahme des relativen Materialverbrauchs mit wachsender Flexibilität des Normformates bei gleicher zuverlässiger Versagenswahrscheinlichkeit aus *Spaethe* [63]

Aus der Abbildung geht hervor, dass mit Verwendung einer höheren Anzahl von Sicherheitsbeiwerten das Material rechnerisch besser ausgenutzt wird und der Verbrauch somit sinkt. Der mit „Zuverlässigkeitstheorie“ beschriftete Graph zeigt den Materialverbrauch, der bei individueller Bemessung aller Tragwerke nach Zuverlässigkeitstheorie theoretisch erreicht werden könnte [63]. Trotz einer Reduktion des relativen Materialverbrauchs bei höherer Anzahl an Teilsicherheitsbeiwerten muss das Berechnungskonzept praktikabel bleiben. Zu viele Teilsicherheitsbeiwerte sind nicht mehr zweckmäßig. Nach *Reid* [66] sind die gewählten Zielzuverlässigkeiten empirisch festgelegt worden. Weiter muss betont werden, dass sich Abweichungen vom Zielzuverlässigkeitsniveau nicht vermeiden lassen, da die Anzahl der Teilsicherheitsbeiwerte und der Lastkombinationen aufgrund der besseren Handhabbarkeit reduziert werden müssen [92]. Nach *Thoft-Christensen & Baker* [93] sind deterministische Sicherheitsbeiwerte immer mit einer gewissen Willkürlichkeit behaftet, dies kann nicht vollständig vermieden werden. Dies trifft auch auf Beiwerte im semi-probabilistischen Konzept zu.

Nach *Sýkora et al.* [86] führt die Arbeit mit Teilsicherheitsbeiwerten bei der Bewertung von Konstruktionen im Bestand häufig zu sehr konservativen Lösungen, probabilistische Berechnungen seien für eine realitätsnahe Bewertung besser geeignet. Diese erfordern Fachkenntnis und bedeuten einen um-

fangreichen zeitlichen Aufwand zur Einarbeitung in die Thematik, die in der täglichen Praxis nicht gegeben ist. Dies unterstreicht die Bedeutung der Weiterentwicklung des bestehenden Konzeptes an die speziellen Bedürfnisse des Bestandsbaus.

### **3.5.2 Anpassungsmöglichkeiten für Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1990:2010-12**

#### **Kombinationsregel nach Abs. 6.4.3.2(3)**

Die *DIN EN 1990:2010-12* [16] gibt in Absatz 6.4.3.2 Satz 3 alternative Kombinationsregeln an. Hervorzuheben ist Gl. 6.10b. Hier kann der Teilsicherheitsfaktor der ständigen Last mit einem Faktor  $\xi = 0,85$  abgemindert werden, wenn die Last nicht dominierend wirkt. So ergibt sich ein abgeminderter Faktor von  $\gamma_G = 1,15$ . Der *Nationale Anhang* [89] lehnt diese Kombinationsregel für Deutschland jedoch ab.

#### **Anpassung der Zielzuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Schadensfolgeklasse**

Eine wichtige Grundlage im wahrscheinlichkeitstheoretischen Berechnungsmodell ist die Einordnung des Tragwerks in eine der drei Schadensfolgeklassen *CC 1*, *CC 2* und *CC 3*. Diese sind in *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B* [16] definiert und direkt mit den Zuverlässigkeitsklassen *RC 1*, *RC 2* und *RC 3* verknüpft (*CC 1* → *RC 1*; *CC 2* → *RC 2*; *CC 3* → *RC 3*). Die Schadensfolgeklassen werden nach den Folgen für Menschenleben und wirtschaftlichen, sozialen und umweltbeeinträchtigenden Folgen klassifiziert. Zur Klasse *CC 3* gehören öffentliche Gebäude und Tribünen, zur Klasse *CC 2* Wohn- und Bürogebäude und zur Klasse *CC 1* landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr. In der kommenden Novellierung des Eurocodes werden eine Klasse *CC 0*, sowie eine Klasse *CC 4* enthalten sein, die für übliche Ingenieuraufgaben jedoch keine praktische Relevanz besitzen.

In Abhängigkeit von den Zuverlässigkeitsklassen kann nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang B* [16] der Sicherheitsindex verringert werden, wie Tab. 3.3 zeigt. Damit können Teilsicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit von der Zuverlässigkeitsklasse angepasst werden. Bei niedrigen Schadensfolgen ergibt sich so eine Abminderung, bei umfangreichen Folgen eine Erhöhung des Teilsicherheitsfaktors. In Bereichen mit geringem Personenverkehr, zum Beispiel bei landwirtschaftlichen Gebäuden, lassen sich durch die wirtschaftlichere Ausführung Einsparpotentiale realisieren [74].

#### **$K_{FI}$ -Faktoren in Abhängigkeit von Schadensfolgeklassen**

Die *DIN EN 1990:2010-12* [16] ermöglicht die Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten auch direkt. Dazu werden  $K_{FI}$ -Faktoren (FI-Force Importance, Tab. 3.2) eingeführt, welche mit den Teilsicherheitsbeiwerten auf Einwirkungsseite verwendet werden können. Die Faktoren sind von der Zuverlässigkeitsklasse abhängig. Bei Einstufung des Tragwerks in die Klasse *RC 1* oder *RC 3* ergeben sich Anpassungen des Teilsicherheitsbeiwertes. Dies ist nur bei ungünstig wirkenden Einwirkungen anzusetzen.

Tab. 3.2:  $K_{FI}$ -Faktoren für Einwirkungen, aus *DIN EN 1990:2010-12*, Tab. B.3 [16]

$K_{FI}$ -Beiwert für Einwirkungen	Zuverlässigkeitsklasse		
	RC 1	RC 2	RC 3
$K_{FI}$	0,9	1,0	1,1

ANMERKUNG Zur Erreichung der Zuverlässigkeitsklasse RC 3 werden in der Regel andere Maßnahmen als die Anwendung des  $K_{FI}$ -Faktors vorgezogen. Der  $K_{FI}$ -Faktor ist nur auf ungünstige Einwirkungen anzuwenden.

Eine genaue Berechnung der  $K_{FI}$ -Faktoren ist möglich, wodurch sich weitere Abminderungen ergeben können. Hier wird dazu auf die Literatur verwiesen, z.B. *Pertermann et al.* [74]. Diese Möglichkeit berücksichtigt jedoch keine menschlichen Fehler bei Planung und Herstellung [74]. Deshalb sind Überwachungsmaßnahmen bei Planung und Herstellung Voraussetzung für die Differenzierung. Die *DIN EN 1990:2010-12* [16] weist weiter explizit darauf hin, dass eine Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten auf Widerstandsseite bei höheren Überwachungsmaßnahmen und Anwendung höherer Schadensfolgeklassen möglich sei. Der *Nationale Anhang* [89] ersetzt die Tabellen zu den Anforderungen an Überwachungsmaßnahmen. So wird z.B. die bauaufsichtliche Überwachung der Planung eingeführt. Nach *Nationalem Anhang NDP zu A.1.3.1(1)* [89] können die  $k_{FI}$ -Faktoren auch in Deutschland angewendet werden. Dies ist prinzipiell auch für Bestandsbauten möglich, da die Einteilung nach den genannten Kriterien ebenso möglich ist, dies erfolgt in der Regel in der Praxis jedoch nicht. In dieser Arbeit wird sich auf die Zuverlässigkeitsklasse 2 konzentriert. Da der Ausweis modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte in dieser Arbeit abhängig von der Zielzuverlässigkeit erfolgt, können angepasste Werte für andere Schadensfolgeklassen abhängig vom Zielwert aus den Ergebnissen abgelesen werden.

### 3.5.3 Werte für die probabilistische Modellbildung nach *DIN EN 1990:2010-12*

#### Zielzuverlässigkeit

*DIN EN 1990:2010-12* legt Mindestwerte für  $\beta$  fest und unterscheidet in Bezugszeiträume von einem oder 50 Jahren, sowie in drei beschriebenen Zuverlässigkeitsklassen (Tab. 3.3). Es wird festgelegt, dass in der Regel mit einem Mindestwert von  $\beta = 3,8$  zu arbeiten ist.

Tab. 3.4 gibt den anzusetzenden Wert in Abhängigkeit von der Art des Grenzzustandes an.

Tab. 3.3: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  aus *DIN EN 1990:2010-12* [16]

Zuverlässigkeits-Klasse	Mindestwert für $\beta$	
	Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
RC 3	5,2	4,3
RC 2	4,7	3,8
RC 1	4,2	3,3

ANMERKUNG Die Bemessung nach EN 1990 mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach Anhang A sowie nach EN 1991 bis EN 1999 führt in der Regel zu einem Tragwerk mit einer Mindestzuverlässigkeit  $\beta \geq 3,8$  für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren. Größere Zuverlässigkeitsklassen als RC 3 werden in diesem Anhang nicht weiter betrachtet, da für die betroffenen Bauteile Sonderuntersuchungen angestellt werden müssen.

Tab. 3.4: Zielwert des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für Bauteile<sup>a</sup> mit RC 2 –Anforderungen aus DIN EN 1990:2010-12 [16]

Grenzzustand	Zielwert der Zuverlässigkeit	
	1 Jahr	50 Jahre
Tragfähigkeit	4,7	3,8
Ermüdung		1,5 bis 3,8 <sup>b</sup>
Gebrauchstauglichkeit (nicht umkehrbar)	2,9	1,5

<sup>a</sup> Siehe Anhang B

<sup>b</sup> Abhängig von der Zugänglichkeit, Wiedereinsetzbarkeit und Schadenstoleranz

Bei der Wahl der Zielzuverlässigkeit ist das zu erwartende Risiko des Versagens als Folge für die Gesellschaft zu beachten. Die gesellschaftliche Akzeptanz dieses Risikos spielt nach *Spaethe* [63] ebenso eine Rolle. *Starr* [66] formuliert einige Hypothesen dazu:

- (1) Risiken, die Menschen freiwillig übernehmen, sind in der Regel 1000-mal größer, als aufgezwungene Risiken;
- (2) das Risiko, das durch die Gefahr an einer Krankheit zu sterben ausgelöst wird, scheint ein psychologischer Maßstab zur Bewertung anderer Risiken zu sein;
- (3) die Bereitschaft Risiken zu übernehmen, scheint direkt proportional zur Kraft der (realen oder erwarteten) Vorteile zu sein;
- (4) die soziale Bereitschaft zur Aufnahme von Risiken wird direkt durch die öffentliche Wahrnehmung der Vorteile der Aktivität beeinflusst.

Nach *Faber & Stewart* [65] kann natürlich nur identifiziertes potentielles Risiko einbezogen werden. Es fällt auf, dass das Zuverlässigkeitsniveau bei einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr größer ist, als bei 50 Jahren. Das resultiert daraus, dass die Wahrscheinlichkeit des Versagens bei einem kürzeren Zeitraum geringer ist und somit ein höheres Zielzuverlässigkeitsniveau gefordert wird. Die Gefahr der Überschreitung der Einwirkungen bleibt dabei nach *Pertermann, Puthli & Ummenhofer* [94] gleich, da die charakteristischen Werte veränderlicher Einwirkungen abhängig vom Bezugszeitraum sind.

### Sensitivitätsfaktoren

Die Sensitivitätsfaktoren dürfen nach DIN EN 1990:2010-12 [16] (siehe auch *Thoft-Christensen & Baker* [93]) vereinfacht mit  $\alpha_R = 0,8$  und  $\alpha_E = -0,7$  verwendet werden, wenn Gl. (3.41) eingehalten ist

$$0,16 < \sigma_E / \sigma_R < 7,6 \quad (3.41)$$

Durch diese Festlegung werden nach *Pertermann, Puthli & Ummenhofer* [95] Einwirkungs- und Widerstandsseite in der Grenzzustandsfunktion entkoppelt. Jedoch entsteht dadurch eine Vereinfachung und größere Ungenauigkeit des Modells.

### 3.5.4 Unsicherheitsquellen

#### Grundlegendes

Unsicherheitsquellen können als *epistemisch* oder *aleatorisch* klassifiziert werden. *Epistemische* Unsicherheiten, vom griechischen *episteme* = Wissen, lassen sich durch einen vergrößerten Datenumfang oder verfeinerte Modelle reduzieren, da sie durch einen Wissensmangel entstehen [68], sie können



nach *Proske* [96] auch aus beschädigten Stichproben resultieren. *Aleatorische* Unsicherheiten können vom Standpunkt des Modellierenden nicht reduziert werden, da sie Unsicherheiten innerhalb des Modells darstellen [68]. Nach *Der Kiureghian & Ditlevsen* [68] stammt das Wort vom lateinischen *alea*, das Rollen der Würfel.

Die Absolutheit dieser Einteilung ist zu hinterfragen. Nach *Der Kiureghian & Ditlevsen* [68] ist die Klassifizierung einer Unsicherheitsquelle als epistemisch oder aleatorisch vom Modell abhängig. Auch der Übergang von der einen zur anderen Form während der Modellanalyse ist möglich. Somit zeigt die Einteilung prinzipiell nur, an welchen Stellen Verfeinerungsmöglichkeiten des Modells bestehen. Es ist davon auszugehen, dass in der Zukunft immer mehr Unsicherheitsquellen nicht mehr aleatorisch, sondern epistemisch eingeordnet werden können.

*ISO 2394:2015* [41] und auch der *JCSS Probabilistic Model Code Part 1* [59] listen die folgenden Unsicherheitsquellen, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

- Normale, natürliche Variabilität bzw. physikalische/ mechanische Unsicherheiten
- Statistische Unsicherheiten
- Maßunsicherheiten
- Modellunsicherheiten
- Unsicherheiten bzgl. neuen Informationen

### ***Unsicherheiten auf der Widerstandsseite***

#### ***Physikalische Unsicherheiten***

Physikalische Unsicherheiten umfassen die spezifischen Gegebenheiten des Materials, dies betrifft nach *Madsen* [97] vor allem die Materialschwankungen zwischen Proben aus dem gleichen Material. Bei Holz ist diese Unsicherheit vor allem auf den strukturellen Aufbau und damit auf die natürliche Inhomogenität des Werkstoffes zurückzuführen. Somit ergeben sich Schwankungen der Festigkeit in axialer, radialer und tangentialer Richtung.

#### ***Statistische Unsicherheiten***

Die Unsicherheiten bei der Messung der physikalischen Größen werden unter der statistischen Unsicherheit zusammengefasst. Nach *Fischer* [64] umfassen sie auf Widerstandsseite

- Schätzung von Parametern aus kleinen Stichproben
- Festlegung von Verteilungen
- Festlegung von Grenzzuständen
- Deterministische Festsetzung von Variablen zur Reduzierung des Rechenaufwandes
- Vereinfachungen bei der statistischen Analyse (lineare Grenzzustandsfunktion, Unabhängigkeit von Einwirkung und Widerstand oder einzelnen Grenzzuständen, wie Biegung/ Schub)
- Messungenauigkeiten

- Vernachlässigung von unbekanntem Korrelationen

Eine Methode zur Reduktion der statistischen Unsicherheit ist nach *Madsen* [97] das Bayes'sche Updating (siehe dazu Anhang Kap. 10.5.4, S. 22 ff.).

### **Modellunsicherheiten**

Die Bildung von Modellen ist nach *Der Kiureghian & Ditlevsen* [68] immer an große Subjektivität geknüpft. Nach *Madsen* [97] entstehen Modellunsicherheiten aufgrund zweier Hauptursachen: Zum einen muss die Anzahl der Basisvariablen auf ein überschaubares Maß reduziert werden, um das Modell praktikabel zu halten, wodurch eine Idealisierung entsteht. Zum anderen können unbekannte Zusammenhänge zwischen den Basisvariablen nicht berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass bei der Aufstellung von Modellen Einflüsse bewusst und unbewusst vernachlässigt werden. Dazu gehören auch Vereinfachungen, wie beispielsweise über den Querschnitt als konstant angenommene Größen (z.B. Festigkeitsgrößen). Es entstehen Abweichungen zwischen theoretischen Berechnungen und praktischen Versuchen. Diese Unschärfen müssen nach *Schneider & Schlatter* [39] bei der Modellbildung berücksichtigt werden. Dabei sind Modellunschärfen stets subjektiv zu schätzende Größen [39].

### **Unsicherheiten auf der Einwirkungsseite**

Auf Einwirkungsseite umfassen Modellunsicherheiten unter anderem, ob die veranschlagten Belastungen tatsächlich in dieser Höhe auftreten und ob die angenommenen Zeiträume zwischen Wiederholungsdauern bei veränderlichen Lasten eingehalten werden. Mögliche Einflussgrößen sind:

- Unsicherheit über tatsächliche Höhe veränderlicher Belastungen
- Berücksichtigung von Verbindungsmitteln als pauschale Zuschläge zum Eigengewicht
- Unsicherheit über tatsächliche Wiederholungsdauer veränderlicher Belastungen
- Unsicherheit über tatsächliche Belastungsdauer veränderlicher Belastungen
- Unsichere Zeiträume zwischen Belastungswiederholungen
- Außergewöhnliche Belastungen, die bei normaler Bemessung nicht berücksichtigt werden
- Gewichtszunahme bei erhöhter Feuchte

Deutlich wird durch diese beispielhafte Zusammenstellung, dass eine Vielzahl von Unsicherheiten in der Bemessung vorhanden ist. Auch im Rahmen wahrscheinlichkeitstheoretischer Betrachtungen können nur Teile dieser Unsicherheiten berücksichtigt werden.

Bei der Realisierung eines Bauwerkes werden nach *Der Kiureghian & Ditlevsen* [78] aleatorische Unsicherheiten in epistemische überführt, da am konkreten Bauwerk Messungen zur Reduktion dieser Unsicherheiten durchgeführt werden können. Demzufolge wird der Informationsumfang deutlich erhöht. Nach *Der Kiureghian & Ditlevsen* [78] wurde dieser Aspekt in einer Vielzahl der Fachveröffentlichungen zur Zuverlässigkeitsanalyse vernachlässigt.

## 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

### 4.1 Grundlagen zur Modellierung von Einwirkungen

#### 4.1.1 Allgemeines

Die Modellierung der Einwirkungen ist nach *Melchers* [36] der mit der größten Unsicherheit behaftete Aspekt in der gesamten Zuverlässigkeitsanalyse. Ein allgemeines Vorgehen zum Aufbau des probabilistischen Modells für eine spezielle Last kann nach *Melchers* [36] wie folgt aussehen:

- (1) Identifikation und Definition der Zufallsvariablen, die genutzt werden können, um die Unsicherheiten bei der Lastbeschreibung zu repräsentieren,
- (2) Auswahl passender Verteilungsfunktionen für jede Basisvariable,
- (3) Wahl der Parameter der Verteilung mit verfügbaren Daten und Standardparameter aus Parameterschätzung [36].

Die Variabilität der Einwirkungen kann räumlicher und zeitlicher Art sein. Eine Modellierung erfolgt mit Zufallsvariablen, Zufallsfeldern oder Zufallsprozessen. Zur Modellierung veränderlicher Einwirkungen in der Zuverlässigkeitsanalyse werden Extremwertverteilung verwendet. Die benötigten Parameter werden aus der Modellierung mittels stochastischen Prozessen bzw. stochastischen Feldern gewonnen, welche in Extremwertverteilungen überführt bzw. durch diese angenähert werden.

Bei einigen Einwirkungen müssen die Werte dazu zunächst in die entsprechend benötigten Kräfte überführt werden. Die Streuungen veränderlichen Einwirkungen sind deutlich höher, als die der ständigen Einwirkungen. Letztere lassen sich aufgrund geringer bis keiner zeitlicher und räumlicher Variabilität genauer bestimmen. Einwirkungen werden somit in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen eingeteilt. In dieser Arbeit wird sich auf ständige, sowie veränderliche Einwirkungen aus Wind, Schnee und der üblichen Nutzung konzentriert.

#### 4.1.2 Last und Lastwirkung

Zur Modellbildung für die räumliche Wirkung von Lasten sind besonders die Nutzlasten von Interesse, da ihr räumliche Wirkung nach *Schneider & Schlatter* [39] über mehrere Stockwerke hinweg gehen kann. Zufällige räumliche Verteilungen werden durch deterministische Gleichverteilungen ersetzt. Die räumliche und zeitliche Filterung erfolgt mathematisch nach *Rackwitz* [98] mit

$$S_j(A, t) = \int_A i(x, y) L(x, y, t) dx dy \quad (4.1)$$

Dabei ist  $i(x, y)$  die Einflussfläche der Lastwirkung  $S_j$  und  $L(x, y, t)$  die zeitlich räumlich zufällige Intensität. Für die deterministisch äquivalente Last wird aus der zufälligen Last in der Regel die maximale Last bemessungsmaßgebend [98]. Für den statischen Fall gilt

$$\int_A l(x, y, L_{equ}(t)) i(x, y) dA = \int_A L(x, y, t) i(x, y) dA \quad (4.2)$$

mit  $I(x, y, L_{equ}(t))$  dem standardisierte Lastbild und  $L_{equ}(t)$  als Skalierungsvektor. Die standardisierte Last soll eine vergleichbare Lastwirkung hervorrufen, wie die reale Last. Dies ist nur näherungsweise möglich, da der Skalierungsvektor abhängig von der Einflussfläche ist. Auch dynamische Lasten werden so in einigen Fällen durch quasi-statische Ersatzlasten ersetzt. Demzufolge dienen diese Lastannahmen nicht der Abbildung der physikalisch exakten Belastung, sondern versuchen nach *Rackwitz* [98] vielmehr den Filtereffekt des Tragwerks darzustellen. Dabei sind Erwartungswert  $E[S_j(A)]$  und Varianz  $Var[S_j(A)]$  der zufälligen Last  $L(x, y)$  ohne den Parameter  $t$  nach *Rackwitz* [98]

$$E[S_j(A)] = E \left[ \int_A i_j(x, y) L(x, y) dx dy \right] = E[L(x, y)] \int_A i_j(x, y) dx dy \quad (4.3)$$

$$Var[S_j(A)] = Cov \left[ \int_A i_j(x_1, y_1) L(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \int_A i_j(x_2, y_2) L(x_2, y_2) dx_2 dy_2 \right] \quad (4.4)$$

$$Var[S_j(A)] = \int_A \int_A i_j(x_1, y_1) i_j(x_2, y_2) Cov[L(x_1, y_1), L(x_2, y_2)] dx_1 dy_1 dx_2 dy_2$$

Aus Gründen der Handhabbarkeit wird das stochastische Zufallsfeld als homogen angenommen. Erwartungswert  $E[L_{equ}]$  und Varianz  $Var[L_{equ}]$  der äquivalenten gleichförmigen Last vereinfachen sich zu Gl. (4.5) und Gl. (4.6) nach [98]:

$$E[L_{equ}] = E[L(x, y)] \quad (4.5)$$

$$Var[L_{equ}] = Var[L] \rho_0^2 \frac{\int_A i_j^2(x, y) dx dy}{\left[ \int_A i_j(x, y) dx dy \right]^2} \quad (4.6)$$

Nach *Glowienka* [72] wird für den Korrelationsradius  $\rho_0$  in der Praxis zumeist

$$\rho_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (4.7)$$

angenommen (Modell des weißen Rauschens<sup>2</sup>). Nach *Madsen et al.* [99] ist im Modell des weißen Rauschens eine große Anzahl unkorrelierter Lastimpulsen vorhanden. Dies hat denselben Effekt wie Lastimpulse, die nur über kurze Zeitintervalle korreliert sind. Das Modell ist für veränderliche Einwirkungen geeignet, da nur bei sehr kurzen Zeitintervallen davon auszugehen ist, dass sie korreliert sind.

In der Praxis werden die Einwirkungen durch einen repräsentativem Wert der Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben, den charakteristischen Wert, wobei die veränderlichen Einwirkungen in ihrer ungünstigsten Laststellung anzunehmen sind ( $T_{ref}$  ist eine geeignete Bezugszeit, z.B. 50 Jahre,  $p_k$  eine vorgegebene Überschreitungswahrscheinlichkeit). Die Definition ist nach *Rackwitz* [98].

$$p_k = P \left[ \max_{[0, T_{ref}]} L_{equ}(t) > q_k \right] \quad (4.8)$$

Wie in *Steck* [78] wird auch hier angenommen, dass Einwirkungen und die daraus resultierenden Schnittgrößen denselben Verteilungsfunktionen folgen und mit den gleichen Variationskoeffizienten anzusetzen sind.

<sup>2</sup> Nach *Rackwitz* [98] wird ein Prozess „Weißes Rauschen“ genannt, wenn das Leistungsspektrum über den gesamten Frequenzbereich einen konstanten Wert  $S_0$  annimmt. Der Begriff leitet sich aus der Analogie mit dem Frequenzinhalt des weißen Lichtes ab, welches alle Frequenzen umfasst.

### 4.1.3 Stochastische Prozesse zur Modellierung veränderlicher Einwirkungen

Da fast alle Einwirkungen stark in Zeit und/ oder Raum streuen, ist in der Regel eine Beschreibung mit einer Variablen mit vier Dimensionen (eine zeitliche, drei räumliche) nötig. Hierbei sind Vereinfachungen nötig. Eine Möglichkeit ist, das Zufallsfeld durch eine Zufallsvariable zu ersetzen. Für jede Einwirkung muss somit nach *Rackwitz* [98] ein eigenes geeignetes stochastisches Modell zur bestmöglichen Beschreibung gefunden werden. Für viele Einwirkungen bietet sich die Modellierung mittels stochastischer Prozesse an. Der Begriff des stochastischen Prozesses schließt nach *Plate* [62] sowohl die diskrete Folge von Daten, als auch stetige Zeitverläufe ein. Abb. 4.1 stellt eine beispielhafte diskrete Folge eines solchen Prozesses mit konstanten Lastdauern  $d$  und Niveaurate dar.

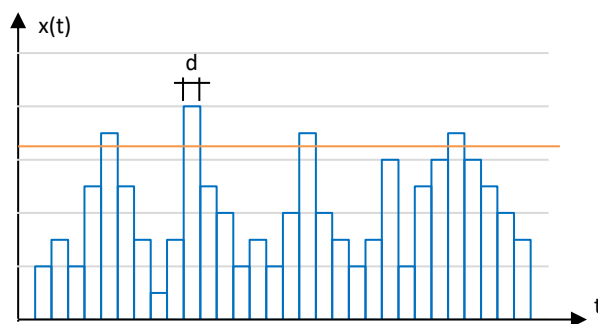


Abb. 4.1: Beispielhafte Zufallsfolge für einen Lastprozess mit diskreten Lastdauern aus *Spaethe* [63]

Nach *Spaethe* [63] ist ein stochastischer Prozess eine Funktion, „deren Wert für jedes Argument  $t$  eine Zufallsgröße ist“ und lässt sich damit als Menge von Zufallsgrößen  $\{X(t), t \in T\}$  beschreiben die Variable  $t$  ist nicht statistisch verteilt. Die Momente zur Beschreibung eines solchen stochastischen Prozesses sind nach *Spaethe* [63]:

Mittelwertfunktion:

$$E[X(t)] = m_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x; t) dx \quad (4.9)$$

Varianzfunktion:

$$\text{Var}[X(t)] = \sigma_x^2(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x(t))^2 f_x(x; t) dx \quad (4.10)$$

Ein stochastischer Prozess hat die allgemeine Verteilungsfunktion:

$$F_X(x, t) = P(X \leq x) \quad (4.11)$$

Die Charakterisierung eines stochastischen Prozesses mit allen Parametern ist für die Praxis zu komplex, weshalb sich nach [63] in der Regel auf die Betrachtung wichtiger numerischer Parameter beschränkt wird. Abb. 4.2 stellt einen solchen stetigen Lastprozess mit Kennzeichnung der Niveaurate, der Verteilungsfunktion der Momentan- und der Maximalwerte (Verteilung der über dem gekennzeichneten Niveau befindlichen Werte) für einen stetigen Prozess dar. In diesem Fall sind 10 positive Niveaureisungen zu erkennen. Die Anzahl der Niveaureisungen ist zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bei einem solchen Lastprozess von Interesse.

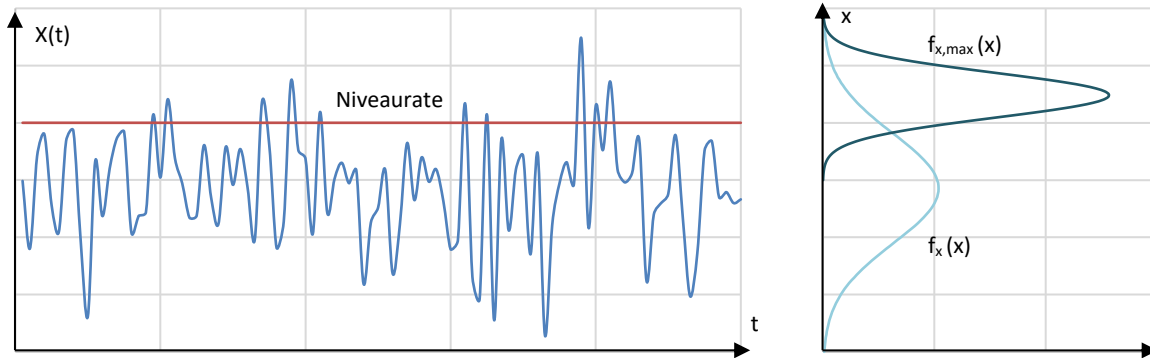


Abb. 4.2: Stetiger Lastprozess mit Niveaurate und Verteilungsfunktionen der Momentan- und Maximalwerte in Anlehnung an Spaethe [63] und Glowienka [72]

Für die Niveaurekrezungsrate werden nur die positiven Niveaurekrezungen (von unten nach oben) gezählt [63]. Es ist von Interesse, in welchen Zeitabständen  $T_R$  dieser Niveaurewert  $r$  überschritten wird.  $T_R$  kann die Werte  $j = 1, 2, 3, \dots$  annehmen, es handelt sich um eine diskrete Zufallsgröße. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass  $T_R = j$  ist, ist dadurch gekennzeichnet, dass in der Folge  $j-1$  Werte kleiner als  $r$  und dann einer größer als  $r$  ist [63]. Somit ist die Wahrscheinlichkeit durch

$$P(T_R = j) = [P(X \leq r)]^{j-1} \cdot P(X > r) = [F_X(r)]^{j-1} (1 - F_X(r)) \quad (4.12)$$

gegeben. Die Verteilungsfunktion von  $T_R$  ist

$$\begin{aligned} F_{T_R}(j) &= \sum_{i=1}^j P(T_R = i) = (1 - F_X(r)) \sum_{i=1}^j [F_X(r)]^{i-1} \\ &= (1 - F_X(r)) \frac{1 - [F_X(r)]^j}{1 - F_X(r)} = 1 - [F_X(r)]^j \end{aligned} \quad (4.13)$$

Der Mittelwert  $m_{T_R}$  der Wiederholungsperiode ist dann (vollständige Herleitung siehe Spaethe [63]):

$$m_{T_R} = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot P(T_R = j) = (1 - F_X(r)) \sum_{j=1}^{\infty} j F_X(r)^{j-1} = \frac{1}{1 - F_X(r)} \quad (4.14)$$

Aus der umgestellten Gleichung (4.14) lässt sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis mit der mittleren Wiederholungsperiode  $m_{T_R}$  im Zeitraum  $j$  Jahre eintritt, mit

$$F_{T_R}(j) = 1 - F_X^j = 1 - \left(1 - \frac{1}{m_{T_R}}\right)^j \quad (4.15)$$

berechnen [63]. Dabei bleibt die Wahrscheinlichkeit des Übersteigens des Niveaurewertes  $P(X > x)$  zu jeder Zeit gleich zu

$$P(X > x) = 1 - F_X(r) = \frac{1}{m_{T_R}} \quad (4.16).$$

Zur Charakterisierung eines stochastischen Prozesses wird auch die Niveaurekrezungsrate  $v^+(r)$  verwendet. Die mittlere Anzahl der Niveaurekrezungen für stetige Prozesse in einer Zeiteinheit berechnet sich nach Spaethe [63] mit Gl. (4.17)

$$v^+(r) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(X(t) < r \cap X(t + \Delta t) > r) \quad (4.17).$$

#### 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

Da es sich beim Bauwerksversagen um seltene Ereignisse handelt sind für die Festlegung der Niveauekreuzungsrate hohe Niveaus von Interesse, welche nur selten überschritten werden. Die Zahl des Eintretens dieser Ereignisse folgt einer Poissonverteilung [63]. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von  $m$  dieser seltenen Ereignisse ist

$$P(N^+(r) = m) = \frac{\lambda^m}{m!} \exp(-\lambda) \quad (4.18)$$

Mit  $\lambda = v^+(r)T$ , der mittleren Anzahl der Niveauekreuzungen je Zeiteinheit  $T$ , ergibt sich

$$P(N^+(r) = m) = \frac{(v^+(r)T)^m}{m!} \exp(-v^+(r)T) \quad (4.19)$$

Der Erwartungswert der Niveauekreuzungen für den allgemeinen Fall ist

$$E[N^+] = v^+(r, t)dt \quad (4.20)$$

Für den stationären Fall (zeitlich konstantes  $v^+$ ) ergibt sich

$$E[N^+] = v^+(r)T \quad (4.21)$$

Mit der Verteilungsfunktion der Extremwerte

$$F_{max X}(r) = P(max X(t) < r) = P(N^+(r) = 0) \approx \exp(-v^+(r)T) \approx 1 - v^+(r)T \quad (4.22)$$

wird nach *Spaethe* [63] der Zusammenhang zwischen Niveauekreuzungsrate  $v^+(r)$  und Extremwertverteilung  $F_{max X}(r)$  zu

$$v^+(r) \approx -\frac{1}{T} \ln F_{max X}(r) \approx \frac{1}{T} (1 - F_{max X}(r)) \quad (4.23)$$

bestimmt. Die Annahme der Poissonverteilung gilt nur für hohe Niveaus, nicht mehr für mittlere.

Im Bauwesen sind für die Modellierung von Nutzlasten Prozesse interessant, bei denen sich die Lasten an diskreten Zeitpunkten ändern bzw. auf null fallen. Dies kann nach *Spaethe* [63] mittels Erneuerungsprozessen erfolgen. Ein Beispiel für einen solchen Prozess mit Pausen gibt Abb. 4.3.

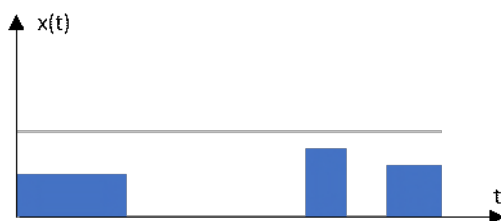


Abb. 4.3: Erneuerungsprozess mit Pausen in Anlehnung an *Spaethe* [63]

Erneuerungsprozesse müssen keine Rechteckform aufweisen. Eine Verallgemeinerung ist nach *Spaethe* [63] durch die Wahl anderer deterministischer Formen möglich. Ein gutes Hilfsmittel zur mathematischen Beschreibung dieser Prozesse ist der Poissonprozess mit der Definition [63]:

$$P(N(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.24)$$

mit der Anzahl  $N(t)$  der Erneuerungszeitpunkte  $t_n$ ,  $\lambda$  die Erneuerungsrate. Die Zeiten zwischen zwei Erneuerungen sind exponentialverteilt mit

$$F_D(t)P(D \leq t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (4.25)$$

Die Erneuerungsrate  $\lambda$  des Prozesses ist mit  $m_D$  als Mittelwert der exponentialverteilten Lastdauern:

$$\lambda = \frac{1}{m_D} \quad (4.26)$$

Weiter ist mit  $m_E$  als dem Mittelwert der Zeitintervalle zwischen den realen beobachtbaren Erneuerungspunkten die Wahrscheinlichkeit  $q$ , dass der Prozess gerade aktiv ist

$$q = \frac{m_D}{m_E} \quad (4.27)$$

Zur Modellierung dieser Belastungen werden den Zeitintervallen zufällige Lastintensitäten zugeordnet. Die Belastungen bleiben im Zeitintervall konstant und sind unabhängig voneinander. Die zufälligen Eigenschaften dieser Verteilung hängen von der Lastintensität und der Lasteintragszeit, bei dreiparametrischen Pulsprozessen zusätzlich von der Lastdauer, ab. Dabei wird unterschieden, ob die Belastung nach der Lasteintragszeit auf null sinkt, oder nicht. Bei letzterem erfolgt die Modellierung mittels zufälliger Erneuerungspunkte, an denen die Last jedoch null beträgt. [63]

#### 4.1.4 Modellierung zeitabhängiger Einwirkungen mit Extremwertverteilungen

Für die probabilistische Analyse werden die Extremwerte der Prozesse benötigt [72]. Eine vereinfachte jedoch in der Praxis ausreichend genaue Modellierung erfolgt mittels zeitveränderlicher Zufallsfolgen, wobei die Lastamplituden als stationär (unabhängig vom betrachteten Zeitpunkt), unabhängig voneinander und mit der Verteilungsfunktion der Momentanwerte abgebildet werden. Es entsteht ein Rechteckprozess mit sprunghaften Veränderungen der Lastamplituden [72]. Das Modell geht auf *Gumbel* [100] zurück. Gl. (4.9) wird nach *Rackwitz* [98] zu

$$E[X(t)] = m_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x) dx \quad (4.28)$$

mit Verteilungsfunktion  $F_y(x)$  und Verteilungsdichte  $f_y(x)$

$$F_y(x) = F_X^n(x) \quad (4.29)$$

$$f_y(x) = n(F_X(x))^{n-1} f_X(x) \quad (4.30)$$

Dies gilt für den Zeitraum  $[0, t]$  mit  $n = t/d$ . Es handelt sich um die Verteilung der Maximalwerte. Bei stationären Zufallsfolgen wächst in der Regel das Mittel  $m$  mit steigender Anzahl  $n$  an, die Streuung wird geringer. Für die Verteilung des Mittelwertes gibt es im Wesentlichen drei Extremverteilungen: die Weibullverteilung für die Maximal- oder Minimalwerte, die Gumbelverteilung und die Frechetverteilung. Laut *Rackwitz* [98] wird die Weibullverteilung für Maximalwerte zur Modellierung von Einwirkungen eher selten verwendet; die Weibullverteilung für Minimalwerte ist dagegen gut geeignet, da sie rechtsschiefe Verteilungen gut erfasst. Besonders häufig wird in der Zuverlässigkeitstheorie die Gumbelverteilung verwendet. Sie eignet sich besonders für die Modellierung in größeren Bezugszeiträumen, wie es bei der Betrachtung der Lebensdauer von Gebäuden nötig ist.

Die Transformation der Gumbelverteilung zwischen verschiedenen Bezugszeiträumen stellt eine Verschiebung auf der x-Achse dar. Dabei entspricht der 98%-Quantilwert der Verteilung bei  $T_{ref} = 1a$  dem Modalwert bei einem Bezugszeitraum von  $T_{ref} = 50a$ , siehe zum Beispiel *Grünberg* [101].



### 4.1.5 Stochastische Modellierung von Lastkombinationen

#### Vereinfachte stochastische Modellierung von Lastkombinationen nach Turkstra

Nach Turkstra [33] gilt für statistisch unabhängige Einwirkungen

$$E(S) = \sum_i E(S_i) \quad (4.31)$$

$$Var(S) = \sum_i Var(S_i) \quad (4.32)$$

Die Modellierung stochastischer Prozesse ist ein mathematisch anspruchsvolles Problem, für das wie beschrieben wenige mathematisch geschlossene Lösungen existieren. Daneben besteht die Möglichkeit, die Modellierung der Einwirkungskombinationen in ein zeitinvariantes Problem zu überführen.

In Normungen müssen Lastkombinationen nach *Diamantidis & Madsen* [102] folgende Anforderungen erfüllen: a) Einfachheit, b) Vollständigkeit, c) Exaktheit, d) Kompatibilität

Die Ziele in Punkt a) und Punkt d) sind mit der Modellierung in Form von stochastischen Prozessen nicht erzielbar, da sie für die tägliche Bemessung zu kompliziert sind. Es ist nicht wahrscheinlich, dass mehrere Einwirkungen gleichzeitig mit ihrem Maximum auftreten. Aus diesem Grund ist es üblich, eine Einwirkung mit ihrem Maximalwert und die anderen mit abgeminderten Einflüssen, bzw. denen, die zum Untersuchungszeitpunkt wahrscheinlichen, anzusetzen. Jede (veränderliche) Einwirkung wird so einmal als Leiteinwirkung betrachtet. Die maximale Beanspruchung ergibt sich somit aus dem maximalen Wert der untersuchten Kombinationen. Dies wird als *Regel von Turkstra* bezeichnet [33].

Es erfolgt eine Untersuchung zu diskreten Zeitpunkten  $t$  im Intervall  $[0, T]$ , statt einer kontinuierlichen Untersuchung. Die führende Last wird mittels Extremwertverteilung modelliert und die begleitende Last durch die Verteilung ihrer Momentanwerte überlagert. Von den Kombinationen der Anzahl  $n$  wird die mit der maximalen Größe maßgebend. Nach *Spaethe* wird die Zuverlässigkeit durch die *Turkstra-Regel* häufig überschätzt. Sie stimmt jedoch damit überein, dass Versagen zumeist beobachtet wurde, wenn eine der Einwirkungen ihr Maximum erreicht hatte und nicht durch eine ungünstige Kombination mehrerer Einwirkungen [63]. Für die Anwendbarkeit der *Turkstra-Regel* müssen die Einwirkungen unabhängig und die Versagenswahrscheinlichkeiten klein sein [64]. Laut *Melchers* [36] ist die *Turkstra-Regel* nicht für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit geeignet, da keine obere Grenze festgelegt wird und die Terme nicht vollständig unabhängig sind. Aus den genannten Gründen wird häufig die Lastkombinationsregel nach *Ferry Borges & Castanheta* empfohlen.

#### Modellierung von Lastkombinationen mit dem Modell von Ferry Borges & Castanheta

Ein weiteres Verfahren bzw. eine Verfeinerung des Verfahrens nach Turkstra [72] zur Kombination von veränderlichen Einwirkungen ist das in *Ferry Borges/ Castanheta* [103] vorgeschlagene Modell. Hierbei werden die Maxima der veränderlichen Einwirkungen eines bestimmten festgelegten Intervalls addiert und mit den Maxima anderer Intervalle verglichen. Ein Beispiel wird in Abb. 4.4 dargestellt

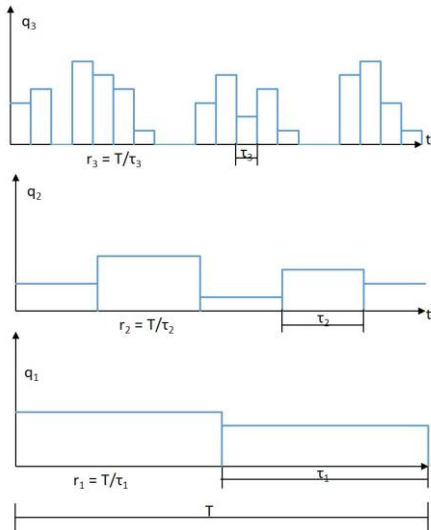


Abb. 4.4: Lastkombination bei Rechteckprozessen aus Schobbe [104]

Die Verteilungsfunktion der Maxima  $F_{i,max}(q_i)$  ergibt sich mit der Verteilungsfunktion  $F_i(x_i)$  im Grundzeitintervall  $\tau_i$  der entsprechenden Einwirkung mit den Lastwechselzahlen  $r_i$  nach Schobbe [104] zu

$$F_i[1 - p_i(1 - F_i(x_i))]^{r_{i,max}} \quad (4.33)$$

mit  $p_i$  der Auftretenswahrscheinlichkeit der Einwirkung. Tab. 4.1 stellt das Schema zur Ermittlung der Lastwechselzahlen dar. Dabei ist  $n$  die Anzahl der Einwirkungen,  $l$  die Anzahl der veränderlichen Einwirkungen davon. Die Lastwechselzahl von ständigen Einwirkungen ist  $r_{l-1} = 1$ . [104]

Tab. 4.1: Kombinationsschema und Lastwechselzahlen zur Kombination mehrere veränderlicher Lasten aus Schobbe [104]

Einwirkungsnummer	$n-l+1$	$n-l+2$	$n-l+3$	...	$n$
Anzahl der Lastwechsel in $T_{ref}$	$r_{n-l+1}$	$r_{n-l+2}$	$r_{n-l+3}$	...	$r_n$
Kombination	Lastwechselzahlen $w_i$				
1	$r_{n-l+1}$	$r_{n-l+2}/r_{n-l+1}$	$r_{n-l+3}/r_{n-l+2}$	...	$r_n/r_{n-l}$
2	1	$r_{n-l+2}$	$r_{n-l+3}/r_{n-l+2}$	...	$r_n/r_{n-l}$
3	1	1	$r_{n-l+3}$	...	$r_n/r_{n-l}$
...	...	...	...	...	...
$l$	1	1	1	...	$r_n$

Annahmen für Grundzeitintervalle verschiedener Einwirkungen finden sich beispielsweise bei Grünberg [101] oder Baravalle [85]. Baravalle legt die Präsenzzeit der Last dem Betrachtungszeitraum  $T_{ref}$  zugrunde, wodurch  $p_i = 1$  wird und damit

$$F_i(F_i(x_i))^{r_{i,max}} \quad (4.34)$$

Dabei ändert sich der Verteilungstyp nicht [103]. Für die führende Einwirkung  $j$  ist

$$r_j = \frac{r_{p,min}}{r_{p,j}} \quad (4.35)$$

Mit  $r_{p,min}$  der geringeren Präsenzdauer der veränderlichen Einwirkungen und  $r_{p,j}$  der Präsenzzeit der betrachteten Einwirkung. Weiter ist für die begleitende Einwirkung  $t$

$$r_t = \frac{\max(d_j, d_t)}{n_{p,j}} \quad (4.36)$$

mit

$$d_j = \frac{r_{p,j}}{r_{r,j}} \quad (4.37)$$

$$d_t = \frac{r_{p,t}}{r_{r,t}} \quad (4.38)$$

wobei  $r_{r,j}$  und  $r_{r,t}$  die Anzahl der Lastwechsel der jeweiligen Variablen innerhalb der Präsenzzeit sind.

## 4.2 Modellierung ständiger Einwirkungen

### 4.2.1 Grundlegendes zur Modellierung

Eigenlasten sind schwerkraftbedingte Lasten, die schon während der Errichtung eines Gebäudes entstehen und über die Nutzungszeit nach weitgehend konstant bleiben. Auch die technische Installation zählt zu den ständigen Einwirkungen [36]. Einige Anteile sind möglicherweise über die Zeit variabel, eine strikte Trennung nach ständigen und veränderlichen Lasten fällt nach *Rackwitz* [98] oft schwer. Nach *JCSS Teil 2.1* [60] sind drei Hauptcharakteristika der ständigen Last zu nennen:

1. „Die Auftretenswahrscheinlichkeit an einem zufälligen Zeitpunkt ist nahe eins,
2. Die Veränderlichkeit im Zeitverlauf ist in der Regel vernachlässigbar,
3. Die Ungewissheit des Maximums ist im Vergleich zu anderen Belastungsarten normalerweise klein“.

Nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] darf das Eigengewicht durch nur einen charakteristischen Wert ausgedrückt werden. Dieser darf auf Grundlage der Nennabmessungen und dem Mittelwert der Rohwichte bestimmt werden. Da die Lasten additiv sind, ist nach *Melchers* [36] die Varianz der gesamten ständigen Last geringer als die Summe der Varianzen der einzelnen Teile. Das Eigengewicht darf als Mittelwert der Verteilung angesetzt werden, wenn das Tragwerk nicht empfindlich auf Änderungen reagiert. Ist dies jedoch der Fall, soll bei ungünstiger Wirkung das 95%-Quantil, bei günstiger Wirkung das 5%-Quantil verwendet werden [16].

Die Streuung des Eigengewichtes ergibt sich vor allem aus räumlichen Streuungen der Wichte, der Abmessung und bei einigen Baustoffen Streuungen durch Einflüsse wie Feuchtigkeit oder Verdichtung. Die Streuungen der Bauteilabmessungen lassen sich nach *Rackwitz* [98] wie folgt bestimmen:

$$a = a_0 + \Delta a(\xi) \quad (4.39)$$

Dabei sind  $a_0 = a_{nominal}$  die vorgesehenen Abmessungen und  $\Delta a(\xi) = \Delta a_1 + \Delta a_2(\xi)$  ein Zufallsfeld. Dieses Zufallsfeld setzt sich aus einer die Streuungen zwischen Bauteilen, Bauwerken etc. beschreibenden Komponente  $\Delta a_1$  und aus einer Komponente, die Streuungen innerhalb eines Bauteils erfasst  $\Delta a_2(\xi)$ , zusammen. Die beiden Komponenten haben den Mittelwert 0. Während der erste Anteil durch eine einfache Zufallsvariable modelliert werden kann, sollte die zweite als Zufallsfeld dargestellt werden. Mit der Standardabweichung der ersten Variable lässt sich eine Aussage über die Qualität der Herstellung treffen, da bei geringem Wert hohe Standards mit wenigen Abweichungen zwischen den Bauteilen vorhanden sind. Die Streuungen der zweiten Variable bringen die unveränderlichen Schwankungen in der laufenden Produktion zum Ausdruck. Korrelationen des Zufallsfeldes beschränken sich

in der Regel auf die Bauteilabmessungen. Meistens ist eine Unterscheidung in die beiden Streuungsanteile jedoch nicht nötig und es gilt nach *Rackwitz* [98]:

$$E[a] = a_0 \quad (4.40)$$

Für die Gesamtstreuung  $Var[\Delta a]$  gilt somit

$$Var[\Delta a] = Var[\Delta a_1] + Var[\Delta a_2(\xi)] \quad (4.41)$$

mit  $Var[i]$  den entsprechenden Varianzen [98]. Die Wichte  $\gamma$  kann analog modelliert werden zu

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma \quad (4.42)$$

wobei wieder  $\gamma_0$  die Wichte in den spezifischen Abmessungen und  $\Delta\gamma$  ein Zufallsfeld ist. *Rackwitz* [98] empfiehlt die Beschreibung durch ein Zufallsfeld, unterstreicht jedoch, dass aufgrund mangelnder Kenntnisse zumeist die Beschreibung als Zufallsvariable genügen muss. Dann ist das Eigengewicht  $G$  einer Konstruktion durch

$$G = \int_{Vol} \gamma dV \quad (4.43)$$

bestimmt [60] [98], wobei  $V$  das Volumen in den Grenzen des betrachteten Elements ist. Erwartungswert und Varianz sind näherungsweise nach *Rackwitz* [98]:

$$E[G] \approx E[V]E[\gamma] \quad (4.44)$$

$$V^2[G] \approx \sum_{i=1}^n V^2[a_i] + V^2[\gamma] \quad (4.45)$$

Ist das Material ausreichend homogen, kann man nach *JCSS Probabilistic Model Code* [60] schreiben:

$$G = \gamma_{av} V \quad (4.46)$$

Dabei ist  $\gamma_{av}$  die durchschnittliche Wichte des Materials in diesem Bereich. Verschiedene Punkte innerhalb eines Bauteils werden als korreliert angenommen. Die Korrelation von zwei Punkten innerhalb eines Bauteils  $\rho(\Delta r)$  kann nach *JCSS PMC* [60]

$$\rho(\Delta r) = p_0 + (1 - p_0) \exp\{-(\Delta r/d)^2\} \quad (4.47)$$

berechnet werden, wobei  $p_0$  die Korrelation zwischen zwei weit entfernten Punkten im Bauteil,  $d$  die Korrelationslänge und  $\Delta r$  der Abstand zwischen den betrachteten Punkten im Bauteil ist. Für diese Arbeit wird von einer Modellierung des Eigengewichtes als stochastisches Feld abgesehen und eine gleichmäßige Verteilung des Eigengewichtes angenommen.

In probabilistischen Analysen kann die Berücksichtigung der Streuung geometrischer Parameter nötig sein. *Rackwitz* [98] schlägt für die Streuung zwischen verschiedenen Einheiten 5% des Nominalwertes vor, für die Streuung innerhalb von Einheiten (Elementen) eine Streuung von 2mm. Für verleimte Holzträger schlägt *Rackwitz* für die Streuung zwischen Einheiten einen Wert von rund null vor, innerhalb von Einheiten eine Streuung von 1 mm [98]. Der Teil 2 des *Probabilistic Model Code* [60] enthält ebenfalls Standardabweichungen für geometrische Parameter. Im Bestandsbau sollte eine Modifikation nur für detailliert untersuchte Bauteile erfolgen. Für diese kann die Geometrie in situ genau aufgenommen werden, was die Aufnahme geometrischer Parameter als streuende Basisvariablen unnötig macht.

#### 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

Nach Rackwitz [98] kann für die geometrischen Streuungen und für die Streuungen der Wichte eine Lognormalverteilung angenommen werden, die somit für die Gesamtstreuung des Eigengewichtes gilt. Bei kleinen Streuungen kann diese durch eine Normalverteilung ersetzt werden. Nach *Probabilistic Model Code* [60] und Melchers [36] kann eine Normalverteilung verwendet werden. Auf Basis von Tab. 4.2 wird für diese Arbeit eine Normalverteilung zur Modellierung der Rohdichte von Holz verwendet.

Tab. 4.2: Empfohlene Verteilungsfunktion für die Rohdichte von Holz nach verschiedenen Untersuchungen

Autor	Jahr	Quelle	Holzart	Empfohlene Verteilung
<i>Badstube &amp; Rug</i>	1989	[105]	Neuholz GK I, II, III*	<i>N</i>
<i>Nier</i>	1994	[106]	Altholz, versch. Arten	<i>N</i>
<i>Rackwitz</i>	1997	[98]	Verschiedene Arten	<i>N/LN</i>
<i>JCSS</i>	2000	[59]	Verschiedene Arten	<i>N</i>
<i>Sørensen</i>	2001	[107]	Norw. Fichte, mittlere Qualität	<i>N</i>
<i>JCSS</i>	2006	[61]	Europäisches Weichholz, versch. Arten	<i>N</i>

\* GK I - S13; GK II - S10; GK III - S10

#### 4.2.2 Statistische Parameter der Rohdichte von Vollholz

Nach Melchers [36] entspricht der Mittelwert der nominalen Last; der Variationskoeffizient der Eigenlast liegt zwischen 0,05-0,10. Tab. 4.3 enthält den Variationskoeffizienten der Rohdichte des Holzes aus verschiedenen Literaturquellen. Es zeigt sich ein Trend zu  $V_G = 10\%$  für die Rohdichte von Holz. Bei *Nier* [106] und in der *DIN 68364:2003-5* [108] sind für Nadelhölzer etwas höhere Werte enthalten. *Steck* [78] schlägt für Nadelholz auf Basis der *DIN 68364:2003-05* [78] einen  $V = 12,2\%$ , und für Laubholz von  $V = 8,7\%$  vor. Die *DIN 68364:2003-5* enthält Werte für fehlerfreies Holz. *Steck* [78] verwendet diese und berücksichtigt Einflussfaktoren wie Holzfehler durch zusätzliche streuende Variablen.

Tab. 4.3: Variationskoeffizient  $V_x$  der Rohdichte von Holz aus verschiedenen Untersuchungen

Autor bzw. Hrsg.	Jahr	Verweis	Holzart	$V_x$ der Rohdichte
<b>Bauholz</b>				
<i>Badstube &amp; Rug</i>	1989	[105]	Neuholz GK I, II, III*	0,05
<i>Rackwitz</i>	1997	[98]	Verschiedene Arten	0,10
<i>JCSS</i>	2000	[59]	Verschiedene Arten	0,10
<i>Sørensen</i>	2001	[107]	Norw. Fichte, mittlere Qualität	0,06
<i>JCSS</i>	2006	[61]	Europäisches Weichholz, versch. Arten	0,10
<b>Fehlerfreies Holz</b>				
<i>Nier</i>	1994	[106]	Fichte	0,12
			Tanne	0,10
			Kiefer	0,14
			NH Gesamtheit	0,14
<i>DIN 68364:2003</i>	2003	[108]	Fichte	0,097
			Tanne	0,118
			Kiefer	0,128
			Lärche	0,11
			Eiche	0,09
			Buche	0,06

DIN 68364:2003-05 enthält Mittelwerte der Rohdichte für verschiedene Holzarten. Diese gelten für Normalklima, also  $\omega = 12(\pm 1,5)\%$  Holzfeuchtegehalt [108] und für fehlerfreies Holz. Auch der *Probabilistic Model Code* enthält Mittelwerte der Rohdichte für verschiedene Holzarten.

Tab. 4.4: Mittlere Kennwert der Rohdichte von Nadel- und Laubhölzern aus DIN 68364 [108] und JCSS Probabilistic Model Code Teil 2.1 [60]

Holzart		Mittelwert der Rohdichte in $[g/cm^3]$	
		DIN 68364	Probabilistic Model Code
Nadelholz	Fichte	0,46	0,44
	Tanne	0,46	-
	Kiefer	0,52	0,51
	Lärche	0,60	0,66
Laubholz	Eiche	0,71	0,65
	Buche	0,71	0,68
	Esche	0,70	-

Angaben für Wichten von Vollholz und Holzwerkstoffen verschiedener Festigkeitsklassen finden sich in DIN EN 1991-1-1:2012-12 [109]. Die Werte werden in Tab. 4.5 abgebildet und den Angaben aus der DIN EN 338:2016-07 [110] gegenübergestellt. Es handelt sich um Nennwerte (Mittelwerte).

Tab. 4.5: Wichte von Holz aus DIN EN 1991-1-1:2010-12 [109] und DIN EN 338:2016-07 [110]

Festigkeits- klasse Nadelholz nach DIN EN 338	Wichte in $[kN/m^3]$		Festigkeits- klasse Laubholz nach DIN EN 338	Wichte in $[kN/m^3]$	
	DIN EN 1991-1-1:2010-12	DIN EN 338:2016-07		DIN EN 1991-1-1:2010-12	DIN EN 338:2016-07
C16	3,7	3,7	D30	6,4	6,4
C18	3,8	3,8	D35	6,7	6,5
C24	4,2	4,2	D40	7,0	6,6
C30	4,6	4,6	D50	7,8	7,4
C35	4,8	4,7	D60	8,4	8,4
C40	5,0	4,8	D70	10,8	9,6

Die Werte für die Klassen C35, C40 sowie für die meisten Festigkeitsklassen des Laubholzes unterscheiden sich, wobei die Angaben der DIN EN 338:2016-07 [110] geringer als in DIN EN 1991-1-1:2010-12 [109] sind. Die gesamte Eigenlast kann nach Schneider & Schlatter [39] als konstant über die Lebensdauer angesehen werden. Es wird somit hier für das Eigengewicht keine Unterscheidung zwischen Neu- und Altholz getroffen. Da der charakteristische Wert des Eigengewichtes als 50%-Quantil angenommen wird, wird das Verhältnis  $m_x/X_k = 1$ .

### 4.2.3 Einfluss der Holzfeuchte auf das Eigengewicht

Die Rohdichte  $\rho_G$  ist abhängig vom Feuchtegehalt des Holzes [111] [112]. Sie ist definiert als

$$\rho_G = \frac{m_G}{V_G} \quad (4.48)$$

mit dem Mittelwert  $m_G$  des Eigengewichtes und dem Volumen  $V_G$ . Sie ist von Holzart, Standort des Baumes und Lage der Probe im Stamm bestimmt. Der Wert wird abhängig von Temperatur und relati-

#### 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

ver Luftfeuchtigkeit angegeben. Die Darr-Rohdichte  $\rho_0$  gibt den Wert für den absolut trockenen Zustand an [113]. Da das Eigengewicht von Holz durch die Rohdichte bestimmt wird, ist es abhängig von seinem Feuchtegehalt. Durch seine Kapillarstruktur ändert sich die Holzfeuchte in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte. Mit technischen Hilfsmitteln kann diese in-situ gut ermittelt werden. Eine Berücksichtigung des erhöhten Materialgewichtes kann durch einen Erhöhungsfaktor erfolgen, der aus der aus Abb. 4.5 von Kollmann [111] abgeleitet werden kann, siehe auch *DIN 52182:1976* [112].

Die zugrunde liegenden Zusammenhänge der Kurven wurde unter Betrachtung von Quellmaßen in Abhängigkeit von der Feuchte für die Holzarten Fichte, Tanne, Linde, Kiefer, Aspe, Lärche, Nussbaum, Eiche, Buche, Birke und Buchsbaum durch Bezug auf die jeweilige Rohdichte hergeleitet und anschließend verallgemeinert, siehe Kollmann [111].

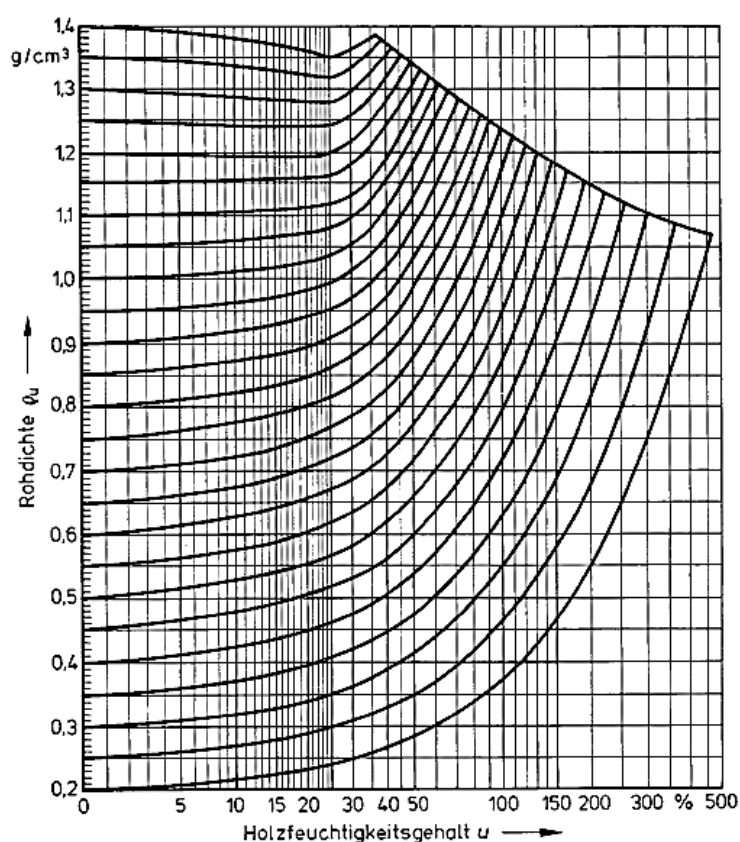


Abb. 4.5: Rohdichte-Feuchtigkeits-Schaubild für Holz aus Kollmann [111]

Die folgende Tabelle stellt die abgeleiteten Faktoren zur Erhöhung des Eigengewichtes bei Berücksichtigung des Feuchteinflusses am Beispiel C24 und D30 zusammen.

Tab. 4.5: Faktoren  $f$  zur Erhöhung des Eigengewichtes in Abh. vom Feuchtegehalt, abgeleitet von Kollmann [111]

Feuchtegehalt $u_{\text{gemessen}}$	≤ 5%	10%	12%	15%	20%	25%	30%	40%	50%	100 %	200 %	300 %
Faktor $f$ [C24]	0,98	1,0	1,0	1,02	1,07	1,10	1,12	1,19	1,29	1,71	2,5	2,62
Faktor $f$ [D30]	0,97	0,99	1,0	1,01	1,04	1,06	1,16	1,22	1,29	1,62	1,69	1,62

Somit ergibt sich für das Eigengewicht unter Berücksichtigung der Feuchte:

$$E[g] = E[g_{Holz}] \cdot f \quad (4.49)$$

Eine Erhöhung des Variationskoeffizienten der ständigen Last abhängig von der Feuchte und damit eine Berücksichtigung im Teilsicherheitsbeiwert erfolgt nicht. In der Bemessung von Tragwerken erfolgt die Berücksichtigung der Feuchte durch den Beiwert  $k_{mod}$ . Insbesondere im Bestandsbau kann durch Messung der Feuchte in situ eine begründete Einordnung in eine Nutzungsklasse erfolgen.

#### 4.2.4 Beispielhafte Untersuchung

Einige Berechnungsbeispiele zur Bestimmung des Erwartungswertes des Eigengewichtes historischer Deckenkonstruktionen werden in Anhang 10.3.1 (S. 14) dargestellt. Tab. 4.6 fasst die statistischen Parameter für die analysierten Deckenkonstruktionen zusammen.

Tab. 4.6: Erwartungswert und Variationskoeffizient des Eigengewichtes bei verschiedenen Deckenkonstruktionen

Deckenkonstruktion	Erwartungswert des Eigengewichtes $E[G]$ [ $kN/m^2$ ]			Variationskoeffizient des Eigengewichtes $V_G$ [%]		
	$E[G]$ und $V_G$ nach DIN 68364	$E[G]$ für C24 EN 338, $V_G$ aus PMC	$E[G]$ pauschal ( $5kN/m^3$ ), $V_G$ aus PMC	$E[G]$ und $V_G$ nach DIN 68364	$E[G]$ für C24 EN 338, $V_G$ aus PMC	$E[G]$ pauschal ( $5kN/m^3$ ), $V_G$ aus PMC
Dübelbodendecke	2,11	1,79	2,05	<b>7,4</b>	5,9	6,0
Ganzer Windelboden	<b>3,93</b>	3,82	3,89	6,8	6,9	6,8
Halber Windelboden	1,95	1,86	1,88	5,8	5,9	5,6
Einschubdecke	2,09	2,00	2,06	6,0	6,0	6,0
Kreuzstakendecke	3,46	3,35	3,43	4,1	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>
Berliner Decke	2,68	2,56	2,64	6,6	6,8	6,6
Leichte Holzbalkendecke	0,80	<b>0,66</b>	0,77	5,6	4,8	4,1

Der Variationskoeffizient im *Probabilistic Model Code* (PMC) ist  $V_G = 0,10$

Höchste und niedrigste Werte fett hervorgehoben

Die statistischen Parameter unterscheiden sich bei den gewählten Annahmen leicht. Der Erwartungswert des Eigengewichtes liegt zwischen  $E[G] = 0,66 kN/m^2$  und knapp  $E[G] = 4,0 kN/m^2$ . Der Variationskoeffizient liegt zwischen  $V_G = 4,0...7,4$  %. Die Erwartungswerte werden zur Bildung praxisrelevanter Verhältnisse aus Eigen- und Nutzlast verwendet. In einigen Quellen können höhere Variationskoeffizienten für die ständige Last gefunden werden. Nach *Melchers* [36] ergibt sich eine höhere Variabilität jedoch aus Haustechnik und nicht-lastabtragenden Bauteilen.

Einige Berechnungsbeispiele für ausgewählte Dachhautaufbauten sind in Anhang 10.3.2 (S. 15) enthalten. Der Variationskoeffizient des Eigengewichtes liegt für die betrachteten Dachaufbauten zwischen  $V_G = 4,1...5,2$  %. Der Erwartungswert kann nach Aufbau der Konstruktion sehr verschieden sein. In den Untersuchungen werden deshalb verschiedene Lastanteile untersucht, siehe dazu Kap. 6.

### 4.3 Modellierung von veränderlichen Einwirkungen – Nutzlasten

#### 4.3.1 Räumliche Variabilität

Nutzlasten setzen sich aus einem quasi-ständigen und einem variablen Anteil zusammen, welche zu einer Gesamtnutzlast zusammengefasst werden. Abb. 4.6 nach *Rackwitz* [98] veranschaulicht dies.



#### 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

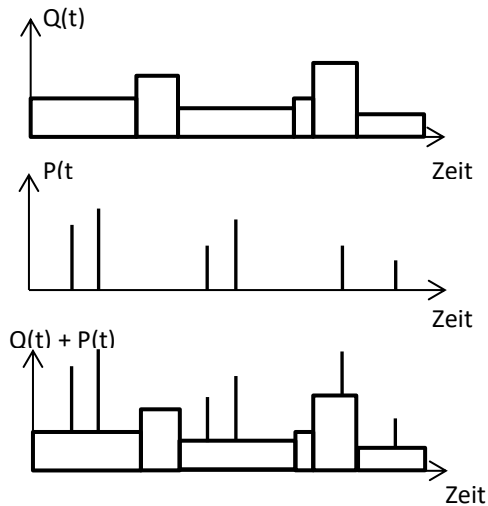


Abb. 4.6: Typische Nutzlastverteilung im Hochbau aus Rackwitz [98]

Nach Madsen, Krenk & Lind [99] wird die Nutzlastintensität eines Raumes in einem Stockwerk in einem Gebäude  $Q(x, y)$  dargestellt durch

$$Q(x, y) = \mu_Q + L_B + L_F + L_R + D(x, y) \quad (4.50)$$

Dabei ist  $\mu_Q$  die mittlere Lastintensität für die Bauwerksklasse,  $L_B$  eine Zufallsvariable mit dem Mittelwert 0, die die Abweichung des Mittels der Abweichung des Bauwerks von  $\mu_Q$  darstellt,  $L_F$  eine Zufallsvariable mit dem Mittelwert 0, die die Abweichung des Mittels der Abweichung des Stockwerks von  $\mu_Q + L_B$  darstellt,  $L_R$  Zufallsvariable mit dem Mittelwert 0, die die Abweichung des Mittels der Abweichung des Raumes von  $\mu_Q = L_B + L_F$  darstellt und  $D(x, y)$  ein Zufallsfeld mit dem Mittelwert 0, das die Abweichungen der Lastintensität von  $\mu_Q = L_B + L_F + L_R$  darstellt. Diese Beziehung kann zum Zufallsfeld  $W(x, y)$  wie folgt zusammengefasst werden:

$$W(x, y) = m + V + U(x, y) \quad (4.51)$$

Dabei ist  $m$  die durchschnittliche Lastintensität in Abhängigkeit von der Bauwerkskategorie,  $V$  eine normalverteilte Variable mit dem Mittelwert 0 und  $U(x, y)$  ein normalverteiltes Zufallsfeld mit dem Mittelwert 0. Die Variable  $m$  stellt einen globalen Mittelwert dar.  $V$  erfasst die Variation zwischen Stockwerken und Bauwerken, damit werden die unterschiedlichen Gewohnheiten der Nutzer innerhalb einer Nutzungsklasse abgebildet. Lokale Lastverdichtungen wie beispielsweise Möbel an Wänden können nach Rackwitz [98] in der Regel aufgrund der Schnittkraftverteilung, die durch die Nutzlasten hervorgerufen wird, vernachlässigt werden. Die Variablen werden als stochastisch unabhängig angenommen [60]. Der Lasteffekt  $S$  für lineare elastische Systeme, bei denen Superposition möglich ist, kann wie folgt bestimmt werden [60]

$$S = \int_A W(x, y) i(x, y) dA \quad (4.52)$$

Dabei sind  $W(x, y)$  die Lastintensität und  $i(x, y)$  die Einflussfunktion des Lasteffektes über die betrachtete Einflussfläche. Dieser Zusammenhang gilt für Flächenlasten. Er kann nach CIB Report W81 [114] auch

als Annäherung für nicht-lineare Fälle verwendet werden. Der Lasteffekt kann gut durch eine äquivalente gleichförmig verteilte Nutzlast  $q$  abgebildet werden:

$$\int_A q \cdot i(x, y) dA = \int_A W(x, y) \cdot i(x, y) dA \quad (4.53)$$

Daraus ergibt sich:

$$q = \frac{\int_A W(x, y) i(x, y) dA}{\int_A i(x, y) dA} \quad (4.54)$$

Diese äquivalente gleichförmig verteilte Nutzlast stellt gemeinsam mit der Einzellast zur Abbildung des konzentrierten veränderlichen Lastanteils die Bemessungsgrundlage für die Nutzlast in den meisten Normen dar [98]. Das Modell enthält einige Vereinfachungen, diese sind nach *CIB Report W81* [114]:

- Die Korrelationen innerhalb des Zufallfeldes  $U(x, y)$  nehmen mit der Entfernung schnell ab, bei einem Abstand von zwei Kräften von 1-2m ist die Korrelation nahe null
- Lastwerte sind konstant bis zu einem Eigentümerwechsel
- Lastwerte unterschiedlicher Besitzer sind unabhängig
- Es erfolgt eine Einteilung in Bereiche (sog. „bays“), wobei die eine Seite durch Bauteile wie Wänden oder Stützen begrenzt wird. Sind diese Abstände sehr groß, sollte die andere Seite der Fläche auf das 1-2-fache des Wertes der anderen Seite limitiert sein

Dabei sind die Parameter des quasi-ständigen Lastanteils  $q$  nach *Rackwitz* [98] wie folgt definiert:

$$E[q] = \frac{E[\int_A W(x, y) \cdot i(x, y) dA]}{\int_A i(x, y) dA} = \frac{E[W(x, y)] \cdot \int_A i(x, y) dA}{\int_A i(x, y) dA} = E[W(x, y)] = m_q \quad (4.55)$$

$$Var[q] = \frac{Var[\int_A W(x, y) \cdot i(x, y) dA]}{(\int_A i(x, y) dA)^2} = \sigma_V^2 + \sigma_U^2 \frac{A_0}{A} \kappa \quad (4.56)$$

Die Variable  $\sigma_V^2$  ist die Kovarianz zwischen zwei Lasten  $q_1$  und  $q_2$  in zwei sich nicht überlappenden Flächen  $A_1$  und  $A_2$  desselben Stockwerks:

$$Cov[q_1, q_2] = \sigma_V^2 \quad (4.57)$$

Der zweite Teil des Summanden in Gl. (4.56) wird auch als  $\kappa_{red}$  bezeichnet:

$$\kappa_{red} = \sigma_U^2 \frac{A_0}{A} \kappa \quad (4.58)$$

Dabei ist  $\kappa$ :

$$\kappa \approx A \cdot \frac{\int_A i^2(x, y) dA}{(\int_A i(x, y) dA)^2} \quad (4.59)$$

Der Wert  $\kappa$  ist der Lastkonzentrationsfaktor, er ist abhängig von der Einflusslinie. Somit hängt er vom untersuchten Lasteffekt, von den Lagerungsbedingungen und von der Geometrie der Struktur ab [114].  
Nachfolgend werden die Werte für  $\kappa$  aus verschiedenen Quellen zusammengestellt (Tab. 4.7):

Tab. 4.7: Werte für  $\kappa$  aus verschiedenen Quellen

Quelle	Platten (Feldmo- ment)	Platten (Rand- moment)	Platten (Stützen- lasten)	Balken (allge- mein)	Balken (Feldmo- ment)	Balken (Rand- moment)	Balken (Quer- kraft)
<i>Rackwitz 1996</i> [115]	1,5	-	-	2,0-2,5	-	-	-
<i>JCSS 2001</i> [60]	2,0	2,4	-	2,0	-	-	1,4
<i>CIB W81 1989*</i> [114]	1,5	1,6	2,2	-	2,0-2,7	2,0	2,5
<i>Melchers 1996</i> [36]	-	-	2,2	-	2,76	2,04	-

\* Im CIB Report zitiert nach: Sentler, L., „A Stochastic Model for Live Loads on Floors in Buildings“, Report 60, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology. 1975.

Nach *CIB Report W81* [114] gilt die Gleichung für die gleichförmig verteilte Ersatzlast nur dann, wenn die Variablen vollständig unabhängig sind. Im Extrem vollständiger Korrelation wird die Varianz zu:

$$Var[q(A_0)] = Cov[q(A_{0_1}), q(A_{0_2})] = \sigma_v^2 + \sigma_u^2 \quad (4.60)$$

Damit wird der Faktor

$$\frac{A_0}{A} \kappa = 1 \quad (4.61)$$

es entsteht keine Lastreduktion. Nach *Rackwitz* [98] und *JCSS PMC Teil 2.2* [60] bildet eine Gammaverteilung die quasi-ständigen Nutzlasten am besten ab.

Der unterbrochene Lastanteil  $p$  wird auf dieselbe Weise modelliert, wie die quasi-ständige Last. Zwar handelt es sich zumeist um eine konzentrierte Last, aus Modellierungsgründen wird jedoch derselbe Ansatz wie für den quasi-ständigen Lastanteil verwendet. Die Belastungsdauer wird als deterministisch gegeben angenommen. Der Erwartungswert  $E[p]$  ist

$$E[p] = \mu_p \quad (4.62),$$

die Standardabweichung hat einen Wert in der Größenordnung des Erwartungswertes. Der Variationskoeffizient liegt demnach nahe eins, was die Verwendung einer Exponentialverteilung begründet. Im Folgenden wird in Anlehnung an *Glowienka* [72] und *Fischer* [64] für den unterbrochenen Lastanteil bei  $A_0 = 20m^2$  eine Exponentialverteilung, für  $A_0 > 20m^2$  eine Gammaverteilung verwendet.

### 4.3.2 Zeitliche Variabilität und Gesamtnutzlast

Für die Bemessung mit zeitlich variablen Nutzlasten müssen Vereinfachungen getroffen werden. Dazu zählt nach *CIB Report W81* [114], dass Lastgröße und Belastungspunkt als unabhängig angenommen werden, dass Korrelationen innerhalb des Zufallsfeldes mit Entfernung sehr stark abnehmen, dass zeitliche und räumlich Variationen unabhängig sind und dass das Konzept der Einteilung in Abschnitte wie bei den zeitlich konstanten Lasten vorzunehmen ist. Bei Nutzerwechsel ergeben sich Lastwechsel auch des quasi-ständigen Nutzlastanteils. Nach *Rackwitz* [98] können die Laständerungen mit einem Poissonprozess modelliert werden. Dies ergibt die Verteilungsfunktion der maximalen quasi-ständigen Last als Extremwertverteilung zu

$$F_{q_{max}}(x) = \exp \left[ -\lambda_s T \left( 1 - F_q(x) \right) \right] \quad (4.63)$$

mit  $T$  einer passenden Referenzzeit, beispielsweise die angenommene Lebensdauer des Bauwerks,  $\lambda_s$  die Auftretensrate der Laständerungen des quasiständigen Lastanteils und  $F_q(x)$  Verteilungsfunktion des quasi-ständigen Lastanteils. Die Dauer der Überschreitungen eines Niveauwertes  $x$ , die aus der quasi-ständigen Last folgt, ist exponentialverteilt. Da auch die kurzzeitigen (transienten) Lastanteile einem Poissonprozess folgen ergibt sich die Extremwertverteilung nach Gl. (4.64) des veränderlichen Lastanteils bezogen auf die Dauer der quasi-ständig wirkenden Lastanteile nach Rackwitz [98] zu

$$F_{p,max}(x) = \frac{\lambda_s}{\left(\lambda_s + \lambda_t (1 - F_p(x))\right)} \quad (4.64)$$

Dabei ist zusätzlich zu Gl. (4.63)  $F_p(x)$  die Verteilungsfunktion des unterbrochenen Lastanteils, siehe Abschnitt 4.3.1, und  $\lambda_t$  die Auftretensrate der kurzfristigen Belastung. Zur Bestimmung der Verteilungsfunktion der Gesamtnutzlast werden quasi-ständiger und unterbrochener Lastanteil überlagert. Dazu muss das folgende Faltungsintegral gelöst werden.

$$F_{tot,max}(x) = \int_0^x F_{p,max}(x-z) \cdot f_q(z) dz \quad (4.65)$$

Mit  $F_{p,max}(x-z)$  der Verteilungsfunktion des veränderlichen Lastanteils nach Gl. (4.64) und  $f_q(z)$  der Verteilungsdichtefunktion des quasi-ständigen Lastanteils. Die Lösung des Integrals erfolgt in dieser Arbeit durch numerische Integration. Man erhält die maximale Last während einer Nutzungseinheit [114], hier angenommen mit  $T = 1 a$ , da sich die Lastwechselzahlen in Tab. 4.9 auf diesen Zeitraum beziehen. Für den Bezugszeitraum  $T = 50 a$  wird die Funktion in die folgende Gleichung eingesetzt [98]:

$$F_{tot,max,T}(x) = \exp\left[-\lambda_s T (1 - F_{tot,max}(x))\right] \quad (4.66)$$

Die Verteilungsfunktion wird durch eine bekannte Extremwertverteilung approximiert. Dazu eignet sich die Gumbelverteilung. Dabei ergeben sich für längere Belastungszeiträume gute Ergebnisse. Die Approximation erfolgt mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Nach Maes & Breitung [116] sollten zur Anpassung der Verteilung der Fehler von  $-\log(1-F(x))$  minimiert werden, um den oberen Schwanz der Verteilungsfunktion stärker zu gewichten. Dadurch wird eine verbesserte Anpassung im relevanten Bereich erreicht (siehe auch Anhang Kap. 10.5.4, S. 22). Der charakteristische Wert veränderlicher Lasten wird in der Regel als 98%-Quantil im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 1a$  bestimmt. Der 98%-Quantilwert im Referenzzeitraum  $T_{ref} = 1a$  entspricht bei Anwendung einer Gumbelverteilung dem Modalwert im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$ . Demzufolge empfiehlt sich die Anwendung der gewichteten Anpassung insbesondere bei Bestimmung der Parameter der approximierten Verteilung für  $T_{ref} = 1a$ .

### 4.3.3 Parameterberechnung für verschiedene Nutzlastkategorien

Tab. 4.8 zeigt statistische Parameter für die Modellierung von ständigen und unterbrochenen Nutzlasten aus *Probabilistic Model Code Teil 2.2* [117] des *Joint Committee on Structural Safety*.

4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

Tab. 4.8: Parameter für Nutzlasten (Momentanwerte) in Abhängigkeit von der Nutzungskategorie aus JCSS PMC [60]

Verteilung	quasi-ständiger Lastanteil					transienter Lastanteil			
	GAMMA					EXP/GAMMA			
Art der Nutzung	$A_0$ [m <sup>2</sup> ]	$m_q$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$1/\lambda_s$ [a]	$m_p$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_U$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$1/\lambda_t$ [a]	$d_p$ [d]
Büro	20	0,5	0,3	0,6	5	0,2	0,4	0,3	1-3
Lobby	20	0,2	0,15	0,3	10	0,4	0,6	1,0	1-3
Wohnen	20	0,3	0,15	0,3	7	0,3	0,4	1,0	1-3
Hotelzimmer	20	0,3	0,05	0,1	10	0,2	0,4	0,1	1-3
Krankenzimmer	20	0,4	0,3	0,6	5-10	0,2	0,4	1,0	1-3
Labor	20	0,7	0,4	0,8	5-10	-	-	-	-
Bibliothek	20	1,7	0,5	1,0	>10	-	-	-	-
Klassenraum	100	0,6	0,15	0,4	>10	0,5	1,4	0,3	1-5
Verkaufsräume:									
Erster Stock	100	0,9	0,6	1,6	1-5	0,4	1,1	1,0	1-14
Weitere Stockwerke	100	0,9	0,6	1,6	1-5		1,1	1,0	1-14
Warenhaus	100	3,5	2,5	6,9	0-1.0	0,4	-	-	-
Industriegebäude:									
leicht	100	1,0	1,0	2,8	5-10	-	-	-	-
schwer	100	3,0	1,5	4,1	5-10	-	-	-	-
Menschenansammlung	20	-	-	-	-	1,25	2,5	0,02	0,5

Aus Tab. 4.8 werden die statistischen Parameter der Gesamtnutzlast berechnet. Dies geschieht durch Gl. (4.56) mittels Überlagerung der Anteile für  $\sigma$  für den quasi-ständigen Lastanteil. Für den veränderlichen Lastanteil kann das gleiche Vorgehen für diejenigen Anteile angewendet werden, die durch eine Gammaverteilung modelliert werden (bei  $A = 1000m^2$ ). Der Wert  $A = 1000m^2$  ist als theoretischer Wert für die Lastbestimmung bei großen Räumen gewählt (siehe [72], [64]). Für kleine Räume wird  $A_0 = 20m^2$  verwendet, siehe auch [118]. Bei exponentialverteilten Anteilen mit  $A = A_0$  ist nach Fischer die Streuung  $\sigma_p$  gleich dem Mittelwert  $m_p$  [64]. Für Klassen- und Verkaufsräume werden die kurzzeitigen Lastanteile auch für  $A = 1000m^2$  mittels Exponentialverteilung modelliert, da  $A_0 > 20m^2$ .

Tab. 4.9: Statistische Kenngrößen der Momentanwerte der Nutzlastanteile auf Basis von Tab. 4.8

Nutzung	Bezugsfläche $A_0$ [m <sup>2</sup> ]	quasi-ständiger Nutzlastanteil						transienter Nutzlastanteil					
		Verteilung: Gamma						Verteilung: EXP/GAMMA					
		$A = A_0^1$			$A = 1000m^2^2$			$A = A_0^1$			$A = 1000m^2^2$		
		$m_q$	$\sigma_q$	$1/\lambda_s$	$m_q$	$\sigma_q$	$1/\lambda_s$	$m_p$	$\sigma_p$	$1/\lambda_t$	$m_p$	$\sigma_p$	$1/\lambda_t$
Büro	20	0,5	0,67	5	0,5	0,32	5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,08	0,3
Lobby	20	0,2	0,34	10	0,2	0,16	10	0,4	0,4	1,0	0,4	0,12	1,0
Wohnen	20	0,3	0,34	7	0,3	0,16	7	0,3	0,3	1,0	0,3	0,08	1,0
Hotelzimmer	20	0,3	0,11	10	0,3	0,05	10	0,2	0,2	0,1	0,2	0,08	0,1
Krankenzimmer	20	0,4	0,5	7	0,4	0,4	7	0,2	0,2	1,0	0,2	0,08	1,0
Klassenraum	100	0,6	0,43	>10	0,6	0,23	>10	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5 <sup>1</sup>	0,3
Verkaufsraum	100	0,9	1,71	1-5	0,9	0,93	1-5	0,4	0,4	1,0	0,4	0,4 <sup>1</sup>	1,0

<sup>1</sup> mit  $\kappa = 1,0$

<sup>2</sup> mit  $\kappa = 2,0$  nach JCSS und in Anlehnung an Fischer [64]

Die Überlagerung des quasi-ständigen und des kurzzeitigen Nutzlastanteils erfolgt mittels Gl. (4.65) bzw. Gl. (4.66.) Abb. 4.7 zeigt beispielhaft die Verbesserung der Approximation der Gumbelverteilung an die empirische Verteilung im oberen Teil durch die logarithmische Gewichtung nach Maes & Breitung [116] beispielhaft (siehe Anhang Kap. 10.5.4). Eine Verbesserung der Anpassung im oberen Bereich der Verteilung zu Lasten der Anpassung im unteren, weniger relevanten Bereich ist zu erkennen.

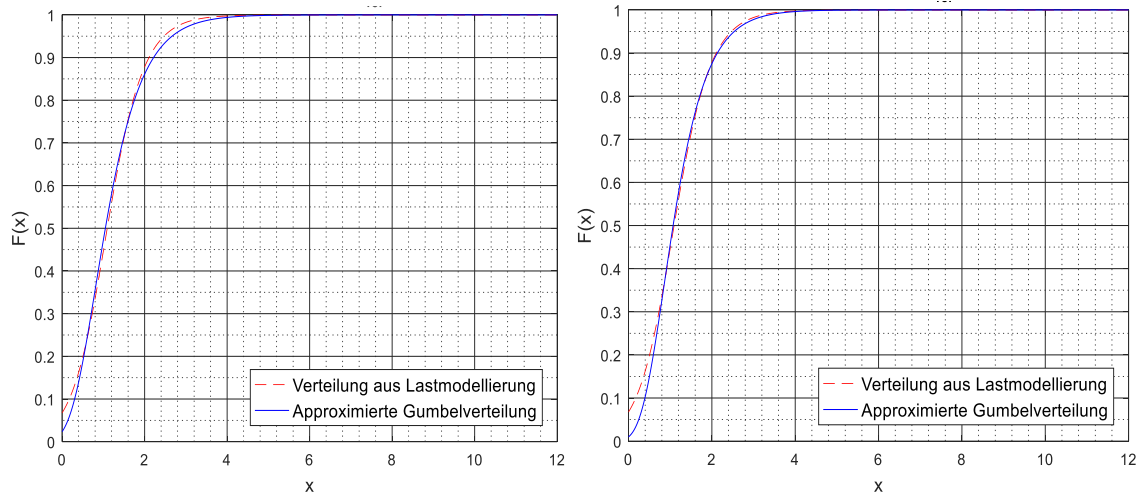


Abb. 4.7: Approximation der Gumbelverteilung an die empirischen Verteilung für die Nutzung „Lobby“ im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 1a$  ohne Gewichtung (links) und mit Gewichtung (rechts),  $A = A_0$

Tab. 4.10 enthält die Ergebnisse ohne Gewichtung, da im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  der mittlere Teil der Verteilung von Interesse ist (charakteristischer Wert als Modalwert angenommen). Die Fläche  $A = 1000m^2$  ist aus Modellierungsgründen stellvertretend für größere Räume angesetzt.

Tab. 4.10: Parameter der approximierten Gumbelverteilung für ausgewählte Nutzungsarten,  $T_{ref} = 50a$

Nutzung	Bezugsfläche $A_0$ [m <sup>2</sup> ]	$q_k$ nach EN 1991-1-1/NA	$T_{ref} = 50a$									
			$A = A_0$					$A = 1000 m^2$				
			$m_{tot}$	$\sigma_{tot}$	$u^1$	$V_x$	95% -Q.	$m_{tot}$	$\sigma_{tot}$	$u^1$	$V_x$	95% -Q.
Büro	20	B1 2,0	2,43	1,0	<b>2,00</b>	<b>0,39</b>	4,28	1,42	0,35	<b>1,26</b>	<b>0,24</b>	2,07
		B2 3,0										
Lobby	20	A2 1,5	2,02	0,73	<b>1,70</b>	<b>0,36</b>	3,31	1,00	0,21	<b>0,90</b>	<b>0,21</b>	1,39
		A3 2,0										
Wohnen	20	A2 1,5	1,78	0,57	<b>1,52</b>	<b>0,32</b>	2,79	0,94	0,18	<b>0,87</b>	<b>0,19</b>	1,27
		A3 2,0										
Hotelzimmer	20	A2 1,5	1,64	0,32	<b>1,50</b>	<b>0,19</b>	2,19	0,84	0,08	<b>0,81</b>	<b>0,10</b>	1,00
		A3 2,0										
Krankenzimmer	20	A2 1,5	1,69	0,69	<b>1,38</b>	<b>0,41</b>	3,00	1,28	0,51	<b>1,04</b>	<b>0,40</b>	2,23
		A3 2,0										
Klassenraum	100	C1 3,0	3,47	0,90	<b>3,07</b>	<b>0,26</b>	4,99	3,38	0,81	<b>3,02</b>	<b>0,24</b>	4,87
Verkaufsräume	100	D2 5,0	5,89	3,08	<b>4,50</b>	<b>0,52</b>	12,2	3,59	1,22	<b>3,04</b>	<b>0,34</b>	6,00

<sup>1</sup> Der Modalwert einer Gumbelverteilung bei  $T_{ref} = 50 J.$  entspricht dem 98%-Quantil bei  $T_{ref} = 1 J.$ , demnach  $u = q_k$

Tab. 4.11: Parameter der approximierten Gumbelverteilung für ausgewählte Nutzungsarten,  $T_{ref} = 1a$

Nutzung	Bezugsfläche $A_0$ [m <sup>2</sup> ]	$q_k$ nach EN 1991-1-1/NA	$T_{ref} = 1a$							
			$A = A_0$				$A = 1000 m^2$			
			$m_{tot}$	$\sigma_{tot}$	$q_k^1$	$V_x$	$m_{tot}$	$\sigma_{tot}$	$q_k^1$	$V_x$
Büro	20	B1 2,0	1,02	0,73	<b>2,91</b>	<b>0,71</b>	0,82	0,35	<b>1,71</b>	<b>0,43</b>
		B2 3,0								
Lobby	20	A2 1,5	1,19	0,72	<b>3,06</b>	<b>0,61</b>	0,75	0,21	<b>1,30</b>	<b>0,28</b>
		A3 2,0								
Wohnen	20	A2 1,5	0,93	0,59	<b>2,46</b>	<b>0,63</b>	0,67	0,20	<b>1,18</b>	<b>0,30</b>
		A3 2,0								
Hotelzimmer	20	A2 1,5	1,26	0,34	<b>2,13</b>	<b>0,27</b>	0,74	0,09	<b>0,98</b>	<b>0,12</b>
		A3 2,0								
Krankenzimmer	20	A2 1,5	0,78	0,59	<b>2,31</b>	<b>0,75</b>	0,61	0,43	<b>1,73</b>	<b>0,72</b>
		A3 2,0								
Klassenraum	100	C1 3,0	2,5	0,91	4,85	0,36	2,45	0,83	<b>4,60</b>	<b>0,34</b>
Verkaufsräume	100	D2 5,0	1,09	1,68	<b>5,45</b>	<b>1,55</b>	1,29	1,21	<b>3,17</b>	<b>0,94</b>

<sup>1</sup> Der Modalwert einer Gumbelverteilung bei  $T_{ref} = 50 J.$  entspricht dem 98%-Quantil bei  $T_{ref} = 1 J.$ , demnach  $u = q_k$

#### 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

Bei Umrechnung der Gumbelverteilung für verschiedene Bezugszeiträume gilt

$$\sigma_1 = \sigma_{50} \quad (4.67)$$

Beim Vergleich von Tab. 4.11 und Tab. 4.12 fallen Unterschiede der Werte auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bestimmung der Verteilung für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50 a$  aus Gl. (4.66) erfolgte. Die Verteilungsfunktionen wurden für beide Bezugszeiträume getrennt bestimmt und unabhängig voneinander durch eine Gumbelverteilung approximiert, weshalb Abweichungen entstehen.

*DIN EN 1990:2010-12* [16] enthält keine Angabe zur Definition des charakteristischen Wertes der Nutzlast. Nach *Grünberg* [101] und *fib Bulletin No. 80* [42] sind Nutzlasten als 95%-Quantil im Bezugszeitraum 50 Jahre charakterisiert. Tab. 4.10 und Tab. 4.11 zeigen, dass bei kleinen Räumen unter Annahme des Modelwertes in  $T_{ref} = 50a$  (98% -Quantilwert in  $T_{ref} = 1a$ ) eine gute Übereinstimmung mit den in *DIN EN 1991-1-1/NA:2020-12* [119] angegebenen Werten erreicht wird. Für große Räume wird mit der Annahme des charakteristischen Wertes als 95%-Quantilwert im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  eine gute Übereinstimmung erreicht. *Glowienka* [72] schlussfolgert aus eigenen Berechnungen, dass der charakteristische Wert der Nutzlast als 98%-Quantilwert in  $T_{ref} = 1a$  und somit analog zu Wind- und Schneelasten angenommen werden sollte. Um kleinere und größere Räume zu erfassen, werden basierend auf den Ergebnissen die charakteristischen Werte der Nutzlasten als 98%-Quantilwert in  $T_{ref} = 1a$  bzw. Modalwerte in  $T_{ref} = 50a$  angenommen. Tab. 4.12 stellt die Ergebnisse der Literatur gegenüber.

**Tab. 4.12: Parameter für die Nutzlastverteilung aus der Literatur ( $T_{ref} = 50a$ ) [kN/m<sup>2</sup>]**

Quelle	Büro ( $A_0 = 20m^2$ )				Wohnen ( $A_0 = 20m^2$ )				Klassenzimmer ( $A_0 = 100m^2$ )			
	$m_x$	$\sigma_x$	$u$	$V_x$	$m_x$	$\sigma_x$	$u$	$V_x$	$m_x$	$\sigma_x$	$u$	$V_x$
<i>EN 1991-1-1</i> (2012) [119]	-	-	<b>2,0</b>	-	-	-	<b>1,5</b>	-	-	-	<b>3,0</b>	-
<i>CIB W81</i> (1989) [114]	2,64	0,50	<b>2,41</b>	0,19	1,73	0,35	<b>1,57</b>	0,20	1,63	0,20	<b>1,54</b>	0,12
<i>Rackwitz</i> <sup>1</sup> (1996) [98]	1,81	0,37	<b>1,65</b>	0,20	1,52	0,44	<b>1,15</b>	0,29	2,65	0,95	<b>2,22</b>	0,36
<i>Sørensen, Svensson &amp; Stang</i> (2005) [120]	3,05	0,88	<b>2,97</b>	0,29	2,71	0,95	<b>2,10</b>	0,35	-	-	-	-
<i>Glowienka</i> (2007) [72]	2,51	0,93	<b>2,09</b>	0,37	1,81	0,50	<b>1,58</b>	0,28	3,49	0,66	<b>3,19</b>	0,19
<i>Fischer</i> (2010) [64]	2,54	0,93	<b>2,12</b>	0,37	1,85	0,51	<b>1,62</b>	0,28	3,63	0,74	<b>3,30</b>	0,20
<i>Honfi</i> <sup>2</sup> (2014) [121]	-	-	<b>3,60</b>	-	-	-	<b>2,20</b>	-	-	-	<b>3,10</b>	-
Eigene Berechnung $A = A_0$	2,43	1,0	<b>2,00</b>	0,39	1,78	0,57	<b>1,52</b>	0,32	3,47	0,90	<b>3,07</b>	0,26
Eigene Berechnung $A = 1000m^2$	1,42	0,35	<b>1,26</b>	0,24	0,94	0,18	<b>0,87</b>	0,19	3,38	0,81	<b>3,02</b>	0,24

<sup>1</sup> vorwiegend ruhende Lasten <sup>2</sup> Werte durch Ablesen aus den Graphen und darum möglicherweise unpräzise

Die Zusammenstellung zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Untersuchungen. Jedoch wird die Bezugsfläche häufig nicht angegeben und Modellannahmen unterscheiden sich. *Honfi* [121] berechnet die Gesamtnutzlast aus der Summe des quasi-ständigen und des unterbrochenen Lastanteils basierend auf einer *Monte Carlo Simulation* beider Werte für jeden Tag im Bemessungszeitraum von 50 Jahren. Nach Aussage des Autors [121] stimmen die Werte für die Wohnraumnutzung sehr gut mit den Angaben der *DIN EN 1991-1-1* [109] überein ( $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$  wurde angenommen<sup>3</sup>). Die Ergebnisse von *Honfi* [121] zeigen eine starke Abhängigkeit der Modellierungsergebnisse von der belasteten Fläche.

<sup>3</sup>  $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$  bei nicht ausreichender Querverteilung der Lasten, sonst  $q_k = 1,5 \text{ N/mm}^2$  bei Wohnraumnutzung in der A2

Nach Fischer [64] ist im Zuge von Umbaumaßnahmen eine Tendenz zu größeren Räumen zu verzeichnen, was einen Variationskoeffizienten für alle Nutzlastarten von  $V_q = 0,20$  rechtfertigt. Zur Untersuchung des Einflusses auf den Teilsicherheitsbeiwert und Berücksichtigung in der Kalibrierung wird die Nutzlast in dieser Arbeit wie in Tab. 4.13 festgelegt berücksichtigt (Gumbelverteilung).

**Tab. 4.13: Parameter zur Modellierung von Nutzlasten – Festlegung für diese Arbeit ( $T_{ref} = 50a$ )**

	$m_q/X_{k,q}$	$V_q$
Kleiner Raum (bis 20m <sup>2</sup> )	1,17	0,32
Großer Raum (über 20m <sup>2</sup> )	1,13	0,25

In Tab. 4.13 ist  $m_q$  der Erwartungswert,  $X_q$  der charakteristische Wert und  $V_q$  der Variationskoeffizient der Gesamtnutzlast. Durch diese Festlegung werden die Nutzlastkategorien A1, A2, A3 und B1 erfasst, wobei bei der Nutzung als Krankenzimmer die Festlegung für Räume bis 20m<sup>2</sup> gilt. Die Unterscheidung nach der Raumgröße ist als Orientierung zu sehen.

#### 4.4 Modellierung von veränderlichen Einwirkungen – Schneelasten

Die Beschreibung der Schneelast ist als stochastischer Prozess möglich. Nach Rackwitz [98] eignet sich die Modellierung als diskreter Prozess bei Messung der Zeit in Tagen. Dabei ist der Schneelastprozess die Summe aus zufälligen Aufträgen minus zufälligen Abträgen, wobei es unwahrscheinlich ist, dass beides am selben Tag auftritt. Nach Spaethe [63] bietet sich eine Modellierung als Poissonscher Pulsprozess in Dreiecksform an, dabei sind im maritimen Klima mehrere Belastungsimpulse je Winter vorhanden, während im kontinentalen Klima nur ein Belastungszeitraum existiert.

Laut Rackwitz [98] sind in Mitteleuropa die Witterungslagen von zwei bis höchstens vier Tagen noch miteinander korreliert. Somit kann für Schneefall und Abtragung eine alternierende (wechselnd positiv, negativ), markierte Binominalfolge angenommen werden. Es handelt sich um eine unabhängige, stationäre Folge, bei der kein Trend nachweisbar ist. Untersuchungen ergaben nach Rackwitz [98], dass die Gammaverteilung die Schneelast am besten abbildet. Für Überschlagsrechnungen und Bezugszeiträumen darf die Gammaverteilung durch eine Gumbelverteilung ersetzt werden (insbesondere maritimes Klima) [98]. Für kontinentales Klima kann eine Normalverteilung angemessen sein.

Für die üblichen Fragestellungen ist die Modellierung als stochastischer Prozess nicht nötig, nach Rackwitz [98] ist ein einfacheres Modell ausreichend, siehe auch [60] [122][123]. Dazu wird die Schneelast auf dem Dach in Abhängigkeit von der Schneelast auf dem Boden bestimmt. Die Schneelast auf dem Dach  $S_r$  berechnet sich zu [60]:

$$S_r = S_g \cdot r \cdot k^{h/h_r} \quad (4.68)$$

Dabei ist  $S_g$  die Schneelast auf dem Boden,  $r$  der Umrechnungsfaktor von der Schneelast auf dem Boden zur Schneelast auf dem Dach,  $k$  ist ein Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit von der Region,  $h$  die Höhenlage und  $h_r$  die Referenzhöhe von 300m über Normal Null (NN). Bei der Modellierung ist die auf den Boden projizierte Fläche der Dachfläche anzusetzen.



### Schneelast auf dem Boden

Nach Teil 2.12 des *Probabilistic Model Code* [60] ist Schneelast auf dem Boden  $S_g$  in Abhängigkeit von der Schneetiefe nach Gl. (4.69)

$$S_g = d\gamma(d) \quad (4.69)$$

mit  $d$  der Schneetiefe und  $\gamma(d)$  der durchschnittlichen Wichte des Schnees. Die durchschnittliche Wichte des Schnees  $\gamma(d)$  lässt sich aus der Schneetiefe nach Gl. (4.70) berechnen:

$$\gamma(d) = \frac{\lambda\gamma(\infty)}{d} \ln \left\{ 1 + \frac{\gamma(0)}{\gamma(\infty)} \left[ \exp\left(\frac{d}{\lambda}\right) - 1 \right] \right\} \quad (4.70)$$

Dabei soll nach *JCSS* [60]  $\gamma(\infty) = 5 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma(0) = 1,70 \text{ kN/m}^3$  und  $\lambda = 0,85 \text{ m}$  sein. Beim Vergleich mit Beobachtungen ist nach *Rackwitz* [98] eine Streuung mit einem Variationskoeffizienten von 15% bis 25% vorhanden. Die Streuung nimmt mit wachsender Schneehöhe ab. Die Aussagekraft der Schneetiefe ist eingeschränkt. Wasserwerte wären nach *Rackwitz* [98] vorzuziehen, diese liegen aber nur in geringem Umfang vor. Die Schneedichte wächst mit dem Alter der Schneedicke. Verantwortlich dafür sind Umkristallisation, Windverfrachtung und Frost-Tau-Wechsel. Außerdem wächst sie mit zunehmender Schneetiefe aufgrund von Zusammendrücken durch Eigengewicht.

Diese Grundsneelast soll nach *Rackwitz* [98] als 98%-Quantil der Verteilung definiert werden (Bezugszeitraum  $T_{ref} = 1a$ ). Dies ist dem geschuldet, dass vor allem in tieferen Lagen starke Schneefälle immer wieder zu Schäden und Einstürzen führen, da die Lasten unterschätzt werden.

### Schneelast auf dem Dach

Zur Umrechnung der Schneelast auf dem Boden in die Schneelast auf dem Dach ist nach *Probabilistic Model Code* [117] der Faktor  $r$  vorgesehen, Gl. (4.72)

$$r = \eta_a C_e C_t + C_r \quad (4.71)$$

Dabei ist  $\eta_a$  der Formkoeffizient,  $C_e$  der Umgebungskoeffizient,  $C_t$  der Temperaturkoeffizient zur Berücksichtigung des thermischen Einflusses (z.B. Beheizung) und  $C_r$  ein Faktor zur Berücksichtigung der Umverteilung des Schnees durch Wind. Die Faktoren  $\eta_a$  und  $C_e$  können zusammengefasst und Abhängigkeit vom Dachneigungswinkel gewählt werden. Die Werte enthält Tab. 4.14, Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Tab. 4.14: Form- und Oberflächenkoeffizient für die Schneebeanspruchung aus *JCSS PMC Teil 2.12* [60]

$\alpha = 0^\circ$	$C_e \eta_a = 0,4 + 0,6 \cdot \exp(-0,1 \cdot u(H))$
$\alpha = 25^\circ$	$C_e \eta_a = 0,7 + 0,3 \cdot \exp(-0,1 \cdot u(H))$
$\alpha = 60^\circ$	$C_e \eta_a = 0$

$u(H)$  ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit über eine Woche auf Dachhöhe. Nach *DIN EN 1991-1-3:2010-12* und bei *Rackwitz* [98] ist anstelle dessen der Formbeiwert  $\mu_i$  enthalten (Tab. 4.15). Damit lautet die Umrechnung von der Schneelast auf dem Boden in die Schneelast auf dem Dach

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k \quad (4.72)$$

wobei  $S_k$  der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Boden ist.

Tab. 4.15: Formbeiwert  $\mu_1$  und  $\mu_2$  aus DIN EN 1991-1-3:2010-12 [122]

Formbeiwert	Dachneigung $\alpha$		
	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,8	$0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30^\circ$	0
$\mu_2$	$0,8 + 0,8 \cdot \alpha / 30^\circ$	1,6	1,6

Die Formbeiwerte gelten, wenn der Schnee ungehindert vom Dach abrutschen kann. Wird das Abrutschen behindert (z.B. durch Schneefanggitter, Brüstungen o.Ä.) ist der Formbeiwert  $\mu = 0,8$  anzusetzen.

Nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [123] ist  $C_e = 1$ . Zudem ist nach Rackwitz [98] für maritimes Klima und nach [123] für Deutschland  $C_t = 1$ . Tab. 4.16 gibt die Werte nach JCSS.

Tab. 4.16: Werte für den Faktor  $C_t$  für die Schneebeanspruchung aus JCSS PMC Teil 2.12 [60]

$C_t = 1$	Wenn keine Beheizung stattfindet
$C_t = 0,8$	Andernfalls, für die meisten gängigen Fälle

Die Umverteilung durch Wind darf bei Pultdächern vernachlässigt werden. Für symmetrische Satteldächer kann der Faktor als konstant und dem Wert  $C_t$  entsprechend angenommen werden.  $C_r$  folgt nach JCSS [60] einer  $\beta$ -Verteilung und ist abhängig vom Dachneigungswinkel. Für andere Dachformen sollen numerische Werte (z.B. nach ENV 1991-2-3 und ISO 4355) angewendet werden [60].

Tab. 4.17 stellt die Werte für  $C_r$  nach PMC [60] für verschiedene Dachneigungswinkel zusammen. Der Wert kann zu null gesetzt werden, wenn keine Umverteilung berücksichtigt wird.

Tab. 4.17 Werte für  $C_r$  zur Berücksichtigung des Windeinflusses in Abhängigkeit vom Dachneigungswinkel aus JCSS [60]

Dachneigungswinkel [°]	$C_r$
10	0
20	0,70
30	0,15
40	0,15
50	0,80
60	0

Nach Rackwitz [98] ist das beschriebene Modell zweckmäßig, hat jedoch Schwächen. Faktoren wie die Geometrie des Daches wären eigentlich als streuende Größen zu betrachten. Dennoch dürfen die Größen nicht wie unabhängige Zufallsgrößen überlagert werden, da zum Teil deutliche, jedoch unbekannte Korrelationen vorliegen. Weiter sind die Angaben für kompliziertere Dachformen nur als Empfehlungen aufzufassen, ggf. sind Modellversuche durchzuführen. Schneelasten streuen stark. Die auf dem Boden beobachteten Lasten weisen Variationskoeffizienten von 30-70% auf ( $T_{ref} = 1a$ ). Auf dem Dach kommen weitere unsichere Faktoren wie die Umverteilung durch Wind hinzu.

In Grünberg [101] wird bei einem Bezugszeitraum von 50 Jahren ein Variationskoeffizient von  $V_S = 0,25$  bei Verwendung einer Gumbelverteilung für die Schneelast auf dem Dach angegeben. Dies wird für diese Arbeit verwendet. Daraus ergibt sich  $m_s/X_{k,s} = 1,12$  mit  $m_s$  dem Erwartungswert und  $X_S$  der Schneelast dem charakteristischen Wert bestimmt werden.

## 4.5 Modellierung von veränderlichen Einwirkungen – Windlasten

Wind setzt sich aus einem quasi-statischen und einem böigen Anteil zusammen. Bei nicht-schwingungsanfälligen Bauwerken können dynamische Windeinflüsse mittels eines Böenreaktionsfaktors berücksichtigt werden. Dadurch wird eine quasi-statische Ersatzlast berechnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden nicht-schwingungsanfällige Gebäude untersucht. Für diese Gebäude kann das Windlastmodell mit dem vereinfacht ermittelten Böengeschwindigkeitsdruck zur Anwendung kommen.

Im probabilistischen Modell werden die Einflussfaktoren auf die Windkraft als Zufallsvariablen modelliert. Die Windkraft  $w$ , welche auf eine Flächeneinheit einer Konstruktion wirkt kann nach *JCSS Probabilistic Model Code Teil 2.13* [60] mit

$$w = c_a \cdot c_g \cdot c_r \cdot \bar{Q}_{ref} = c_a \cdot c_e \cdot \bar{Q}_{ref} \quad (4.73)$$

bestimmt werden, wobei  $c_a$  der aerodynamische Formfaktor,  $c_g$  der Böenfaktor,  $c_r$  der Rauigkeitsfaktor und  $\bar{Q}_{ref}$  der mittlere Vergleichsdruck (Windgeschwindigkeit auf freiem Feld) sind. Die mittlere Vergleichswindgeschwindigkeit folgt nach *JCSS Teil 2.13* [60] einer Weibullverteilung, die maximale Windgeschwindigkeit für längere Zeitperioden dagegen einer Gumbelverteilung. Der Variationskoeffizient der jährlichen maximalen Windlast ist von der Klimazone abhängig und liegt in der Regel zwischen  $V_1 = 0,10 \dots 0,35$ . Stürme mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $> 10$  m/s sollen nach *JCSS* als unterbrochener Rechteckwellenprozess modelliert werden.

Der Erwartungswert  $E(x)$  und die Varianz  $V_w^2$  der gesamten Windlast wird mit

$$E(w) = E(c_g) \cdot E(c_a) \cdot E(c_r) \cdot E(\bar{Q}_{ref}) \quad (4.74)$$

$$V_w^2 = V_{c_g}^2 \cdot V_{c_a}^2 \cdot V_{c_r}^2 \cdot V_{\bar{Q}_{ref}}^2 \quad (4.75)$$

bestimmt. Nach *JCSS Probabilistic Model Code* kann eine logarithmische Normalverteilung für die einzelnen Zufallsgrößen angenommen werden [60]. Umfangreiche Ausführungen zur Modellierung der einzelnen Parameter finden sich in [60] und bei *Rackwitz* [98]. Neuere Überlegungen zur Windlastmodellierung können beispielsweise in *Botha et al.* [124] nachgelesen werden.

Laut *DIN EN 1991-1-4:2010-12* [125] sind Windeinwirkungen mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2% bzw. einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren definiert. Die charakteristischen Werte für verschiedenen Bedingungen sind in *DIN EN 1991-1-4* [125] bzw. *DIN EN 1991-1-4/NA* [126] definiert. Nachfolgend wird das vereinfachte statistische Modell nach *König & Hosser* [127] erläutert und beispielhaft mit dem Eurocode verglichen. Die Windeinwirkung  $w$  wird ermittelt zu

$$w = c_{pe} \cdot q_p \quad (4.76)$$

wobei der  $c_{pe}$ -Wert die Bauwerksgeometrie und die Windrichtung erfasst. Der Staudruck  $q_p$  kann mit der  $\rho$  Luftdichte ( $1,226 \text{ kg/m}^3$ ) und der Windgeschwindigkeit  $v$  in m/s ermittelt werden zu

$$q_p = \frac{1}{2} \rho v_z(t)^2 \approx \frac{v_z^2}{1600} \quad (4.77)$$

Umgestellt zu

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{p}} \quad (4.78)$$

wird  $v$  auch als Reynoldszahl bezeichnet [125]. Die Windgeschwindigkeit  $v_z$  kann in einen sich langsam ändernden  $\bar{v}$  und einen turbulenten Anteil  $v'$  aufgeteilt werden [63]:

$$v_z(t) = \bar{v}_z + v'_z(t) \quad (4.79)$$

Der Anteil  $\bar{v}$  ist von der Geländehöhe abhängig. Durch die Rauigkeit des Geländes nimmt er mit der Höhe zu. Folgendes Potenzgesetz kann als Näherung verwendet werden [63]:

$$\bar{v}_z = \bar{v}_G \cdot \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha \quad (4.80)$$

Hier sind  $\bar{v}_G$  die Geschwindigkeit in der Gradientenhöhe  $z_G$  und  $\alpha$  der Koeffizient für die Bodenrauigkeit,  $z$  ist die Bauwerkshöhe. Die Geschwindigkeit  $\bar{v}_G$  stellt die Jahresextremwerte dar. Sie kann nach JCSS [60] durch eine Gumbelverteilung approximiert werden. Der Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit ist nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 [125] der charakteristische Wert der mittleren 10-Minuten Geschwindigkeit. Spaethe [63] gibt Jahresmaxima für das 10-min-Mittel wie folgt an:

Tab. 4.18 Statistische Parameter der Windgeschwindigkeit aus Spaethe [63] – Auszug

Meteorologische Station	Standortkategorie	$m_{\bar{v}_G}$ [m/s]	$\sigma_{\bar{v}_G}$ [m/s]	$V_{\bar{v}_G}$
Warnemünde	Küstengebiet	26,09	3,89	0,15
Schwerin	Binnentiefeland	21,55	3,64	0,17
Neustrelitz	Binnentiefeland	17,51	3,91	0,22
Potsdam	Binnentiefeland	20,18	3,77	0,19
Weimar	Mittelgebirgsvorland, mäßig windgeschützte Lagen	21,37	2,72	0,13
Fichtelberg	Kamm- & Gipfellagen d. Mittelgebirge (außer Brocken)	28,22	3,67	0,13

Nach König & Hosser [127] betragen die Werte für Deutschland in Normallagen  $m_{\bar{v}(g)} = 29,6 \text{ m/s}$  und  $V_{\bar{v}(g)} = 0,12$ . Nachfolgend werden die Werte nach König & Hosser [127] für die weitere Betrachtung angenommen. Unter Verwendung von Gl. (4.77) weisen König & Hosser [127]  $m_{\bar{q}(g)} = 0,548 \text{ kN/m}^2$  als Mittelwert für den Staudruck aus. Der Variationskoeffizient des Staudrucks  $V_{\bar{q}_G}$  darf als das Zweifache des Variationskoeffizienten der Gradientengeschwindigkeit angenommen werden.

$$V_{\bar{q}_G} \approx 2 \cdot V_{\bar{v}_G} = 0,24 \quad (4.81)$$

Aus dem Quantilwert des Staudrucks  $\bar{q}_{Gk}$  wird die Gradientengeschwindigkeit berechnet, mit dieser die Böengeschwindigkeit  $\bar{v}_{Gk}$ . Der Windstaudruck wird aus der Böengeschwindigkeit ermittelt. Das 98%-Quantil des Staudrucks des quasi-statischen Anteils bei Annahme einer Gumbelverteilung ist (Anm. bei König & Hosser [127] 99%-Quantil, hier nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 98%-Quantil):

$$g_k = u - \frac{1}{a} \cdot \ln(-\ln p) \quad (4.82)$$

Mit  $u = m - \frac{0,5772 \cdot V \cdot m \cdot \sqrt{6}}{\pi}$  und  $a = \frac{\pi}{m \cdot V \cdot \sqrt{6}}$  nach DIN EN 1990:2010-12 Anhang C. Damit wird

$$\bar{q}_{Gk} = q_{G98\%} = m_{\bar{q}_G} \cdot \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6} \cdot V_{\bar{q}_G}}{\pi} \cdot [0,5772 + \ln(-\ln 0,98)] \right\} = 0,889 \text{ kN/m}^2 \quad (4.83)$$

Es ergibt sich umgestellt aus (4.77 nach [127] die Gradientengeschwindigkeit  $\bar{v}_{Gk}$  zu

#### 4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

$$\bar{v}_{Gk} = \sqrt{1600 \cdot \bar{q}_{Gk}} = 37,7 \text{ m/s} \quad (4.84)$$

Wie in Gl. (4.79) dargestellt, ist zum konstanten Anteil der Windgeschwindigkeit ein turbulenter Anteil hinzuzurechnen. Dieser ist

$$v'_z = \bar{v}_G \cdot \xi \cdot \left(\frac{z_1}{z_G}\right) \quad (4.85)$$

Hier ist  $z_1$  eine Bezugshöhe von 10 m,  $z_G$  die Gradientenhöhe abhängig von der Windlastzone und  $\xi$  dem Böenkoeffizient. Damit ergibt sich die gesamte Böengeschwindigkeit  $v_{zk}$  zu [127]

$$v_{zk} = \bar{v}_{Gk} \left[ \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha + \left(\frac{z_1}{z_G}\right)^\alpha \cdot \xi \right] \quad (4.86)$$

Nach König & Hosser [127] können folgende Werte für die Parameter verwendet werden:

Tab. 4.19: Charakteristische Werte der Böengeschwindigkeit aus König & Hosser [127]

	$\alpha$	$\xi$	$z_G$
Offenes Gelände	0,16	0,56	200 m
Stadt	0,28	0,98	400 m

Mit (4.77) kann der Staudruck über die Höhe berechnet werden. Grafisch ergibt sich folgender Vergleich mit den vereinfachten Böengeschwindigkeitsdrücken nach DIN EN 1991-1-4/NA [126]. Die Grafik stimmt sehr gut mit der nach König & Hosser [127] überein. Es wird deutlich, dass die genauer berechneten Werte in beiden Fällen etwas unter den vereinfachten nach DIN EN 1991-1-4/NA liegen. Dies ist aufgrund des erhöhten Genauigkeitsgrades auch sinnvoll.

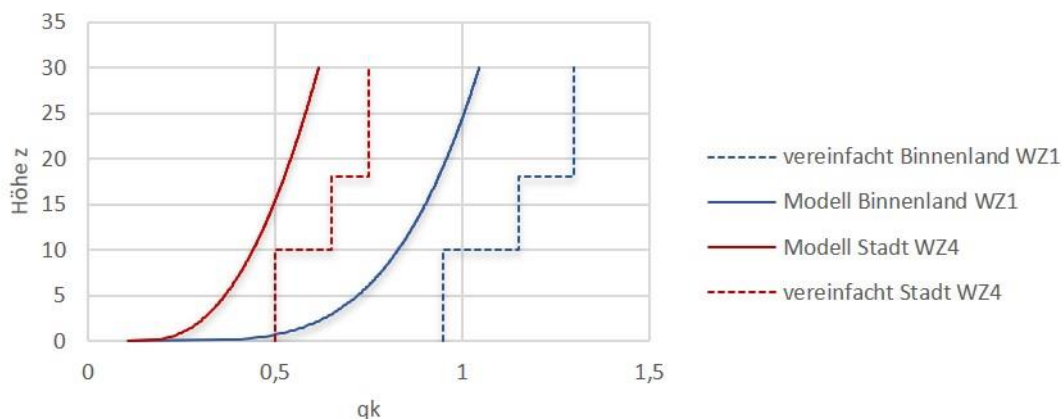


Abb. 4.8: Charakteristischer Geschwindigkeitsdruck aus DIN EN 1991-1-4/NA und vereinfachtes stochastisches Modell

Weiter ist der  $c_p$ -Wert mit einer Streuung zu versehen. Nach Probabilistic Model Code Teil 2.13 soll dieser mit einem Variationskoeffizienten von 10-15% angesetzt werden [60]. Mit  $V_{cp} = 0,10$  als Variationskoeffizienten für den Winddruck wird

$$V_{w,1} = \sqrt{V_q^2 + V_{cp}^2} = \sqrt{0,24^2 + 0,1^2} = 0,26 \quad (4.87)$$

Eine Berechnung mit den Angaben des JCSS Probabilistic Model Codes und Gl. (4.75) nach [60] ergibt

$$V_{w,1} = \sqrt{V_{\bar{q}_{ref}}^2 + V_{c_r}^2 + V_{c_{a,f}}^2 + V_{c_g}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2} = 0,26 \quad (4.88)$$

Die Berechnungen basieren auf der Annahme der Unkorreliertheit der Variablen. Der Faktor für die dynamische Antwort des Tragwerks wurde nicht berücksichtigt, da schwingungsanfällige Tragwerke in

dieser Arbeit vernachlässigt wurden. Rackwitz [98] schlägt einen Gesamtvariationskoeffizienten von  $V_{w,1} = 0,30$  vor, resultierend aus Werten von 10-20% für die Variationskoeffizienten der Einflussfaktoren. Nach Lourenço et al. [128] ist  $V_{w,1} = 0,35-0,40$  anzunehmen. Rackwitz [98] folgend wird für den Bezugszeitraum von  $T_{ref} = 1a$   $V_{w,1} = 0,30$  angenommen. Die Werte sind auf den Zeitraum  $T_{ref} = 1a$  bezogen. Für die Umrechnung auf den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  kann wie folgt vorgegangen werden:

$$m_{w,50} = m_{w,1} + 0,78 \cdot \sigma \cdot \ln(50) = m_{w,1} + 0,78 \cdot m_{w,1} \cdot V_{w,1} \cdot \ln(50) \quad (4.89)$$

$$\frac{m_{w,50}}{m_{w,1}} = 1 + 0,78 \cdot V_{w,1} \cdot \ln(50) = 1,92 \quad (4.90)$$

Der Mittelwert  $m_w$  ist von der Höhe abhängig, aus diesem Grund kann hier nur das Verhältnis aus den Werten mit einjährigem Bezugszeitraum zum 50-jährigem Bezugszeitraum angegeben werden.

$$\sigma = V_{w,1} \cdot m_{w,1} = V_{w,50} \cdot m_{w,50} \quad (4.91)$$

$$V_{w,50} = \frac{V_{w,1} \cdot m_{w,1}}{m_{w,50}} \approx 0,16 \quad (4.92)$$

Dies ist auch in Grünberg [101] zu finden. Es ergibt sich  $m_w/X_{k,w} = 1,09$  mit  $m_w$  dem Mittelwert und  $X_w$  dem charakteristischen Wert der Windlast.

#### 4.6 Modellunsicherheiten auf der Einwirkungsseite

Wie in Kap. 3.5.4 beschrieben, sind eine Reihe von Unsicherheitsquellen bei Bemessung und Nachweis von Baukonstruktionen vorhanden. Auf Einwirkungsseite resultieren diese Unsicherheiten maßgeblich aus Berechnungsvereinfachungen und den gewählten Verfahren bei der Schnittgrößenermittlung. Die Schnittgrößenermittlung erfolgt bei Holzbauteilen in der Regel nach Theorie I. Ordnung. Für die wesentlichen Belastungsbereiche kann ein lineares Tragverhalten unterstellt werden. Jedoch treten auch beim Holz beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze plastische Verformungen auf. Diese ist bei Druckbeanspruchung deutlich früher erreicht, als bei Zugbeanspruchung. Der E-Modul schwankt mit der Holzart. Zwar erfolgt eine Einteilung in Festigkeitsklassen, in diesen sind jedoch verschiedene Holzarten zusammengefasst. Die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten gelten auch für Bauholz, es treten größere Streuungen als bei ungestörtem Holzgefüge auf [113].

Eine eindeutige Trennung der Modellunsicherheit in einen Anteil auf Einwirkungs- und einen auf Widerstandsseite fällt schwer. Die Unsicherheit der Festlegung des E-Moduls hat sowohl einen Einfluss auf die Schnittgrößen als auch für die Quantifizierung von Steifigkeiten. Nach Rackwitz [98] könnte die Modellierung von Einwirkungen nur bis zu dem Punkt erfolgen, ab dem die Wirkung des Bauwerkes beginnt, was schwer zu definieren ist. Zudem wären Interaktionen zwischen Bauwerk und Einwirkung kaum zu modellieren. Demnach muss eine gewisse Unschärfe in Kauf genommen werden. Ein weiteres Problem resultiert aus der nicht direkten Messbarkeit der Schnittgrößen. Mit genaueren Rechenverfahren wie FE-Analysen ist eine bessere Abschätzung möglich, die Implementierung ist jedoch auf-

4. Modellierung von Einwirkungen auf Holzbauten im Bestand

grund begrenzter Kenntnis der Materialeigenschaften, insbesondere bei Holz als inhomogenes Material, ebenfalls nicht exakt. Die Quantifizierung von Modellunsicherheiten ist jedoch von großer Wichtigkeit, da nach Hansen [129] die Versagenswahrscheinlichkeit mit zunehmenden Variationskoeffizienten der Modellunsicherheit überproportional zunimmt. Modellunsicherheiten können als eine Erhöhung des Variationskoeffizienten oder als zusätzliche streuende Basisvariable in der Bemessung berücksichtigt werden. Nach JCSS Probabilistic Model Code Teil 3.9 [61] kann man schreiben:

$$Y' = \theta_1 f(X_1 \dots X_n) \tag{4.93}$$

oder 
$$Y' = \theta_1 + f(X_1 \dots X_n) \tag{4.94}$$

$Y'$  steht dabei für die reale Größe,  $X_i$  sind die Basisvariablen,  $\theta_1$  beschreibt die Parameter, die Modellunsicherheiten enthalten, und  $f()$  ist die Modellfunktion. Auch eine Kombination von beiden Definitionen ist möglich. Eine Anbindung der Modellunsicherheit an die Basisvariable ist mittels

$$X'i = \theta_1 X_i \tag{4.95}$$

möglich. Dies ist dann nötig, wenn Schnittgrößen aus unterschiedlichen Einwirkungen resultieren. Die Größe der Modellunsicherheit hängt auch vom Grad der statischen Bestimmtheit ab. Bei statisch unbestimmtem System wäre zusätzlich die Streuung der Steifigkeit zu berücksichtigen. Da dies jedoch häufig vernachlässigt wird, ist die Streuung der Modellunsicherheit bei hoch unbestimmten Systemen nach Glowienka [72] geringer einzustufen, als bei statisch bestimmten Systemen.

Modellunsicherheiten auf Einwirkungsseite werden nach JCSS Probabilistic Model Code in Unsicherheiten des Berechnungsmodells der Last und Unsicherheiten des Lasteffektes unterteilt [61]. Die folgende Tabelle stellt Annahmen für erstgenanntes von verschiedenen Autoren zusammen:

Tab. 4.20: Statistische Parameter für Modellunsicherheiten der Einwirkung  $\theta_e$  nach verschiedenen Autoren

Nach Autor	Jahr	Einwirkung	Mittelwert $m_\theta$	$V_\theta$	Verteilung
Vrouwenvelder [130]	2002	Ständig	1,00	0,10	N
Hansen [129]	2004	Unabhängig	k.A.	0,10	N/ LN
Faber, Köhler, Sørensen [131]	2007	Ständig	1,00	0,10	LN
		Veränderlich	1,00	0,05-0,10	LN

Für Variationskoeffizienten bis  $V_\theta = 10\%$  hat es nach Hansen [129] keinen Einfluss, ob die Modellunsicherheit als normal- oder als lognormalverteilt angenommen wird. Insgesamt betrachtet liegen zur Quantifizierung der Modellunsicherheit relativ wenige Untersuchungen vor. Auch ein Optimierungspotential für den Bestandsbau wäre zu diskutieren. Umfassende eigene Untersuchungen konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, weshalb sich auf die Angaben aus der Literatur fokussiert wird. Ständige Einwirkungen können im Bestandsbau im Rahmen der Bestandsaufnahme in situ mit einem hohem Genauigkeitsgrad bestimmt werden. Aus diesem Grund wird die Modellunsicherheit für diese in dieser Arbeit reduziert. Für den Modellfaktor auf der Einwirkungsseite werden die Festlegungen nach Tab. 4.21 getroffen.

Tab. 4.21: Festlegung zur Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite

Einwirkung	Verteilung	$m_x/X_k$	Variationskoeffizient
Ständige Einwirkung	N	1,0	0,05
Nutzlast	N	1,0	0,10
Schneelast	N	1,0	0,10
Windlast	N	1,0	0,10

## 4.7 Zusammenfassung statistischer Parameter

Tab. 4.22 stellt die für diese Arbeit benötigten statistischen Parameter zu probabilistischen Modellierung der Einwirkungen zusammen. Die Angaben gelten für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$ .

Tab. 4.22: Statistische Parameter zur Modellierung von Einwirkungen

	Basisvariable	Sym- bol	Vertei- lung	$m_x^1$	$V_x$	Bemerkung
Einwirkungen	<b>Ständige Einwirkung</b>					
	Konstruktionseigenlast	$G$	N	1,0	0,10	In Anlehnung an [132]
	<b>Veränderliche Einwirkungen</b>					
	<b>Nutzlast – Kategorie A1, A2, A3, B1</b>					
	Verteilung der Maximalwerte im Bezugszeitraum					
	Kleiner Raum (bis 20m <sup>2</sup> )	$N$	GUM	1,0	0,40	Eigene Berechnungen und [98, 114, 117]
	Großer Raum (über 20m <sup>2</sup> )	$N$		1,0	0,25	
	Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·365	-	in Anlehnung an [85]
	Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	5·365	-	
	<b>Schneelast</b>					
	Verteilung der Maximalwerte im Bezugszeitraum	$S$	GUM	1,0	0,25	in Anlehnung an [101]
	Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·60	-	in Anlehnung an [85]
	Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	10	-	(angepasst unter Annahmen für Dt.)
	<b>Windlast</b>					
	Verteilung der Maximalwerte im Bezugszeitraum	$W$	GUM	1,0	0,16	in Anlehnung an [98, 101]
Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·365	-	in Anlehnung an [85]	
Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	50·365	-		
Modell	<b>Einwirkungsseite</b>					
	Ständige Einwirkung	$\theta_G$	N	1,0	0,05	Vorschlag
	Nutzlast	$\theta_N$	N	1,0	0,10	Multiplikativ in Anlehnung an [129, 133, 134]
	Schneelast	$\theta_S$	N	1,0	0,10	
	Windlast	$\theta_W$	N	1,0	0,10	

<sup>1</sup> durch Normierung mittels Bemessungsparameter  $Z_d$

Zur Bestimmung des Erwartungswertes aus dem charakteristischen Wert (Modalwert) können abhängig von der Lastart folgende Verhältnisse verwendet werden (Tab. 4.23).

Tab. 4.23: Verhältnis  $m_x/x_k$  für verschiedene Lasten bei Annahme einer Gumbelverteilung

Last	$m_x/x_k$
Schneelast	1,13
Windlast	1,08
Nutzlast, $V_N = 0,25$	1,13
Nutzlast, $V_N = 0,32$	1,17



## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

### 5.1 Bewertung von Holzbauteilen im Bestand

#### 5.1.1 Schritte der Bestandsbewertung

Zur Überprüfung bestehender Konstruktionen müssen diese in situ begutachtet und exakt dokumentiert werden [135]. Zur Vereinheitlichung der Bestandsbewertung und Weiterentwicklung aktueller Normen bestehen europäische Bestrebungen. So wurden im Rahmen der *COST Action IE0601* Richtlinien zur Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand erarbeitet [9]. Zudem beschäftigte sich die *COST Action FP1101* mit Bestandsaufnahme, Verstärkung und Überwachung von Holzkonstruktionen. Die Erfassung und Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand ist als mehrstufiger Prozess zu verstehen. Mit dem Forschungsbericht stellen [136] *Lißner & Rug* (2004) die Anwendung der geltenden Normen für den Bestandsbau dar. Eine Aktualisierung des Berichtes findet sich in [10]. In [12] findet sich ein Schema zu Analyse und Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand. Dargestellt ist ein vierstufiger Prozess, dessen Schritte nach Bedarf abhängig von der individuellen Konstruktion und dem Untersuchungsbedarf präzisiert und ausgebaut werden können. Die Schritte umfassen

1. die Erfassung des Bauzustandes,
2. die Ermittlung der Schadensursache,
3. die Bewertung des Bauzustandes und
4. die Festlegung bautechnischer Maßnahmen.

Die Ergebnisse aus dem Bericht wurden in die Erläuterung zur *DIN 1052:2004-08* aufgenommen [137]. Die *COST Action E55 „Modeling of the Performance of Timber Structures“* wurde von 2006-2010 durchgeführt und bestand aus den folgenden drei Arbeitsgruppen (Working Groups, WG): WG 1 Aufnahme von Versagensfällen und Fehlfunktionen, WG 2 Schadenspotential von Holzkonstruktionen und WG 3 Robustheit von Holzkonstruktionen. Der Bericht [138] „*Assessment of Timber Structures*“ entstand aus der WG 1. Im Teilbericht werden Schritte der Bestandsaufnahme [139, S. 13] zusammengefasst:

1. Aufnahme des Zustandes des Gebäudes und der Konstruktion,
2. Erfassung und Dokumentation von Schäden (Art, Erscheinungsbild),
3. Bestimmung von Schadensursachen,
4. Bewertung des Effektes und der Konsequenzen der Schädigung,
5. Spezifizierung der notwendigen Handlungen und Instandsetzungsmaßnahmen.

Aus einer umfassenden Literaturschau zum Thema leiten *Perria & Sieder* [44] ein sechsstufiges Verfahren ab. Dieses umfasst die folgenden Schritte:

1. Literaturstudie
2. Vorläufige Untersuchung
3. Detaillierte Untersuchung
4. Tragfähigkeitsbewertung
5. Spezielle Anforderungen
6. Festlegung von Interventionen

Die grundlegende Systematik der Schritte der Bestandsaufnahme stimmt in den drei genannten Veröffentlichungen gut überein und findet sich auch entsprechend in *DIN EN 17121:2019* [43] wieder. Diese regelt die Schritte der Tragfähigkeitsüberprüfung bis hin zur detaillierten Untersuchung, jedoch keine vertieften Hinweise zur rechnerischen Überprüfung.

Die Technical Specification *DIN CEN/TS 17440:2020* [45] des *CEN/TC250* wendet die Grundsätze der *DIN EN 1990:2010-12* [16] auf den Bestandsbau an, lässt jedoch auch Freiraum für nationale Regelungen. So sind beispielsweise keine Anpassungen von Zielzuverlässigkeiten oder Teilsicherheitsbeiwerten für den Bestandsbau gegeben, eine nationale Festlegung dieser wird jedoch ermöglicht.

In der Praxis erfolgt in der Regel keine umfassende Bestimmung von Materialparametern vor Ort. Zwar muss auch bei der Bewertung bestehender Konstruktionen eine visuelle Festigkeitssortierung durchgeführt werden, dies geschieht nach [140] in der Praxis aufgrund fehlender Qualifizierung jedoch selten. Des Weiteren erfolgt keine Aktualisierung von Lasten anhand von spezifischen Daten. Die Möglichkeit der Erhöhung des Informationsstandes, z.B. durch zerstörungsfreie bis zerstörungssarme Materialuntersuchungen in situ, wird bis dato wenig genutzt, was häufig zur Unterschätzung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen und damit zu unverhältnismäßigen Maßnahmen führt. Es besteht weiterer Normungsbedarf bezüglich gut zugänglicher rechnerischer Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen.

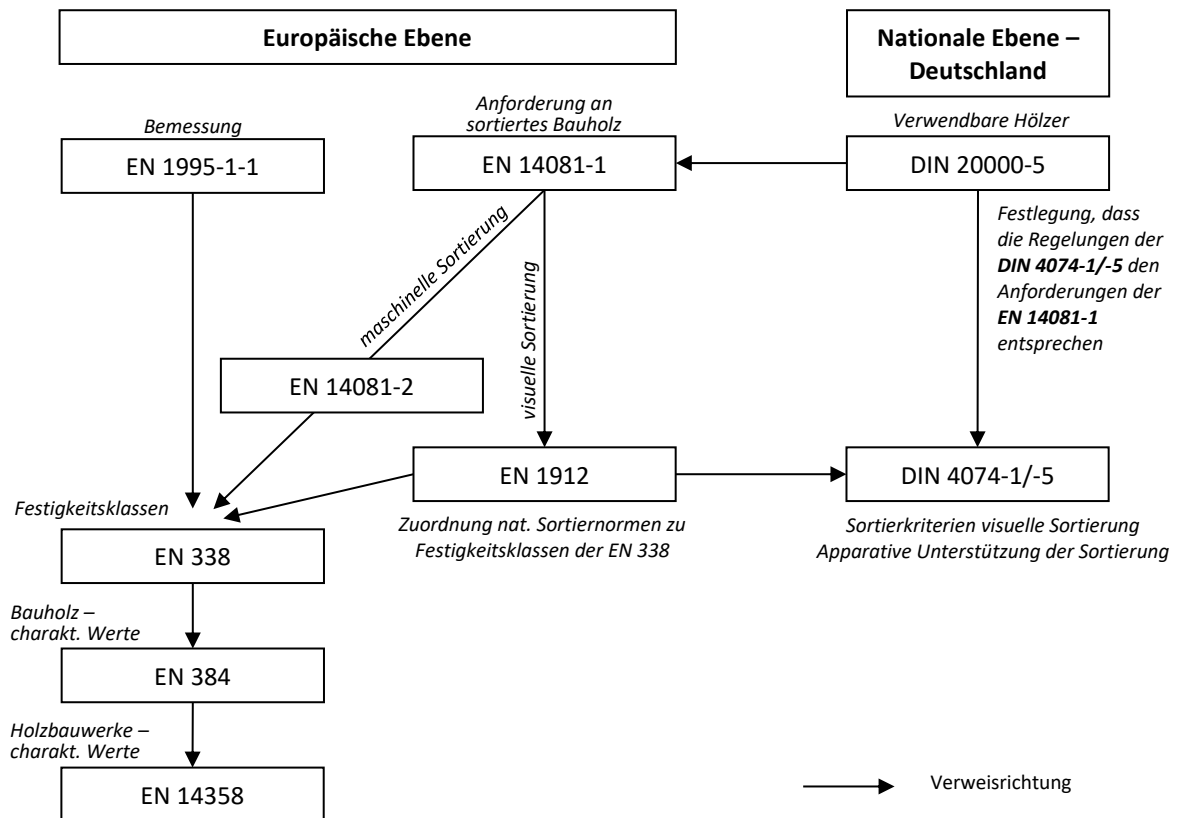
### 5.1.2 Festigkeitssortierung im Bestand

#### Grundlegendes

Die Bewertung und Quantifizierung der Materialeigenschaften ist für inhomogene Baustoffe nicht trivial. Insbesondere die natürliche Variabilität der Eigenschaften des Vollholzes, ausgelöst durch das Wachstum des Baumes, ist nicht, wie bei anderen Werkstoffen, durch eine Überwachung des Herstellungsprozesses wie bei industriell hergestellten Materialien, begrenzt. Die Einordnung des Holzes in Festigkeitsklassen ist ein Hilfsmittel zur Verbesserung der Abschätzung der Materialeigenschaften des vorliegenden Elements. Die strukturellen Eigenschaften bestimmen die Festigkeit des Holzes maßgeblich. So kann die Zugfestigkeit von Bauholz niederer Qualität im Vergleich zu fehlerfreiem Holz nach *Hoffmeyer* [141] verhältnismäßig von  $100 \text{ N/mm}^2$  auf  $10 \text{ N/mm}^2$  sinken. Eine möglichst genaue Bewertung des einzelnen Tragelements unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen ist somit von außerordentlicher Bedeutung zur Abschätzung der Tragfähigkeit.

Die in Deutschland geltende Normung zur Festigkeitssortierung von Bauholz setzen sich aus nationalen und europäischen Regelungen, Ergänzungen zur apparativ Unterstützung der visuellen Sortierung und einigen speziellen Unternormen zusammen. Abb. 5.1 stellt die prinzipielle Normenstruktur zur Sortierung von Schnittholz grafisch dar.

## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand



**Abb. 5.1: Normstruktur zur Festigkeitssortierung und zur Festlegung charakteristischer Werte im Holzbau**

Die Einteilung des Holzes in Güteklassen zur verbesserten Ausnutzung der Beanspruchbarkeit erfolgt in Deutschland für Schnittholz seit 1939 [1] nach den Kriterien der *DIN 4074*, zunächst nur anhand visueller Kriterien für Nadelholz. Die Einführung von Kriterien zur Sortierung von Schnittholz aus Laubholz erfolgt mit der *DIN 4074-5:2003-06*, welche im Jahre 2008 novelliert wurde (*DIN 4074-5:2008-12*). Die *DIN 4074-1:2012-06* [142] und *DIN 4074-5:2008-12* [143] legen Grenzwerte für die visuelle Sortierung von Schnittholz fest, diese werden nachfolgend kurz erläutert. Die *DIN 4074-2:1958-12* (noch immer gültige Fassung) beinhaltet Sortierkriterien für Rundholz. Ein Bezug zur Anwendung der visuellen Festigkeitssortierung im Bestandsbau wird in Kap. 5.1.2 gegeben.

**Äste** gehören zu den Parametern, die die Tragfähigkeit mit am meisten bestimmen. Nach *Glos* [144] wird der Einfluss auf das Tragverhalten insbesondere durch die Veränderung des den Ast umgebende Holz hervorgerufen. In den Ergebnissen von *Glos* [144] beeinflusst die Ästigkeit alle charakteristischen Größen der Arbeitslinie bei Druckbelastung signifikant. Zudem nimmt mit Zunahme des größten Astdurchmessers der E-Modul und die Druckfestigkeit ab. Weiter fanden beispielsweise *Kessel et al.* [145] Korrelationskoeffizienten zwischen Ästigkeit und Biegefestigkeit von  $\rho = -0,322 \dots -0,56$ .

Die **Faserneigung** ist die Abweichung der Faserrichtung von der Stablängsachse. Sie bestimmt den Winkel zwischen Kraftangriff und Holzfasern und ist von großem Einfluss auf die Tragfähigkeit. Faserabweichungen können sowohl durch den Wuchs (z.B. Drehwuchs) entstehen, als auch einschneitbedingte Ursachen haben.

Die **Markröhre** liegt in der Mitte des Stammes innerhalb des ersten Jahrringes. Die Dicke ist abhängig von der Holzart und liegt normalerweise im Millimeterbereich, kann aber bis zu 1,5 cm betragen [146]. Die **Jahrringbreite** wird durch Umwelteinflüsse und die Wuchsbedingungen bestimmt. Die ersten um die Markröhre liegenden Jahrringe werden auch als juveniles Holz bezeichnet. Nach *Nier* [106] hat das Holz in Kernnähe schlechtere Qualität, als weiter außen liegendes. Die schlechteren Trageigenschaften sind auf den schnelleren Wuchs in der frühen Lebenszeit des Baumes zurückzuführen. Die Jahrringbreite beeinflusst die Rohdichte des Holzes. Nach *Rug & Mönck* [1] ist engtringiges Holz besser für tragende Zwecke geeignet, als breitringiges. In den Wachstumsperioden des Baumes im Jahr werden Früh- und Spätholz gebildet. Das Spätholz ist zumeist etwas dunkler und weist oft einen leichten Glanzeffekt auf [106]. Dadurch können die Jahrringe farblich voneinander abgegrenzt werden.

**Risse** können verschiedene Ursachen haben. Nach *DIN 4074-1* [142] bzw. *DIN 4074-5* [143] sind Blitzeisse nicht zulässig, für Schwindrisse werden Grenzwerte angegeben. Auch die **Baumkante** wird durch die Sortiernormen begrenzt. Diese gibt beim Schnittholz an, wie viel zum rechteckigen Querschnitt fehlt [146]. Eine **Krümmung** des Holzes entsteht durch wuchsbedingte Ursachen. *DIN 4071-1:2012-06* [142] und *DIN 4074-5:2008-12* [143] unterscheiden die Verdrehung, die Längskrümmung und die Querkrümmung. **Verfärbungen** sind bei der Festigkeitssortierung des Holzes in festgelegten Grenzen zulässig. **Fäule** ist nach *DIN 4074-1* und *DIN 4074-5* grundsätzlich nicht zulässig.

**Druckholz** wird bei Nadelhölzern bei einseitiger Beanspruchung ausgebildet und zeichnet sich durch eine etwas dunklere und rötlichere Färbung als das normale Holz aus. Der Fibrillenwinkel ist stärker geneigt, ca. 45° zur Stammachse, damit werden nach *Kollmann* [147] Überbeanspruchungen in Faserrichtung in Querkräfte umgewandelt. Zudem hat Druckholz nach *Glos* [144] ein geringeres E-Modul als normales Holz, was auf die wachsende Bruchdehnung mit zunehmenden Druckholzanteil zurückzuführen ist. Die Rohdichte des Druckholzes ist höher, als die von normalem Holz. Laubholz bildet kein Druckholz aus. Bei Windbeanspruchung bildet es nach *Nier* [106] jedoch auf der zugbeanspruchten Seite verstärktes Holz aus, der Kern wird leeseitig verschoben.

Als natürlich gewachsenen Material ist Holz anfällig für natürliche Schädigungen. Dazu zählen **Insektenfraß**. Nach *DIN 4074-1* bzw. *DIN 4074-5* sind die an der Oberfläche erkennbaren Fraßgänge maßgebend. Insektenbefall durch Frischholzinsekten ist generell nicht zulässig. Im Bestandsbau ist im Zweifelsfall ein Fachmann zu Rate zu ziehen.

**Sonstige Merkmale** sind nach *DIN 4074-1:2012-06* [142] und *DIN 4074-5* [143] sinngemäß wie die übrigen Merkmale zu berücksichtigen. Nach *Rug & Mönck* [1] sind Formmissbildungen, Strukturfehler, mechanisch verursachte Fehler und biologisch-zerstörende Beeinträchtigungen zu berücksichtigen.

*Kessel & Sandoz* [148] nutzen folgende Kenngrößen zur Bewertung der Effizienz einer Sortiernorm: Trennschärfe, Handhabung, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. Die *DIN 4074-1/1958* erzielte sehr gute Ergebnisse im Bereich der Wirtschaftlichkeit, jedoch eine mangelnde Trennschärfe. Die *DIN 4074-1*

5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

wurde in den Jahren 1958, 1989, 2003 und 2012 novelliert. Wichtige Änderungen werden in Tab. 5.1 zusammengefasst. Da im Folgenden (Kap. 5.3.2) eine Literaturlauswertung folgt, welche auch Untersuchungen aus der ehemaligen DDR beinhaltet, sei hier angemerkt, dass die Sortierkriterien der TGL 117-0767:1963-02 denen der DIN 4071-1:1958-12 entsprachen.

Tab. 5.1: Anpassung der Sortierkriterien in der DIN 4074-1 bei Novellierung der Norm

Fassung	Zusammenfassung wichtiger Änderungen im Vergleich zur Vorgängerfassung	
	Sortierkriterien	Feuchte
1958	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schärfere Regelungen für die GK II und II, unzulässig sind jetzt Blitz- und Frostrisse, Insektenbefall, Ringschäle, sowie Weiß- und Rotfäule bei Hölzern ohne Holzschutz nach DIN 68800</li> <li>- Einführung der Schnittklassen A, B und C</li> <li>- Einführung von Grenzwerten für Einzeläste bei Brettern, sowie Grenzwerte für Astansammlungen für Kanthölzer und Bretter</li> <li>- Begrenzung der Drehwüchsigkeit</li> <li>- Verschärfung der Grenzwerte für die zulässige Faserabweichung (GK1 von 10% auf 7%, GK II von 20% auf 12%, GK III von 33% auf 20%)</li> </ul>	<p>Halbtrocken: 30% (QS A&gt;200cm<sup>2</sup> 35%)<sup>1</sup></p> <p>Trocken: 20%</p>
1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einführung von Grenzwerten für die zulässige Baumkante</li> <li>- Geringfügige Lockerung der Grenzwerte für Einzeläste in S7 &amp; S10 (vormals GK III &amp; GK II) von 1/2 auf 3/5 bei S7 und von 1/3 auf 2/5 bei S10</li> <li>- Einführung einer maximalen Jahrringbreite auch für die S10 (allgemein 6mm, Douglasie 8mm; S13 allgemein 4mm, Douglasie 6mm)</li> <li>- Einführung von Grenzwerten für nagelfeste rote und braune Streifen (zuvor zulässig)</li> <li>- Einführung von Grenzwerten für Druckholz</li> <li>- Einführung der Möglichkeit der maschinellen Sortierung</li> <li>- Die Mindestwichte als Sortierkriterium wird entfernt</li> </ul>	<p>Halbtrocken: 30% (QS A&gt;200cm<sup>2</sup> 35%)<sup>1</sup></p> <p>Trocken: 20%</p>
2003	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verschärfung des Grenzwerts für die Faserneigung in der S7 von 20% auf 16%</li> <li>- Ausschluss der Markröhre in S13</li> <li>- Einführung einer maximalen Jahrringbreite auch für die S7 (6mm, Douglasie 8mm)</li> <li>- Begrenzung der zulässigen Breite von Schwindrissen</li> <li>- Lockerung des Grenzwertes der Baumkante in S13 von 1/8 auf 1/4, Einführung eines Grenzwertes für die Baumkante in S7 analog zu S10 (1/3)</li> <li>- Lockerung des Grenzwertes der Längskrümmung in S13 von 5mm/2m auf 8mm/2m, Verschärfung in der S7 von 15mm/2m auf 12mm/2m</li> <li>- Unterscheidung von Längskrümmung und Verdrehung</li> </ul>	Sortierung generell bei 20%
2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verschärfung des Grenzwertes für Schwindrisse in der S7 von 3/5 auf 1/2</li> <li>- Verschärfung der Grenzwerte für die zulässige Baumkante (S13 von 1/4 auf 1/5, S10 und S7 von 1/3 auf 1/4)</li> <li>- Verschärfung des Grenzwertes der Längskrümmung in der S7 von 12mm/2m auf 8mm/2m (Angleichung auf den Wert in der S10 und der S13)</li> <li>- Verschärfung des Grenzwertes der Verdrehung in der S7 von 2mm/25mm Breite auf 1mm/25mm Breite (Angleichung auf den Wert in der S10 und der S13)</li> <li>- Verschärfung des Grenzwertes für nagelfeste braune Streifen in der S7 von 3/5 auf 2/5</li> <li>- Verschärfung des Grenzwertes für Druckholz in der S7 von 3/5 auf 2/5</li> </ul>	Sortierung generell bei 20%

Nicht genannte Kriterien wurden im Vergleich zur Vorgängernorm nicht angepasst

Die genannten Kriterien beziehen sich auf Kanthölzer

<sup>1</sup> entsprechend der Vornorm mit Ausnahme der Regelung für Querschnitte mit A > 200cm<sup>2</sup>

Die Zusammenstellung zeigt, dass mit der Weiterentwicklung der DIN 4074-1 weitere Sortierkriterien hinzukamen, sowie die Grenzwerte im Laufe der Zeit leicht verschärft wurden. Mit der letzten Novellierung der Norm wurden insbesondere die Grenzwerte für die Sortierklasse S7 verschärft.

Heute kann Holz visuell oder maschinell sortiert werden. Die Bewertung der visuellen Sortierkriterien ist nach Köhler [149] stark abhängig von der durchführenden Person und damit subjektiv. Zudem sind

nach Sandomeer & Steiger [150] bzw. Glos [151] die visuellen Sortierkriterien nur gering mit der Festigkeit korreliert. Seit der Fassung der DIN 4074 von 1989 ist auch eine maschinelle Sortierung möglich. Die Einbeziehung von Eigenschaften wie E-Modul und Rohdichte verbessert die Sortierung, da diese deutlich mit der Festigkeit korreliert sind. Nach [61] beträgt der Korrelationskoeffizient zwischen Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul  $\rho = 0,8$ , zwischen Biegefestigkeit und Rohdichte  $\rho = 0,6$ . Für die Festigkeitssortierung im Bestand liegen aktuell keine normativen Regelungen vor, sodass die genannten Normen auf die Bestandsbewertung übertragen werden müssen. Nachfolgend werden einige Aspekte zur Festigkeitssortierung im Bestand zusammenfassend dargestellt.

### Anwendung der DIN 4074-1/-5 auf die Festigkeitssortierung im Bestand

Zur Überprüfung und Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen muss eine Bestimmung der Materialeigenschaften in situ erfolgen. Für den Bestandsbau sind nicht alle Sortierkriterien der DIN 4074-1/-5 relevant. Eine Bewertung nach Lißner & Rug [137] wird in Tab. 5.2 dargestellt.

Tab. 5.2: Bewertung der Sortierkriterien der DIN 4074-1 für die Anwendbarkeit auf den Bestandsbau

Kriterium	Bewertungen nach Lißner & Rug [136]
Äste	- Sehr wichtiges Kriterium, Anforderungen auf Altholz übertragbar - Beschränkung auf hoch beanspruchte Bereiche - Schwierigkeiten durch nicht zugängliche Bereiche, Extrapolation für < S13
Faserneigung	- Kriterien bei Altholz meist erfüllt - Für $\geq$ S13 stichprobenartig nachweisen
Markröhre	- Im Bestand häufig große Querschnitte, deshalb meist nicht maßgebend
Jahrringbreite	- Für < S13 meist nicht maßgebend - Für $\geq$ S13 nachweisen, bzw. durch Prüfung der Rohdichte oder Bohrkerne
Risse	- Grenzwerte prüfbar, bei Überschreitung Querschnittsreduzierung
Baumkante	- Querschnittsreduzierung bei Überschreitung der Kriterien
Krümmung	- Bei verbautem Holz nicht nötig
Verfärbungen, Fäule	- Hinweis auf Pilzbefall
Druckholz	- Bei verbautem Holz nicht nötig, da keine größeren Verformungen zu erwarten
Insektenfraß durch Frischholz-Insekten	- Ebenfalls auf Larven prüfen, Befall entfernen, wenn nicht bereits abgestorben
Sonstige Sortiermerkmale	- Schädigungen mit Einfluss auf die Tragfähigkeit: - Insekten/ Pilze, Korrosion, Temperatur, mechanische Schädigung

Es wird deutlich, dass ein Teil der Kriterien bei Altholz entfallen. Andere wiederum sind schwerer prüfbar. Die meisten der Kriterien sind durch visuelle Untersuchung prüfbar, wobei eine erschwerte Zugänglichkeit bei allen Kriterien ein Problem sein kann. Dies ist durch entsprechend sorgsame Prüfung, Extrapolation der gefundenen Ergebnisse für Sortierklassen < S13 und nach Möglichkeit durch eine Beschränkung auf die höher belasteten Bereiche auszugleichen. [136]

Einige Kriterien können in den meisten Fällen nicht ohne technische Hilfsmittel geprüft werden. Faserneigung und Jahrringverlauf sind nur im Inneren des Holzes erkennbar. Die DIN 4074-1 betont die Notwendigkeit der Messung der Holzfeuchte. Dies ist im Bestand gut durch technische Hilfsmittel möglich.

In *DIN 4074-1:2012-06* [142] und *DIN 4074-5:2008* [143] wird durch apparativ unterstützte visuelle Sortierung eine Einordnung in die Sortierklasse S 15 bzw. LS 15 möglich. Somit erscheint auch im Bestandsbau eine Zuordnung zu höheren Festigkeitsklassen bei apparativ unterstützter Sortierung in situ möglich. Dazu muss jedoch die apparativ unterstützte Festigkeitssortierung mit zerstörungsfreien bis zerstörungsfreien Hilfsmittel voran getrieben werden, siehe dazu beispielsweise [152].

### **Exkurs: UNI 11119:2004 als Norm zur Festigkeitssortierung im Bestand**

Die italienische Norm *UNI 11119:2004* [29] enthält Regelungen zur Bewertung von tragenden Holzbauteilen in situ. Zwar ist sie auf Objekte des Kulturerbes fokussiert, ist jedoch auch auf andere Konstruktionen anwendbar. Die Norm enthält einen Abschnitt zur Festigkeitssortierung verbauter Tragelemente in situ, folgendes muss beachtet werden [29]:

- Klassifizierung des gesamten Bauteils und wenn nötig einzelnen Bereich extra,
- Beachtung der Sortierungsumstände, wie Zugänglichkeit und Sichtbarkeit. Sind weniger als drei Seiten des Bauteils zugänglich, muss im Bericht darauf ausdrücklich hingewiesen werden,
- Liegen Schädigungen durch holzerstörende Insekten vor, so muss der gesamte befallene Bereich begutachtet werden und die wirksame Querschnittsfläche entsprechend dem zerfressenen Anteil reduziert werden. Die prozentuale Abminderung muss deutlich aus dem Bericht hervorgehen,
- Zur Zuweisung einer Klasse müssen alle Grenzwerte eingehalten werden. Die Zuordnung von Zwischenklassen ist nicht gestattet,
- Beim Vorliegen anderer als in der Norm genannten Holzarten sollen die Klassen basierend auf einer Holzart erfolgen, die ähnliche anatomische und Dichtigkeitseigenschaften aufweist.

Die visuellen Sortierkriterien in *UNI 11119:2004* [29] sind: Baumkante, Schädigungen, Frostrisse, Ringschäle, einzelne Äste, Astgruppen, Faserverlauf (radial), Faserneigung (tangential), Verdrehung. Die Norm erlaubt die Anwendung unterstützender Untersuchung mit zerstörungsfreien apparativen Methoden. Eine eindeutige Korrelation des untersuchten Kriteriums mit der Festigkeit muss vorliegen. Die Extrapolation der Ergebnisse aus anderen Abschnitten auf die untersuchten Bauteile ist nicht gestattet. Tab. 5.3 vergleicht die Sortierkriterien der *UNI 11119:2004* [29] mit der *DIN 4074-1:2012-06* [142] (Sortierkriterien für Neuholz) und orientiert sich dabei an der Struktur der *DIN 4074-1:2012-06* [142]. Die Tabelle erfasst nur Kriterien, die auch in der *UNI 11119:2004* [29] quantitativ bewertet werden. In fast allen Kriterien weist die *DIN 4074-1:2012-06* [142] strengere Grenzwerte auf. Die Angaben hinsichtlich der Längskrümmung sind allgemein schwer vergleichbar, da die *DIN 4074-1:2012-06* [142] einen Absolutwert angibt, die *UNI 11119* einen Prozentwert. Herauszuheben ist das Kriterium der zulässigen Baumkante. In der untersten Festigkeitsklasse legt die *DIN 4074-1* das strengere Kriterium fest, in den beiden anderen die *UNI 11119*. Die Baumkante kann vor Ort gemessen und vom effektiven Querschnitt abgezogen werden, damit wäre ein Grenzwert überflüssig (siehe dazu auch die Bewertung der Kriterien in Tab. 5.4). Einige Kriterien werden in *UNI 11119:2004* [29] nicht mit quantitativen Grenzwerten belegt. Diese werden in Tab. 5.4 zusammengefasst und bewertet.

Tab. 5.3: Vergleich der Grenzwerte für Sortierkriterien der *UNI 11119:2004* mit der *DIN 4074-1:2012-06* [153]

Sortiermerkmal	Norm	Sortierklasse		
	DIN 4074-1 [142]	S 7, S 7k	S 10, S 10k	S 13, S 13k
	UNI 11119 [29]	III	II	I
1. Äste	DIN 4074-1 UNI 11119	Bis 3/5 ≤ 1/2 (einzelne) ≤ 3/4 (Gruppen)	Bis 2/5 ≤ 1/3 (einzelne) ≤ 70mm ≤ 2/3 (Gruppen)	Bis 1/5 ≤ 1/5 (einzelne) ≤ 50 mm ≤ 2/5 (Gruppen)
2. Faserneigung	DIN 4074-1 UNI 11119	Bis 12% -20 %	Bis 12% -12 %	Bis 7% -7%
5. b) Blitzrisse/ Frostrisse/ Ringschäle	DIN 4074-1 UNI 11119	Nicht zulässig Nur bedingt er- laubt	Nicht zulässig Nicht erlaubt	Nicht zulässig Nicht erlaubt
6. Baumkante	DIN 4074-1 UNI 11119	Bis 1/4 1/3	Bis 1/4 1/5	Bis 1/5 1/8
7. a) Längs- krümmung	DIN 4074-1 UNI 11119	Bis 8 mm 33%	Bis 8 mm 20%	Bis 8 mm 10%
7. b) Verdrehung	DIN 4074-1 UNI 11119	1mm/ 25mm Höhe Möglich, wenn es nicht durch die Markröhre geht	1mm/ 25mm Höhe	1mm/ 25mm Höhe

Tab. 5.4: Bewertung der in der *UNI 11119:2004* [29] nur qualitativ oder nicht enthaltenen Sortierkriterien

Kriterium	Falls vorhanden qualitative Regelungen der <i>UNI 11119:2004</i> [29]	Bewertung für den Altbau nach <i>Lißner &amp; Rug</i> [137]
Markröhre	Keine Angabe	Für den Altbau meist nicht maßgebend
Jahrringbreite	Keine Angabe	Für ≥ S13 durch Rohdichteprüfung oder Bohrkerne nachweisen
Schwindrisse	Keine Angabe	Grenzwerte müssen geprüft werden
Verfärbung, Fäule	Bei Pilzbefall darf die Bewertung nur die entsprechende Stelle betreffen.	Große Bedeutung
Druckholz	Keine Angabe	Für den Altbau nicht maßgebend
Insektenfraß durch Insekten	Die Bewertung soll nur die befallene Stelle betreffen. Ist der komplette Balken befallen, muss das komplette Holzteil bewertet werden. In der Tragfähigkeitsanalyse müssen die mechanischen Eigenschaften im Verhältnis zur befallenen Stelle reduziert werden.	Große Bedeutung

Deutlich wird, dass die Kriterien Markröhre und Druckholz für den Bestandsbau von untergeordneter Relevanz sind. *UNI 11119:2004* [29] gibt keine Grenzwerte zur Bewertung von Rissen vor. Es finden sich auch keine Festlegungen zur Überprüfung der Jahrringbreite, da die Zugänglichkeit zumeist nicht gegeben ist. *Piazza & Riggio* [154] fanden bei Anwendung der *UNI 11119:2004* [29] zur visuellen Festigkeitssortierung einen Fehler bei der Ermittlung der Biegesteifigkeit aus vier-Punkt-Biegetests von 28%, bezogen auf das 5%-Quantil (25% bei Anwendung der *UNI 11035* für die Sortierung von Neuholz). Nach *Piazza & Riggio* ist die Sortierung nach *UNI 11119* etwas konservativer, da die Sortierkriterien nicht durch Testserien ermittelt, sondern auf Basis der Norm zur Sortierung von Neuholz festgelegt wurden. Untersucht wurden Fichten-, Lärchen- und Kastanienholz aus Norditalien. Für die Biegefestigkeit ergab sich eine Abweichung von -61% (-50% bei Anwendung der Norm zur Sortierung von Neuholz *UNI 11035*). Die Autoren schlussfolgern daraus, dass die visuelle Sortierung die Festigkeit unterschätze. *Sousa* [155] fand eine mittlere Unterschätzung bei der Vorhersage des E-Moduls von 29% bei visueller Festigkeitssortierung auf Basis der *UNI 11119:2004* und eine mittlere Überschätzung von 16%.



### ***Kombination von visueller und maschineller Sortierung zur Verbesserung der Festigkeitssortierung im Bestand***

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen muss entsprechend den bauaufsichtlichen Anforderungen eine Festigkeitssortierung verbauter Hölzer durchgeführt werden. Dies ist aufgrund schlechter Zugänglichkeit bzw. Einsehbarkeit und mangelnder Ausleuchtung der Bauteile häufig schwierig. Zudem erfolgt die Festigkeitssortierung im Bestand meist nur relativ grob und ohne entsprechende Qualifizierung des Fachplaners, siehe *Linke, Rug & Pasternak* [140]. Zudem wird die Festigkeit durch die visuelle Sortierung zumeist unterschätzt, siehe *Linke & Rug* [140] und *Piazza & Riggio* [154]. Die Weiterentwicklung der Festigkeitssortierung in situ unter Zuhilfenahme technischer Hilfsmittel zur Abschätzung bzw. Bestimmung struktureller Materialeigenschaften über die Konstruktion ist von zentraler Bedeutung zur substanzschonenden Erhaltung bestehender Konstruktionen. Durch eine verbesserte Sortierung in situ und damit einer Erhöhung des Informationsstandes kann eine realitätsnähere die Abschätzung der Tragfähigkeit erfolgen. Zum anderen wird eine Einordnung in eine höhere Festigkeitsklasse durch eine quasi-apparative Sortierung möglich. Des Weiteren kann die Variabilität der Eigenschaften in der Festigkeitsklasse Klasse durch eine möglichst präzise Sortierung reduziert werden. Dabei müssen verschiedene die Verfahren kombiniert werden, da keine der Methoden allein, d.h. nur eine visuelle Sortierung oder nur eine zerstörungsfreie Prüfmethode, aktuell hinreichend genaue Ergebnisse für eine realitätsnahe Abschätzung der Tragfähigkeit liefert, siehe dazu auch *Piazza & Riggio* [154]. Nach *Blaß & Frese* [156] ergibt eine visuelle Vorsortierung vor einer maschinellen Sortierung bessere Ergebnisse. Geprüft wurden in der Untersuchung die Zug- bzw. die Biegefestigkeit der Prüfkörper. *Leicester* [157] betont, dass bei der Bestimmung von Holzeigenschaften aus Prüfkörpern diese repräsentativ für die lastabtragenden Teile sein müssen. Eine Extrapolation der Prüfungsergebnisse auf andere Tragwerksteile ist nach *UNI 11119:20004* verboten [29].

Nach *Probabilistic Model Code* [61] besteht zwischen Rohdichte und Biegefestigkeit eine starke positive Korrelation ( $\rho = 0,8$ ). Dieses ist in erster Linie auf fehlerfreies Holz anwendbar. Untersuchungen von *Piazza & Riggio* [154] zeigen, dass die Korrelation zwischen Rohdichte, ermittelt anhand lokaler Methoden wie Pylodyn und Resistograph, und Festigkeit gering bis kaum vorhanden ist. Untersuchungen von *Linke, Rug & Pasternak* [152] zeigen eine Abhängigkeit der Korrelation von der Holzart. Im Wesentlichen wird die Tragfähigkeit maßgeblich von makroskopischen Struktureigenschaften wie Ästen oder Wuchsfehlern überlagert. Untersuchungen zeigen eine gute Korrelation von E-Modul und Festigkeit, auch auf Bauteilebene, wobei jedoch visuelle Kriterien nicht vernachlässigt werden dürfen. Untersuchungen von *Glos* [158] und *Apitz* [159] ergaben, dass eine Kombination aus der Bestimmung des Elastizitätsmoduls mit einer Bestimmung der Ästigkeit das verlässlichste Sortierergebnis, die beste Schätzung für die Biegefestigkeit ergibt. Die Beziehung zwischen den Holzeigenschaften nach *DIN EN 384:2019-12* [160] wird in Kap. 5.2.4 dargestellt.

Tab. 5.5 zeigt eine Zusammenfassung und Bewertung verschiedener (technischer) Hilfsmittel zur Bewertung bestehender Konstruktionen im Hinblick auf zu ermittelnde Parameter und den Nutzen der Technik. Die Darstellung ist angelehnt an *Lißner & Rug* [161], die Bewertung erfolgt nach *Lißner & Rug* [161], sowie *Hösl & Dietsch* [162].

Tab. 5.5: Techniken der Bauzustandsanalyse aus *Lißner & Rug* [12],  
Bewertung der Techniken aus *Lißner & Rug* [12] ergänzt mit *Hösl & Dietsch* [162]

Zu erfassende Daten		Technik	Nutzen der Technik und Bewertung der Anwendbarkeit für den Bestandsbau	In-situ? <sup>1</sup>
Genereller Bauzustand	Erste Untersuchungen	Vorhandene Dokumentation	Aufschluss über Bauphase, Struktur, verwendete Materialien etc.	Nein, zf
		Visuelle Begutachtung	Erfassung von Zustand und Schädigungen	Ja, zf
		Fotodokumentation	Festhalten des Bauzustandes, eigene Dokumentation	Ja, zf
		Händische Untersuchungen	Klopfen, Bebeilen etc. Erfassung von Zustand und Schädigungen	Ja, zf
		Bestimmung der Holzart	Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften	z. T. zf/z
	Technische Hilfsmittel zur Erfassung des Bauzustandes	Endoskopie	Untersuchung verdeckter Schädigungen	Ja, za
		Mikroskopie	Untersuchung verdeckter Schädigungen	Nein, z
		Ultraschall (Ultraschallecho)	Untersuchung verdeckter Schädigungen	Ja, zf
		Bohrwiderstandsmessung	Untersuchung verdeckter Schädigungen	Ja, za
		Röntgenuntersuchung	Untersuchung verdeckter Schädigungen	Ja, zf
		Identifizierung von Schädlingen	Rückschlüsse, welche Behandlungsmethode am sinnvollsten ist	z. T., zf/za
	Holzfeuchte	Verschiedene Techniken	Einfluss der Feuchte auf Festigkeiten, Anwendbarkeit durch verschiedene Techniken gegeben	Ja, zf/z
	Alter	Datierung der Bauphase	Rückschlüsse auf Konstruktionsweise	z. T., zf
Dendrochronologie		Rückschlüsse auf Konstruktionsweise, Kraftfluss, Bohrkernentnahme nötig	Nein, z	
Erfassung geometrischer Daten	Struktur und Verformungen	Handaufmaß	Hohe Genauigkeit, aber zeitaufwendig	Ja, zf
		Nivellier	Hohe Genauigkeit	Ja, zf
		Theodolit	Anwendbarkeit gegeben, situative Entscheidung für Technik	Ja, zf
		Tachymeter		Ja, zf
		Photogrammetrie		Ja, zf
		Laserscanning		Ja, zf
	Restquerschnitte	Schäden durch Insekten, Pilze, Mazeration	Genaue Bestimmung des Restquerschnitts Anwendbarkeit durch verschiedene zerstörungsfreie und zerstörungsarme Techniken gegeben	Ja, zf/za/z
		Endoskopie	Untersuchung versteckter Teile	Ja, za
		GPR, Radiographie	Bestimmung verdeckter Schäden, Anwendbarkeit mit hohem technischem Aufwand gegeben	Ja, zf

z – zerstörend, za – zerstörungsarm, zf – zerstörungsfrei, z. T. – zum Teil

5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Tab. 5.13: Techniken der Bauzustandsanalyse aus *Lißner & Rug* [12],  
Bewertung der Techniken aus *Lißner & Rug* [12] ergänzt mit *Hösl & Dietsch* [162] (Fortsetzung)

Zu erfassende Daten	Technik	Nutzen der Technik und Bewertung der Anwendbarkeit für den Bestandsbau	In-situ? <sup>1</sup>	
Erfassung von Rohdichte, Festigkeits-, Steifigkeitseigenschaften	Festigkeit	Festigkeits-sortierung	Normen für visuelle Sortierung auf Altholz anwendbar	Ja, zf
		Entnahme von Bohrkernen	Anwendbarkeit gegeben, Anzahl an Probekörpern begrenzt Normen zur experimentellen Festigkeitsbestimmung: Druck – DIN 52185, Biegung – DIN 52186, Zug – DIN 52188, Abscheren – DIN 52187	Nein, z
	Rohdichte	Entnahme von Bohrkernen	Genaue Bestimmung Anwendbarkeit gegeben, Anzahl an Probekörpern begrenzt	Nein, z
		Bohrwiderstands-messung	Qualitative Bestimmung von Dichteänderungen Anwendung gegeben, jedoch nur qualitative Daten	Ja, za
		Ausziehwi-derstands-messung	Qualitative Bestimmung von Dichteänderungen Anwendung gegeben, jedoch nur qualitative Daten	Ja, za
		Schlagwi-derstands-messung	Rohdichte Bestimmung durch Messung der Eindring-tiefe bei definierter Schlagkraft	Ja, za
		Röntgenstrahl-messung	Zerstörungsfreie Bestimmung, Technik in der Entwicklung	Ja, zf
		Ultraschall-messung	Zerstörungsfreie Bestimmung	Ja, zf
	E-Modul	Ultraschall-messung	Zerstörungsfreie Bestimmung	Ja, zf
		Statische Beanspruchung	Last durch Verformung bestimmt, Regelungen in DIN EN 380 Unsicherheit über Anfangszustand	Ja, zf
		Dynamische Beanspruchung	Messung der Frequenz nach Anregung, behinderungs-freie Schwingung nötig, im eingebauten Zustand nicht gegeben	Ja, zf
	Spanungs-zustand	Belastung/Entlastung	Ermittlung des Spannungszustandes über Verformungsmessung	Ja, zf
		Anheben der Konstruktion	Tatsächliche Belastung ermitteln Sehr hoher Aufwand Nur in besonderen Fällen praktikabel	Ja, zf

z – zerstörend, za – zerstörungsarm, zf – zerstörungsfrei, z. T. – zum Teil

Die Ultraschall-Laufzeitmessung ist eine der vielversprechendsten zerstörungsfreien Methoden zur Bestimmung von Materialparametern in situ. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle hängt nach *Steiger* [163] maßgeblich vom Elastizitätsmodul und der Rohdichte ab. *Kessel & Sandoz* [164] und auch *Linke, Rug & Pasternak* [152] fanden deutliches Potential der Verbesserung der visuellen Festigkeitssortierung unter Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung.

*Sousa* [155] fand keine signifikante Korrelation zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Druckfestigkeit für Kastanienholz (Altholz). Für die Zugfestigkeit ergaben die Testergebnisse eine mittlere Korrelation zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Zugfestigkeit. Bei Überlagerung von Testergebnissen aus kleinen fehlerfreien Proben mit globalen Messungen am Bauteil ergaben sich gute Korrelationen des im Test ermittelten zum vorhergesagten E-Modul [155].

## 5.2 Tragverhalten von Bauteilen aus Vollholz

### 5.2.1 Grundlegendes zum Einfluss struktureller Parameter auf die Variabilität

Bei der statistischen Modellierung von Festigkeitseigenschaften können verschiedene Betrachtungsebenen unterschieden werden. Nach *Fink & Köhler* [165] ist die Variabilität der Eigenschaften zwischen einzelnen Hölzern einer Festigkeitsklasse und innerhalb eines Bauteils zu differenzieren. Die erstgenannten Unterscheidungen resultieren aus individuellen Wuchsbedingungen der Bäume und aus der Entnahmelage des Bauteils aus dem Stamm (Lage relativ zum Kern bzw. entlang der Stammachse). Streuungen innerhalb eines Bauteils resultieren aus der natürlichen Inhomogenität des Holzes bedingt durch seinen Wuchs. Die Unterscheidung in drei Ebenen ist in Tab. 5.6 nach *Köhler* [149] dargestellt.

Tab. 5.6: Betrachtungsebenen von Bauholz aus *Köhler* [149]

Ebene	Untersuchungsobjekt	Ergebnisse von statistischen Tests
<b>Mikroebene</b>	Einzelnes Bauteil/ Testkörper	Festigkeitsverteilung für spezielles Element
<b>Mesoebene</b>	Auswahl von Bauteilen/ Testkörpern	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Festigkeitseigenschaft
<b>Makroebene</b>	Mehrere Auswahlen von Bauteilen/ Testkörpern	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Festigkeitseigenschaften für die jeweiligen Bauholzgruppen

Bei Betrachtung einzelner Bauteile bzw. Testkörpern („Mikroebene“ nach Tab. 5.1) weist Bauholz eine Variabilität der Trageigenschaften in radialer, axialer und longitudinaler Richtung auf. Die Variabilität der Eigenschaften über den Querschnitt ist vom jeweiligen Bauteil abhängig. Sie ergibt sich aus dem strukturellen Aufbau, der Orientierung der Zellen/Fasern und weiterer wuchsbedingter Eigenschaften. Die Variabilität der Biegemomenten Tragfähigkeit in longitudinaler (axialer) Richtung wird im *JCSS Probabilistic Model Code* [61] Teil 3.5 wie folgt beschrieben:

$$R_{m,ij} = \exp(v + \varpi_i + \chi_{ij}) \quad (5.1)$$

Dabei ist  $v$  der unbekannte Logarithmus der mittleren Festigkeit in allen Bereichen aller Komponenten (siehe Abb. 5.2). Der Parameter  $\varpi_i$  ist der Unterschied zwischen den Logarithmen der Mittelwerte der Festigkeiten der Bereiche zwischen den Komponenten  $i$  und  $v$ . Er ist normalverteilt mit Mittelwert null und Standardabweichung  $\sigma_\omega$ . Außerdem ist  $\chi_{ij}$  der Unterschied zwischen der Festigkeit des schwachen Bereiches  $j$  im Balken  $i$  und dem Wert  $v + \omega_i \cdot \chi_{ij}$ .  $\chi_{ij}$  ist normalverteilt mit dem Mittelwert 0 und der Standardabweichung  $\sigma_\chi$ . Dabei sind  $\omega_i$  und  $\chi_{ij}$  statistisch unabhängig. Die Biegetragfähigkeit  $R_{m,ij}$  ist die Biegetragfähigkeit an einer speziellen Stelle, diese schwankt über die Länge des Balkens (Abb. 5.2). Für Elastizitätsmodul und Rohdichte wird nach *Probabilistic Model Code* [61] Teil 3.5 nicht von einer Variabilität über den Querschnitt ausgegangen. Die Festigkeitseigenschaften von Vollholz sowie der Einfluss struktureller Parameter werden nachfolgend beschrieben (Kap. 5.2.2). Auf die Festigkeitsbestimmenden Parameter wird im Rahmen des Abschnitts zur Festigkeitssortierung (Kap. 5.1.2) eingegangen.

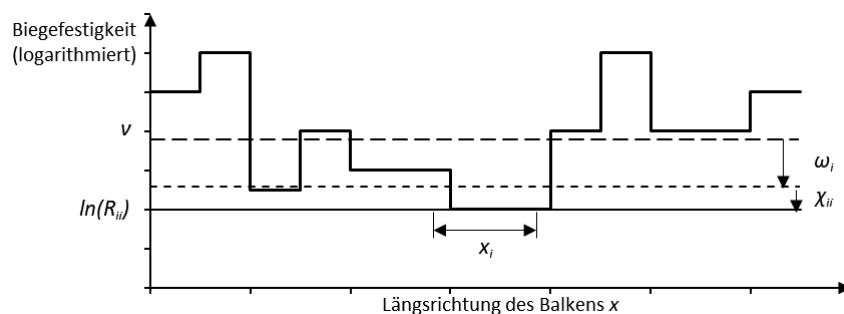


Abb. 5.2: Abschnittsmodell für die Variation der Biegefestigkeit in Längsrichtung aus *JCSS Probabilistic Model Code* [61]

## 5.2.2 Festigkeit von Bauholz bei verschiedenen Beanspruchungsrichtungen

### Zugfestigkeit von Bauholz

Beim Zugversagen des Holzes in Faserrichtung handelt es sich nach *Steiger* [166] [167] um ein sprödes Versagen. Fehlerfreies Holz ist bei Zugbeanspruchung um ein Vielfaches tragfähiger als Bauholz. Insbesondere der Einfluss von Ästen und Schrägfaserigkeit ist hoch. Äste beeinflussen nicht nur den Nettoquerschnitt, auch die bedingte lokale Schrägfaserigkeit und Strukturstörungen in diesem Bereich beeinflussen das Tragverhalten stark [166] [167]. Durch die ausgelösten Spannungsspitzen sinkt die Tragfähigkeit. Astlagen im Randbereich des Trägers haben einen größeren Einfluss, als in anderen Zonen. Durch die angeschnittenen Faser wirkt die Resultierende nicht mehr in der Stablängsachse, es entsteht eine ausmittige Beanspruchung [1][168]. Druckholz ruft nach *Glos und Burger* [168] sprödes Versagen hervor, Frühholz reißt nach *Rug & Mönck* [1] vor dem Spätholz. Die Zugfestigkeit steigt, wie auch die anderen Festigkeitseigenschaften des Holzes, mit zunehmender Rohdichte. Die Zugfestigkeit sinkt mit der freien Prüfkörperlänge [168]. In der Praxis wird die Zugtragfähigkeit zumeist durch die Anschlüsse begrenzt [167]. Eine hohe Zugfestigkeit eines Prüfkörpers ist an einem langfaserigen Zugbruch zu erkennen. Durch chemisch aggressive Medien beeinflusstes Holz bricht kurzfasrig oder glatt, ebenso bei zu hoher Dauerbelastung [1]. Nach *Rug & Mönck* [1] beträgt die Zugfestigkeit schon bei einem Kraft-Faser-Winkel von  $15^\circ$  nur noch die Hälfte der Zugfestigkeit in Faserrichtung. Bei einem Winkel von  $90^\circ$  erreicht sie mit 7% ihren niedrigsten Wert. Querkzugbeanspruchungen sollten in der Bemessung vermieden werden, da Holz hier nur sehr geringe Festigkeiten aufweist.

### Druckfestigkeit von Bauholz

Tritt eine Beanspruchung auf Druck auf, so muss zwischen Querschnitts- und Bauteilversagen unterschieden werden. Bei gedrunghenen Querschnitten ohne Stabilitätsversagen entsteht das Versagen durch lokales Ausweichen der Fasern, wobei Druckstauchungen entstehen. Bei schlanken Stäben versagt der Stab schon vor Erreichen der kritischen Drucklast durch seitliches Ausknicken. Nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] wird ein Knickversagen durch den Beiwert  $k_c$  erfasst. Dieser bezieht den Schlankheitsgrad, die Druckfestigkeit und das Elastizitätsmodul des Materials ein und berücksichtigt

eine Unterscheidung in Vollholz und Brettschichtholz bzw. Furnierholz durch den Faktor  $\beta_c$ . Beim Stabilitätsversagen handelt es sich um ein nichtlineares Problem [169]. Bei der Bemessung müssen Steifigkeitsparameter zusätzlich zu den Festigkeitsparametern berücksichtigt werden. Eine Fokussierung auf Stabilitätsprobleme erfolgt in dieser Arbeit nicht.

Der Einfluss von Holzmerkmalen ist bei Druckbeanspruchung nicht so groß, wie bei Zugbeanspruchung, wobei die durch Äste verursachten lokalen Faserabweichungen ein früheres Versagen auslösen [166] [167]. *Glos* [144] identifizierte vier hauptsächliche Einflussfaktoren auf die Druckfestigkeit des Holzes: die Holzfeuchtigkeit, die Rohdichte, die Ästigkeit und der Druckholzanteil.

Das Tragverhalten bei Druckbeanspruchung wird am deutlichsten von allen Festigkeitseigenschaften durch die Feuchte beeinflusst. Kiefernholz hat nach *Rug & Mönck* [1] bei 8% Holzfeuchte die größte Druckfestigkeit, Fichtenholz bei 10%. Beim Versagen bei Druckbeanspruchung handelt es sich um ein duktileres Versagen. Wie auf alle Festigkeitseigenschaften hat die Rohdichte auch auf die Druckfestigkeit einen großen Einfluss. Die Bruchlast wird nach *Steiger* [167] durch das Festlegen einer maximalen Verformung festgelegt, da sie nicht eindeutig bestimmt werden kann. Bei der Belastung von Holz in Faserrichtung bis zur Bruchlast treten vor dem Druckversagen starke Verformungen auf [1]. Nach *Rug & Mönck* [1] geht bei einem Winkel von 15° die Druckfestigkeit auf ca. 70% und bei 30° auf ca. 35% der Festigkeit parallel zur Faser zurück, siehe auch Abb. 5.3 basierend auf *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90].

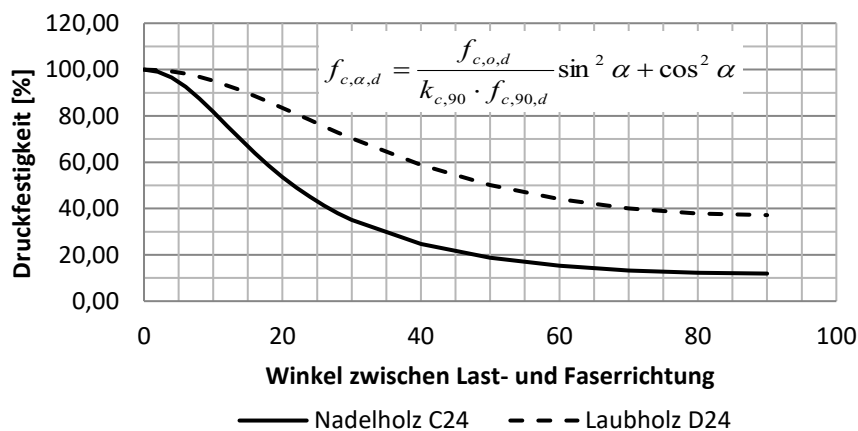


Abb. 5.3: Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom Winkel zur Faserrichtung, berechnet am Beispiel C24 (mit KLED kurz, NKL 1), Werte nach *DIN EN 338:2016-07* [110], Berechnung nach *DIN EN 1995-1-1* [90] bzw. *DIN EN 1995-1-1/NA* [91]

Die Querdruckfestigkeit von Eiche und Buche sind deutlich höher, als von Nadelholz [1]. Im Gegensatz zur Festigkeit in Faserrichtung erhöhen Äste die Druckfestigkeit quer zu Faserrichtung [1]. Für die Bemessung müssen Würfeldruck, Schwellendruck und Stempeldruckfestigkeit unterschieden werden. Diese werden durch den Beiwert  $k_c$  in der Bemessung nach *Eurocode 5* erfasst.

Tab. 5.7 fasst die wichtigsten Einflussparameter auf die Zug- und Druckfestigkeit in Faserrichtung und die Art deren Berücksichtigung in der Bemessung zusammen.

5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Tab. 5.7: Einflussfaktoren auf die Zug- und Druckfestigkeit in Faserrichtung (+ positiver Zhg.; - negativer Zhg.) und Berücksichtigung in der Bemessung

Die größten Einflussfaktoren auf die <b>Zugfestigkeit</b> in FR	Die größten Einflussfaktoren auf die <b>Druckfestigkeit</b> in FR	Berücksichtigung in der <b>Bemessung/ Überprüfung</b>
Rohdichte (+)		indirekt durch Sortierung
Spätholzanteil (+)		-
Holzfeuchte (-) <sup>1</sup>		Nutzungs-kategorie (NKL, $k_{mod}$ , $k_{def}$ )
Faser-Last-Winkel (-)		charakt. Festigkeit.
Querschnittsvolumen (-)		ggf. Volumenfaktor
Faserverlauf		Sortierung
Ästigkeit (-)		Sortierung
	Holzart	Sortierung
	Belastungsdauer (-)	Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED, $k_{mod}$ , $k_{def}$ )
	Schlankheitsgrad (-)	Bemessung

<sup>1</sup> bei Druck größerer Einfluss als bei Zug

### Biegefestigkeit von Bauholz

Beim Biegeversagen handelt es sich um eine Kombination aus Zug- und Druckversagen. Nach Steiger [166] [167] hängt es von der Holzqualität ab, ob zuerst ein Zug-, oder ein Druckversagen der Randfasern auftritt, die beschriebene Spannungsumlagerung findet nur bei qualitativ sehr hochwertigem Holz statt. Bei Bauholz normaler Qualität kommt es nicht zu diesen Stauchungen in der Druckzone (plastisches Tragverhalten), da der Querschnitt schon zuvor in der Zugzone versagt. Bei normalem Bauholz sind demzufolge die linearen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen zur Bestimmung der Bruchlast ausreichend. Bei Holz hoher Qualität müsste die Bruchlast durch Berücksichtigung der nicht-linearen Bruchlast in der Druckzone bestimmt werden [166], dies erfolgt in der Praxis in der Regel jedoch nicht. Beim Einbau von biegebeanspruchten Hölzern sollte darauf geachtet werden, dass sich Äste nach Möglichkeit in der Druckzone befinden [1]. Die größte Biegefestigkeit wird nach *Rug & Mönck* bei einer Holzfeuchte von ca. 6% erreicht.

Für schlanke Träger ist das Problem des Biegedrillknickens (Kippen) zu untersuchen. Nach *DIN EN 1995-1-1:2012-12* [90] wird bei einem relativen Schlankheitsgrad von  $\lambda_{rel,m} < 0,25$  nicht von einem Stabilitätsproblem ausgegangen.

### Scher- und Schubfestigkeit von Bauholz

Die Scherfestigkeit von Holz ist verhältnismäßig gering und wird nach *Rug & Mönck* [1] von der Holzfeuchte, der Frühholzfestigkeit, von Schwindrissen und der Lage der Jahrringe beeinflusst. Zudem nimmt die Scherfestigkeit mit der Länge der Scherfuge ab, da keine gleichmäßige Spannungsverteilung über die Länge besteht [1]. Die Schubfestigkeit wird maßgebend, wenn kurze Bauteile auf Biegung beansprucht werden [1]. Bei stehenden Jahrringen ist die Festigkeit höher, als bei liegenden. Die Schubfestigkeit parallel zur Faserrichtung ist geringer als rechtwinklig dazu. Nach *Rug & Mönck* [1] wird bei Biegebeanspruchung die Scherfestigkeit maßgebend.

## ***Festigkeit bei kombinierter Beanspruchung***

### *Beanspruchung auf Druck und Biegung*

Beim zeitgleichen Einwirken von Druckkräften und Biegemomenten hängt das Versagen von der Geometrie des Bauteils, der Höhe der Belastungen und den Materialeigenschaften ab. Je nach Größe der Beanspruchungen tritt das Versagen infolge Zug- oder Druckversagen der Randfasern ein [166] [167]. Wirtschaftliche Bemessungsmodelle berücksichtigen nach *Steiger* [166] die Plastifizierung der Druckzone, und das spröde Versagen in der Zugzone. Wie beschrieben ist die Versagensart jedoch stark von den speziellen Gegebenheiten im betrachteten Fall abhängig.

### *Beanspruchung auf Zug und Biegung*

Beim Versagen auf Zug und Biegung entsteht kein Stabilitätsproblem. Nach *Steiger* [167] handelt es sich um ein sprödes Versagen, weshalb der Volumeneinfluss zu berücksichtigen ist. Auch hierbei ist das Versagen stark vom Verhältnis zwischen Biegung und Normalkraft abhängig. Bei großen Biegemomenten entsteht ein typischer Biegebruch, wobei die Bruchstelle sich zum Ort der Einleitung der Zugkraft hin verlagert. Bei hohen Zugkräften entsteht an dem Ort mit den meisten lokalen Fehlstellen ein typischer Zugbruch [166].

## **5.2.3 Holzfestigkeiten im Zeitverlauf**

### ***Entwicklung von Festigkeitswerten im Zeitverlauf***

Die Festigkeitswerte von Holz werden im Laufe der Zeit von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Das Einhalten des konstruktiven Holzschutzes und die regelmäßige Überprüfung von Holzkonstruktionen im Bestand sind essentielle Voraussetzungen für die Gewährleistung langlebiger Konstruktionen. Werden diese Besonderheiten beachtet und wird das Holz nicht durch äußere Einflussfaktoren geschädigt, ist nicht von einer Festigkeitsminderung von Holz im Zeitverlauf auszugehen. Dies wird durch eine Vielzahl von Untersuchungen belegt. Eine Zusammenstellung der Forschungserkenntnisse ist beispielsweise bei *Kranitz* [170] zu finden. Bezüglich der mechanischen Eigenschaften zeigen die Untersuchungen keinen einheitlichen Trend, sodass das davon ausgegangen werden kann, dass ohne äußere Einflüsse nicht von einer durch Alterung bedingten Änderung der mechanischen Eigenschaften des Holzes auszugehen ist. Einige Untersuchungen zeigen eine erhöhte Sprödhafteigkeit, siehe beispielsweise *Mönck* [171]. Zudem muss beachtet werden, dass bei Altholz die Wuchsbedingungen, die einen Einfluss auf die Tragfähigkeit haben, häufig nicht bekannt sind, sodass der Vergleich mit Neuholz schwer fällt [170]. Beispielhaft werden einige Untersuchungen aufgeführt. Tests von *Rug & Seemann* [172] an neuem und altem Holz (60, 140 und 200 Jahre alt) zeigten keine signifikanten Abweichungen der Festigkeitswerte und Festigkeitsstreuungen zwischen Neu- und Altholz. Auch *Nier* [106] zeigte durch Korrelationsanalysen mit den verschiedenen Einflussparametern auf die Festigkeit, dass ein negativer Zusammenhang



zwischen Probenalter und Festigkeit nicht statistisch abgesichert werden kann. In seinen Untersuchungen nahm jedoch bei den alten Konstruktionshölzern die Ästigkeit zu, was der Grund für die Aussortierung vieler Hölzer in dieser Untersuchung war. *Walthelm* [173] fand bei der Prüfung von ca. 100 Jahre altem Holz sehr gute Festigkeiten vor, die sogar etwas über den damaligen Festlegungen für Neuholz lagen. Weiter sind folgende Untersuchungen zu nennen: *Erler* 1993 [174], *Görlacher* 1999 [175]. Auch diese belegen, dass Holz durch Alterungsprozesse nicht an Festigkeit verliert. In der Schweiz wurde der Grundsatz, dass Altholz, wenn es nicht mechanisch oder biologisch geschädigt ist, keine geringeren Festigkeitswerte aufweist als Neuholz auch in die Bestandsbaunorm *SIA 269-5* [25] aufgenommen.

### Entwicklung von Festigkeitswerten unter Langzeitbelastung

Unter Dauerbeanspruchung verringert sich die Holzfestigkeit. Abb. 5.4 visualisiert vier Ansätze zur Beschreibung der Festigkeit unter Langzeitbelastung. Die Grafik wurde auf Grundlage einer Zusammenfassung von *Steck* [78] und unter Prüfung der Primärquellen erstellt.

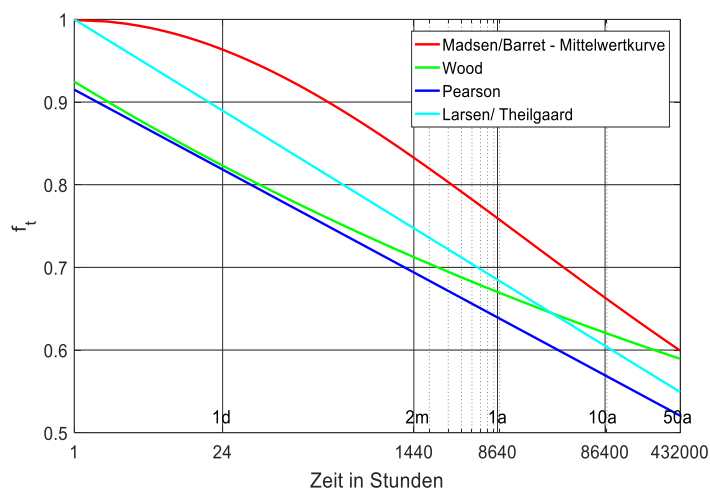


Abb. 5.4: Zeitfestigkeit von Holz in Abhängigkeit von der Belastungsdauer (x-Achse logarithmiert)

Die Berechnungsformeln werden im Anhang 10.4 (S. 18 ff.) angegeben. Die Kurven zeigen, dass schon nach zehn Jahren ständiger Belastung etwas weniger als 60% der Tragfähigkeit bei Kurzzeitbelastung erreicht werden. *Wood* [176] führte 126 Langzeittests über einen Zeitraum von acht Jahren an kleinen fehlerfreien Proben der Douglas-Fichte (6% und 12% Holzfeuchte) durch, betont jedoch, dass die Schlussfolgerungen ohne weitere Untersuchungen nicht auf anderen Holzarten oder frisch gefälltes (nicht getrocknetes) Holz übertragen werden sollten. Die Belastungen entsprach 60-95% der Kurzzeitfestigkeit (Kurzzeitfestigkeit von Standardprüfkörpern bei einer Belastungsdauer von fünf Minuten.). Die dem Graphen nach *Pearson* [177] zugrundeliegende Berechnungsformel wurde aus der Auswertung mehrerer Untersuchungen und Bestimmung der Regressionsgleichung gewonnen. Es wurden Belastungsstufen von bis zu 90% der Kurzzeitfestigkeit untersucht. Höher ausgelastetes Holz (ca. 90% Auslastung der Kurzzeitfestigkeit) versagte schneller. *Pearson* [177] konnte anhand der Auswertung verschiedener Untersuchungen keinen Grenzwert für die Abnahme der Festigkeit feststellen. Bei einer

Auslastung von unter 50% der Kurzzeitfestigkeit sei die Langzeitfestigkeit für übliche Standzeiten jedoch ausreichend. Der Ansatz nach *Larsen & Theilgaard* [178] stellt eine theoretische Herleitung unter Annahme einer Belastung in Höhe von mindestens 60% der Kurzzeitfestigkeit dar. *Madsen & Barret* [179] führten umfangreiche Biegetests an Bauholz durch und kamen zu dem Resultat, dass die Ergebnisse der *Wood-Kurve* zu ungünstig seien. Die Autoren betonen, dass eine Extrapolation des Graphen weit über die untersuchten Testzeiträume (7 Stunden, 7 Tage, 70 Tage, 365 Tage) hinaus nicht sinnvoll sei, weil dann die Festigkeit auf null sinken würde, was nicht der Realität entspricht. Die Autoren vermuten, dass die Kurve an einem bestimmten Punkt abflacht, dies sei jedoch durch weitere Untersuchungen zu bestätigen. Es wurde festgestellt, dass die durchschnittliche Festigkeit nach zwei Monaten bei ca. 85% und nach einem Jahr bei ca. 75% der Kurzzeitfestigkeit liegt. Bei konservativer Extrapolation der Ergebnisse beträgt die Festigkeit nach 50 Jahre ca. 55% der Kurzzeitfestigkeit. *Madsen & Barret* stellten keine Unterschiede der Langzeitfestigkeit bei trockenem und feuchtem Holz fest. Auch hier wurde festgestellt, dass die Abnahme der Langzeitfestigkeit von der Spannungsgröße abhängig ist. Zudem trat das Versagen zumeist im Bereich von Strukturstörungen auf. Nach *Steck* [78] ist die Anwendung der Ergebnisse von *Madsen & Barret* bedenklich, da diese nur für den Lastfall ständige Last gelten, der Einfluss von Klimaschwankungen und des Querschnitts unbekannt ist und die Ergebnisse streng genommen nur für Bauholz aus Douglas-Fichte gelten. Nach 50 Jahren unter Langzeitbelastung liegen die Festigkeiten nach allen Berechnungsansätzen bei knapp unter 60% (Tab. 5.8).

Tab. 5.8: Reduktion der Festigkeit unter 50 Jahren Langzeitbelastung nach verschiedenen Berechnungsansätzen

t	Madsen/Barrett (Mittelwertkurve nach Steck)	Madsen/ Barret geschätzte Werte	Wood	Pearson	Larsen/ Theilgaard
50a	0,599	0,55*	0,589	0,521	0,549

\* Wert nach Madsen/ Barret bei sehr konservativer Extrapolation der Ergebnisse

Die Anwendbarkeit der Ergebnisse auf den extrapolierten Zeitraum ist zu hinterfragen. Zudem handelt es sich bei Bauholz nicht um fehlerfreies Holz, sodass der Effekt der Langzeitbelastung im Verhältnis zum Einfluss von Strukturstörungen geringer ausfallen dürfte. Dennoch wurde der Modifikationsfaktor  $k_{mod} = 0,6$  bei maßgebender ständiger Belastung auf dieser Basis in die Normung (*DIN EN 1995-1-1:2010-12*) eingeführt. Für Vollholz ist der Beiwert für alle Klassen der Lasteinwirkungsdauer in Nutzungsklasse 1 und 2 gleich. Im Vergleich dazu werden die Werte für Nutzungsklasse 3 wie in Tab. 5.9 angegeben abgemindert. Ein eindeutiger Trend kann nicht festgestellt werden, sodass die Abweichungen auf die Rundungen zur Festlegung praktikabler Werte zurückzuführen sind.

Tab. 5.9: Prozentuale Abminderung von  $k_{mod}$  in NKL 3 in Bezug auf den Wert in NKL 1 bzw. 2 abhängig von der Klasse der Lasteinwirkungsdauer

	Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED)				
	ständig	lang	mittel	kurz	sehr kurz
Prozentuale Abminderung von $k_{mod}$ in NKL 3 in Bezug den Wert in NKL 1 bzw. 2	16,67 %	21,43 %	18,75 %	22,22 %	18,18 %

## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Das Konzept zur Abbildung des Einflusses von Feuchtigkeitseinfluss und Langzeitbelastung mittels dieses Faktors ist nach *Köhler & Fink* [180] zu stark vereinfacht und sollte ein weiterer Forschung näher untersucht werden bzw. in der Bemessung detaillierter berücksichtigt werden. Der physikalische Effekt, der zur Festigkeitsreduktion von Holz unter Langzeitbelastung führt, kann nach *Köhler, Sørensen & Faber* [131] mit kumulativen Schadensmodellen abgebildet werden. Dazu werden in der Literatur drei Modelle verwendet: *Gerhards* Modell [181], *Foschi & Yaos* Modell [182] und *Nielsens* Modell [183]. Details können in den Literaturangaben direkt oder bei [120] bzw. [131] nachgelesen werden. In *Sørensen, Svensson & Stang* wird der  $k_{mod}$ -Faktor für verschiedene Lastfälle mittels dieser drei Modelle berechnet [120]. Es ergeben sich die Werte nach Tab. 5.10.

Tab. 5.10:  $k_{mod}$  Werte für verschiedene Lastfälle aus *Sørensen, Svensson & Stang* [120]

Lastfall	Modifikationsbeiwert
Schnee	0,75-0,80
Wind	1,00-1,05
Nutzlast	0,80

Die hohen Werte für den Windlastfall ergeben sich durch die kurzen Einwirkungszeiten der Windlast. Es fällt auf, dass keine Unterscheidung nach der Nutzungsklasse getroffen wird. Die Werte stimmen ungefähr mit denen der *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] für die Nutzungsklasse 1 überein. Der Wert für Schnee kann nach EC 5 etwas höher liegen (bei KLED kurz  $k_{mod} = 0,9$ ), ebenso der für Wind (KLED sehr kurz  $k_{mod} = 1,10$ ). *Sørensen et al.* [120] weisen darauf hin, dass die gefundenen Werte etwa mit denen aus amerikanischen und kanadischen Studien übereinstimmt.

### Verformung unter Langzeitbelastung

Die Verformungen des Holzes nehmen unter Langzeitbelastung zu. Der Effekt ist nach *Rug & Mönck* [1] abhängig von der Rohdichte, den strukturellen Eigenschaften, der Schnittrichtung, dem Belastungsgrad und der Art der Belastung. Die Kriechverformung steigt mit Holzfeuchte und Temperatur. Darüber hinaus ist sie bei Schubbeanspruchung deutlich höher als bei Beanspruchung auf Zug [1]. Das Kriechen kann nach *Niemz* [184] in drei Phasen eingeteilt werden: primäres Kriechen (degressiver Fortschritt), sekundäres Kriechen (konstanter Fortschritt), tertiäres Kriechen (progressiver Fortschritt). Letzterer nimmt unter üblichen Lastkombinationen eine untergeordnete Bedeutung ein.

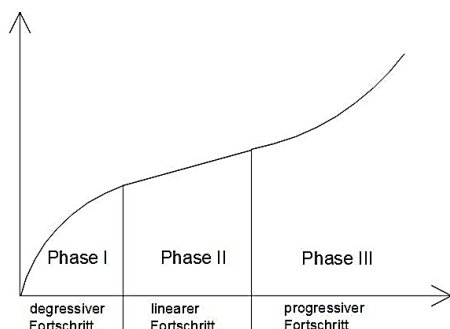


Abb. 5.5: Phasen des Kriechens aus *Niemz* [184]

Eine Zusammenstellung von Einflussparametern auf das Kriechen (unter anderem, Faser-Last-Winkel, Frühholz-/ Spätholzanteil, Holzart etc.) sind bei *Niemz* [184] zu finden. Diese zeitabhängigen Verformungen werden im aktuellen Bemessungskonzept der Eurocodes nach *DIN EN 1995:2010-12* [90] bzw. *DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08* [91] durch den Beiwert  $k_{def}$  in die Berechnung einbezogen. Der Wert ist ebenfalls von der Nutzungsklasse und dem Baustoff abhängig.

### **Maßabweichungen durch Querschnittsverwitterungen im Zeitverlauf**

Eine pauschale Einbeziehung von Querschnittsverwitterungen wäre nicht der Praxis entsprechend. Durch eine qualifizierte Bestandsaufnahme in-situ müssen die kritischen Hölzer der Konstruktion detailliert untersucht werden. Deutliche Verwitterungen können so an den entsprechenden Stellen durch Nettoquerschnitte berücksichtigt werden. Bezüglich der Verbindungsmittel ist zu untersuchen, ob Verwitterung größere Fehlflächen verursachen. Diese Fehlflächen können nach *Görlacher* [175] zu örtlichen Stabilitätsproblemen führen und sind unbedingt zu beachten. Auch dies kann für den Einzelfall anhand einer umfangreichen Bestandsaufnahme vor Ort erfolgen.

#### **5.2.4 Beziehungen zwischen den mechanischen Eigenschaften**

Die Eigenschaften von Holz sind untereinander korreliert. Nach *Köhler* [149] sowie *JCSS Probabilistic Model Code* [61] können die Biegefestigkeit, der Biege-E-Modul und Rohdichte als Referenzeigenschaften verwendet werden. Zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit wird nach *Glos* [144] ein linearer Zusammenhang unterstellt. Die Abhängigkeit zwischen E-Modul und Rohdichte wird allgemein als parabolisch unterstellt, für Fichtenholz wird nach *Glos* [144] ein linearer Zusammenhang angenommen. Der *Probabilistic Model Code Part 3.5* [61] gibt die Beziehungen nach Tab. 5.11 zwischen den Eigenschaften an. Variationskoeffizienten und Verteilungsfunktionen der Referenzeigenschaften sind in Tab. 5.12 dargestellt. Die Beziehungen wurden anhand von Standardprüfkörpern in Standardprüfbedingungen ermittelt. Nach *JCSS PMC* [61] wird davon ausgegangen, dass sie auch für andere Bedingungen und Bauteilgrößen gelten. Diese genannten Werte gelten nur für Nadelholz. Weiter werden im *PMC* [61] Korrelationskoeffizienten zwischen Materialeigenschaften angegeben. Diese wurden an fehlerfreien Prüfkörpern ermittelt. Es wird angenommen, dass diese auch für Bauholz anwendbar sind [61].

5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Tab. 5.11: Beziehung zwischen den Referenzeigenschaften und anderen Eigenschaften aus *Probabilistic Model Code* [61], Erwartungswerte und Variationskoeffizienten

Eigenschaft		Erwartungswert $E[X]$	Variationskoeffizient $V_x$
Zugfestigkeit in Faserrichtung	$R_{t,0}$	$E[R_{t,0}] = 0,6E[R_m]$	$COV[R_{t,0}] = 1,2COV[R_m]$
Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	$R_{t,90}$	$E[R_{t,90}] = 0,015E[\rho_{den}]$	$COV[R_{t,90}] = 2,5COV[\rho_{den}]$
Elastizitätsmodul – Zug in Faserrichtung	$E_{t,0}$	$E[E_{t,0}] = E[E_m]$	$COV[E_{t,0}] = COV[E_m]$
Elastizitätsmodul – Zug rechtwinklig zur Faserrichtung	$E_{t,90}$	$E[E_{t,90}] = E[E_m]/30$	$COV[E_{t,90}] = COV[E_m]$
Druckfestigkeit in Faserrichtung	$R_{c,0}$	$E[R_{c,0}] = 5E[R_m]^{0,45}$	$COV[R_{c,0}] = 0,8COV[R_m]$
Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	$R_{c,90}$	$E[R_{c,90}] = 0,008E[\rho_{den}]$	$COV[R_{c,90}] = COV[\rho_{den}]$
Schubmodul	$G_v$	$E[G_v] = E[E_m]/16$	$COV[G_v] = COV[E_m]$
Schubfestigkeit	$R_v$	$E[R_v] = 0,2E[R_m]^{0,8}$	$COV[R_v] = COV[R_m]$

Tab. 5.12: Probabilistische Modelle für die Referenzeigenschaften für Bauholz aus *Probabilistic Model Code* [61]

		Verteilung	Variationskoeffizient
Biegefestigkeit	$R_m$	Lognormal	0,25
Biege-E-Modul	$E_m$	Lognormal	0,13
Rohdichte	$\rho_{den}$	Normal	0,10

In *DIN EN 384:2019-02* [160] werden Beziehungen zwischen den charakteristischen Werten mechanischer Eigenschaften für Nadel- und Laubholz angegeben. Einige der Beziehung waren bereits in *DIN EN 338:2010-02* enthalten, wurden mit der Novellierung dieser im Jahre 2016 jedoch gestrichen. Für Steifigkeiten, deren charakteristischer Wert als Erwartungswert definiert ist, stimmen die Beziehungen in *JCSS PMC* [61] und *DIN EN 384:2019-02* [160] überein. Für Festigkeiten ergeben sich andere Werte, da der charakteristische Wert als 5%-Quantil definiert ist.

Tab. 5.13: Materialbeziehungen nach *DIN EN 384:2019-02* [160]

Eigenschaft	Beziehungen zwischen den mechanischen Eigenschaften
Zugfestigkeit in FR <sup>1</sup>	
Nadelholz	$f_{t,0,k} = -3,07 + 0,73f_{m,k}$
Laubholz	$f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k}$
Druckfestigkeit in FR <sup>1</sup>	$f_{c,0,k} = 4,3(f_{m,k})^{0,5}$
Druckfestigkeit rechtwinklig zur FR <sup>1</sup>	
Nadelholz	$f_{c,90,k} = 0,007\rho_k$
Laubholz	$f_{c,90,k} = 0,010\rho_k$ für $\rho_k < 700 \text{ kg/m}^3$ $f_{c,90,k} = 0,015\rho_k$ für $\rho_k \geq 700 \text{ kg/m}^3$
Schub	$f_{v,k} = 3,0 + 0,03f_{m,k}$ für $f_{m,k} \leq 60 \text{ MPa}$ $f_{v,k} = 5,0$ für $f_{m,k} > 60 \text{ MPa}$
E-Modul in FR <sup>1</sup>	
Nadelholz	$E_{0,05} = 0,67 E_{0,mean}$
Laubholz	$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$
E-Modul rechtwinklig zur FR <sup>1</sup>	
Nadelholz	$E_{90,mean} = E_{0,mean}/30$
Laubholz	$E_{90,mean} = E_{0,mean}/15$
Schubfestigkeit, Nadel- und Laubholz	$G_{mean} = E_{0,mean}/16$
Rohdichte, Nadel- und Laubholz	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$

<sup>1</sup>FR – Faserrichtung

## 5.3 Probabilistische Modellbildung für den Materialwiderstand mit Berücksichtigung der Aktualisierung von Widerstandsparametern

### 5.3.1 Grundlegendes und Arbeitsschritte

Grundlage der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Holzkonstruktionen ist die detaillierte Bestandsaufnahme und Bewertung aller tragfähigkeitsbestimmenden Merkmale. Da die Variabilität der Eigenschaften durch Einflüsse auf verschiedenen Ebene bestimmt wird (Tab. 5.6) stellt die Kombination von Informationen aus verschiedenen Quellen bzw. Betrachtungsebenen des Materials eine Herausforderung dar. *Sousa, Branco & Lourenço* [185] fassen dies wie in Abb. 5.6 dargestellt zusammen.

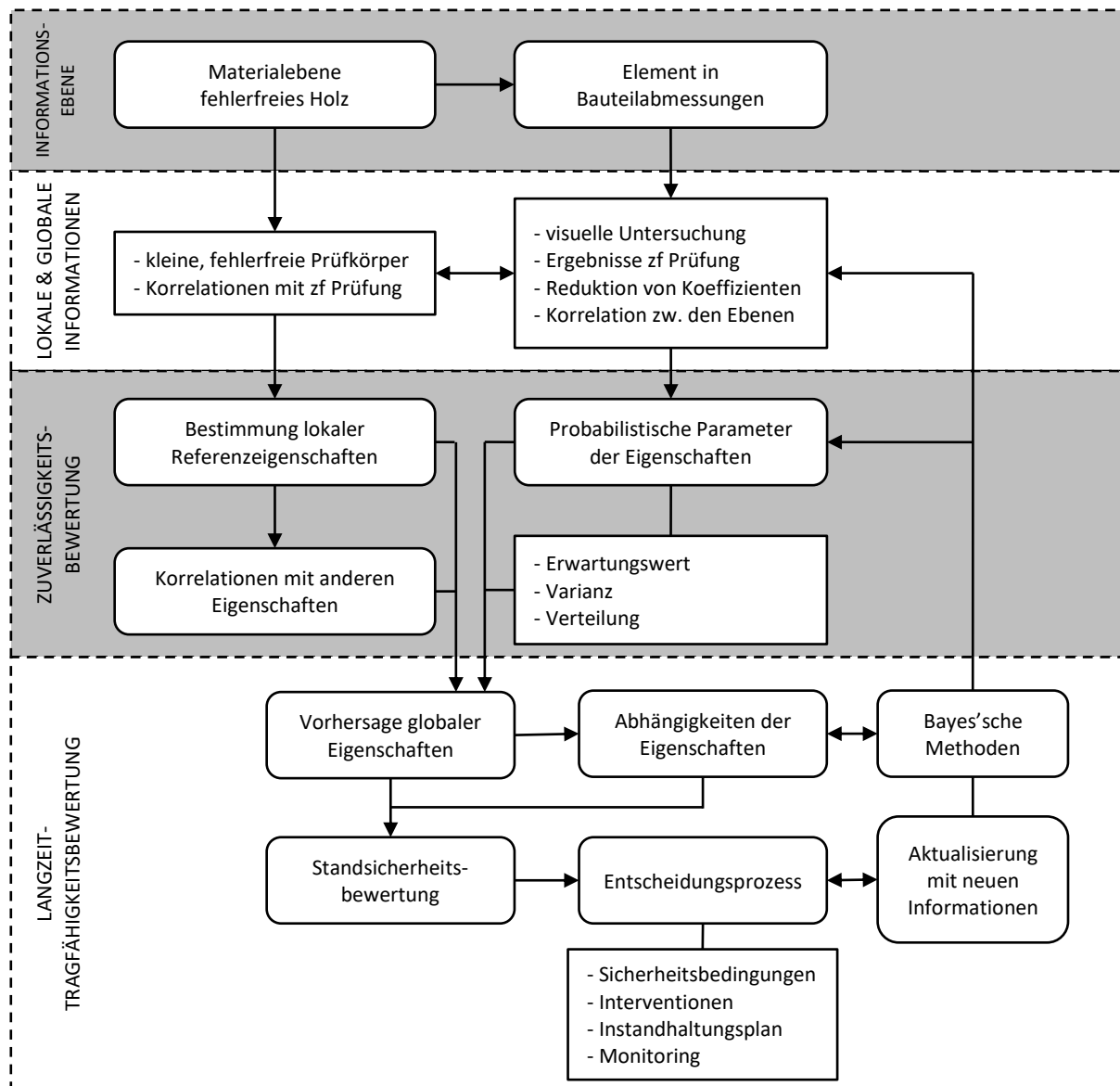


Abb. 5.6: Ganzheitliche Methodik zur Standsicherheitsanalyse, Bewertung und Aktualisierung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen unter Kombination verschiedener Informationsebenen aus *Sousa, Branco & Lourenço* [185]

## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Zur Entwicklung eines probabilistischen Widerstandsmodells für Bauholz für die Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten sowie für die Parameteraktualisierung im speziellen Fall werden die in Abb. 5.7 zusammengefassten Methoden für Datensätze aus der Literatur angewendet und bewertet.

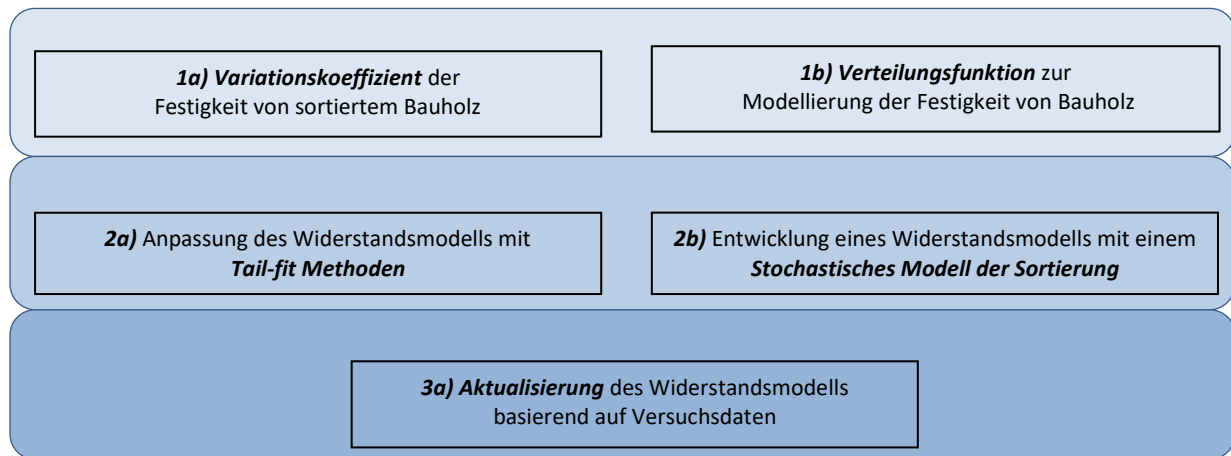


Abb. 5.7: Arbeitsschritte zur Entwicklung eines probabilistischen Widerstandsmodells für Bauholz

### 5.3.2 1a) Variationskoeffizient der Festigkeit – Literaturstudie

Zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten wird die Basisvariable normiert, d.h. der Erwartungswert der Basisvariablen beträgt  $\mu = 1$ . Die Sicherstellung einer einhundertprozentigen Materialauslastung erfolgt mit einem Bemessungsparameter. Eine geringere Auslastung des Materials kann in diesem Rahmen nicht berücksichtigt werden. Somit kann sich die Erarbeitung eines Widerstandsmodells auf den Variationskoeffizienten und den Variationskoeffizienten (= relatives Streumaß) der Basisvariablen konzentrieren. Literaturstudien zum Variationskoeffizienten der Festigkeit von sortiertem Bauholz werden durchgeführt und vergleichend auf Untersuchungen zur Prüfung kleiner fehlerfreier Proben eingegangen. Der Variationskoeffizient wird aus den zitierten Quellen wenn vorhanden entnommen, bei Vorlage der Daten unter Berücksichtigung des in Anhang Kap. 10.5.1 beschriebenen Biaskorrekturfaktor mit der Momentenmethode berechnet. Die Ergebnisse der Literaturstudie werden im Anhang 10.6. (S. 28ff.) tabellarisch aufbereitet und nachfolgend beschrieben.

### Variationskoeffizienten der Festigkeit von Nadelholz

#### Kleine fehlerfreie Proben

Die Ergebnisse der Literaturstudie wird in Anhang 10.6.1 (S. 28 ff.) tabellarisch dargestellt. Es werden Ergebnisse fehlerfreier Prüfkörper aus Altholz nach *Rug & Seemann* [186] und *Nier* [106] dargestellt. Für kleine fehlerfreie Proben aus Neuholz werden *Kollmann* [147], *ČSSR Standard 1969* und *UDSSR Standard 1978* zitiert nach *Apitz* [159], *Rug & Seemann* [172] und *DIN 68364:2003-05* [108] zitiert. Die Ergebnisse liegen im in Tab. 5.14 ausgewiesenen Bereich. Deutlich wird, dass die Variationskoeffizienten von der Festigkeitseigenschaft abhängen. Die Werte der Zugfestigkeit sind am größten, die der

Druckfestigkeit am geringsten. Die Ergebnisse bei Unterscheidung nach der Holzart sind beim Vergleich der Angaben nach *Nier* [106] und der *DIN 68364* [108] unterschiedlich, es kann kein eindeutiges Ergebnis ausgewiesen werden.

**Tab. 5.14: Variationskoeffizienten der Festigkeit für unsortiertes Nadelholz als kleine fehlerfreie Proben – Zusammenfassung der Literaturstudie**

	Biegefestigkeit	Druckfestigkeit in FR	Zugfestigkeit in VR
<b>Altholz</b>			
Obere Grenze	0,28	0,25	0,38
Untere Grenze	0,23	0,15	0,31
<b>Neuholz</b>			
Obere Grenze	0,19	0,20	0,10
Untere Grenze	0,13	0,06	0,10

Nach *Nier* [106] kann von kleinen Prüfkörpern nicht auf die Bauteilfestigkeit geschlossen werden, wenn Parameter wie Ästigkeit, Kerbstellen, aber auch Rohdichte, Druckfestigkeit, E-Modul nicht berücksichtigt werden [106]. Auch nach *Marchand* [187] repräsentieren kleine Prüfkörper das Bauholz schlecht und teilweise falsch, dabei bringe auch die Klassenbildung keinen nennenswerten Verbesserung.

### **Bauholz, unsortiert**

Die Literaturstudie wird in Anhang 10.6.1 zusammengefasst. Zu Variationskoeffizienten des Altholzes in Bauteilabmessungen werden *Ehlbeck & Görlacher* [188], *Rug & Seemann* [186] und *Nier* zitiert. Die Ergebnisse von unsortiertem Neuholz in Bauteilabmessungen werden aus *Natterer, Marchand & Fux* [189], *Glos & Diebold* [158], *Apitz* [159, 190], *Kiesel* [191], *Glos & Burger* [168], *Burger* [192], *Glos, Diebold & Schleifer* [193], *Ranta-Maunus* [194], *Ranta-Maunus, Denzler & Stapel* [195], *Stapel* [196] und *Linke & Mühlisch* [197, 198] entnommen. Die Ergebnisse liegen im Bereich nach Tab. 5.15.

**Tab. 5.15: Variationskoeffizienten der Festigkeit für unsortiertes Nadelholz in Bauteilgröße – Zusammenfassung der Literaturstudie**

	Biegefestigkeit	Druckfestigkeit in FR	Zugfestigkeit in FR
<b>Altholz</b>			
Obere Grenze	0,33	-	-
Untere Grenze	0,17	-	-
<b>Neuholz</b>			
Obere Grenze	0,40	0,20	0,52
Untere Grenze	0,17	0,16	0,29

Im Vergleich zu den Untersuchungen an fehlerfreien Proben zeigen die Versuche an Bauholz im Durchschnitt höhere Variationskoeffizienten aller drei betrachteten Festigkeitseigenschaften.

In der Literatur fanden sich wenige Untersuchungen an Altholz in Bauteilabmessungen. In den Untersuchungen von *Ehlbeck & Görlacher* [188] ergeben sich hohe Variationskoeffizienten, da Bauteile mit starkem Insektenbefall im Randbereich enthalten sind. Zudem könnten nach Aussage der Autoren frühere Überbelastungen vorhanden sein [188]. Es liegt jedoch nur ein geringer Stichprobenumfang vor. In den Ergebnissen von *Nier* [106] ergeben sich verhältnismäßig hohe Variationskoeffizienten, da Hölzer mit Querschnittsschwächungen nicht aussortiert wurden.



### Visuell sortiertes Bauholz

Die Ergebnisse der Literaturstudie für Nadelholz in Bauteilabmessung bei visueller Sortierung werden in Anhang 10.6.2 (S. 31 ff.) dargestellt und nachfolgend zusammengefasst.

#### Biegefestigkeit

Die Literaturstudie umfasst die Arbeiten von *Graf* [199], *Glos* [200], *Natterer, Marchand & Fux* [189], *Apitz* [159], *Glos & Diebold* [158], *Sørensen & Hoffmeyer* [201] (Datenbank C, H, I und J), *Stapel* [196] und *Linke & Mühlisch* [197, 198]. Bei *Graf* [199] handelt es sich um eine der ältesten dokumentierten Studien in diesem Bereich. *Glos* [200] begründet die ausgewiesenen Werte auf einer Literaturzusammenstellung. Bei *Apitz* [159] wurden die meisten Hölzer der GK II zugeordnet, weitere der GK I und die wenigsten der GK III. Die Werte für den Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit sind vergleichsweise hoch. Zudem ist der Wert in der GK II größer als in der GK III. Auch *Kessel & Sandoz* [148] fanden bei Anwendung der *DIN 4074-1/1953* zur Sortierung von 132 Fichtenkantholzbalken einen höheren Mittelwert in der Klasse GK III im Vergleich zur GK II und stellen eine unbefriedigende Trennschärfe der Sortierung fest, sodass sich dieses Ergebnis so erklären lässt. Die Arbeiten von *Natterer, Marchand & Fux* [189] umfassen Untersuchungen zwei verschiedenen klimatischen Bedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit). In *Sørensen & Hoffmeyer* [201] finden sich verschiedene Datenbanken mit Untersuchungen an vornehmlich Fichtenholz bei visueller Sortierung und unterschiedlichen Methoden maschinellen Sortierung. Der Variationskoeffizient wurde aus der Anpassung der Stichprobe an verschiedene Verteilungen entwickelt. Der im Anhang ausgewiesene Wert gilt für die Lognormalverteilung.

*Stapel* [196] führt sehr umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss der Sortiernorm bei visueller Sortierung durch. Die Variationskoeffizienten der betrachteten Festigkeitseigenschaften (Biegefestigkeit und Zugfestigkeit) werden in Paper I seiner Dissertation für das unsortierte Material umfassend dargestellt und für das sortierte Material beschrieben. Für die Biegefestigkeit von Fichte ergeben sich in allen Festigkeitsklassen Werte zwischen  $V_R = 0,27 \dots 0,30$  bei Anwendung der *DIN 4074-1* und der Britischen Sortiernorm. Die skandinavischen Sortierregeln führen zu geringeren Variationskoeffizienten, die französischen Sortiernormen zu höheren Werten ( $V_R = 0,24$  für C30). Weitere Ergebnisse werden in Paper II und III dargestellt, siehe Anhang 10.6.2.

Im *Probabilistic Model (PMC)* [61] wird für den Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit für Bauholz mittlerer Güte  $V_R = 0,25$  ausgewiesen. Aus den hier zusammengestellten Untersuchungen ergibt sich ein Klassendurchschnitt für die mittlere Klasse von  $V_R = 0,26$ ; der Durchschnitt für die höhere Klasse (GK I bzw. C30) liegt darunter ( $V_R = 0,22$ ), der für die höhere darüber (GK III bzw. C18/ C16,  $V_R = 0,29$ ). Es ergibt sich eine Tendenz, dass in Klassen höherer Festigkeit geringere Variationskoeffizienten der Festigkeit vorhanden sind. Auch ist der durchschnittliche Variationskoeffizient in den einzelnen Klassen erwartungsgemäß geringer, als bei unsortiertem Holz.

### Druckfestigkeit

Die Literaturstudie umfasst die Arbeiten von *Graf* [199], *Glos* [200], *Kiesel* (Teilstichprobe Kiefer nach [202], Zusammenfassung verschiedener Holzarten nach [203]) und *Sørensen & Hoffmeyer* [201] (Datenbank J). Für den Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit an Prüfkörpern in Bauholzabmessungen liegen wenige Untersuchungen vor. Der Klassendurchschnitt der Untersuchungen ist mit  $V_R = 0,18$  etwas günstiger als der nach *PMC* [61] des *JCSS* ausgewiesene Wert von  $V_R = 0,20$ . Der Wert für die höhere Festigkeitsklasse liegt darunter ( $V_R = 0,15$ ) der für die niedrigere Festigkeitsklasse etwas darüber ( $V_R = 0,21$ ).

### Zugfestigkeit

Die Literaturstudie umfasst die Arbeiten von *Glos* [200], *Rug, Badstube & Kofent* [203], *Burger* [192] *Sørensen & Hoffmeyer* [201] (Datenbank C und J) und *Stapel* [196]. Die Variationskoeffizienten der Zugfestigkeit bei visueller Sortierung sind nach *Rug, Badstube & Kofent* [201] relativ hoch. Die Werte wurden an Brettern ermittelt, die zur Brettschichtholzherstellung verwendet wurden.

Es ergibt sich im Klassendurchschnitt mit  $V_R = 0,36$  ein ungünstigerer Wert für den Variationskoeffizienten der Zugfestigkeit als er im *PMC* [61] des *JCSS* für Holz mittlerer Güte angegeben ist ( $V_R = 0,30$ ), wengleich der Wert für die höhere Festigkeitsklasse im Durchschnitt geringer ( $V_R = 0,28$ ), als der Wert für die niedrigere Festigkeitsklasse höher ( $V_R = 0,40$ ) (jedoch nur eine Untersuchung von *Glos*) ist. Durch die geringe Anzahl der Untersuchungen fallen ungünstigere Werte stark ins Gewicht, wie auch der Vergleich der oberen und unteren Grenzwerte mit dem Klassendurchschnitt zeigt.

### Zusammenfassung der Literaturstudie für visuell sortiertes Nadelholz

Die Ergebnisse der Literaturoswertung werden in Tab. 5.16 zusammenfassend dargestellt.

**Tab. 5.16: Variationskoeffizienten der Festigkeit für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen – Zusammenfassung der Literaturstudie**

		Güteklasse bzw. Festigkeitsklasse		
		GK I/ C30	GK II/ C24	GK III/ C18, C16
<b>Biegefestigkeit</b>	Obere Grenze	0,47	0,41	0,41
	Untere Grenze	0,06	0,19	0,20
<b>Biegefestigkeit</b> exklusive der Ergebnisse von <i>Apitz</i> [159] und <i>Graf</i> [199] (starke Ausreißer)	Obere Grenze	0,26	0,33	0,41
	Untere Grenze	0,16	0,19	0,20
		GK I/ C30	GK II/ C24	GK III/ C18, C16
<b>Druckfestigkeit</b>	Obere Grenze	0,20	0,20	0,22
	Untere Grenze	0,08	0,14	0,17
		GK I/ C30	GK II/ C24	GK III/ C18, C16
<b>Zugfestigkeit</b>	Obere Grenze	0,38	0,46	0,43
	Untere Grenze	0,21	0,28	0,26

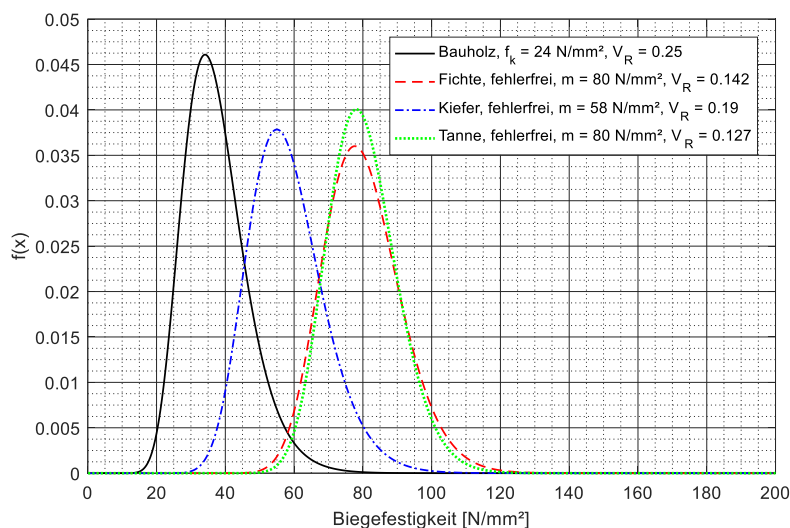
Gründen für die Variabilität der Ergebnisse der Studien sind Unterschiede im Probenumfang und die Auswahl des Probenmaterials. Nach *Steck* [78] können die festigkeitsbestimmenden Merkmale von Holz in Bauteilabmessungen als statistisch unabhängige Basisvariablen verstanden werden. Diese sind

## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

unter anderem Schrägfaserigkeit, Ästigkeit, Holzfeuchtigkeit und die Biegefestigkeit der fehlerfreien Kleinprobe. Demnach kann der Variationskoeffizient bei Überlagerung aller Anteile mit

$$V_{ges} = \sqrt{\sum V_{xi}^2} \quad (5.2)$$

berechnet werden. Damit ergibt sich mit den Angaben nach Steck [78] für GK I (C30)  $V_R = 0,22$ , GK II (C24)  $V_R = 0,25$  und GK III (C18 bzw. C16)  $V_R = 0,30$  für den Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit. Im Vergleich zu den fehlerfreien Proben sind die Variationskoeffizienten der Festigkeiten von Bauholz höher. Dies resultiert aus dem Einfluss von Holzfehlern auf die Tragfähigkeit. Nach Nier [106] streuen zwar die Festigkeitseigenschaften bei Normprüflingen stärker als bei Bauteilgröße, da die Erwartungswerte der Festigkeiten jedoch deutlich höher liegen, sind die Variationskoeffizienten geringer. Zur Visualisierung wird dies grafisch dargestellt. Dazu wurde unter Annahme des charakteristischen Wertes der Biegefestigkeit für C 24 aus dem charakteristischem Wert  $f_k = 24 \text{ N/mm}^2$  und  $V_R = 0,25$  die Verteilungsfunktion der Eigenschaft (logarithmische Normalverteilung) bestimmt. Außerdem werden Verteilungen für fehlerfreies Holz auf Basis der Angaben der DIN 68364:2003-05 [108] dargestellt (Abb. 5.8).



**Abb. 5.8: Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Biegefestigkeit für sortiertes Bauholz und fehlerfreies Holz, logarithmische Normalverteilung; fehlerfrei : Fichte, Kiefer, Tanne, aus DIN 68364:2003-05 [108]; Bauholz: charakt. Wert aus DIN EN 338:2016-07 [110] Festigkeitsklasse C24,  $V_R$  nach JCSS PMC [61]**

Deutlich wird, dass die Festigkeitsverteilung der Prüfkörper in Bauholzabmessungen deutlich nach links verschoben ist, der Erwartungswert  $E[x]$  also geringer ist, als bei fehlerfreiem Holz. Bei kleinen Proben ohne maßgebende makroskopische Strukturmerkmale wird die Tragfähigkeit vom mikroskopischen Holzaufbau und dem Anteil von Zellulose, Hemizellulose und Lignin bestimmt. Änderungen dieser Parameter führen zu einer Veränderung der Tragfähigkeit. Dabei haben schon kleine Variationen einen Einfluss. Bei Holz in Bauholzabmessungen überlagern die sichtbaren Strukturmerkmale den Einfluss des mikroskopischen Holzgefüges. Der Variationskoeffizient der Festigkeitseigenschaft ist bei Bauholz größer, da kleinere Erwartungswerte der Festigkeit vorhanden sind. Zudem steigt aufgrund des Größeneffektes die Wahrscheinlichkeit des Vorliegens eines Defektes im beanspruchten Material, siehe auch [204]. Die Variabilität der Eigenschaften wird durch die Festigkeitssortierung eingegrenzt.

## Variationskoeffizienten der Festigkeit von Laubholz

### Kleine fehlerfreie Proben

Zu Festigkeit des Laubholzes liegen nur wenige Untersuchungen vor. Auch im Teil 3.5 des *Probabilistic Model Code* [61] wird darauf hingewiesen, dass derzeit noch nicht genügend Angaben für Laubholz vorhanden sind. In *DIN 68364:2003-05* [108] sind Werte für fehlerfreie kleine Prüfkörper vorhanden. Die Angaben zeigen im Vergleich zum Nadelholz leicht günstigere Werte. Des Weiteren führten *Kollmann* [147] und *Rug & Seemann* [172] Untersuchungen aus kleinen fehlerfreien Prüfkörpern aus Neuholz durch. *Rug & Seemann* [172] und *Sousa* [155] enthalten Studien an kleinen fehlerfreien Prüfkörpern aus Altholz. Die Literaturstudie zum Variationskoeffizienten der Festigkeit von unsortiertem Laubholz wird in Anhang 10.6.3 (S. 35) dargestellt.

Tab. 5.17: Variationskoeffizienten der Festigkeit für kleine fehlerfreie Proben aus Laubholz  
– Zusammenfassung der Literaturstudie

	Biegefestigkeit	Druckfestigkeit in FR	Zugfestigkeit in VR
<b>Altholz</b>			
Obere Grenze	-	0,17	0,27*
Untere Grenze	-	0,08	0,27*
<b>Neuholz</b>			
Obere Grenze	0,17*	0,16	0,23*
Untere Grenze	0,09*	0,08	0,23*

\* nur eine Quelle

### Bauholz, unsortiert

Die Studien an Laubholz in Bauteilabmessungen umfassen *Ehlbeck & Görlacher* [188] (Altholz), *Sousa* [155] (Altholz), *Glos & Lederer* [205] (Neuholz), *Glos, Diebold & Schleifer* [193] (Neuholz) *Stapel* [196] (Neuholz) und *Linke & Mühlisch* [206] (Neuholz). Die Ergebnisse werden in Tab. 5.17 und Anhang 10.6.3 (S. 35) zusammengefasst. Für die Druckfestigkeit in Faserrichtung liegen keine Untersuchungen vor. Im Vergleich zum Nadelholz liegen die Werte für die Zugfestigkeit im gleichen Bereich, bei Betrachtung der Biegefestigkeit, streuen die Ergebnisse etwas weniger. Jedoch liegen deutlich weniger Untersuchungen als zum Tragverhalten des Nadelholzes vor.

Tab. 5.18: Variationskoeffizienten der Festigkeit für Laubholz in Bauteilabmessungen, unsortiert  
– Zusammenfassung der Literaturstudie

	Biegefestigkeit	Druckfestigkeit in FR	Zugfestigkeit in FR
<b>Altholz</b>			
Obere Grenze	0,45	-	-
Untere Grenze	0,11	-	-
<b>Neuholz</b>			
Obere Grenze	0,35	-	0,50*
Untere Grenze	0,23	-	0,43*

\* nur eine Quelle

### Visuell sortiertes Bauholz

Die Literaturstudie umfasst die Ergebnisse nach *Sousa* [155] (Altholz), *Stapel* [196] (Neuholz) und *Linke & Mühlisch* [206] (Neuholz). In den Untersuchungen von *Sousa* [155] handelte sich um Altholzbalken (über 100 Jahre altes Kastanienholz) aus Deckenkonstruktionen (Einfeldträger). Vier der Prüfkörper

wurden zerstörend getestet, 16 weitere wurden nach einer Prüfung im elastischen Bereich zur Gewinnung von Brettern, sowie kleiner fehlerfreie Proben für Druck- und Zugversuche (s.o.) verwendet. Die Untersuchungen von *Stapel* [196] umfassen die Holzarten Ahorn, Pappel und Esche. Die Untersuchungen von *Linke & Mühlisch* [206] wurden an Eichenholz durchgeführt.

Die Ergebnisse werden in Anhang 10.6.4 (S. 36) dargestellt, sowie in Tab. 5.16 zusammengefasst. Ein deutlicher Trend zu geringeren Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit in höheren Festigkeitsklassen im Vergleich zu Klassen niedrigerer Festigkeit zeigt sich. Die Werte liegen im Mittel im Bereich der Werte des visuell sortierten Nadelholzes, wobei die Streuung der Ergebnisse zwischen den Untersuchungen geringer ist.

Tab. 5.19: Variationskoeffizienten der Festigkeit für visuell sortiertes Laubholz in Bauteilabmessungen – Zusammenfassung der Literaturstudie

		Güteklasse bzw. Festigkeitsklasse		
		LS 13/ D40/ class I <sup>1</sup>	LS 10/ D35/ class II <sup>1</sup>	LS 7/ D30/ class III <sup>1</sup>
Biegefestigkeit	Obere Grenze	0,28	0,31	0,45
	Untere Grenze	0,18	0,21	0,32

<sup>1</sup> Klasse nach UNI 11119:2004

### ***Variationskoeffizienten der Festigkeit bei apparativ unterstützter Sortierung***

Die maschinelle Sortierung kann die visuelle Sortierung maßgeblich verbessern. *Kessel & Sandoz* [164] zeigten, dass bei Sortierung mittels Ultraschall eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit bei gleichzeitig leicht erhöhtem Mittelwert (im Vergleich zur visuellen Sortierung bzw. zur visuellen Sortierung unter Berücksichtigung der Rohdichte) erreicht werden kann. Der Korrelationskoeffizient in der linearen Regressionsanalyse war dabei mit  $\rho = 0,61$  gut. Die Untersuchungen von *Badstube, Rug und Kofent* [203] zeigen im direkten Vergleich eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Festigkeitseigenschaft bei maschineller Sortierung im Vergleich zur visuellen Sortierung. Auch die Aufstellung früherer Untersuchungen von *Burger* [192] zeigt eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Festigkeit bei maschineller Sortierung. Für diese Arbeit sind insbesondere Sortierverfahren interessant, die zerstörungsfrei bis zerstörungsarm in situ durchgeführt werden können. Ergebnisse einiger Untersuchungen werden in Anhang 10.6.5 (S. 37 f.) tabellarisch dargestellt.

### ***Biegefestigkeit***

*Kessel & Sandoz* [164] untersuchten die Effizienz der Festigkeitssortierung vergleichend bei rein visueller Sortierung, visueller Sortierung mit Bestimmung der Rohdichte und Sortierung mittels Ultraschall als alleiniger Sortierparameter. Die Ergebnisse zeigen eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit bei Berücksichtigung der Rohdichte bei der visuellen Sortierung und eine weitere Reduktion bei Sortierung mittels Ultraschall (siehe Anhang 10.6.5). Für die Sortierung mittels Ultraschall liegt der Variationskoeffizient der Biegefestigkeit je nach Klasse bei nur  $V_R = 0,219...0,184$ .

Die Untersuchungen von *Steiger* [163] unter Verwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung ergaben sehr günstige, zum Teil sehr geringe Variationskoeffizienten. Der im *Probabilistic Model Code* [61] mit  $V_R = 0,25$  empfohlene Wert wird für die Klassen C35 und C27 unterschritten ( $V_R = 0,08...0,14$  bzw.  $V_R = 0,04...0,14$ ), für die Klassen C40 und C22 erreicht bzw. unterschritten.

*Linke & Mühlisch* [198] führen Kalibrierungstests zur Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die apparativ unterstützte Sortierung in situ durch. Die visuelle Sortierung ergab geringere Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit, als die maschinelle Sortierung. Die apparativ unterstützte Sortierung mit multipler Korrelation mehrerer Sortierparameter zeigt vielversprechende erste Ergebnisse, siehe [207].

### *Druckfestigkeit*

Zur Druckfestigkeit bei apparativ unterstützter Sortierung lagen Untersuchungen von *Steiger* [163] und *Sousa* [155] vor. Bei *Steiger* sinken die Variationskoeffizienten mit steigender Festigkeitsklasse, es ergeben sich Werte von  $V_R = 0,05...0,24$ . Für die mittleren und höhere Klassen wird der im *Probabilistic Model Code* [61] empfohlene Wert von  $V_R = 0,20$  leicht unterschritten. Für die Klasse C27 liegen die Werte zwischen  $V_R = 0,5-0,20$ , für C35 bei  $V_R = 0,9...0,1$  und für C40 bei  $V_R = 0,12...0,18$ .

### *Zugfestigkeit*

Der Variationskoeffizient der Zugfestigkeit entspricht in den Untersuchungen von *Steiger* [163] in der mittleren Klasse etwa den im *PMC* [61] ausgewiesenen Wert von  $V_R = 0,30$ . In der Klasse C22 wird er jedoch deutlich überschritten ( $V_R = 0,41...0,57$ ).

### **Zwischenfazit**

Die Literaturstudie zeigt, dass der Variationskoeffizient der Biege-, Zug- und Druckfestigkeit kleiner fehlerfreier Proben im Vergleich zu Vollholz in Bauteilabmessungen erwartungsgemäß geringer ist. Die Festigkeitssortierung reduziert den Wert. Dabei lässt sich eine Tendenz zu einem geringeren Variationskoeffizienten in höheren Klassen feststellen, wobei jedoch einige Untersuchungen einen größeren Wert in der Klasse C 24 bei visueller Sortierung ergaben. Dies könnte auf eine Tendenz zur präferierten Einstufung des Materials in die mittlere Klasse zurückzuführen sein. Eine direkte Vergleichbarkeit der Studien und damit eine Quantifizierung abhängig von der Festigkeitsklasse fällt jedoch schwer, die Ergebnisse sind nicht eindeutig. Faktoren, die das Ergebnis u.a. beeinflussen sind:

- die Qualität des Holzes (Wuchsbedingungen, Standort etc.),
- die Qualität der Sortiernorm,
- die Subjektivität der Einschätzung der Kriterien durch die bewertende Person,
- der Stichprobenumfang.

## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Die apparative Unterstützung hat das Potential, die visuelle Sortierung in situ wesentlich zu verbessern, sollte jedoch nicht losgelöst von dieser angewendet werden. Die Informationen aus den Verfahren müssen kombiniert werden, um ein gutes Sortierergebnis zu ermöglichen. Die Festlegung von spezifischen Variationskoeffizienten der Festigkeit für definierte Festigkeitsklassen, gegebenenfalls abhängig von einer Methode der apparativ unterstützen Sortierung, bleibt demnach noch offen.

### 5.3.3 1b) Verteilungsfunktionen zur Modellierung der Festigkeit von Bauholz

#### Literaturstudie

Zur Modellierung von Festigkeitseigenschaften werden im Allgemeinen rechtsschiefe Verteilungen wie die logarithmische Normalverteilung oder die Weibullverteilung angewendet. Diese sollen diese Zufallsgröße gut repräsentieren und zudem durch den Fokus auf den unteren Wertebereich auf der sicheren Seite liegen. Tab. 5.20 stellt einige Empfehlungen aus der Literatur zur Wahl der Verteilungsfunktion zur Modellierung der Festigkeitseigenschaften von Bauholz zusammen.

Tab. 5.20: Verteilungsfunktionen für Bauholz nach verschiedenen Literaturangaben

Autor bzw. Hrsg.	Jahr	Ref.	Holzart	Empfohlene Verteilungsfunktion	Anmerkungen aus den zitierten Referenzen
<i>Glos</i>	1981	[200]	GK II	Weibull (3-p.)	<i>Besonders bei vielen Versuchen geeignet</i>
<i>Badstube, Rug &amp; Plessow</i>	1989	[105]	GK I, II, III	Weibull (3-p.)	
<i>Kiesel</i>	1990	[191]	NH	Weibull (3-p.)	<i>In Entwurfsfassung des EC 5 festgelegt</i>
<i>Steiger</i>	1995	[166]	Bauholz	LOGN (3-p.) Weibull (3-p.)	<i>Festigkeitssortiertes Holz, Festlegung untere Grenze möglich</i>
<i>Sørensen</i>	2001	[107]	Europ. NH	LOGN Weibull (2-p.)	<i>Bei Anwendung von Weibull 2-p. können etwas geringere <math>V_x</math> verwendet werden</i>
<i>JCSS</i>	2006	[61]	Europ. NH	LOGN	<i>Empfohlen bei Stichprobenanzahl <math>n = 10</math> Zur Vereinheitlichung des Eurocode-Konzeptes für verschiedene Werkstoffe</i>
<i>Sousa et al.</i>	2015	[208]		LOGN	<i>Gewählt aufgrund guter Anpassung des unteren Wertebereichs bei Biegefestigkeit</i>

Nach *Apitz (1987)* [209] sind die Festigkeitseigenschaften des Bauholzes in der Grundgesamtheit weibullverteilt, in den Festigkeitsklassen normalverteilt. Nach *Steiger (1995)* [166] ist für fehlerfreies Holz eine 2-parametrische Weibullverteilung anzusetzen und für Bauholz eine 3-parametrische Weibullverteilung, sehr oft genüge jedoch eine Lognormalverteilung den Anforderungen. Zudem sei die zu wählende Funktion durch die Normung festgelegt und es gelte somit, möglichst gute Parameter zu finden, die die Stichprobe bestmöglich entsprechen. *Steiger* [166] empfiehlt in diesem Zusammenhang die 2-parametrische Lognormalverteilung zur Beschreibung von Holzfestigkeiten.

## **Statistische Anpassungstests für Versuchsdaten aus der Literatur**

### **Statistische Anpassungstests für visuell sortierte Proben**

Für verschiedene Datensätze aus Materialtests werden statistische Anpassungstests zur Überprüfung der Eignung der Normalverteilung, der logarithmischen Normalverteilung und der Weibullverteilung durchgeführt. Dazu wird der Anderson-Darling-Test (siehe Anhang Kap. 10.5.4) verwendet. Der Test sollte beim Vorliegen von weniger als acht Datenpunkten nicht angewendet werden. Er wurde zur Überprüfung einer Anpassung an die Normalverteilung entwickelt, kann aber auch zur Überprüfung der Anpassung an andere statistische Verteilungsfunktionen Anwendung finden.

Die Untersuchungen erfolgten für Daten aus *Apitz* [210] (Biegefestigkeit), *Kiesel* [211] (Druckfestigkeit) und *Linke & Mühlisch* [197, 198, 206] (Biegefestigkeit). Die Ergebnisse werden tabellarisch in Anhang 10.7.1 (S. 39 ff.) dargestellt. Auf Basis der Mehrzahl der Untersuchungsergebnisse muss die Nullhypothese „die Datenmenge ist der logarithmischen Normalverteilung zugeordnet“ abgelehnt werden, wohingegen die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Weibullverteilung zugeordnet“ nicht abgelehnt wird. Der Vergleich aus Testgröße und kritischem Wert zeigt, dass bei *Kiesel* [211] der Grenzwert in der GK II und GK III für die Prüfung der Eignung der Lognormalverteilung nur leicht überschritten ist. Bei *Linke & Mühlisch* [198] ist dies bei Betrachtung der Fichtenproben für die Klasse C 24 ebenfalls der Fall. In den Untersuchungen ist die Tendenz zur Normal- und Weibullverteilung zu erkennen.

### **Statistische Anpassungstests für Versuchsdaten aus der Literatur bei apparativ unterstützte Sortierung mit in situ anwendbaren technischen Hilfsmitteln**

Durch Zuhilfenahme technischer Hilfsmittel kann die Subjektivität der Festigkeitssortierung in Vergleich zur visuellen Sortierung reduziert werden. Zudem kann durch die Ermittlung von Materialparametern die Korrelation zu den Festigkeitseigenschaften verbessert werden. Deshalb wurden statistische Anpassungstests unter Zuhilfenahme der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung sortierten Proben von *Steiger* [163] und *Linke & Mühlisch* [197, 198, 206] durchgeführt. Die Ergebnisse werden tabellarisch in Anhang 10.7.2 (S. 41 ff.) aufbereitet.

Die Untersuchungen von *Steiger* [163] wurden für übliches Bauholz in verschiedenen Abmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Anpassungstests tendieren eindeutig zur Eignung der Lognormalverteilung zur Modellierung der Biege-, Zug- und Druckfestigkeit von Bauholz. Für die Druckfestigkeit wird auch die Normalverteilung nicht abgelehnt. Die Weibullverteilung wird für den weit überwiegenden Teil der Festigkeitsklassen und Festigkeitskenngrößen abgelehnt.

Die Untersuchungen von *Linke & Mühlisch* [197, 198, 206] basieren auf 303 Fichtenproben, 300 Kiefernproben und 301 Eichenproben. Für eine ausführliche Darstellung der Versuchsdurchführung siehe [152]. Die Ergebnisse der statistischen Anpassungstests lehnen überwiegend eine Normal- oder



Weibullverteilung nicht ab. Die Lognormalverteilung wird für den überwiegenden Teil der Festigkeitsklassen und Festigkeitskennwerte abgelehnt. Bei Anwendung der indirekten Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zur Festigkeitssortierung für die Festigkeitsklassen C18 und C24 wird sie nicht abgelehnt.

### Zwischenfazit

Die Versuchsergebnisse ließen auf die Eignung von Normal-, Lognormal- oder Weibullverteilung schließen, ein einheitliches Bild ist nicht gegeben. Die Auswertung der Versuche von *Steiger* [163] ergab, dass eine logarithmische Normalverteilung die Festigkeitseigenschaften des Bauholzes bei Sortierung mit Ultraschall-Laufzeitmessung am besten repräsentiert. Die Untersuchungen von *Linke & Mühlisch* dagegen lassen eher auf die Eignung einer Normal- bzw. Weibullverteilung schließen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung als alleiniges Sortierkriterium eine mittlere Korrelation zwischen Referenz- und Zielgröße bei den untersuchten Fichtenholzproben vorliegt ( $\rho = 0,42$  bzw.  $\rho = 0,44$ ). Dadurch entsteht zwangsläufig ein Fehler bei der Einordnung in die Sortierklassen. Dem *Zentralen Grenzwertsatz der Statistik von Lindeberg und Lévy* folgend strebt die Verteilung der Summe von  $n$  statistisch unabhängig Zufallsvariablen bei großen Stichprobenzahl  $n$  approximativ gegen die Normalverteilung, siehe beispielsweise *Plate* [62], was das gezeigte Ergebnis begründet. Dieser entstehende Fehler ist nicht mit dem Messfehler der Referenzvariable zu verwechseln, welcher die Zielvariable nicht direkt beeinflusst, siehe dazu auch die Ausführungen zum stochastischen Model der Sortierung von *Pöhlmann & Rackwitz* [212]. Für den hier betrachteten Fall lässt sich der Sachverhalt durch Überlagerung einer simulierten, logarithmisch normalverteilten Zufallsgröße  $x$  mit einem normalverteilten Messfehler  $\tau$  mit  $N \sim (0, \sigma_\tau^2)$  zeigen. Einige Vergleichsrechnungen zeigten, dass schon bei  $\sigma_x = \sigma_\tau$  die ursprünglich simulierte logarithmische Normalverteilung zur Normalverteilung wird (Abb. 5.9).

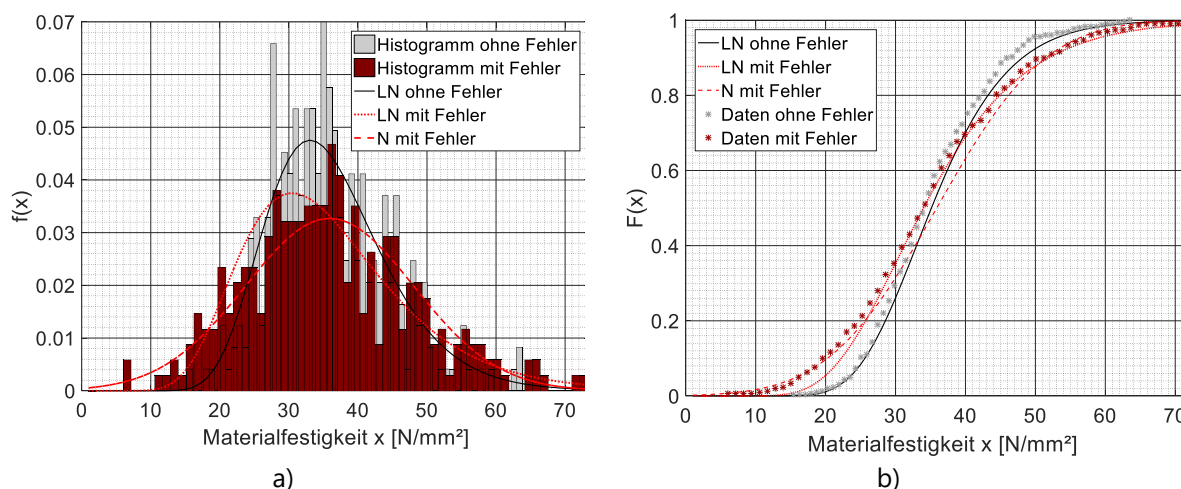


Abb. 5.9: Einfluss eines Fehlers auf Versuchsdaten, simuliert mit  $x_k = 24 \text{ N/mm}^2$ ,  $V_x = 0,25$  (LN),  $m_\tau = 0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_\tau = \sigma_x$  (N), Verteilungsdichtefunktion mit Histogramm (a) und kumulative Verteilungsfunktion (b)

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem mit Ultraschallimpulslaufzeitmessung bestimmten E-Modul und der Biegefestigkeit ist bei Eichenholzproben in Linke & Mühlisch [206] für einen Einzelsortierparameter sehr gut. Warum dennoch hier die Eignung einer logarithmischen Normalverteilung zur Repräsentation der Biegefestigkeit bei diesen Daten abgelehnt werden muss, kann hier nicht abschließend bewertet werden. In der Literatur liegen vergleichsweise wenig Untersuchungen zum Laubholz vor, sodass die Vergleichbarkeit schwerfällt.

### Festlegung für diese Arbeit

Auch für die Überprüfung bestehender Konstruktionen gilt *DIN EN 338* und die darin angegebenen charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte. *DIN EN 338:2016-07* [110] verweist für die Festigkeitssortierung auf *DIN EN 14081-1* (aktuelle Fassung: 2011-05 [213]) und für die Bestimmung charakteristischer Werte auf die *DIN EN 384*. In *DIN EN 384:2019-02* [160] wird auf *DIN EN 14358* zur Berechnung des 5%-Quantil für charakteristische Werte verwiesen [160]. *DIN EN 14358:2016-11* [214] legt fest, dass für Festigkeitseigenschaften eine logarithmische Normalverteilung anzunehmen ist, es sei denn es stellt sich heraus, dass eine Normalverteilung angemessener ist.

Der *Probabilistic Model Code* [61] strebt eine Vereinheitlichung der Wahl der Verteilungsfunktion für Festigkeitswerte baustoffübergreifend an und schlägt eine logarithmische Normalverteilung zur Modellierung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auch von Bauholz vor. Dies wurde gewählt, da für die Mehrheit der Baustoffe die Lognormalverteilung die passendste Funktion ist. Dies dient dem Ziel der Vereinfachung und der besseren Zugänglichkeit probabilistischer Methoden für die Ingenieure. So verwendet auch das *fib Bulletin 80 „Partial factor methods for existing concrete structures“* [42] die logarithmische Normalverteilung zur Modellierung von Festigkeitseigenschaften des Betons. Im *JRC Science and Policy Report (2015)* [27] wird angegeben, dass zur Berechnung der Quantilwerten aus Versuchen in der Regel die logarithmische Normalverteilung akzeptiert werden kann. Die folgenden Abbildungen zeigen Weibullverteilung und Lognormalverteilung bei gleichem charakteristischem Wert der Festigkeit (Beispiel Biegefestigkeit  $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ ) für ausgewählte Variationskoeffizienten.

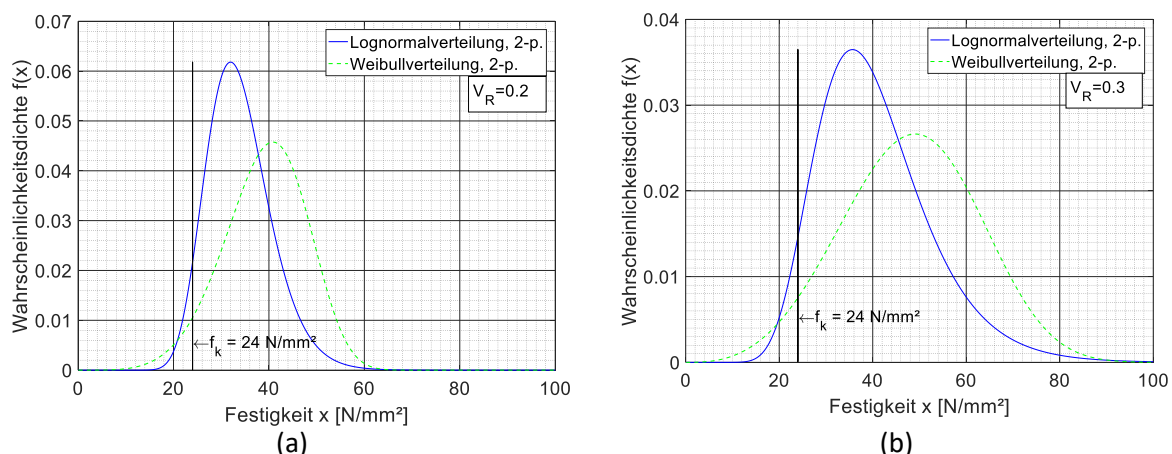


Abb. 5.10: Lognormalverteilung und Weibullverteilung bei identischem charakteristischem Wert (5%-Quantil) für  $V_R = 0,2$  (a) und  $V_R = 0,3$  (b)

Deutlich zu sehen ist, dass mit zunehmendem Variationskoeffizienten der Erwartungswert der Weibullverteilung deutlich nach rechts verschoben wird. Jedoch ist auch die Streuung im Vergleich zur Lognormalverteilung größer (bedingt durch den linearen Zusammenhang zwischen Erwartungswert und Streuung bei fixem Variationskoeffizienten). Zudem fällt auf, dass die Schiefe der Weibullverteilung bei kleinen Variationskoeffizienten und festem charakteristischem Wert negativ ist, bei  $V_R = 0,30$  etwa null und bei größeren Variationskoeffizienten positiv.

Die Wahl der Verteilungsfunktion hat signifikanten Einfluss auf die errechnete Zuverlässigkeit im Rahmen probabilistischer Analysen. *Sørensen 2001* [201] stellt fest, dass bei Verwendung der 2-p. Weibullverteilung zwar geringere Variationskoeffizienten angewendet werden können, das Zuverlässigkeitsniveau jedoch deutlich geringer als bei Verwendung der logarithmischen Normalverteilung ist, wenn die gleichen charakteristische Werte zugrunde gelegt werden. Dies konnte durch eigene Vergleichsrechnungen bestätigt werden. Die deutlich geringeren Zuverlässigkeiten bei Anwendung der Weibullverteilung stellen die Eignung dieser bei zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen in Frage.

Die logarithmische Normalverteilung ist vorteilhaft bei Berechnung von charakteristischen Werten aus Stichproben mit großen Streuungen und relativ geringen Erwartungswerten, da negative Werte hier ausgeschlossen werden, siehe auch *Fischer* [215] und *Schäper* [216]. Dies ist sinnvoll, da Festigkeiten bestehender Konstruktionen mit teilweise langen Standzeiten kaum negativ sein können.

Schlussfolgernd wird für diese Arbeit die logarithmische Normalverteilung für die Modellierung der Festigkeitseigenschaften von Schnittholz verwendet.

### 5.3.4 2a) Anpassung des Widerstandsmodells unteren Wertebereich

Zur Modellierung von Festigkeitseigenschaften in probabilistischen Analysen ist es von Bedeutung, dass die Funktion der Wahrscheinlichkeitsverteilung insbesondere im unteren Datenbereich gut den zugrundeliegenden Daten entspricht. Die Sortierung hat einen deutlichen Einfluss auf das statistische Modell. Deshalb wird untersucht, ob mittels tail-fit Methoden zur Anpassung im unteren Wertebereich ein robusteres Widerstandsmodell entwickelt werden kann. Dazu werden die *gewichtete Methode der kleinsten Fehlerquadrate (weighted least squares method)* nach *Maes & Breitung* [116] (siehe Anhang Kap. 10.5.4) und die *zensierte Maximum-Likelihood-Methode* wie beschrieben in *Faber, Köhler & Sørensen* [134] (siehe Anhang Kap. 10.5.2 und 10.5.3) für den Datensatz *Fichte, Festigkeitsklasse C30 bei Sortierung mittels indirekter US Messung* aus *Linke & Mühlisch* [198] angewendet.

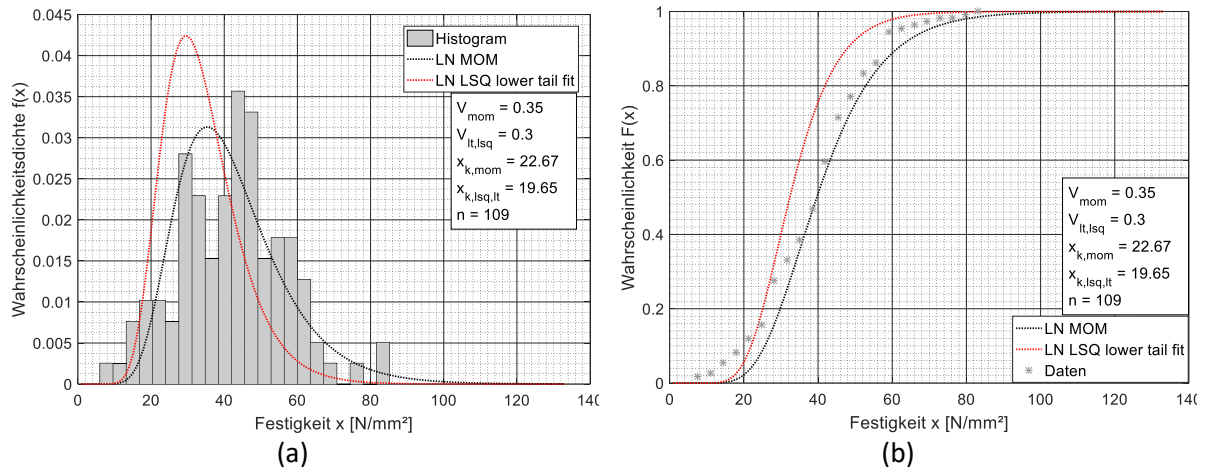


Abb. 5.11: Anpassung im unteren Wertebereich der Lognormalverteilung mittels gewichteter Methode der kleinsten Fehlerquadrate für den Datensatz *Fichte, Festigkeitsklasse C30, Sortierung mit indirekter US Messung aus Linke & Mühlisch [198]* (a) Verteilungsdichtefunktion, (b) Verteilungsfunktion) (Biegefestigkeit)

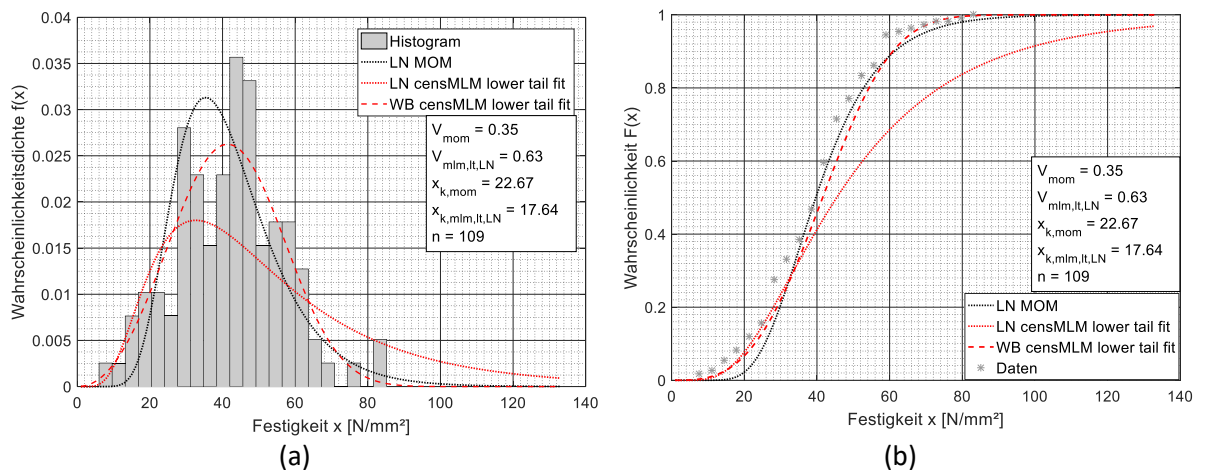


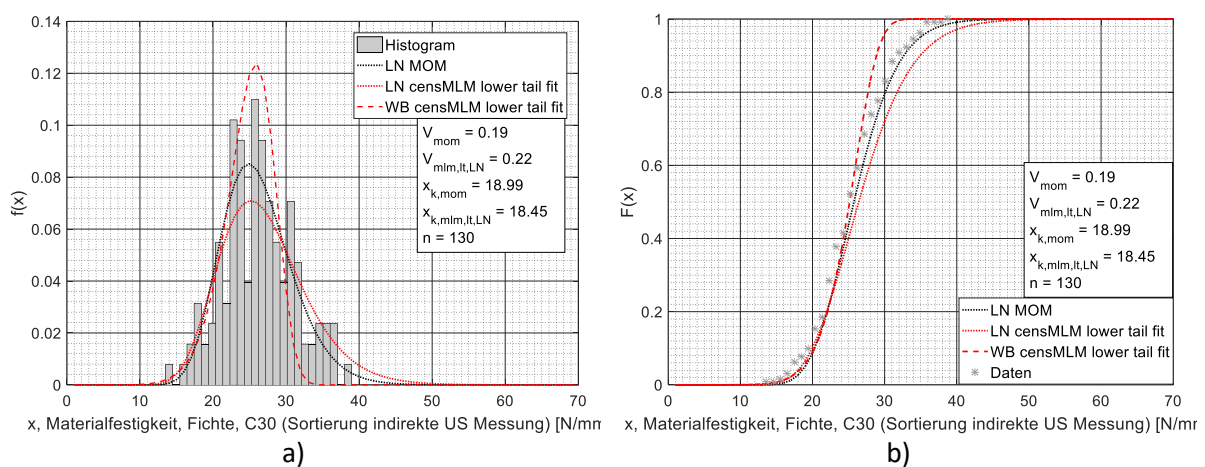
Abb. 5.12: Anpassung im unteren Wertebereich der Lognormalverteilung und der Weibullverteilung mittels zensierter Maximum-Likelihood-Methode, vergleichend Lognormalverteilung aus Berechnung der Momente aus der Stichprobe ohne Gewichtung („LN MOM“) Datensatz: *Fichte, Festigkeitsklasse C30, Sortierung mit indirekter US Messung aus Linke & Mühlisch [198]* (a) Verteilungsdichtefunktion, (b) Verteilungsfunktion) (Biegefestigkeit)

Abb. 5.11 links lässt eine gute Anpassung der logarithmischen Normalverteilung im unteren Wertebereich erkennen. Bei Betrachtung der kumulativen Funktion wird jedoch deutlich, dass mit der Methode der gewichteten Fehlerquadrate zwar eine Gestaltsänderung der Funktion erfolgt, diese jedoch nicht gut mit dem Datensatz übereinstimmt. Abb. 5.12 zeigt, dass mit der zensierten Maximum-Likelihood-Methode (Grenzwert beim unteren 30%-Quantilwert der Daten gewählt) eine gute Anpassung im unteren Wertebereich erfolgt. Es zeigt sich hier jedoch eindeutig, dass, wie auch durch den statistischen Anpassungstest schon überprüft, die Datenmenge nicht gut durch eine Logarithmische Normalverteilung repräsentiert werden kann. Die Anpassung führt zu einer zu starken Änderung der Verteilungsparameter, was in einer Zuverlässigkeitsanalyse zu sehr ungünstigen Ergebnissen führen würde. Dies ist möglicherweise auf die bereits beschriebene Fehlerüberlagerung aufgrund der mittleren MOM Korrelation zwischen Referenz- und Zielgröße bei dieser Untersuchung zurückzuführen. Vergleichend ist die Anpassung für die Weibullverteilung dargestellt, welche sich diesem Datensatz besser anpassen lässt.

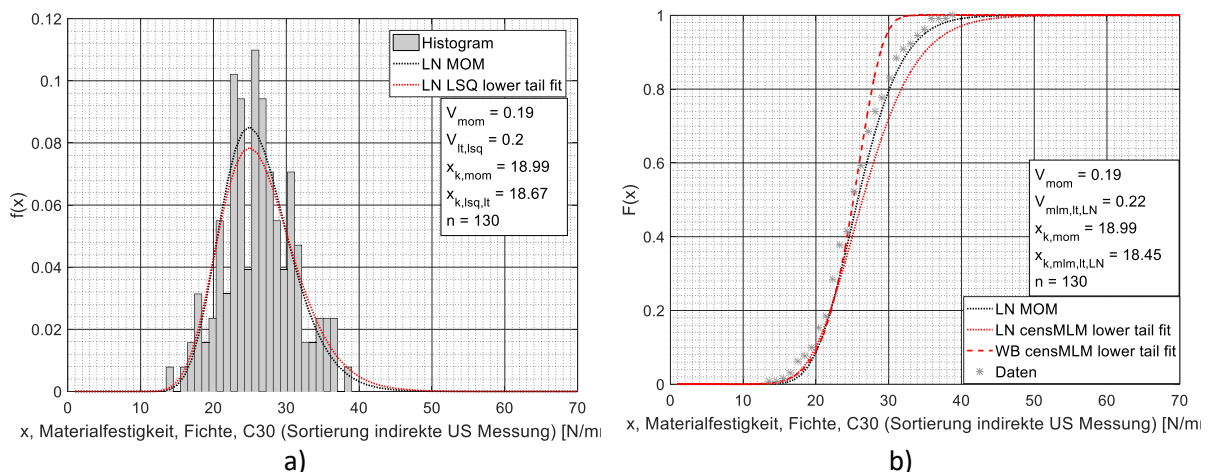
## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Eine Verbesserung der Anpassung im unteren Wertebereich ist somit von der insgesamten Eignung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für den betrachteten Datensatz abhängig und kann im Zuge der Normungsentwicklung nicht pauschalisiert werden. Die Anpassung wird vergleichend für einen Datensatz, welcher nach Anderson-Darling Test mittels Logarithmischer Normalverteilung repräsentiert werden kann, angewendet. Dafür wird der Datensatz *Steiger, Druckversuche, unsortiert* aus [163] gewählt, siehe Abb. 5.13 und Abb. 5.14.

Es zeigt sich, dass mittels der zensierten Maximum-Likelihood-Methode die Anpassung besser auf den unteren Wertebereich fokussiert werden kann. Jedoch geht dies deutlicher zu Lasten der Anpassung im oberen Datenbereich, als dies bei der gewichteten Methode der kleinsten Fehlerquadrate der Fall ist, was sich unter anderem in einer Erhöhung des Variationskoeffizienten der Festigkeit niederschlägt.



**Abb. 5.13: Anpassung im unteren Wertebereich der Logarithmischen Normalverteilung mittels gewichteter Methode der kleinsten Fehlerquadrate, vergleichend Lognormalverteilung aus Berechnung der Momente aus der Stichprobe ohne Gewichtung („LN MOM“), Datensatz: *Druckfestigkeit, unsortiert* aus Steiger [163] (a) Verteilungsdichtefunktion, b) Verteilungsfunktion)**



**Abb. 5.14: Anpassung im unteren Wertebereich der Logarithmischen Normalverteilung und der Weibullverteilung mittels zensierter Maximum-Likelihood-Methode, vergleichend Lognormalverteilung aus Berechnung der Momente aus der Stichprobe ohne Gewichtung („LN MOM“), Datensatz *Druckfestigkeit, unsortiert* aus Steiger [163] (a) Verteilungsdichtefunktion, b) Verteilungsfunktion)**

## **Zwischenfazit**

Für die Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung an einen gewählten Datenbereich muss die Stichprobe einen großen Umfang aufweisen. So werden für die zensierte Maximum-Likelihood-Methode nach *Faber, Köhler & Sørensen* [134] die unteren 30% verwendet. Für die Methode der gewichteten Fehlerquadrate erfolgt die Anpassung an die Werte, welche sich aus den relativen Häufigkeiten der gebildeten Intervalle im Histogramm ergeben. Die Anzahl dieser ist direkt abhängig vom Umfang der verfügbaren Daten. Soll die Anpassung dann für in eine Festigkeitsklasse sortiertes Bauholz erfolgen, reduzieren sich für die Anpassung explizit zur Verfügung stehenden Daten schnell sehr stark. Bei der Planung von Versuchsdurchführung für Kalibrierungsarbeiten ist dies zu beachten.

Es zeigte sich, dass die mit den fitting-Methoden erzielten Anpassungen des Widerstandsmodells mit den vorliegenden Datensätzen aktuell noch nicht zur Verallgemeinerung zwischen verschiedenen Sortiermethoden und damit Nutzung zur Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte angewendet werden können, da die Ergebnisse der Sortierung bei unterschiedlichen Stichproben noch zu starken Unterschieden führen. Bei Weiterentwicklung und Verbesserung der Sortierung kann, insbesondere die zensierte Maximum-Likelihood-Methode, zu einer besseren Anpassung im unteren Wertebereich genutzt werden. Ein somit robusteres Widerstandsmodell reduziert Unsicherheiten in der Modellbildung und kann ggf. durch eine Reduktion der Modellunsicherheiten genutzt werden.

### **5.3.5 2b) Widerstandsmodell mit einem stochastischen Modell der Sortierung – Parametervergleich**

*Pöhlmann & Rackwitz* [212] stellten ein stochastisches Modell auf, mit welchem unter Anwendung eines Sortierparameters mit festgelegten Klassengrenzen eine Festigkeitssortierung erfolgen kann (siehe Anhang 10.5.7, S. 26). Das Modell wurde auf Versuchsdaten von *Linke & Mühlisch* [197, 198, 206] angewendet, für eine detaillierte Versuchsbeschreibung siehe [152]. Die Versuche umfassen Kalibrierungstests und werden in *Linke, Rug & Pasternak* [152] ausgewertet und hier für die Untersuchung herangezogen, siehe auch [217].

Die Genauigkeit der Messinstrumente wurde auf Grundlage von *DIN 4074-3:2008-12* [218] überprüft. Basierend darauf wird für das stochastische Modell der Fehler normalverteilt mit  $\tau \sim N(0, 20^2)$  [m/s] für die Ultraschall-Laufzeit-Messungen und für die Rohdichtemessungen mit  $\tau \sim N(0, (10^{-9})^2)$  [kg/m<sup>3</sup>] angenommen, wobei letzterer aus einem Anteil für die Wichtebestimmung und einem Anteil für die Maßabweichung besteht. Die Grenzwerte für die Sortierung werden anhand von [152] festgelegt.

Tab. 5.21 zeigt, dass die Korrelationskoeffizienten für die Holzarten sehr unterschiedlich sind. Bei den Eichenproben ergaben die Ultraschallmessungen eine sehr gute Korrelation mit der Biegefestigkeit, dagegen war keine Korrelation zwischen Rohdichte und Biegefestigkeit nachweisbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Korrelation der Prüfmethode mit der Biegefestigkeit ist bei der Fichte

5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

gut, wobei für die Rohdichtebestimmung ein höherer Wert erwartet wurde. Die Kiefernproben zeigten eine nicht zufriedenstellende Korrelation zwischen Ultraschallmessung und Biegefestigkeit, dagegen jedoch die größte Korrelation der Rohdichte mit der Biegefestigkeit. Jedoch wurden bei der Kiefer mittels kombinierter visueller Sortierung und Rohdichtemessung fast alle Proben in die Festigkeitsklasse C40 klassifiziert, was den Schluss nahelegt, dass die visuelle Sortierung die Tragfähigkeit unterschätzt. Es zeigte sich auch, dass die charakteristischen Wert in vielen Fällen unter den in *DIN EN 338:2016-07* [110] ausgewiesenen Werten liegen und die Variationskoeffizienten der Festigkeit in einigen Fällen noch zu hoch und höher als bei der visuellen Sortierung liegen.

Tab. 5.21: Verteilungsparameter der logarithmischen Normalverteilung bei unterschiedlichen Sortierverfahren – Stochastisches Modell der Sortierung, Untersuchung mit Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [197, 198, 206]

Holzart	Festigkeitsklasse	Direkte US Messung <sup>1</sup>			Indirekte US Messung <sup>1</sup>			Rohdichtemessung <sup>2</sup>		
		$\rho$	$V_R$	$f_k$	$\rho$	$V_R$	$f_k$	$\rho$	$V_R$	$f_k$
Eiche (n = 301)	D30	0,69	0,26	31,17	0,72	0,25	33,42	-	Korrelation nicht nachweisbar!	
	D35		0,24	35,57		0,23	38,41			
	D40		0,22	41,57		0,21	42,98			
	>D40		0,17	60,30		0,16	61,62			
Fichte (n = 303)	C18	0,42	0,42	11,26	0,44	0,41	11,39	0,30	0,42	17,76
	C24		0,36	17,27		0,36	17,05		0,39	19,78
	C30		0,32	22,03		0,32	21,65		0,38	21,12
	>C30		0,29	27,82		0,28	28,21		0,34	26,14
Kiefer (n = 300)	C18	0,23	Keine Proben!		0,27	Keine Proben!		0,54	Keine Proben!	
	C24		Korrelation zu gering!			Korrelation zu gering!				
	C30									
	>C30									
								0,36	28,41	

<sup>1</sup> Grenzwerte für die Sortierung: [152]

<sup>2</sup> Grenzwerte für die Sortierung: 5%-Quantilwerte aus *EN 338:2016-07*

Vergleichend werden Korrelationskoeffizienten aus anderen Untersuchungen dargestellt (Tab. 5.22).

Tab. 5.22: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Festigkeitseigenschaft und Schallgeschwindigkeit

	Festigkeit	Holzart	Sandoz [219]	Kessel & Sandoz [164]	Kessel et al. [220]	Kessel et al. [145]		Steiger [167]	Glos, Diebold & Schleifer [193]	Linke & Mühlisch [197, 198, 206]	
						Z1	Z2			di- rekt	indi- rekt
NH	Bie- gung	Fichte	0,667- 0,675	0,61	0,67... 0,79	0,38- 0,71	0,55- 0,71	0,60	0,70	0,42	0,44
		Kiefer	-	-	-			-	0,69	0,23	0,27
		Lärche	-	-	-			-	0,45	-	-
		Douglasie	-	-	-			-	0,55	-	-
	Druck	Fichte	-	-	-			0,58	-	-	-
	Zug	Fichte	-	-	-			0,59	-	-	-
LH	Bie- gung	Eiche	-	-	-			-	0,54	0,69	0,72
		Buche	-	-	-			-	0,42	-	-
	Zug	Buche	-	-	-			-	0,57	-	-

Z1 - nicht konditioniert; Z2 - konditioniert

Die Korrelation kann durch Einbeziehung mehrerer Sortierparameter deutlich verbessert werden. *Sandoz & Benoit* [221] fanden eine Verbesserung des Korrelationskoeffizienten zwischen Sortierparameter und Biegefestigkeit für Kiefer von  $\rho = 0,51$  auf  $\rho = 0,64$ , wenn zusätzlich zur Bewertung mit Ultraschall noch die Rohdichte hinzugezogen wird<sup>4</sup>. *Kessel et al.* [220] fanden eine Verbesserung auf  $\rho = 0,75...0,83$  bei Berücksichtigung von Schallgeschwindigkeit und Rohdichte. Auch die Ergebnisse von *Kessel et al.* [145] und *Hanhijärvi, Ranta-Maunus & Turk* [222] zeigen die deutliche Erhöhung des Korrelationskoeffizienten zur Festigkeit bei Berücksichtigung mehrerer Sortierparameter<sup>5</sup>. Bei hohen Korrelationskoeffizienten könnte unter Annahme der Parameter der Regressionsgeraden eine theoretische Sortierung zur Bestimmung der Verteilungseigenschaften der Zielgröße in verschiedenen Festigkeitsklassen vorgenommen werden. Zur verlässlichen Bestimmung der Korrelationskoeffizienten und der Parameter der Regressionsgeraden abhängig von der Holzart und der Festigkeitseigenschaft sind jedoch weitere Versuche nötig und kann an dieser Stelle nicht abschließend bewertet werden. Analysen mit simulierten Datensätzen zeigten jedoch, dass eine hohe Korrelation ( $\rho = 0,8...0,9$ ) nötig ist, um eine signifikante Reduktion des Variationskoeffizienten der Zielgröße in den Klassen zu erzielen.

Die Festigkeitssortierung soll sicherstellen, dass die charakteristischen Werte den Angaben der *EN 338* entsprechen. Die Bestimmung charakteristischer Werte von sortiertem Bauholz für tragende Zwecke wird in *DIN EN 384* [160] unter Einbeziehung von *DIN EN 14081-1* [213] festgelegt. Nach *DIN 14358:2016-11* berechnet sich das 5%-Quantil bei Lognormalverteilung zu

$$x_{k,0.05,LN} = \exp(m_{u,x} - k_s(n)s_{u,x}) \quad (5.3)$$

mit  $m_{u,x}$  und  $s_{u,x}$  den aus der Stichprobe bestimmten Parametern der logarithmischen Normalverteilung. Der charakteristische Wert mit Korrekturfaktor ist für die Normalverteilung

$$x_{k,0.05,N} = m_x - k_s(n)s_x \quad (5.4)$$

mit  $m_x$  und  $s_x$  den aus der Stichprobe bestimmten Parametern der Normalverteilung. Der Wert für  $k_s(n)$  darf vereinfacht angenommen werden zu

$$k_n(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \quad (5.5)$$

Aus dem so ermittelte Quantil ist dann mittels *DIN EN 384* [160] in Abhängigkeit von der Sortiermethode der charakteristische Wert zu bestimmen. Dieser ist bei maschineller Sortierung

$$x_k = x_{k,0.05}k_v \quad (5.6)$$

mit  $k_v = 1,0$  bei  $f_k > 30 \text{ N/mm}^2$ , sonst  $k_v = 1,12$ .

Des Weiteren wird der Variationskoeffizient mit dem Stichprobenanzahlabhängigen Biaskorrekturfaktor angepasst, zu finden beispielsweise in *Plate* [62]

$$V_x = \sqrt{\frac{n}{(n-1)} \cdot \frac{\sigma_x}{\mu_x}} \quad (5.7)$$

<sup>4</sup> Das in [221] beschriebene Gerät ist nicht für die mobile Anwendung optimiert und nicht im Bestand anwendbar

<sup>5</sup> Die Autoren von [222] betonen, dass es sich nicht um eine repräsentative Stichprobe handelt.



5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Tab. 5.23 vergleicht Variationskoeffizient und charakteristischen Wert (5%-Quantil) für Eichenproben aus [206] und für Fichtenproben aus [198] bei Sortierung mittels direkter und indirekter Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bei Auswertung mit der Momentenmethode (siehe Anhang Kap. 10.5.1) und dem stochastischen Modell der Sortierung. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Anhang 10.7 (S. 39 ff.). Die Auswertung impliziert keine Bewertung der zugrunde gelegten Sortierung, sondern dient dem Vergleich der Ergebnisse aus der Anwendung der angewendeten Methoden.

Tab. 5.23: Parametervergleich bei Anwendung der Momentenmethode und dem Stochastischen Modell der Sortierung

Holzart	Festigkeitsklasse	Direkte US Messung						
		Momentenmethode				Stochastisches Modell der Sortierung		
		n	$f_k - LN$	$f_k - N$	$V_x$	$f_k - LN$	$f_k - N$	$V_x$
Eiche ( $\rho = 0,69$ )	D40	45	40,14	36,52	0,26	44,54	41,57	0,22
	D35	41	38,02	34,95	0,25	38,84	35,57	0,24
	D30	21	31,11	28,39	0,29	34,69	31,17	0,26
Fichte ( $\rho = 0,42$ )	C30	88	25,20	21,28	0,31	26,44	22,03	0,32
	C24	65	19,75	15,19	0,37	22,20	17,27	0,36
	C18	38	20,51	15,50	0,38	17,02	11,26	0,42
		Indirekte US Messung						
Eiche ( $\rho = 0,72$ )	D40	20	38,64	35,63	0,25	45,68	42,98	0,21
	D35	42	35,51	32,18	0,26	41,28	38,41	0,23
	D30	47	33,68	31,26	0,24	36,59	33,42	0,25
Fichte ( $\rho = 0,44$ )	C30	84	26,18	22,74	0,29	26,04	21,65	0,32
	C24	51	18,07	11,81	0,42	21,91	17,05	0,36
	C18	46	19,93	14,92	0,38	17,07	11,39	0,41

Die Ergebnisse aus Berechnung mit der Momentenmethode und dem stochastischen Modell der Sortierung unterscheiden sich etwas. Es zeigt sich, dass bei Untersuchung der Eichenproben der Variationskoeffizient der Festigkeit in den Klassen geringer ist, als bei der Momentenmethode. Dies ist auf den hohen Korrelationskoeffizienten zurückzuführen, der mit  $\rho = 0,69$  bzw.  $\rho = 0,72$  für einen einzelnen Sortierparameter als sehr gut zu bewerten ist. Bei geringeren Korrelationskoeffizienten, wie es bei den Fichtenproben der Fall ist ( $\rho = 0,42$  bzw.  $\rho = 0,44$ ) steigen die Variationskoeffizienten an. Zudem zeigt sich, dass bei hohen Korrelationskoeffizienten zwischen Mess- und Zielgröße der Variationskoeffizient der Festigkeit (hier Biegefestigkeit) deutlich reduziert wird.

Insbesondere bei großen Probenzahl in der Klasse zeigt sich eine gute Übereinstimmung der charakteristischen Werte bei Anwendung beider Methoden. Bei besonders großen Variationskoeffizienten weichen die Ergebnisse stärker voneinander ab. Bei der Momentenmethode erfolgt zudem eine explizite Berücksichtigung von Ausreißern bei Berechnung der Momente. Im stochastischen Modell der Sortierung haben die einzelnen Prüfkörperergebnisse durch die Berechnung der Momente der gesamten Stichprobe, den Korrelationskoeffizienten, die Klassengrenzen und die Parameter der Regressionsgleichung Einfluss auf die Verteilungsfunktion in den Klassen. Die direkte Berücksichtigung von Ausreißern bei der Momentenmethode führt so bei den Fichtenproben in der Klasse C24 (indirekte US Messung) zu einem erhöhten Variationskoeffizienten der Zielgröße Festigkeit im Vergleich zu darunterliegenden

Klasse. Diese Ausreißer nach unten und oben sind in Abb. 5.15 gut zu erkennen. Es ist ersichtlich, dass die Streuung der Daten in dieser Klasse vergleichsweise groß ist.

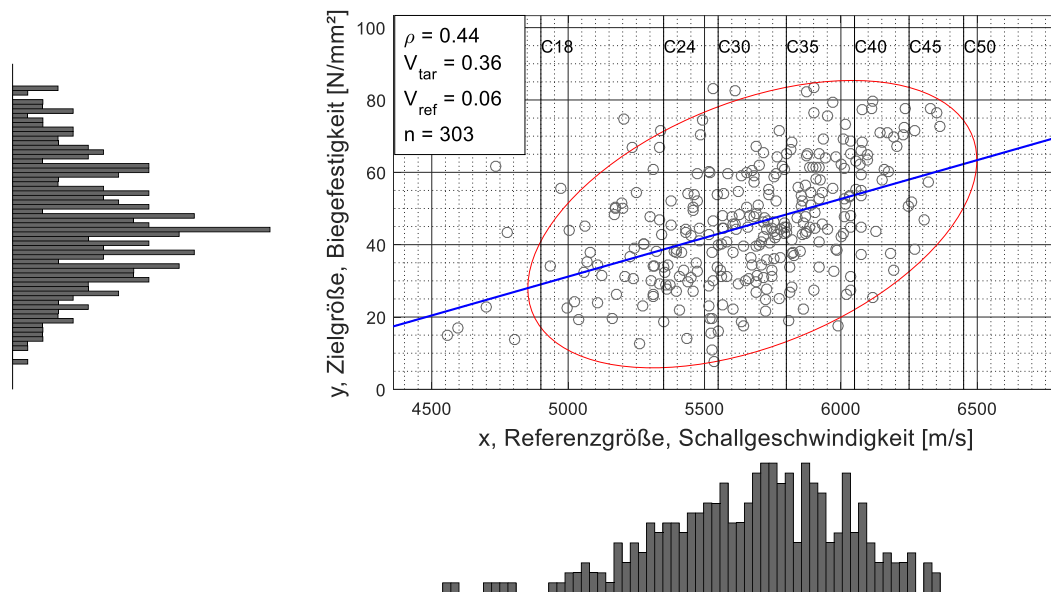


Abb. 5.15: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung, Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])

Das Stochastische Modell der Sortierung bietet den Vorteil der Ermittlung von Parametern zur Charakterisierung von Materialeigenschaften des sortierten Bauholzes ohne Vorliegen der kompletten Stichprobe. Auf Basis von Kalibrierungstests mit zerstörender Prüfung können Materialmodelle für verschiedene Sortierverfahren entwickelt werden. Folgende Parameter werden dazu benötigt

1. Korrelationskoeffizient  $\rho$  zwischen Referenz- und Zielvariable
2. Mittelwert  $\mu_x$  und Standardabweichung  $\sigma_x$  des Sortierparameters  $X$   
(bei multipler Korrelation aus den Einzelparametern berechneter Sortierparameter)
3. Mittelwert  $\mu_y$  und Standardabweichung  $\sigma_y$  der Zielgröße  $Y$  ermittelt in zerstörender Prüfung
4. Parameter  $a$  und  $b$  der linearen Regressionsgeraden

### 5.3.6 3a) Aktualisierung des Widerstandsmodells auf Basis von Versuchsdaten

#### Bestimmung von Bemessungswerten aus Versuchen

Charakteristische Werte mit einer geringen Auftretenswahrscheinlichkeit sollten, insbesondere bei Zufallsgrößen mit großer Variabilität, nicht direkt aus Versuchsergebnissen geschätzt werden, siehe Holický & Vorlíček [223]. DIN EN 14358:2016-11 [214] beinhaltet Korrekturfaktoren zur Berechnung charakteristischer Werte bei begrenzter Stichprobenzahl. Es müssen Anpassungsfaktoren zur Berücksichtigung der Stichprobenzahl auf Basis des angestrebten Vertrauensniveaus angewendet werden. Angaben dazu sind auch in DIN EN 1990:2010-12 Anhang D [16] für bekannte und unbekannte Stichprobennzahlen enthalten. Eine Zusammenfassung weiterer Methoden findet sich in Holický & Vorlíček [223].

### Bestimmung der erforderlichen Stichprobenanzahl anhand des geforderten Vertrauensniveaus

Fischer [215] beschreibt die Abschätzung eines erforderlichen Stichprobenumfangs  $n_{erf}$  abhängig vom Vertrauensniveau  $P = 1 - \alpha$  und der Genauigkeit der Schätzung. Nach DIN EN 14358 [214] sind charakteristische Werte aus Prüfergebnissen mit einem Vertrauensniveau von  $\alpha = 1 - P = 0,75$  zu bestimmen. Für eine einseitig nach unten begrenzte Normalverteilung und ein Vertrauensniveau von  $P = 1 - \alpha = 0,90$  leitet Fischer bei mittlerer Genauigkeit der Schätzung einen erforderlichen Stichprobenumfang von  $n \geq n_{erf} = 20$  ab. Für eine verteilungsfreie Schätzung ergibt sich für das 5%-Quantil nach den Berechnungen bei einem Vertrauensniveau von  $P = 1 - \alpha = 0,90$  ein Stichprobenumfang von  $n_{erf} = 45$ , bei einem Vertrauensniveau von  $P = 1 - \alpha = 0,75$  ein Stichprobenumfang von  $n_{erf} = 28$  [215].

### Auswirkung der Stichprobenanzahl auf charakteristischen Wert & Bemessungswert

Für Festigkeitseigenschaften mit  $V_R > 0,20$  empfiehlt sich nach Schäper [216] die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung. Svensson [224] empfiehlt bei Vorliegen von weniger als  $n = 100$  Tests die Anwendung der Student'schen t-Verteilung zur Berechnung charakteristischer Werte. Dabei ist

$$R_k = m \cdot \exp\left(t_{0,05,f} \cdot V' \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}\right) \quad (5.8)$$

und

$$R_d = m \cdot \exp\left(t_{(\Phi(\alpha \cdot \beta),f)} \cdot V' \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}\right) \quad (5.9)$$

mit  $m$  dem Mittelwert aus der Stichprobe,  $n$  der Stichprobenzahl und  $V' = \sqrt{\ln(V^2 + 1)}$  bei  $V \leq 0,25$  sonst  $V' = V$ . Der Freiheitsgrad  $f$  der t-Verteilung ergibt sich aus  $f = n - 1$ . Wie auch in [224] dargestellt ergibt sich die Entwicklung des Verhältnisses aus charakteristischem Wert und Mittelwert bzw. Bemessungswert und Mittelwert nach Abb. 5.16. Exemplarisch wurden  $\alpha = -0,8$  und  $\beta = 3,8$  gewählt.

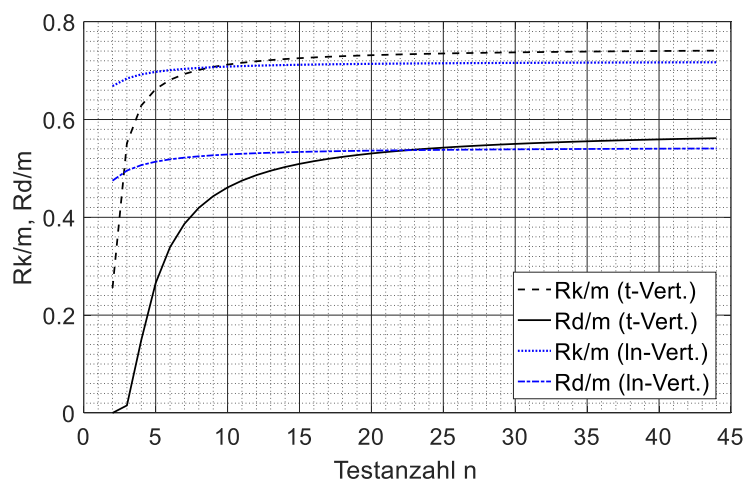


Abb. 5.16: Entwicklung des charakteristischen Wertes und des Bemessungswertes abhängig von der Stichprobenanzahl für die Student'sche t-Verteilung und die logarithmische Normalverteilung aus Svensson [224]

### Bayes'sches Updating – Parameterstudie zur Stichprobenzahl

Die Anwendung des Bayes'schen Updatings ermöglicht die Einbeziehung auch geringer Stichprobenzahlen in die Tragfähigkeitsbewertung (siehe Anhang Kap. 10.5.4, S. 22). Zu betonen ist die Bedeutung der Wahl des Priorimodells auf das Updatingergebnis. Zudem werden unrealistische Resultate durch die Einbeziehung der Vorinformationen vermieden [225]. Die Berücksichtigung der Vertrauenswürdigkeit der Information durch Zuweisung einer höheren Gewichtung bzw. geringeren Unsicherheit der verfügbaren Information ist möglich, siehe dazu auch Anhang Kap. 10.5.4.

Es wurde eine Parameterstudie mit simulierten Daten durchgeführt um festzustellen, ab welcher Stichprobenzahl sich die Streuung des Erwartungswertes reduzieren lässt und von welchen Parametern dies abhängt. Die Veröffentlichung von Teilergebnissen erfolgte in [226]. Die Analysen zum Einfluss des Stichprobenumfangs auf die Aktualisierung des Materialmodells wurden für die Vollholz-Festigkeitsklassen C24 und C30 durchgeführt. Zur Modellierung der Festigkeitseigenschaften von Holz wird zur Festlegung des Variationskoeffizienten der Festigkeit den Empfehlungen im *Probabilistic Model Codes (PMC)* [61] gefolgt. Diese gelten nach Angabe im *PMC* für Bauholz „mittlerer Qualität“. Für Bauholz höherer Qualität kann aufgrund des größeren Erwartungswertes bei gleichbleibender Streuung von einer Reduktion des Variationskoeffizienten ausgegangen werden, konkrete Zahlenwerte sind jedoch schwierig zu beziffern, da sie u.a. von der Sortiermethode, der Qualität der Sortierung und der Holzart abhängen, wie auch die Literaturstudie in Kap. 5.3.2 gezeigt hat (siehe auch [152] [217]). In Ermangelung statistisch abgesicherter Werte werden die Angaben aus dem *PMC* auch für die Festigkeitsklasse C30 angewendet. Charakteristische Werte werden der *EN 338* [110] entnommen. Mit diesen Ausgangswerten werden die entsprechenden Erwartungswerte ermittelt, siehe Tab. 5.24.

Tab. 5.24: Parameter für Festigkeitseigenschaften in verschiedenen Festigkeitsklassen nach aktuellen Regelwerken

Festigkeitsklasse	Parameter	Festigkeitseigenschaft		
		Biegefestigkeit	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit
<b>C24</b>	Variationskoeffizient $V$ aus <i>PMC Teil 3.5</i> [-]	0,25	0,20	0,30
	Charakt. Wert $f_k$ (5%-Quantil) aus <i>EN 338</i> [N/mm <sup>2</sup> ]	24,0	21,0	14,5
	Ermittelter Erwartungswert $\mu$ [N/mm <sup>2</sup> ]	36,2	29,2	23,8
<b>C30</b>	Variationskoeffizient $V$ aus <i>PMC Teil 3.5</i> [-]	0,25	0,20	0,30
	Charakt. Wert $f_k$ (5%-Quantil) aus <i>EN 338</i> [N/mm <sup>2</sup> ]	30,0	24,0	19,0
	Ermittelter Erwartungswert $\mu$ [N/mm <sup>2</sup> ]	45,3	33,6	31,1

Auf Basis der zusammengestellten Annahmen werden Stichproben unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung simuliert. Die Aktualisierung im Updating Verfahren wurde unter der Annahme durchgeführt, dass a priori Funktion und Vorhersagefunktion dem gleichen Verteilungstyp entsprechen. Dann kann das analytische Verfahren zur Kombination der Information wie beschrieben in

5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Köhler, Sørensen & Faber [131] zur Anwendung kommen. Insbesondere bei kleinen Stichprobenanzahlen wird das Ergebnis stark von Ausreißern der Daten beeinflusst. Um diesen Effekt zu reduzieren, werden 1000 Simulationen durchgeführt. Tab. 5.25 zeigt die Streuung des Erwartungswertes bei 1000 Simulationen der entsprechenden Stichprobenanzahlen für die betrachteten Festigkeitskennwerte.

Tab. 5.25: Streuung des Erwartungswertes bei 1.000 Simulationen [N/mm<sup>2</sup>], erweitert aus [226]

Anzahl simulierter Stichproben	Festigkeitseigenschaft											
	Biegefestigkeit				Druckfestigkeit				Zugfestigkeit			
	C24		C30		C24		C30		C24		C30	
	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]
3	1,90	5,2	2,49	5,5	1,50	5,1	1,83	5,4	1,31	5,5	1,70	5,5
5	1,94	5,4	2,61	5,8	1,55	5,3	1,89	5,6	1,44	6,1	1,80	5,8
8	2,03	5,6	2,61	5,8	1,42	4,9	1,75	5,2	1,43	6,0	2,04	6,6
10	1,99	5,5	2,41	5,3	1,36	4,7	1,63	4,9	1,39	5,8	1,84	5,9
20	1,65	4,6	2,10	4,6	1,12	3,8	1,26	3,8	1,34	5,6	1,74	5,6
30	1,45	4,0	1,98	4,4	0,98	3,4	1,11	3,3	1,21	5,1	1,56	5,0
40	1,43	3,8	1,72	3,8	0,95	3,2	1,00	3,0	1,07	4,5	1,55	5,0
50	1,21	3,3	1,58	3,5	0,79	2,7	0,93	2,8	1,05	4,4	1,42	4,6

Tab. 5.26: Streuung des Erwartungswertes bei 100.000 Simulationen [N/mm<sup>2</sup>], erweitert aus [226]

Anzahl simulierter Stichproben	Festigkeitseigenschaft											
	Biegefestigkeit				Druckfestigkeit				Zugfestigkeit			
	C24		C30		C24		C30		C24		C30	
	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/ mm <sup>2</sup> ]	[%]
3	1,90	5,2	2,37	5,2	1,53	5,3	1,76	5,3	1,26	5,3	1,66	5,3
5	2,01	5,6	2,52	5,6	1,54	5,3	1,76	5,3	1,40	5,9	1,83	5,9
8	2,01	5,5	2,52	5,6	1,47	5,0	1,67	5,0	1,45	6,1	1,90	6,1
10	1,96	5,4	2,45	5,4	1,40	4,8	1,61	4,8	1,45	6,1	1,89	6,1
20	1,72	4,8	2,14	4,7	1,16	4,0	1,32	4,0	1,34	5,6	1,75	5,6
30	1,53	4,2	1,91	4,2	1,00	3,4	1,14	3,4	1,21	5,1	1,60	5,1
40	1,38	3,8	1,71	3,8	0,89	3,0	1,01	3,0	1,12	4,7	1,46	4,7
50	1,26	3,5	1,59	3,5	0,81	2,8	0,93	2,8	1,04	4,4	1,36	4,4

Der größte Einfluss der Stichprobenanzahl zeigte sich auf die Biegefestigkeit. Dies ist auf den relativ großen Erwartungswert in Verbindung mit einem großen Variationskoeffizienten (= große Streuung) zurückzuführen. Der Erwartungswert der Zugfestigkeit ist im Vergleich der drei Kennwerte am geringsten, der Variationskoeffizient am größten, umgekehrt verhält es sich bei der Druckfestigkeit. Dies resultiert in ähnlichen Ausprägungen der Streuung des Erwartungswertes, wobei sich bei der Druckfestigkeit eine Erhöhung der Stichprobenanzahl schneller in einer Reduktion dieser Streuung auswirkt. Zur Bewertung der Ergebnisse stellt sich die Frage nach einer vertretbaren Größe der Streuung. Prozentual liegt die Streuung bezogen auf den Erwartungswert bei 3...5%. Bezogen auf den charakteristischen Wert zeigten sich vergleichbare, durchgehend leicht günstigere Ergebnisse. Wird ein Grenzwert der akzeptablen Streuung bei ca. 5% festgelegt, ergibt sich, dass für die Druckfestigkeit eine Erhöhung auf  $n = 10$  Stichproben eine geringfügige Reduktion der Streuung des Erwartungswertes mit sich bringt, für die Zug- und die Biegefestigkeit kann davon erst ab  $n = 20$  ausgegangen werden. Diese Zahlen liegen

deutlich über denen, die im Bestandsbau in aller Regel aufgrund von Vermeidung von Schädigungen am Tragwerk, Zeitbeschränkungen und ökonomischen Restriktionen realisierbar sind. Für alle betrachteten Kennwerte lässt sich festhalten, dass eine geringfügige Erhöhung der Stichprobenanzahl, beispielsweise von drei auf fünf Stichproben, nicht mit einer signifikanten Reduktion der Streuung des ermittelten Erwartungswertes einherzugehen scheint. Erst deutliche Erhöhungen auf mindestens  $n = 20$  Stichproben bringen eine deutliche Verbesserung. Das Ergebnis ist abhängig von der untersuchten Festigkeitseigenschaft und den zugrunde gelegten statistischen Parametern.

### Zusammenfassung zur erforderlichen Stichprobenzahl

Nach *Marchand* [187] ergibt sich nach *ISO 3129*  $n_{erf} = 61$  Proben für die Bestimmung der Biegefestigkeit bei einem angenommenen Variationskoeffizienten von  $V_R = 0,20$ . *Sousa et al.* [185] bestimmen nach *ISO 13910* eine Mindestanzahl von  $n_{erf} = 40$  Prüfkörpern für die Bestimmung von charakteristischen Werten. Aus den Berechnungen von *Fischer* [215] zur nötigen Stichprobenzahl bei der Bestimmung charakteristischer Werte ergab sich  $n_{erf} \geq 20$ . Auch die Parameterstudie zur Reduktion der Streuung des Erwartungswertes bei Anwendung des Bayes'schem Updating ergab dieses Ergebnis.

Die Ergebnisse betonen die Bedeutung umfangreicher Stichprobenumfänge bei der Durchführung von Kalibrierungstests zur Entwicklung von apparativ unterstützten Methoden der Festigkeitssortierung. Bei der Tragfähigkeitsbewertung von Bauteilen in Bestandstragwerken sind Stichprobenumfänge in den genannten Umfängen aus ökonomischen (zerstörungsfreie Techniken) oder auch zusätzliche zu starke Schädigungen am Tragwerke (zerstörungsarme Techniken) kaum zu erzielen. Dennoch nutzen umfangreichere Untersuchungen am Tragwerk der Entdeckung von lokalen Fehlstellen, sowie der Beurteilung des Lastabtrags. Des Weiteren können Untersuchungen am Tragwerk durch Updating-Verfahren in die Standsicherheitsbewertung einbezogen werden.

## 5.4 Modellunsicherheiten auf der Widerstandsseite

Wie auch auf der Einwirkungsseite müssen auf der Widerstandsseite Modellunsicherheiten berücksichtigt werden. Dies erfolgt als multiplikatives Element angebinden an die jeweilige Basisvariable. *PMC Teil 3.5* [61] enthält folgende Werte für die Modellunsicherheit von Widerstandsvariablen:

Tab. 5.27: Variationskoeffizienten der Modellunsicherheit auf Widerstandsseite  $\theta_R$

Quelle	Jahr	Ref.	Lastdauer	Mittelwert	Variationskoeffizient $V_x$	Verteilung
JCSS	2006	[61]	Mit Effekt d. Lastdauer	1,00	0,10	LOGN
			Ohne Effekt d. Lastdauer	1,00	0,05-0,10	LOGN

Effekte der Dauer der Lasteinwirkung und von Feuchteeffekten sind in der Modellunsicherheit zu berücksichtigen, wenn dies nicht bereits im probabilistischen Modell erfolgte. Nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] bzw. *DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08* [91] erfolgt dies mittels des Faktors  $k_{mod}$ .

## 5. Modellierung des Widerstands von Holzbauteilen im Bestand

Im *JCSS PMC Teil 3.9* [61] sind statistische Parameter von Modellunsicherheiten verschiedener Schnittgrößen dargestellt, siehe Tab. 5.28. Diese können zum Teil miteinander korreliert sein, eine vollständige Korrelation ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen an verschiedenen Stellen des Tragwerks unwahrscheinlich [61].

Tab. 5.28: Statistische Parameter für Modellunsicherheiten  $\theta_{\xi}$  in Abhängigkeit vom Schnittgrößentyp aus *JCSS* [61]

Schnittgröße	Verteilung	Mittelwert	Variationskoeffizient
Rahmenmomente	Lognormal	1,0	0,10
Rahmennormalkräfte	Lognormal	1,0	0,05
Rahmenquerkräfte	Lognormal	1,0	0,1
Plattenmomente	Lognormal	1,0	0,2
Plattennormalkräfte	Lognormal	1,0	0,1

Nach *Hansen* [129] ist es bei großen Variationskoeffizienten von Bedeutung, ob die Modellunsicherheit normal oder logarithmisch normalverteilt angenommen wird. Für Stahlbeton sei diese Grenze bei Biegung bei  $V_{\theta R} = 7\%$ , bei Querkraft bei  $V_{\theta R} = 9\%$  und bei Durchstanzen bei  $V_{\theta R} = 13\%$  erreicht [129].

Aufgrund der Zugrundelegung einer qualifizierten Bestandsaufnahme in situ mit sorgfältiger Bewertung der kritischen Tragwerksteile wird für diese Arbeit für alle Festigkeitseigenschaften eine Normalverteilung und  $V_{\theta R} = 7\%$  angenommen. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Kalibrierung angepasster Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für Biege- sowie Zug- und Druckbeanspruchung in Faserrichtung. Für diese Festigkeitseigenschaften liegen viele Untersuchungen vor, sodass das Tragverhalten gut modelliert und die Modellunsicherheit einheitlich angenommen werden kann. Für Schub-, sowie Zug-/ Druckbeanspruchungen unter einem Winkel zur Faserrichtung ist die Modellunsicherheit in weiteren Untersuchungen möglicherweise anzupassen.

### 5.5 Zusammenfassung und statistische Parameter

Holz ist ein natürlich gewachsenes, anisotropes und inhomogenes Material. Dementsprechend unterscheiden sich die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften abhängig von der Beanspruchungsrichtung. Zudem üben Wuchsbedingungen einen deutlichen Einfluss auf die Materialeigenschaften aus. Die Modellbildung ist zudem von der Festigkeitssortierung abhängig. Zur Bewertung von Holzbauteilen im Bestand wurde auf die Festigkeitssortierung in situ und Optionen der apparativen Unterstützung in Form eines Überblicks eingegangen. In Bezug auf die probabilistische Modellbildung wurde eine Literaturstudie zu statistischen Parametern durchgeführt, sowie auf Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Modells bei Vorliegen konkreter Datensätze eingegangen (tail-fit Methoden, Stochastisches Modell der Sortierung, Bayes'sches Updating mit konjugierten Prioriverteilungen).

Für die Durchführung der Zuverlässigkeitsanalysen in Kap. 6, sowie die Optimierung des Teilsicherheitsbeiwertes in Kap. 7 werden durch die Normierung der Grenzzustandsfunktionen zur Modellierung der Holzeigenschaften nur die Verteilungsfunktion und der Variationskoeffizient der Basisvariablen benötigt. Die Ergebnisse der Literaturstudie (siehe Kap. 5.3.2 bzw. Anhang 10.6, S. 28 ff.) bestätigten im

Mittel die Empfehlungen des *JCSS PMC* [61] für die Zug- und die Druckfestigkeit in Faserrichtung, sowie für die Biegefestigkeit. Die betrachteten Untersuchungen unterscheiden sich jedoch stark im Hinblick auf das verwendete Material sowie Methoden und Normen der Festigkeitssortierung, was die Vergleichbarkeit erschwert und zu einem heterogenen Ergebnis führt.

Die in Tab. 5.29 und Tab. 5.30 zusammengefassten statistischen Daten gelten primär für Nadelholz. Auf Basis der durchgeführten Literaturstudien können für Laubholz ähnliche bis leicht günstigere Werte vermutet werden (siehe Anhang 10.6.4, S. 36). Der begrenzte Umfang statistischer Daten ermöglicht jedoch keine statistisch abgesicherte, abschließende Festlegung. Für die probabilistischen Parameterstudien werden die Variationskoeffizienten der Festigkeitseigenschaften in einem festgelegten Intervall variiert, um den Einfluss auf die erreichte Zuverlässigkeit zu studieren.

Tab. 5.29: Parameter zur statistischen Modellierung von Bauholz auf Widerstandsseite

	Basisvariable	Symbol	Verteilung	$m_x^1$	$V_x$	Bemerkung
Festigkeit/ Steifigkeit	<b>Festigkeiten</b>					
	Biegefestigkeit	$R_m$	LN	1,0	0,25	Orientierungswerte basierend auf <i>JCSS PMC</i> [61] & Literaturstudie
	Druckfestigkeit in FR	$R_{c,0}$	LN	1,0	0,20	
	Zugfestigkeit in FR	$R_{t,0}$	LN	1,0	0,30	
	Druckfestigkeit rechtwinklig zur FR	$R_{c,90}$	N	1,0	0,10	Orientierungswerte basierend auf <i>JCSS PMC</i> [61]
	Scherfestigkeit	$R_v$	LN	1,0	0,25	
	<b>Steifigkeiten</b>					
Biege-Elastizitätsmodul	$E_m$	N	1,0	0,13	In Anlehnung an [61]	
Geom.	Querschnittsmaße, Bauteillängen und andere Abmessung	$h, b, l$	det.	1,0	-	Berücksichtigung in probabilistischer Analyse durch Bemessungsparameter $z_d$
Model	<b>Widerstandsseite</b>					
	Alle Variablen	$\theta_R$	N	1,0	0,07	Multiplikativ, Vorschlag bei Vorliegen einer qualifizierte Bestandsaufnahme in situ

<sup>1</sup> durch Normierung mittels Bemessungsparameter  $z_d$

Tab. 5.30: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten  $\rho$  von Holzfestigkeiten aus *JCSS PMC* [61]

	Druckfestigkeit in FR $R_{c,0}$	Zugfestigkeit in FR $R_{t,0}$
Biegefestigkeit $R_m$	0,8	0,8



## 6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

### 6.1 Grundlegendes und Zielstellung

Eine Grundlage des Bemessungskonzeptes der geltenden europäischen Normung stellt die Akzeptanz eines vereinbarten Zielzuverlässigkeitsniveaus dar. Dieses vereinbarte Niveau soll mit den Bemessungsregeln der Eurocodes erzielt werden. In *DIN EN 1990:2020-12 Anhang C* [16] sind Zielwerte für den Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta$  abgänglich von der Schadensfolgeklasse CC (engl. *consequence class*) angegeben. Der Zielwert beträgt für CC 2 (mittlere Klasse) im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  beträgt  $\beta_t = 3,8$ . Weiter enthält *ISO 2394:2015* [41] Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 1a$  unter dem Gesichtspunkt einer ökonomischen Optimierung. Im *JRC Science and Policy Report* [27] wird  $P_f = 10^{-5}$  ( $\beta = 4,26$ ) als akzeptiertes, jährliches individuelles Risiko angegeben. *Melchers* [36] gibt als Orientierung an, dass ein Wert zwischen  $P_f = 10^{-3} \dots 10^{-4}$  ( $\beta = 3,09 \dots 3,72$ ) im akzeptierten Bereich für die Zielversagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion bezogen auf die gesamte Lebenszeit ist.

*Melchers* [36] betont, dass diese abstrakten Werte schwer als Vergleichswerte ohne konkreten Modellbezug dienen können und dass die Nachrechnung bestehender Normen zur Ableitung von Vergleichswerten ein zielorientierterer und verlässlicherer Weg ist. Dabei liegt die These zugrunde, dass die nach aktuellem Normungsstand errichteten Konstruktionen den Anforderungen an das öffentliche Sicherheitsinteresse genügen, siehe dazu auch die Ausführungen von *Baravalle & Köhler* [227]. Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ist also als Vergleichswert der Analyse zu verstehen und nicht losgelöst von den Modellannahmen als Bewertungskriterium zu verwenden.

Nachfolgend wird das Zuverlässigkeitsniveau bei Anwendung der Bemessungsregeln nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] und *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] für ausgewählte Bemessungssituationen berechnet und mit dem Zielwert nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] (Schadensfolgeklasse CC 2) verglichen. Dazu wird ein Bemessungsparameter bestimmt, der unter Verwendung der geltenden Teilsicherheitsbeiwerte eine 100%-ige Querschnittsauslastung sicherstellt. Die Berechnungen werden in *MATLAB*, Kontrollrechnungen zur Überprüfung des Skriptes mittels *COMREL* (Software *STRUREL*) der Firma *RCP GmbH* durchgeführt. Tragwerksreserven bei nicht vollständiger Querschnittsauslastung können im Rahmen dieser Betrachtungen nicht berücksichtigt werden. Alle Berechnungen werden an Einzelbauteilen durchgeführt, Systemeffekte werden nicht berücksichtigt. Diese führen nach *Sørensen* [107] in der Regel zu Tragfähigkeitsreserven, welche pauschal nicht zu quantifizieren sind und in Sicherheitsbeiwerte einbezogen werden können. Das so bestimmte Sicherheitsniveau in den ausgewählten Bemessungssituationen dient als Grundlage zur Ableitung von Zielwerten für den Bestandsbau in Kap. 7.2. Auf Basis der Berechnungen werden Anpassungen für den Bestandsbau diskutiert und die Zielgrößen für die Kalibrierung in dieser Arbeit festgelegt.

## 6.2 Übersicht betrachteter Beanspruchungen für Bauteile im Bestand aus Holz

Tab. 6.1 fasst die in dieser Arbeit betrachteten Beanspruchungssituationen zusammen.

Tab. 6.1: Übersicht über betrachtete Beanspruchungen für Bauteile im Bestand aus Holz

Beanspruchungsart	Lfd.-Nr.	Belastung & Belastungsrichtung		Beispiel
<b>Einachsige Beanspruchung</b>				
	(1)	Ständige Last		
	(2)	Ständige Last + Nutzlast		Deckenbalken
	(3)	Ständige Last + Schneelast		Sparren/ Pfette
	(4)	Ständige Last + Windlast		Sparren/ Pfette
	(5)	Ständige Last + Schneelast + Windlast		Sparren/ Pfette
<b>Spannungskombination</b>				
Doppelbiegung	(6)	Ständige Last + Schneelast	Biegung, z-Richtung	Sparren/ Riegel in Holz- ständerwand
		+ Windlast	Biegung, y-Richtung	
	(7)	Ständige Last + Nutzlast	Biegung, z-Richtung	Giebelstütze
		+ Windlast	Biegung, y-Richtung	
Druck + Biegung	(8)	Ständige Last + Schneelast	Druck, x-Richtung	Stütze mit Knickhalterung, Kehlbalken
		+ Windlast	Biegung, y- oder z-Richtung	
	(9)	Ständige Last + Nutzlast	Druck, x-Richtung	Stütze mit Knickhalterung
		+ Windlast	Biegung, y- oder z-Richtung	
Zug + Biegung	(10)	Ständige Last + Nutzlast	Biegung, y- oder z-Richtung	Zugbalken im Sparrendach, ausgebaut
		+ Schneelast	Zug, x-Richtung	

*Richtungsdefinition bei Spannungskombinationen nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 [16]*

Die Arbeit fokussiert sich auf einachsige Beanspruchungen und Spannungskombinationen ohne Stabilitätsgefahr, sowie Bauteildimensionen, die in Vollholz ausführbar sind. Lastkombinationen und Wirkungsrichtungen wurden im Hinblick auf praktische Relevanz gewählt.

## 6.3 Grenzzustandsfunktionen und Bemessungsparameter

### 6.3.1 Allgemeines zur Formulierung der Grenzzustandsfunktionen

Die allgemeine Form der Grenzzustandsfunktion kann durch Gl. (6.1) dargestellt werden.

$$g_i(R, G, Q_1, Q_2, \theta_R, \theta_G, \theta_{Q_1}, \theta_{Q_2}) = z_d \theta_R R - LA_G \theta_G G - (1 - \alpha_G)(LA_{Q_1} \theta_{Q_1} S_1 \cdot (1 - LA_{Q_2}) \theta_{Q_2} S_2) \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.1)$$

Dabei ist  $R$  die Widerstandsvariable,  $G$  die ständige Einwirkung,  $S_1$  und  $S_2$  sind zwei veränderliche Einwirkungen,  $\theta_{Q_1}$  und  $\theta_{Q_2}$  die Modellunsicherheiten der jeweiligen veränderlichen Einwirkungen.  $\theta_G$  die Modellunsicherheit der ständigen Einwirkung und  $\theta_R$  die Modellunsicherheit der Widerstandsvariablen. Weiter ist  $z_d$  der Bemessungsparameter zur Sicherstellung einer einhundertprozentigen Querschnittsauslastung,  $LV_G$  der Lastanteil der ständigen Last an der Gesamtlast und  $LV_{Q_1}$  der Lastanteil der ersten veränderlichen Last an der gesamten veränderlichen Belastung.

Alle Grenzzustandsgleichungen werden mit dem Bemessungsparameter  $z_d$  normiert, siehe dazu auch [228]. Dieser wird anhand einer einhundertprozentigen Auslastung der semi-probabilistischen Bemessungsgleichung berechnet. Damit ist die grundlegende Forderung an den Grenzzustand mit

$$z_d \frac{k_{mod} \cdot f_k}{\gamma_M} - \gamma_G LA_G g_k - \gamma_Q (1 - LA_G) q_k \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.2)$$

bzw. bei zwei veränderlichen Einwirkungen mit

$$z_d \frac{k_{mod} \cdot f_k}{\gamma_M} - \gamma_G LA_G g_k - \gamma_Q (1 - LA_G) (LA_{Q1} q_{1,k} + (1 - LA_{Q1}) q_{2,k}) \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.3)$$

gegeben. Dabei ist  $k_{mod}$  der Modifikationsbeiwert entsprechend der maßgebenden Lastart (hier analog zu [229] deterministisch modelliert),  $f_k$  der charakteristische Wert der Materialfestigkeit,  $g_k$  der charakteristische Wert der ständigen und  $q_k$  der charakteristische Wert der veränderlichen Einwirkung,  $\gamma_G$  der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen inklusive Modellunsicherheit,  $\gamma_Q$  der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen inklusive Modellunsicherheit,  $\gamma_M$  der Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand inklusive Modellunsicherheit,  $LV_G$  der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast und  $LV_{Q1}$  der Anteil der ersten veränderlichen Last an der gesamten veränderlichen Last. Bei kombinierter Beanspruchung muss die Korrelation zwischen den Festigkeitseigenschaften berücksichtigt werden. Durch die in Kap. 3.4.3 beschriebene Cholesky Transformation werden die Variablen durch Berücksichtigung der Korrelationskoeffizienten in unabhängige Variablen überführt.

### 6.3.2 Transformation in den Standardnormalraum

Zur Durchführung der Zuverlässigkeitsanalysen mit der *First Order Reliability Method* werden die Basisvariablen in den Standardnormalraum transformiert. Dies erfolgt innerhalb der Grenzzustandsgleichung. Die Transformation für logarithmisch normalverteilte Widerstandsgrößen  $R$  ist

$$R = \exp(\sigma_{L,R} \cdot u_R + m_{L,R}) \quad (6.4)$$

Dabei ist  $u_R$  die Widerstandsvariable im standardisierten Raum und  $\sigma_{L,R}$  und  $m_{L,R}$  die Parameter der Lognormalverteilung. Die Transformation für normalverteilte Einwirkungsgrößen  $S_G$  ist

$$S_G = (\sigma_G \cdot u_G + m_G) \quad (6.5)$$

mit  $u_G$  der Einwirkungsvariablen im standardisierten Raum und  $\sigma_G$  und  $m_G$  den Parameter der Normalverteilung. Die Transformation für gumbelverteilte Einwirkungsgrößen  $S_Q$  ist

$$S_Q = \left( u_Q - \frac{1}{a} \cdot \ln(-\ln(\Phi(u))) \right) \quad (6.6)$$

mit  $u_Q$  der Einwirkungsvariablen im standardisierten Raum und  $a$  und  $u$  den Parametern der Gumbelverteilung. Die Transformation für normalverteilte Modellwiderstandsvariablen  $\theta_i$  ist

$$\theta_i = (\sigma_{\theta,i} \cdot u_{\theta,i} + m_{\theta,i}) \quad (6.7)$$

mit  $u_{\theta,i}$  der Modellunsicherheitsvariablen  $\theta_i$  im standardisierten Raum und  $\sigma_{\theta,i}$  und  $m_{\theta,i}$  den Parametern der Normalverteilung. In den folgend dargestellten Grenzzustandsfunktionen wird die Transformation aus Übersichtsgründen nicht explizit dargestellt. Alle Berechnungen erfolgen im Standardnormalraum.

### 6.3.3 Grenzzustandsfunktionen für einachsige Beanspruchung

Einachsige Spannung infolge ständiger Beanspruchung

$$g = z_d \cdot k_{mod} \cdot R \cdot \theta_R - S_G \cdot \theta_{S,G} \quad (6.8)$$

mit

$$z_d = \frac{\gamma_G \cdot g_k \cdot \gamma_M}{k_{mod} \cdot f_k} \quad (6.9)$$

Einachsige Spannung infolge ständiger und einer veränderlichen Last

$$g = z_d \cdot k_{mod} \cdot R \cdot \theta_R - (LV_G \cdot S_G \cdot \theta_{S,G} + (1 - LV_G) \cdot S_Q \cdot \theta_{S,Q}) \quad (6.10)$$

mit

$$z_d = \frac{(LA_G \cdot \gamma_G \cdot g_k + (1 - LA_G) \cdot \gamma_Q \cdot q_k) \cdot \gamma_M}{k_{mod} \cdot f_k} \quad (6.11)$$

Einachsige Spannung infolge ständiger und zwei veränderlichen Einwirkungen

Die veränderlichen Lasten werden nach dem Modell von *Ferry Borges & Castanheta* [103] unter Berücksichtigung der spezifischen Lastdauern überlagert, siehe Kap. 4.1.5.

$$g = z_d \cdot k_{mod} \cdot R \left( LA_G \cdot S_G \cdot \theta_{S,G} + (1 - LA_G) \cdot (LA_{Q1} \cdot S_{Q,1}^{n_1} \cdot \theta_{S,1} + (1 - LA_{Q2}) \cdot S_{Q,2}^{n_2} \cdot \theta_{S,2}) \right) \quad (6.12)$$

mit

$$n_1 = \frac{\min(n_{p1}, n_{p2})}{n_{p1}} \quad (6.13) \quad n_2 = \frac{\max(d_1, d_2)}{n_{p2}} \quad (6.14)$$

$$d_1 = \frac{n_{p1}}{n_{r1}} \quad (6.15) \quad d_2 = \frac{n_{p2}}{n_{r2}} \quad (6.16)$$

Dabei ist  $n_{pi}$  die Präsenzzeit der Last  $i$  im betrachteten Grundzeitintervall und  $n_{ri}$  die Anzahl der Wiederholungen in der Präsenzzeit, siehe *Baravalle* [85]. Der Bemessungsparameter zur Gewährleistung einer einhundertprozentigen Querschnittsauslastung  $z_d$  wird berechnet mit

$$z_d = \frac{\gamma_M}{k_{mod} \cdot f_k} \cdot \left( LA_G \cdot \gamma_G \cdot g_k + LA_Q \cdot (LA_{Q1} \cdot \gamma_Q \cdot q_{k,1} + LA_{Q2} \cdot \gamma_Q \cdot \psi_{Q2} \cdot q_{k,2}) \right) \quad (6.17)$$

### 6.3.4 Grenzzustandsfunktionen für Spannungskombinationen

Zug und Biegung

In *Köhler, Sørensen & Faber* [131] bzw. *Köhler* [230] wird die Modellierung der Grenzzustandsfunktion bei kombinierter Biege- und Zugbeanspruchung nach Gl. (6.18) dargestellt.

$$g = 1 - \left( \frac{1}{z_{d,A}} \frac{\sum_i S_{t,i}}{R_{t,0}} + \frac{1}{z_{d,M}} \frac{\sum_i S_{m,i}}{R_m} \right) X_M \quad (6.18)$$

Bei Anbindung der Modellunsicherheit an die jeweilige Basisvariable ergibt sich

$$g = 1 - \left( \frac{1}{z_{d,A}} \frac{\sum_i S_{t,i} \cdot \theta_{S,t,i}}{R_{t,0} \cdot \theta_{R,t,0}} + \frac{1}{z_{d,M}} \frac{\sum_i S_{m,i} \cdot \theta_{S,m,i}}{R_m \cdot \theta_{R,m}} \right) \quad (6.19)$$

Zu berücksichtigen ist die Korrelation der Biegefestigkeit mit der Zugfestigkeit des Materials, welche im *JCSS Probabilistic Model Code* [61] mit  $\rho = 0,8$  angegeben ist. Die Bemessungsparameter  $z_{d,A}$  und  $z_{d,M}$  ergeben sich aus Lösung des Gleichungssystems aus Gl. (6.20) und Gl. (6.21).

$$0 = 1 - \left( \frac{\gamma_M \cdot (LA_G \cdot \gamma_G \cdot g_k + (1 - LA_G) \cdot LA_{Q1} \cdot \gamma_Q \cdot q_{k,1})}{z_{d,A} \cdot k_{mod} \cdot f_{k,t}} \right) \quad (6.20)$$

$$- \left( \frac{\gamma_M \cdot (1 - LA_G) \cdot (1 - LA_{Q1}) \cdot \gamma_Q \cdot \psi_{0,2,Q2} \cdot q_{k,1}}{z_{d,M} \cdot k_{mod} \cdot f_{k,t}} \right)$$

$$0 = z_{d,M} - \frac{6 \cdot z_{d,A}}{h/b} \quad (6.21)$$

### Druck und Biegung

Analog ergibt sich bei kombinierter Beanspruchung aus Druck- und Biegung (ohne Stabilitätsproblem)

$$g = 1 - \left( \frac{1}{z_{d,A}} \frac{\sum_i S_{c,i} \cdot \theta_{S,c,i}}{R_{c,0} \cdot \theta_{R,c,0}} + \frac{1}{z_{d,A}} \frac{\sum_i S_{m,i} \cdot \theta_{S,m,i}}{R_m \cdot \theta_{R,m}} \right). \quad (6.22)$$

Zu berücksichtigen ist die Korrelation der Biegefestigkeit mit der Druckfestigkeit des Materials, welche im PMC [61] mit  $\rho = 0,8$  angegeben ist. Die Bemessungsparameter  $z_{d,A}$  und  $z_{d,M}$  ergeben sich dem Gleichungssystem aus Gl. (6.23) und (6.24). Die Plastifizierung in der Druckzone und die entstehende Tragfähigkeitserhöhung wird zu DIN EN 1995-1-1:2010-12 [90] durch Quadratur des Terms berücksichtigt.

$$0 = 1 - \left( \frac{\gamma_M \cdot (LA_G \cdot \gamma_G \cdot g_k + (1 - LA_G) \cdot LV_{Q1} \cdot \gamma_Q \cdot q_{k,1})}{z_{d,A} \cdot k_{mod} \cdot f_{k,c}} \right)^2 \quad (6.23)$$

$$- \left( \frac{\gamma_M \cdot (1 - LA_G) \cdot (1 - LA_{Q1}) \cdot \gamma_Q \cdot \psi_{0,2,Q2} \cdot q_{k,1}}{z_{d,M} \cdot k_{mod} \cdot f_{k,c}} \right)$$

$$0 = z_{d,M} - \frac{6 \cdot z_{d,A}}{h/b} \quad (6.24)$$

### Doppelbiegung – Ständige Last und zwei veränderliche Lasten

Allgemein lässt sich schreiben

$$g = 1 - \left( \frac{1}{z_{d,M}} \frac{\sum_i S_{m,y,i} \cdot \theta_{S,m,y,i}}{R_m \cdot \theta_{R,m}} + \frac{1}{z_{d,M}} \frac{\sum_i S_{m,z,i} \cdot \theta_{S,m,z,i}}{R_m \cdot \theta_{R,m}} \right). \quad (6.25)$$

Für eine kombinierte Beanspruchung aus ständiger Last und einer veränderlichen Last in z-Richtung und einer veränderlichen Last in y-Richtung ergibt sich

$$g = 1 - \left( \frac{1}{z_{d,z}} \cdot \frac{LA_G \cdot S_{G,z} \cdot \theta_{S,G} + (1 - LA_G) \cdot LA_{Q,1} \cdot S_{Q,1,z}^{n_1} \cdot \theta_{S,1}}{R_m} + \frac{1}{z_{d,y}} \cdot \frac{(1 - LA_G) \cdot (1 - LA_{Q,1}) \cdot S_{Q,2,z}^{n_2} \cdot \theta_{S,2}}{R_m} \right) \cdot \frac{1}{\theta_{R,m} \cdot k_{mod}}. \quad (6.26)$$

Der Bemessungsparameter  $z_{d,z}$  ist

$$z_{d,z} = \frac{\gamma_M}{f_{k,m}} \cdot \left( LA_G \cdot \gamma_G \cdot g_k + (1 - LA_G) \cdot \left( LA_{Q1} \cdot \gamma_Q \cdot q_{k,1} + k_m \cdot (1 - LA_{Q1}) \cdot \gamma_Q \cdot \psi_{0,2,Q2} \cdot q_{k,2} \cdot \frac{h}{b} \right) \right). \quad (6.27)$$

Dabei ist  $k_m$  der Verteilungsbeiwert für Biegespannungen in einem Querschnitt nach DIN EN 1995-1-1:2010-12. Dieser ist für rechteckige Querschnitte mit  $k_m = 0,7$  und für alle anderen  $k_m = 1,0$  anzunehmen. Auf der sicheren Seite wird  $k_m = 1,0$  angenommen. Für rechteckige Querschnitte ist

$$z_{d,y} = z_{d,z} \cdot \frac{h}{b}. \quad (6.28)$$

## 6.4 Probabilistische Parameter der Basisvariablen

Die folgenden statistischen Parameter werden für diese Arbeit festgelegt (Tab. 6.2).

Tab. 6.2: Probabilistische Parameter der Basisvariablen für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  (Grundzeitintervall)

	Basisvariable	Sym- bol	Vertei- lung	$m_x^1$	$V_x$	Bemerkung
Widerstand	<b>Vollholz</b>					
	Biegefestigkeit	$R_m$	LN	1,0	0,25	Indikative Werte aus [61]
	Druckfestigkeit in Faserrichtung	$R_{c,0}$	LN	1,0	0,20	
Zugfestigkeit in Faserrichtung	$R_{t,0}$	LN	1,0	0,30		
Einwirkungen	<b>Ständige Einwirkung</b>					
	Konstruktionseigenlast	$G$	N	1,0	0,10	In Anlehnung an [132]
	<b>Veränderliche Einwirkungen</b>					
	<b>Nutzlast</b> – Kategorie A1, A2, A3, B1					
	Verteilung der Maximalwerte im Bezugszeitraum					
	Kleiner Raum (bis 20m <sup>2</sup> )	$N$	GUM	1,0	0,40	Basierend auf eigenen Berechnungen mit [60, 98, 114]
	Großer Raum (über 20m <sup>2</sup> )	$N$		1,0	0,25	
	Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·365	-	In Anlehnung an [85]
	Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	5·365	-	
	<b>Schneelast</b>					
	Verteilung der Maximalwerte im Bezugszeitraum	$S$	GUM	1,0	0,25	In Anlehnung an [101]
	Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·60	-	In Anlehnung an [85] (angepasst für Dtl.)
	Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	10	-	
	<b>Windlast</b>					
Verteilung der Maximalwerte im Bezugszeitraum	$W$	GUM	1,0	0,16	In Anlehnung an [98, 101]	
Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·365	-	In Anlehnung an [85]	
Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	50·365	-		
Modellsicherheit	<b>Widerstandsseite</b>					
	Qualifizierte Bestandsaufnahme in-situ	$\theta_R$	N	1,0	0,07	Eigener Vorschlag
	<b>Einwirkungsseite</b>					
	Ständige Einwirkung, qualifizierte Bestandsaufnahme in situ	$\theta_G$	N	1,0	0,05	Eigener Vorschlag
	Nutzlast	$\theta_N$	N	1,0	0,10	In Anlehnung an [129, 133, 134]
	Schneelast	$\theta_S$	N	1,0	0,10	
Windlast	$\theta_W$	N	1,0	0,10		

<sup>1</sup> durch Normierung mittels Bemessungsparameter  $z_d$

Für die Modellierung bei kombinierter Beanspruchung werden die Korrelationskoeffizienten nach Tab. 6.3 verwendet. Einwirkungen werden als unkorreliert angenommen.

Tab. 6.3: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten  $\rho$  der Holzfestigkeiten aus JCSS PMC [61]

	Druckfestigkeit $f_c$	Zugfestigkeit $f_t$
Biegefestigkeit $f_m$	0,8	0,8

## 6.5 Ergebnisse zum impliziten Sicherheitsniveau der Normung im Holzbau bei Standardbeanspruchungsfällen

### 6.5.1 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last

Tab. 6.4 enthält den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für ausgewählte Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ , Abb. 6.1 (links) zeigt die Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit. Zur Orientierung ist die Zielzuverlässigkeit für Neubauten nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50$  Jahre für die Schadensfolgeklasse CC2 dargestellt ( $\beta = 3,8$ ). Abb. 6.1 (rechts) zeigt die quadrierten Sensitivitätsfaktoren  $\alpha_i^2$  abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit. Diese Darstellung wurde gewählt, da

$$\Sigma \alpha_i^2 = 1 \quad (6.29)$$

ist. Somit kann die Entwicklung des Einflusses jeder Variablen auf die Zuverlässigkeit gut abgelesen werden. Der Modifikationsbeiwert ist in diesem Lastfall  $k_{mod} = 0,6$ .

Tab. 6.4: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Spannung aus ständiger Beanspruchung für ausgewählte Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$

$V_R$	0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,30
$\beta$ für $V_G = 0,05$	4,17	4,00	3,84	3,70	3,64	3,58	3,47	3,37
$\beta$ für $V_G = 0,10$	3,90	3,76	3,64	3,53	3,48	3,43	3,34	3,26
$\beta$ für $V_G = 0,15$	3,58	3,49	3,41	3,33	3,29	3,25	3,18	3,11

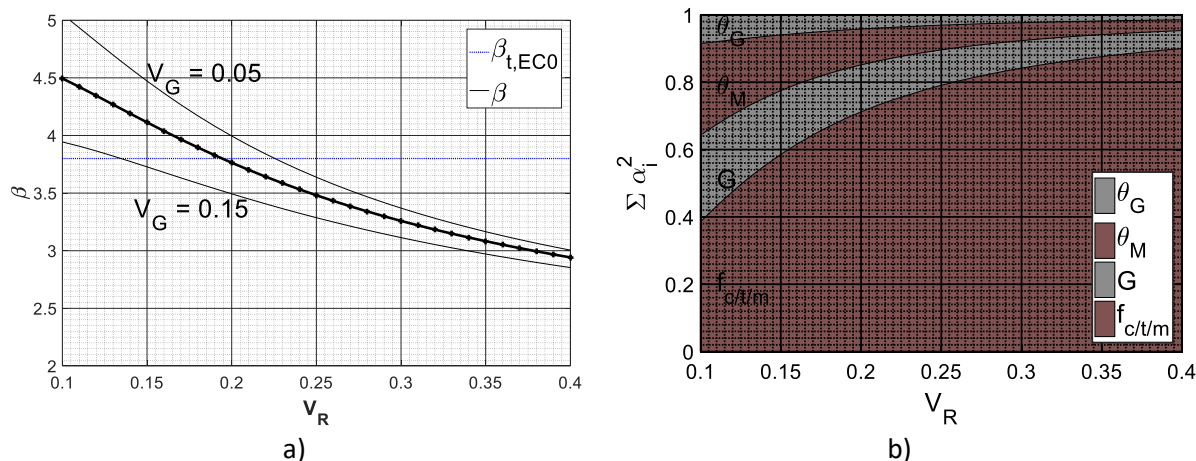


Abb. 6.1: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren für  $V_G = 0,10$  (b) abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit für eine ständige Beanspruchung im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$

Es zeigt sich, dass der Zielwert für den Neubau ( $\beta = 3,8$  in  $T_{ref} = 50a$  nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16]) rechnerisch nur bei  $V_R \leq 0,20$  erreicht wird. Nach *JCSS PMC* [61] kann für die Biegefestigkeit  $V_R = 0,25$ , für die Druckfestigkeit in Faserrichtung  $V_R = 0,20$  für die Zugfestigkeit und  $V_R = 0,30$  in Faserrichtung angenommen werden. Die Zielzuverlässigkeit wird damit für Biege- und Zugbeanspruchung schon beim Auftreten von ausschließlich ständigen Lasten nicht erreicht. Analysen zeigten, dass der Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$  einen starken Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat. Bei Betrachtung der Sensitivitätsfaktoren zeigt sich, dass die Festigkeitsstreuung durchgängig einen dominanten Einfluss auf

die Zuverlässigkeit hat, welcher mit zunehmendem Variationskoeffizienten weiter zunimmt. Für  $V_G = 0,05$  zeigt sich eine Verschiebung der Kurve nach rechts, sowie eine Verstärkung des Anstiegs. Dementsprechend stellt sich bei geringen Variationskoeffizienten der Festigkeit ein deutlich höheres Zuverlässigkeitsniveau ein, der Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 3,8$  wird bei  $V_R > 0,22$  unterschritten.

### 6.5.2 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last + Nutzlast

Tab. 6.5 und Tab. 6.6 enthalten den Zuverlässigkeitsindex in  $T_{ref} = 50a$  für verschiedene Variationskoeffizienten der Festigkeit und verschiedene Lastanteile der Nutzlast an der Gesamtlast definiert mit

$$LA_Q = \frac{q_k}{g_k + q_k} \quad (6.30),$$

für  $V_N = 0,25$  (in Kap. 4.3 für große Räume mit großer bzw. kleine Räume mit geringer Lastfluktuation) und  $V_N = 0,40$  (in Kap. 4.3 für kleine Räume mit großer Lastfluktuation hergeleitet). Der Modifikationsbeiwert ist in diesem Lastfall  $k_{mod} = 0,8$ .

Tab. 6.5: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Festigkeit $V_R$							
		0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,30
Lastanteil veränderlicher Last an Gesamtlast $LA_Q$	0,1	3,97	3,82	3,70	3,64	3,58	3,53	3,38	3,29
	0,2	3,95	3,81	3,69	3,63	3,58	3,52	3,38	3,30
	0,3	3,80	3,70	3,60	3,56	3,51	3,46	3,34	3,26
	0,4	3,58	3,52	3,45	3,42	3,39	3,35	3,25	3,19
	0,5	3,36	3,33	3,29	3,26	3,24	3,22	3,14	3,10
	0,6	3,17	3,15	3,13	3,11	3,10	3,08	3,03	2,99
	0,7	3,00	2,99	2,98	2,97	2,96	2,95	2,92	2,89
	0,8	2,85	2,85	2,85	2,85	2,84	2,84	2,81	2,80
	0,9	2,72	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,72	2,70

Tab. 6.6: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast,  $V_N = 0,40$

		Variationskoeffizient der Festigkeit $V_R$							
		0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,30
Lastanteil veränderlicher Last an Gesamtlast $LA_Q$	0,1	3,89	3,76	3,64	3,53	3,48	3,43	3,34	3,26
	0,2	3,62	3,54	3,46	3,38	3,35	3,31	3,24	3,17
	0,3	3,25	3,22	3,18	3,14	3,12	3,10	3,05	3,01
	0,4	2,93	2,93	2,92	2,90	2,89	2,88	2,86	2,83
	0,5	2,67	2,68	2,69	2,69	2,68	2,68	2,67	2,66
	0,6	2,46	2,48	2,50	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51
	0,7	2,29	2,31	2,34	2,35	2,36	2,36	2,37	2,38
	0,8	2,14	2,17	2,20	2,22	2,23	2,23	2,25	2,26
	0,9	2,01	2,05	2,08	2,10	2,11	2,12	2,14	2,15

Abb. 6.2 zeigt die Ergebnisse der Parameterstudien für die ausgewiesenen Lastverhältnisse abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit für  $V_N = 0,40$  und  $V_N = 0,25$ . Vergleichend wird der Zielwert aus *DIN EN 1990:2010-12* [16] ( $\beta = 3,8$ ) für Neubauten im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  dargestellt. Es werden ebenfalls die Entwicklung der (quadratischen) Sensitivitätsfaktoren dargestellt. So lässt sich graphisch gut erkennen, wie sich der Einfluss der einzelnen Basisvariablen an der rechnerischen Zuverlässigkeit mit Veränderung des Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$  in den untersuchten Bemessungssituationen ändert.



6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

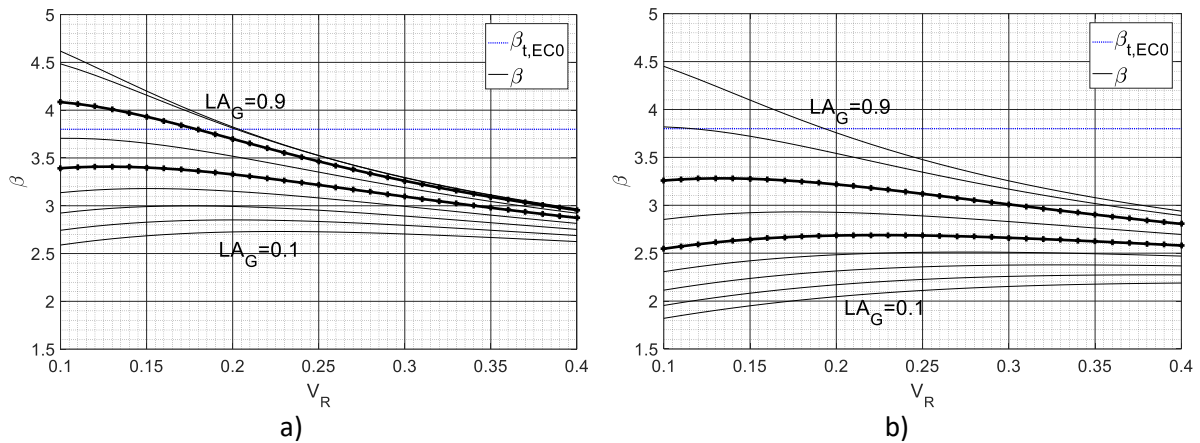


Abb. 6.2: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last + Nutzlast abhängig von  $V_R$  für  $V_N = 25\%$  (a) und  $V_N = 0,40$  (b) hervorgehoben sind  $LA_G = 0,70$  und  $LA_Q = 0,50$

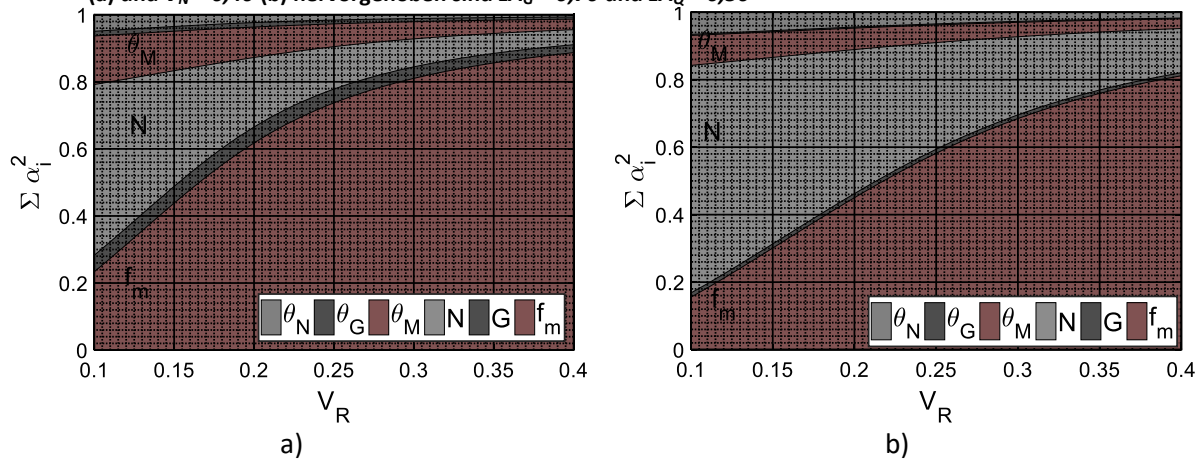


Abb. 6.3: Sensitivitätsfaktoren abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$  für ständige Beanspruchung + Nutzlast für  $V_N = 0,25$ ,  $LA_G = 0,70$  (links) und  $LA_G = 0,50$  (rechts),  $T_{ref} = 50a$

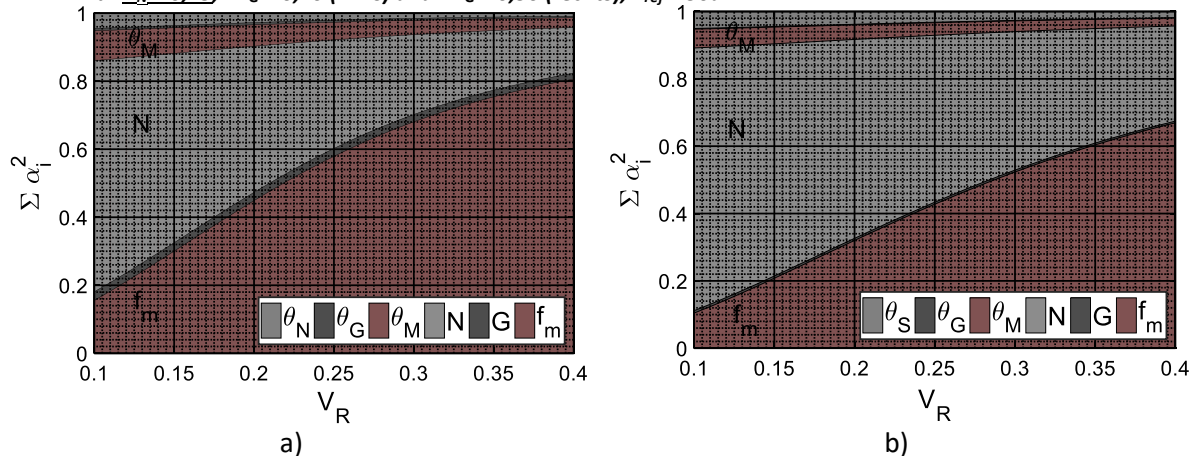


Abb. 6.4: Sensitivitätsfaktoren abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$  für ständige Beanspruchung + Nutzlast für  $V_N = 0,40$ ,  $LA_G = 0,70$  (links) und  $LA_G = 0,50$  (rechts),  $T_{ref} = 50a$

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass ein höherer Anteil der Nutzlast die rechnerische Zuverlässigkeit deutlich senkt. Die dominanten Einflussgrößen sind in allen Betrachtungsfällen die Nutzlast und/ oder die Materialfestigkeit. Auch ein deutlicher Einfluss der Modellunsicherheit des Materialmodells ist zu erkennen. Der Einfluss der ständigen Last auf die Zuverlässigkeit ist in den betrachteten Fällen gering. Für  $V_N = 0,40$  und  $LA_Q = 0,30$  sowie für  $V_N = 0,25$  und  $LA_Q = 0,50$  ergeben sich vergleichbare, leicht abweichende Kurven. Aufgrund dessen, kann eine Einteilung in drei zu gewichtenden Kategorien a, b und c für die Kalibrierung angepasster Sicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  in Kap. 7 nach Abb. 6.5 erfolgen.

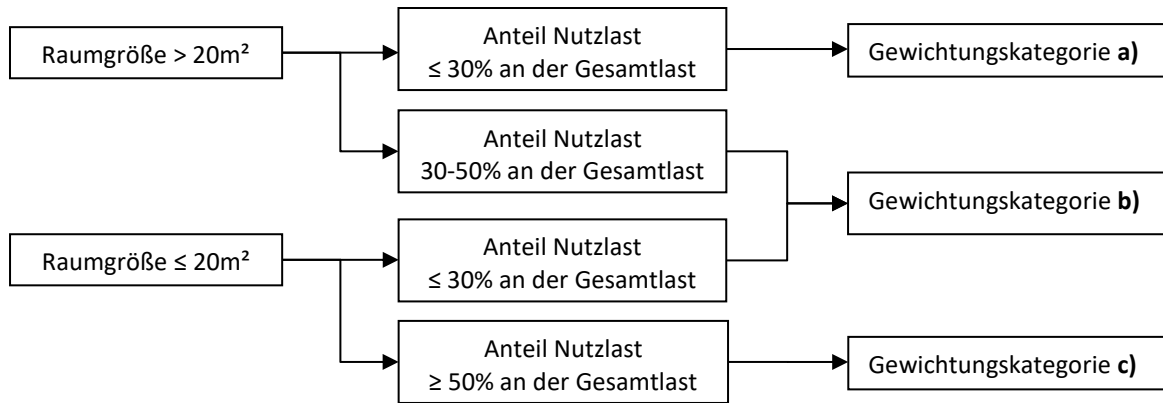


Abb. 6.5: Einteilung der Gewichtungskategorien für die Nutzlastbeanspruchung

### 6.5.3 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last + Schneelast oder Windlast

Bei Steildächern mit Dachneigungen  $\geq 60^\circ$  müssen keine Schneelasten berücksichtigt werden. Deshalb werden zunächst beide Lasten getrennt modelliert. Der Modifikationsbeiwert wird im Lastfall ständige Last + Windlast  $k_{mod} = 1,0$ , angenommen. Der Modifikationsbeiwert für eine Belastung aus ständiger Last und Schneelast wird mit  $k_{mod} = 0,9$  (Klasse der Lasteinwirkungsdauer KLED kurz) angenommen. Im Folgenden enthält Tab. 6.7 den Zuverlässigkeitsindex im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für verschiedene Lastanteile der Schneelast an der Gesamtlast. Des Weiteren zeigt Tab. 6.8 die Zuverlässigkeit bei Windlastbeanspruchung, sowie Abb. 6.6 die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse und Abb. 6.7 die Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für den Fall  $LA_G = 0,50$ .

Tab. 6.7: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast

		Variationskoeffizient der Festigkeit $V_R$							
		0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,30
Lastanteil veränderlicher Last an Gesamtlast $LA_G$	0,1	3,97	3,82	3,70	3,58	3,53	3,47	3,38	3,29
	0,2	3,95	3,81	3,69	3,58	3,52	3,47	3,38	3,30
	0,3	3,80	3,70	3,60	3,51	3,46	3,42	3,34	3,26
	0,4	3,58	3,52	3,45	3,39	3,35	3,32	3,25	3,19
	0,5	3,36	3,33	3,29	3,24	3,22	3,19	3,14	3,10
	0,6	3,17	3,15	3,13	3,10	3,08	3,06	3,03	2,99
	0,7	3,00	2,99	2,98	2,96	2,95	2,94	2,92	2,89
	0,8	2,85	2,85	2,85	2,84	2,84	2,83	2,81	2,80
	0,9	2,72	2,73	2,73	2,73	2,73	2,72	2,72	2,70

Tab. 6.8: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Windlast

		Variationskoeffizient der Festigkeit $V_R$							
		0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,30
Lastanteil veränderlicher Last an Gesamtlast $LA_G$	0,1	3,99	3,85	3,72	3,60	3,54	3,49	3,39	3,31
	0,2	4,06	3,90	3,77	3,64	3,59	3,53	3,43	3,34
	0,3	4,06	3,92	3,78	3,66	3,60	3,55	3,45	3,36
	0,4	4,00	3,87	3,75	3,64	3,59	3,54	3,44	3,35
	0,5	3,88	3,78	3,68	3,59	3,54	3,50	3,41	3,33
	0,6	3,74	3,66	3,59	3,51	3,47	3,43	3,36	3,29
	0,7	3,60	3,54	3,48	3,42	3,39	3,36	3,30	3,24
	0,8	3,46	3,42	3,38	3,33	3,31	3,28	3,23	3,18
	0,9	3,34	3,31	3,28	3,24	3,22	3,20	3,16	3,11

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

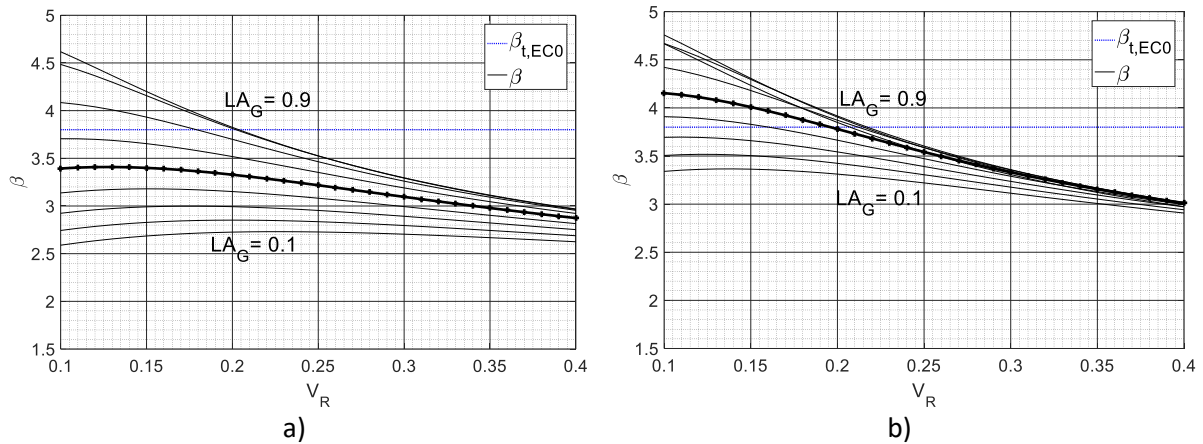


Abb. 6.6: Zuverlässigkeitsindex für ständige Last + Schneelast (a) bzw. ständige Last + Windlast (b) abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ ,  $T_{ref} = 50a$ , hervorgehoben ist jeweils  $LA_Q = 0,50$

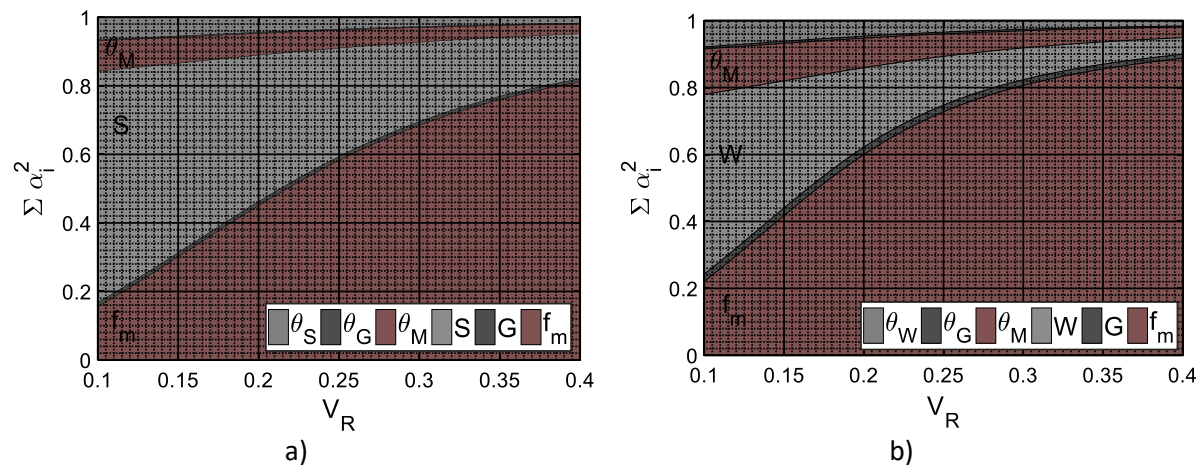


Abb. 6.7: Sensitivitätsfaktoren für ständige Beanspruchung + Schneelast (a) bzw. ständige Last + Windlast (b) abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ , beispielhaft für  $LA_Q = 0,5$   $T_{ref} = 50a$

Bei Betrachtung der Lastkombination aus ständiger Last und Schneelast wird der Zielwert von  $\beta_t = 3,8$  ( $T_{ref} = 5a$ ) für die Schadensfolgeklasse CC 2 nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] für Lastanteile der Schneelast an der Gesamtlast von  $LA_Q \geq 0,4$  für alle Variationskoeffizienten der Festigkeit unterschritten. Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass bei einem Lastanteil der Schneelast von  $LA_Q = 0,5$  ab  $V_R \geq 0,20$  der Einfluss des Materials die Zuverlässigkeit dominiert, bei kleineren Variationskoeffizienten der Festigkeit ist die Schneelast der dominierende Einflussfaktor.

Das alleinige Wirken einer Windlast führt zu deutlich günstigeren Ergebnissen, als eine Beanspruchung aus Schneelast. Bei Variationskoeffizienten der Festigkeit von  $V_R > 0,2$  wird der Zielwert von  $\beta_t = 3,8$  jedoch für alle Aufteilung der Lastanteile unterschritten. Sensitivitätsanalysen werden im Rahmen der Darstellungen zu kombinierter Wind- und Schneelastbeanspruchung präsentiert.

*Einfluss der Modellierung des Materialwiderstands als normalverteilte Zufallsgröße*

Der Einfluss einer Modellierung der Widerstandsvariablen als normalverteilte Zufallsgröße wird untersucht und in Abb. 6.8 dargestellt.

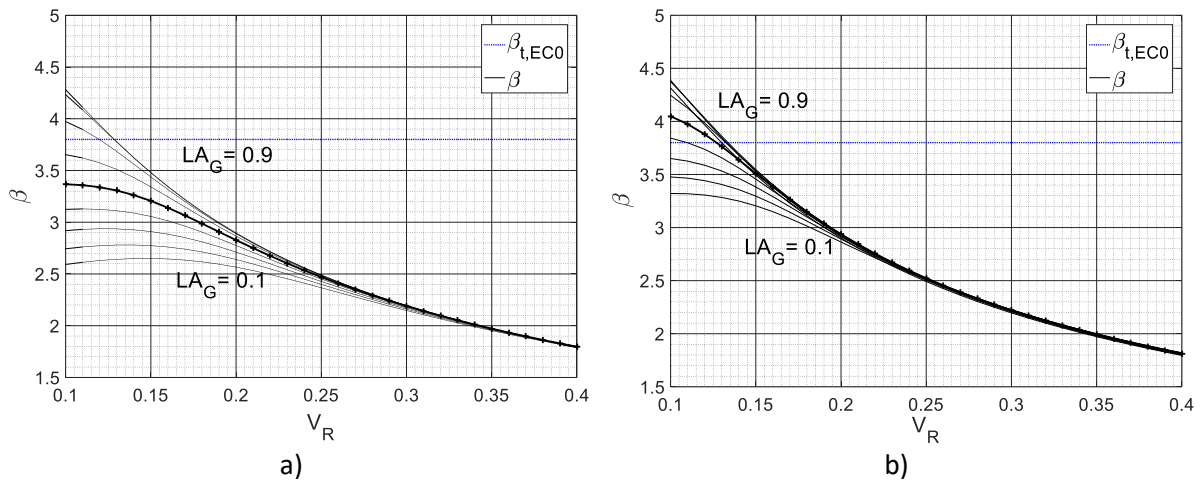


Abb. 6.8: Zuverlässigkeitsindex für ständige Last + Schneelast (a) bzw. ständige Last + Windlast (b) abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ ,  $T_{ref} = 50a$ , hervorgehoben ist jeweils  $LA_Q = 0,50$   
**Festigkeit normalverteilt**

Im Vergleich zur Modellierung mittels logarithmischer Normalverteilung zeigt sich eine deutlich reduzierte Zuverlässigkeit, die insbesondere bei großen Variationskoeffizienten des Materialwiderstands zunimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung das Auftreten negativer Werte nicht ausgeschlossen. Diese nimmt mit einer größeren Streuung der Variablen, insbesondere bei kleinem Erwartungswert, wie es hier durch die Normierung der Fall ist, zu. Für einen Variationskoeffizienten von  $V_R = 0,10$ , wie für die Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung empfohlen, entsprechen die Ergebnisse jedoch noch ungefähr denen bei Anwendung der logarithmischen Normalverteilung und  $V_R = 0,20$ .

### 6.5.4 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last + Schneelast + Windlast

Die Überlagerung wurde mit der Lastkombinationsregel nach *Ferry Borges & Castanheta* [103] durchgeführt. Es ergaben sich vergleichbare, nur leicht abweichende Ergebnisse. Der Modifikationsbeiwert wird mit  $k_{mod} = 1,0$  angenommen. Untersuchungen mit einem Variationskoeffizienten von  $V_R = 0,2$  ergeben die Werte nach Tab. 6.9 und Abb. 6.9.

Tab. 6.9: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,20$ , Lastfall einachsige Beanspruchung

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten $LA_{Qi}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamlast $LA_Q$	0,1	3,82	3,80	3,77	3,75	3,74	3,76	3,78	3,79	3,81
	0,2	3,87	3,82	3,77	3,73	3,71	3,74	3,76	3,79	3,81
	0,3	3,91	3,84	3,76	3,68	3,65	3,69	3,71	3,73	3,74
	0,4	3,93	3,84	3,74	3,62	3,57	3,60	3,61	3,61	3,59
	0,5	3,95	3,83	3,69	3,53	3,45	3,47	3,46	3,44	3,42
	0,6	3,95	3,80	3,62	3,42	3,31	3,31	3,30	3,27	3,24
	0,7	3,93	3,76	3,54	3,29	3,15	3,15	3,13	3,10	3,07
	0,8	3,90	3,70	3,44	3,14	2,98	2,98	2,96	2,93	2,91
	0,9	3,85	3,63	3,33	2,99	2,81	2,81	2,80	2,78	2,76

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

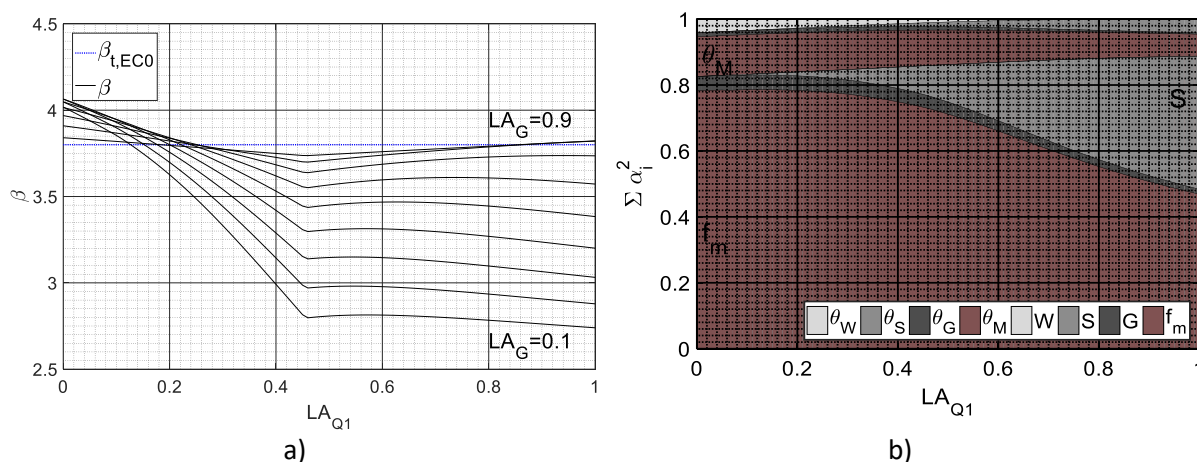


Abb. 6.9: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,20$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall einachsige Beanspruchung

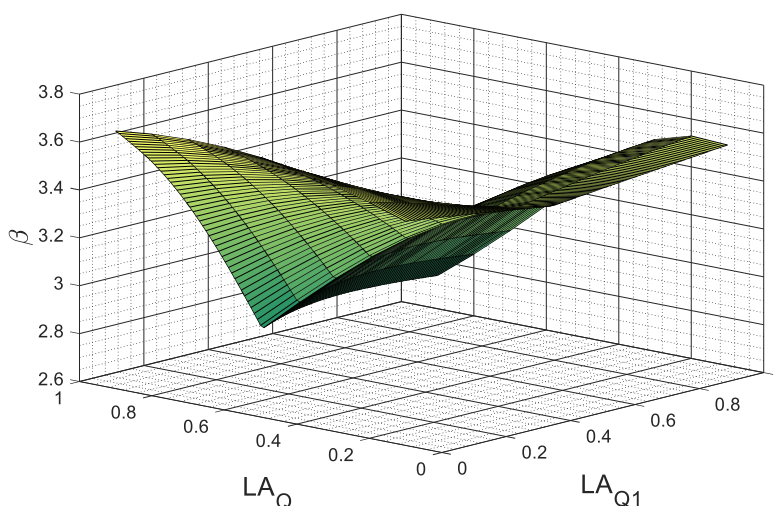


Abb. 6.10: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,20$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall einachsige Beanspruchung, 3D-Ansicht

Der Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta = 3,8$  wird für  $LA_G \geq 0,5$  und für geringe Anteile der Schneelast an der veränderlichen Last erreicht. Für größere Anteile der veränderlichen Last an der Gesamtlast wird der Zielwert unterschritten. Die Ergebnisse für  $V_R = 0,25$  sind in Tab. 6.10 und Abb. 6.11 zusammengestellt.

Tab. 6.10: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ , Lastfall einachsige Beanspruchung

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf gesamte veränderliche Lasten $LA_{Q1}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast $LA_Q$	0,1	3,52	3,50	3,48	3,46	3,45	3,47	3,48	3,49	3,51
	0,2	3,55	3,51	3,47	3,43	3,42	3,45	3,47	3,49	3,51
	0,3	3,57	3,52	3,46	3,39	3,37	3,40	3,43	3,45	3,47
	0,4	3,59	3,51	3,43	3,34	3,30	3,34	3,36	3,38	3,39
	0,5	3,60	3,50	3,39	3,26	3,21	3,25	3,27	3,27	3,27
	0,6	3,60	3,48	3,34	3,18	3,11	3,14	3,15	3,15	3,14
	0,7	3,58	3,44	3,27	3,08	2,99	3,01	3,02	3,02	3,00
	0,8	3,56	3,40	3,20	2,97	2,86	2,88	2,89	2,89	2,87
	0,9	3,53	3,35	3,12	2,85	2,72	2,75	2,76	2,76	2,75

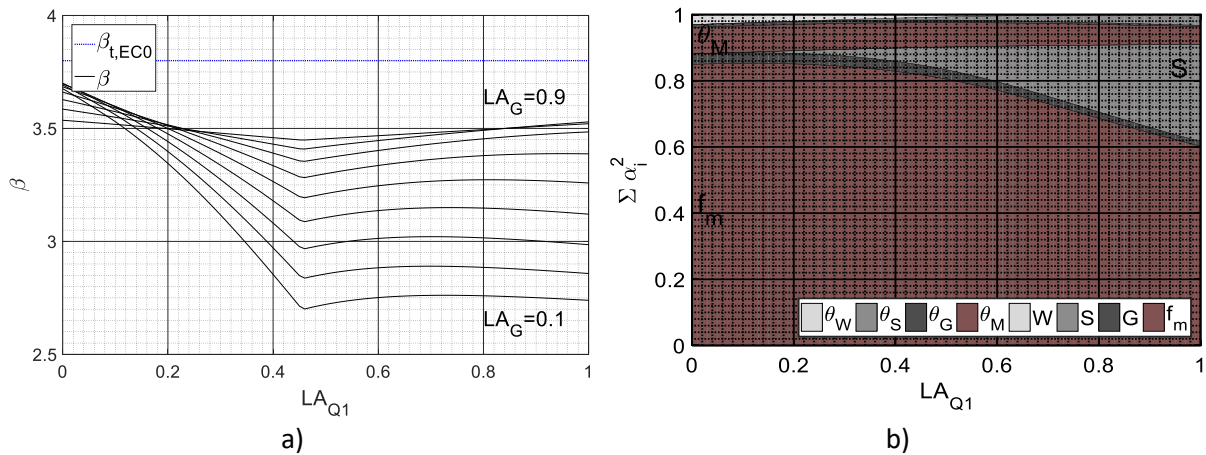


Abb. 6.11: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall einachsige Beanspruchung

Sensitivitätsanalysen können im Anhang 10.9.1 (S. 50 ff.) nachgeschlagen werden. Diese stellen den Einfluss der Variablen auf die rechnerische Zuverlässigkeit für veränderliche Lastanteile aus ständiger und veränderliche Lasten vergleichend für  $V_R = 0,20$  und  $V_R = 0,25$  dar. Es zeigt sich der zunehmende Einfluss der Schneelast auf die Zuverlässigkeit mit steigendem Lastanteil. Mit diesem zunehmenden Einfluss schwindet der Einfluss der ständigen Last und der Materialfestigkeit. Vergleichend werden die Ergebnisse für  $V_R = 0,20$  und  $V_R = 0,25$  gegenübergestellt. Diese zeigen, wie der Einfluss der Schneelast auf die Zuverlässigkeit bei geringerem Variationskoeffizienten mit steigendem Anteil der veränderlichen Lasten deutlich schneller zunimmt, als bei größerem Variationskoeffizienten der Festigkeit. Des Weiteren ist auch der Einfluss der Windlast bzw. der Modellunsicherheit der Windlast größer. Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass sich für hohe Anteile der Windlast eine günstigere rechnerische Zuverlässigkeit als dies für hohe Schneelastanteile der Fall ist, siehe dazu im Einzelnen Anhang 10.9.1, Seite 50. Abb. 6.11 zeigt, dass der Zielwert  $\beta = 3,8$  ( $T_{ref} = 50a$ ) auch für große Anteile ständiger Last nicht erreicht wird. Zudem zeigt sich bei allen Kurven ein charakteristischer Knick (Abb. 6.11 a). An dieser Stelle wird die Belastung der jeweils anderen veränderlichen Einwirkung in der semi-probabilistischen Bemessung für den Bemessungsparameter  $z_d$  maßgebend („Bemessungsknick“).

### 6.5.5 Doppelbiegung aus ständiger Last + Windlast

Es werden Zuverlässigkeitsanalysen für Doppelbiegung unter ständiger Last und Windlast durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Tab. 6.11 und Abb. 6.12 dargestellt. Die Zuverlässigkeitskurven erreichen für hohe Anteile der Windlast an der Gesamlast ( $LA_Q > 0,5$ ) ihren Höchstwert bei einem Anteil der horizontalen Windlast von ca.  $LA_{Q1} = 0,3$ . Die Sensitivitätsstudien zeigen in diesem Bereich einen erhöhten Einfluss der Materialfestigkeit auf die Zuverlässigkeit. Die Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.2 (Seite 53 ff.) zeigen die Erhöhung dieses Einflusses bei zunehmenden Anteil der veränderlichen

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

Last. Insbesondere für hohe Anteile der Windlast in z-Richtung sinkt die Zuverlässigkeit ab. Zudem zeigen die Kurven, dass die Erhöhung des Anteils der ständigen Last in diesem Lastfall ab  $LA_G > 0,5$  nicht zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit führt. Für größere Anteile der Windlast in y-Richtung ( $LA_{Q2} = 1 - LA_{Q1}$ ) wird dies noch deutlicher. Dieser Effekt ist auch in Abb. 6.6 b), Abb. 6.9/ Abb. 6.11 und den entsprechenden Ergebnistabellen erkennbar.

Tab. 6.11: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast,  $h/b = 1/2$

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf gesamte veränderliche Lasten $LA_{Q1}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast $LA_Q$	0,1	3,52	3,52	3,52	3,53	3,53	3,53	3,53	3,54	3,54
	0,2	3,55	3,56	3,57	3,57	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58
	0,3	3,59	3,60	3,61	3,61	3,62	3,62	3,62	3,61	3,61
	0,4	3,62	3,63	3,64	3,65	3,65	3,64	3,64	3,62	3,61
	0,5	3,64	3,66	3,67	3,67	3,67	3,65	3,63	3,61	3,58
	0,6	3,64	3,67	3,68	3,68	3,67	3,64	3,61	3,57	3,53
	0,7	3,61	3,66	3,68	3,67	3,65	3,60	3,56	3,50	3,45
	0,8	3,55	3,62	3,65	3,64	3,60	3,55	3,49	3,43	3,37
	0,9	3,45	3,55	3,60	3,59	3,54	3,47	3,40	3,34	3,28

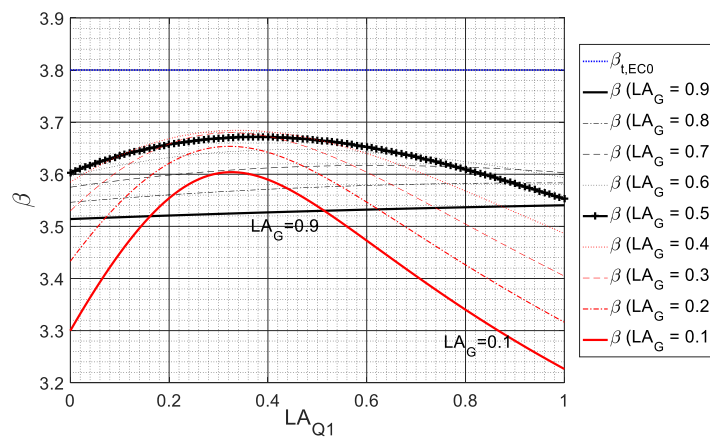


Abb. 6.12: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Windlast in z-Richtung) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $h/b = 1/2$

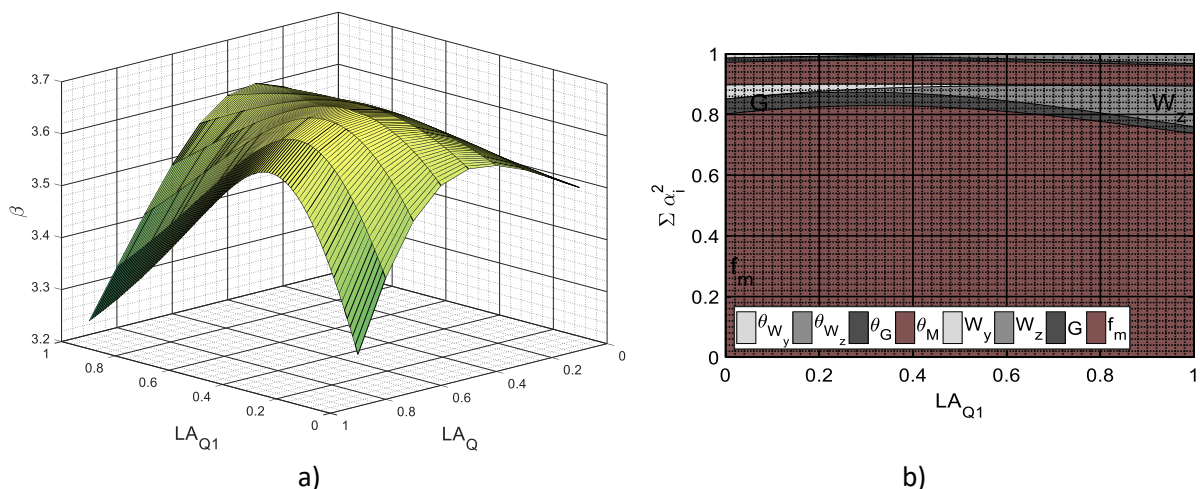


Abb. 6.13: Zuverlässigkeitsindex (a) in 3D- Ansicht und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Windlast in z-Richtung) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall Doppelbiegung,  $h/b = 1/2$

### Einfluss der Modellierung mit korrelierten Widerstandsgrößen

Die Biegefestigkeit kann als einheitliche Widerstandsvariable in z- und in y-Richtung angesetzt werden. Dies ist jedoch nicht ganz korrekt, da die Biegefestigkeit von lokal auftretenden strukturellen Parametern beeinflusst wird, die in natürlich in den Wirkungsrichtungen der Lasten unterschiedlich verteilt sein können. Aus diesem Grund werden vergleichend die Ergebnisse der Modellierung mit zwei getrennten Variablen in z- und y-Richtung unter Beachtung einer Korrelation von  $\rho = 0,8$  dargestellt. Tab. 6.12 und Abb. 6.14 zeigen die Ergebnisse bei Berücksichtigung einer Korrelation der Biegefestigkeit in beide Wirkungsrichtungen mit  $\rho = 0,8$ . Es zeigt sich eine leichte Erhöhung der rechnerischen Zuverlässigkeit, die insbesondere bei hohem Lastanteil der ständigen Last und gleichzeitigem geringem Lastanteil der Windlast in z-Richtung wirksam wird.

Tab. 6.12: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast,  $h/b = 1/2$ , korrelierte Widerstandsvariablen ( $\rho = 0,8$ )

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf gesamte veränderliche Lasten $LA_{Q1}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamlast $LA_Q$	0,1	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
	0,2	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,59	3,59
	0,3	3,66	3,66	3,66	3,66	3,65	3,65	3,64	3,63	3,62
	0,4	3,72	3,72	3,72	3,71	3,70	3,69	3,67	3,64	3,62
	0,5	3,76	3,77	3,77	3,76	3,73	3,70	3,67	3,63	3,59
	0,6	3,78	3,81	3,81	3,78	3,75	3,70	3,65	3,59	3,54
	0,7	3,75	3,81	3,82	3,79	3,73	3,67	3,60	3,53	3,47
	0,8	3,66	3,76	3,80	3,76	3,69	3,61	3,53	3,45	3,38
	0,9	3,53	3,67	3,74	3,71	3,63	3,54	3,45	3,37	3,29

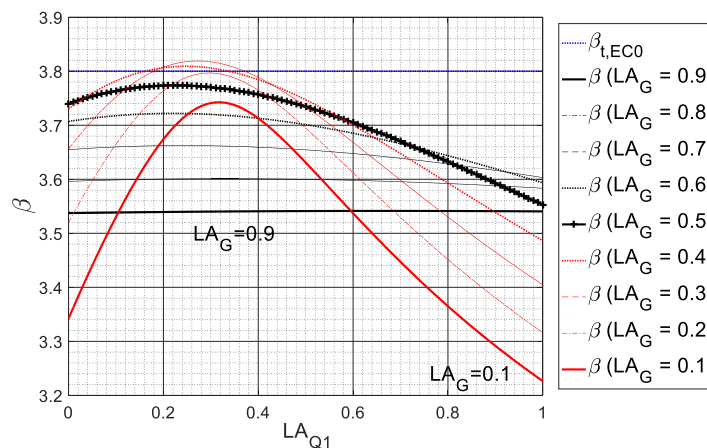


Abb. 6.14: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Windlast in z-Richtung) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Anteile der ständigen Last an der Gesamlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $h/b = 1/2$ , korrelierte Widerstandsvariablen ( $\rho = 0,8$ )

### 6.5.6 Doppelbiegung aus ständiger Last + Schneelast + Windlast

Die ständige Last und die Schneelast werden in z-Richtung, die Windlast in y-Richtung angesetzt. Für diesen Lastfall wurden verschiedene Querschnittsverhältnisse  $b/h$  untersucht. Dargestellt werden die Ergebnisse für  $b/h = 1/2$  und  $b/h = 1/1$ . Die Windlast wirkt bei  $b/h = 1/2$  auf die schwächere Querschnittsseite. Neben der Untersuchung des Einflusses einer Korrelation der Widerstandsgrößen wird



6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

zum Studium des Einflusses eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit auf  $V_R = 0,22$  untersucht. Der Modifikationsbeiwert wird mit  $k_{mod} = 1,0$  angenommen.

*Ergebnisse*

Für einen Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit von  $V_R = 0,25$ , die Modellierung unter Anwendung von einer Variablen für die Biegefestigkeit und dem Querschnittsverhältnis von  $b/h = 1/2$  ergeben sich die Ergebnisse nach Tab. 6.13. Dieser Fall wird als Referenzfall verwendet, mit dem nachfolgend der Einfluss einer Anpassung der benannten Parameter verglichen wird.

Tab. 6.13: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamlast	0,1	3,49	3,48	3,46	3,47	3,48	3,49	3,50	3,50	3,51
	0,2	3,51	3,47	3,43	3,45	3,47	3,49	3,50	3,51	3,52
	0,3	3,52	3,46	3,40	3,43	3,45	3,46	3,48	3,48	3,49
	0,4	3,52	3,44	3,35	3,38	3,40	3,41	3,42	3,41	3,40
	0,5	3,53	3,41	3,29	3,32	3,33	3,33	3,32	3,30	3,28
	0,6	3,52	3,36	3,20	3,23	3,23	3,22	3,20	3,17	3,15
	0,7	3,51	3,30	3,09	3,11	3,10	3,08	3,06	3,03	3,01
	0,8	3,47	3,21	2,94	2,96	2,95	2,94	2,92	2,90	2,88
	0,9	3,42	3,09	2,77	2,79	2,80	2,79	2,78	2,76	2,75

Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei einem geringen Anteil der veränderlichen Last an der Gesamlast der Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta_t = 3,8$  ( $T_{ref} = 50a$ ) nicht erreicht wird. Je nach Anteil der veränderlichen Last an der Gesamlast und der Schneelast an der Gesamlast variiert das erreichte Zuverlässigkeitsniveau zwischen  $\beta = 2,75...3,51$ .

*Einfluss der Modellierung mit korrelierten Widerstandsgrößen*

Die Ergebnisse der Studien bei Modellierung der Biegefestigkeit in z- und y-Richtung als zwei getrennte, korrelierte Basisvariablen wird in Tab. 6.14 dargestellt.

Tab. 6.14: Zuverlässigkeitsindex beispielhaft für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/2$ , Biegefestigkeit als zwei, korrelierte Variablen

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamlast	0,1	3,51	3,49	3,48	3,48	3,49	3,50	3,50	3,51	3,52
	0,2	3,55	3,51	3,47	3,48	3,50	3,51	3,51	3,52	3,53
	0,3	3,59	3,52	3,45	3,47	3,48	3,49	3,50	3,50	3,49
	0,4	3,62	3,52	3,42	3,44	3,45	3,45	3,44	3,43	3,41
	0,5	3,65	3,51	3,38	3,39	3,39	3,37	3,35	3,32	3,29
	0,6	3,67	3,49	3,30	3,31	3,29	3,26	3,23	3,19	3,15
	0,7	3,67	3,43	3,19	3,19	3,16	3,13	3,09	3,05	3,02
	0,8	3,63	3,35	3,05	3,04	3,01	2,98	2,94	2,91	2,88
	0,9	3,54	3,21	2,86	2,87	2,85	2,83	2,80	2,78	2,76

Im Bereich eines großen Lastanteil der ständigen Last an der Gesamlast und geringem Anteil der Schneelast an der veränderlichen Last zeigt sich bei der Modellierung mit zwei korrelierten Variablen

eine Erhöhung der Zuverlässigkeit, siehe Abb. 6.15. Diese Änderungen beschränken sich auf den Bereich eines geringen Anteils der Schneelast und sind besonders stark bei einem großen Anteil der ständigen Last zu erkennen. Bei einem hohen Anteil der Schneelast stimmen die Graphen überein. Auch bei Betrachtung der Sensitivitätsfaktoren (Abb. 6.16) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Die Modellierung mittels einer Widerstandsvariablen für die Biegefestigkeit ist somit für diesen Lastfall hinreichend genau und für die Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte leicht auf der sicheren Seite.

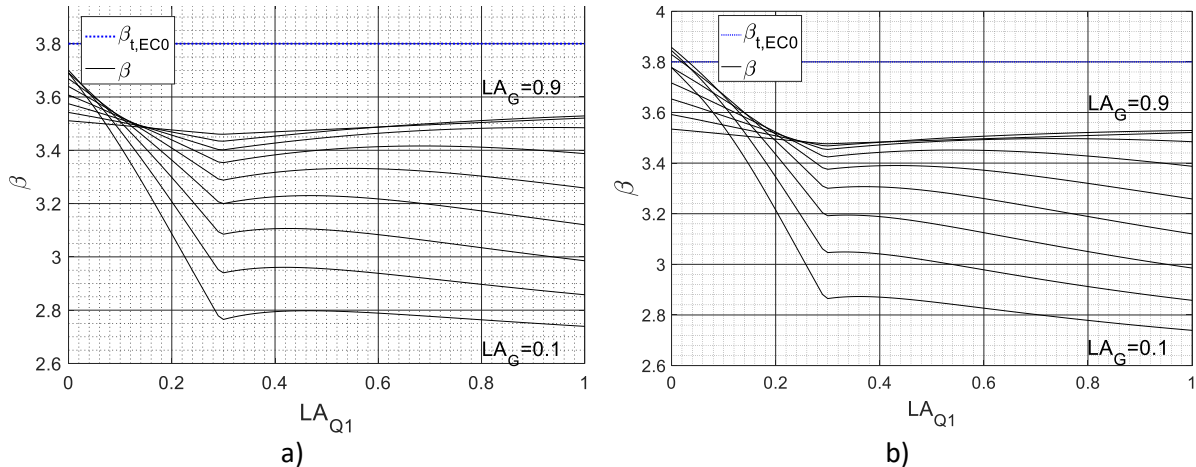


Abb. 6.15: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung,

a) eine Variable für die Biegefestigkeit in z- und y- Richtung, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ )

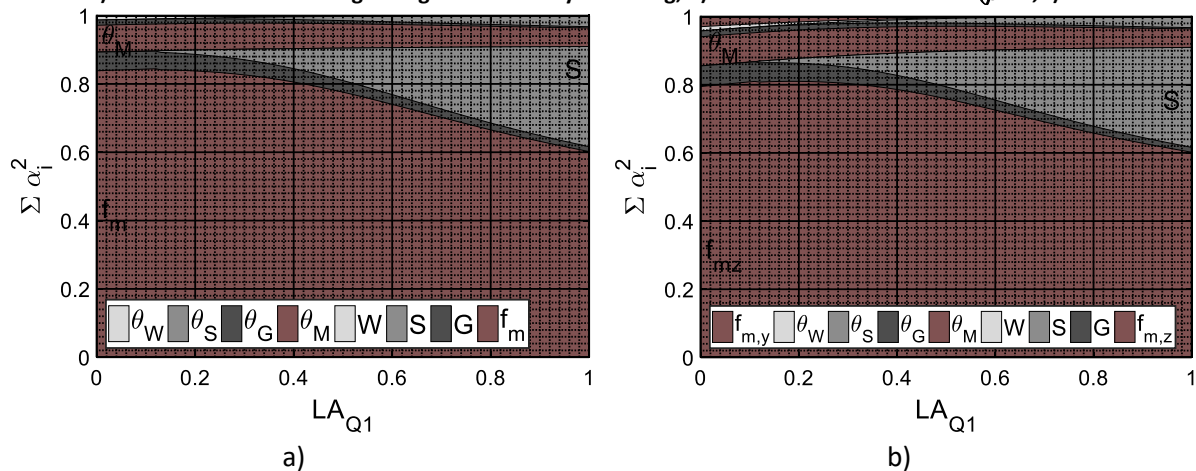


Abb. 6.16: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung,

a) eine Variable für die Biegefestigkeit in z- und y- Richtung, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ )

Vergleichend mit den Studien zur Einfachbiegung zeigt sich bei der Doppelbiegung bei Erhöhung des Anteils der Schneelast ein schnellerer Abfall der Zuverlässigkeit. Der Bemessungsknick ist im Vergleich zu Abb. 6.11 deutlich nach links verschoben. Die Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.3 (Seite 55 ff.) zeigen durch die Aufteilung der Biegefestigkeit in eine Variable für die z- und eine für die y-Richtung, dass der Einfluss der Biegefestigkeit in y-Richtung für hohe Anteile der darauf wirkenden Windlast erst ab einem Anteil der veränderlichen Last an der Gesamtlast von  $LA_Q \geq 0,7$  zu sehen ist.

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

*Einfluss des Querschnittsverhältnisses*

Vergleichend werden Analysen für quadratische Querschnitte geführt. Diese sind eher unüblich und werden zur Verdeutlichung des Einflusses auf die Zuverlässigkeit als Extremfall modelliert. Das veränderte Querschnittsverhältnis hin zu einem quadratischen Querschnitt zeigt im Bereich eines hohen Anteils der veränderlichen Last, speziell bei einem hohen Anteil der Windlast, einen erhöhenden Einfluss auf die rechnerische Zuverlässigkeit. Bis zu dieser Stelle (vor dem „Bemessungsknick“) ist die in y-Richtung wirkende Windlast die bemessungsrelevante Last. Aufgrund der Forderung nach einem quadratischen Querschnittsverhältnis führt dies zu einem größeren Querschnitt, der Bemessungsknick verschiebt sich nach rechts. Dies wirkt sich erhöhend auf die Zuverlässigkeit aus, da der stark streuenden, und damit statistisch ungünstiger Schneelast ein größerer Bemessungsparameter entgegengesetzt wird. Die Betrachtung der Sensitivitätsfaktoren zeigen für  $LA_G = 0,5$  keinen signifikanten Unterschied. Auch die Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.3 (Seite 55 ff.) für weitere Lastverhältnisse ergeben keine besonders hervorzuhebenden Abweichungen. Die Ergebnisse werden in Tab. 6.15, sowie Abb. 6.17 und Abb. 6.18 dargestellt.

Tab. 6.15: Zuverlässigkeitsindex beispielhaft für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/1$

		Anteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,52	3,50	3,48	3,46	3,45	3,47	3,48	3,49	3,51
	0,2	3,55	3,51	3,47	3,43	3,42	3,45	3,47	3,49	3,51
	0,3	3,57	3,52	3,46	3,39	3,37	3,40	3,43	3,45	3,47
	0,4	3,59	3,51	3,43	3,34	3,30	3,34	3,36	3,38	3,39
	0,5	3,60	3,50	3,39	3,26	3,21	3,25	3,27	3,27	3,27
	0,6	3,60	3,48	3,34	3,18	3,11	3,14	3,15	3,15	3,14
	0,7	3,58	3,44	3,27	3,08	2,99	3,01	3,02	3,02	3,00
	0,8	3,56	3,40	3,20	2,97	2,86	2,88	2,89	2,89	2,87
	0,9	3,53	3,35	3,12	2,85	2,72	2,75	2,76	2,76	2,75

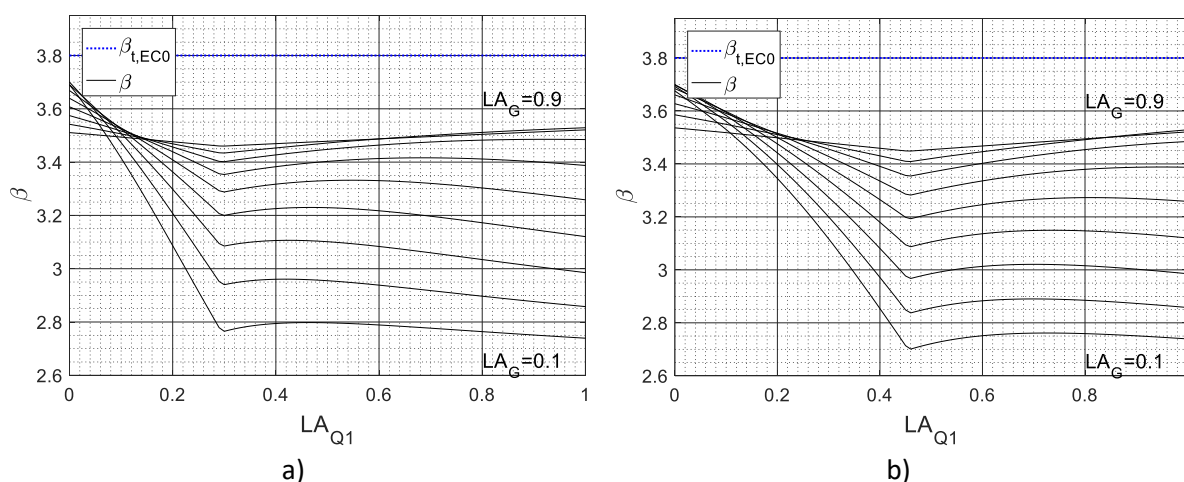


Abb. 6.17: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b):  $b/h = 1/1$

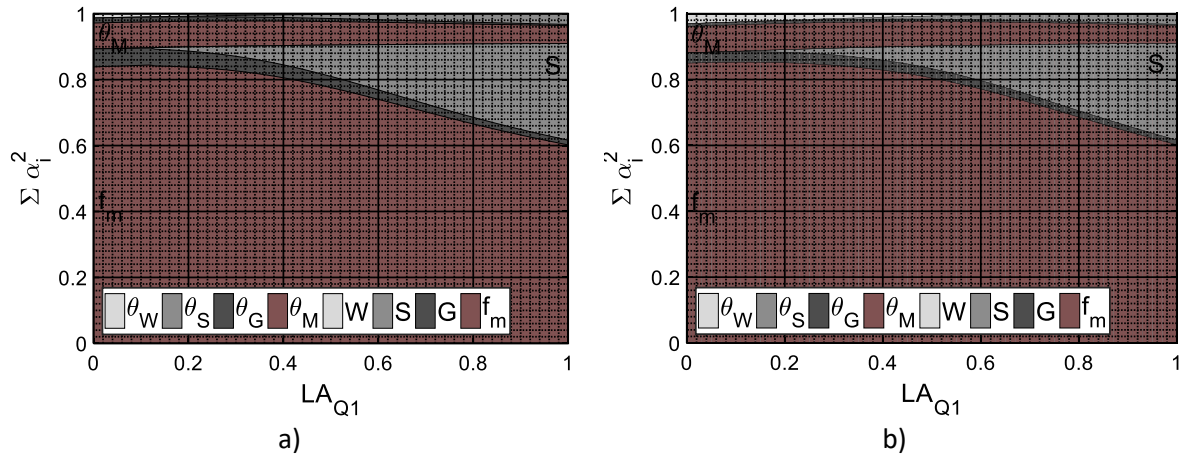


Abb. 6.18: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1/1$

### *Einfluss einer Reduktion des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit*

Die Reduktion des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit führt zu einer durchgängigen Erhöhung der Zuverlässigkeit über alle Lastverhältnisse, siehe Abb. 6.19. Dies ist durch großen Einfluss dieser auf die rechnerische Zuverlässigkeit begründet, den auch die Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.3 (Anhang S. 32 ff.) zeigen. Am geringsten ist der Einfluss bei hohem Lastanteil der Schneelast, da diese einen hohen Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat. Die Sensitivitätsstudien werden vergleichend für  $V_R = 0,25$  und  $V_R = 0,22$  bei Querschnittsverhältnissen von  $b/h = 1/1$  und  $b/h = 1/2$  durchgeführt.

Tab. 6.16: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,22$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/2$

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,70	3,68	3,66	3,64	3,65	3,66	3,66	3,67	3,68
	0,2	3,77	3,72	3,68	3,63	3,65	3,66	3,67	3,68	3,69
	0,3	3,83	3,76	3,69	3,62	3,64	3,65	3,66	3,66	3,65
	0,4	3,90	3,80	3,69	3,58	3,60	3,61	3,60	3,58	3,56
	0,5	3,97	3,84	3,68	3,53	3,54	3,52	3,50	3,46	3,42
	0,6	4,03	3,86	3,65	3,44	3,43	3,40	3,35	3,30	3,26
	0,7	4,06	3,85	3,59	3,31	3,29	3,24	3,19	3,14	3,09
	0,8	4,05	3,81	3,48	3,14	3,11	3,07	3,02	2,98	2,94
	0,9	3,98	3,72	3,33	2,92	2,91	2,88	2,85	2,82	2,79

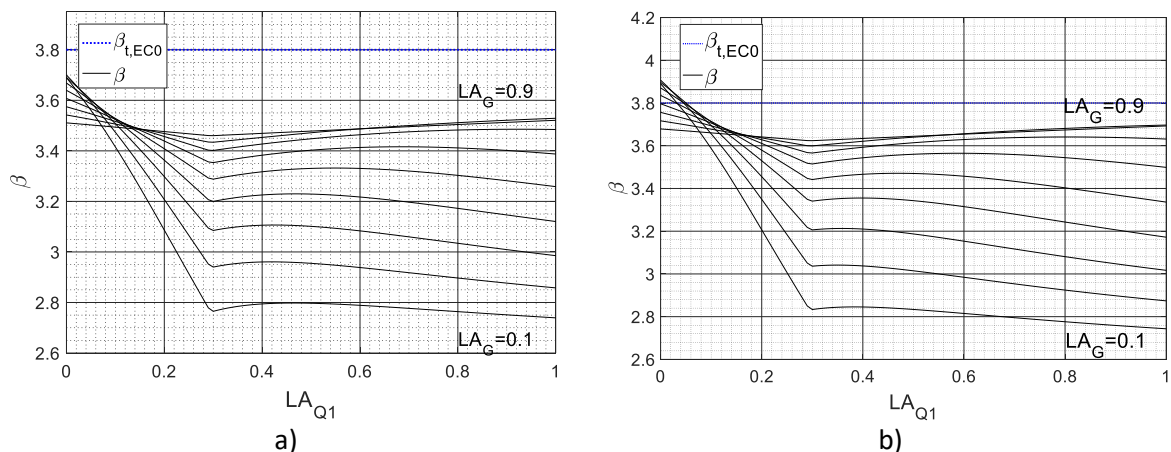


Abb. 6.19: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $b/h = 1/2$   
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

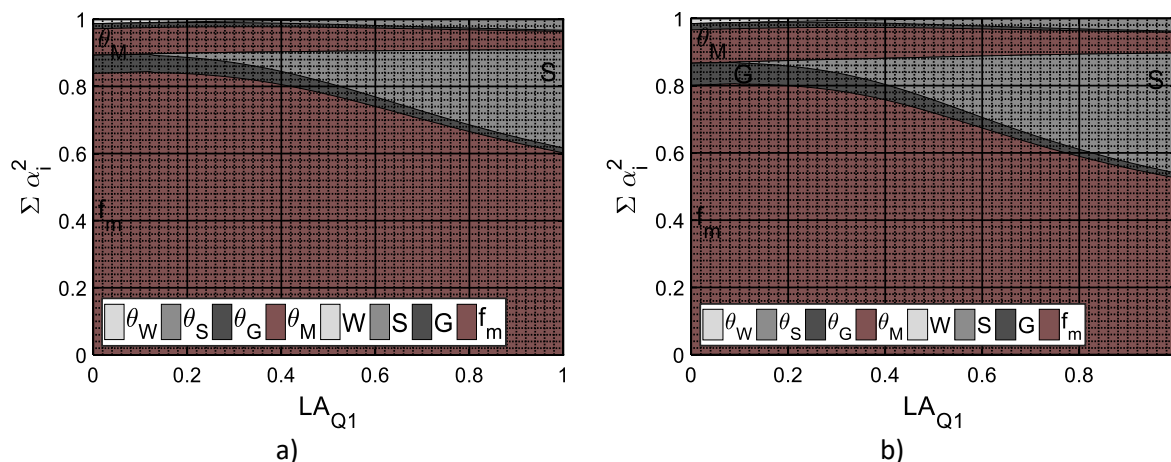


Abb. 6.20: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $b/h = 1/2$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$ ,  $LA_G = 0,5$

6.5.7 Doppelbiegung aus ständiger Last + Nutzlast + Windlast

Es werden die ständige Last und die Nutzlast in z-Richtung, die Windlast in y-Richtung angesetzt. Der Modifikationsbeiwert ist in diesem Lastfall mit  $k_{mod} = 1,0$  angenommen.

Einfluss des Querschnittsverhältnisses

Die Querschnittsverhältnisse  $b/h = 1/2$  und  $b/h = 1/1$  werden betrachtet. Die Windlast wirkt bei einem Verhältnis von  $b/h = 1/2$  auf die schwächere Querschnittsseite. Tab. 6.17, Tab. 6.18, sowie Abb. 6.21 bis Abb. 6.22 zeigen die erreichte Zuverlässigkeit für  $V_N = 0,25$ . Abb. 6.22 zeigt vergleichend die Sensitivitätsfaktoren bei  $LA_G = 0,5$  vergleichend für  $b/h = 1/1$  und  $b/h = 1/2$ .

Tab. 6.17: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/2$

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,50	3,48	3,46	3,47	3,48	3,49	3,50	3,51	3,51
	0,2	3,51	3,47	3,44	3,46	3,47	3,49	3,50	3,51	3,52
	0,3	3,52	3,46	3,40	3,43	3,45	3,46	3,48	3,48	3,49
	0,4	3,52	3,44	3,36	3,38	3,40	3,41	3,42	3,41	3,40
	0,5	3,50	3,40	3,29	3,32	3,33	3,33	3,32	3,30	3,28
	0,6	3,47	3,35	3,20	3,23	3,23	3,22	3,20	3,17	3,15
	0,7	3,41	3,27	3,09	3,11	3,10	3,09	3,06	3,04	3,01
	0,8	3,31	3,16	2,94	2,96	2,96	2,94	2,92	2,90	2,88
	0,9	3,18	3,02	2,77	2,80	2,80	2,79	2,78	2,76	2,75

Tab. 6.18: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/1$

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,52	3,50	3,48	3,46	3,46	3,47	3,48	3,50	3,51
	0,2	3,55	3,51	3,47	3,43	3,42	3,45	3,47	3,49	3,51
	0,3	3,56	3,51	3,45	3,39	3,37	3,40	3,43	3,45	3,47
	0,4	3,54	3,48	3,41	3,34	3,30	3,34	3,36	3,38	3,39
	0,5	3,50	3,43	3,36	3,27	3,21	3,25	3,27	3,27	3,27
	0,6	3,43	3,37	3,29	3,18	3,11	3,14	3,15	3,15	3,14
	0,7	3,35	3,29	3,20	3,09	2,99	3,02	3,02	3,02	3,00
	0,8	3,26	3,19	3,10	2,98	2,86	2,89	2,89	2,89	2,87
	0,9	3,17	3,10	3,00	2,86	2,73	2,75	2,76	2,76	2,75

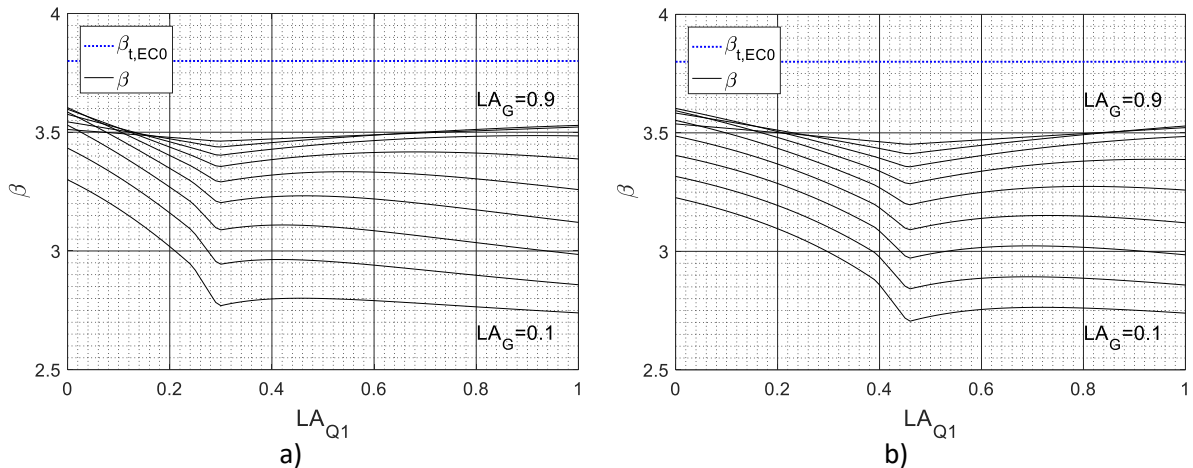


Abb. 6.21: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1/1$

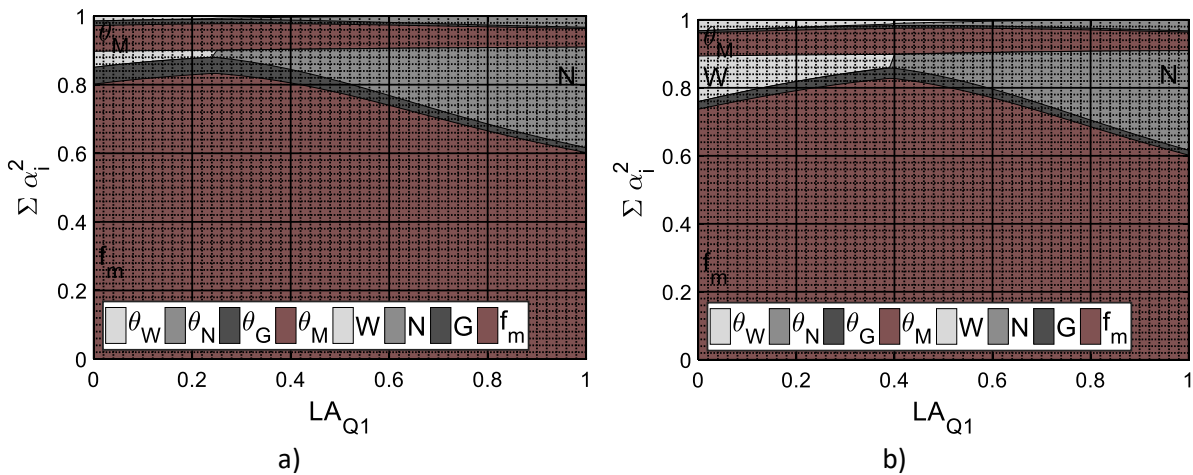


Abb. 6.22: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1/1$ ,

Bei der Beanspruchungskombination Windlast und Nutzlast zeigt sich im Vergleich zur Kombination Windlast und Schneelast bei hohem Windlastanteil (bis ca.  $LA_{Q2} = 0,7$ ) eine höhere Sensitivität der Zuverlässigkeit von der Windlast. Der Bemessungsknick ist gegenüber der Kombination aus Eigenlast, Schneelast und Windlast nur leicht verschoben. Deutlich zu sehen ist, ab welchem Lastverhältnis die jeweils andere veränderliche Last maßgebend wird. Auch in der Darstellung der Sensitivitätsfaktoren in Anhang 10.9.4 (S. 64 ff.) lässt sich der Punkt erkennen, bei welchem dies bei der Zuverlässigkeitsanalyse der Fall ist. In der Darstellung des Zuverlässigkeitsindex zeigt der Knick der Graphen den Punkt an, ab welchem sich der Bemessungsparameter ändert, d.h. ab welchem Punkt in der semi-probabilistischen Bemessung die andere veränderliche Variable maßgebend wird. Beide Punkte, der Knick in den Zuverlässigkeitskurven und die veränderten Sensitivitäten, liegen nicht genau übereinander. Dies ist den Vereinfachungen im semi-probabilistischen Modell und der Modellbildung des probabilistischen Modells geschuldet. Der deutliche Schnitt in der Darstellung der Sensitivitätsfaktoren zwischen Wind- und Nutzlast ist in dieser Art bei der Überlagerung von Windlasten mit Schneelasten so nicht zu

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

erkennen. Dies ist auf die Annahme der durchgängigen Wirkung von Wind- und Nutzlasten mit unterschiedlicher Anzahl von Lastwechseln zurückzuführen. Schneelasten wirken zeitlich begrenzt. Bei Anwendung der Lastkombination nach *Ferry Borges & Castanheta* [103] entsteht so ein stetiger Übergang der Sensitivitätenverteilung. Auch in diesem Lastfall wird der Zielwert von  $\beta = 3,8$  nicht erreicht.

*Einfluss einer Erhöhung des Variationskoeffizienten der Nutzlast*

Vergleichend zu den vorhergehend dargestellten Untersuchungen werden die Ergebnisse bei Anwendung von  $V_N = 0,40$  (kleine Räume mit großer Lastfluktuation) dargestellt und vergleichend der Einfluss einer Reduktion des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit von  $V_R = 0,25$  auf  $V_R = 0,22$  untersucht. Dies wurde für einen Variationskoeffizienten der Nutzlast von  $V_N = 0,25$  nicht vergleichend ausgewiesen, da dies bei der Überlagerung mit Schneelast erfolgt und die Ergebnisse im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  vergleichbar sind. Hier fällt der Einfluss des veränderten Modifikationsbeiwertes  $k_{mod}$  geringer ins Gewicht, als bei ausschließlich ständigen Lasten.

Tab. 6.19: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,40$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/2$

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,49	3,48	3,46	3,46	3,47	3,47	3,48	3,48	3,48
	0,2	3,51	3,47	3,42	3,43	3,43	3,43	3,43	3,42	3,41
	0,3	3,51	3,45	3,37	3,37	3,36	3,34	3,32	3,29	3,25
	0,4	3,51	3,42	3,30	3,27	3,24	3,20	3,15	3,10	3,04
	0,5	3,50	3,37	3,20	3,14	3,08	3,02	2,95	2,89	2,83
	0,6	3,46	3,30	3,06	2,97	2,90	2,82	2,76	2,69	2,64
	0,7	3,40	3,20	2,88	2,78	2,70	2,63	2,57	2,51	2,46
	0,8	3,29	3,06	2,68	2,57	2,50	2,44	2,39	2,34	2,30
	0,9	3,16	2,90	2,46	2,36	2,31	2,26	2,22	2,19	2,16

Tab. 6.20: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,22$ ,  $V_N = 0,40$ , Lastfall Doppelbiegung,  $b/h = 1/2$

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,66	3,64	3,62	3,62	3,63	3,64	3,64	3,64	3,65
	0,2	3,68	3,63	3,59	3,59	3,59	3,59	3,58	3,57	3,55
	0,3	3,69	3,62	3,53	3,52	3,50	3,48	3,44	3,39	3,35
	0,4	3,69	3,58	3,45	3,40	3,36	3,29	3,23	3,16	3,10
	0,5	3,67	3,53	3,32	3,24	3,16	3,08	3,00	2,92	2,86
	0,6	3,62	3,44	3,15	3,04	2,94	2,85	2,77	2,70	2,64
	0,7	3,54	3,32	2,95	2,82	2,72	2,64	2,56	2,50	2,45
	0,8	3,41	3,16	2,72	2,59	2,50	2,43	2,37	2,32	2,28
	0,9	3,24	2,96	2,48	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12

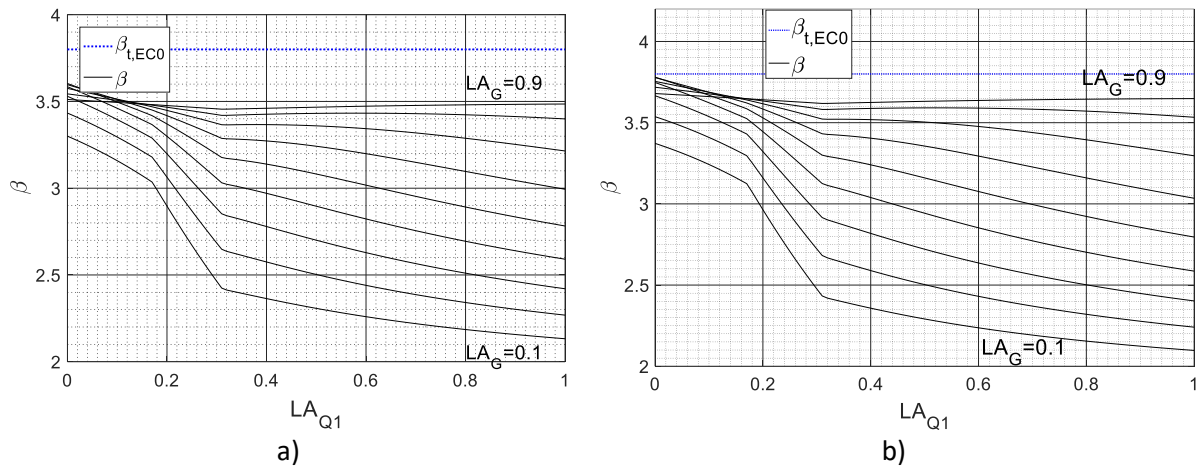


Abb. 6.23: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_N = 0,40$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

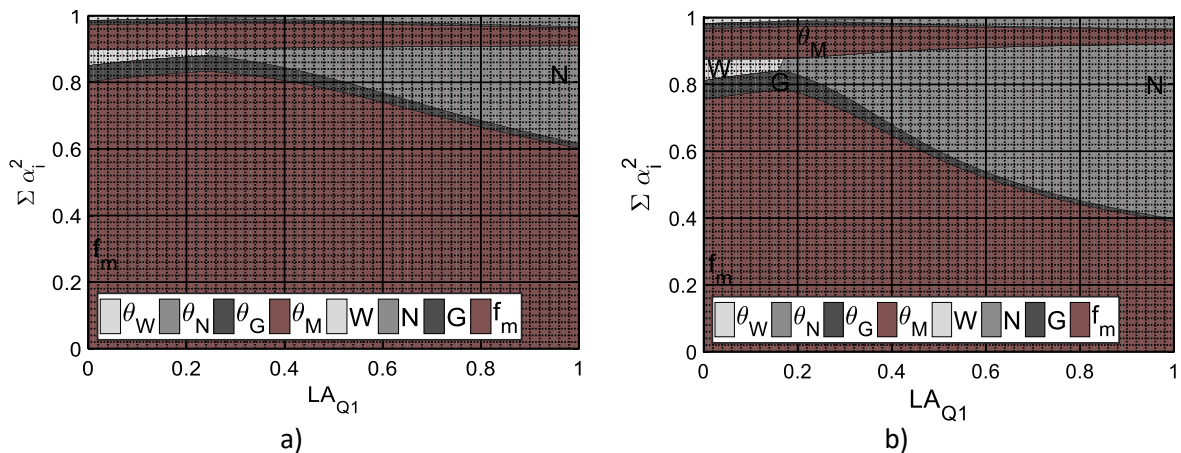


Abb. 6.24: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last,  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_N = 0,40$ ,  $b/h = 1/2$ ,  $LA_G = 0,5$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

Aufgrund der höheren Lastvariabilität zeigt sich eine deutliche Reduktion der Zuverlässigkeit. Erwartungsgemäß ist die Zuverlässigkeit im Bereich eines höheren Anteils der Last 1 (Nutzlast) deutlich reduziert, während sie im Bereich dominanter Windlast mit den vorherigen Studien vergleichbar ist. Umfangreiche Sensitivitätsstudien im Anhang 10.9.4 (S. 67 ff.) zeigen deutlich den steigenden Einfluss der veränderlichen Lasten auf die Zuverlässigkeit mit steigendem Lastanteil. Zudem zeigt sich der beschriebene „Bemessungsknick“ auch bei Betrachtung der Sensitivitätsfaktoren durch einen erhöhten Wert und damit größerem Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Materialfestigkeit bei ca.  $LA_{Q1} = 0,4$  (leicht variierend, abhängig vom Anteil der ständigen Last an der Gesamlast  $LA_G$ ). Die Reduktion des Variationskoeffizienten der Festigkeit wirkt insgesamt im Bereich eines hohen ständigen Lastanteils und insbesondere im Bereich geringerer Nutzlasten erhöhend auf die Zuverlässigkeit. Somit wird für einen Anteil der ständigen Last von  $LA_G = 0,9$  der Zielwert von  $\beta_t = 3,8$  für  $T_{ref} = 50a$  erreicht.

### 6.5.8 Druck & Biegung aus ständiger Last + Schneelast + Windlast

Tab. 6.21, Tab. 6.22, Abb. 6.25 und Abb. 6.26 zeigen die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse bei kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung. Die ständige Last und die Schneelast wurden als Druckbeanspruchung in Faserrichtung wirkend (x-Richtung), die Windlast als Biegebeanspruchung (y- oder



6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

z-Richtung), angesetzt. Natürlich kann auch eine Windlast eine Drucknormalkraft im Bauteil erzeugen, diese ist jedoch unter den angenommenen Modellierungsparametern günstiger, als eine Beanspruchung aus Schnee. Die Druck- und die Biegefestigkeit des Holzes wurden als korrelierte Größen mit  $\rho = 0,8$  modelliert. An dieser Stelle ist zu betonen, dass für die Festlegung der Lastverhältnisse nicht mehr Lasten, sondern Lastwirkungen betrachtet werden (Spannungen), um die Vergleichbarkeit der Einwirkungen in Form von Lastverhältnissen bzw. Spannungsverhältnissen zu wahren. Da geometrische Parameter jedoch als deterministisch betrachtet werden, hat dies keinen weiteren Einfluss auf die folgende Betrachtung. Der Modifikationsbeiwert ist in diesem Lastfall mit  $k_{mod} = 1,0$  angenommen.

Tab. 6.21: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$ , Verhältnis  $b/h = 1/2$ , Lastfall Druck & Biegung

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,71	3,71	3,73	3,74	3,76	3,77	3,78	3,80	3,81
	0,2	3,64	3,65	3,68	3,71	3,74	3,76	3,78	3,80	3,81
	0,3	3,56	3,58	3,63	3,67	3,70	3,72	3,73	3,74	3,74
	0,4	3,46	3,48	3,54	3,59	3,62	3,63	3,62	3,61	3,59
	0,5	3,33	3,35	3,43	3,47	3,48	3,48	3,46	3,44	3,41
	0,6	3,18	3,17	3,26	3,30	3,31	3,29	3,27	3,25	3,22
	0,7	2,99	2,94	3,05	3,09	3,10	3,09	3,07	3,06	3,05
	0,8	2,80	2,64	2,79	2,85	2,87	2,88	2,88	2,88	2,88
	0,9	2,69	2,28	2,48	2,58	2,64	2,67	2,70	2,72	2,73

Tab. 6.22: Zuverlässigkeitsindex für  $V_R = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$ , Verhältnis  $b/h = 1/1$ , Lastfall Druck & Biegung

		Lastanteil der Schneelast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,73	3,75	3,76	3,77	3,78	3,79	3,80	3,80	3,81
	0,2	3,70	3,72	3,74	3,77	3,78	3,80	3,81	3,81	3,82
	0,3	3,65	3,69	3,72	3,75	3,76	3,77	3,77	3,76	3,75
	0,4	3,59	3,65	3,68	3,70	3,70	3,69	3,67	3,64	3,61
	0,5	3,52	3,58	3,61	3,61	3,59	3,55	3,51	3,46	3,42
	0,6	3,40	3,48	3,49	3,46	3,41	3,36	3,32	3,27	3,23
	0,7	3,22	3,31	3,30	3,26	3,21	3,16	3,12	3,09	3,06
	0,8	2,95	3,06	3,05	3,01	2,98	2,95	2,93	2,91	2,89
	0,9	2,49	2,69	2,73	2,74	2,75	2,75	2,74	2,74	2,74

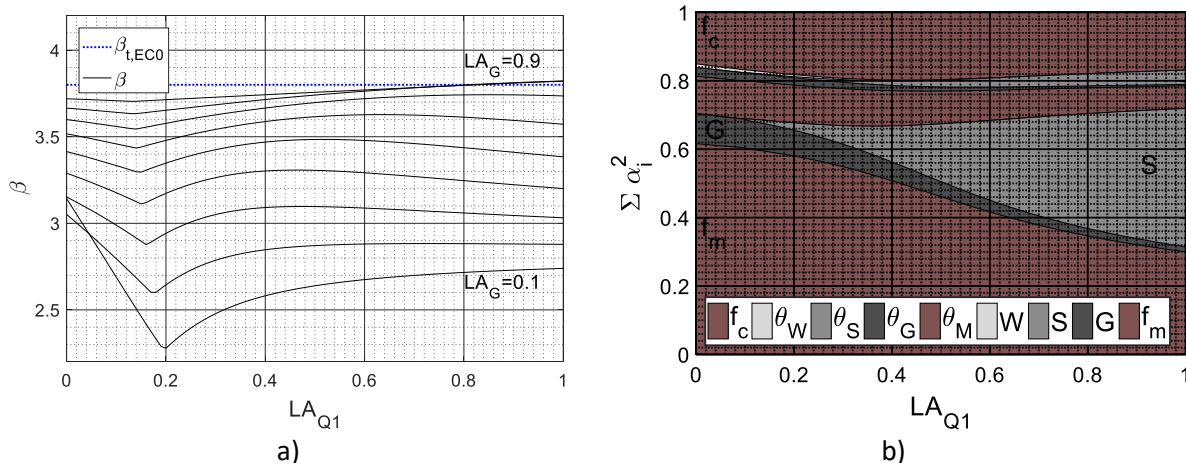


Abb. 6.25: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/2$  Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

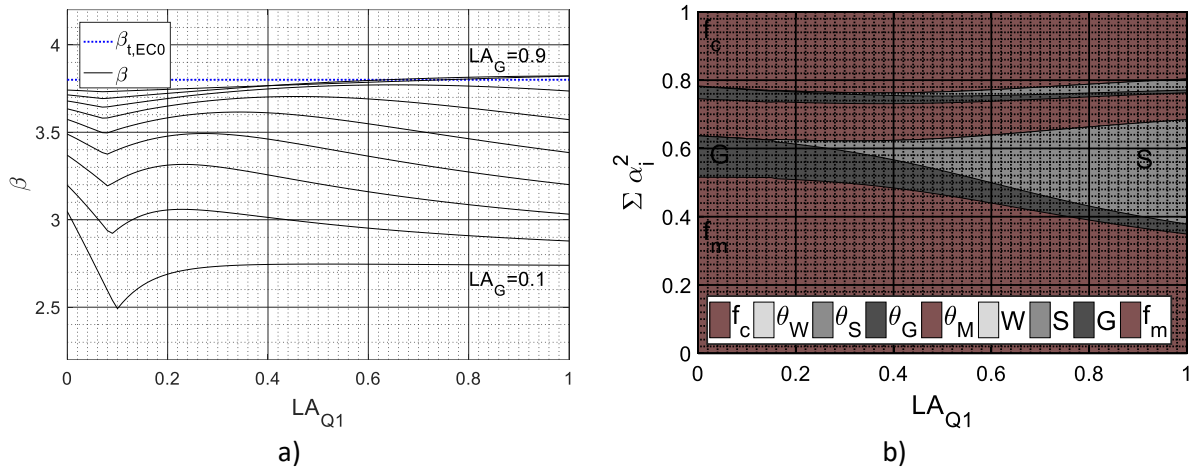


Abb. 6.26: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

Die Kurven zeigen nach dem „Bemessungsknick“ einen fast horizontalen Verlauf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Windlast mit einem geringeren Variationskoeffizienten eine Biegebeanspruchung hervorruft. Die Biegefestigkeit wird mit einem größeren Variationskoeffizienten modelliert als die Druckfestigkeit. Letztere wird durch die stärker streuende Schneelast beansprucht.

Vergleichend wurden Studien ohne Berücksichtigung einer Korrelation der Festigkeitseigenschaften durchgeführt. Die Berücksichtigung der Korrelation wie angegeben resultiert in einem etwas homogenerem Zuverlässigkeitsniveau bei Variation des Anteils der veränderlichen Lastwirkungen. Zudem ergibt sich ein etwas geringeres Zuverlässigkeitsniveau als bei Annahme statistischer Unabhängigkeit. Die erreichte Zuverlässigkeit zeigte sich deutlich sensitiv bezüglich des Einflusses Materialfestigkeiten und der Modellunsicherheit des Materialmodells, wie die Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.5 (S. 70 ff.) zeigen. Das veränderte Verhältnis  $h/b$  wirkt sich moderat auf die rechnerische Zuverlässigkeit aus. Jedoch zeigt sich ein erhöhter Einfluss der Windlast bei einem Verhältnis  $h/b = 1/2$ . Dies ist erwartungsgemäß auf das Wirken der Windlast in der schwächeren Querschnittsachse zurückzuführen und zeigt sich deutlich erst bei einem hohen Lastanteil der veränderlichen Lasten.

### 6.5.9 Druck & Biegung aus ständiger Last + Nutzlast + Windlast

Variationskoeffizient der Nutzlast:  $V_N = 0,25$

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse bei kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung aus ständiger Last, Nutz- und Windlast bei Lastüberlagerung mit der *Ferry Borges & Castanheta* [103] Lastkombinationsregel werden dargestellt. Die ständige Last und die Nutzlast wurden als Druckbeanspruchung in Faserrichtung (x-Richtung), die Windlast als Biegebeanspruchung wirkend (y- oder z-Richtung) angesetzt. Zunächst werden die Ergebnisse der Parameterstudien für  $V_N = 0,25$  (großer Raum mit normaler bzw. kleiner Fluktuation, kleiner Raum mit geringer Fluktuation) präsentiert (siehe Tab. 6.23, Tab. 6.24, Abb. 6.27, Abb. 6.28). Der Modifikationsbeiwert ist in diesem Lastfall  $k_{mod} = 1,0$ .

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

Die Windlast wurde auf die schwächere Querschnittsseite wirkend (bei  $b/h = 1/2$  relevant) angesetzt. Aus diesem Grund zeigt sich für einen geringen Anteil ständiger Last und einen hohen Anteil der Windlast an den veränderlichen Lasten eine reduzierte Zuverlässigkeit. Diese Reduktion ist auch anhand der Sensitivitätsanalysen in Anhang 10.9.6 (S.73 ff.) ausgelöst durch einen deutlichen Anteil der Windlast bis ca.  $LA_{Q1} = 0,20$  zu erkennen und wird besonders ab einem Lastanteil der veränderlichen Last von  $LA_Q \geq 0,7$  deutlich. Der Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta_t = 3,8$  wird für hohe Anteile ständiger Last ( $LA_G \geq 0,8$ ) bei beiden Querschnittsverhältnissen erreicht.

Tab. 6.23: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,25$ , Verhältnis  $b/h = 1/2$ , Lastfall Druck & Biegung

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,71	3,72	3,73	3,74	3,76	3,77	3,78	3,80	3,81
	0,2	3,64	3,66	3,69	3,72	3,74	3,76	3,78	3,80	3,81
	0,3	3,56	3,58	3,63	3,67	3,70	3,72	3,73	3,74	3,74
	0,4	3,45	3,48	3,54	3,59	3,62	3,63	3,62	3,61	3,59
	0,5	3,32	3,35	3,42	3,47	3,48	3,48	3,46	3,44	3,41
	0,6	3,14	3,17	3,26	3,30	3,31	3,29	3,27	3,25	3,22
	0,7	2,92	2,94	3,05	3,09	3,10	3,09	3,07	3,06	3,05
	0,8	2,69	2,64	2,79	2,85	2,87	2,88	2,88	2,88	2,88
	0,9	2,53	2,28	2,48	2,58	2,64	2,67	2,70	2,72	2,73

Tab. 6.24: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,25$ , Verhältnis  $b/h = 1/1$ , Lastfall Druck & Biegung

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,74	3,75	3,76	3,77	3,78	3,79	3,79	3,80	3,81
	0,2	3,70	3,72	3,75	3,77	3,78	3,80	3,81	3,81	3,82
	0,3	3,66	3,69	3,72	3,75	3,76	3,77	3,77	3,76	3,75
	0,4	3,60	3,65	3,68	3,70	3,70	3,69	3,67	3,64	3,61
	0,5	3,52	3,58	3,61	3,61	3,59	3,55	3,51	3,46	3,42
	0,6	3,40	3,48	3,49	3,46	3,41	3,36	3,32	3,27	3,23
	0,7	3,22	3,31	3,30	3,26	3,21	3,16	3,12	3,09	3,06
	0,8	2,94	3,06	3,05	3,01	2,98	2,95	2,93	2,91	2,89
	0,9	2,48	2,69	2,73	2,74	2,75	2,75	2,74	2,74	2,74

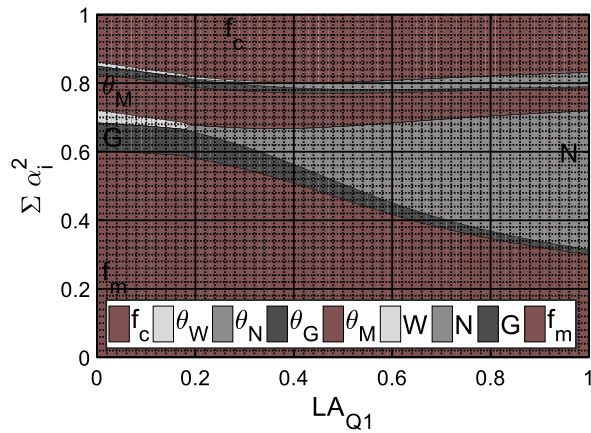
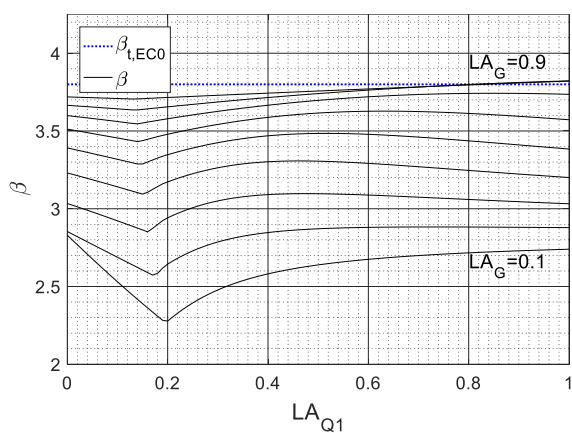


Abb. 6.27: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/2$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

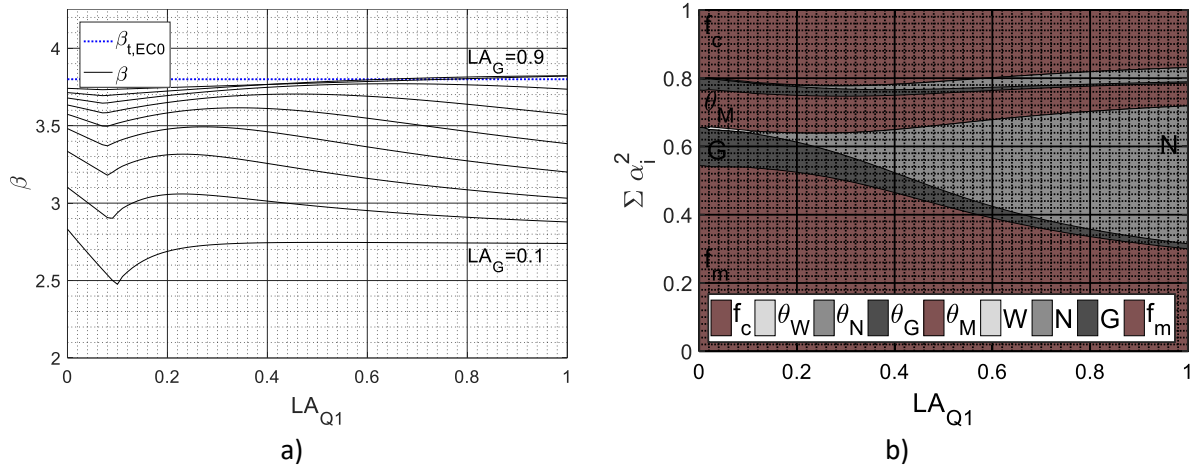


Abb. 6.28: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

Variationskoeffizient der Nutzlast:  $V_N = 0,40$

Vergleichend zeigen Tab. 6.25, Tab. 6.26, Abb. 6.29 und Abb. 6.30 die Ergebnisse für  $V_N = 0,40$  (kleiner Raum mit großer Lastfluktuation). Aufgrund der höheren Variabilität der Nutzlast zeigen sich deutlich reduzierte Zuverlässigkeiten in Bereichen mit einem hohen Lastanteil der Nutzlast an der Gesamtlast.

Tab. 6.25: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,40$ , Verhältnis  $b/h = 1/2$ , Lastfall Druck & Biegung

		Anteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,71	3,71	3,72	3,73	3,74	3,75	3,76	3,76	3,77
	0,2	3,64	3,64	3,66	3,67	3,68	3,68	3,68	3,67	3,65
	0,3	3,55	3,55	3,57	3,57	3,56	3,53	3,49	3,45	3,40
	0,4	3,45	3,42	3,44	3,41	3,36	3,30	3,23	3,17	3,11
	0,5	3,30	3,26	3,24	3,19	3,11	3,04	2,97	2,90	2,85
	0,6	3,12	3,03	2,99	2,92	2,84	2,77	2,71	2,66	2,61
	0,7	2,90	2,74	2,70	2,63	2,57	2,52	2,48	2,44	2,41
	0,8	2,66	2,38	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26	2,24	2,23
	0,9	2,51	2,02	2,03	2,05	2,06	2,06	2,06	2,07	2,07

Tab. 6.26: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,40$ , Verhältnis  $b/h = 1/1$ , Lastfall Druck & Biegung

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamtlast	0,1	3,73	3,74	3,75	3,75	3,76	3,77	3,77	3,77	3,77
	0,2	3,69	3,71	3,72	3,72	3,72	3,72	3,70	3,68	3,66
	0,3	3,64	3,66	3,66	3,65	3,62	3,58	3,52	3,46	3,40
	0,4	3,57	3,59	3,57	3,51	3,43	3,35	3,26	3,19	3,12
	0,5	3,48	3,47	3,40	3,29	3,18	3,08	2,99	2,92	2,86
	0,6	3,34	3,29	3,16	3,02	2,91	2,82	2,74	2,68	2,62
	0,7	3,12	3,02	2,86	2,74	2,64	2,57	2,51	2,46	2,42
	0,8	2,78	2,66	2,53	2,44	2,38	2,33	2,29	2,26	2,24
	0,9	2,30	2,22	2,18	2,14	2,12	2,10	2,09	2,08	2,08

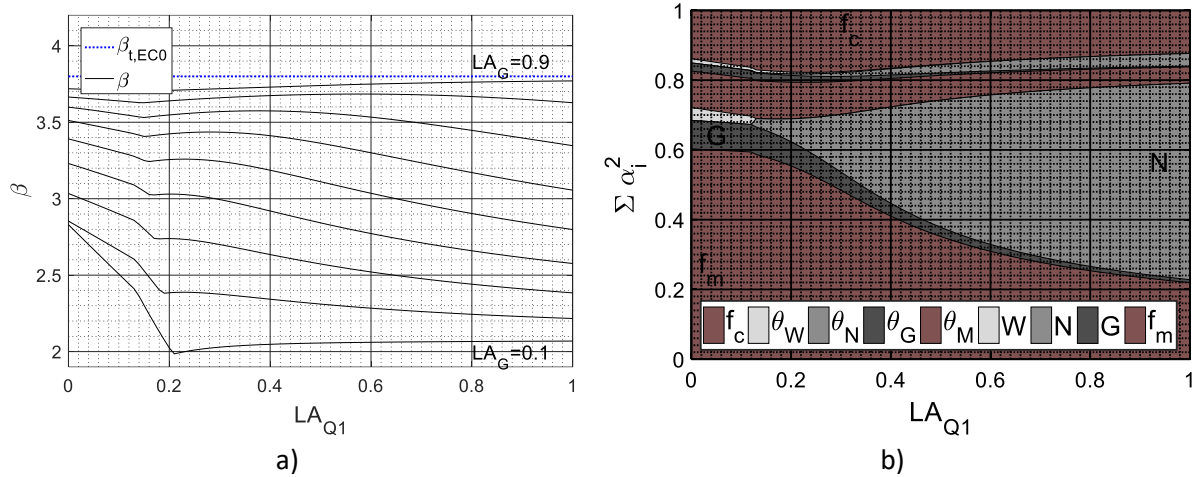


Abb. 6.29: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,40$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/2$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

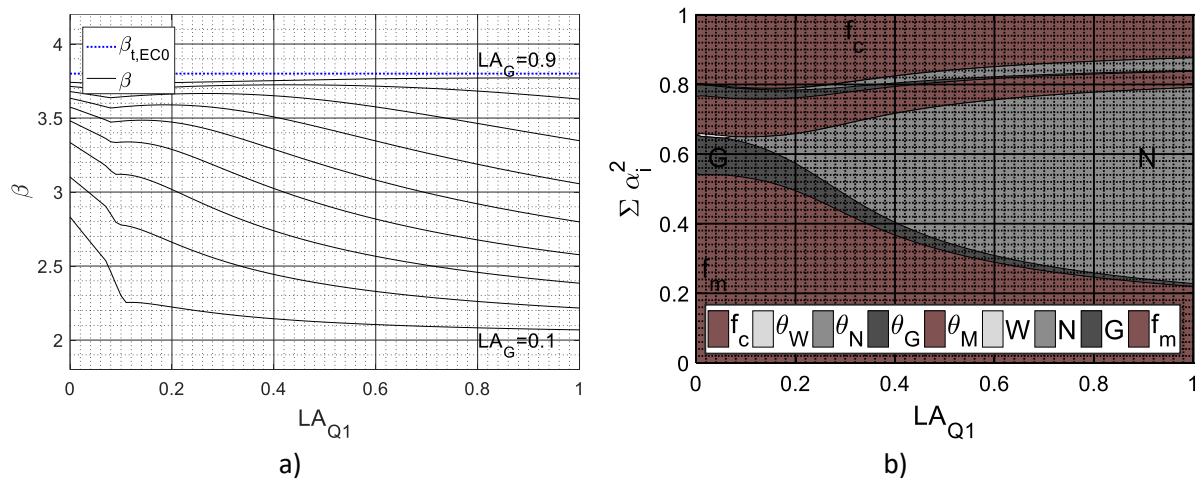


Abb. 6.30: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ ,  $V_N = 0,40$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

In den Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.6 (S. 76 ff.) zeigt sich der starke Einfluss der Nutzlast auf die rechnerische Zuverlässigkeit besonders deutlich. Bei einem Lastanteil von  $LA_Q \geq 0,8$  bestimmt die Nutzlast die erzielte Zuverlässigkeit nahezu vollständig.

### 6.5.10 Zug & Biegung aus ständiger Last + Nutzlast + Schneelast

Die Ergebnisse für kombinierter Zug- und Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast (Biegebeanspruchung in y- oder z-Richtung) und Schneelast (Zugbeanspruchung in x-Richtung), wie sie in ausgebauten Sparrendächern auftreten kann, werden in Tab. 6.27, Tab. 6.28, Abb. 6.31 und Abb. 6.32 dargestellt. Der Modifikationsbeiwert wird in diesem Lastfall mit  $k_{mod} = 0,9$  angenommen.

Wie die bisherigen Untersuchungen vermuten ließen, wirken die Schneelast sowie die Zugfestigkeit des Holzes dominierend auf die Zuverlässigkeit. Diese Kombination der beiden stark streuenden Größen führt zu geringen rechnerischen Zuverlässigkeiten. Dies wird sogar bis hin zu einem Anteil der

Nutzlast an der veränderlichen Last von ca.  $LA_{Q1} = 0,7$  bei  $b/h = 1/2$  und  $LA_{Q1} = 0,8$  bei  $b/h = 1/1$  ersichtlich. Sensitivitätsstudien werden im Anhang 10.9.7 (S. 79 ff.) dargestellt. Diese zeigen bereits ab einem Lastanteil der veränderlichen Lasten von  $LA_Q = 0,3$  einen großen Einfluss der Schneelast auf die Zuverlässigkeit, die den Einfluss der Nutzlast in großen Teilen überlagert. Das veränderte Verhältnis aus Querschnittshöhe zu -breite resultiert bei Betrachtung der Sensitivitätsfaktoren in keinem nennenswerten Unterschied. Der Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta_t = 3,8$  ( $T_{ref} = 50a$ ) wird in keinem Lastverhältnis erreicht, er zum Großteil deutlich unterschritten.

Tab. 6.27: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,t} = 0,30$ , Verhältnis  $b/h = 1/2$ , Lastfall Zug & Biegung

		Lastanteil Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderliche Last an Gesamlast	0,1	3,11	3,15	3,20	3,25	3,31	3,36	3,40	3,45	3,49
	0,2	2,67	2,74	2,82	2,91	3,03	3,16	3,28	3,39	3,48
	0,3	2,41	2,46	2,52	2,60	2,73	2,91	3,11	3,30	3,46
	0,4	2,28	2,30	2,34	2,40	2,48	2,67	2,92	3,19	3,42
	0,5	2,24	2,24	2,25	2,27	2,32	2,46	2,73	3,06	3,37
	0,6	2,24	2,22	2,21	2,20	2,22	2,27	2,56	2,92	3,31
	0,7	2,27	2,24	2,20	2,18	2,16	2,18	2,40	2,79	3,24
	0,8	2,31	2,27	2,22	2,18	2,14	2,12	2,26	2,66	3,17
	0,9	2,34	2,30	2,25	2,20	2,14	2,09	2,14	2,54	3,08

Tab. 6.28: Zuverlässigkeitsindex für  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,t} = 0,30$ , Verhältnis  $b/h = 1/1$ , Lastfall Zug & Biegung

		Lastanteil der Nutzlast bezogen auf veränderliche Lasten								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Anteil veränderlicher Last an Gesamlast	0,1	2,74	2,81	2,89	2,97	3,05	3,17	3,27	3,37	3,45
	0,2	2,35	2,39	2,45	2,52	2,62	2,74	2,95	3,18	3,39
	0,3	2,25	2,26	2,28	2,31	2,37	2,46	2,64	2,96	3,31
	0,4	2,25	2,24	2,23	2,23	2,25	2,30	2,40	2,74	3,21
	0,5	2,27	2,25	2,23	2,21	2,20	2,22	2,27	2,55	3,09
	0,6	2,30	2,28	2,25	2,22	2,19	2,18	2,19	2,38	2,96
	0,7	2,33	2,30	2,27	2,24	2,20	2,17	2,14	2,24	2,84
	0,8	2,36	2,33	2,30	2,26	2,22	2,17	2,12	2,12	2,73
	0,9	2,38	2,35	2,32	2,29	2,24	2,19	2,12	2,06	2,62

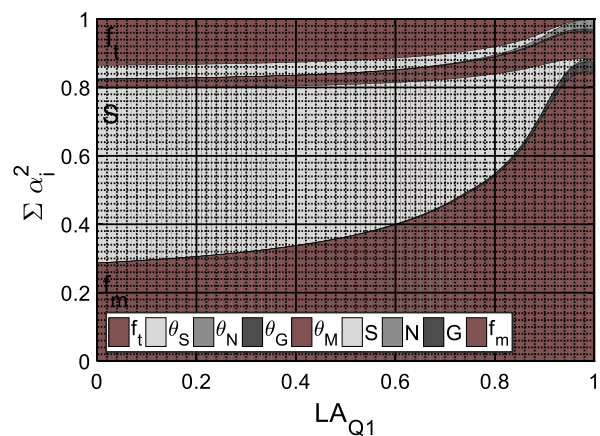
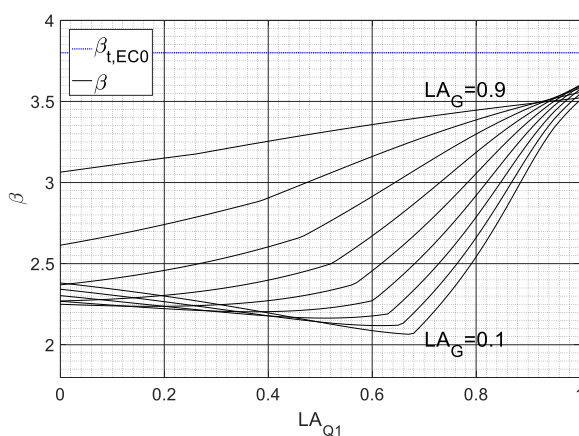


Abb. 6.31: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,t} = 0,30$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/2$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

6. Studien zum impliziten Sicherheitsniveau des Eurocode-basierten Bemessungskonzeptes

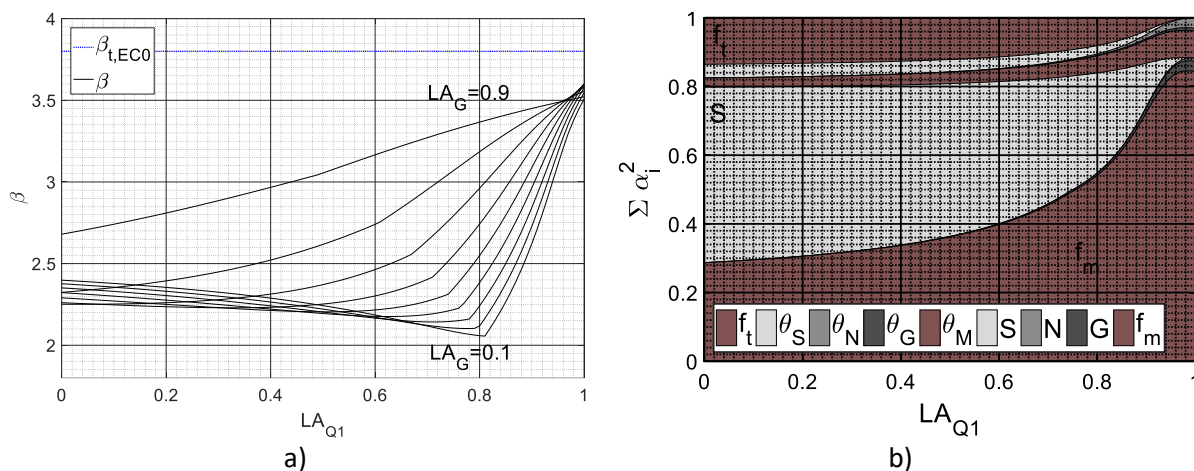


Abb. 6.32: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,t} = 0,30$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$

*Einfluss einer Reduktion des Variationskoeffizienten der Festigkeit*

Vergleichend wird der Einfluss einer Reduktion der Variationskoeffizienten der Festigkeitseigenschaften auf  $V_{R,m} = 0,22$  und  $V_{R,t} = 0,26$  dargestellt (Abb. 6.33). Insbesondere bei großem Anteil der ständigen Last zeigt sich eine Erhöhung der rechnerischen Zuverlässigkeit. Bei größerem Anteil veränderlicher Lasten dominiert die Schneelast weiter die Zuverlässigkeitsanalyse, wie auch die Sensitivitätsstudien in Anhang 10.9.7 (S. 56 ff.) zeigen. Auch hier wird der Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta_t = 3,8$  (für CC 2,  $T_{ref} = 50a$ ) zum Teil um mehr als  $\Delta\beta = 1,3$  unterschritten.

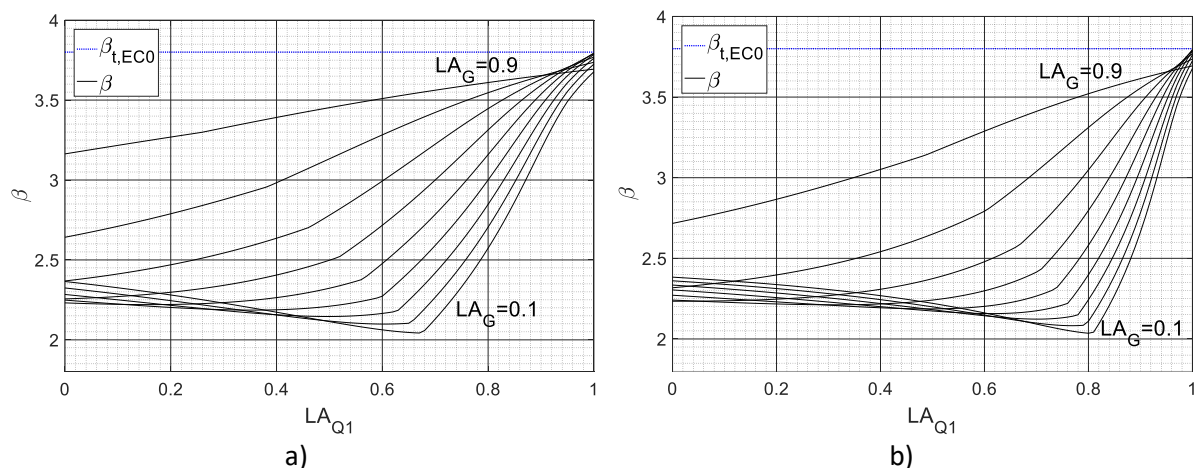


Abb. 6.33: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,22$ ,  $V_{R,t} = 0,26$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung, a:  $b/h = 1/2$ , b:  $b/h = 1/1$

## 6.6 Zusammenfassung

Aufgrund der Vielfältigkeit der Beanspruchungsfälle und Lastkombinationen sind eine Vielzahl verschiedener Bemessungssituationen mit variierenden Eingangsparametern zu untersuchen, um eine Abschätzung des mit der geltenden Normung erzielten Zuverlässigkeitsniveaus zu ermöglichen. Es zeigt sich, dass das rechnerische Zuverlässigkeitsniveau zwischen verschiedenen Belastungs- und Beanspruchungsfällen zum Teil stark variiert. Eine Zugbeanspruchung im Holz ist aufgrund der starken Variabilität der Zugfestigkeit des Holzes bedingt durch den hohen Einfluss schon kleinerer struktureller Abweichungen mit einem relativ starken Zuverlässigkeitsabfall verbunden. Auch ein hoher Anteil ständiger Lasten, insbesondere von Schnee- und Nutzlasten, reduziert die Zuverlässigkeit deutlich.

Des Weiteren zeigte sich, dass Annahmen zur Modellierung veränderlicher Einwirkungen, wie zur Maximalverteilung im Grundzeitintervall und auch die Dauer des Grundzeitintervalls bei Lastüberlagerung mit der Lastkombinationsregel nach *Ferry Borges & Castanheta* [103], mit Sorgfalt zu wählen sind, da diese das rechnerische Zuverlässigkeitsniveau deutlich beeinflussen. Die Analysen ergaben weiter, dass das Querschnittsverhältnis  $b/h$  einen moderaten Einfluss auf die Zuverlässigkeit bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung hat. Bei hohem Anteil veränderlicher Lasten und hohem Anteil der horizontal wirkenden Windlast ergab sich für Querschnitte mit dem Verhältnis  $b/h = 1/2$  ein leicht geringeres Zuverlässigkeitsniveau, als für Querschnitte mit  $b/h = 1/1$ . Dies ist auf die Bedingung der einhundertprozentigen Querschnittsauslastung zurückzuführen. Dominiert die in  $y$ -Richtung wirkende Windlast die semi-probabilistische Bemessungsgleichung, so wird bei  $b/h = 1/1$  ein insgesamt deutlich größerer Bemessungsparameter gewählt. Dies wirkt sich erhöhend auf die Zuverlässigkeit aus, da die Windlast im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  mit einem geringeren Variationskoeffizienten modelliert wird, als Schnee- oder Nutzlasten. Bei der Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte in den betrachteten Beanspruchungsfällen müssen unterschiedliche Breiten-/ Höhen-Verhältnisse nicht gesondert berücksichtigt werden, da der Effekt unter dominierenden Faktoren wie der Wahl des Lastverhältnisses untergeht. Hier wird auf Basis der Studien  $b/h = 1/2$  einheitlich gewählt.

Insbesondere bei Betrachtung der Sensitivitätsstudien wird der Einfluss des Grundzeitintervalls bei der Überlagerung veränderlicher Einwirkungen mit dem Modell nach *Ferry Borges & Castanheta* [103] deutlich. Wind- und Nutzlasten werden als durchgehend präsent mit unterschiedlicher Lastwechselzahl modelliert. Bei Betrachtung der Sensitivitätsfaktoren zeigt sich dies in einem deutlichen Schnitt der Sensitivitätenverteilung. Bei Überlagerung veränderlicher Einwirkungen mit unterschiedlichen Grundzeitintervallen wie Wind- und Schneelasten, äußert sich dies in einem fließenden Übergang.

Der nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] geforderte Zuverlässigkeitsindex für einen Bezugszeitraum von  $T_{ref} = 50$  Jahre für die Schadensfolgeklasse CC 2 beträgt  $\beta_t = 3,8$ . Wie die Untersuchungen zeigen, wird dieser Wert mit den derzeit geltenden Sicherheitsbeiwerten nur in wenigen Beanspruchungsfällen vollumfänglich erreicht.



Es ergeben sich somit drei zentrale Fragestellungen:

1. Liegt bei unter Anwendung der geltenden Eurocodes bemessenen Holzkonstruktionen ein strukturelles Sicherheitsproblem vor?
2. Sind die in der geltenden Normung festgelegten Teilsicherheitsbeiwert für die Last- und/ oder die Materialeite zu gering?
3. Wie begründet sich die Wahl des Zielzuverlässigkeitsindex und kann dieser in allen Bemessungsfällen zur Anwendung kommen?

In *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C Absatz 3* heißt es „Die „Versagenswahrscheinlichkeit“ und der zugehörige Zuverlässigkeitsindex (siehe C.5) sind lediglich operative Werte, die nicht die wirklichen Versagensraten ausdrücken, sondern nur für die Kalibrierung der Normen und für Vergleiche der Zuverlässigkeitsniveaus verschiedener Tragwerke verwendet werden.“ Demnach kann von einem „operativen Vergleichswert der Analyse“ gesprochen werden. Dieser Vergleichswert ist hochgradig abhängig von den gewählten Modellparametern der Analyse. Zur Bewertung der Akzeptanz eines gewählten Zielwertes gilt es also zu beurteilen, ob ein strukturelles Sicherheitsproblem der nach aktueller Norm gebauten Holzkonstruktionen auf die Anwendung zu geringer Sicherheitsbeiwerte schließen lässt. Daten zu einem überdurchschnittlich häufigen Versagen von Konstruktionen aus Holz liegen nicht vor. Diese Zahl lässt nicht auf ein pauschales Sicherheitsproblem gebauter Konstruktionen in Industrieländern schließen. Die Ergebnisse der Parameterstudien können somit als Orientierung zur Definition eines Zielzuverlässigkeitsniveaus dienen.

Des Weiteren unterstreichen die Ergebnisse der Studien die Bedeutung einer besonders gewissenhaften Untersuchung von Bauteilen unter Zugbeanspruchung, ganz besonders beim Auftreten veränderlicher Lasten. Unter den dargestellten Randbedingungen können in diesem Beanspruchungsfall deutlich reduzierte rechnerische Zuverlässigkeitswerte auftreten. Eine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes bei Zugbeanspruchung sollte demnach nur erfolgen, wenn sichergestellt werden kann, dass keine Strukturmerkmale vorhanden sind, die die Festigkeit stark beeinflussen.

In den übrigen untersuchten Beanspruchungsfällen scheint sich der mittlere Zuverlässigkeitsindex um einen mittleren Wert von  $\beta = 3,2$  für  $T_{ref} = 50a$  zu bewegen. Ausschlaggebend für Streuungen des Wertes sind der Variationskoeffizient der Materialfestigkeit, sowie der Anteil von Schnee- bzw. Nutzlasten. Im Rahmen einer Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten sind demnach möglichst realitätsnahe Ausprägungen der Lastverhältnisse zu identifizieren. Aufgrund des dominierenden Einflusses auf die Zuverlässigkeit und die Möglichkeit der Aktualisierung im speziellen Fall im Bestand erscheint es sinnvoll, die Ergebnisse abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit auszuweisen.

## 7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

### 7.1 Zielstellung

Die Normungsarbeit zur (Weiter-)Entwicklung eines semi-probabilistischen Bemessungskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten muss sich drei maßgeblichen, zum Teil komplementär verlaufenden Zielen stellen. Diese sind: eine gute praktische Anwendbarkeit, eine möglichst optimale Ausnutzung von Ressourcen und nicht zuletzt die Wahrung eines angemessenen Sicherheitsniveaus. Eine Balance zwischen diesen Anforderungsbereichen zu finden, stellt die größte Herausforderung der Normungsentwicklung dar. Zur Optimierung des Bewertungskonzeptes für bestehende Konstruktionen sollte dieses möglichst flexibel an den individuell vorhandenen Informationsstand anpassbar sein. Nur so kann der Vorteil des Bestandsbaus gegenüber dem Neubau, die Verwertung von Kenntnissen aus einer Aktualisierung von Last- und Widerstandsparametern mittels einer qualifizierten Bestandsaufnahme, nutzbar gemacht und damit Tragwerksreserven erschlossen werden.

Nach *Vrouwenvelder* [130] erfolgt die Kalibrierung von Normen in zwei Schritten. Aus Kalibrierungs- und Optimierungsbetrachtungen resultiert das Zielzuverlässigkeitsniveau  $\beta_t$ . Basierend auf diesem können die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma$  entweder mit standardisierten Sensitivitätsfaktoren  $\alpha$  oder durch Minimierung der Abweichung der Zuverlässigkeit der Einzelfälle vom Zielzuverlässigkeitsniveau kalibriert werden, siehe Abb. 7.1.

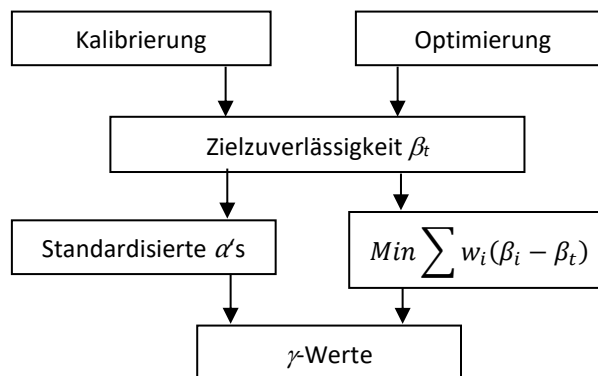


Abb. 7.1: Zweischrittverfahren zur Normungskalibrierung aus *Vrouwenvelder* [130]

Dieses Kapitel beschäftigt sich zunächst mit der Problematik der Ableitung eines Zielzuverlässigkeitsindex für Konstruktionen im Bestand und widmet sich anschließend vereinfachten Methoden zur Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte (Methoden mit festgelegten/ standardisierten  $\alpha$ -Werten). Folgend wird eine probabilistische Optimierung des Teilsicherheitsbeiwertes des Materialwiderstandes  $\gamma_M$  für definierte Bemessungskategorien durchgeführt. Dabei wird der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G$  für ständige Einwirkungen auf Basis der *SIA 269:2011* [21] angepasst. Der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen  $\gamma_Q$  wird im Rahmen der probabilistischen Optimierung in dieser Arbeit nicht modifiziert.

## 7.2 Zielzuverlässigkeitsindex für Konstruktionen im Bestand

### 7.2.1 (Neu)Bemessung und (Bestands)Bewertung

Melchers [36] betont, dass für die Bewertung der Tragsicherheit von Bestandskonstruktionen nicht dieselben Zielwerte für  $\beta_i$  bzw.  $P_f$  verwendet werden können wie im Neubau. Da im Bestandsbau das Untersuchungsobjekt in realisierter Form vorliegt und über einen langen Zeitraum nutzungsfähig war, unterscheidet sich die Bemessungs- bzw. Bewertungssituation in Neu- und Altbau zum Teil fundamental. Dies betrifft zum einen die Überprüfbarkeit des Materials und ständiger Lasten in situ. Zudem kann nach Holzer [231] davon ausgegangen werden, dass bei langer Standzeit die bemessungsrelevanten veränderlichen Einwirkungen mindestens einmal aufgetreten sind. Beispielsweise kann auf Basis einer Binominalverteilung für das Eintreten oder Nicht-Eintreten eines zufälligen Ereignisses davon ausgegangen werden, dass ein Ereignis, das im Mittel alle zwanzig Jahre auftritt nach  $n = 100$  Jahren mit der Wahrscheinlichkeit  $p = 99,4\%$  mindestens einmal eingetreten ist [231]. Ein Ereignis, das im Mittel alle 100 Jahre auftritt, ist nach 200 Jahren mit  $p = 86,6\%$  eingetreten [231]. Bei Standzeiten von mehreren hundert Jahren wie bei historischen Holzkonstruktionen, sind diese demnach mit einer hohen Wahrscheinlichkeit den bemessungsrelevanten Lasten bereits mindestens einmal ausgesetzt gewesen.

Nach Holický [232] sind für Bestandsbauten Bemessungsregeln über den Umfang der Regelungen des Neubaus hinaus nötig. Laut *JRC Science and Policy Report* [27] kann die Zielzuverlässigkeit zur Bewertung von Konstruktionen im Bestand auf Basis der Festlegungen für den Neubau angepasst werden. Normen aus der Errichtungszeit der Konstruktion sollen als informative Dokumente genutzt werden [27]. Daraus ergibt sich eine Empfehlung der Anwendung der geltenden Normen unter Berücksichtigung entsprechender Anpassungen für den Bestandsbau. Bei bestehenden Tragwerken können tragwerksspezifische Aspekte untersucht und individuelle Daten bezüglich Einwirkung und Widerstand einbezogen werden. Somit werden Unsicherheiten reduziert. Zudem spielen ökonomische Kriterien und Kosten-Nutzen-Betrachtungen eine wichtige Rolle.

Nach *ONR 24009:2013* [30] haben sich historische Konstruktionen über die Zeit bewährt, wenn keine Mängel festgestellt werden. Durch eine qualifizierte Bestandsaufnahme in situ wird der Kenntnisstand im Vergleich zum Neubau signifikant erweitert. Ständige Einwirkungen können durch Aufmaß direkt am Bauwerk bestimmt und somit aktualisiert werden, siehe z. B. *SIA 269:2011* [21]. In der Schweiz wurde mit der Normenreihe *SIA 269* im Jahre 2011 eine eigene Normenreihe zur Bewertung und rechnerischen Überprüfung bestehender Tragwerke eingeführt, siehe Kap. 2.3.1. Veränderliche Einwirkungen aus Wind und Schnee können anhand von Messreihen soweit vorhanden konkretisiert werden. Auch Nutzlasten können aktualisiert und ggf. durch Nutzungseinschränkungen begrenzt werden.

Im Bestandsbau ist die Aktualisierung von Widerstandsgrößen auf Basis von Korrelationsbeziehungen durch Bestimmung von Referenzgrößen am Tragwerk möglich. Des Weiteren ist die konkrete Bean-

spruchung des Bauteils bekannt. Holz ist ein inhomogenes, natürlich gewachsenes Material. Die Festigkeitssortierung erfolgt anhand von sicht- bzw. messbaren Parametern. Demnach erfolgt die Klassifizierung anhand der ungünstigsten Einflussparameter. Bei der Aktualisierung der Festigkeitseigenschaften kann somit die Lage festigkeitsmindernder Struktureigenschaften wie Ästen oder Faserabweichungen und ihr Einfluss auf das Tragverhalten berücksichtigt werden.

Nach *Spaethe* [63] weisen technische Systeme in der Regel den gleichen charakteristischen Verlauf der Ausfallrate auf („Badewannenkurve“). Zu Beginn der Lebensdauer (Phase I) treten vermehrt Ausfälle auf, da technische, planerische und Ausführungsmängel sichtbar werden. In Phase II ist die Ausfallrate nahezu konstant und wird durch Extremereignisse bestimmt. Am Ende der Lebensdauer (Phase III) treten vermehrt Ausfälle aufgrund von Alterungserscheinungen des Systems/ der Konstruktion auf. Für Gebäude sind die Herstellphase und die frühe Nutzungszeit kritische Phasen in der Lebenszeit eines Gebäudes. *Matousek & Schneider* [233] werten ca. 800 Schadensfälle aus und kommen zu dem Schluss, dass zufällige Abweichungen von Material und Einwirkungen durch die Sicherheitsfaktoren gut abgedeckt sind. Die Sicherheit der Baukonstruktionen wird maßgeblich durch Fehler der am Bau Beteiligten beeinträchtigt. Auch das Zusammentreffen ungünstiger Umstände spielt eine untergeordnete Rolle. Tab. 7.1 zeigt, dass die Mehrzahl der Schadensfälle während der Bauphase bis zur Übergabe auftrat. Nach dem fünften Jahr der Nutzung traten nur noch in 12% der Fälle ein Schaden auf.

Tab. 7.1: Verteilung der 692 erfassten Fälle mit Bauwerksschäden nach Bauwerksart und Zeitpunkt der Schadensentdeckung aus *Matousek & Schneider* [233]

		Bauwerksart					Bauwerksschäden insgesamt	Bauwerksschäden anteilig		
		Hochbau	Industriebau	Verkehrsbauwerke	Wasserbau	Restliche				
Bauphase, in welcher der Schaden entdeckt	Vorbereitung, Aushub, Fundamente	23	6	3	15	9	56	0,08	0,58	Erstellung
	Tragwerk unterhalb Terrain	11	3	12	17	2	45	0,07		
	Tragwerk oberhalb Terrain	141	43	36	11	28	259	0,37		
	Übergabe des Bauwerks	34	4	1	2	1	42	0,06		
	Im 1. u. 2. Jahr der Nutzung	48	16	3	4	6	77	0,11	0,40	Nutzung
	4. bis 5. Jahr der Nutzung	14	17	0	0	0	31	0,04		
	Nach 5. Jahr der Nutzung	41	36	7	0	1	85	0,12		
	Während der Nutzung, Zeit unbekannt	39	26	12	1	4	82	0,12		
Umbau und Abbruch	11	1	1	1	1	15	0,02	0,02		
<b>Total</b>		<b>362</b>	<b>152</b>	<b>75</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>692</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich Neu- und Bestandsbau in grundlegenden Punkten unterscheiden. Diese sind:

1. Die verringerte Wahrscheinlichkeit für Planungs- und Ausführungsmängel aufgrund schadensfreier Standzeit im Bestandsbau
2. Die Bestimmbarkeit von Materialparametern am Bauwerk
3. Die Bestimmbarkeit der konkreten Beanspruchung der Bauteile

**7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand**

Deutlich wird, dass für eine wirtschaftliche und substanzschonende Bewertung der Tragfähigkeit angepasste normative Regelungen für den Bestandsbau im Rahmen des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes benötigt werden. Tab. 7.2 zeigt eine Zusammenstellung aktueller normativer Regelungen bezüglich einer Anpassung der Zielzuverlässigkeit im Bestandsbau

**Tab. 7.2: Anpassung der Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau in verschiedenen Normen**

Norm/ Regelwerk	Jahr	Regelung zur Anpassung der Zuverlässigkeit im Bestandsbau	
		Aussage	Erläuterung
<b>UNI 11138</b> [28]	2004	Möglich, keine Werte	- Für Bauwerke mit kulturellem Interesse - Ohne konkrete Festlegung von Zahlenwerten
<b>ISO 13822</b> [40]	2010	Möglich, keine Werte	- Zahlenwerte wie in <i>EN 1990</i> - Verweis auf <i>Allen</i> [234] für Anpassung im Bestandsbau
<b>SIA 269</b> [21]	2011	Möglich, Werte enthalten	- Abwägung nach ökonomischen Kriterien und Schadensfolgeklasse
<b>NEN 8700</b> [50]	2011	Möglich, Werte enthalten	- Einteilung nach Zuverlässigkeitsklassen
<b>ONR 24009</b> [30]	2013	Eingeschränkt, Werte enthalten	- Nur für außergewöhnlich Einwirkungen & Erdbeben
<b>ISO 2394</b> [41]	2015	Möglich, Werte enthalten	- Abwägung nach ökonomischen Kriterien und Schadensfolgeklasse
<b>DIN CEN/TS 17440:2020-10</b> [45]	2020	Möglich, keine Werte	- Zielzuverlässigkeit für Bestandskonstruktionen kann geringer sein, als für Neubauten - Ableitung soll nach Prinzipien der <i>ISO 2394</i> erfolgen

Nachfolgend werden verschiedene Konzepte zur Ableitung der Ziel- und Mindestzuverlässigkeit von Konstruktionen im Bestand angewendet und bewertet. Die Ergebnisse zum erreichten Zielzuverlässigkeitsniveau bei Anwendung der geltenden Normung aus Kap. 6 werden dabei einbezogen.

**7.2.2 Empirischer Ansatz zur Berechnung der Zielzuverlässigkeit unter verschiedenen Rahmenbedingungen nach D. E. Allen [234]**

Die Zielversagenswahrscheinlichkeit kann unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien berechnet werden, es bestehen dazu verschiedene empirische Ansätze. *D.E. Allen* [234] schlägt den folgenden Zusammenhang nach Gl. (7.1) vor

$$P_f = \frac{A_c \cdot T_{ref} K}{W \sqrt{n_p}} \tag{7.1}$$

wobei  $A_c$  ein Faktor zur Beschreibung der menschlichen Aktivität im Zusammenhang mit der Konstruktion ist und somit eine Einordnung verschiedener Konstruktionstypen ermöglicht,  $T_{ref}$  der Bezugszeitraum,  $W$  ein Warnfaktor, welcher die Art des Versagens kategorisiert,  $\sqrt{n_p}$  ein Bedeutungsbeiwert, der die Anzahl betroffener Personen im Falle eines Tragwerksversagens beinhaltet und  $K$  ein Kalibrierungsbeiwert, siehe Tab. 7.3. *Schueremans* [235] kombiniert diesen Ansatz mit einem Ansatz aus *CIRIA* [236] zu

$$P_f = 10^{-4} \cdot S_c \frac{T_{ref} A_c}{n_p} \frac{C_f}{W} \tag{7.2}$$

wobei  $S_c$  ein Beiwert zur Beachtung der sozialen Relevanz des Bauwerks ist.

Tab. 7.3: Die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmende Faktoren nach *Schueremans* [235], zusammengestellt durch *Schueremans* nach genannten Quellen

Ökonomischer Faktor nach <i>CEB</i> [118]	$C_f$	Warnfaktor nach <i>Allen</i> [234]	$W$
nicht ernst (geringe ökonomische Konsequenzen)	10	versagenssichere Konditionen	0,01
ernst (wesentliche ökonomische Konsequenzen)	1	graduelles Versagen mit Wahrscheinlichkeit der Ankündigung	0,1
sehr ernst (große ökonomische Konsequenzen)	0,1	graduelles, verstecktes Versagen	0,3
		plötzliches Versagen ohne vorherige Warnung	1,0
Aktivitätenfaktor nach <i>Allen</i> [234]	$A_c$	Faktor für soziale Kriterien <i>CIRIA</i> [236]	$S_c$
Nachversagensaktivität	0,3	Plätze mit öffentlichen Ansammlungen, Dämme (historische Gebäude mit großer Bedeutung für die Menschheit, UNESCO Weltkulturerbe z. B.)	0,005
Normale Aktivität			
Gebäude	1,0	Wohngebäude, Büros, Verkaufshäuser, Industriegebäude (gelistete historische Gebäude)	0,05
Brücken	3,0		
Stark gefährdete Konstruktionen (offshore)	10,0		
		Brücken	0,5
		Türme, Masten, Offshore-Konstruktionen	5

*Schueremans & van Gemert* [237] schlagen vor,  $S_c$  für denkmalgeschützte Bauten mit  $S_c = 0,05$  anzunehmen. Für Wohngebäude mit graduellen, verstecktem Versagen, nicht ernstesten ökonomischen Konsequenzen und 10 betroffenen Personen ergibt sich mit Tab. 7.3 im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$

$$P_f = 10^{-4} \cdot 0,05 \cdot \frac{50 \cdot 1,0}{10 \cdot 0,3} \cdot 10 = 8,3 \cdot 10^{-4} \quad (\beta_t = 3,15) \quad (7.3)$$

Vergleichend ergibt sich bei 50 betroffenen Personen

$$P_f = 10^{-4} \cdot 0,05 \cdot \frac{50 \cdot 1,0}{50 \cdot 0,3} \cdot 10 = 1,6 \cdot 10^{-4} \quad (\beta_t = 3,60) \quad (7.4)$$

Bei „ernsten“ ökonomischen Konsequenzen wird

$$P_f = 10^{-4} \cdot 0,05 \cdot \frac{50 \cdot 1,0}{50 \cdot 0,3} \cdot 1 = 1,6 \cdot 10^{-5} \quad (\beta_t = 4,16) \quad (7.5)$$

### 7.2.3 Zielzuverlässigkeit unter Berücksichtigung der Schadensfolgeklasse und ökonomischen Kriterien

In *DIN EN 1990:2010-12* wird die Zielzuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Zuverlässigkeitsklasse bzw. Schadensfolgeklasse angegeben. *Steenbergen et al.* [238] schlagen vor, diese um  $\Delta\beta = 0,5$  für den Zielwert und um  $\Delta\beta = 1,5$  für den Mindestwert im Bestandsbau abzumindern. Im *JRC Science and Policy Report* [27] werden die Zielzuverlässigkeiten ebenfalls nach Zuverlässigkeitsklassen angegeben. Die Werte entsprechen den Mindestwerten der *NEN 8700:2011-12*. Tab. 7.4 fasst die Werte zusammen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Zuverlässigkeitsklasse der RC 2 bzw. Schadensfolgeklasse CC 2, weshalb die Werte hervorgehoben sind.

Die Werte aus *DIN EN 1990:2010-12 in Anhang B* [16], wie in Tab. 7.4 ausgewiesen, werden als Empfehlungen für Mindestwerte bezeichnet, während der gleiche Wert für die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 in *Anhang C* der *DIN EN 1990:2010-12* [16] als Zielwert des Zuverlässigkeitsindex ausgewiesen wird.

Die Zielzuverlässigkeit in *DIN EN 1990:2010-12* gilt nach *Diamantidis & Holický* [239] für Tragwerksteile, nicht für Systeme.

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Tab. 7.4: Zuverlässigkeitsniveau nach Zuverlässigkeitsklasse im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50 a$

Zuverlässigkeits- klasse nach DIN EN 1990:2010-12	$\beta_{t,new}$	$\beta_{0,exis}$			$\beta_{t,exis}$		
	DIN EN 1990: 2010-12 [16]	Steenbergen et al. [238] <sup>1</sup> fib Bulletin 80 [42] <sup>1</sup>	JRC Report [27] NEN 8700:2011 [50]		Steenbergen et al. [238] <sup>1</sup> fib Bulletin 80 [42] <sup>1</sup>	NEN 8700:2011 [50]	
			wn	wd		wn	wd
RC 0/ CC 1a	-	-	1,8	0,8	-	-	-
RC 1/ CC 1b	3,3	1,8	1,8	1,1	2,8	2,8	1,8
RC 2/ CC 2	3,8	<b>2,3</b>	<b>2,5</b>		<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>2,5</b>
RC 3/ CC 3	4,3	2,8	3,3		3,8	3,8	3,3

wn – Wind nicht dominant, wd – Wind dominant

<sup>1</sup> Anpassung auf Basis der Zielwerte der EN 1990

Im *fib Bulletin No. 80* [42] wird empfohlen, eine Bestandskonstruktion zuerst gegen das Minimumlevel  $\beta_0$  und danach, wenn nötig, gegen das Zielniveau  $\beta_{up}$  (up = upgraded, hier  $\beta_t$ ) zu bemessen. Aus Tab. 7.4 ergibt sich für die Schadensfolgeklasse CC 2  $\beta_{0,exis} = 2,5$  und  $\beta_{t,exis} = 3,3$ .

Die Akzeptanz von Zielzuverlässigkeitswerten ist mit der Wahrung menschlicher Sicherheitsinteressen, ökonomischen Interessen bzw. einer Kombination von beidem, siehe auch *Vrouwenvelder* [130], verknüpft. Eine Festlegung zur einzuhaltenden Versagenswahrscheinlichkeit sollte nach *ISO 2394:2015* [41] unter Beachtung der Versagenskonsequenzen und der Art des Versagens, ökonomischen Verlusten, sozialer Unannehmlichkeiten, des Einflusses auf die Umwelt, den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen und dem Aufwand sowie den Kosten der Sicherheitsmaßnahme erfolgen. Ist es nicht zu befürchten, dass im Falle eines Tragwerksversagens Menschen zu Schaden kommen, kann die Festlegung der Zielversagenswahrscheinlichkeit rein nach ökonomischen Optimierung erfolgen, andernfalls wird in *ISO 2394:2015* die Anwendung des Grenzkostenprinzips empfohlen. Die annehmbaren Sicherheitskosten stellen nach *Faber & Stewart* [65] eine gesellschaftliche Entscheidung dar. Zentral ist hier die Abkürzung *ALARP*, welche für „as low as reasonable possible“ nach *ISO 2394:2015* [41] steht. Zur Darstellung des Prinzips der probabilistischen Kostenoptimierung siehe Kap. 3.4.5.

Die Einteilung des Zuverlässigkeitsniveaus nach den Kosten der nötigen Sicherheitsmaßnahme wird in der *ISO 2394:2015* [41], dem *JCSS Probabilistic Model Code* [59] und der *SIA 269:2011* [21] gewählt, wobei die Werte in den Dokumenten übereinstimmen. Die Werte werden in Tab. 7.5 dargestellt. In *ISO 2394:2015* [41] wird betont, dass sich die Werte auf Basis ökonomischer Optimierung ableiten und möglicherweise im Hinblick auf menschliche Sicherheit angepasst werden müssen.

Tab. 7.5: Mindestzuverlässigkeitsindices aus *ISO 2394:2015* [41] für  $T_{ref} = 1 a$  und Umrechnung auf  $T_{ref} = 50 a$

Relative Kosten der Sicherheits- maßnahme <sup>1</sup>	Versagenskonsequenzen					
	Gering ( $\rho < 2$ )		Moderat ( $2 < \rho < 5$ )		Groß ( $\rho < 10$ )	
	<i>ISO 2394:</i> <i>2015</i>	Umrechnung für stat. unabh. Jahre	<i>ISO 2394:</i> <i>2015</i>	Umrechnung für stat. unabh. Jahre	<i>ISO 2394:</i> <i>2015</i>	Umrechnung für stat. unabh. Jahre
	<b>1a</b>	<b>50a</b>	<b>1a</b>	<b>50a</b>	<b>1a</b>	<b>50a</b>
<b>Groß</b> (SIA: $EF_m < 0,5$ )	3,1	1,7	3,3	2,8	3,7	2,7
<b>Normal</b> (SIA: $0,5 \leq EF_m \leq 2,0$ )	3,7	2,7	4,2	3,2	4,4	3,5
<b>Klein</b> (SIA: $EF_m > 2,0$ )	4,2	3,2	4,4	3,5	4,7	3,8

<sup>1</sup> Einteilung nach *SIA 269:2011* (Zeilen absteigend): Maßnahmeneffizient klein, mittel, groß

Diamantidis, Holický & Jung [240] schlagen vor, die Werte der ISO 2394 um  $\Delta\beta = 0,5$  für einen Zielzuverlässigkeitsindex und um  $\Delta\beta = 1,5$  für einen Mindestzuverlässigkeitsindex im Bestandsbau abzumindern (ausgehend von den Werten der ISO 2394, in der benannten Veröffentlichung Stand 1998). Unter Verwendung der ISO 2394:2015(E) ergeben sich die Werte nach Tab. 7.6.

Tab. 7.6: Anpassung der Zuverlässigkeitsindices aus ISO 2394 [41] für den Bestand aus Diamantidis, Holický & Jung [240]

Relative Kosten der Sicherheitsmaßnahme <sup>1</sup>	Versagenskonsequenzen					
	Gering ( $\rho < 2$ )		Moderat ( $2 < \rho < 5$ )		Groß ( $\rho < 10$ )	
	Anpassung für Bestand nach [240]		Anpassung für Bestand nach [240]		Anpassung für Bestand nach [240]	
	$1 a^2$	$50 a^3$	$1 a^2$	$50 a^3$	$1 a^2$	$50 a^3$
<b>Groß</b> (SIA: $EF_m < 0,5$ )	2,6	1,2	2,8	1,3	3,2	2,2
<b>Normal</b> (SIA: $0,5 \leq EF_m \leq 2,0$ )	3,2	2,2	3,7	2,7	3,9	3,0
<b>Klein</b> (SIA: $EF_m > 2,0$ )	3,7	2,7	3,9	3,2	4,2	3,3

<sup>1</sup> Einteilung nach SIA 269:2011 (Zeilen absteigend): Maßnahmeneffizient klein, mittel, groß

<sup>2</sup> Anwendung der Anpassung auf die Werte der ISO 2394 ( $\beta_{t,exis} = \beta_{t,new} - 0,5$ )

<sup>3</sup> Anwendung auf aus ISO 2394 auf  $T_{ref} = 50a$  umgerechneten Wert

Für mittlere Schadensfolgeklassen ergibt sich mit der Umrechnung nach Diamantidis, Holický & Jung [240]  $\beta_{t,exis} = 2,7$  für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$ .

Die Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit vom Bezugszeitraum zeigt Abb. 7.2.

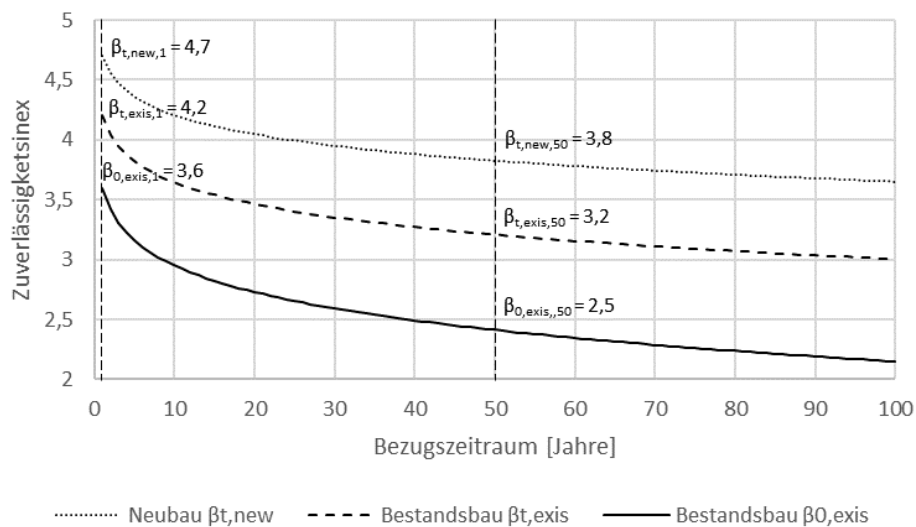


Abb. 7.2: Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit vom Bezugszeitraum

Die Verknüpfung der Schadensfolgeklassen wie in Tab. 7.5 und Tab. 7.6 angegeben mit den Schadensfolgeklasse der DIN EN 1990:2010-12 Anhang B [16] ist nicht direkt anwendbar, obgleich beide Beschreibungen und Beispiele für die einzelnen Klassen bereit stellen. In letztgenannter Norm sind drei Schadensfolgeklassen enthalten, während die ISO 2394:2015 vier Klassen beschreibt. SIA 269:2011 enthält die Zielzuverlässigkeiten wie in Tab. 7.6 dargestellt. Die Spalten werden beschrieben mit: geringe Versagensfolgen (entspricht den Werten in Klasse 2 nach ISO 2394:2015), moderate Versagensfolgen (entspricht den Werten in Klasse 3 nach ISO 2394:2015) und hohe Versagensfolgen (entspricht den Werten in Klasse 4 nach ISO 2394:2015).



Der Koeffizient  $\rho$  ist in SIA 269:2011 [21] definiert als

$$\rho = \frac{C_f}{C_w} \quad (7.6)$$

Dabei sind  $C_f$  die Versagenskosten und  $C_w$  die Instandsetzungskosten bzw. die Kosten für den Ersatzneubau. Die Effizienz von sicherheitsbezogenen Erhaltungsmaßnahmen wird mittels der Maßnahmeneffizienz  $EF_M$  ermittelt

$$EF_M = \frac{\Delta R_M}{SC_M} \quad (7.7)$$

$\Delta R_M$  ist die Risikoreduktion,  $SC_M$  sind die Kosten der Maßnahme. Sicherheitsmaßnahmen sind damit dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit unterworfen.

Brühwiler [20] unterstreicht, dass bestehende Tragwerke nicht mit geringerer Sicherheit nachgewiesen werden. Das Niveau wird unter Berücksichtigung tragwerksspezifischer Risiken gewählt und ist nicht niedriger als bei Neubauten. Außerdem weist er darauf hin, dass grundsätzlich eine nachhaltige Entwicklung der Bauwerke gefordert wird. Dabei ist jedoch von Bedeutung, den Rechenaufwand gering zu halten (gemäß SIA 269, Ziffer 2.1.3). Dies kann bedeuten, nur die maßgebenden Querschnitte nachzurechnen. Zu unterstreichen ist der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit.

#### 7.2.4 Vorschlag zur Anpassung des Zielzuverlässigkeitsindex abhängig von der Maßnahmenkategorie

Für die Bewertung bestehender Konstruktionen werden nach Diamantidis, Holický und Sýkora [241] zwei Level benötigt: ein Minimumlevel, unter dem eine Konstruktion repariert werden sollte, und ein Optimumlevel zur Instandsetzung. Nach Turkstra [33] kann keine Normung ein umfassend optimales Zielzuverlässigkeitsniveau bereitstellen. Zudem ist die Frage nach der begründeten Definition des Zielwertes nicht umfassend dokumentiert, sodass die Kalibrierung von Sicherheitsbeiwerten am impliziten Sicherheitsniveau einer zufriedenstellenden Normung empfehlenswert erscheint.

Die Untersuchungen in Kap. 6 ergaben, dass bei Bemessung nach geltenden Eurocodes sich das implizite Sicherheitsniveau in einem Bezugszeitraum von  $T_{ref} = 50a$  um  $\beta_t = 3,2$  bewegt und dabei von verschiedenen Randbedingungen wie dem Anteil der veränderlichen Lasten und dem beanspruchten Materialwiderstand abhängt. Der im Mittel erreichte Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 3,2$  korrespondiert zudem gut mit dem auf den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  umgerechneten Wert für moderate Versagenskonsequenzen und normalen Kosten der Sicherheitsmaßnahme nach Tab. 7.5 basierend auf ISO 2394:2015 [41] und einer Anpassung für den Bestandsbau ausgehend von den Werten nach DIN EN 1990:2010-12 [16] in Tab. 7.4. Somit wird  $\beta_{t,exis} = 3,2$  als Zielwert für Instandsetzungsmaßnahmen vorgeschlagen. Der vorgeschlagene Mindestzuverlässigkeitsindex für die Bewertung von Konstruktionen im Bestand wird für diese Arbeit basierend auf Tab. 7.5 mit  $\beta_{0,exis} = 2,5$  festgelegt und ergibt sich maßgeblich aus den Empfehlungen des JRC Science and Policy Report [27].

Zudem erscheint es sinnvoll, zusätzlich ein Zuverlässigkeitsindex für die Überprüfung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen festzulegen. Dieses wird als diskussionsoffener Vorschlag auf Basis der beschriebenen Literaturstudie, sowie den durchgeführten Berechnungen zur Zuverlässigkeit von Bauteilen auf Basis des geltenden semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes vorgebracht. Für den Bestandsbau erhöhen sich die relativen Kosten der Sicherheitsmaßnahme für einen vergleichsweise geringen Zuwachs an Sicherheit deutlich. *Vrouwenvelder* [133] schlägt vor, sich in der Tabelle der Zielzuverlässigkeiten nach JCSS für den Bestandsbau in der Spalte für die relativen Kosten der Sicherheitsmaßnahme nach oben zu bewegen. Auch im *fib Bulletin 80* [42] wird empfohlen, für Bestandsbauten anstelle von moderaten Kosten in die Zeile der hohen Kosten für die Sicherheitsmaßnahme zu wechseln. Unter Anwendung von Tab. 7.5 ergibt sich  $\beta_t = 2,8$ . Bei der Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten kommt es zwangsläufig unter den einbezogenen Bemessungssituationen zu Schwankungen um den Zielwert. Um einen ausreichenden Abstand von einem nicht zu unterschreitendem Mindestwert  $\beta_{0,exis} = 2,5$  zu halten, wird die folgenden Berechnungen  $\beta_{t,eval} = 2,9$  für die Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Bauteilen im Bestand festgelegt. Die Zielwerte für die drei identifizierten Maßnahmenkategorien werden in Tab. 7.7 zusammengefasst.

Tab. 7.7: Vorschlag für Zielzuverlässigkeiten in Abhängigkeit von der Maßnahmenkategorie, Schadensfolgeklasse CC 2

$\beta_t$ ( $T_{ref} = 50a$ )	Maßnahmenkategorie Anforderungen
2,5	<b>Minimumlevel nach JRC Science and Policy Report [27]</b> $\beta_{0,exis}$ <i>Strukturelle Eingriffe können zur Sicherstellung der Tragfähigkeit nicht vermieden werden. Ein geringerer Zuverlässigkeitsindex kann nicht akzeptiert werden</i>
2,9	<b>Bewertungslevel <math>\beta_{t,eval}</math></b> <i>Lastabtragende Bauteile, welche in einer qualifizierten Bestandsaufnahme in situ detailliert untersucht wurden. Material- und Lastparameter wurden studiert und für die Bewertung der Tragfähigkeit aktualisiert. Die Einstufung in eine Festigkeitsklasse wurde mittels zerstörungsfreier bis zerstörungssarmer technischer Hilfsmittel verbessert.</i>
3,2	<b>Instandsetzungslevel nach JRC Science and Policy Report [27], <math>\beta_{t,exis}</math></b> <i>Level für Verstärkungsmaßnahmen und Austausch lastabtragender Bauteile. Anforderung an die Zuverlässigkeit entspricht den Forderungen für den Neubau.</i>

### 7.2.5 Berücksichtigung einer begrenzten Restnutzungsdauer

Die Definition des Zielzuverlässigkeitsindex ist vom Bezugszeitraum  $T_{ref}$  abhängig. Der Zuverlässigkeitsindex für einen bestimmten Betrachtungszeitraum ergibt sich aus den Zuverlässigkeitsindices der Einzeljahre ggf. unter Berücksichtigung einer statistischen Abhängigkeit der Jahre, wie in Kap. 3.3.4 beschrieben. Für Bauwerke im Bestand besteht die Möglichkeit, dass eine begrenzte Restnutzungsdauer vorgesehen ist. Dies kann in die Tragfähigkeitsbewertung einbezogen werden, siehe auch *JRC Science and Policy Report 2015* [27]. *Stauder* [50] stellt einen Zusammenhang zur Berechnung einer abgeminderten Zielzuverlässigkeit bei definierter Restnutzungsdauer vor. Danach kann der Zielzuverlässigkeitsindex innerhalb der Restnutzungsdauer  $\beta_{RN}$  nach Gl. (7.8) berechnet werden

$$\beta_{RN} = -\Phi^{-1}(P_{f,RN}) = -\Phi^{-1}\left(N \cdot \left(1 - \sqrt[RN]{1 - F_T(t)}\right)\right) \quad (7.8)$$

## 7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Dabei ist  $P_{f,RN}$  die Versagenswahrscheinlichkeit innerhalb der Restnutzungsdauer,  $N$  die Gesamtnutzungsdauer in Jahren,  $R_N$  die Restnutzungsdauer in Jahren und  $F_T(t)$  die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit innerhalb der Nutzungsdauer. Die Berechnung kann auch in Bezug auf die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit anstelle der Versagenswahrscheinlichkeit in einer festgelegten Nutzungsdauer erfolgen. Dann ist

$$\beta_{RN} = -\Phi^{-1}(P_{f,RN}) = -\Phi^{-1}\left(N \cdot \left(1 - \sqrt[R_N]{(1 - P_{f,1})^N}\right)\right) = \Phi^{-1}\left(\left(\Phi(\beta_N)\right)^{\frac{N}{R_N}}\right) \quad (7.9)$$

mit  $P_{f,1}$  der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit und  $\beta_N$  dem Zielzuverlässigkeitsindex innerhalb der Gesamtnutzungsdauer. Bei Anwendung des Konzeptes wird das geforderte Zielzuverlässigkeitsniveau nicht unterschritten, wenn die charakteristischen Einwirkungen wie für den Neubau festgelegt, verwendet werden.

*DIN EN 1990:2010-12* [16] gibt fünf Klassen der Nutzungsdauer an. Übliche Bauwerke werden für eine übliche Nutzungsdauer von 50 Jahren errichtet. Basierend auf  $\beta = 3,2$  ergeben sich die Zielzuverlässigkeitsindices abhängig von der Restnutzungsdauer analog zu den Berechnung von *Stauder* [50] unter der Annahme statistisch unabhängiger Jahre wie in Tab. 7.8 dargestellt.

Tab. 7.8: Zielzuverlässigkeitsindex abhängig von der Restnutzungsdauer

$R_N$ Restnutzungsdauer [a]	50	40	30	25	20	15	10	5
$\beta_t$ Instandsetzungslevel	3,20	3,14	3,05	2,99	2,93	2,84	2,70	2,46
$\beta_t$ Bewertungslevel	2,90	2,83	2,74	2,68	2,60	2,50	2,35	2,08

Zur Berücksichtigung einer reduzierten Restnutzungsdauer im Tragfähigkeitsnachweis kann der angepasste Sicherheitsbeiwert abhängig von der Zielzuverlässigkeit aus den Kalibrierungsergebnissen unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit abgelesen werden.

Für die ermittelten Zielzuverlässigkeitsindices können modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte abhängig vom Bemessungsfall aus den dargestellten Tabellen in Kap. 7.5 bzw. Anhang 10.11 (S. 87 ff.) unter Berücksichtigung der Anwendungsvoraussetzungen entnommen werden.

## 7.3 Vereinfachte Verfahren zur Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten

### 7.3.1 Design Value Method (DVM)

#### Grundlegendes

Diese Methode wird in der *ISO 2394:2015* [41] und im *fib Bulletin Nummer 80* [42], kann jedoch auch aus den Angaben der *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] hergeleitet werden. beschrieben. Die Sensitivitätsfaktoren für Einwirkungs- und Widerstandsgrößen werden als fest angenommen und es erfolgt keine Berücksichtigung der Art des Grenzzustandes. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden in Ab-

hängigkeit von der zugrunde gelegten Verteilungsfunktion unter Einsetzen des angestrebten Zielzuverlässigkeitsniveaus direkt berechnet. Es ist somit kein iteratives Verfahren nötig. Der Ablauf erfolgt nach Abb. 7.3. Nachfolgend werden die Teilsicherheitsbeiwerte für ständige und veränderliche Einwirkung und für Festigkeitsgrößen für Holzbauteile mit der Methode berechnet. Die detaillierte Herleitung der Formeln kann in Anhang Kap. 10.1.1 nachgelesen werden.

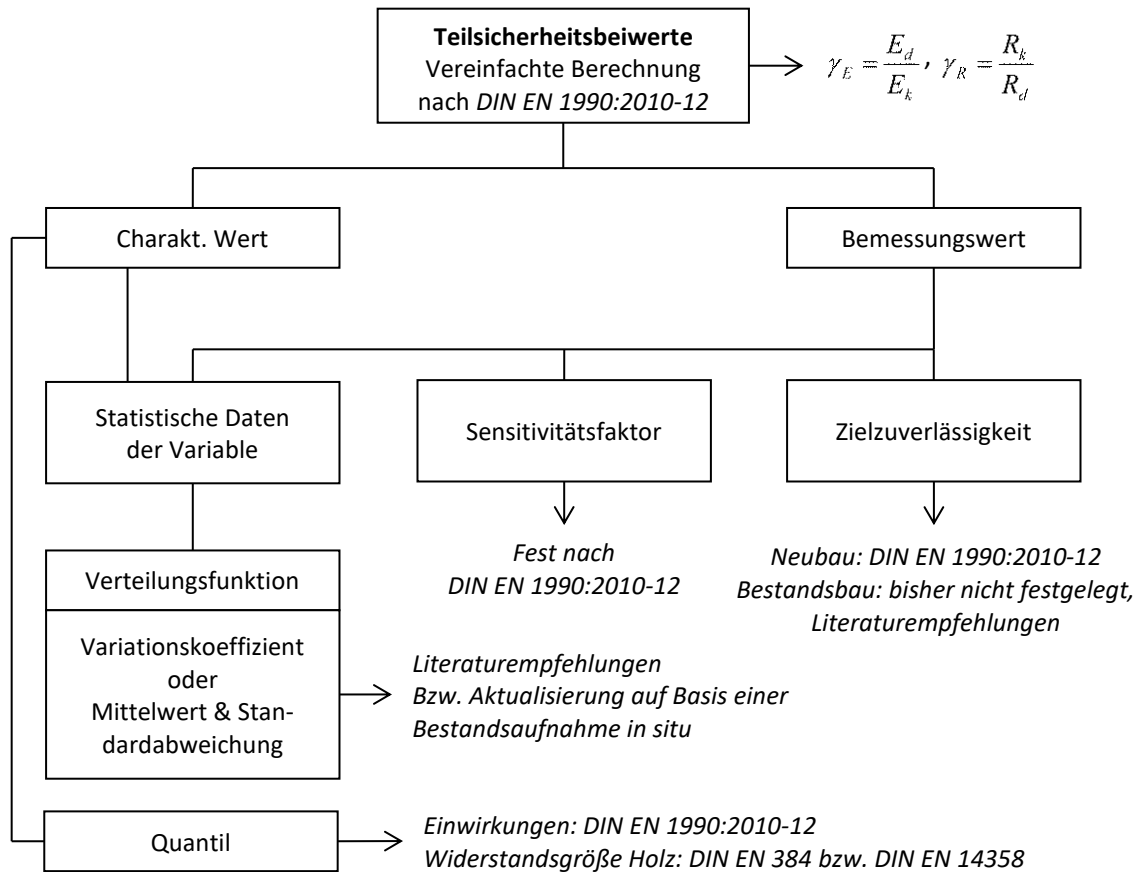


Abb. 7.3: Vorgehen zur Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten mit der *Design Value Method (DVM)*

### Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen

Ständige Einwirkungen werden als normalverteilt angenommen. *DIN EN 1990:2010-12* [16] legt fest, dass für den charakteristischen Wert in der Regel der Mittelwert zu verwenden ist. Nur wenn das Tragwerk sehr empfindlich auf Änderungen des Eigengewichtes reagiert, der 95%-Quantilwert zur Anwendung kommen soll. Da der Wert für  $\Phi^{-1}(q)$  für den Mittelwert zu null wird, kann der Teilsicherheitsbeiwert für die ständige Einwirkung wie folgt bestimmt werden:

$$\gamma_{G,sup} = \frac{1 - \alpha_E \beta V_E}{1 + V_E \cdot \Phi^{-1}(q)} \quad (7.10)$$

$$\gamma_{G,sup} = 1 - \alpha_E \beta V_{G,sup} \quad (7.11)$$

### Teilsicherheitsbeiwert für veränderlicher Einwirkungen

Der charakteristische Wert klimatischer Einwirkungen wird als 98%-Quantilwert im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 1a$  festgelegt. Aus diesem Grund muss eine Umrechnung für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  erfolgen.

$$\gamma_Q = \frac{1 - \left( \frac{V_E \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln\{-\ln \Phi(-\alpha_E \beta)\}) \right)}{1 - \frac{V_E \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln(-\ln(q)^T))} \quad (7.12)$$

Dabei ist der Quantilwert für Wind- und Schneelasten  $q = 0,98$ . Es erfolgt eine Umrechnung des charakteristischen Wertes der Einwirkung auf die Referenzperiode  $T_{ref} = 50$  Jahre innerhalb der Formel. Nach Grünberg [101] und dem *fib Bulletin Nummer 80* [42] sind Nutzlasten als 95%-Quantilwert in einem Bezugszeitraum von 50 Jahren abgebildet. Demnach würde keine weitere Umrechnung auf den Bezugszeitraum erfolgen (das T in der Formel würde entfallen) und es wäre  $q = 0,95$  einzusetzen. Die Untersuchungen von Glowienka [72] und Fischer [64] ergaben jedoch, dass auch für Nutzlasten das 98%-Quantil in einem Bezugszeitraum von einem Jahr den nach Norm vorgegebenen charakteristischen Werten am besten entspricht. Dies deckt sich mit den in Kap. 4.3 durchgeführten Berechnungen. Demzufolge wäre der Teilsicherheitsbeiwert analog zu klimatischen Einwirkungen (Windlasten, Schneelasten) zu bestimmen, wenn die charakteristischen Werte aus *DIN EN 1991-1-1:2010-12* [109] verwendet werden sollen. Dies wird in dieser Arbeit zugrunde gelegt.

### Teilsicherheitsbeiwert für Widerstände

Auf Widerstandsseite wird das 5%-Quantil der Verteilung verwendet. Es wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Der Teilsicherheitsbeiwert errechnet sich auf der Widerstandsseite nach Gl. (7.13). Der Wert für  $\Phi^{-1}(q)$  ist für das 5%-Quantil  $\Phi^{-1}(0,05) = 1,645$ .

$$\gamma_M = \exp(V_R \cdot (\alpha_R \beta + \Phi^{-1}(q))) \quad (7.13)$$

### Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit

#### Widerstandsseite

Der Faktor wird auf Materialseite in einen Anteil für die Widerstandsgröße selbst  $\gamma_{Rd,1}$  und einen Anteil für die geometrische Unsicherheit  $\gamma_{Rd,2}$  unterteilt. [42]

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,1} \cdot \gamma_{Rd,2} \quad (7.14)$$

Verwendet für den Modellfaktor wird eine Normalverteilung und das 50%-Quantil. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei nicht mehr um die maßgebende Widerstandsgröße handelt und demnach der Sensitivitätsfaktor nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] abgemindert werden kann. Somit ergibt sich

$$\gamma_{Rd,1} = \frac{1 + V_{\theta,R} \cdot \Phi^{-1}(q)}{1 - 0,4 \cdot \alpha_R \beta V_{\theta,R}} \quad (7.15)$$

Da  $\Phi^{-1}(0,5) = 0$  ist wird

$$\gamma_{Rd,1} = \frac{1}{1 - 0,4 \cdot \alpha_R \beta V_{\theta,R}} \quad (7.16)$$

$\gamma_{Rd,2}$  für die geometrische Streuung kann bei detaillierter Bestandsaufnahme  $\gamma_{Rd,2} = 1$  gesetzt werden.

### Einwirkungsseite

Der Modellfaktor für ständige und veränderliche Einwirkungen wird analog zum Faktor  $\gamma_{Rd,1}$  der Materialseite bestimmt. Es ergibt sich

$$\gamma_{Sd} = \frac{1 - 0,4 \cdot \alpha_E \beta V_{\theta,E}}{1 + V_{\theta,E} \cdot \Phi^{-1}(q)} \quad (7.17)$$

Da  $\Phi^{-1}(0,5) = 0$  ist wird

$$\gamma_{Sd} = 1 - 0,4 \cdot \alpha_E \cdot \beta \cdot V_{\theta,E} \quad (7.18)$$

### Zusammenstellung

Die Berechnungen werden für die ausgewiesenen Zielwerte der Zuverlässigkeit durchgeführt. In Kap. 5.4 wurde argumentiert, dass der Variationskoeffizient der Modellunsicherheit für das Widerstandsmodell aufgrund der Überprüfbarkeit des Tragsystems in situ auf  $V_{\theta,R} = 0,07$  reduziert wird. Dies wurde hier für die tabellarische Darstellung beibehalten (Tab. 7.9).

Tab. 7.9: Ergebnisse der vereinfachten Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten mit der DVM (Design Value Method)

					Neubau		Bestandsbau		
					Zielwert CC 2, EC 0		Vorschläge für Zielzuverlässigkeitsindizes		
					$\beta_{t,new} = 3,8$		Instandsetzungslevel $\beta_{t,exis} = 3,2$	Bewertungslevel $\beta_{t,eval} = 2,9$	Mindestlevel $\beta_{0,exis} = 2,5$
Widerstand	Festigkeit	Material	$V_R$	$V_{\theta,R}$	$\gamma_M$	$\gamma_M$	$\gamma_M$	$\gamma_M$	
	Druck	NH	0,20	0,07	1,44	1,29	1,22	1,08	
	Zug	NH	0,30	0,07	1,66	1,42	1,31	1,12	
	Biegung	NH	0,25	0,07	1,55	1,35	1,27	1,10	
Einwirkung	Ständige Lasten		$V_G$	$V_{\theta,E}$	$\gamma_G$	$\gamma_G$	$\gamma_G$	$\gamma_G$	
			0,05	0,05	1,19	1,16	1,14	1,12	
			0,07	0,05	1,24	1,20	1,18	1,16	
			0,10	0,05	1,32	1,27	1,24	1,21	
			0,12	0,05	1,37	1,31	1,28	1,25	
	Veränderliche Lasten		$V_Q$	$V_{\theta,E}$	$\gamma_Q$	$\gamma_Q$	$\gamma_Q$	$\gamma_Q$	
	Nutzlast	Wohnen							
		A ≤ 20m <sup>2</sup>		0,32	0,10	2,90	2,49	2,30	2,07
		A > 20m <sup>2</sup>		0,19	0,10	2,10	1,86	1,76	1,63
		Büro							
		A ≤ 20m <sup>2</sup>		0,39	0,10	3,38	2,86	2,62	2,34
	A > 20m <sup>2</sup>		0,24	0,10	2,40	2,09	1,96	1,79	
Schneelast		0,25	0,10	2,46	2,14	2,00	1,83		
Windlast		0,16	0,10	1,93	1,73	1,64	1,53		

Die Ergebnisse werden in Abb. 7.4 bis Abb. 7.6 grafisch aufbereitet. Um den Einfluss der Modellunsicherheit auf den berechneten Teilsicherheitsbeiwert zu verdeutlichen, werden für alle drei Teilsicherheitsbeiwerte die Ergebnisse für  $V_{\theta} = 0,05$  und  $V_{\theta} = 0,10$  dargestellt.

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

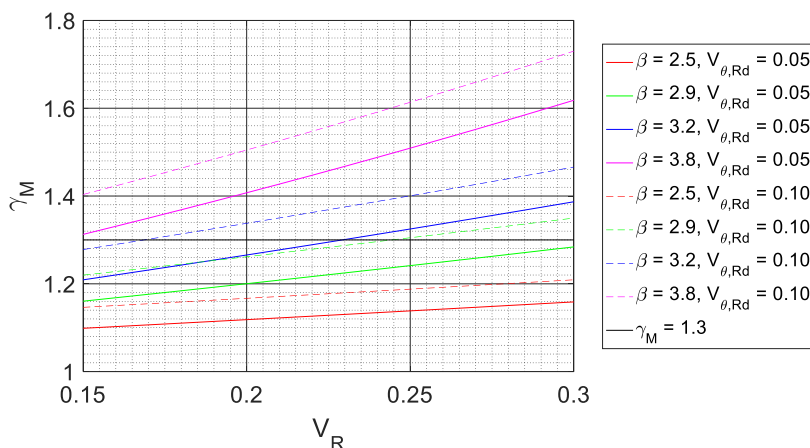


Abb. 7.4: Teilsicherheitsbeiwert für Widerstandsgrößen  $\gamma_M$  mit der Design Value Method (DVM)

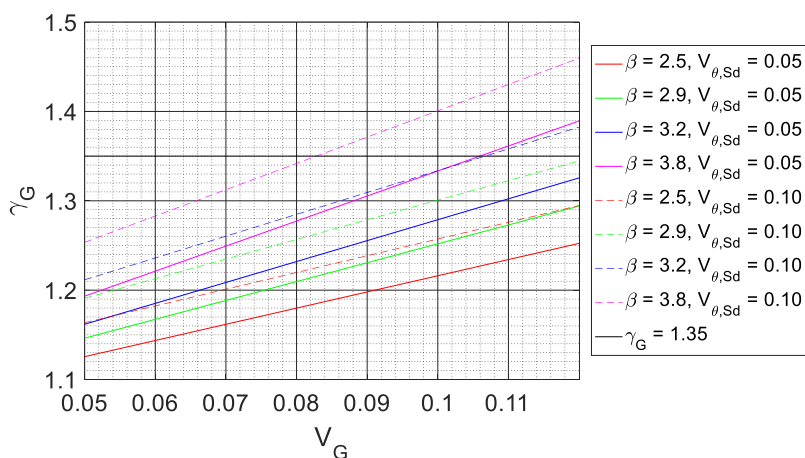


Abb. 7.5: Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen  $\gamma_G$  mit der Design Value Method (DVM)

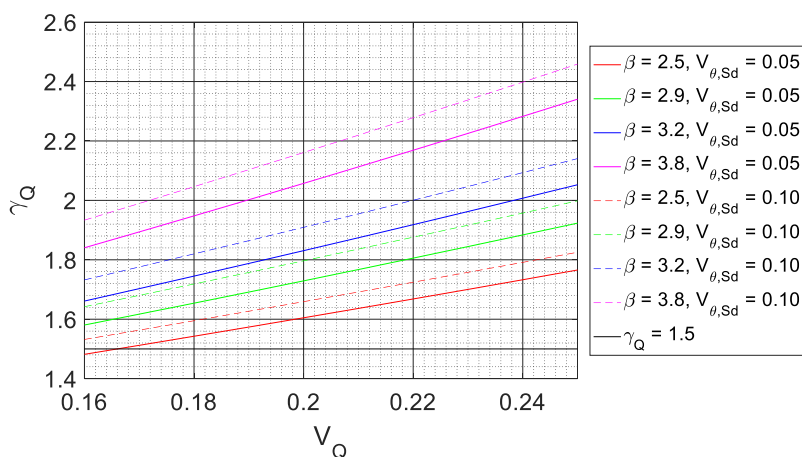


Abb. 7.6: Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen  $\gamma_Q$  mit der Design Value Method (DVM)

**Auswertung**

**Widerstandsgrößen**

Bei Annahme des Zielzuverlässigkeitsindex aus *DIN EN 1990:2010-12* [16] für die Schadensfolgeklasse CC 2 ( $\beta_{t,new} = 3,8$ ) liegen die berechneten Teilsicherheitsbeiwerte deutlich höher, als die aktuelle Festlegung nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] ( $\gamma_M = 1,30$ ). Auch für das vorgeschlagene Instandsetzungslevel von  $\beta_{t,exis} = 3,2$  liegen die errechneten Werte höher als die normativen Vorgaben. Die konservative

Annahme des Sensitivitätsfaktors  $\alpha(\sqrt{|\alpha_E|^2 + |\alpha_R|^2} = \sqrt{0,7^2 + 0,8^2} = 1,06 > 1)$  führt zu einer leichten Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes. Maßgeblich ist die Erhöhung jedoch auf den Variationskoeffizienten und den veranschlagten Zielzuverlässigkeitsindex zurückzuführen.

### Ständige Einwirkungen

Bei Annahme eines Variationskoeffizienten der ständigen Lasten von  $V_G = 0,10$  und einer Modellunsicherheit von  $V_{\theta,G} = 0,05$  ergibt sich für den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G = 1,32$ , bei  $V_G = 0,10$  und  $V_{\theta,G} = 0,10$  ergibt sich  $\gamma_G = 1,38$  für den Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta_{t,new} = 3,8$ . Dies liegt im Bereich der aktuellen normativen Festlegung von  $\gamma_G = 1,35$ .

Bei Abminderung der Zielzuverlässigkeit auf  $\beta_{t,exis} = 3,2$  ergibt sich mit  $V_G = 0,07$  für den Bestandsbau und  $V_{\theta,G} = 0,05$   $\gamma_G = 1,20$ , wie auch in SIA 269:2011 [21] für  $\gamma_{G,up}$  angegeben

### Veränderliche Einwirkungen

Bei Betrachtung der veränderlichen Einwirkungen zeigen sich sehr hohe Teilsicherheitsbeiwerte. Diese variieren zwischen den Belastungen und damit den angenommenen Variationskoeffizienten stark. Für Nutzlasten wird auch mit den günstigsten Annahmen (Nutzlast, Raum mit  $A > 20 \text{ m}^2$ , Wohnraumnutzung) und dem Mindestniveau von  $\beta_{0,exis} = 2,5$  die geltende normative Festlegung von  $\gamma_Q = 1,50$  nicht erreicht. Auch für Schneelasten werden deutlich höhere Werte errechnet. Bei Windlasten errechnet sich im Mindestniveau ungefähr der Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_Q = 1,50$ , für die ausgewiesenen Zielwerte wären jedoch deutlich höhere Teilsicherheitsbeiwerte nötig. Die konservativen Annahmen für den Sensitivitätsfaktor führt zu einer leichten Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes, als dies bei probabilistischer Kalibrierung für definierte Grenzzustände der Fall wäre. Jedoch sind die Abweichungen von den aktuell geltenden Werten zu hoch, als dass dies darauf zurückzuführen wäre.

### 7.3.2 Adjusted Partial Factor Method (APFM) – Anpassung für den Bestandsbau

Die Methode wird im *fib Bulletin no. 80* [42] beschrieben. Die Teilsicherheitsbeiwerte des Neubaus werden mithilfe von Faktoren für den Bestandsbau angepasst, Sensitivitätsfaktoren werden fix angenommen. Eine Anpassung des Zielzuverlässigkeitsindex für den Bestandsbau wird berücksichtigt. Die Berechnung des Anpassungsfaktors basiert auf dem Verhältnis der Bemessungswerte, die aus den unterschiedlichen Annahmen für Zielzuverlässigkeitsindices und ggf. Referenzperiode gebildet werden.

### Anpassungsfaktor für Widerstandsgrößen

Der Anpassungsfaktor für logarithmisch normalverteilte Widerstandsgröße ist nach [42] (Gl. (7.19))

$$\omega_Y = \frac{\gamma_{Rd}(\beta'')}{\gamma_{Rd}(\beta')} \cdot \exp\left(\alpha_R \beta' V_x' \left(\frac{\beta'' V_x''}{\beta' V_x'} - 1\right) - 1,645 V_x' \left(\frac{V_x''}{V_x'} - 1\right)\right) \quad (7.19)$$



## 7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Dabei ist  $\alpha_R$  der Sensitivitätsfaktor der Widerstandsvariablen,  $\beta'$  das Zuverlässigkeitsniveau für neue Konstruktionen,  $\beta''$  das Zuverlässigkeitsniveau für alte Konstruktionen,  $V_x'$  der Variationskoeffizient der Widerstandsvariablen in Bezug auf den Neubau und  $V_x''$  der Variationskoeffizient der Widerstandsvariablen in Bezug auf den Altbau bzw. der in situ bestimmte Wert.

Der Modellfaktor  $\gamma_{Rd}$  setzt sich zusammen aus

$$\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd,1} \cdot \gamma_{Rd,2} \quad (7.20)$$

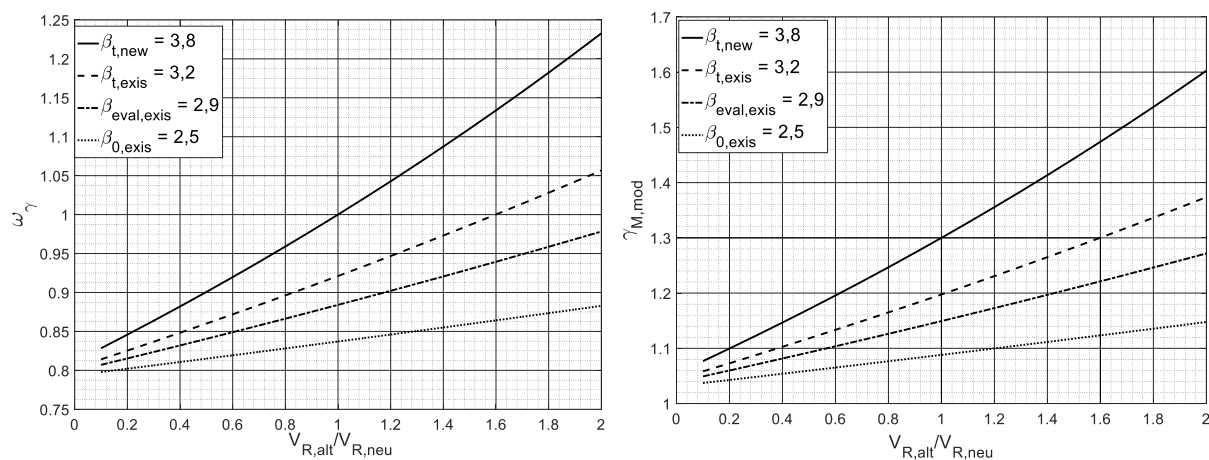
Dabei ist  $\gamma_{Rd,1}$

$$\gamma_{Rd,1} = \frac{1}{1 - 0,32 \cdot \beta \cdot V_{\theta,Rd,1}} \quad (7.21)$$

Zumeist wird  $V_{\theta,Rd,1} = 0,05$  angenommen.  $\gamma_{Rd,2}$  ist der Faktor für geometrische Variationen. Bei qualifizierter Bestandsaufnahme kann er zu eins angenommen werden:

$$\gamma_{Rd,2} = \frac{1}{1 - 0,32 \cdot \beta \cdot V_{R,Rd,2}} = 1 \quad (7.22)$$

Abb. 7.7 stellt den Anpassungsfaktor und modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte dar. Mit der *Design Value Method* (Kap. 7.3.1) kann bestimmt werden, dass mit  $V_R = 0,15$  bei Annahme einer lognormalverteilten Widerstandsgröße der Zielwert von  $\beta = 3,8$  (Schadensfolgeklasse CC 2,  $T_{ref} = 50a$ ) aus *DIN EN 1990:2010-12* [16] eingehalten werden kann. Aus diesem Grund wurde der Wert bei der Ermittlung von Abb. 7.7 zugrunde gelegt und muss für  $V_{R,neu}$  im Verhältnis  $V_{R,alt}/V_{R,neu}$  angewendet werden.



**Abb. 7.7:** Anpassungsfaktor  $\omega_\gamma$  und  $\gamma_{M,mod}$  abhängig vom Verhältnis des im Bestand ermittelten Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_{R,alt}$  zum im Neubau zugrunde gelegten Wert ( $V_{R,neu} = 0,15$ ),  $\beta_{t,new} = 3,8$ ,  $\alpha_R = 0,8$ ,  $V_{\theta,R} = 0,05$ , logarithmische Normalverteilung, *APFM* aus *fib* [42]

Die Parameterstudien in Kap. 6 ergaben, dass bei den materialtypischen Streuungen für Bauholz bei Anwendung der geltenden Bemessungsvorschriften im Mittel ein Zuverlässigkeitsniveau von  $\beta_t = 3,2$  erreicht wird. Die Streuungen um diesen Wert sind bedingt durch das Lastverhältnis aus ständiger und veränderlicher Lasten und der Größe des Variationskoeffizienten des Materialwiderstandes. Auch die Anwendung der *APFM* zeigt, dass unter den definierten Festlegungen ( $V_{R,neu} = 0,15$  und  $\gamma_M = 1,30$  wird  $\beta_{t,new} = 3,8$  erreicht) bei einem Variationskoeffizienten des Materialwiderstandes von  $V_R = 0,25$  der Teilsicherheitsbeiwert zur Erzielung von  $\beta_t = 3,2$ ,  $\gamma_M = 1,31$  beträgt.

Eine beispielhafte Berechnung für die vorgeschlagenen Zuverlässigkeitsindizes und ausgewählte Variationskoeffizienten der Festigkeit zeigt Tab. 7.10.

Tab. 7.10: Beispielhafte Anpassungen des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  mit der APFM ( $V_{R,neu} = 0,25$ )

$\beta$	Instandsetzungslevel				Bewertungslevel				Mindestlevel			
	3,2				2,9				2,5			
$V_{R,alt}$	0,18	0,20	0,22	0,25	0,18	0,20	0,22	0,25	0,18	0,20	0,22	0,25
$\gamma_{M,mod}$	1,23	1,25	1,28	1,31	1,18	1,19	1,21	1,24	1,11	1,12	1,13	1,14

### Anpassungsfaktor für ständige Einwirkungen

Für normalverteilte ständige Einwirkungen kann der Anpassungsfaktor für den Teilsicherheitsbeiwert mit Gl. (7.23) bestimmt werden

$$\omega_\gamma = \frac{\gamma_{Ed,G}(\beta'')}{\gamma_{Ed,G}(\beta')} \cdot \frac{1 - \alpha_E \beta'' V_G''}{1 - \alpha_E \beta' V_G'} \quad (7.23)$$

Der Modellfaktor kann mit Gl. (7.24) bestimmt werden:

$$\gamma_{Ed,G} = 1 - \alpha_E \beta V_{\theta,G} = 1 - 0,28 \cdot \beta \cdot V_{\theta,G} = 1 + 0,28 \cdot 3,8 \cdot 0,11 = 1,117 \quad (7.24)$$

Dabei ist  $\alpha_E$  der Sensitivitätsfaktor für begleitende Einwirkungen ( $\alpha_E = -0,7 \cdot 0,4$ ).  $V_{\theta,G}$  ist der Variationskoeffizient der Modellunsicherheit, er wird mit  $V_{\theta,G} = 0,05$  angenommen. Abb. 7.8 stellt den Anpassungsfaktor und den modifizierten Teilsicherheitsbeiwert für die aufgeführten Verhältnisse dar.

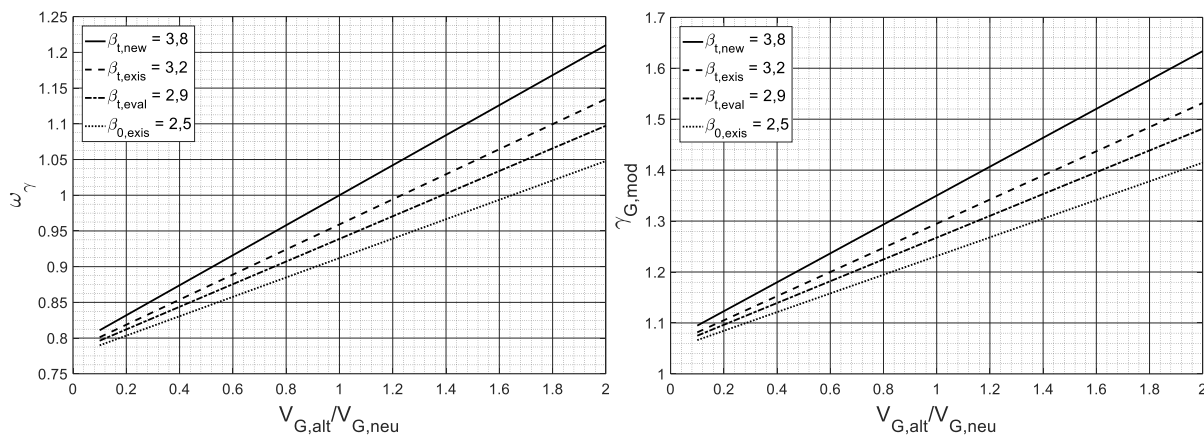


Abb. 7.8: Anpassungsfaktor  $\omega_\gamma$  und  $\gamma_{G,mod}$  abhängig vom Verhältnis des im Bestand ermittelten Variationskoeffizienten der ständigen Einwirkung  $V_{G,alt}$  zum im Neubau zugrunde gelegten Wert ( $V_{G,neu} = 0,10$ ),  $\beta_{Neubau} = 3,8$ ,  $\alpha_E = -0,7$ ,  $V_{\theta,G} = 0,05$ , Normalverteilung, APFM aus fib [42]

Es ergeben sich ähnliche, etwas konservativere Ergebnisse im Vergleich zur DVM, was sich auch mit der Aussage im fib Dokument deckt [42]. Tab. 7.11 zeigt beispielhafte Anpassungen für  $\gamma_G$ .

Tab. 7.11: Beispielhafte Anpassungen des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_G$  mit der APFM, ( $V_{G,neu} = 0,10$ )

$\beta$	Instandsetzungslevel			Bewertungslevel			Mindestlevel		
	3,2			2,9			2,5		
$V_{G,alt}$	0,07	0,10	0,12	0,07	0,10	0,12	0,07	0,10	0,12
$\gamma_{G,mod}$	1,22	1,29	1,34	1,20	1,27	1,31	1,18	1,23	1,27

### Anpassungsfaktor für veränderliche Einwirkungen

Im *fib Bulletin Nummer 80* [42] werden zwei Methoden beschrieben. Methode A legt als charakteristischen Wert der Einwirkungen die Angaben des Eurocodes zugrunde. Der angepasste Teilsicherheitsbeiwert wird unter Berücksichtigung der neuen Referenzperiode und ggf. einer angepassten Zielzuverlässigkeit berechnet. Diese implizite Korrektur der charakteristischen Werte auf die betrachtete Referenzperiode kann, wie im *fib* Dokument betont, zu Sicherheitsbeiwerten  $< 1$  führen. Vermieden werden kann dies durch Anwendung der Methode B, bei der die charakteristischen Einwirkungen aus aktualisierten Informationen bestimmt werden. Zur Anwendung der mit Methode B angepassten Sicherheitsbeiwerte müssen jedoch die angepassten charakteristischen Werte verwendet werden. Für diese Arbeit wurde festgelegt, dass alle modifizierten Teilsicherheitsbeiwerte auf die charakteristischen Werte der aktuellen normativen Festlegung anwendbar sein sollen. Auf diesem Grund wird sich hier auf die Methode A fokussiert.

Der Anpassungsfaktor für die variablen Einwirkungen aus Wind und Schnee nach Methode A ist [42]:

$$\omega_Y = \frac{\gamma_{Ed,Q}(\beta'')1 + V_{Qc\lim,I}''[0,78 \ln t''_{ref} - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln(-\alpha_E \beta''))]}{\gamma_{Ed,Q}(\beta')1 + V_{Qc\lim,I}'[0,78 \ln t'_{ref} - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln(-\alpha_E \beta'))]} \quad (7.25)$$

Nach *fib Bulletin* [42] liegt der variablen Einwirkung aus Wind nicht das Zielniveau  $\beta = 3,8$  für den Bezugszeitraum 50 Jahre, sondern das Niveau  $\beta = 2,8$  zugrunde. Diese Abweichung ist nach Aussage im *fib Bulletin* wahrscheinlich auf ökonomische Gründe zurückzuführen [42]. Die Anwendung der *DVM* in Kap. 7.3.1 konnten dies nicht bestätigen. Auch bei Anwendung eines Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 2,5$  ergaben sich höhere Werte, als der geltende Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_Q = 1,5$ . Lediglich für die Windlast wurde der Wert annähernd erreicht. Wird davon ausgegangen, dass der zugrunde gelegte Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 2,5$  beträgt, ergeben sich die Anpassungsfaktoren bzw. angepassten Teilsicherheitsbeiwerte nach Abb. 7.9. Analog zur Anwendung der *DVM* in Kapitel 7.3.2 ergeben sich für veränderliche Einwirkungen deutliche höhere Teilsicherheitsbeiwerte.

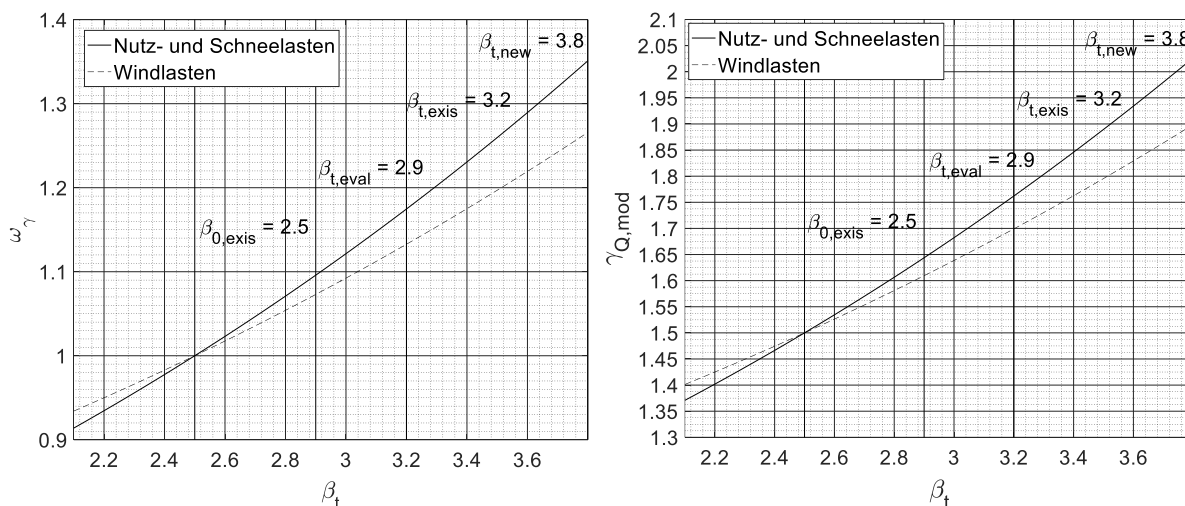


Abb. 7.9: Anpassungsfaktoren für den Teilsicherheitsbeiwert für veränderlicher Einwirkungen (Nutz-/ Schneelast:  $V_{Q,neu} = 0,25$ , Windlast:  $V_{Q,neu} = 0,16$ ,  $\alpha_E = -0,7$ ,  $t''_{ref} = t'_{ref}$ ), APFM aus *fib* [42]

### 7.3.3 Anwendung der ISO 2394 auf den Bestandsbau durch D. E. Allen [234]

#### – Anpassung für den Bestandsbau

Die ISO 13822:2010 [40] als Norm für den Bestandsbau verweist für eine Anwendung der Prinzipien der ISO 2394 auf bestehende Tragwerke auf Allen [234]. Dieser empfiehlt die Anpassung der Lastfaktoren für Gebäude im Bestand. Es fällt auf, dass der angegebene Wert für den Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit für Holz mit  $V_R = 0,3$  hoch gewählt ist. Es werden angepasste Teilsicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit von der Absenkung der Zielzuverlässigkeit bzw. des bisherigen Tragverhaltens ausgewiesen. Das Tragwerk wird unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien (siehe Tab. 7.12) bewertet. Eine Aktualisierung von Parametern wird nicht berücksichtigt, auch erfolgt keine Anpassung in Abhängigkeit des Werkstoffs. Eine verbale Beschreibung der unterschiedlichen Stufen der Kriterien führt zu einem ausgewiesenen Differenzbetrag. Für den Gesamtwert kann für die entsprechende Belastung der Teilsicherheitsfaktor der Tabelle entnommen werden. Für die ungünstigsten Fälle, bei denen die Zuverlässigkeit nicht zusätzlich abgesenkt wird, wird bei ständigen Lasten ein Faktor von  $\gamma_G = 1,25$  ausgewiesen. Tab. 7.12 stellt die Abminderungen bei Anpassung des Sicherheitsniveaus für ständige und veränderliche Lasten dar. Anschließend werden die Kriterien und die entsprechenden Anpassungswerte dargestellt. Eine kurze Beispielrechnung zeigt die Anwendung der Methode.

Tab. 7.12: Lastfaktoren für die Bauwerksbewertung aus Allen [234]

Anpassung des Design-Sicherheitsniveaus $\Delta = (\Delta_S + \Delta_R + \Delta_P)$	Lastfaktor für:	
	Ständige Lasten <sup>1</sup>	Veränderliche Lasten
0	1,25 (0,85)	1,50
0,25	1,20 (0,88)	1,40
0,5	1,15 (0,91)	1,30
0,75	1,11 (0,93)	1,20
1,0 oder mehr	1,08 (0,95)	1,10

<sup>1</sup> Anwendung des eingeklammerten Wertes bei günstiger Wirkung der ständigen Last

Tab. 7.13: Anpassungsfaktoren für Teilsicherheitsbeiwerte aus Allen [234]

Anpassung für Tragwerksverhalten	$\Delta_S$
- Versagen führt zum Zusammenbruch, Beeinträchtigung von Menschen ist wahrscheinlich	0,0
- Versagen führt unwahrscheinlich zum Zusammenbruch, Beeinträchtigung von Menschen ist unwahrscheinlich	0,25
- Versagen ist nur lokal, Beeinträchtigung von Menschen ist sehr unwahrscheinlich	0,5
Anpassung für Risikokategorie	$\Delta_R$
- Große Wichtigkeit des Gebäudes oder hohe Belegungszahl, die dem Versagen ausgesetzt ist	0,0
- Normale Belegungszahl, die dem Versagen ausgesetzt ist	0,25
- Geringe Belegungszahl, die dem Versagen ausgesetzt ist	0,5
Anpassung für Tragverhalten in der Vergangenheit	$\Delta_P$
- Keine Belege für zufriedenstellendes Tragverhalten in der Vergangenheit	0,0
- zufriedenstellendes Tragverhalten in der Vergangenheit <sup>1</sup> oder ständige Lasten gemessen <sup>2</sup>	0,25

<sup>1</sup> Nur für ständige und veränderliche Lasten anwenden, Alter 50 Jahre oder mehr, keine signifikante Verschlechterung des Tragwerks

<sup>2</sup> Nur auf den Faktor für ständige Lasten anwenden

### **Beispiel: Anpassung von Teilsicherheitsbeiwerten nach D. E. Allen**

Betrachtet wird der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten bei der Nachrechnung eines Dachstuhls eines 70 Jahre alten Hauses. Im Versagensfall könnten Bewohner zu Schaden kommen ( $\Delta_S = 0,0$ ). Es handelt sich um ein normal genutztes Einfamilienhaus mit einer Bewohnerzahl von vier Personen ( $\Delta_R = 0,25$ ). Das Tragverhalten des Dachstuhls in der Vergangenheit war absolut zufriedenstellend ( $\Delta_P = 0,25$ ). Es ergibt sich folgende Abminderung des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Lasten:

$$\Delta = \Delta_S + \Delta_R + \Delta_P = 0,0 + 0,25 + 0,25 = 0,5$$

→ Aus Tab. 7.12 ergibt sich für  $\Delta = 0,5$ :  $\gamma_{G,mod} = 1,15$ ,  $\gamma_{Q,mod} = 1,30$

### **7.3.4 Zusammenfassung**

Die Ergebnisse der Berechnung mit der *DVM* zeigten, dass das in *DIN EN 1990:2010-12* [16] geforderte Zielzuverlässigkeitsniveau mit den aktuell geltenden Teilsicherheitsbeiwerten unter Anwendung der herausgearbeiteten probabilistischen Parameter für veränderliche Einwirkungen nicht erreicht wird. Die mit der *DVM* bestimmten angepassten Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen weichen jedoch deutlich von den derzeitigen Festlegungen aus *DIN EN 1990:2010-12* [16] ab.

Das Verfahren nach *D.E. Allen* [234] stellt ein erstes Anpassungsverfahren der Teilsicherheitsbeiwerte für den Bestandsbau auf Basis der Ausgangswerte des Neubaus dar. In gewisser Weise ähnelt es der *APFM*, da auch hier der Sicherheitsbeiwert aus dem Neubau als Grundlage für eine Anpassung im Bestandsbau verwendet wird. Bei beiden Verfahren wird davon ausgegangen, dass mit den Sicherheitsbeiwerten für den Neubau auch das entsprechend geforderte rechnerische Sicherheitsniveau erzielt wird, ohne dies rechnerisch zu überprüfen. Nach *fib Bulletin* [42] ist die *Adjusted Partial Factor Method (AFPM)* etwas robuster in der praktischen Anwendung als die *Design Value Method (DVM)*, da die Anpassung weniger subjektiv ist.

## **7.4 Anpassung des Materialbeiwertes unter Einbeziehung einer in situ bestimmten Referenzeigenschaft**

### **7.4.1 Herleitung und Beispiel**

Die beschriebenen Methoden zur vereinfachten Anpassung von Teilsicherheitsbeiwerten basieren auf Modifikationen des Zielzuverlässigkeitsniveaus und einer Festlegung des Variationskoeffizienten der Zielgröße auf Basis von a priori Informationen. Die direkte Bestimmung von Zielgrößen gestaltet sich jedoch schwierig, da dies häufig mit einer (teil-)zerstörenden Prüfung verbunden ist. Demzufolge werden Referenzeigenschaften zur Aktualisierung von Informationen über das im Bestand vorliegende Material und seine Qualität herangezogen.

Der Teilsicherheitsbeiwert ist ein Hilfsmittel zur Bestimmung des Bemessungspunktes von einem festgelegten Startpunkt aus. Die Definition von Sicherheitsbeiwerten ist somit auch bezogen auf andere

Werte der Verteilung, beispielsweise von Erwartungswerten ausgehend, möglich. Die Bestimmung der Erwartungswerte ist jedoch mit größerer statistischer Unsicherheit als das 5%-Quantil behaftet. So hat beispielsweise der Feuchtegehalt des Holzes wie beschrieben einen deutlichen Einfluss auf den Erwartungswert, im Bereich des 5%-Quantils ist dieser Einfluss jedoch sehr gering.

Bei der Aktualisierung von Materialeigenschaften durch die Messung von Referenzeigenschaften mit apparativer Unterstützung in situ wird das Materialmodell aktualisiert. Bei semi-probabilistischer Bewertung der Tragfähigkeit werden weiterhin die charakteristischen Werte der *EN 338* verwendet. Durch die Aktualisierung der Verteilungskurve würde sich ein anderer charakteristischer Wert ergeben. Da dieser jedoch weiter nach *EN 338* [110] angenommen werden soll, kann die Transformation auf den Bemessungspunkt vorgenommen, also der Teilsicherheitsbeiwert angepasst werden. Ist die gemessene Referenzeigenschaft deutlich größer als für die entsprechende Festigkeitsklasse zugrunde gelegt, kann die Anpassung auf den Bemessungswert bezogen auf den charakteristischen Wert nach Norm entsprechend kleiner ausfallen. Es erfolgt damit keine Abminderung des Sicherheitsniveaus durch eine Reduktion des Sicherheitsbeiwertes. Vielmehr muss zur Bestimmung des Bemessungspunktes, welcher sich auf Basis der aktualisierten Verteilungsfunktion ergibt, bezogen auf die genormten Materialeigenschaften ein geringerer Sicherheitsbeiwert angenommen werden.

Zur Nutzung des Informationszuwachses aus der Prüfung in situ wird die Korrelation aus Referenz- und Zieleigenschaft herangezogen. Nach *Köhler* [242] kann der Mittelwert der Zielvariablen  $\mu_{y|x_{meas}}$  basierend auf der gemessenen Referenzvariablen mit

$$\mu_{y|x_{meas}} = \mu_{y_{code}} \cdot \left( 1 + \rho_{x,y} \cdot V_{y_{code}} \cdot \frac{x_{meas} - \mu_{x_{code}}}{\mu_{x_{code}} \cdot V_{x_{code}}} \right) \quad (7.26)$$

berechnet werden. Dabei sind  $V_{x_{code}}$  der Variationskoeffizient und  $\mu_{x_{code}}$  der Mittelwert der gemessenen Referenzvariablen wie in der Normung oder einem anderen Regelwerk definiert,  $V_{y_{code}}$  der Variationskoeffizient der Zielvariablen wie in der Normung oder einem anderen Regelwerk definiert und  $\rho_{x,y}$  der Korrelationskoeffizient von Ziel- und Referenzvariablen. Der Wert für  $x_{meas}$  wird anhand zerstörungsfreier oder zerstörungssarmer Tests in situ bestimmt.

Die Standardabweichung der Zielvariablen  $\sigma_{y|x_{meas}}$  abhängig vom Testergebnis ist nach *Köhler* [242]

$$\sigma_{y|x_{meas}} = V_{y_{code}} \cdot \mu_{y_{code}} \cdot \sqrt{1 - \rho_{x,y}^2} \quad (7.27)$$

Mit Gl. (7.26) und Gl. (7.27) kann der Variationskoeffizient der Zielvariablen berechnet werden

$$V_{y|x_{meas}} = \frac{\sigma_{y|x_{meas}}}{\mu_{y|x_{meas}}} = \frac{V_{y_{code}} \cdot \sqrt{1 - \rho_{x,y}^2}}{\left( 1 + \rho_{x,y} \cdot V_{y_{code}} \cdot \frac{x_{meas} - \mu_{x_{code}}}{\mu_{x_{code}} \cdot V_{x_{code}}} \right)} \quad (7.28)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m$  für logarithmisch normalverteilte Widerstandsvariablen ist

$$\gamma_m = \exp \left( V_R \cdot (\alpha_R \cdot \beta + \Phi^{-1}(q)) \right) \quad (7.29)$$

Mit  $V_R = V_{y|x_{meas}}$  wird nun unter Berücksichtigung der aus den Referenzgrößen aktualisierten Werten der Zielgröße der aktualisierte Teilsicherheitsbeiwert

$$\gamma_{m,up} = \exp \left( \frac{V_{y\_code} \cdot \sqrt{1 - \rho_{x,y}^2}}{\left(1 + \rho_{x,y} \cdot V_{y\_code} \cdot \frac{x_{meas} - \mu_{x\_code}}{\mu_{x\_code} \cdot V_{x\_code}}\right)} \cdot (\alpha_R \cdot \beta + \Phi^{-1}(q)) \right) \quad (7.30)$$

Die Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes ist nun abhängig von der aktualisierten Widerstandsvariablen und damit von der beobachteten, mit zerstörungsfreien bzw. zerstörungsarmen Untersuchungsmethoden bestimmten Referenzvariablen  $x_{meas}$ . Zur Einbeziehung der Modellunsicherheit wird der Modellfaktor  $\gamma_{Rd}$  eingeführt. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,up}$  wird dann

$$\gamma_{M,up} = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_{m,up} \quad (7.31)$$

Der Modellunsicherheitsfaktor  $\gamma_{Rd}$  berechnet sich anhand des 50%-Quantils einer Normalverteilung unter Berücksichtigung der Anpassung für eine Begleitvariable nach *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] oder *ISO 2394:2015* [41]. Ist der Korrelationskoeffizient zwischen Mess- und Zielgröße gering, sollte die Methode nicht angewendet werden. Unberücksichtigt bleiben zudem die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Referenzvariablen (z. B. Bestimmung des E-Moduls aus der Schallgeschwindigkeit oder Bestimmung der Materialfestigkeit aus kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern). Dies muss bei der Bestimmung der Referenzgröße berücksichtigt werden.

Die Herleitung wurde in *Loebjinski, Köhler, Rug & Pasternak* [243] vorgestellt. Zudem wurde die Aktualisierung in *Loebjinski, Linke, Rug & Pasternak* [244] für verschiedene gemessene Referenzvariablen an einem Beispielobjekt angewendet.

### Beispiel 7.2: Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_M$ auf Basis einer gemessenen Referenzeigenschaft

Der charakteristische Wert der Biegefestigkeit in der Festigkeitsklasse C 24 beträgt  $f_k = 24 \text{ N/mm}^2$ . Unter Anwendung eines Teilsicherheitsbeiwertes von  $\gamma_M = 1,3$  und  $k_{mod} = 1,0$  ergibt sich ein Bemessungswert von  $f_d = 18,46 \text{ N/mm}^2$ , siehe Abb. 7.10.

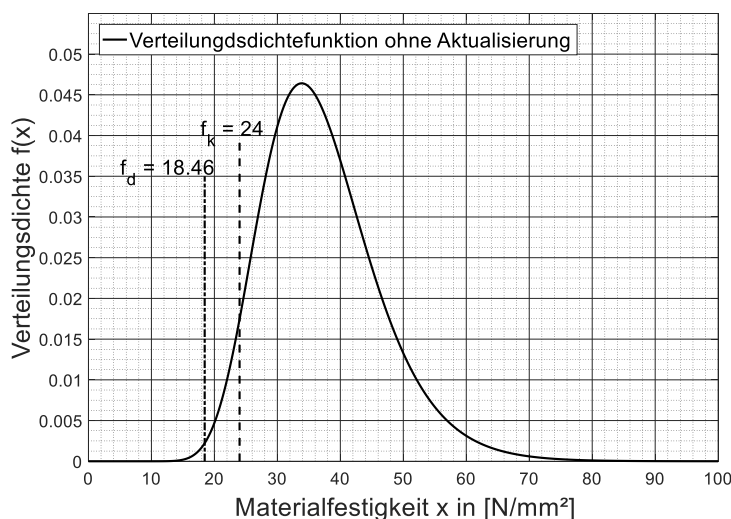


Abb. 7.10: Beispielhafte Verteilungsdichtefunktion mit charakteristischem Wert und Bemessungswert

Es wird nun angenommen, dass anhand von Messungen in situ der E-Modul am untersuchten Bauteil mit  $11.500 \text{ N/mm}^2$  bestimmt werden kann. Die Werte zur beispielhaften Aktualisierung werden in Tab. 7.14 zusammengefasst.

Tab. 7.14: Beispielhafte Annahmen für eine Aktualisierung des Materialwiderstands

Variable	Erwartungswert	Variationskoeffizient	Erwartungswert	Variationskoeffizient	Korrelationskoeffizient aus Referenz- und Zielvariablen	Mittelwert der Messergebnisse
	Zielvariable	Zielvariable	Referenzvariable	Referenzvariable		
	basierend auf Vorinformationen					
Formelzeichen	$\mu_{y_{code}}$	$V_{y_{code}}$	$\mu_{x_{code}}$	$V_{x_{code}}$	$\rho_{x,y}$	$x_{meas}$
Beispiel	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] 37,09*	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] 0,25**	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] 11.000***	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] 0,13**	0,8**	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] 11.500

\* aus  $f_k = 24 \text{ N/mm}^2$  (DIN EN 338:2016-07 [110]) mit  $V=0,25$  ermittelt

\*\* JCSS PMC [61]

\*\*\* DIN EN 338:2016-07 [110]

Mit Gl. (7.26) und Gl. (7.27) ergibt sich  $\mu_{y|x_{meas}} = 43,61 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{y|x_{meas}} = 6,11 \text{ N/mm}^2$ . Mit Gl. (7.30). Gl. (7.31) und Tab. 7.14 wird der aktualisierte Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,up} = 1,22$  und damit der aktualisierte Bemessungswert des Materialwiderstands  $f_{d,act} = 19,67 \text{ N/mm}^2$ . Graphisch dargestellt ist dies in Abb. 7.11.

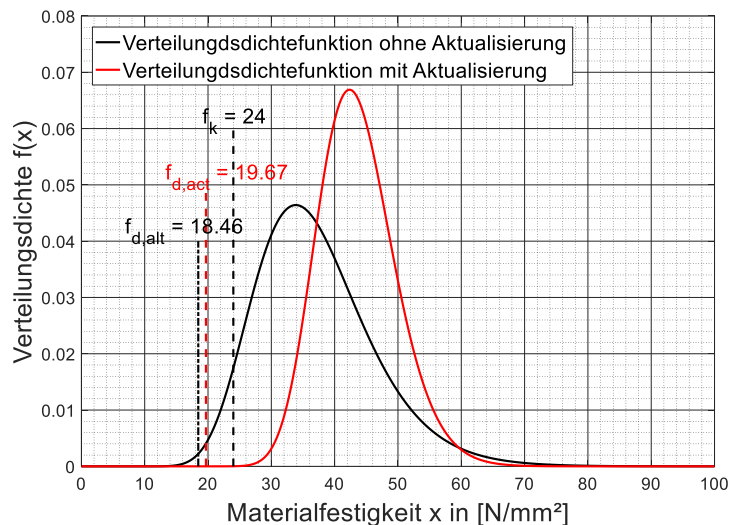


Abb. 7.11: Beispielhafte Verteilungsdichtefunktion mit Aktualisierung

Graphisch erscheint die Aktualisierung des Bemessungswertes verglichen mit der aktualisierten Verteilungsdichtefunktion gering. Dies ist auf den Einfluss des Korrelationskoeffizienten und die Berücksichtigung des Modellunsicherheitsfaktors zurückzuführen. Es handelt es sich um einen Ansatz zur Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes für Widerstandsgrößen auf Basis einer aktualisierten Materialeigenschaft, welche in den vorangestellten Methoden nur durch eine Aktualisierung des Variationskoeffizienten stattgefunden hat. Auch bei dieser Methode wird der Sensitivitätsfaktor fest angenommen und nicht für die Bemessungssituation aktualisiert. Dies wird im Rahmen der Methode der probabilistischen Optimierung nachfolgend einbezogen.



### 7.4.2 Berücksichtigung begrenzter Stichprobenzahlen

Der Ausweis modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte (Kap. 7.5) erfolgt abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeitseigenschaft. Ein Nachweis einer reduzierten Variabilität der Materialfestigkeit kann durch eine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes berücksichtigt werden. Zur Nutzung eines möglichen Potentials ist deshalb eine umfassende Anzahl an Tests in situ nötig. Ohne aktualisierte Informationen aus Materialtests in situ sollten die Angaben des *PMC Teil 3.5* [61] für den Variationskoeffizienten der verschiedenen Festigkeitseigenschaften des Bauholzes angenommen werden und der Sicherheitsbeiwert nur für den betrachteten Bemessungsfall angepasst werden.

Kap. 5.3.6 ergab, dass bei verteilungsfreier Schätzung auf Basis eines Vertrauensniveaus von  $P = 1 - \alpha = 0,75$  die erforderliche Stichprobenzahl  $n_{erf} = 28$  beträgt. Nach *Fischer* [64] kann erst ab einer Stichprobenzahl von  $n = 30$  eine zuverlässige Aussage zur zugrunde zulegenden Verteilungsfunktion der Materialeigenschaft getroffen werden. Entspricht die Materialeigenschaft einer anderen Verteilungsfunktion als die in der Kalibrierung zugrunde gelegten, entsteht nach *Fischer* [64] ab  $V_R = 10\%$  ein Fehler, der nicht vernachlässigt werden kann. Die Ermittlung von Materialkennwerten am Tragwerk in situ ist aufgrund Schadensvermeidung und ökonomischen Restriktionen in der Regel nur mit begrenztem Stichprobenumfang möglich. *Fischer* [64] schlägt Übertragungsfaktoren bei begrenzten Stichprobenzahlen zur Anwendung auf die kalibrierten Teilsicherheitsbeiwerte unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten der Betondruckfestigkeit vor, siehe Tab. 7.15 und Gl. (7.32). Von einer begrenzten Stichprobenzahl soll bei  $n < 30$  Proben ausgegangen werden.

$$\gamma_{M,opt} = \gamma_{TF} \cdot \gamma_{M,up} \quad (7.32)$$

Tab. 7.15: Übertragungsfaktoren zur Berücksichtigung begrenzter Stichprobenzahlen nach *Fischer* [64]

Festigkeitsstreuung	Übertragungsfaktor $\gamma_{TF}$		
	$V_R < 15\%$	$15\% < V_R < 30\%$	$V_R > 30\%$
$\gamma_{TF}$	1,05	1,10	1,15

Die Berücksichtigung von Vorinformationen reduziert Unsicherheiten. Erfolgt die Aktualisierung der Materialfestigkeit unter Anwendung des Bayes'schem Updating unter Annahme des a priori Werkstoffmodells des *JCSS PMC* [61], werden die Übertragungsfaktoren abhängig von der Stichprobenzahl und der zu aktualisierenden Materialeigenschaft vorgeschlagen, siehe Tab. 7.16. Diese basieren auf den Betrachtungen in Kap. 5.3.6. Mit  $\sigma' = 0,10$  im analytischen Modell nach *Raiffa & Schleiffer* [245] liegt ihnen ein relativ großes Vertrauen in die gewonnenen Information zugrunde, welches insbesondere bei geringen Stichprobenzahlen zum Tragen kommt.

Tab. 7.16: Vorschlag für Übertragungsfaktoren bei Bildung des Werkstoffmodells mittels Bayes'schem Updating unter begrenzten Stichprobenzahlen, Mindeststichprobenzahl nach geprüfter Festigkeitseigenschaft

Biegefestigkeit	Druckfestigkeit	Übertragungsfaktor $\gamma_{TF}$
$n = 5$	$n = 5$	1,05
$n = 15$	$n = 8$	1,04
$n = 30$	$n = 20$	1,03

## 7.5 Probabilistische Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für ausgewählte Beanspruchungsfälle

### 7.5.1 Grundlegendes, Optimierungsablauf, Optimierungskategorien & Parameter

#### Grundlegendes

In die in Kap. 7.3 und Kap. 7.4 vorgestellten Verfahren zur Berechnung bzw. Anpassung von Teilsicherheitsbeiwerten finden die Art des Grenzzustands und die Lastverhältnisse keinen Eingang. Auch entsteht durch die Festlegung der Sensitivitätsfaktoren eine deutliche Vereinfachung. Die Verfahren sind jedoch gut zur Entwicklung einer ersten Näherung geeignet. Die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten mittels probabilistischer Näherungsverfahren oder vollprobabilistischer Verfahren ermöglicht die Berücksichtigung des Einflusses jeder Basisvariablen im Optimierungsproblem auf die erreichte Zuverlässigkeit im betrachteten Grenzzustand. Eine Entkopplung von Last- und Widerstandsseite, wie sie durch fixe Sensitivitätsfaktoren erzielt werden soll, ist nur im Rahmen von Näherungen möglich, die nach *Pottharst, König & Weigler* [67] nur bereichsweise gültig sind. Hinweise zur zuverlässigkeitsbasierten Normungsoptimierung finden sich in *ISO 2394:2015 Anhang E* [41]. Für die Optimierung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  in dieser Arbeit sind Rahmenbedingungen zu beachten. Dazu zählt die Einschränkung der Betrachtung auf Querschnittsversagen, da Stabilitätsversagen im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden konnte. Weiter wird in jeder Bemessungssituation von einer einhundertprozentigen Querschnittsauslastung ausgegangen, geringere Auslastungen können nicht berücksichtigt werden und wirken sicherheitserhöhend. Prinzipiell ist zu beachten, dass stark streuende Materialeigenschaften auch zu einer rechnerischen Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes führen können, siehe auch *Goris & Voigt* [246]. Im Folgenden wird der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  anhand des probabilistischen Näherungsverfahrens *FORM* für festgelegte Zielzuverlässigkeitsniveaus kalibriert.

Die aktuelle Normungslegung weist einen hohen wissenschaftlichen Anspruch und damit einhergehend ein hohes Komplexitätslevel auf, siehe dazu auch *Baravalle, Mikoschek, Colling & Köhler* [229]. Das benötigte Komplexitätslevel muss unter Abwägung verschiedener Beteiligungsinteressen diskutiert werden. Die Herausforderung in der Normungsarbeit besteht somit in der Zusammenführung komplexer wissenschaftlicher Erkenntnisse in praxistaugliche Anwendungskonzepte, siehe beispielsweise *Fink & Köhler* [180]. Eine Option ist die Entwicklung von Bemessungsverfahren in Abhängigkeit von der Komplexität des Bemessungsproblems [229]. Nach *Arnbjerg-Nielsen, Karlsson & Ditlevsen* [92] erhöht eine größere Anzahl angepasster Sicherheitsbeiwerte das Optimierungspotential, dabei sollten diese jedoch im Kontext einer guten Handhabbarkeit der Normung einen angemessenen Umfang nicht übersteigen, siehe dazu auch Kap. 3.5.1. Bei der Kalibrierung von Sicherheitsbeiwerten handelt es sich um ein Optimierungsproblem unter Berücksichtigung der gewünschten bzw. vertretbaren Komplexität der Normung und der Ausnutzung des Optimierungspotentials einzelner Bemessungssituationen. Die Wahl einer angemessenen Anzahl von Bemessungskategorien ist ein Optimierungsproblem, welches

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

eine gute Übersichtlichkeit und damit Handhabbarkeit der empfohlenen Werte und den Umfang des Optimierungspotentials einbezieht. Es handelt sich somit um komplementäre Ziele, zwischen denen ein Nutzenoptimum erzielt werden soll, siehe Abb. 7.12.

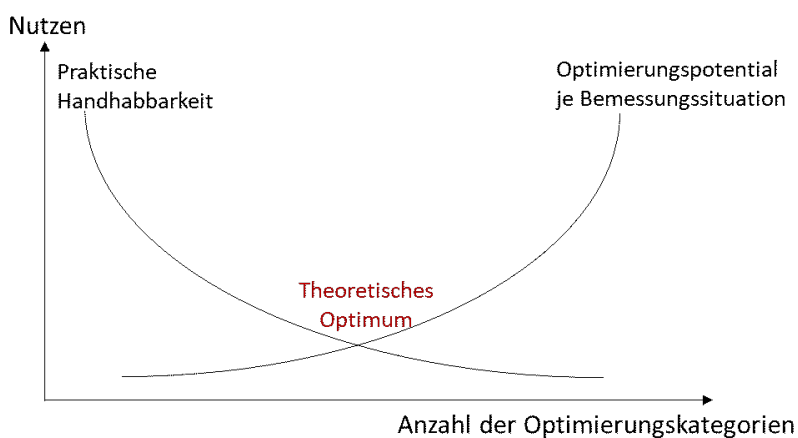


Abb. 7.12: Prinzipielle Darstellung komplementärer Ziele bei der Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Prozess der Normungskalibrierung

**Optimierungskategorien**

Zur Erzielung eines gleichmäßigeren Sicherheitsniveaus und zur Nutzbarmachung von Tragwerksreserven erfolgt die Optimierung der Teilsicherheitsbeiwerte für die verschiedenen Bemessungsfälle. Optimierungskategorien und praktische Handhabbarkeit müssen durch die Wahl einer angemessenen Anzahl an Optimierungskategorien berücksichtigt werden. Diese werden anhand der durchgeführten Zuverlässigkeitsanalysen abgegrenzt, in Tab. 7.17 dargestellt und durch Beispiele konkretisiert.

Tab. 7.17: Matrix der Optimierungsfälle abhängig von Last und Beanspruchung mit beispielhaften Bauteilen und Nummerierung der entsprechenden Abschnitte in den folgenden Unterkapiteln

	Ständige Last und				
	-	Nutzlast	Lastkombination Nutz- & Windlast	Windlast	Lastkombination Schnee- & Windlast
<b>Einachsig Druck/ Zug</b>	<b>7.5.2</b>	<b>7.5.3</b> <i>Stütze, Druckstrebe/ -</i>	-	<b>7.5.6</b> <i>Druckstrebe im Hängewerk / Hängesäule</i>	<b>7.5.8</b> <i>Druckstrebe im Hängewerk/ Hängesäule</i>
<b>Einachsig Biegung</b>	<b>7.5.2</b>	<b>7.5.3</b> <i>Deckenbalken</i>	-	<b>7.5.6</b> <i>Pfette</i>	<b>7.5.8</b> <i>Pfette</i>
<b>Doppelbiegung</b>	-	-	<b>7.5.4</b> <i>Wandriegel</i>	<b>7.5.7</b> <i>Pfette</i>	<b>7.5.9</b> <i>Pfette</i>
<b>Druck &amp; Biegung</b>	-	-	<b>7.5.5</b> Druck aus ständiger Last & Nutzlast, Biegung aus Windlast <i>Stütze</i>	-	<b>7.5.10</b> Druck aus ständiger Last & Schneelast, Biegung aus Windlast <i>Sparren</i>

**Anpassung von Eingangsgrößen zur Kalibrierung von  $\gamma_m$  im Bestandsbau**

Die anzupassenden Eingangsgrößen in das Modell zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten für den Bestandsbau werden in Abb. 7.13 zusammengefasst.

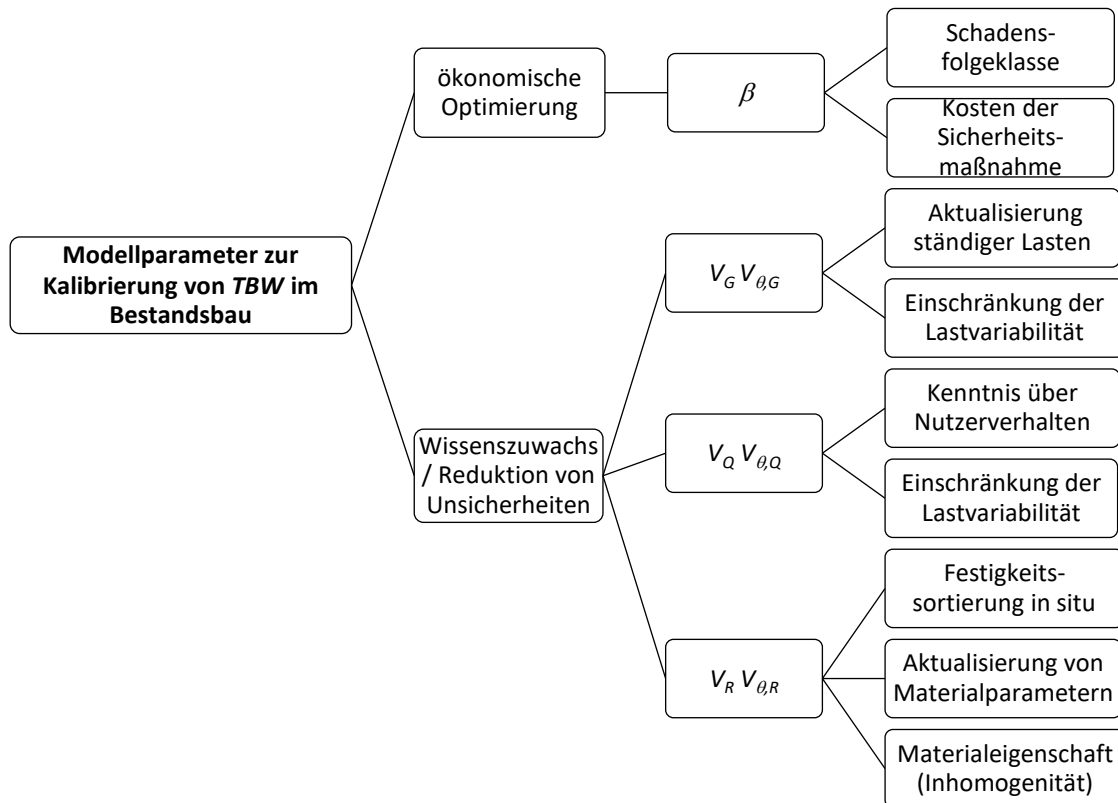


Abb. 7.13: Modellparameter zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten (TBW) im Bestandsbau

### Teilsicherheitsbeiwert und Variationskoeffizienten für ständige Einwirkungen

Bei der detaillierten Bestandsaufnahme in situ können ständige Lasten aktualisiert werden. Die Unsicherheiten zur Modellierung dieser Größe reduziert sich somit. In der Schweizer Norm SIA 296:2011 [24] wird aus diesem Grund eine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Einwirkungen auf  $\gamma_G = 1,20$  vorgenommen. Als Zielzuverlässigkeitsindex für die mittlere Schadensfolgeklasse sowie mittlere relative Kosten der Sicherheitsmaßnahme weißt SIA 269:2011 [24] einen Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta = 4,2$  in  $T_{ref} = 1a$  aus. Bei Umrechnung auf den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  unter Annahme der statistischen Unabhängigkeit der Jahre ergibt sich  $\beta = 3,2$ . Diese Annahme ist bei Dominanz veränderlicher Einwirkungen hinreichend genau. Dieser Zielzuverlässigkeitsindex korrespondiert gut mit dem in Kap. 6 bestimmten mittleren Zuverlässigkeitsniveau.

Die *Design Value Method (DVM)* in Kap. 7.3.1 ergab, dass sich bei einem Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta = 3,2$  und einem Variationskoeffizienten von  $V_G = 0,07$  der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G = 1,20$  einstellt. In Anhang Kap. 10.3 wurden Erwartungswert und Variationskoeffizient einiger beispielhafter Bauteile in Holzbauweise bestimmt. Der Variationskoeffizient lag zwischen  $V_G = 0,04$  und  $V_G = 0,07$ . Es handelte sich hierbei nicht um eine repräsentative Studie. Die Beispielrechnungen zeigen jedoch die Möglichkeit der Reduktion des Variationskoeffizienten ständiger Einwirkungen für den Bestandsbau auf  $V_G = 0,07$ , wenn Raummaße und Materialien in situ bestimmt werden.

Korrekterweise müsste für jedes Zielzuverlässigkeitsniveau auch ein anderer Sicherheitsbeiwert nicht nur für  $\gamma_M$  sondern auch für  $\gamma_G$  kalibriert werden. Dies würde jedoch zu einer unübersichtlichen Fülle an verschiedenen Beiwerten führen. Aus diesem Grund wird  $\gamma_G = 1,20$  konstant für alle Zielzuverlässigkeitsniveaus verwendet. Entstehende Schwankungen der Zuverlässigkeit werden in der Kalibrierung über die Anpassung von  $\gamma_M$  erfasst.

### *Teilsicherheitsbeiwert und Variationskoeffizient für veränderliche Einwirkungen*

In Tab. 2.15 wurde deutlich, dass die niederländische Norm *NEN 8700:2011-12* (nach [50]) und der *JRC Science and Policy Report* ([27]) für die ungünstigste Situation im Bestandsbau einen Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen von  $\gamma_{Q,mod} = 1,40$  festlegen ( $\beta = 2,5$ ). Dies konnte durch eigene Berechnungen mittels der vereinfachten Verfahren in Kap. 7.2.5 nicht bestätigt werden. Die Betrachtungen unter Anwendung der vereinfachten Verfahren ergaben, dass der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q$  für veränderliche Einwirkungen für die meisten Lastarten zu gering gewählt zu sein scheint. Für diese Arbeit wird der Wert wie in der aktuellen Normung definiert mit  $\gamma_Q = 1,50$  beibehalten. Schwankungen der rechnerischen Zuverlässigkeit werden über die Optimierung von  $\gamma_M$  erfasst. Für Nutzlasten wird eine Einschränkung auf die Nutzlastkategorien A und B vorgenommen.

### *Variationskoeffizient der Materialfestigkeit*

Der Variationskoeffizient des natürlich gewachsenen Holzes ist durch Einflussparameter auf verschiedenen Ebenen bestimmt, siehe Kap. 5.2.1. Zunächst ist er auf der Mikroebene durch strukturelle Einflüsse bedingt. Durch die Prüfung einer Auswahl (Stichprobe) von Prüfkörper erfolgt die Einstufung in eine Festigkeitsklasse (Mesoebene). Aufgrund der Inhomogenität des Materials ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Festigkeitseigenschaft von der Beanspruchungsrichtung abhängig. Der Variationskoeffizient der Materialeigenschaften ist somit weiter abhängig von der Genauigkeit der Methoden der Festigkeitssortierung und von der Anzahl der Klassen, in welche das Material eingeordnet wird. Bei größerer Anzahl entsteht eine geringere Streuung innerhalb der Klasse. Die Anzahl verwendeter Klassen müssen jedoch zudem in der Praxis gut handhabbar sein. Zudem sinkt definitionsgemäß der Variationskoeffizient mit steigendem Erwartungswert der Eigenschaft. Die Literaturstudie ergab zu beiden Punkten kein einheitliches und damit verlässliches Ergebnis. Des Weiteren können Materialparameter wie beschrieben durch Prüfung in situ aktualisiert werden. Um die Einbeziehung aktualisierter Materialparameter zu ermöglichen, werden die Berechnungsergebnisse abhängig von  $V_R$  ausgewiesen.

### *Probabilistische Parameter der Basisvariablen*

Tab. 7.18 fasst die Parameter für die nachfolgende Kalibrierung unter Berücksichtigung der getroffenen Anpassungen zusammen.

Tab. 7.18: Probabilistische Parameter der Basisvariablen für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  (Grundzeitintervall)

	Basisvariable	Sym- bol	Vertei- lung	$m_x^1$	$V_x$	Bemerkung
<b>Widerstand</b>	<b>Konstruktionsvollholz</b>					
	Biegefestigkeit	$R_m$	LN	1,0	0,25	Indikative Werte aus [61], Ausweis der Ergebnisse abh. von $V_R$
	Druckfestigkeit in Faserrichtung	$R_{c,0}$	LN	1,0	0,20	
	Zugfestigkeit in Faserrichtung	$R_{t,0}$	LN	1,0	0,30	
	Druckfestigkeit in Faserrichtung	$R_{c,90}$	N	1,0	0,10	
Biegefestigkeit	$R_v$	LN	1,0	0,25		
<b>Einwirkungen</b>	<b>Ständige Einwirkung</b>					
	Konstruktionseigenlast	$G$	N	1,0	<b>0,07</b>	Anpassung für Bestandsbau
	<b>Veränderliche Einwirkungen</b>					
	<b>Nutzlast – Kategorie A1, A2, A3, B1</b>					
	Verteilung der Maximalwerte					
	Kleiner Raum (bis 20m <sup>2</sup> )	$N$	GUM	1,0	0,40	Basierend auf eigenen Berechnungen mit [60, 98, 114]
	Großer Raum (über 20m <sup>2</sup> )	$N$		1,0	0,25	
	Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·365 <sup>(2)</sup>	-	In Anlehnung an [85]
	Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	5·365 <sup>(2)</sup>	-	
	<b>Schneelast</b>					
	Verteilung der Maximalwerte					
	Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·60 <sup>(2)</sup>	-	In Anlehnung an [85] (angepasst für Dtl.)
	Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	10	-	
	<b>Windlast</b>					
	Verteilung der Maximalwerte					
Präsenzzeit in Tagen im Bezugszeitraum	$n_p$	det.	50·365 <sup>(2)</sup>	-	In Anlehnung an [98, 101]	
Lastwechselzahl in der Präsenzzeit	$n_r$	det.	50·365 <sup>(2)</sup>	-		
<b>Modellunsicherheit</b>	<b>Widerstandsseite</b>					
	Qualifizierte Bestandsaufnahme in-situ	$\theta_R$	N	1,0	0,07	Vorschlag
	<b>Einwirkungsseite</b>					
	Ständige Einwirkung, qualifizierte Bestandsaufnahme in situ	$\theta_G$	N	1,0	0,05	Vorschlag
	Nutzlast	$\theta_N$	N	1,0	0,10	In Anlehnung an [129, 133, 134]
	Schneelast	$\theta_S$	N	1,0	0,10	
Windlast	$\theta_W$	N	1,0	0,10		
<sup>1</sup> durch Normierung mittels Bemessungsparameter $z_d$			<sup>2</sup> Hochrechnung von einem Jahr auf den gewählten Bezugszeitraum $T_{ref} = 50a$			

### Zielzuverlässigkeitsindex und Anmerkung zur Schadensfolgeklasse

Die Kalibrierungen werden für Zielzuverlässigkeitsniveaus von  $\beta = 2,5$  bis  $\beta = 3,2$  durchgeführt, das vorgeschlagenen Bewertungslevel  $\beta_{t,eval} = 2,9$  (Kap. 7.2.4) wird gesondert hervorgehoben. Die Kalibrierung erfolgt unter Zugrundelegung der Schadensfolgeklasse CC 2 nach *DIN EN 1990:2010-12* [16]. Eine Anpassung unter Berücksichtigung der Schadensfolgeklasse ist unter Anpassung des Zielzuverlässigkeitsniveaus wie in Kap. 7.2 beschrieben möglich. Für die Schadensfolgeklasse CC 3 ergibt sich unter Umständen eine Erhöhung der Teilsicherheitsbeiwerte. In *DIN EN 1990:2010* [16] werden Faktoren zu Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte abhängig von der Schadensfolgeklasse angegeben ( $k_{FI}$ -Faktoren) (Kap. 3.5.2).

### Optimierungsablauf

Nach *Arnbjerg-Nielsen, Karlsson & Ditlevsen* [92] erfolgt die Optimierung von Sicherheitsbeiwerten basierend auf ausgewählten, optimal bemessenen Konstruktionen. Für diese werden Zuverlässigkeitsanalysen unter Berücksichtigung von Unsicherheitsquellen durchgeführt und anhand dieser das Zuverlässigkeitslevel bestimmt. An diesem Zuverlässigkeitsniveau wird die Norm kalibriert und Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte bestimmt, siehe auch Anhang Kap. 10.1.3. Die Optimierung wird durch Minimierung der Abweichung der Zielzuverlässigkeitsindices in den betrachteten Bemessungssituationen vom gewählten Zielzuverlässigkeitsindex durchgeführt. Das Vorgehen wird mit *probabilistischer Optimierung* bezeichnet und, siehe auch *ISO 2394:2015* [41], *Sørensen* [107] und *Vrouwenvelder* [130] erläutert. Die Abweichung  $D$  des Zuverlässigkeitsindex in der  $i$ -ten Bemessungssituation  $\beta_i$  vom Zielwert  $\beta_t$  unter Berücksichtigung eines spezifischen Gewichtungsfaktors  $w_i$

$$D = \sum_i w_i (\beta_i - \beta_t)^2 \quad (7.33)$$

hat Eingang in den aktuellen Normungsentwurf zur Überarbeitung der *EN 1990* [247] gefunden. In dieser Arbeit wird die Optimierung in Abhängigkeit vom Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialseite durchgeführt, daraus ergibt sich

$$\min D(\gamma_M) = \sum_i w_i (\beta_i - \beta_t)^2 \quad (7.34)$$

unter der Nebenbedingung  $1,1 \leq \gamma_M \leq 1,5$

Diese Restriktion ergibt sich aus konzeptionellen Überlegungen. Zum einen sollen Sicherheitsbeiwerten  $< 1,0$  ausgeschlossen werden. Zum anderen ergaben die Untersuchungen, dass im baupraktischen Bereich in den ausgewählten Beanspruchungskombinationen Teilsicherheitsbeiwerte  $> 1,5$  nicht auftreten. Zur Reduktion der Rechenzeit, die aufgrund der Anzahl und Spanne der zu variierenden Eingangsparameter sonst schnell sehr groß wird, können deshalb diese Schranken gesetzt werden.

Im Rahmen der probabilistischen Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten kommt es zu Schwankungen um den Zielzuverlässigkeitsindex. Eine Unterschreitung der geforderten Zuverlässigkeit sollte aus Sicherheitsgründen im Rahmen der Optimierung stärker bestraft werden, als eine Überschreitung. Verschiedene Straffunktionen („*penalty function*“) stellt *Baravalle* [85] vor. In dieser Arbeit wird ein einfacher Faktor  $w_{pen}$  eingeführt, der Unterschreitungen der Zielzuverlässigkeit stärker gewichtet und dabei abhängig von der Größe der Unterschreitung ist. Er wird nach Gl. (7.35) bestimmt

$$w_{pen} = \begin{cases} 1 & \text{für } \beta_i \geq \beta_t \\ 1 + (\beta_i - \beta_t) & \text{für } \beta_i < \beta_t \end{cases} \quad (7.35)$$

Damit ändert sich die Optimierung zu

$$\min D(\gamma_M) = \sum_i w_i w_{pen} (\beta_i - \beta_t)^2 \quad (7.36)$$

unter der Nebenbedingung  $1,0 \leq \gamma_M \leq 1,5$

Der Ablaufplan wird in Abb. 7.14 visualisiert

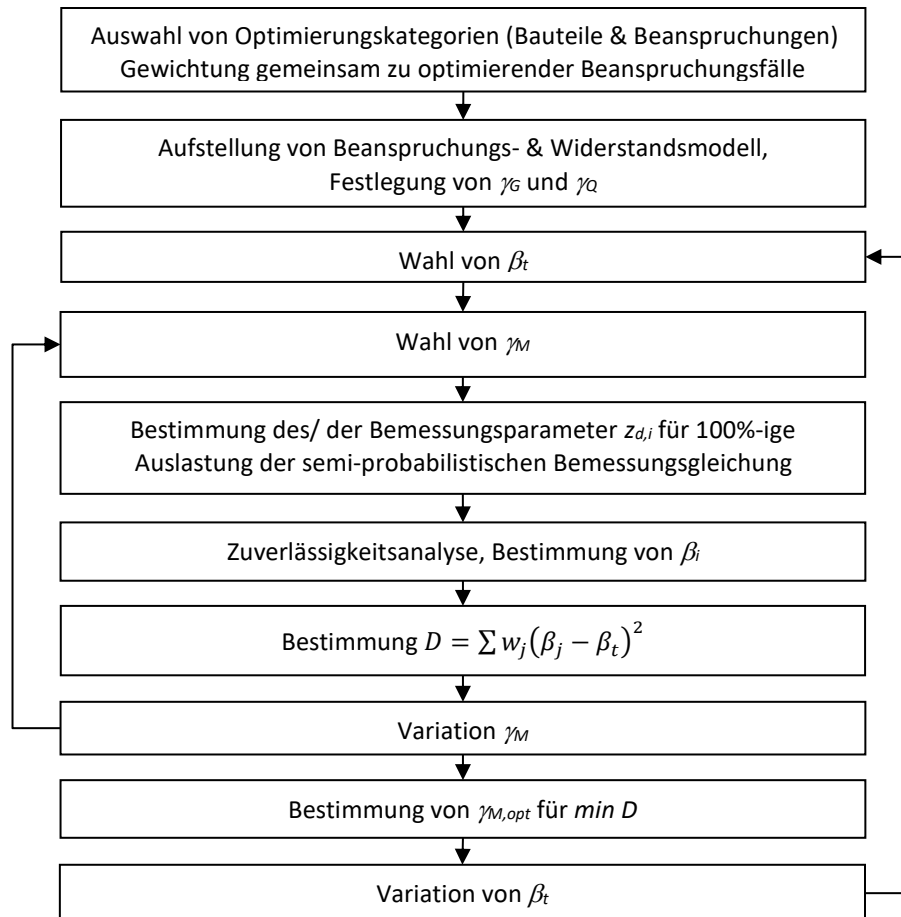


Abb. 7.14: Schritte zur Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$

### 7.5.2 Bauteile unter einachsiger Beanspruchung aus ständiger Last

Die ständige Bemessungssituation kann im Holzbau aufgrund des starken Einflusses des Modifikationsbeiwertes  $k_{mod}$  ( $k_{mod} = 0,6$  in NKL 1 & NKL 2) maßgebend werden. Abb. 7.15 zeigt die Kalibrierungsergebnisse für  $\gamma_M$  abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$  und dem Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta$ , die tabellierten Ergebnisse sind in Anhang Tab. 10.43 dargestellt.

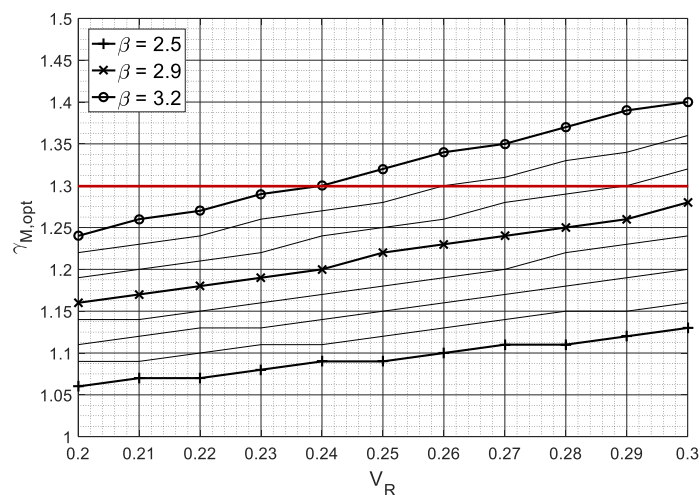


Abb. 7.15: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ) (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)



7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Die Ergebnisse zeigen die deutliche Abhängigkeit des Sicherheitsbeiwertes von der Zielzuverlässigkeit und den Einfluss schon geringer Anpassungen dieser. Für das vorgeschlagene Bewertungslevel mit  $\beta_{t,eval} = 2,9$  ( $T_{ref} = 50a$ ) zeigt sich ein Anpassungspotential des Teilsicherheitsbeiwertes,  $\gamma_M$  ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ). Auch für geringere Variationskoeffizienten der Festigkeit zeigt sich Anpassungspotential.

Tab. 7.19: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,14
		<b>0,20</b>	<b>1,16</b>
		0,22	1,18
		<b>0,25</b>	<b>1,22</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,22
		<b>0,20</b>	<b>1,24</b>
		0,22	1,27
		<b>0,25</b>	<b>1,32</b>

Anmerkungen:

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ wird  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen. Eine Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

7.5.3 Bauteile unter einachsiger Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast

Lastfälle und Gewichtungen

Zur Eingrenzung der Kalibrierung auf praktische Relevanz wird eine Abschätzung der Lastverhältnisse aus ständiger Last und Nutzlast für eine Auswahl von Nutzungskategorien benötigt. DIN EN 1991-1-1:2010-12 [109] bzw. die entsprechenden Nationalen Anhänge beinhalten charakteristische Werte für verschiedenen Nutzlastarten. Anhand der in Abschnitt 4.3 bestimmten Parameter zur Modellierung von Nutzlasten ergeben sich die Erwartungswerte und Lastverhältnisse nach Tab. 7.20.

Tab. 7.20: Anteil der Nutzlast an der Gesamtlast  $LA_Q = q_k / (g_k + q_k)$  für verschiedene Deckenkonstruktionen

Erwartungswert des Eigengewichtes [kN/m <sup>2</sup> ]		Kategorie					
		A2		A3/B1		B2/C1	
		Charakteristischer Wert der Nutzlast [kN/m <sup>2</sup> ]					
		1,5*		2		3	
		Erwartungswert der Nutzlast [kN/m <sup>2</sup> ]					
		Gr. Raum	Kl. Raum	Gr. Raum	Kl. Raum	Gr. Raum	Kl. Raum
		1,68	1,83	2,24	2,44	3,36	3,66
Dübelbodendecke	2,11	0,44	0,46	0,51	0,54	0,61	0,63
Ganzer Windelboden	3,93	0,30	0,32	0,36	0,38	0,46	0,48
Halber Windelboden	1,95	0,46	0,48	0,53	0,56	0,63	0,65
Einschubdecke	2,09	0,45	0,47	0,52	0,54	0,62	0,64
Kreuzstakendecke	3,46	0,33	0,35	0,39	0,41	0,49	0,51
Berliner Decke	2,68	0,39	0,41	0,46	0,48	0,56	0,58

\* Für Decken ohne ausreichende Querverteilung der Lasten muss  $q_k = 2,0$  kN/m<sup>2</sup> angenommen werden.

Für lastweiterleitende Bauteile darf der Wert um 0,5 kN/m<sup>2</sup> abgemindert werden

Kleiner Raum:  $V_N = 0,4$ ,  $m_{\sqrt{x_k}} = 1,22$ ; Großer Raum:  $V_N = 0,25$ ,  $m_{\sqrt{x_k}} = 1,12$

Nach Lißner & Rug [12] sind leichte Holzbalkendecken nicht häufig vorzufinden, sie werden hier ausgeklammert. Der übliche Bereich der Lastverhältnisse für Holzbalkendecken und lastweiterleitende Bauteile für die Nutzlastkategorien A2/A3 und B1 liegt dann zwischen  $LA_Q = 0,30$  und  $LA_Q = 0,55$ . Die Nutzlastkategorien B2 und C1 werden vergleichend aufgeführt.

Die Variationskoeffizienten der Nutzlast werden nach Tab. 4.10 als obere Grenzwerte mit  $V_N = 0,40$  (Büro- Lobby-, Wohnräume mit  $A \leq 20m^2$ ; Krankenzimmer) und  $V_N = 0,25$  (Büro- Lobby-, Wohnräume in Räumen mit  $A > 20m^2$ ; Hotelzimmer) festgelegt. Zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten als Optimierungsproblem über ausgewählte Lastfälle müssen die zu betrachtenden Einzelfälle, sowie deren Gewichtung festgelegt werden. Es werden die Gewichtungskategorien und Wichtungsfaktoren  $w_i$  nach Tab. 7.21 untersucht. Die Festlegung der Wichtungsfaktoren basiert auf der Annahme, dass große Räume mit geringerer Lastfluktuation (Kategorie a), sowie große Räume mit stärkerer bzw. kleinere Räume mit geringerer Lastfluktuation (Kategorie b) bei historischen Holzkonstruktionen häufig vorzufinden sind, wohingegen kleineren Räumen mit stärkerer Lastfluktuation (Kategorie c) eine geringere Auftretenswahrscheinlichkeit unterstellt wird (für die Kategorien siehe Abb. 6.5). Es werden zwei Varianten für Wichtungsfaktoren betrachtet. Des Weiteren wird eine Kalibrierung für die pauschale Annahme des Lastanteils der ständigen Last von  $LA_G = 0,5$  und  $V_N = 0,25$  vergleichend durchgeführt.

Tab. 7.21: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für Druck- und Biegestäbe unter Eigenlast & Nutzlast

Lastfall	$V_N$	$LA_G$	Wichtungsfaktor $w_i$		Anmerkungen
			Variante a	Variante b	
a	0,25 ( $A > 20m^2$ )	0,3	0,50	0,35	Erfasst werden nach Tab. 4.10 Büro-, Lobby-, und Wohnräume mit $A > 20m^2$ , sowie Hotel- und Klassenzimmer; Geringer Nutzlastanteil an der Gesamtlast
b	0,25 ( $A > 20m^2$ )	0,5	0,40	0,50	Erfasst werden nach Tab. 4.10 Büroraum, Lobby, und Wohnräume mit $A > 20m^2$ , sowie Hotel- und Klassenzimmer; Höherer Nutzlastanteil an der Gesamtlast
c	0,40 ( $A \leq 20m^2$ )	0,5	0,10	0,15	Erfasst werden nach Tab. 4.10 Büroraum, Lobby, Wohnraum mit $A \leq 20m^2$ , sowie Krankenzimmer; Höherer Nutzlastanteil an der Gesamtlast
			$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	

### Kalibrierungsergebnisse

Die Kalibrierungsergebnisse werden in Abb. 7.16 und Abb. 7.17 abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit sowie vom Zielzuverlässigkeitsniveau veranschaulicht. Hervorgehoben werden die Ergebnisse für  $\beta_{t,exis} = 3,2$  (Instandsetzungslevel, CC 2),  $\beta_{t,eval} = 2,9$  (Vorschlag für ein Bewertungslevel) und  $\beta_{0,exis} = 2,5$  (Mindestlevel, CC 2), sowie für die empfohlenen Werte des Variationskoeffizienten der Festigkeit nach JCSS PMC [61]  $V_{R,c} = 0,20$  (Druckfestigkeit) und  $V_{R,m} = 0,25$  (Biegefestigkeit). Die tabellierten Werte finden sich in Anhang Tab. 10.44 und Tab. 10.45.

Es zeigt sich eine Überschreitung des geltenden Sicherheitsbeiwertes von  $\gamma_M = 1,3$  bei  $V_R = 0,25$  und  $\beta_{t,exis} = 3,2$ . Unter Annahme des vorgeschlagenen Zielzuverlässigkeitsindex für die Tragfähigkeitsbewertung im Bestand ergibt sich bei  $V_R = 0,25$  ein optimierter Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_{M,opt} = 1,22$  bzw.  $\gamma_{M,opt} = 1,24$ . Eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Festigkeit wie beispielsweise für die Druckfestigkeit ( $V_R = 0,20$ ) ergibt für das Bewertungslevel  $\gamma_{M,opt} = 1,24$   $\gamma_{M,opt} = 1,18$  bzw.  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ .

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

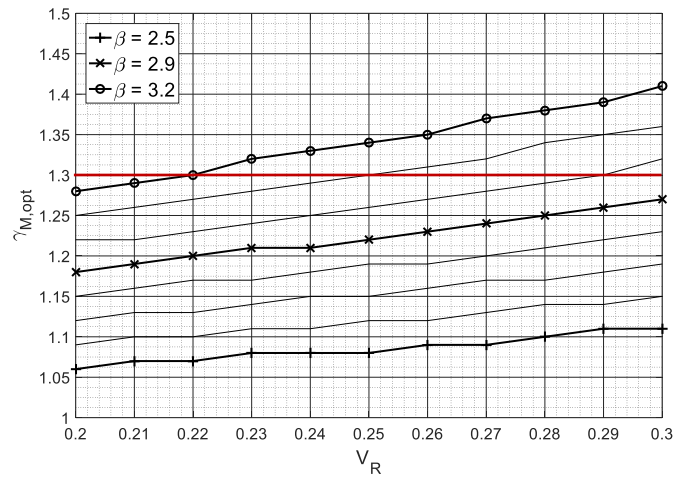


Abb. 7.16: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LAG$  nach Tab. 7.21 – Variante a (50,40,10) (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz)

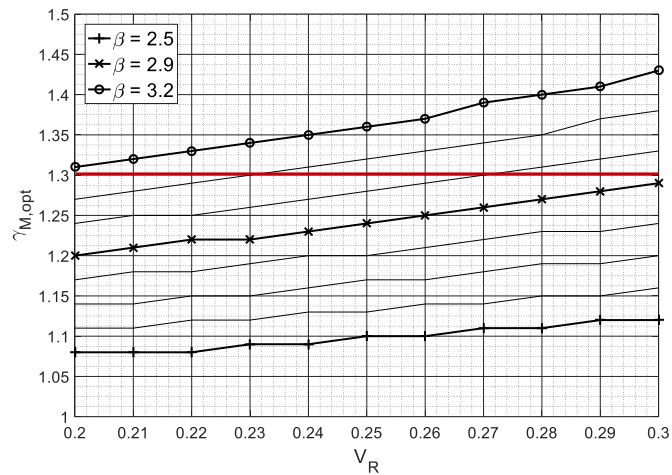


Abb. 7.17: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G$  nach Tab. 7.21 – Variante b (35,50,15) (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz)

Die Ergebnisse bei unter den pauschalen Annahmen von  $V_N = 0,25$  und  $LA_G = 0,5$  werden in d Abb. 7.18 dargestellt, die tabellierten Ergebnisse enthält Anhang Tab. 10.46.

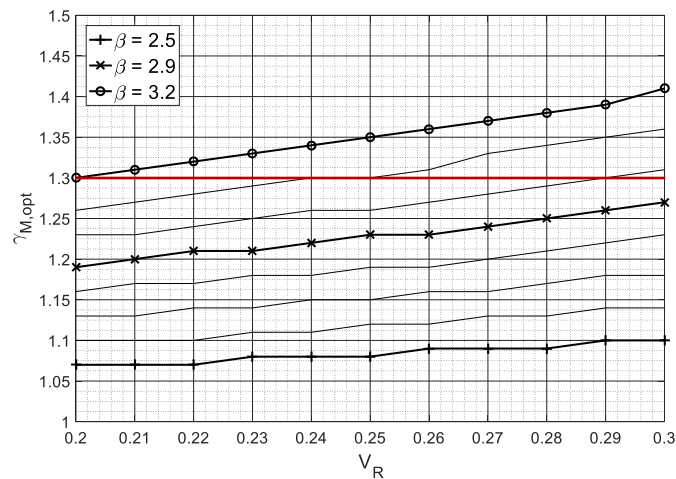


Abb. 7.18: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz)

Die kalibrierten Sicherheitsbeiwerte sollen auf die charakteristischen Werte der geltenden Normen angewendet werden. Wie in Kap. 4.3 gezeigt, werden diese mit dem gewählten Modellierungsansatz für Räume mit  $A = 20 \text{ m}^2$  gut abgebildet, für größere Räume jedoch deutlich unterschritten. Aus diesem Grund ist der hier etwas größer kalibrierte Sicherheitsbeiwert für das Instandsetzungslevel nicht als problematisch anzusehen, da aufgrund der angesetzten höheren charakteristischen Werte ein Sicherheitspotential besteht. Kleineren Räumen mit starker Lastfluktuation, die zu ungünstigen Ergebnissen führen, wird wie beschrieben eine geringere Auftretenswahrscheinlichkeit zugeschrieben. Da es sich bei der Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten um eine Optimierung über mehrere Betrachtungsfälle handelt, ist das Ergebnis mit pauschalem vergleichsweise hohem Lastanteil der veränderlichen Last als zufriedenstellend zu bewerten. Tab. 7.22 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse

Tab. 7.22: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G$ nach Tab. 7.21 – a		$LA_G$ nach Tab. 7.21 – b		$LA_G = 0,5$ , $V_N = 0,25$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,17	0,18	1,19	0,18	1,19
		<b>0,20</b>	<b>1,18</b>	<b>0,20</b>	<b>1,20</b>	<b>0,20</b>	<b>1,19</b>
		0,22	1,20	0,22	1,22	0,22	1,21
		<b>0,25</b>	<b>1,22</b>	<b>0,25</b>	<b>1,24</b>	<b>0,25</b>	<b>1,23</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,27	0,18	1,29	0,18	1,29
		<b>0,20</b>	<b>1,28</b>	<b>0,20</b>	<b>1,31</b>	<b>0,20</b>	<b>1,30</b>
		0,22	1,30	0,22	1,33	0,22	1,32
		<b>0,25</b>	<b>1,34</b>	<b>0,25</b>	<b>1,36</b>	<b>0,25</b>	<b>1,35</b>

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.21 zugrunde.

Abweichende Annahmen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung *in situ* wird  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen.

Eine Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

### 7.5.4 Bauteile unter Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast und Windlast

#### Lastfälle und Gewichtungen

Die Kalibrierung für Doppelbiegung aus ständiger Last und Nutzlast in z-Richtung, sowie Windlast in y-Richtung wurde für  $V_N = 0,25$  und verschiedenen Lastanteile der veränderlichen Last an der Gesamtlast durchgeführt, siehe Tab. 7.22. Wie Kapitel 7.5.3 zeigt, führt die pauschale Annahme von  $V_N = 0,25$  und  $LA_G = 0,5$  im Vergleich zur gleichzeitigen Berücksichtigung geringerer Lastanteile und höherer Variationskoeffizienten der Nutzlast für kleinere Räume unter den hier getroffenen Annahmen zu vergleichbaren Ergebnissen. Demnach kann die pauschale Annahme von  $LA_G = 0,5$  und  $V_N = 0,25$  hier so gewählt werden, um die Anzahl der Lastkombinationen mit der Windlast überschaubar zu halten. Die Optimierung wurde unter gleichmäßiger Gewichtung verschiedener Verteilungen der Lastanteile der veränderlichen Lasten (Nutz- und Windlast) durchgeführt.

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Tab. 7.23: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Doppelbiegung unter Eigenlast, Nutzlast und Windlast

Lfd. Nr.	$LA_G$	$LA_{Q1}$ (Nutzlast)	$LA_{Q2}$ (Windlast)	$w_i$
1	0,4, 0,5 oder 0,6	0,1	0,9	0,111
2	0,4, 0,5 oder 0,6	0,2	0,8	0,111
3	0,4, 0,5 oder 0,6	0,3	0,7	0,111
4	0,4, 0,5 oder 0,6	0,4	0,6	0,111
5	0,4, 0,5 oder 0,6	0,5	0,5	0,111
6	0,4, 0,5 oder 0,6	0,6	0,4	0,111
7	0,4, 0,5 oder 0,6	0,7	0,3	0,111
8	0,4, 0,5 oder 0,6	0,8	0,2	0,111
9	0,4, 0,5 oder 0,6	0,9	0,1	0,111
				$\Sigma = 1$

Kalibrierungsergebnisse

Die Ergebnisse für  $LA_G = 0,5$  werden in Abb. 7.19 und die tabellierte Werte in Anhang Tab. 10.48 dargestellt. In der zusammenfassenden Tab. 7.22 werden die Lastverhältnisse  $LA_G = 0,4$  und  $LA_G = 0,6$  hinzugefügt, diese Ergebnisse sind vergleichend in Anhang 10.11.1 (S. 87) dargestellt und zeigen die Erhöhung des kalibrierten Teilsicherheitsbeiwert bei höherem Anteil der veränderlichen Last an der Gesamtlast.

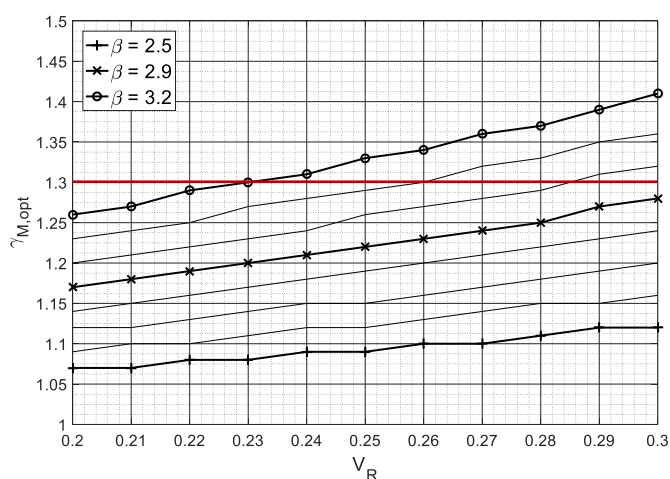


Abb. 7.19: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindizes ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$  (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

Im Instandsetzungslevel zeigt sich eine leichte Erhöhung des kalibrierten Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{M,opt}$  für  $V_R = 0,25$  im Vergleich zur normativ geltenden Festlegung von  $\gamma_M = 1,3$ . Diese Abweichung ist aufgrund der in Kapitel 7.5.3 beschriebenen etwas ungünstigeren Modellannahmen akzeptabel. Für das Bewertungslevel zeigt sich ein Anpassungspotential des Teilsicherheitsbeiwertes vergleichbar mit einachsiger Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast.

Tab. 7.24: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung unter Eigenlast, Nutzt- und Windlast in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G = 0,4$		$LA_G = 0,5$		$LA_G = 0,6$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,18	0,18	1,16	0,18	1,14
		0,20	1,19	0,20	1,17	0,20	1,16
		0,22	1,21	0,22	1,19	0,22	1,18
		<b>0,25</b>	<b>1,24</b>	<b>0,25</b>	<b>1,22</b>	<b>0,25</b>	<b>1,21</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,27	0,18	1,24	0,18	1,22
		0,20	1,29	0,20	1,26	0,20	1,24
		0,22	1,31	0,22	1,29	0,22	1,27
		<b>0,25</b>	<b>1,35</b>	<b>0,25</b>	<b>1,33</b>	<b>0,25</b>	<b>1,31</b>

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde.

Abweichende Annahmen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ wird  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen.

Eine Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

### 7.5.5 Bauteile unter Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast und Windlast

#### Lastfälle und Wichtungen

Dieser Optimierungsfall umfasst aus ständiger Last und Nutzlast auf Druck in Faserrichtung beanspruchte Bauteile mit einer zusätzlichen Biegebeanspruchung aus Windlast. Der Variationskoeffizient der Nutzlast wurde mit  $V_N = 0,25$  angenommen. Die Wichtungsfaktoren sind in Tab. 7.37 gegeben.

Tab. 7.25: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung unter Eigenlast, Nutzlast und Windlast (ohne Stabilitätsversagen)

Lfd. Nr.	$LA_G$	$LA_{Q1}$ (Schneelast bzw. Nutzlast)	$LA_{Q2}$ (Windlast)	$w_i$
1	0,4, 0,5 oder 0,6	0,1	0,9	0,111
2	0,4, 0,5 oder 0,6	0,2	0,8	0,111
3	0,4, 0,5 oder 0,6	0,3	0,7	0,111
4	0,4, 0,5 oder 0,6	0,4	0,6	0,111
5	0,4, 0,5 oder 0,6	0,5	0,5	0,111
6	0,4, 0,5 oder 0,6	0,6	0,4	0,111
7	0,4, 0,5 oder 0,6	0,7	0,3	0,111
8	0,4, 0,5 oder 0,6	0,8	0,2	0,111
9	0,4, 0,5 oder 0,6	0,9	0,1	0,111
				$\Sigma = 1$

#### Ergebnisse

Die Kalibrierungsergebnisse werden in Abb. 7.20 und tabelliert in Anhang Tab. 10.51 dargestellt. Im Vergleich zur Beanspruchung auf Doppelbiegung zeigt sich eine leichte Verschiebung der Kurven auf y-Achse nach oben kombiniert mit einem etwas flacheren Anstieg. Wird ein Mindestanteil ständiger Lasten von  $LA_G = 0,5$  festgelegt, kann im vorgeschlagenen Bewertungslevel ( $\beta_{t,eval} = 2,9$ ) eine Anpassung auf  $\gamma_{M,opt} = 1,23$  erfolgen. Die Ergebnisse sind in Tab. 7.26 zusammengefasst und um  $LA_G = 0,4$  und  $LA_G = 0,6$  (ausführliche Ergebnisse in Anhang 10.11.4, S. 90) ergänzt.

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

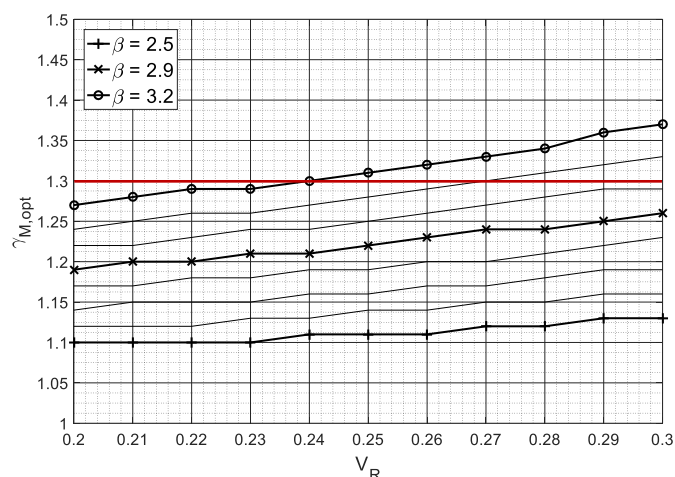


Abb. 7.20: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck), Nutzlast (Druck) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindizes ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

Bei Erhöhung des Lastanteils der veränderlichen Last zeigt sich schnell eine Erhöhung des kalibrierten Teilsicherheitsbeiwertes. Der Einfluss des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit hat insbesondere bei höheren Zielzuverlässigkeitsniveaus einen deutlicheren Einfluss auf den Sicherheitsbeiwert. Tab. 7.26 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tab. 7.26: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck in Stabachse), Nutzlast (Druck in Stabachse) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindizes und Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G = 0,4$		$LA_G = 0,5$		$LA_G = 0,6$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,23	0,18	1,18	0,18	1,16
		0,20	1,23	0,20	1,19	0,20	1,17
		0,22	1,24	0,22	1,20	0,22	1,18
		<b>0,25</b>	<b>1,26</b>	<b>0,25</b>	<b>1,22</b>	<b>0,25</b>	<b>1,20</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,31	0,18	1,26	0,18	1,23
		0,20	1,32	0,20	1,27	0,20	1,24
		0,22	1,33	0,22	1,29	0,22	1,26
		<b>0,25</b>	<b>1,36</b>	<b>0,25</b>	<b>1,31</b>	<b>0,25</b>	<b>1,29</b>

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.37 bzw. wie ausgewiesen zugrunde.

Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ wird  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

7.5.6 Bauteile unter einachsiger Beanspruchungen aus Eigenlast und Windlast

Die Zuverlässigkeitsanalysen für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  zeigten, dass sich die Windlast weniger dominant auf die Zuverlässigkeit auswirkt, als die Schneelast, da die quasi-statische Ersatzlast der Windlast wird als weniger stark streuende Zufallsgröße modelliert wird, als dies bei Schnee- oder Nutzlasten der Fall ist. Demnach verhält sich die erzielte Zuverlässigkeit insbesondere gegenüber der stark streuenden Materialfestigkeit sensitiv. Auch im JRC Science and Policy Report [27] werden bei domi-

nanten Windlasten geringere Teilsicherheitsbeiwerte ausgewiesen. Für steile Dächer mit Dachneigungswinkeln  $\alpha \geq 60^\circ$  muss keine Schneelast berücksichtigt werden. Für steile Dächer kann somit ein Optimierungspotential der Teilsicherheitsbeiwerte gesondert untersucht werden. In *Lißner & Rug* [12] wird die historische Entwicklung von Dachneigungen und Proportionen von Dächern zwischen dem 11. Und 16. Jahrhundert dargestellt. Die Zusammenstellung zeigt, dass zwischen dem 13. Und dem 14. Jahrhundert vermehrt Dächer mit dem Dachneigungswinkel von  $50-60^\circ$ , ab Mitte des 14. Jahrhunderts sogar bis  $70^\circ$  und auch zu Anfang des 15. Jahrhunderts Dächer mit Dachneigungswinkeln über  $60^\circ$  gebaut wurden. Demzufolge erfährt das alleinige Wirken ständiger Lasten und Windlasten für historische Dachkonstruktionen durchaus praktische Relevanz.

### Lastfälle und Gewichtungen

Zur Eingrenzung auf praktische Relevanz werden die Lastverhältnisse aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Dachneigungswinkel und Windlastzonen in Tab. 7.27 zusammengestellt.

Tab. 7.27: Lastverhältnisse aus ständiger Last und Windlast  $LA_Q = q_k / (g_k + q_k)$  für verschiedene Dachneigungswinkel und Windlastzonen

					$g_k = 1$ kN/m <sup>2</sup> DF		$g_k = 1,5$ kN/m <sup>2</sup> DF		$g_k = 2$ kN/m <sup>2</sup> DF	
					DN 60°	DN 75°	DN 60°	DN 75°	DN 60°	DN 75°
Zone	$q_{b,0}$	$w_k$	$w_k$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	
1	Binnenland	0,5	0,35	0,40	0,41	0,61	0,32	0,51	<b>0,26</b>	0,44
2	Binnenland	0,65	0,46	0,52	0,48	0,67	0,38	0,57	0,31	0,50
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	0,60	0,68	0,54	0,72	0,44	0,64	0,37	0,57
3	Binnenland	0,8	0,56	0,64	0,53	0,71	0,43	0,62	0,36	0,55
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	0,74	0,84	0,60	0,76	0,49	0,68	0,42	0,62
4	Binnenland	0,95	0,67	0,76	0,57	0,75	0,47	0,66	0,40	0,59
	Küste und Inseln der Ostsee	1,25	0,88	1,00	0,64	0,79	0,54	0,72	0,47	0,66
	Inseln der Nordsee	1,4	0,98	1,12	0,66	<b>0,81</b>	0,57	0,74	0,49	0,68

Die Anteile der Windlast an der Gesamtlast liegen nach Tab. 7.27 zwischen  $LA_Q = 0,26$  und  $LA_Q = 0,82$ . Für die Kalibrierung von  $\gamma_{M,opt}$  wird demnach eine breite Spanne von Lastanteilen der Windlast an der Gesamtlast betrachtet, sowie vergleichend eine Optimierung über  $LA_G = 0,1...0,9$  vorgenommen.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kalibrierung werden in Tab. 7.28 für ausgewählte Lastanteile der ständigen Last  $LA_G$  zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der spezifischen Parameter zur Modellierung der Windlast eine die Festlegung eines maximalen Lastanteils der veränderlichen Last zur Anwendung eines optimierten Teilsicherheitsbeiwertes in diesem Lastfall nicht zielführend ist. Der Wert sollte für den ungünstigsten Fall bzw. als Optimierung über alle relevanten Lastanteile angenommen werden.



7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Tab. 7.28: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Biegung aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$V_R$	$LA_G$					
			0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	über alle
			$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,15	1,13	1,08	1,09	1,11	1,10
		<b>0,20</b>	<b>1,16</b>	1,14	1,09	1,11	1,13	1,11
		0,22	1,16	1,14	1,11	1,13	1,15	1,13
		<b>0,25</b>	1,18	1,16	1,14	1,16	<b>1,19</b>	1,16
		0,28	1,20	1,18	1,17	1,20	1,22	1,19
		<b>0,30</b>	1,21	1,20	1,19	1,22	<b>1,25</b>	1,21
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,26	1,23	1,16	1,16	1,19	1,18
		<b>0,20</b>	<b>1,27</b>	1,24	1,18	1,19	1,21	1,20
		0,22	1,28	1,25	1,20	1,22	1,24	1,22
		<b>0,25</b>	<b>1,30</b>	1,28	1,24	1,26	1,29	1,26
		0,28	1,33	1,31	1,18	1,31	1,34	1,30
		<b>0,30</b>	1,35	1,34	1,31	1,34	<b>1,37</b>	1,33

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde.

Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ wird  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

Die Ergebnisse zeigen, dass zur Empfehlung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für diesen Lastfall unterschiedliche Anteile der ständigen bzw. veränderlichen Last an der Gesamtlast maßgebend werden. In der Ergebniszusammenstellung wird auf Basis der Kalibrierungsergebnissen ein Vorschlag unterbreitet, siehe Kap. 7.6.

### 7.5.7 Bauteile unter Doppelbiegung aus Eigenlast und Windlast

#### Lastfälle und Gewichtungen

Die Zuverlässigkeitsanalysen in Kap. 6.5.5 ergaben, dass eine Beschränkung des Lastanteils der veränderlichen Last in diesem Lastfall nicht in allen Fällen zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit führt. Dem entsprechend wird die Kalibrierung der Sicherheitsbeiwerte für verschiedenen Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast durchgeführt. Die Optimierung erfolgt über Lastanteile der Windlast in y-Richtung von  $LA_{Q2} = 0,1 \dots 0,9$ .

#### Ergebnisse

Tab. 7.29 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse für ausgewählte Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast. Der ungünstigste Fall findet sich bei  $LA_G = 0,9$ . Die Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Lasten auf  $\gamma_{G,up} = 1,20$  führt trotz der Reduktion des Variationskoeffizienten dazu, dass die ständige Last in der Zuverlässigkeitsanalyse einen höheren Einfluss hat. Abb. 7.21 zeigt ausführlichere Ergebnisse für  $LA_G = 0,9$  (tabelliert in Anhang Tab. 10.53).

Tab. 7.29: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$V_R$	$LA_G$				
			0,1	0,2	0,5	0,8	0,9
			$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,07	1,06	1,06	1,10	1,12
		0,20	1,08	1,07	1,07	1,12	1,14
		0,22	1,09	1,08	1,09	1,14	1,16
		<b>0,25</b>	1,11	1,11	1,12	1,17	<b>1,19</b>
		0,28	1,14	1,13	1,16	1,21	1,23
		<b>0,30</b>	1,15	1,15	1,18	1,23	1,26
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,15	1,14	1,13	1,17	1,19
		0,20	1,17	1,15	1,15	1,20	1,22
		0,22	1,18	1,17	1,18	1,22	1,25
		<b>0,25</b>	1,22	1,21	1,22	1,27	1,29
		0,28	1,25	1,25	1,26	1,32	1,34
		0,30	1,28	1,27	1,30	1,35	1,38

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde.

Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ wird  $V_{R,m} = 0,25$  und  $V_{R,c} = 0,20$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

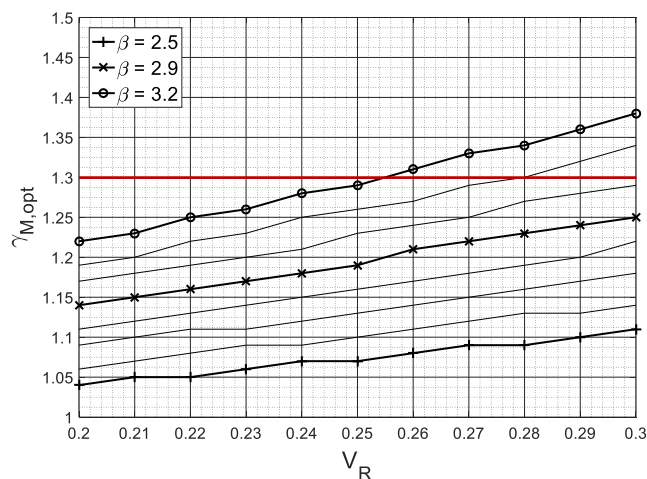


Abb. 7.21: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,9$  (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

### 7.5.8 Bauteile unter einachsiger Beanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast

#### Grundlegendes

Wie in Kap. 7.5.1 beschrieben handelt es sich bei der Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten um ein Optimierungsproblem, welchem zwischen der Anzahl der Optimierungskategorien und der zulässigen Abweichung vom Zielzuverlässigkeitsindex unterschieden werden muss. Eine geringe Abweichung vom Zielzuverlässigkeitsindex und damit auch ein größeres Optimierungspotential wird mit einer höheren Anzahl der betrachteten Optimierungskategorien erzielt und resultiert damit auch in einer höheren Anzahl von Teilsicherheitsbeiwerte für unterschiedliche Bemessungsfälle. Für Beanspruchungen aus Schnee- und Windlasten entstehen damit zwei mögliche Ansätze:

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

a) Optimierung für Schnee- und Windlasten getrennt

- Vorteil: das durchschnittliche Zuverlässigkeitsniveau über die ausgewählten Bemessungsfälle liegt dichter am Zielzuverlässigkeitsindex
- Nachteil: Es müssen Teilsicherheitsbeiwerte abhängig von der Einwirkungsart und von der betrachteten Materialfestigkeit ausgewiesen werden

b) Optimierung über verschiedene Zusammenstellungen von Lastkombinationen aus Schnee- und Windlasten

- Vorteil: Es werden weniger Teilsicherheitsbeiwerte ausgewiesen, eine Unterscheidung kann nur nach der betrachteten Festigkeitseigenschaft erfolgen
- Nachteil: Die Abweichung des durchschnittlichen Zuverlässigkeitsindex liegt deutlicher über und unter dem Zielwert, als bei Ansatz a)

Die Ergebnisse für das ausschließliche Wirken von ständiger Last und Windlast wurden in Kap. 7.5.6 dargestellt. Nachfolgende werden die Ergebnisse beider Ansätze zur Kalibrierung bei wirkenden Schnee- bzw. Schnee- und Windlast dargestellt.

**Ansatz a) Lastkombination aus ständiger Last und Schneelast**

*Lastfälle und Gewichtungen*

Zur Eingrenzung der Lastverhältnisse aus ständiger Last und Schneelast auf praktische Relevanz werden zunächst die Grenzwerte der anzusetzenden charakteristischen Werte der einzelnen Schneelastzonen betrachtet und für unterschiedliche Dachneigungswinkel mit Annahmen für das Eigengewicht der Dachfläche ins Verhältnis gesetzt, siehe Tab. 7.30.

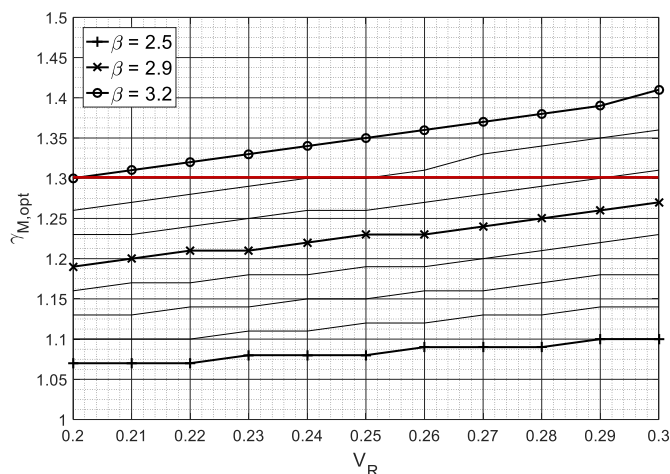
Tab. 7.30: Lastverhältnisse aus ständiger Last und Schneelast  $LA_Q = q_k / (g_k + q_k)$  für verschiedene Dachneigungswinkel und Schneelastzonen

					$g_k = 1 \text{ kN/m}^2 \text{ DF}$			$g_k = 1,5 \text{ kN/m}^2 \text{ DF}$			$g_k = 2 \text{ kN/m}^2 \text{ DF}$		
		DN ≤ 30°	DN 40°	DN 50°	DN ≤ 30°	DN 40°	DN 50°	DN ≤ 30°	DN 40°	DN 50°	DN ≤ 30°	DN 40°	DN 50°
Zone	$s_k$	$s$	$s$	$s$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$	$LA_Q$
1	0,65	0,52	0,35	0,17	0,34	0,23	0,11	0,25	0,17	0,08	0,20	0,13	<b>0,05</b>
1a	0,81	0,65	0,43	0,22	0,39	0,27	0,13	0,30	0,20	0,09	0,24	0,16	0,07
2	0,85	0,68	0,45	0,23	0,40	0,28	0,14	0,31	0,21	0,10	0,25	0,16	0,08
2a	1,06	0,85	0,57	0,28	0,45	0,33	0,17	0,35	0,24	0,12	0,29	0,20	0,09
3	1,10	0,88	0,59	0,29	<b>0,46</b>	0,33	0,17	0,36	0,25	0,12	0,30	0,20	0,10

Bei Anwendung der unteren Grenzwerte ergeben sich Lastanteile der veränderlichen Last an der Gesamtlast von  $LA_G = 0,05$  bis  $LA_G = 0,46$ . Insbesondere in der Schneelastzone 3 kommen je nach Standort auch deutlich höhere charakteristische Werte zur Anwendung. Zur Kalibrierung optimierter Teilsicherheitsbeiwerte werden Lastanteile der Schneelast an der Gesamtlast von  $LA_Q = 0,4$ ,  $LA_Q = 0,5$  und  $LA_Q = 0,6$  getrennt betrachtet. Somit entfällt eine Gewichtung verschiedener Lastfallkombinationen.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse für  $LA_G = 0,5$  werden in Abb. 7.22 dargestellt (tabelliert in Anhang Tab. 10.56).



**Abb. 7.22:** Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

Eine Zusammenfassung mit Darstellung ausgewählter Ergebnisse für  $LA_G = 0,4$  und  $LA_G = 0,6$  erfolgt in Tab. 7.31. Umfangreiche Kalibrierungsergebnisse für  $LA_G = 0,40$  und  $LA_G = 0,60$  können Anhang 10.11.5 (S. 91) entnommen werden. Die Kalibrierung ergibt ein Anpassungspotential des Teilsicherheitsbeiwertes im Bewertungslevel abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit.

**Tab. 7.31:** Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G = 0,4$		$LA_G = 0,5$		$LA_G = 0,6$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,23	0,18	1,19	0,18	1,15
		<b>0,20</b>	<b>1,24</b>	<b>0,20</b>	<b>1,19</b>	<b>0,20</b>	<b>1,16</b>
		0,22	1,25	0,22	1,21	0,22	1,17
		<b>0,25</b>	<b>1,26</b>	<b>0,25</b>	<b>1,23</b>	<b>0,25</b>	<b>1,20</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,35	0,18	1,29	0,18	1,24
		<b>0,20</b>	<b>1,36</b>	<b>0,20</b>	<b>1,30</b>	<b>0,20</b>	<b>1,25</b>
		0,22	1,37	0,22	1,32	0,22	1,27
		<b>0,25</b>	<b>1,40</b>	<b>0,25</b>	<b>1,35</b>	<b>0,25</b>	<b>1,31</b>

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde.

Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen.

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

## Ansatz b) Lastkombination aus ständiger Last, Wind- und Schneelast

### Lastfälle und Gewichtungen

Die Auswahl und Gewichtung von Lastkombinationen für die Optimierung stellt aufgrund der vielfältigen möglichen Kombinationsmöglichkeiten eine Herausforderung dar, es müssen eine Reihe von Annahmen getroffen werden. Lastverhältnisse aus ständiger Last, Schneelast und Windlast werden benötigt. Die Herleitung wird in Anhang 10.10.1 (S. 85) dargestellt. Diese basiert auf der Auswahl von 22

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

deutschen Großstädten, die möglichst repräsentativ verteilt über alle Schnee- und Windlastzonen getroffen wurde. Für diese wird die Schneelast für verschiedene Dachneigungswinkel bestimmt. Aus dem jeweils größten Wert der zufällig ausgewählten Städte in der betrachteten Schneelastzone wird das Lastverhältnis aus Schneelast, Windlast und ständiger Last (nach Anhang Kap. 10.3 ungünstig mit  $g_k = 1 \text{ kN/m}^2$  angenommen) bestimmt. Des Weiteren verlangt die Festlegung der Wichtungsfaktoren eine Abschätzung der prozentualen Verteilung der Schneelastzonen in Deutschland, sowie die Gewichtung relevanter Dachneigungswinkel für Holzkonstruktionen im Bestand. In Anhang 10.10.2 (S. 86) wird versucht, eine Abschätzung diesbezüglich basierend auf einer graphischen Auswertung der prozentualen Verteilung der in Deutschland vorhandenen Schneelastzonen mit einem Geoinformationssystem, sowie einer Abschätzung vorhandener Dachneigungswinkel zu finden. Die Annahmen sind etwas ungünstig im Hinblick auf einen verhältnismäßig großen Anteil flacher Dächer gewählt, da sich dies ungünstig auf die Zuverlässigkeit auswirkt. Es ergeben sich 14 verschiedene Verhältnisse aus ständiger Last, Schneelast und Windlast und die Wichtungsfaktoren nach Tab. 7.32. Die Wichtungsfaktoren ergeben sich durch Multiplikation der angenommenen prozentualen Verteilung der einzelnen Schneelastzonen mit der prozentualen Gewichtung der verschiedenen Dachneigungswinkel.

Tab. 7.32: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für einachsige Beanspruchung aus Eigenlast, Schnee- und Windlast (ohne Stabilitäts- und Schubversagen) aus einer Abschätzung von Schneelastzonen und Dachneigungswinkeln

Lastfall			Wichtungsfaktor $w_i$	Beispiele für praktische Anwendungsfälle
Lfd.-Nr.	Schneelastzone	Dachneigungswinkel		
1	SLZ 1	$\alpha \leq 30^\circ$	0,07	Flachdach
2		$\alpha = 40^\circ$	0,03	Satteldach
3		$\alpha = 50^\circ$	0,03	Satteldach
4	SLZ 1a	$\alpha \leq 30^\circ$	0,02	Flachdach
5		$\alpha = 40^\circ$	0,02	Satteldach
6		$\alpha = 50^\circ$	0,02	Satteldach
7	SLZ 2	$\alpha \leq 30^\circ$	0,27	Flachdach
8		$\alpha = 40^\circ$	0,13	Satteldach
9		$\alpha = 50^\circ$	0,13	Satteldach
10	SLZ 3	$\alpha \leq 30^\circ$	0,04	Flachdach
11		$\alpha = 40^\circ$	0,02	Satteldach
12		$\alpha = 50^\circ$	0,02	Satteldach
13	alle	$\alpha = 60^\circ$	0,10	Spitzdach (z.B. Kirchen)
14		$\alpha = 75^\circ$	0,10	Spitzdach (z.B. Kirchen)
			$\Sigma = 1$	

Die Ergebnisse bei dieser Herangehensweise sind abhängig von der Auswahl der geografischen Orte, sowie von der Abschätzung der Häufigkeit verschiedener Dachneigungswinkel im Bestand und somit subjektiv geprägt. Deshalb werden zudem Kalibrierung mit fixem Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast mit  $L_{AG} = 0,5$  und  $L_{AG} = 0,6$  und verschiedenen Anteilen der veränderlichen Lasten durchgeführt (Tab. 7.33). Hierbei werden alle Lastfälle gleich stark gewichtet.

Tab. 7.33: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für einachsige Beanspruchung unter Eigenlast & kombinierter Schnee- und Windlast (ohne Stabilitäts- und Schubversagen) mit fixem Anteil ständiger Lasten

Lfd. Nr.	$LA_G$	$LA_{Q1}$ (Schneelast)	$LA_{Q2}$ (Windlast)	$w_i$
1	0,5 bzw. 0,6	0,1	0,9	0,111
2	0,5 bzw. 0,6	0,2	0,8	0,111
3	0,5 bzw. 0,6	0,3	0,7	0,111
4	0,5 bzw. 0,6	0,4	0,6	0,111
5	0,5 bzw. 0,6	0,5	0,5	0,111
6	0,5 bzw. 0,6	0,6	0,4	0,111
7	0,5 bzw. 0,6	0,7	0,3	0,111
8	0,5 bzw. 0,6	0,8	0,2	0,111
9	0,5 bzw. 0,6	0,9	0,1	0,111
				$\Sigma = 1$

Ergebnisse für einachsige Beanspruchung unter ständiger Last, Schneelast und Windlast

Bei Annahme der hergeleiteten Lastverhältnisse und Wichtungsfaktoren nach Tab. 7.32 ergeben sich die modifizierten Teilsicherheitsbeiwerte nach Abb. 7.23. (tabelliert in Anhang Tab. 10.57)

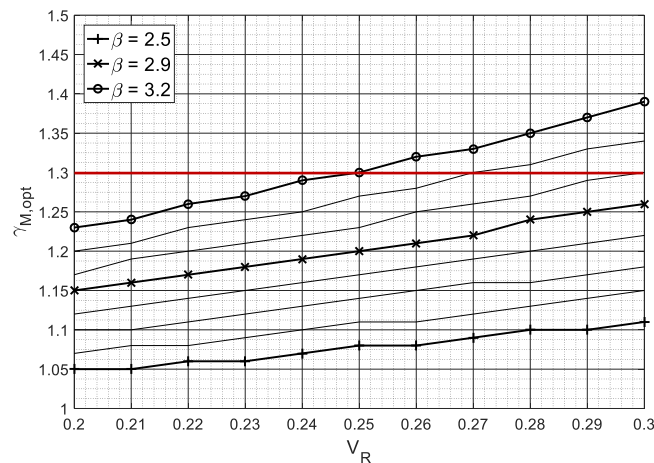


Abb. 7.23: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices,  $LA_G$  nach Tab. 7.32 ( $\Delta\beta = 0,1$ ) (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

Bei Annahme eines fixen Anteils der ständigen Last an der Gesamtlast von  $LA_G = 0,5$  und den Annahmen nach Tab. 7.33 ergeben sich die kalibrierten Sicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  nach Abb. 7.24 (tabelliert in Anhang Tab. 10.59).

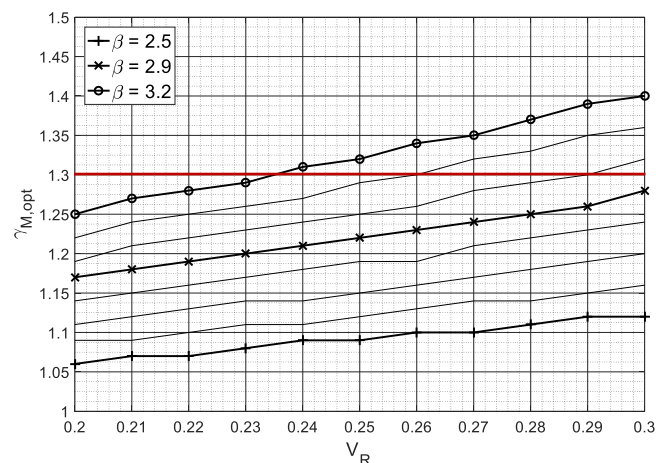


Abb. 7.24: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices,  $LA_G = 0,5$  ( $\Delta\beta = 0,1$ ) (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

## 7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Die Annahme eines festen Lastanteils der ständigen Last und unter Optimierung über alle Aufteilungen der Lastanteile der veränderlichen Lasten ergeben sich leicht höhere Sicherheitsbeiwerte, als für die hergeleiteten Lastanteile. Unter der Festlegung von  $\beta_{t,eval} = 2,9$  ( $T_{ref} = 50a$ ) ergibt sich für  $LA_G = 0,5$  und  $V_R = 0,25$  eine Abminderung auf  $\gamma_{M,opt} = 1,22$ , für  $V_R = 0,20$  auf  $\gamma_{M,opt} = 1,17$ . Ergebnisse für abweichende Zielzuverlässigkeitsniveaus können den oben dargestellten Tabellen bzw. Abbildungen entnommen werden. Im Instandsetzungslevel kann eine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes bei  $V_R < 0,25$  erfolgen. Im Vergleich zur ausschließlich wirkenden Schneelast ergeben sich erwartungsgemäß günstigere Ergebnisse. Die Ergebnisse für  $LA_G = 0,4$  und  $LA_G = 0,6$  werden in Anhang 10.11.8 (S. 92) dargestellt. Die Ergebnisse werden in Tab. 7.34 zusammengefasst.

**Tab. 7.34:** Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Biegung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G$ nach Tab. 7.32 bzw. Anhang 10.10		$LA_G = 0,4$		$LA_G = 0,5$		$LA_G = 0,6$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,13	0,18	1,17	0,18	1,15	0,18	1,14
		<b>0,20</b>	<b>1,15</b>	<b>0,20</b>	<b>1,18</b>	<b>0,20</b>	<b>1,17</b>	<b>0,20</b>	<b>1,15</b>
		0,22	1,17	0,22	1,20	0,22	1,19	0,22	1,18
		<b>0,25</b>	<b>1,20</b>	<b>0,25</b>	<b>1,23</b>	<b>0,25</b>	<b>1,22</b>	<b>0,25</b>	<b>1,21</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,20	0,18	1,25	0,18	1,23	0,18	1,21
		<b>0,20</b>	<b>1,23</b>	<b>0,20</b>	<b>1,27</b>	<b>0,20</b>	<b>1,25</b>	<b>0,20</b>	<b>1,24</b>
		0,22	1,26	0,22	1,30	0,22	1,28	0,22	1,27
		<b>0,25</b>	<b>1,30</b>	<b>0,25</b>	<b>1,34</b>	<b>0,25</b>	<b>1,32</b>	<b>0,25</b>	<b>1,31</b>

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.32 bzw. wie ausgewiesen zugrunde.

Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen.

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

### 7.5.9 Bauteile unter Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast

#### Lastfälle und Gewichtungen

Die ständige Last und die Schneelast werden in z-Richtung wirkend angesetzt, die Windlast in y-Richtung. Analog zum Lastfall Einfachbiegung wird die Kalibrierung für Lastanteile der ständigen Last von  $LA_G = 0,5$  und  $LA_G = 0,6$  durchgeführt und die Anteile aus Schnee- und Windlast gleichmäßig gewichtet, siehe, Tab. 7.35.

Tab. 7.35: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Doppelbiegung aus Eigenlast & Schnee- und Windlast (ohne Stabilitäts- und Schubversagen) mit fixem Anteil ständiger Lasten

Lfd. Nr.	$LA_G$	$LA_{Q1}$ (Schneelast)	$LA_{Q2}$ (Windlast)	$w_i$
1	0,5 bzw. 0,6	0,1	0,9	0,111
2	0,5 bzw. 0,6	0,2	0,8	0,111
3	0,5 bzw. 0,6	0,3	0,7	0,111
4	0,5 bzw. 0,6	0,4	0,6	0,111
5	0,5 bzw. 0,6	0,5	0,5	0,111
6	0,5 bzw. 0,6	0,6	0,4	0,111
7	0,5 bzw. 0,6	0,7	0,3	0,111
8	0,5 bzw. 0,6	0,8	0,2	0,111
9	0,5 bzw. 0,6	0,9	0,1	0,111
				$\Sigma = 1$

### Ergebnisse

Für den Lastanteil der ständigen Last  $LA_G = 0,5$  ergeben sich die modifizierten Teilsicherheitsbeiwerte bzw. Abb. 7.25 (tabelliert in Anhang Tab. 10.62).

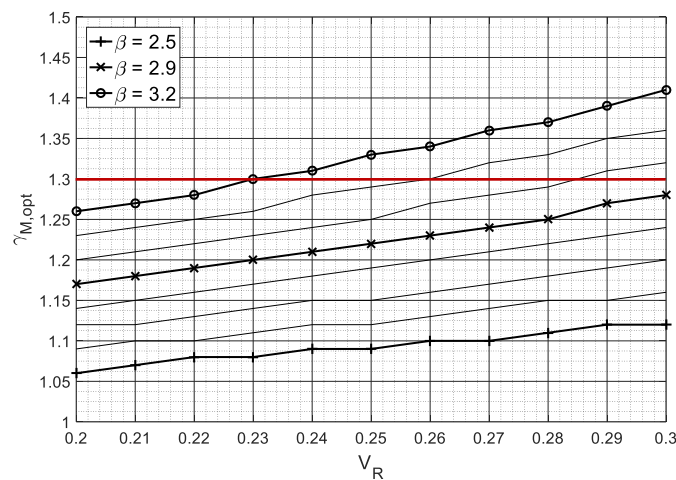


Abb. 7.25: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindizes ( $\Delta\beta = 0,1$ ,  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Vollholz)

Im Instandsetzungslevel ( $\beta_{t,exis} = 3,2$ ,  $T_{ref} = 50a$ ) ergibt sich für  $V_R = 0,25$  ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_{M,opt} = 1,34$  und damit etwas höher als nach geltender Festlegung in DIN EN 1995-1-1:2010-12 [90]. Für das vorgeschlagene Bewertungslevel ( $\beta_{t,eval} = 2,9$ ,  $T_{ref} = 50a$ ) ergibt sich bei  $V_R = 0,25$   $\gamma_{M,opt} = 1,23$ . Ausführliche Ergebnisse für  $LA_G = 0,4$  und  $LA_G = 0,6$  werden in Anhang 10.11.9 (S. 94) dargestellt.

Es ergeben sich geringfügige Abweichungen zu den Ergebnissen bei einem Lastanteil der ständigen Last von  $LA_G = 0,5$ . Für  $\beta_{t,eval} = 3,2$  und  $V_R = 0,25$  entspricht der kalibrierte Teilsicherheitsbeiwert etwa der Festlegung der DIN EN 1995-1-1:2020-12 [90], für eine reduzierte Zielzuverlässigkeit und/ oder eine Reduktion des Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit ergeben sich zum Teil deutliche Reduktionen. Die Annahme höherer Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit führen auch in diesem Lastfall zu einer rechnerischen Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$ .



7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Die Ergebnisse sind vergleichbar mit dem Lastfall Einfachbiegung bei Lastkombination aus ständiger Last, Schneelast und Windlast. Eine Zusammenfassung für Doppelbiegung erfolgt in Tab. 7.36.

**Tab. 7.36:** Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last (starke Achse), Schneelast (starke Achse) und Windlast (schwache Achse) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindizes und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G = 0,4$		$LA_G = 0,5$		$LA_G = 0,6$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,18	0,18	1,15	0,18	1,14
		<b>0,20</b>	1,19	<b>0,20</b>	1,17	<b>0,20</b>	1,16
		0,22	1,21	0,22	1,19	0,22	1,18
		<b>0,25</b>	<b>1,24</b>	<b>0,25</b>	<b>1,22</b>	<b>0,25</b>	<b>1,21</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,26	0,18	1,23	0,18	1,22
		<b>0,20</b>	1,28	<b>0,20</b>	1,26	<b>0,20</b>	1,24
		0,22	1,31	0,22	1,28	0,22	1,27
		<b>0,25</b>	<b>1,35</b>	<b>0,25</b>	<b>1,33</b>	<b>0,25</b>	<b>1,31</b>

*Anmerkungen:*

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde.

Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen.

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

**7.5.10 Bauteile unter Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast**

*Lastfälle und Gewichtungen*

Dieser Optimierungsfall umfasst aus ständiger Last und Schneelast auf Druck in Faserrichtung beanspruchte Bauteile mit einer zusätzlichen Biegebeanspruchung aus Windlast. Die Lastanteile  $LA_G = 0,4$ ,  $LA_G = 0,5$  und  $LA_G = 0,6$  werden betrachtet. Die folgenden Studien wurden mit den Lastanteilen und den entsprechenden Wichtungsfaktoren  $w_i$  nach Tab. 7.37 durchgeführt. Es werden einheitliche Wichtungsfaktoren für die unterschiedlichen Lastverhältnisse der veränderlichen Last angenommen.

**Tab. 7.37:** Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung unter Eigenlast, Schneelast und Windlast (ohne Stabilitätsversagen)

Lfd. Nr.	$LA_G$	$LA_{Q1}$ (Schneelast bzw. Nutzlast)	$LA_{Q2}$ (Windlast)	$w_i$
1	0,4, 0,5 oder 0,6	0,1	0,9	0,111
2	0,4, 0,5 oder 0,6	0,2	0,8	0,111
3	0,4, 0,5 oder 0,6	0,3	0,7	0,111
4	0,4, 0,5 oder 0,6	0,4	0,6	0,111
5	0,4, 0,5 oder 0,6	0,5	0,5	0,111
6	0,4, 0,5 oder 0,6	0,6	0,4	0,111
7	0,4, 0,5 oder 0,6	0,7	0,3	0,111
8	0,4, 0,5 oder 0,6	0,8	0,2	0,111
9	0,4, 0,5 oder 0,6	0,9	0,1	0,111
				$\Sigma = 1$

*Ergebnisse*

Die Kalibrierungsergebnisse für  $LA_G = 0,5$  werden in Abb. 7.26 (tabelliert in Anhang Tab. 10.65) dargestellt. Ausführliche Ergebnisse für  $LA_G = 0,4$  und  $LA_G = 0,6$  werden in Anhang 10.11.10 (S. 95) dargestellt. Die ausgewiesenen Variationskoeffizienten beziehen sich auf die Biegefestigkeit. Die Druckfestigkeit ist wie oben festgelegt mit einem Korrelationskoeffizienten von  $\rho = 0,8$  mit der Biegefestigkeit korreliert. Zudem ist nach JCSS PMC [61]  $V_{R,c} = 0,8 \cdot V_{R,m}$ .

Für das vorgeschlagene Bewertungslevel mit  $\beta_{t,eval} = 2,9$  ergibt sich eine Anpassung auf  $\gamma_{M,opt} = 1,24$ .

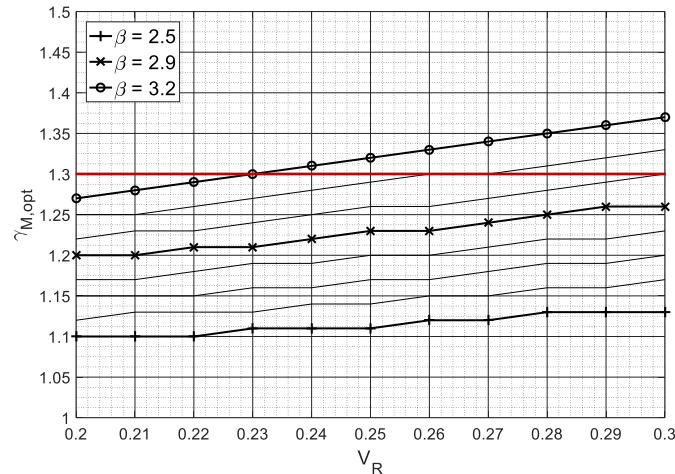


Abb. 7.26: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz)

Die Ergebnisse sind vergleichbar, mit dem Lastfall Druck und Biegung auf ständiger Last, Nutzlast und Windlast. Der verhältnismäßig flache Verlauf der Kurven, insbesondere bei niedrigen Zielzuverlässigkeitsindices zeigt den dominanten Einfluss der Lasten auf die Zuverlässigkeit und einen reduzierten Einfluss der Materialstreuung. Eine Zusammenfassung zeigt Tab. 7.38.

Tab. 7.38: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck in Stabachse), Schneelast (Druck in Stabachse) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel,  $\gamma_G = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$  – Zusammenfassung

Level	$\beta_t$	$LA_G = 0,4$		$LA_G = 0,5$		$LA_G = 0,6$	
		$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$	$V_R$	$\gamma_{M,opt}$
Bewertungslevel	2,9	0,18	1,24	0,18	1,19	0,18	1,17
		0,20	1,25	0,20	1,20	0,20	1,18
		0,22	1,26	0,22	1,21	0,22	1,19
		<b>0,25</b>	<b>1,27</b>	<b>0,25</b>	<b>1,23</b>	<b>0,25</b>	<b>1,21</b>
Instandsetzungslevel	3,2	0,18	1,32	0,18	1,26	0,18	1,24
		0,20	1,33	0,20	1,27	0,20	1,26
		0,22	1,35	0,22	1,29	0,22	1,27
		<b>0,25</b>	<b>1,37</b>	<b>0,25</b>	<b>1,32</b>	<b>0,25</b>	<b>1,30</b>

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.37 bzw. wie ausgewiesen zugrunde.  
Abweichende Annahmen als die ausgewiesenen erfordern eine angepasste Kalibrierung.  
Ohne Aktualisierung der Materialeigenschaften durch Prüfung in situ  $V_R = 0,25$  auf Basis des JCSS PMC empfohlen.  
Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren.

## 7.6 Zusammenfassung der Kalibrierungsergebnisse und Vorschlag modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für die Praxis

Zur Integration von Maßnahmen beim Bauen im Bestand in das bestehende Normungskonzept wurde eine Differenzierung in verschiedene Level für technische Maßnahmen vorgeschlagen. Dies umfasst:

- **Instandsetzungslevel** für Maßnahmen im Bestand mit Austausch von Tragwerksteilen
  - *Ständige Lasten werden in situ aktualisiert.*  
Die Teilsicherheitsbeiwerte sind  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_M = 1,30$
- **Bewertungslevel** für die Bewertung der Tragfähigkeit verbauter Bauteile im Bestand
  - *Das mittlere Zuverlässigkeitsniveau unter Anwendung der geltenden Normung wird bestimmt. Basierend darauf wird eine Anpassung des Zielzuverlässigkeitsniveaus für die Bewertungssituation vorgeschlagen. Eine Anpassung auf  $\gamma_{G,up} = 1,20$  wird berücksichtigt. Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  werden für verschiedene Lastkombinationen und Beanspruchungen kalibriert.*

Es erfolgte eine Optimierung der Teilsicherheitsbeiwerte für vorgeschlagene Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  in ausgewählten Beanspruchungssituationen bzw. bestimmten Lastkombinationen. Tab. 7.39 fasst die Ergebnisse der Kalibrierungen für das Bewertungslevel mit  $\beta_{t,eval} = 2,9$  zusammen.

Tab. 7.39: Zusammenfassung zur Kalibrierung des Teilsicherheitsbeiwertes für ausgewiesene Holzfestigkeiten  $\gamma_{M,opt}$  abhängig von Last und Beanspruchung – **Bewertungslevel** (Schadensfolgeklasse CC 2)

	Ständige Last und					
	-	Nutzlast <sup>1,2</sup>	Nutz- & Windlast <sup>2</sup>	Windlast <sup>3</sup>	Schneelast <sup>2</sup>	Schnee- & Windlast <sup>2</sup>
<b>Einachsig Druck</b> (ohne Stabilitätsgefahr)	1,16	1,19	-	1,16	1,19	1,17
<b>Einachsig Biegung</b>	1,22	1,23	-	1,19	1,23	1,22
<b>Doppelbiegung</b>	-	-	1,22	1,19	-	1,22
<b>Druck &amp; Biegung</b> (ohne Stabilitätsgefahr)	-	-	1,22	-	-	1,23
<b>Einachsig Zug in FR</b>	1,28	1,27	-	1,25		

<sup>1</sup> Nur für die in Kap. 7.5.3 benannten Nutzlastarten anwendbar!

<sup>2</sup> Ergebnisse für  $LA_G = 0,50$

<sup>3</sup> ungünstigstes Ergebnis aus allen Lastverhältnissen

Die Kalibrierung basiert auf  $\beta_{t,eval} = 2,9$  ( $T_{ref} = 50a$ )

Mit der *Design Value Method (DVM)* in Kap. 7.3.1 ergab sich für  $\beta_{t,eval} = 2,9$  bei  $V_R = 0,20$  ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,22$ , bei  $V_R = 0,25$   $\gamma_M = 1,27$ . Die *Adjusted Partial Factor Method* in Kap. 7.3.2 resultierte für  $\beta_{t,eval} = 2,9$  bei  $V_R = 0,20$  in  $\gamma_M = 1,19$  und bei  $V_R = 0,25$   $\gamma_M = 1,24$ . Die Kalibrierungsergebnisse liegen in ähnlicher Größenordnung, sind zum Teil etwas günstiger.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Verwendung einheitlicher Teilsicherheitsbeiwerte für unterschiedliche veränderliche Einwirkungen, insbesondere bei inhomogenen Materialien mit großen Festigkeitsstreuungen wie Holz, nicht unproblematisch ist. In der Kalibrierung müssen Schwankungen der

Zuverlässigkeit über die Widerstandsseite aufgefangen werden. Dies ist bei großen Variationskoeffizienten der Festigkeit nur eingeschränkt möglich. Grünberg [101] zeigte, dass sich für unterschiedliche veränderliche Einwirkungen unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte ergeben, Glowienka [72] stellte einen Vorschlag mit erhöhten Teilsicherheitsbeiwerten für veränderlicher Einwirkungen vor,  $\gamma_Q = 1,8$  für Nutz- und Windlasten, wenn ihr Anteil mehr als 35% an der Gesamtlast beträgt).

Die entstehende steigende Komplexität der Normung durch eine Vielzahl verschiedener Teilsicherheitsbeiwerte ist gegen den Nutzen einer besseren Ausnutzung des Materials und eines einheitlicheren Zuverlässigkeitsniveaus über alle Bemessungssituationen abzuwägen. In Tab. 7.40 wird ein Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für das Bewertungslevel zusammengefasst. Dieser basiert auf der Abwägung einer überschaubaren Anzahl verschiedener Sicherheitsbeiwerte und einer Nutzung des gegebenen Anpassungspotentials unter Wahrung des vorgeschlagenen Zielzuverlässigkeitsniveaus im Überprüfungslevel von  $\beta_{t,eval} = 2,9$  ( $T_{ref} = 50a$ ).

Tab. 7.40: Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  für die Bewertung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Holz in Bestandstragwerken (Querschnittsnachweise)

Klasse der Lasteinwirkungsdauer und Nutzungsklasse	KLED ständig, NKL 1 & 2	KLED mittel/ kurz, NKL 1 & 2	KLED kurz/ sehr kurz, NKL 1 & 2
<b>Beanspruchung</b>	Nur ständige Lasten	Nutzlast <sup>1,2</sup> , Schneelast <sup>2</sup> oder Lastkombination Schnee- & Windlast <sup>2</sup>	Windlast <sup>3</sup>
<b>Einachsig Druck in FR</b> (ohne Stabilitätsgefahr)	1,16	1,20	1,16
<b>Biegung, Doppelbiegung oder Druck &amp; Biegung</b> (ohne Stabilitätsgefahr)	1,23	1,23	1,20
<b>Einachsig Zug in FR</b>	1,30	1,30	1,25

**Bewertungslevel ( $\beta_{t,eval} = 2,9$ )  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$**

Zielwert der Zuverlässigkeit zur Kalibrierung, Abweichungen in bestimmten Bemessungssituationen sind möglich.

<sup>1</sup> Anwendung nur für die Nutzungskategorien A und B unter Anwendung von Fußnote 2

<sup>2</sup> Der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast beträgt  $LA_G \geq 0,5$

<sup>3</sup> Der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast ist beliebig

Unter praktischen Gesichtspunkten kann es angemessen sein, eine Vereinfachung des Sets optimierter Teilsicherheitsbeiwertes, wie in Tab. 7.41 dargestellt, vorzunehmen (Änderungen durch Fettdruck hervorgehoben). Die Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes der durch graue Schattierung markierten Sicherheitsbeiwerte hätte einen Zuverlässigkeitsabfall auf  $\beta = 2,8$  zur Folge. Da es sich bei der probabilistischen Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten um ein Optimierungsproblem handelt, sind ohnehin Schwankungen der Zuverlässigkeit vorhanden. In der Verifizierung (Kap. 7.7) wird der Unterschied des erreichten Zuverlässigkeitsniveaus zwischen der Anwendung von  $\gamma_{M,opt} = 1,23$  und  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  in den entsprechenden Beanspruchungsfällen untersucht.

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

Tab. 7.41: Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  für die Bewertung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Holz in Bestandtragwerken (Querschnittsnachweise), Set mit verbesserter praktischer Handhabbarkeit

Klasse der Lasteinwirkungsdauer und Nutzungsklasse	KLED ständig, NKL 1 & 2	KLED mittel/ kurz, NKL 1 & 2	KLED kurz/ sehr kurz, NKL 1 & 2
Beanspruchung	Nur ständige Lasten	Nutzlast <sup>1,2</sup> , Schneelast <sup>2</sup> oder Lastkombination Schnee- & Windlast <sup>2</sup>	Windlast <sup>3</sup>
Einachsig Druck in FR (ohne Stabilitätsgefahr)	<b>1,15</b>	1,20	<b>1,15</b>
Biegung, Doppelbiegung oder Druck & Biegung (ohne Stabilitätsgefahr)	<b>1,20</b>	<b>1,20</b>	1,20
Einachsig Zug in FR	1,30	1,30	1,25

Bewertungslevel ( $\beta_{t,eval} = 2,9$ )  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$

Zielwert der Zuverlässigkeit zur Kalibrierung, Abweichungen in bestimmten Bemessungssituationen sind möglich.

<sup>1</sup> Anwendung nur für die Nutzungskategorien A und B unter Anwendung von Fußnote 2

<sup>2</sup> Der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast beträgt  $LA_G \geq 0,5$

<sup>3</sup> Der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast ist beliebig

Bei Anpassung des Variationskoeffizienten der Festigkeit oder Anwendung anderer Zielzuverlässigkeiten können modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  den Tabellen entnommen werden.

## 7.7 Verifizierung der Kalibrierungsergebnisse

### 7.7.1 Grundlegendes

Die Validierung angewandeter Methoden sowie die Verifizierung gewonnener Erkenntnisse sind zentrale Bestandteile guter wissenschaftlicher Praxis. Während die Validierung die Prüfung der angewandten Methoden für den bestimmten Zweck umfasst, schließt die Verifizierung die Überprüfung der wissenschaftlichen Korrektheit einer Aussage/ eines Ergebnisses ein.

Die wissenschaftliche Eignung der in dieser Arbeit angewendeten Methoden (Validierung) wird durch die Vielzahl der zitierten Fachliteratur und aktuellen wissenschaftliche Studien mit ähnlicher Motivation belegt, siehe z. B. [50, 64, 72, 85]. Zudem ist die *First Order Reliability Method (FORM)*, die zur Kalibrierung der Sicherheitsbeiwerte angewendet wurde, ein etabliertes Verfahren zur Zuverlässigkeitsanalyse dessen Genauigkeitsgrad für die betrachteten Grenzzustandsfunktion hinreichend ist.

Die Verifizierung der Kalibrierungsergebnisse wird anhand einer Reihe von Zuverlässigkeitsuntersuchungen an mit den ausgewiesenen Sicherheitsbeiwerten bemessenen Bauteilen vorgenommen. Dafür werden in den abgegrenzten Optimierungskategorien Beispielkonstruktionen unter Anwendung der modifizierten Sicherheitsbeiwerte hinsichtlich einer einhundertprozentigen Querschnittsauslastung dimensioniert und die erzielte Zuverlässigkeit im speziellen Bemessungsfall überprüft. Die Kalibrierung der Sicherheitsbeiwerte erfolgte mittel *First Order Reliability Method* in *MATLAB*. Zur Vermeidung systematischer Programmierfehler wird die Überprüfung mittels *Monte Carlo Simulation* durchgeführt. Des Weiteren wird der graphische Verlauf der Zuverlässigkeitskurven, die sich unter Anwendung der angepassten Sicherheitsbeiwerte ergeben (Berechnung mit *FORM*), dargestellt. Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Überprüfung mit *Monte Carlo Simulation* erfolgt in Anhang 10.12

(ab S. 96), die mit *FORM* erstellten Grafiken werden auf den folgenden Seiten dargestellt. Die Ergebnisse beider Verfahren wurden in der Überprüfung vergleichend bewertet. Die Bauteilmaße in der *Monte Carlo Simulation* sind akademisch gewählt, da der Fokus auf der Einhaltung einer annähernd 100%-igen Querschnittsauslastung und der Abdeckung aller relevanten Lastverhältnisse aus ständiger und veränderlicher Last, sowie auf der Variation der unterschiedlichen Anteile der veränderlichen Lasten liegt. Die Darstellung von Beispielrechnungen als praktische (akademische) Fallstudien unter Anwendung der vorgeschlagenen angepassten Sicherheitsbeiwerte erfolgt in Kap. 8.

### 7.7.2 Druckbeanspruchung ohne Stabilitätsgefahr

#### Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Nutz- oder Schneelasten

Die Ergebnisse einer Überprüfung für Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast bzw. Schneelast mit *Monte Carlo Simulation* werden in Anhang 10.12.1 (Tab. 10.67) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der angesetzte Zielwert für die Kalibrierung  $\beta_{t,eval} = 2,9$  ( $T_{ref} = 50a$ ) bei Einhaltung eines Mindestlastanteils von  $LA_G = 0,5$  erreicht wird. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Einhaltung des Mindestlastanteils der ständigen Last zur Einhaltung der Zielzuverlässigkeit.

Abb. 7.27 stellt die Zuverlässigkeitskurven bei Anwendung der modifizierten Sicherheitsbeiwerte für den definierten Lastbereich unter Anwendung von *FORM* dar. Die Kurven unterstreichen die Bedeutung der Einhaltung des maximalen Lastanteils der veränderlichen Last an der Gesamtlast von  $LA_Q = 0,5$ . Die Auswahl der Empfehlung für den angepassten Teilsicherheitsbeiwert erfolgte für  $V_R = 0,25$ . Die Darstellung der Überprüfung mit *FORM* zeigt Variationskoeffizienten der Festigkeit von  $V_R = 0,22...0,28$ .

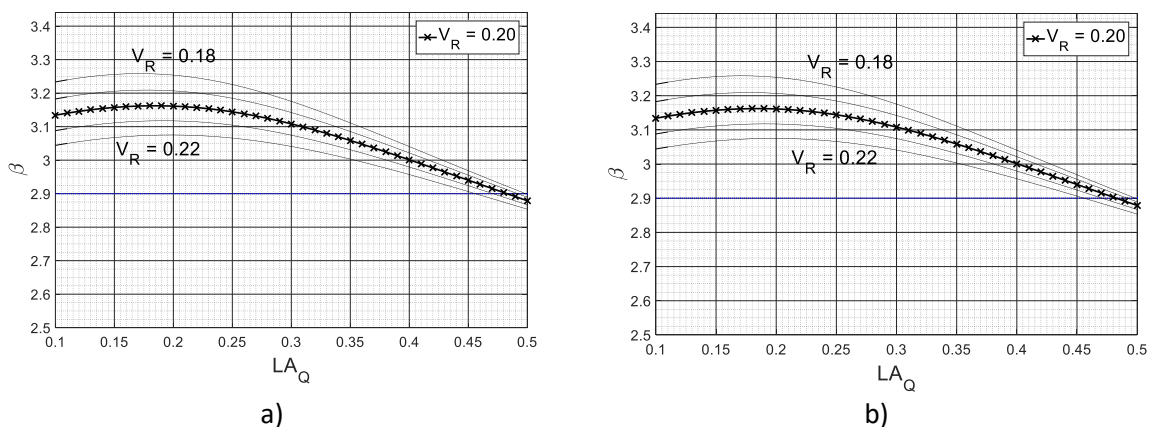


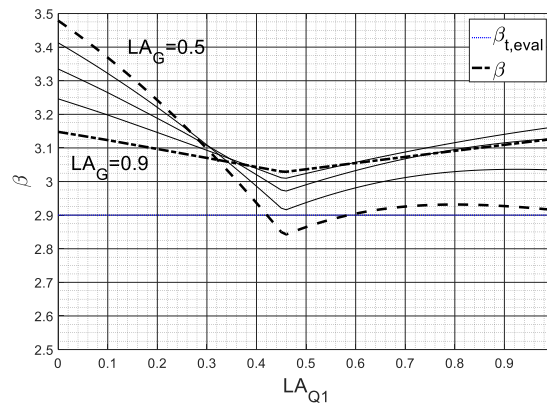
Abb. 7.27: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Druck, (Berechnung mit *FORM*), a) Schneelast, b) Nutzlast

#### Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Lastkombination aus Schnee- und Windlast

Die Ergebnisse einer beispielhaften Überprüfung für Druckbeanspruchung aus ständiger Last Wind- und Schneelast werden in Anhang 10.12.1 (Tab. 10.68) dargestellt. Auch bei hohem Lastanteil der ständigen Last zeigt sich noch ein deutlicher Einfluss einer Änderung des Lastanteils der Schneelast auf die Zuverlässigkeit. Der der Kalibrierung zugrundeliegende Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta_{t,eval} = 2,9$  wird

## 7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

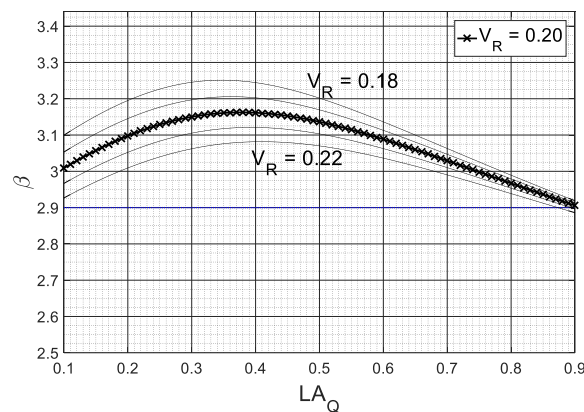
bei Einhaltung des Lastanteils der ständigen Last erreicht. Abb. 7.28 zeigt die erreichte Zuverlässigkeit mit angepassten Teilsicherheitsbeiwerten für  $LA_G \geq 0,5$ .



**Abb. 7.28:** Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Druck, Schnee- und Windlast (Berechnung mit FORM)

### Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast

Die Ergebnisse der Überprüfung mit *Monte Carlo Simulation* werden in Anhang 10.12.1 (Tab. 10.69) dargestellt. Wie auch bei der Kalibrierung der Sicherheitsbeiwerte zeigt sich der größte erreichte Zuverlässigkeitsindex bei einem Lastanteil der ständigen Last um  $LA_G = 0,5$ . Der Zielwert der Zuverlässigkeit wird in der Überprüfung erreicht. Abb. 7.27 stellt den Verlauf der Zuverlässigkeit graphisch unter Verwendung von FORM dar.



**Abb. 7.29:** Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,16$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Druck, Windlast (Berechnung mit FORM)

## 7.7.3 Biegung, Doppelbiegung oder Druck & Biegung ohne Stabilitätsgefahr

### Einfachbiegung

#### Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast

Beispielhaft ausgewählt wurden die Konstruktionen nach Abb. 7.31.- Geometrische Randbedingungen wurden *Lißner & Rug* [12] entnommen, siehe Abb. 7.30 und Abb. 7.31.

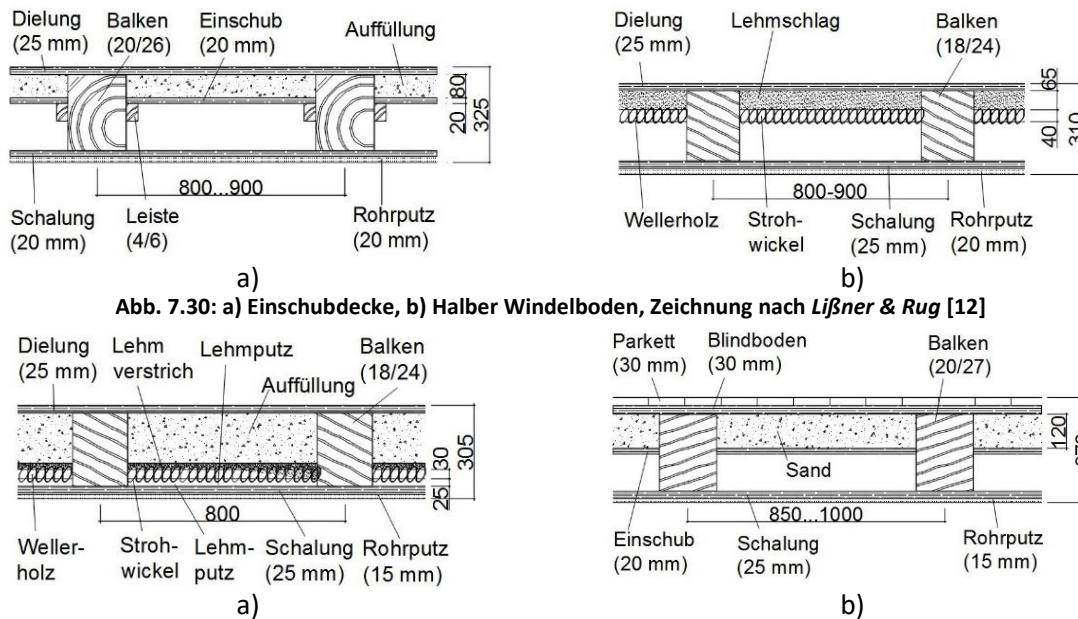


Abb. 7.30: a) Einschubdecke, b) Halber Windelboden, Zeichnung nach Lißner & Rug [12]

Abb. 7.31: a) Ganzer Windelboden, b) Berliner Decke, Zeichnung nach Lißner & Rug [12]

Die Verifizierung wird für das Bewertungslevel, d.h.  $\beta_{t,eval} = 2,9$ ,  $\gamma_{G,up} = 1,20$  und  $\gamma_{M,opt} = 1,23$  durchgeführt. Die Stützweiten der Balken wurden so gewählt, dass sich eine annähernd einhundertprozentige Querschnittsauslastung (+/- 1%) einstellt. Bei der Überprüfung wurden die statistischen Parameter der Nutzlast aus 4.3.3 verwendet. Anhang 10.12.2, Tab. 10.70 zeigt die Ergebnisse der *Monte Carlo Simulation* tabellarisch. Die Ergebnisse für die vergleichende Verifizierung mittels *FORM* zeigt Abb. 7.32 a). Für kleinere Räume mit Büronutzung wird der geforderte Zielwert leicht, für größere Räume unter Wohnraum- und Büronutzung aufgrund der günstigeren statistischen Parameter deutlich überschritten. Kleinere Räume unter Büroraumnutzung weisen ein geringeres erreichtes Zuverlässigkeitsniveau auf. Der festgelegte Mindestwert für den Bestand  $\beta_{0,exis} = 2,5$  wird nur in wenigen Fällen knapp unterschritten. Zudem ist bei Büronutzung durch mehrere Personen in einem Raum eher mit einer Tendenz zu größeren Raumgrößen, als die zugrunde gelegten zu rechnen. Für große Räume mit Büroraumnutzung wird der Zielwert überschritten.

Zu beachten ist, dass für die *Monte Carlo Simulation* die in Abschnitt 4.4 bestimmten Verteilungsparameter verwendet wurde. Dabei ergaben sich für große Räume geringere charakteristische Werte, als sie in *DIN EN 1991-1-1:2010-12* [109] angegeben sind. Bei der Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus der Normung in Abschnitt 6 kommt dieser Aspekt nicht zum Tragen, da durch die Normung der Grenzzustandsfunktion nur der Variationskoeffizient der Zufallsvariablen einen expliziten Einfluss auf die erreichte Zuverlässigkeit hat. Somit ergeben sich rechnerisch günstigere Zuverlässigkeiten.

Vergleichend wird in Abb. 7.32 b) die erzielte Zuverlässigkeit bei einer Abminderung auf  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  dargestellt, da in Kap. 7.6 auf die Vorteile einer Vereinfachung des Sets angepasster Teilsicherheitsbeiwerte hingewiesen wurde. Es zeigt sich, dass der vorgeschlagene Zielwert von  $\beta_{t,eval} = 2,9$  für  $V_R > 0,26$  und ab  $LA_Q > 0,35$  auch für  $V_R = 0,25$  leicht unterschritten ( $\beta \geq 2,8$ ) wird.



7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

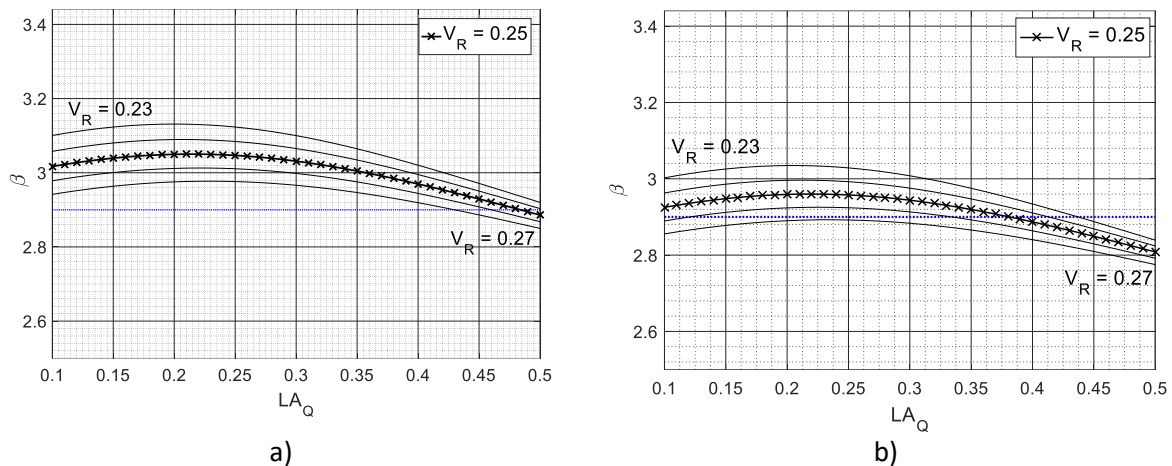


Abb. 7.32: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Biegebeanspruchung, Nutzlast mit  $V_N = 0,25$  (Berechnung mit FORM), a)  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ , b)  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

Biegebeanspruchung aus unter ständiger Last, Schneelast und Windlast

Für die Vergleichsrechnung wurde ungünstig der Dachneigungswinkel  $\alpha < 30^\circ$  angenommen. Durchgeführt wurde die Berechnung mit den ausgewiesenen Mindestwerten der Schneelastzonen aus der Normung sowie einem geringen Eigengewicht der Dachkonstruktion von  $g_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$ . In der Praxis sind höhere Werte sowohl für ständige Lasten als auch für Schneelasten möglich. Bei hundertprozentiger Querschnittsauslastung ist das Lastverhältnis aus ständiger und veränderlicher Last ein die Zuverlässigkeit stark bestimmender Faktor.

Die vergleichend Überprüfung mit FORM zeigt Abb. 7.33 a). Lastanteile mit dominanter Windlast führen, wie Abb. 7.33 zeigt, zu einer höheren Zuverlässigkeit. Insgesamt wird der Zielwert eingehalten und nur im Bereich des Anteils der Schneelast an der veränderlichen Last von  $0,4 < LA_{Q1} < 0,7$  für  $LA_G = 0,5$ ,  $LA_G = 0,6$  und  $LA_G = 0,7$  leicht unterschritten ( $\beta \geq 2,8$ ). Abb. 7.33 b) zeigt vergleichend das Ergebnis bei  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ . In diesem Fall unterschreiten alle Kurven im Bereich  $0,3 < LA_{Q1} < 0,7$  leicht den Zielwert, die Zuverlässigkeit sinkt nicht unter  $\beta = 2,7$ .

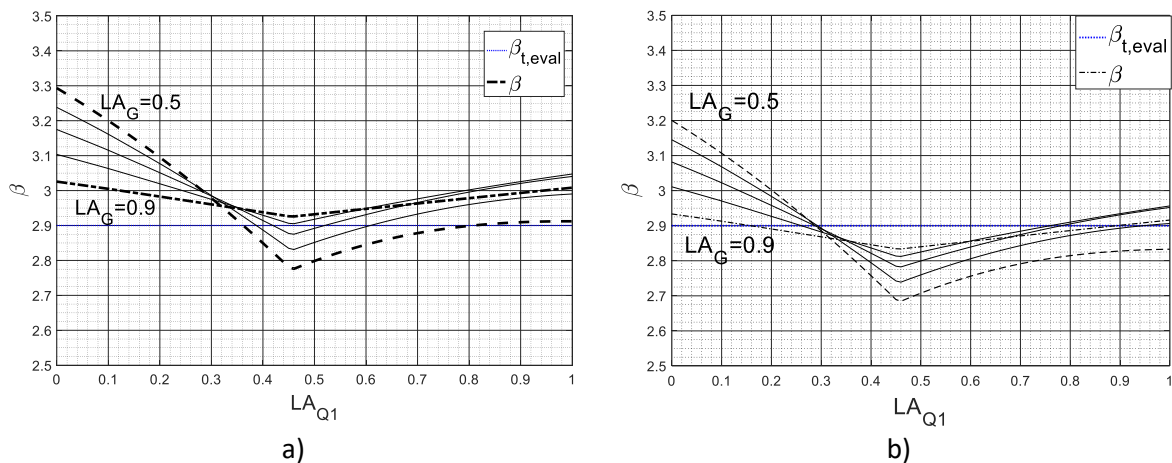
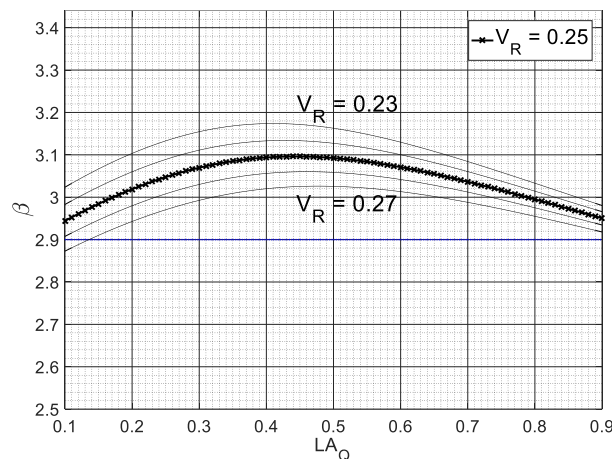


Abb. 7.33: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Schnee- und Windlast (Berechnung mit FORM), a)  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ , b)  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

### Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Windlast

Aufgrund der geringeren Lastvariabilität der Windlast im Vergleich zur Nutz- oder Schneelast ergab sich für Beanspruchung aus ständiger Last und Windlast im Bewertungslevel von  $\beta_{t,eval} = 2,9$   $\gamma_{M,opt} = 1,20$  ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ). Die Ergebnisse für die beispielhafte Überprüfung ausgewählter Bemessungsfälle mit Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Windlast werden in Anhang 10.12.2, Tab. 10.72 dargestellt (*Monte Carlo Simulation*). Abb. 7.34 zeigt die Überprüfung mit *FORM*.



**Abb. 7.34: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, ständige Last und Windlast (Berechnung mit *FORM*)**

Die Ergebnisse zeigen eine relativ deutliche Unempfindlichkeit der Zuverlässigkeit vom Anteil der Windlast an der Gesamtlast im betrachteten Bereich. Diese ist auf die Dominanz des Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit (hier  $V_{R,m} = 0,25$  angenommen) zurückzuführen. Dementsprechend bestätigt sich der Vorschlag, dass beim alleinigen Wirken einer Windlast von der Festlegung des Mindestlastanteils der ständigen Einwirkung abgesehen werden kann. Die Ergebnisse liegen gemäß dem Ziel der Kalibrierung um den Zielwert, größtenteils leicht darüber. Auch die Annahme der geringeren Variabilität des Zuverlässigkeitsniveaus bei dieser Beanspruchung bestätigte sich.

### Doppelbiegung

#### Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast

Anhang 10.12.2, Tab. 10.73 stellt die Ergebnisse einer beispielhaften Überprüfung mit *Monte Carlo Simulation* zusammen. Abb. 7.35 zeigt den Verlauf der Zuverlässigkeitskurven berechnet mit *FORM*. Dabei ist  $LA_{Q1}$  der Anteil der Windlast in z-Richtung und  $LA_{Q2}$  der Anteil der Windlast in y-Richtung.

7. Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand

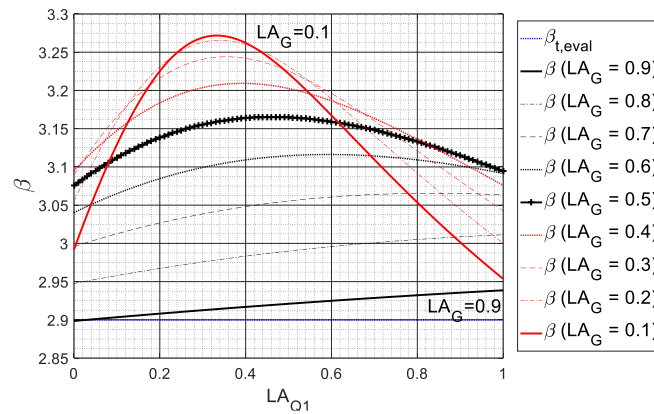
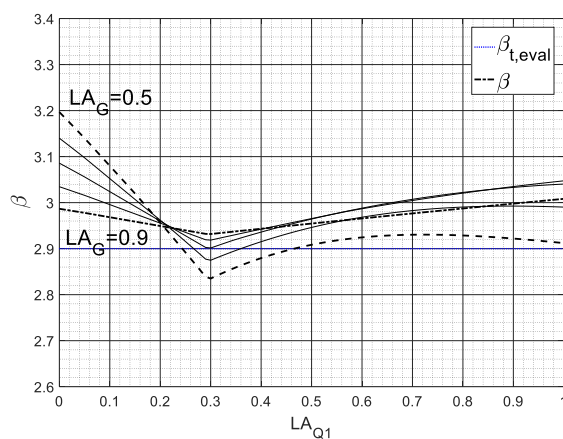


Abb. 7.35: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei 100%-iger Querschnittsauslastung, Doppelbiegung, ständige Last und Windlast (Berechnung mit FORM)

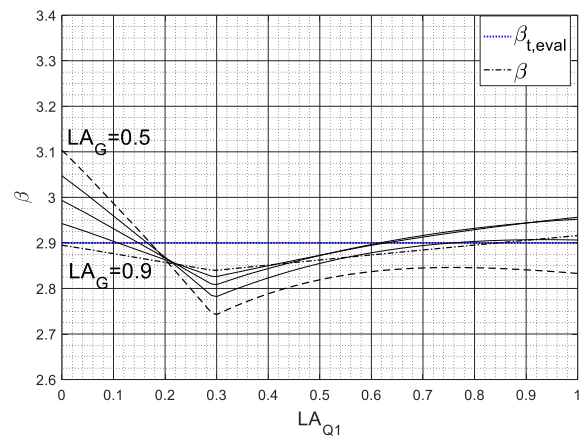
*Doppelbiegung aus ständiger Last und Schneelast in z-Richtung und Windlast in y-Richtung*

Zur Veranschaulichung des Grenzbereiches erfasst Anhang Tab. 10.74 (Monte Carlo Simulation) nur Schnee als führende veränderliche Last, sowie Lastanteile der ständigen Last  $LA_G = 0,50...0,60$ .

Die Berechnung mit FORM wird in Abb. 7.36 a) dargestellt. Lastanteile mit dominanter Windlast führen zu einer höheren Zuverlässigkeit. Der Zielzuverlässigkeitsindex der Kalibrierung wird in der Mehrzahl der Lastverhältnisse eingehalten bzw. überschritten und nur in wenigen Fällen leicht unterschritten. Die Anpassung von  $\gamma_{M,opt} = 1,23$  auf  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  führt zu einer leichten Unterschreitung des Zielwertes zwischen  $0,2 < LA_{Q1} < 0,7$  ( $\beta > 2,7$ ).



a)



b)

Abb. 7.36: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, Doppelbiegung, ständige Last, Schnee- und Windlast (Berechnung mit FORM), a)  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ , b)  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

**Druck & Biegung**

*Druck aus ständiger Last, Schneelast bzw. Nutzlast, Biegung aus Windlast*

Für die Analysen werden die geometrischen Parameter so gewählt, dass keine Stabilitätsgefahr entsteht ( $k_c = 1,0$ ). Es werden Lastkombinationen gewählt, bei denen die überwiegende Beanspruchung aus Druck besteht und der Lastanteil der veränderlichen Einwirkungen wie in den Anwendungsregeln

festgelegt 50% nicht überschreitet. Für diesen Lastfall werden zur Modellierung der Nutzlast die Parameter nicht aus Kap. 4.3.3 entnommen, sondern unter Verwendung des ausgewiesenen Variationskoeffizienten (Tab. 4.23) berechnet. Die Kombinationen mit Schneelast bzw. Nutzlast in großen Räumen resultieren in einer Zuverlässigkeit rund um den festgelegten Zielwert. Werden die Nutzlastparameter für kleine Räume angesetzt, ist die Zuverlässigkeit wie erwartet geringer. Der Mindestwert  $\beta_{0,exis} = 2,5$  wird jedoch nicht unterschritten. Kleinere Unterschreitungen des Mindestanteils der Lastwirkung aus ständiger Last sind bei einem geringeren Anteil der Lastwirkung aus der veränderlichen Last 1 (Schneelast bzw. Nutzlast) nicht problematisch. Abb. 7.37 zeigt die mit *FORM* berechneten Werte für den festgelegten Bereich, Anhang 10.12.1, Tab. 10.75 die Ergebnisse der *Monte Carlo Simulation*. Abb. 7.38 zeigt vergleichend das Ergebnis bei Anwendung von  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ . Der vorgeschlagene Zielwert von  $\beta_{t,eval} = 2,9$  wird auch hier durchgehend überschritten.

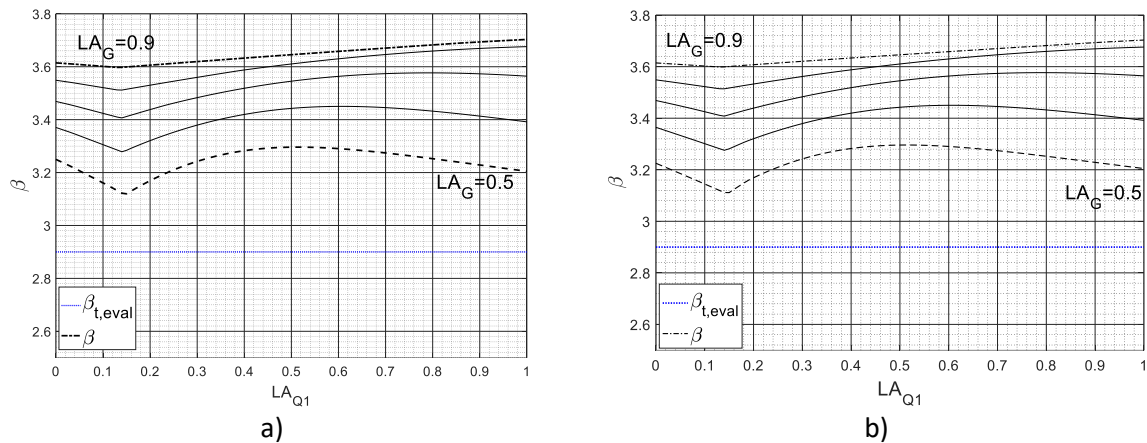


Abb. 7.37: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, Druck & Biegung, a) Schnee- und Windlast, b) Nutz- und Windlast (Berechnung mit *FORM*)

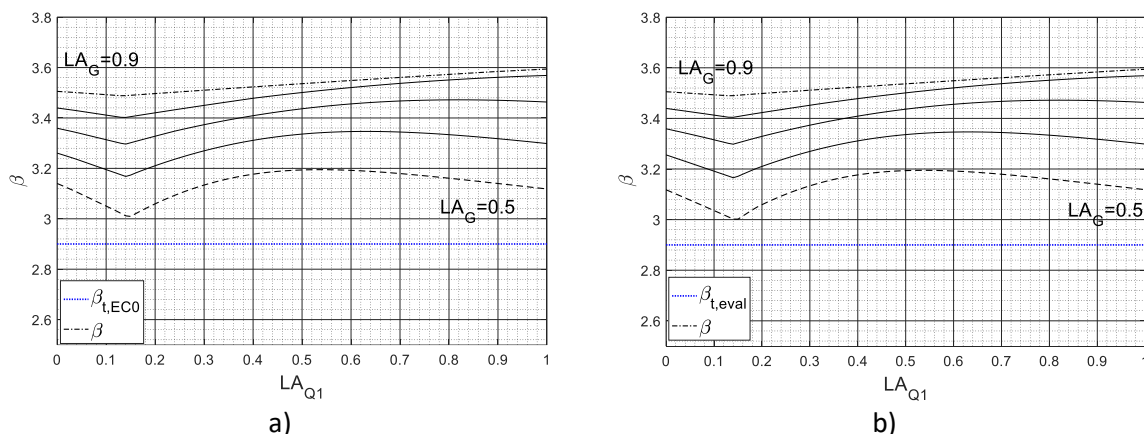


Abb. 7.38: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, Druck & Biegung, a) Schnee- und Windlast, b) Nutz- und Windlast (Berechnung mit *FORM*)

### 7.7.4 Zugbeanspruchung

#### Zugbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast

Anhang 10.12.3, Tab. 10.76 zeigt die Ergebnisse einer beispielhaften Überprüfung des auf Basis der Kalibrierungsergebnisse ausgewählten Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{M,opt}$  mittels *Monte Carlo Simulation*.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Kalibrierungsziel über alle Lastverhältnisse eingehalten wird. Auch Abb. 7.39 zeigt Konsistenz zwischen der Überprüfung mittels Monte Carlo Simulation und Berechnung mittels *FORM*. Die Auswahl der Empfehlung für den angepassten Teilsicherheitsbeiwert aus den Kalibrierungsergebnissen erfolgte für  $V_R = 0,30$ . Die Darstellung der Überprüfung mit *FORM* erfolgt für Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R = 0,28...0,32$  zur Veranschaulichung des Einflusses.

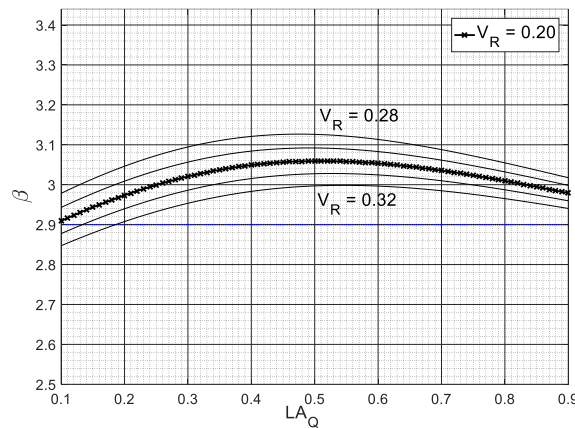


Abb. 7.39: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,25$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Zug, Windlast (Berechnung mit *FORM*)

### 7.7.5 Schlussbemerkung zur Verifizierung

Durch die Anpassung der Sicherheitsbeiwerte zeigt sich eine Änderung des Anstiegs der Zuverlässigkeitskurven, welche dadurch im Allgemeinen etwas flacher verlaufen. Die Überprüfung zeigt in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Einhaltung bzw. Überschreitung des für die Kalibrierung zugrunde gelegten Zielwertes. Dies ist auf die Verwendung der penalty function und der Aufteilung in Optimierungskategorien für die Kalibrierung zurückzuführen. Die Verminderung von  $\gamma_{M,opt} = 1,23$  auf  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  für die ausgewiesenen Lastfälle führt zu einer leichten Unterschreitung des Zielwertes auf  $\beta \approx 2,8$ . Allgemein zeigt sich, dass die *Monte Carlo Simulation* zu leicht geringeren Zuverlässigkeitsindices als die *FORM*-Berechnung führt. Diese Abweichung fällt jedoch gering aus. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung beider Verfahren.

Abschließend soll betont werden, dass ein Tragwerk nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] verschiedene festgelegte Anforderungen zu erfüllen hat. Die Tragfähigkeit ist nur einer davon, zudem sind Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu erfüllen. Nach *Scheer, Pasternak & Hofmeister* [248] führt die Weiterentwicklung der Normung zu schlankeren Querschnitten, sodass Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit immer häufiger bemessungsmaßgebend werden. Durch die Ausnutzung vorhandener Tragreserven durch Anpassung des Zielzuverlässigkeitsindex für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit in dieser Arbeit können insbesondere Grenzwerte für Verformungen und Schwingungen bemessungsmaßgebend werden. Diese werden im Einzelfall festgelegt und hier nicht gesondert betrachtet.

## 8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen

### 8.1 Einordnung in aktuelle normative Entwicklungen

Die aktuelle Arbeit des CEN/TC 250 zeigt die Entwicklung einer neuen Norm bzw. neuen Normenreihe für die Überprüfung und Bewertung von Konstruktionen im Bestand. Mit der DIN CEN/TS 17440:2020-10 [45] wurde eine Technische Spezifikation geschaffen, die ergänzend oder zusätzlich zu DIN EN 1990 für den Bestandsbau verwendet werden kann. In der aktuellen Fassung der DIN CEN/TS 17440 [45] bleiben einige Dinge noch ungeregelt, so sind Zielzuverlässigkeitsindices für Konstruktionen im Bestand nicht enthalten. Zudem sind tiefergehende, materialspezifische Regelungen für die Tragfähigkeitsüberprüfung nötig.

Die DIN EN 17121:2016-06 [43] schafft ein erstes europäisches Rahmenwerk zur Bestandsaufnahme und Bewertung von Holzkonstruktionen im Bestand. Diese stellt einen weiteren wichtigen Meilenstein in der Entwicklung eines harmonisierten europäischen Normungskonzeptes auch für den Bestandsbau dar. Die rechnerische Bewertung der Tragfähigkeit ist jedoch nicht Bestandteil dieser Norm.

Zur Integration des in dieser Arbeit entwickelten Vorschlag zur modifizierten semi-probabilistischen Bewertung für den Holzbau im Bestand, wäre die Einordnung einer materialspezifischen Bestandsbaunorm in das bestehende Normenkonzept mit den skizzierten Bezügen nach Abb. 8.1 möglich. So könnte in einem Teil 3 der DIN EN 1995-1 das nach nachfolgend vorgestellte Stufenkonzept zur rechnerischen Tragfähigkeitsüberprüfung integriert werde. Als Anwendungsvoraussetzung ist die Konstruktion im Sinne der DIN EN 17121:2019-12 [43] in situ zu bewerten (siehe Kap. 2.4.5).

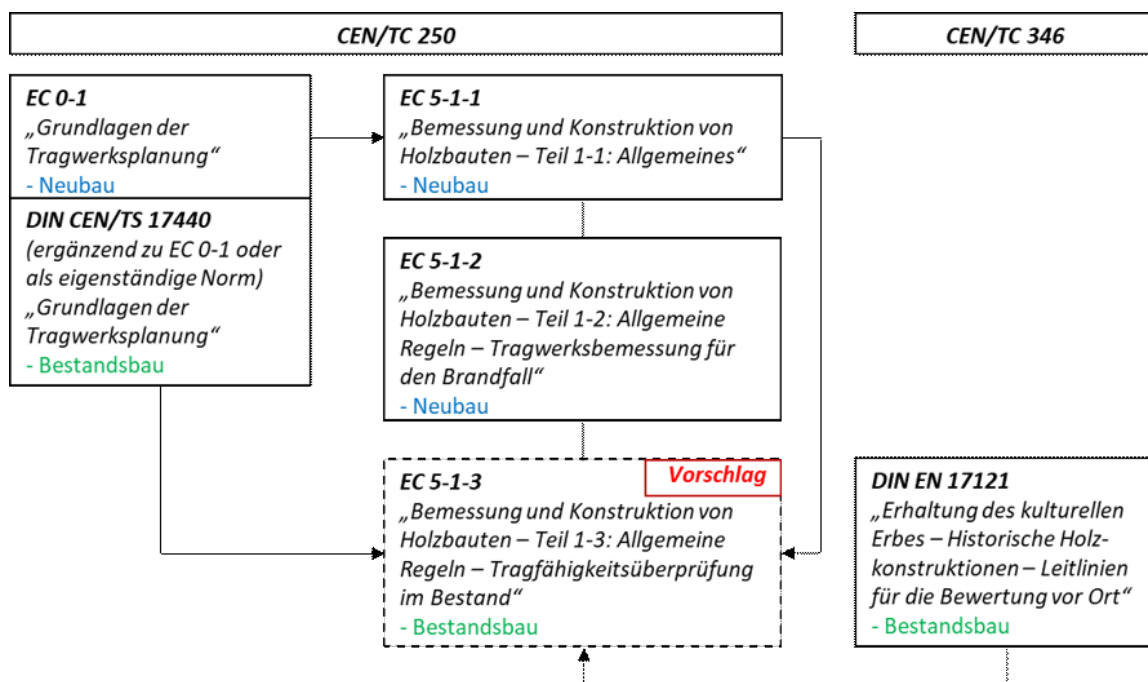


Abb. 8.1: Vorschlag für die Einordnung einer modifizierten Tragfähigkeitsüberprüfung für den Holzbau im Bestand in die aktuelle Normung

## 8.2 Stufenkonzept zur Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen im Bestand

Die Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen umfasst eine Reihe verschiedene Aspekte. Dazu gehören

- das Wissen über die Konstruktion/ Bauweise, planmäßiger und ggf. veränderter Lastabtrag (ausgelöst durch Verformungen, Beschädigungen, Ausfall von Tragwerkselementen),
- der Informationsstand bzgl. Last- und Materialparametern, Aktualisierungsmöglichkeit,
- die Sicherheitskosten,
- das gesellschaftliches Interesse an der Konstruktion/ kulturhistorischer Wert.

Um dieser Komplexität besser Rechnung tragen zu können und eine gewisse Flexibilität auch im semi-probabilistischen Bemessungskonzept zu ermöglichen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Stufenkonzept zur Tragfähigkeitsbewertung von Holzbauteilen in Bestandskonstruktionen entwickelt, siehe Abb. 8.2. Es besteht aus drei grundlegenden Stufen, welche in Anlehnung an den *JRC Science and Policy Report* [27] mit der Terminologie *Knowledge Level (KL)* benannt werden. Das Konzept wurde in *Loebjinski, Köhler, Rug & Pasternak* [243] vorgestellt und in *Loebjinski, Rug & Pasternak* [217] weiterentwickelt. Auf die einzelnen Bewertungsschritte wird nachfolgend detaillierter eingegangen.

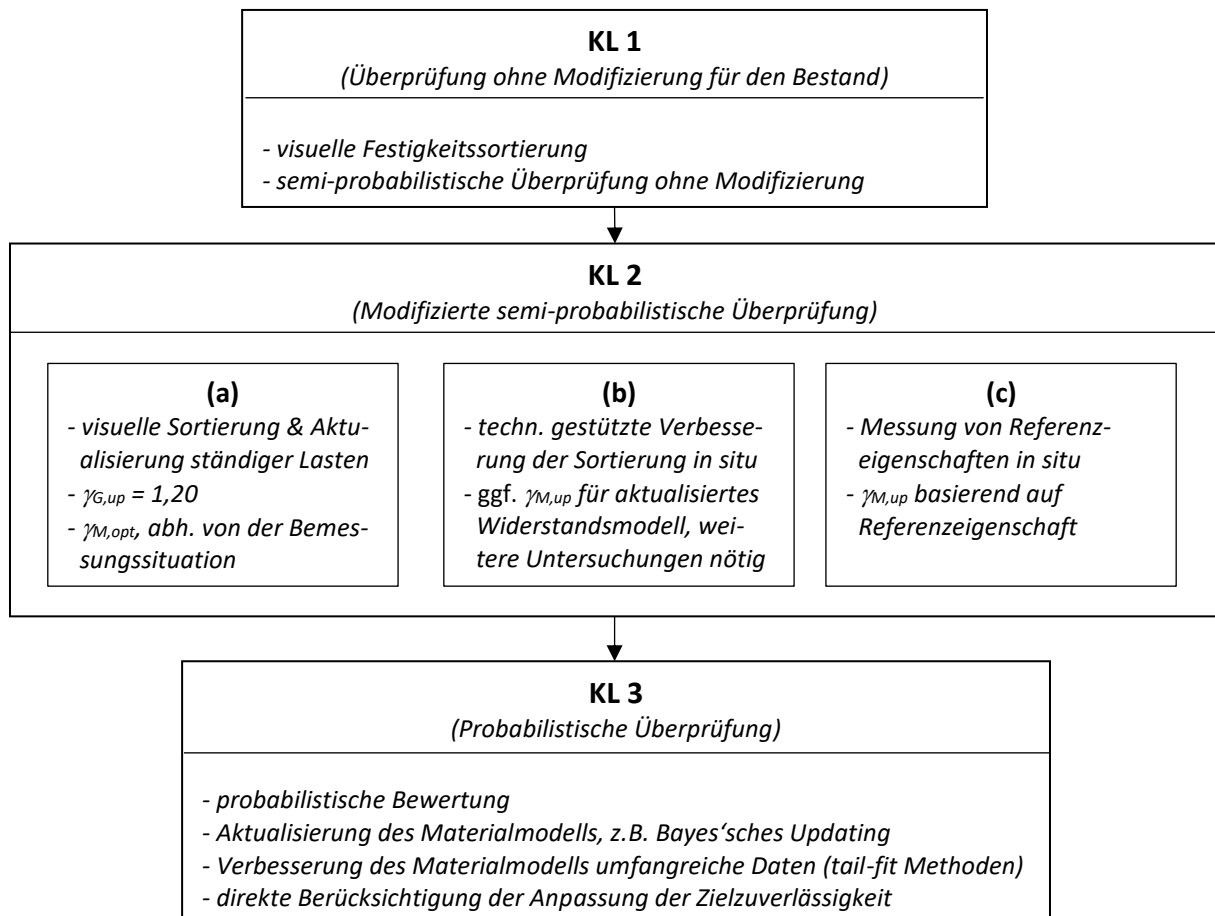


Abb. 8.2: Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen beim Bauen im Bestand

## 8.3 Die Bewertungsschritte im Detail

### 8.3.1 Knowledge Level 1 – Überprüfung ohne Modifizierung für den Bestand

Die Konformität der Konzepte zur Bemessung und Bewertung von Tragwerken zur Gewährleistung struktureller Konsistenz verschiedener Anwendungsbereiche der Normung bzw. spezifischer Normungsteile ist von besonderem Interesse zur Schaffung bzw. Bewahrung eines einheitlichen Normensystems. Aus diesem Grund ist es von besonderer Wichtigkeit, dass sich der entwickelte Vorschlag zur Tragfähigkeitsbewertung bestehender Konstruktionen in das System der geltenden Normung eingliedert, diese ergänzt bzw. erweitert. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, setzt das vorgestellte Stufenverfahren im *Knowledge Level 1* an den geltenden Festlegungen nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] und *DIN EN 1995-1-1:2010-12* [90] mit den entsprechenden Nationalen Anhängen an. Eine visuelle Festigkeitssortierung wird vorausgesetzt, die Zuordnung zu den Festigkeitsklassen der *DIN EN 338* erfolgt nach *DIN EN 1912*. Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit ist die zudem Untersuchung auf Schädigungen bedeutend. Für umfassendere Ausführungen wird auf die Literatur verwiesen, siehe beispielsweise *Lißner & Rug* [12]. Ständige Lasten werden anhand üblicher Annahmen und geometrischem Aufmaß bzw. bestehender Unterlagen nach Abgleich derer Konformität mit der Konstruktion bestimmt, veränderliche Lasten entsprechend der Vorgaben der Unternormen der *DIN EN 1991-1* angesetzt.

### 8.3.2 Knowledge Level 2 – Modifizierte semi-probabilistische Überprüfung

Das *Knowledge Level 2 (KL 2)* stellt eine Erweiterung der Tragfähigkeitsbewertung basierend auf aktualisierten Informationen dar. Je nach Umfang der Aktualisierung kann die Bewertung in den Unterstufen *KL 2a)*, *KL 2b)* und *KL 2c)* erfolgen. Die Tragfähigkeitsbewertung erfolgt auf semi-probabilistischem Niveau mit modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten. Zur Anwendung der angepassten Beiwerte gelten Anwendungsvoraussetzungen, die angelehnt an das *DBV Merkblatt* [18] (siehe Kap. 2.2.5) und *SIA 269* [21] (siehe Kap. 2.3.1) und entsprechend der in der Kalibrierung getroffenen Annahmen, sowie des Anwendungsbereichs dieser Arbeit angepasst formuliert werden.

Tab. 8.1: Anwendungsvoraussetzungen für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte im Bestandsbau mit Holz im *Knowledge Level (KL) 2*

Anwendungsvoraussetzungen für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte im Bestandsbau mit Holz
Das Bauwerk wurde bei Bemessung mindestens für die übliche Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgelegt
Das Tragwerk wird seit Inbetriebnahme seit mindestens 5 Jahren bestimmungsgemäß genutzt
Das Tragwerk ist in schadensfreiem Zustand
Anzusetzen sind Eigenlasten, vorwiegend ruhende Nutzlasten, Einzellasten, ggf. Wind- und Schneelasten
Der Anteil der ständigen Last liegt bei mindestens $LA_G = 0,5$ . <b>Ausgenommen</b> davon sind Beanspruchungen, die neben ständigen Lasten aus dem alleinigen Wirken von Windlasten erzeugt werden. (siehe auch Tab. 7.20, Tab. 7.27, Tab. 7.30)
Geometrische Parameter und ständige Lasten werden durch Überprüfung in situ aktualisiert
Die Mindeststichprobenzahl zur Aktualisierung von Materialeigenschaften beträgt $n_{min} = 5$
Bei Aktualisierung von $V_R$ erfolgt bei $n < 30$ die Anpassung des modifizierten Teilsicherheitsbeiwertes mit einem Übertragungsfaktor (siehe Kap. 7.4.2)



### 2a) Optimierte Teilsicherheitsbeiwerte abhängig von der Beanspruchung

Wie in Kap. 7.5.1 beschrieben, handelt es sich bei der Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten um ein Optimierungsproblem. Eine größere Anzahl unterschiedlicher Sicherheitsbeiwerte für verschiedene Grenzzustände bedeuten eine höhere Komplexität der Normung, ermöglicht jedoch auch eine bessere Materialausnutzung. Unter Abwägung von Kosten und Nutzen kann eine Bewertung der Tragfähigkeit mit optimierten Teilsicherheitsbeiwerten im Bestandsbau vorteilhaft ein.

Die in dieser Arbeit kalibrierten Teilsicherheitsbeiwerte (Tab. 7.40) werden dem *Knowledge Level 2a*) zugeordnet. Zur Entwicklung des Vorschlags aus den Ergebnissen siehe Kap. 7.6. Im Hinblick auf eine Vereinfachung des Sets modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  siehe auch Tab. 7.41 (S. 220) und die Diskussion zur Abweichung vom Zielniveau für die Kalibrierung in Kap. 7.7 (S. 220 ff.).

Tab. 8.2: Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  für die Bewertung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Holz in Bestandstragwerken (Querschnittsnachweise) – *Knowledge Level (KL) 2a*)

Klasse der Lasteinwirkungsdauer und Nutzungsklasse	KLED ständig, NKL 1 & 2	KLED mittel/ kurz, NKL 1 & 2	KLED kurz/ sehr kurz, NKL 1 & 2
<b>Lasten</b>	Nur ständige Lasten	Nutzlast <sup>1,2</sup> , Schneelast <sup>2</sup> oder Lastkombination Schnee- & Windlast <sup>2</sup>	Windlast <sup>3</sup>
<b>Einachsig Druck in FR</b> (ohne Stabilitätsgefahr)	1,16	1,20	1,16
<b>Biegung, Doppelbiegung oder Druck &amp; Biegung</b> (ohne Stabilitätsgefahr)	1,23	1,23	1,20
<b>Einachsig Zug in FR</b>	1,30	1,30	1,25

**Bewertungslevel ( $\beta_{t,eval} = 2,9$ )  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$**

Zielwert der Zuverlässigkeit zur Kalibrierung, Abweichungen in bestimmten Bemessungssituationen sind möglich.

<sup>1</sup> Anwendung nur für die Nutzungskategorien A und B unter Anwendung von Fußnote 2

<sup>2</sup> Der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast beträgt  $LA_G \geq 0,5$

<sup>3</sup> Der Anteil der ständigen Last an der Gesamtlast ist beliebig

Die Kalibrierung erfolgte unter Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_G$  auf  $\gamma_{G,up} = 1,2$  nach SIA 269:2011 [21]. Zur Anwendung dieser Anpassung ist die Aktualisierung der Lastwerte der ständigen Einwirkungen basierend auf den „ermittelten geometrischen Größen und Raumlasten als Mittelwert“ [24, S. 7] vorzunehmen. Der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten wird  $\gamma_Q = 1,50$  belassen.

### 2b) Apparativ gestützte Sortierung/ ggf. Update Widerstandsmodell

Die apparativ unterstützte Sortierung mittels zerstörungsfreier bis zerstörungssarmer Untersuchungsmethoden hat das Potential, die Festigkeitssortierung in situ wesentlich zu verbessern. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit diesem Potential, siehe beispielsweise *Kasal & Tannert* [249], *Blaß & Frese* [250], *Sandomeer & Steiger* [150], *Piazza & Riggio* [154] und *Linke, Rug & Pasternak* [140].

Die apparativ gestützte Sortierung führt im Vergleich zur visuellen Sortierung zu einer höheren Ausbeute höherfesten Materials, siehe dazu beispielsweise *Linke, Rug & Pasternak* [152]. Die somit nutzbar gewordenen Tragfähigkeitsreserven können und sollten bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Holzkonstruktionen einbezogen werden.

Zudem beeinflusst die Sortierung das Materialmodell innerhalb der Festigkeitsklassen des sortierten Bauholzes, siehe beispielsweise auch *Faber, Köhler & Sørensen* [134]. Durch eine verbesserte Festigkeitssortierung kann somit die Variabilität der Materialeigenschaften innerhalb der Klasse eingeschränkt werden. Der Variationskoeffizient stellt als statistischer Parameter einen zentralen Einflussfaktor bei der Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten dar, da die Eingangsgrößen unter Annahme einer einhundertprozentigen Querschnittsauslastung normiert werden. Unter der Annahme gleichbleibender Streuung der Materialeigenschaften in den Festigkeitsklassen sinkt zudem der Variationskoeffizient der Materialeigenschaft Festigkeit in höheren Festigkeitsklassen per Definition, da der Variationskoeffizient als Koeffizient aus Streuung und Erwartungswert berechnet wird.

Neben der Nutzbarmachung höherer Festigkeitsklassen in der semi-probabilistischen Bewertung kann bei Nachweis eines positiv aktualisierten Widerstandsmodells durch apparativ unterstützte Sortierung ein angepasster Teilsicherheitsbeiwert zur Anwendung kommen. Erste Untersuchungen zum Widerstandsmodell bei Sortierung mittels Ultraschall-Impulslaufzeitmessung wurden in *Loebjinski, Rug & Pasternak* [217] basierend auf den Untersuchungen aus *Linke, Rug & Pasternak* [152] vorgestellt. Es zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit des Sortierergebnisses von der Holzart. Kann durch die apparativ unterstützte Sortierung eine statistisch abgesicherte Reduktion des Variationskoeffizientens, ggf. abhängig von der Festigkeitsklasse, nachgewiesen werden, können die ausgewiesenen Teilsicherheitsbeiwerte für die Materialfestigkeit entsprechend den aufgeführten Tabellen zur Anwendung kommen. Zur Nutzung dieses Potentials sind jedoch weitere Studien nötig. Aktuell kann das *Knowledge Level 2b*) aus diesem Grund nur die Nutzung des Potentials aus der Einstufung in eine höhere Festigkeitsklasse aus Anwendung der apparativ unterstützten Sortierung enthalten.

### 2c) Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_M$ auf Basis in situ überprüfter

#### Referenzeigenschaften

Durch die Überprüfung von Referenzeigenschaften mittels technischer Hilfsmittel kann auf die Zielgröße, die Materialfestigkeit, geschlossen werden. Dazu gehören beispielsweise die Bestimmung des Elastizitätsmoduls auf Basis von Ultraschallmessungen, Probelastung oder anderer Verfahren, die Bestimmung der Rohdichte mittels Entnahme und Prüfung kleiner Bohrkerne. Mit diesen Informationen kann in *Knowledge Level 2c*) die Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  auf Basis der gemessenen Referenzeigenschaft erfolgen. Dazu wurde eine Formel hergeleitete (siehe Kap. 7.4.1).

$$\gamma_{M,up} = \gamma_{Rd} \cdot \exp \left( \frac{V_{y\_code} \cdot \sqrt{1 - \rho_{x,y}^2}}{\left(1 + \rho_{x,y} \cdot V_{y\_code} \cdot \frac{x_{meas} - \mu_{x\_code}}{\mu_{x\_code} \cdot V_{x\_code}}\right)} \cdot (\alpha_R \cdot \beta + \Phi^{-1}(q)) \right) \quad (8.1)$$

## **8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen**

Der Sensitivitätsfaktor wird nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] mit  $\alpha_R = 0,8$  angenommen. Die Aktualisierung dessen abhängig vom speziellen Bemessungsproblem ist möglich. Sensitivitätsstudien für verschiedene Beanspruchungssituationen sind in Anhang Kap. 10.9 (ab Anhang S.50) enthalten.

Dieser aktualisierte Teilsicherheitsbeiwert wird auf den charakteristischen Wert der *DIN EN 338* angewendet. Es zeigt sich aus den verschiedenen Betrachtungsansätzen, dass für eine verlässliche Bestimmung charakteristischer Werte eine sehr hohe Stichprobenzahl nötig ist, siehe dazu auch Kap. 5.3.6. Diese sind zumeist im Bestandsbau häufig schwer realisierbar. Unter Anwendung eines Übertragungsfaktors kann eine begrenzte Stichprobenzahl berücksichtigt werden, siehe dazu Kap. 7.4.2. Des Weiteren muss bei der Ermittlung der Referenzeigenschaft der Messfehler berücksichtigt werden. Der mit Gl. (8.1) berechnete Teilsicherheitsbeiwert ist nur auf die entsprechend aktualisierte Materialeigenschaft anzuwenden.

### **8.3.3 Knowledge Level 3 – Probabilistische Überprüfung**

Eine Bewertung der Tragfähigkeit mit genauerer Modellierung der Eingangsgrößen sowie dezidierterer Bewertung des Ergebnisses ermöglicht Bewertung mittels probabilistischer Näherungsverfahren (*FORM, SORM*) oder probabilistisch exakter Verfahren (*Monte Carlo Simulation*), siehe Kap. 3.4. Die Anwendung dieser Verfahren in der Bemessung ist in *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] bereits gestattet. Insbesondere im Bestandsbau können diese Verfahren aus verschiedenen Gründen vorteilhaft sein. Sie ermöglichen die zielgerichtete Bewertung des Einflusses einzelner Basisvariablen auf die Zuverlässigkeit, die Berücksichtigung von Zusatzinformationen durch Aktualisierung von Einwirkungs- und Widerstandsgrößen (z.B. durch *Bayes'sches Updating*, siehe Anhang Kap. 10.5.4). Weiter kann beim Vorliegen umfangreicher Versuchsdaten das Modell entsprechend einer guten Anpassung im unteren Wertebereich (tail-fit Methode) verbessert werden, siehe Kap. 5.3.4). Zudem ermöglicht eine probabilistische Bewertung die direkte Anpassungen der Zielzuverlässigkeit beispielsweise auf Basis einer begrenzten Restnutzungsdauer (siehe Kap. 7.2.5) oder ökonomischer Kriterien (siehe Kap. 7.2.4).

### **8.3.4 Zusammenfassung**

Entsprechend der genannten Anforderungen werden die Ergebnisse zur Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten bei der Überprüfung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen aus Holz in Tab. 8.3 zusammenfassend dargestellt.

Die Berücksichtigung einer begrenzten Restnutzungsdauer kann durch Anpassung der Zielzuverlässigkeit erfolgen. Für angepasste Zielwerte  $\beta_t$  können kalibrierte Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt}$  den Tabellen in Kap. 7.5 entnommen werden.

Tab. 8.3: Zusammenfassung der Stufen der Tragfähigkeitsüberprüfung

Nachweisformat	Detaillierungsgrad der Bestandsaufnahme in situ			
Semi-probabilistisch ohne Aktualisierung - KL 1	Visuelle Festigkeitssortierung in situ			
	<i>Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1990, DIN EN 1995-1-1, DIN EN 1995-1-1/NA</i>			
Semi-probabilistisch mit Aktualisierung - KL 2  <i>Die Voraussetzungen zur Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte sind zu beachten!</i>	<b>Visuelle Festigkeitssortierung in situ</b> Optimierung von $\gamma_M$ abh. von Beanspruchung & Lasten  $\gamma_{M,opt}$	<b>Apparativ unterstützte Festigkeitssortierung in situ</b> Aktualisierung von $\gamma_M$ aus aktualisierten Widerstandsparametern  $\gamma_{M,up}$		
	<b>KL 2a)</b> <i>Aktualisierung ständiger Lasten: <math>\gamma_{G,up} = 1,20</math> (ungünstig wirkend)  Veränderliche Lasten: <math>\gamma_Q = 1,50</math>;</i>	<b>KL 2b)</b> <i>Aktualisierung ständi- ger Lasten: <math>\gamma_{G,up} = 1,20</math> (ungünstig wirkend)  Veränderliche Lasten: <math>\gamma_Q = 1,50</math>;</i>	<b>KL 2c)</b> <i>Aktualisierung ständi- ger Lasten: <math>\gamma_{G,up} = 1,20</math> (ungünstig wirkend)  Veränderliche Lasten: <math>\gamma_Q = 1,50</math>;</i>	
	<b>Festigkeitsklasse nach visueller Sortierung</b>	<b>Festigkeitsklasse mit apparativer Unterstützung</b>	<b>Festigkeitsklasse mit apparativer Unterstützung</b>	
	$\gamma_{M,opt}$ abhängig von der Beanspruchung nach Tab. 8.2	$\gamma_{M,up} = \gamma_{M,opt}$ abhängig von der Beanspruchung nach Tab. 8.2 <u>Perspektivisch:</u> $\gamma_{M,up}$ abh. von der Sor- tiermethode	$\gamma_{M,up}$ aus in situ bestimmter Referenzeigenschaft nach Gl. (8.1)	
	<b>Probabilistisch - KL 3</b>	<b>Visuelle Festigkeitssortierung in situ</b>	<b>Apparativ unterstützte Festigkeitssortierung in situ/ Bestimmung von Materialparametern</b>	
	<i>Probabilistische Bewertung mit Näherungsverfahren oder probabilistisch exakten Verfahren</i>	<i>Probabilistische Bewertung mit Näherungsverfahren oder probabilistisch exakten Verfahren  Aktualisierung/ Verbesserung des Widerstandsmodells basieren auf Testdaten</i>		

## 8.4 Illustrative Darstellungen zur Tragfähigkeitsüberprüfung mit dem vorgeschlagenen Stufenkonzept

### 8.4.1 Beispiel 8.1: Umnutzung einer Holzbalkendecke

#### Grundlegendes

Betrachtet wird eine Holzbalkendecke im Bestand, ausgeführt als Berliner Decke. Berliner Decken wurden nach *Lißner & Rug* [12] schwerpunktmäßig zwischen 1919 und 1945 ausgeführt. Für dieses Beispiel wird davon ausgegangen, dass das Gebäude in den 1930er Jahren errichtet und die Decke von da an bis zum Überprüfungszeitpunkt bestimmungsgemäß genutzt wurde. Eine Umnutzung von Wohn- in Büronutzung ist geplant. Dies erfordert die Überprüfung der Tragfähigkeit bei erhöhter Auflast. Abb. 8.3 stellt die Deckenkonstruktion und das idealisierte statische System dar.

## 8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen

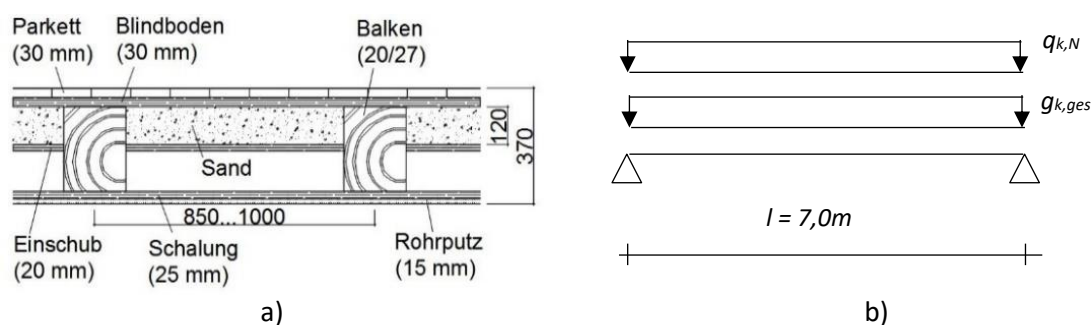


Abb. 8.3: Beispiel 8.1 – System  
Berliner Decke im Querschnitt aus Lißner & Rug [12] (a) und idealisiertes statisches System (b)

### Bewertung im Knowledge Level KL 1

Zunächst erfolgt die Tragfähigkeitsbewertung in *Knowledge Level 1*. Nach Bestandsaufnahme in situ werden keine tragfähigkeitsbeeinflussende Schädigungen am Tragwerk festgestellt. Nach visueller Prüfung erfolgt die Einstufung in die Festigkeitsklasse C 24. Tab. 8.4 fasst geometrische Randbedingungen, Lasten und Materialparameter zusammen.

Tab. 8.4: Beispiel 8.1 - Geometrie, benötigte Materialkennwerte & zu berücksichtigende Einwirkungen

Geometrie		Festigkeitsparameter		Einwirkungen	
Achsabstand der Balken	$d = 90 \text{ cm}$	Druckfestigkeit	$f_{c,k} = 21 \text{ N/mm}^2$	Deckeneigengewicht	$g_{k,EG} = 2,7 \text{ kN/m}^2$
Balkenstützweite	$l = 7,0 \text{ m}$	Biegefestigkeit	$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Fußbodenaufbau	$g_{k,F} = 1 \text{ kN/m}^2$
Balkenquerschnitt	$h/b = 20/27 \text{ cm}$			Nutzlast	$q_{k,N} = 2 \text{ kN/m}^2$

Illustrativ wird nachfolgend nur die Bewertung der Biegefestigkeit der Deckenbalken durchgeführt. Tab. 8.5 fasst das Ergebnis in *KL 1* zusammen. Es ergibt sich eine Auslastung von  $\eta = 1,22 > 1$  und damit eine Überschreitung der zulässigen Beanspruchung. Die Tragfähigkeitsbewertung soll anhand einer detaillierten Prüfung im *Knowledge Level 2* weiter erfolgen.

Tab. 8.5: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im *KL 1*

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im <i>KL 1</i>
$\gamma_G = 1,35$	$g_k = 3,3 \text{ kN/m}$	$q_d = 7,2 \text{ kN/m}$	1,22 > 1
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 1,8 \text{ kN/m}$	$\sigma_d = 18,1 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_M = 1,30$	$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 14,8 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,8 \text{ (NKL 1)}$			

### Bewertung im Knowledge Level KL 2

#### Bewertung im Knowledge Level KL 2a)

Die semi-probabilistische Tragfähigkeitsbewertung mit aktualisierten Informationen ist Bestandteil des *Knowledge Levels 2*. Zur Anwendung der angepassten Teilsicherheitsbeiwerte in *Level 2a)* für Nutzlasten darf ein Mindestanteil ständiger Lasten von  $LA_G = 50\%$  nicht unterschritten werden. Dies bezieht sich auf die Erwartungswerte. Charakteristische Werte ständiger Lasten werden als Erwartungswerte angegeben, charakteristische Werte der Nutzlasten als 98%-Quantil im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 1 \text{ a}$  bzw.

als Modalwert im Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50 a$ . Zur Berechnung des Erwartungswertes aus dem Modalwert kann für mit  $V_N = 0,40 m_x/x_k = 1,22$  (Annahme für kleine Räume bis  $A = 20m^2$ , siehe Kap. 4.3) und für  $V_N = 0,25 m_x/x_k = 1,13$  (größere Räume, siehe Kap. 4.3) angenommen werden. Dann ist

$$\frac{m_x}{x_k} = 1,13 \quad (8.2)$$

$$m_{x,N} = 1,18 \text{ kN/m} \cdot 1,13 = 1,33 \text{ kN/m} \quad (8.3)$$

$$LV = \frac{m_q}{m_q + m_g} = \frac{1,33 \text{ kN/m}}{1,33 \text{ kN/m} + 1,8 \text{ kN/m}} = 0,42 < 0,5 \quad (8.4)$$

bzw.

$$\frac{m_x}{x_k} = 1,22 \quad (8.5)$$

$$m_{x,N} = 1,18 \text{ kN/m} \cdot 1,22 = 1,44 \text{ kN/m} \quad (8.6)$$

$$LV = \frac{m_q}{m_q + m_g} = \frac{1,44 \text{ kN/m}}{1,44 \text{ kN/m} + 1,8 \text{ kN/m}} = 0,44 < 0,5 \quad (8.7)$$

Das Kriterium ist hier in beiden Fällen eingehalten.

Bei eingehender Begutachtung in situ wird der konstruktive Aufbau aus Abb. 8.3 bestätigt und die ständigen Lasten aktualisiert. Dabei wird für dieses Beispiel angenommen, dass die in *KL 1* veranschlagten Lasten übernommen werden können. Wird festgestellt, dass konstruktive Abweichungen vorliegen oder auch andere Materialien verwendet wurde, sind die Lasten entsprechend zu aktualisieren.

Da die Anwendungsvoraussetzungen nach Tab. 8.1 eingehalten sind, kann der Nachweis im Bewertungslevel erfolgen (Tab. 8.6). Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  wird auf Basis von Tab. 8.2 angepasst.

**Tab. 8.6: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im *KL 2a*)**

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im <i>KL 2a</i> )
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$g_k = 3,3 \text{ kN/m}$	$q_d = 6,8 \text{ kN/m}$	$1,08 > 1$
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 1,8 \text{ kN/m}$	$\sigma_d = 16,8 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M,opt} = 1,23$	$f_{k,m} = 24 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 15,6 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,8 \text{ (NKL 1)}$			

Unter Einhaltung der ausgeschriebenen Anwendungsgrenzen führt die Bewertung mit angepassten Teilsicherheitsbeiwerten für den Bestand in *Level KL 2a*) zu einer deutlich geringeren Überschreitung des Nachweises der Tragfähigkeitsbewertung. Dieses ist zum einen auf die Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Lasten, auf Basis der Aktualisierung der ständigen Last und damit der Annahme einer geringeren Streuung der Zufallsvariablen zurückzuführen. Zum anderen resultiert das Ergebnis aus der Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes für den Materialwiderstand, welche für diesen Beanspruchungsfall (Biegebalken unter Nutzlast  $LA_G \geq 0,5$ ) durchgeführt wurde. Dem liegt eine angepasste Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau zugrunde.

## 8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen

Das Materialmodell wurde in diesem Level nicht grundlegend aktualisiert. Da dies in der Regel mit einem erhöhten ökonomischen Aufwand für die in situ Untersuchung verbunden ist, wurde diese Option in die Level *KL 2b*) bzw. *KL 2c*) aufgenommen und kann damit als Erweiterung erfolgen.

### Bewertung im Knowledge Level *KL 2b*)

Eine apparativ unterstützte Festigkeitssortierung in situ (*Level KL 2b*) führt zu einer verbesserten Kenntnis der Materialfestigkeit. Auf die Probleme bei der Anwendung der geltenden Sortiervorschriften auf den Bestandsbau und das Potential einer apparativ unterstützten Sortierung wurde in Kap. 5.1.2 eingegangen. Wird an dieser Stelle illustrativ davon ausgegangen, dass die Einstufung in die Festigkeitsklasse C 30 möglich wird, ändert sich die Bewertung wie in Tab. 8.7 gezeigt.

Tab. 8.7: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im *KL 2b*)

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im <i>KL 2b</i> )
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$g_k = 3,3 \text{ kN/m}$	$q_d = 6,8 \text{ kN/m}$	$0,86 < 1$
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 1,8 \text{ kN/m}$	$\sigma_d = 16,8 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M,up} = \gamma_{M,opt} = 1,23$	$f_{k,m} = 30 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 19,5 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,8 \text{ (NKL 1)}$			

Mit  $\eta = 0,86 < 1$  zeigt sich eine Verringerung der Auslastung. Deutlich wird das Potential, dass eine dezidierte Analyse zur genaueren Festigkeitssortierung mit sich bringt. An dieser Stelle erfolgte keine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwert auf Basis der Sortiermethode, da dazu wie in Kap. 5.3.5 beschrieben weitere Untersuchungen nötig sind.

### Bewertung im Knowledge Level *KL 2c*)

Im *Knowledge Level KL 2c*) wird der Teilsicherheitsbeiwert auf Basis der Materialuntersuchungen aktualisiert. In Abgrenzung zu *Knowledge Level 2b*) wird die untersuchte Referenzeigenschaft über die Aktualisierung der Festigkeitsklasse hinaus zur Modifikation des Teilsicherheitsbeiwertes nach Gl. (8.1) S. 233 verwendet. Die Aktualisierung kann auf Basis zerstörungsfreier oder zerstörungsarmer Tests durchgeführt werden. Beispielhaft wird eine Aktualisierung der Rohdichte sowie der Druckfestigkeit aus der Entnahme von Kernbohrungen angenommen. Der ausgewiesenen Wert der Druckfestigkeit ist der auf Bauteilgröße umgerechnete Wert. Die Eingangsdaten sowie die Aktualisierung zeigt Tab. 8.8. Die Aktualisierung erfolgte zum einen unter Verwendung des vereinfachten Sensitivitätsfaktors  $\alpha = 0,8$  nach *DIN EN 1990:2010-12* [16]. Der Wert kann entsprechend den Analysen in Kap. 6 aktualisiert werden. Für einen Lastanteil der ständigen Last von  $L_{AG} = 0,5$ ,  $V_R = 0,25$  und  $V_N = 0,25$  ergibt sich aus Ablesen aus Abb. 6.3 b) S. 144

$$\alpha = \sqrt{0,6} = 0,77 \quad (8.8)$$

Tab. 8.8: Beispiel 8.1 – Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  im KL 2c) für beispielhafte Messergebnisse

	Aktualisierung basierend auf der Referenzgröße				Anmerkungen
	Rohdichte		Druckfestigkeit		
	$\alpha = 0,8$	$\alpha = 0,77$	$\alpha = 0,8$	$A = 0,77$	
$\mu_{x,ref}$	460 [kg/m <sup>3</sup> ]		33,9 [N/mm <sup>2</sup> ]		Erwartungswert der Referenzgröße (mit $V = 0,20$ aus charakt. Wert der EN 338 [110] für C30 berechnet)
$V_{x,ref}$	0,10		0,20		Variationskoeffizient der Referenzgrößen aus JCSS PMC [61]
$V_{y,target}$	0,25		0,25		Variationskoeffizient der Zielgröße (Biegefestigkeit) aus JCSS PMC [61]
$\rho_{x,y}$	0,6		0,8		Korrelationskoeffizient aus JCSS PMC [61]
$x_{meas}$	465 [kg/m <sup>3</sup> ]		35 [N/mm <sup>2</sup> ]		Erwartungswert der Referenzgröße Annahme – aus Prüfung zu bestimmen
$\gamma_{M,up}$	<b>1,22</b>	<b>1,20</b>	<b>1,18</b>	<b>1,16</b>	Modifikation basierend auf $\beta_{eval,exis} = 2,9$

Die Verbesserung der Dichte im Vergleich zum normierten Wert führt aufgrund der geringeren Korrelation zur Zielgröße nicht zu einem maßgeblichen Anpassungspotential. Der Korrelationskoeffizient zwischen Biegefestigkeit und Rohdichte wurde nach JCSS PMC [61] angenommen. Kessel et al. [145] fanden je nach Kollektiv Korrelationskoeffizienten zwischen Biegefestigkeit und mittlerer Rohdichte von  $\rho = 0,134 \dots 0,669$ , über alle Kollektive ergab sich  $\rho = 0,346$ . Eine Korrelation in der Größenordnung reicht für die Aktualisierung des Materialbeiwertes als alleiniger Parameter nicht aus.

Die Aktualisierung der Druckfestigkeit als Referenzgröße führt zu einer Reduktion von  $\gamma_M$ . Hier wurde ein Korrelationskoeffizient von  $\rho = 0,8$  zwischen Druck- und Biegefestigkeit angenommen. Dieser ist im JCSS PMC [61] für kleine fehlerfreie Proben angegeben. Im JCSS PMC [61] wird angenommen, dass die Beziehung auch für Bauholz gilt. Die Annahme sollte nur nach eingehender visueller Prüfung des Bauteils auf festigkeitsbestimmende Merkmale insbesondere der Biegezugzone zur Anwendung kommen. Die Aktualisierung erfolgt ohne Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Bestimmung der Referenzgröße aus der Messgröße (z.B. Bestimmung der Druckfestigkeit in Bauteilgröße aus der Bestimmung der Druckfestigkeit von Kernbohrungen). Des Weiteren wurde für dieses Beispiel der Variationskoeffizient der Referenzgröße aus der Literatur entnommen. Unter Verwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwertes auf Basis einer aktualisierten Druckfestigkeit ergibt sich das Ergebnis nach Tab. 8.9.

Tab. 8.9: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2c)

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2c)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$g_k = 3,3 \text{ kN/m}$	$q_d = 6,7 \text{ kN/m}$	0,81 < 1
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 1,8 \text{ kN/m}$	$\sigma_d = 15,4 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M,up} = 1,16$	$f_{k,m} = 30 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 20,2 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,8 \text{ (NKL 1)}$			

Bei Anwendung des aktualisierten Sensitivitätsfaktors zeigt sich eine Reduktion der Auslastung (mit  $\alpha = 0,8$  und  $\gamma_{M,up} = 1,18$ ,  $\eta = 0,83$ ) Die Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  resultiert in einer eher geringfügigen Verbesserung. Der modifizierte Teilsicherheitsbeiwert muss auf den ausgewiesenen normativen Wert für die charakteristische Festigkeit angewendet werden. Eine gleichzeitige Aktualisierung von Teilsicherheitsbeiwert und charakteristischem Wert kann mit dieser Methode nicht erfolgen.



### Bewertung im Knowledge Level KL 3

Die Verteilungsparameter sollten aufgrund der begrenzten Stichprobenzahl und der großen Materialstreuung nicht direkt aus den Versuchsdaten geschätzt werden. Unter Berücksichtigung von Vorinformationen kann mit dem Bayes'schen Updating die Aktualisierung der Zielgröße erfolgen. Zur Demonstration wird angenommen, dass die Aktualisierung basierend auf sechs Probennahmen zur Bestimmung der Druckfestigkeit in Faserrichtung durchgeführt wird. Beispielhaft wird angenommen, dass die Messung zu den Ergebnissen  $x_{ref} = [27,57 \ 35,01 \ 32,54 \ 34,83 \ 27,91 \ 34,45]$  führt. Nach DIN EN 384:2019-02 [160] ergibt sich für die Biegefestigkeit  $y_{tar} = [41,11 \ 55,42 \ 57,27 \ 65,60 \ 42,13 \ 64,22]$ . Tab. 8.10 und Abb. 8.4 zeigen das Aktualisierungsergebnis. Die simulierten Werte wurden so gewählt, dass das Ergebnis nur leicht über der Annahme basierend auf der Norm liegt um zu demonstrieren, dass die Aktualisierung aufgrund der Berücksichtigung der Messunsicherheit auch zu einer Erhöhung des Variationskoeffizienten führen kann. Mit dem aktualisierten charakteristischen Wert kann die semi-probabilistische Überprüfung erfolgen, siehe Tab. 8.11.

Tab. 8.10: Beispiel 8.1 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating

	$m_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$V_x$	$f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Prioriverteilung	45,26	0,25	30,0
Daten	54,29	0,19	38,81
Aktualisierung	50,01	0,26	31,75

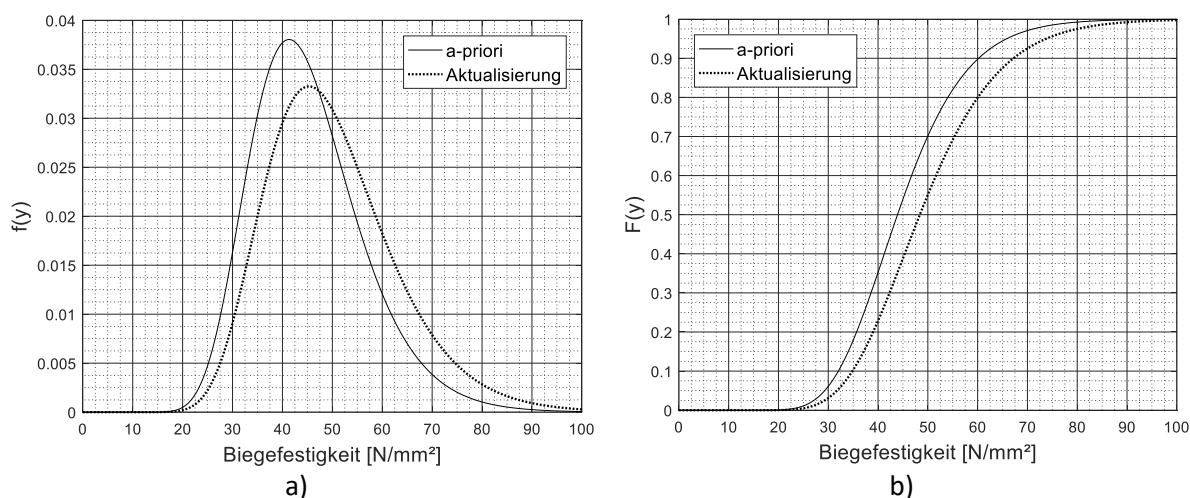


Abb. 8.4: Beispiel 8.1 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating (a) kumulative Verteilungsfunktion, b) Verteilungsdichtefunktion)

Tab. 8.11: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2c)

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2c)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$g_k = 3,3 \text{ kN/m}$	$q_d = 6,7 \text{ kN/m}$	0,79 < 1
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 1,8 \text{ kN/m}$	$\sigma_d = 15,4 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M,up} = 1,20$	$f_{k,m} = 31,75 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 20,2 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,8$ (NKL 1)			

Zur verbesserten Interpretation der Ergebnisse wird eine probabilistische Bewertung mittels Monte Carlo Simulation (crude monte carlo sampling) durchgeführt. Die Grenzzustandsfunktion ist

$$g = k_{mod} \cdot R \cdot \theta_R - (S_G \cdot \theta_{S,G} + S_Q \cdot \theta_{S,Q}) \cdot \frac{l^2}{8} / \left( \frac{bh^2}{6} \right) \quad (8.9)$$

Die Parameter aus Tab. 8.12 werden angenommen. Die Berechnung der aktualisierten Biegefestigkeit auf Basis der gemessenen Referenzeigenschaft erfolgt aus der Verteilungsfunktion mittels Bayes'schem Updating.

Tab. 8.12: Beispiel 8.1 - Parameter zur probabilistischen Bewertung (alle Variablen in [N/mm<sup>2</sup>])

Variable	Sym- bol	Param. 1	Param. 2	V <sub>x</sub>	Vert.	Anm.
Biegefestigkeit – keine Aktualisierung: C24 (KL 1)	R	10,49	0,25	0,25	LN	
Biegefestigkeit – aktualisierte Festigkeitsklasse (KL 2b)	R	10,71	0,25	0,25	LN	
Biegefestigkeit – aktualisiert aus Referenzgröße (KL 2b)	R	10,79	0,26	0,26	LN	
Ständige Last – nicht aktualisiert (KL 1)	S <sub>G</sub>	3,312	0,331	0,10	N	
Ständige Last – aktualisiert (KL 2a)	S <sub>G</sub>	3,312	0,2318	0,07	N	
Nutzlast	S <sub>Q</sub>	1,368	2,50	0,25	GUM	T <sub>ref</sub> = 50a
Modellunsicherheit Widerstand	θ <sub>R</sub>	1	0,07	0,07	N	Multi- plikativ
Modellunsicherheit ständige Last	θ <sub>S,G</sub>	1	0,05	0,05	N	
Modellunsicherheit Nutzlast	θ <sub>S,q</sub>	1	0,10	0,10	N	

Vergleichend werden probabilistische Analysen für die Kenntnisstände aller vorangegangenen Level dargestellt. Die Ergebnisse werden in Tab. 8.13 zusammengefasst. Die starke Erhöhung der berechneten Zuverlässigkeit unter Verwendung der aus der Referenzeigenschaften aktualisierten Materialfestigkeit ist auf die starke Reduktion der Streuung im Rahmen der Aktualisierung bei Anwendung von Gl. (7.27) zurückzuführen (Resultat ist die Reduktion von V<sub>R</sub> = 0,25 auf V<sub>R</sub> = 0,14, siehe auch Tab. 8.12).

Tab. 8.13: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 3

Aktualisierung entsprechend	β	β <sub>r</sub> <sup>1</sup>	Anmerkungen
KL 1	3,06	3,2	Keine Aktualisierung
KL 2a)	3,09	2,9	Reduktion des Variationskoeffizienten der ständigen Last & Anpassung der Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau
KL 2b)	3,82	2,9	Aktualisierung der Festigkeitsklasse
KL 2c)	3,95	2,9	Aktualisierung der Festigkeit aus Referenzeigenschaft

<sup>1</sup> Zielgröße

### Auswertung

Das Beispiel zeigt, wie sich die schrittweise Aktualisierung der Parameter, sowie die Anpassung des semi-probabilistischen Nachweiskonzeptes auf die Tragfähigkeitsüberprüfung auswirkt. Der größte Sprung ist von KL 2a) zu KL 2b) zu verzeichnen. Dies ist auf die Einstufung in eine höhere Festigkeitsklasse zurückzuführen. Zudem resultiert die Anwendung eines für den Beanspruchungsfall kalibrierten Teilsicherheitsbeiwert in der Nutzbarmachung von Tragfähigkeitsreserven bei der semi-probabilistischen Überprüfung.

## 8.4.2 Beispiel 8.2: Hängesäule in einem historischen Steildach

### Grundlegendes

Betrachtet wird eine Hängesäule in einem historischen Kirchendach nach Abb. 8.5. Untersucht wird aus illustrativen Gründen an dieser Stelle nur die Zugbeanspruchung in der Hängesäule. Auf die Untersuchung der Tragfähigkeit der Versatzverbindung wird verzichtet. Es wird angenommen, dass es sich um ein Bauteil in einem historischen Kirchendachstuhl mit einer Dachneigung von  $\alpha > 60^\circ$  handelt. Demnach setzt sich die Beanspruchung aus ständiger Last und Windlast zusammen.

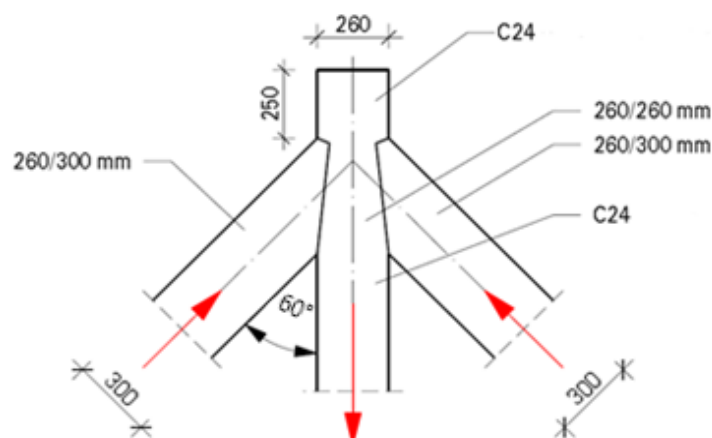


Abb. 8.5: Beispiel 8.2 – Hängesäule

### Bewertung im Knowledge Level KL 1

Nach visueller Prüfung erfolgt eine Einstufung in die Festigkeitsklasse C 24. Tab. 8.14 fasst geometrische Randbedingungen, Lasten und Materialparameter zusammen.

Tab. 8.14: Beispiel 8.2 - Geometrie, benötigte Materialkennwerte & zu berücksichtigende Einwirkungen

Geometrie		Festigkeitsparameter		Einwirkungen	
Balkenquerschnitt	$h/b = 26/26 \text{ cm}$	Zugfestigkeit in FR	$f_{t,0,k} = 14,5 \text{ N/mm}^2$	Ständige Last	$G_k = 220 \text{ kN}$
Nettoquerschnitt	$h/b = 14/26$			Windlast	$Q_{k,w} = 110 \text{ kN}$

Erneut erfolgt die Tragfähigkeitsüberprüfung zunächst in *Knowledge Level 1*. Das Ergebnis wird in Tab. 8.15 zusammenfassend dargestellt. Es zeigt sich eine leichte Überschreitung der angenommenen Tragfähigkeit. Die weitere Analyse erfolgt in *Knowledge Level 2a*).

Tab. 8.15: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 1

Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 1
$\gamma_G = 1,35$	$g_k = 220 \text{ kN}$	$q_d = 462 \text{ kN}$	1,14 > 1
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 110 \text{ kN}$	$\sigma_d = 12,7 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_M = 1,30$	$f_{t,k} = 14,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,d} = 11,15 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 1,0 \text{ (NKL 1)}$			

## Bewertung im Knowledge Level KL 2

### Bewertung in Knowledge Level KL 2a)

Die Überprüfung ständiger Lasten kann bei detaillierter Bestandsaufnahme in situ durch Überprüfung der verbauten Bauteilquerschnitte, sowie des weiteren Dachaufbaus erfolgen. Des Weiteren zeigten die probabilistischen Analysen, dass das alleinige Wirken von Windlasten neben ständigen Lasten zu einer erhöhten Zuverlässigkeit im Vergleich zu einer Beanspruchung aus Schnee- oder Nutzlasten führt. So enthält beispielsweise auch der *JRC Science and Policy Report* [27] bei der dominanten Wirkung von Windlasten eine günstigere Anpassung der Sicherheitsbeiwerte. Entsprechend erfolgt die Bewertung in KL 2a) gemäß der Teilsicherheitsbeiwerte aus Tab. 7.40 S. 219 bzw. Tab. 8.2 S. 232, das Ergebnis zeigt Tab. 8.16.

Tab. 8.16: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2a)

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2a)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$g_k = 220 \text{ kN}$	$q_d = 429 \text{ kN}$	$1,02 \approx 1$
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 110 \text{ kN}$	$\sigma_d = 11,8 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M,opt} = 1,25$	$f_{t,k} = 14,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,d} = 11,6 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 1,0 \text{ (NKL 1)}$			

### Bewertung im Knowledge Level KL 2b)

Insbesondere bei zugbeanspruchten Bauteilen wurde schon in historischen Tragwerken auf die Auswahl besonders hochwertiger Bauhölzer geachtet, da der große Einfluss struktureller Parameter auf diesen Kennwert bekannt war. Es kann demnach für dieses Beispiel davon ausgegangen werden, dass eine detaillierte Inspektion des Bauteils durch eine entsprechend qualifizierte Fachperson zur Einstufung in eine höhere Festigkeitsklasse führt. Wird von einer Einstufung in die Sortierklasse S 30 nach DIN 4074-1 [142] (Nadelholz) bzw. LS 30 nach DIN 4074-5 [143] (Laubholz) und damit Festigkeitsklasse C 30 ausgegangen, ergibt sich das Bewertungsergebnis nach Tab. 8.17.

Tab. 8.17: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2b)

Teilsicherheitsbeiwerte	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2b)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$g_k = 220 \text{ kN}$	$q_d = 429 \text{ kN}$	$0,78 < 1$
$\gamma_Q = 1,50$	$q_k = 110 \text{ kN}$	$\sigma_d = 11,8 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M,up} = \gamma_{M,opt} = 1,25$	$f_{t,k} = 19 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,d} = 15,2 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 1,0 \text{ (NKL 1)}$			

### Bewertung im Knowledge Level KL 2c)

Die Aktualisierung der Zugfestigkeit auf Basis am Tragwerk entnommener Proben ist in der Regel problematisch, da sich die Reduktion des Nettoquerschnitts besonders negativ auf die Tragfähigkeit auswirkt. Die Aktualisierung der Festigkeit aus Referenzeigenschaften aus einer zerstörungsfreien Prüfung ist möglich, siehe auch DIN EN 384:2019-02 [160]. Die Aktualisierung kann beispielsweise mittels Be-

## 8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen

stimmung des E-Moduls aus Ultraschall-Impulslaufzeitmessung erfolgen. Bei der Berechnung der Festigkeit basierend darauf sollten jedoch festigkeitsbestimmende Holzmerkmale wie beispielsweise Äste berücksichtigt werden. Eine Aktualisierung mittels multipler Korrelation ist zu empfehlen. Für dieses Beispiel wird daher von der Anpassung der Zugfestigkeit auf Basis einer gemessenen Referenzeigenschaft abgesehen.

### Bewertung im Knowledge Level KL 3

Für die Annahmen aus den Stufen *KL 1*, *KL 2a)* und *KL 2b)* wird eine probabilistische Bewertung mittels *Monte Carlo Simulation* vorgenommen. Die Parameter werden in Tab. 8.18 angegeben, die Ergebnisse in Tab. 8.19 zusammengestellt. Die Berechnung resultiert in einer deutlichen Erhöhung der Zuverlässigkeit in *KL 2b)* bei Aktualisierung der Festigkeitsklasse. Für *KL 2a)* zeigt sich, vergleichbar mit der semiprobabilistischen Bewertung, eine gute Übereinstimmung des Ausnutzungsgrades mit dem Zielwert.

Tab. 8.18: Beispiel 8.2 - Parameter zur probabilistischen Bewertung (alle Variablen in  $[N/mm^2]$ )

Basisvariable	Symbol	Param. 1	Param. 2	$V_x$	Vert.	Anm.
Zugfestigkeit – keine Aktualisierung: C24	$R$	10,06	0,29	0,30	LN	
Zugfestigkeit – aktualisierte Festigkeitsklasse C30	$R$	10,34	0,29	0,30	LN	
Ständige Last – nicht aktualisiert	$S_G$	6,04	0,60	0,10	N	
Ständige Last – aktualisiert	$S_G$	6,04	0,42	0,07	N	
Windlast	$S_W$	3,02	2,45	0,16	GUM	$T_{ref} = 50a$
Modellunsicherheit Widerstand	$\theta_R$	1	0,07	0,07	N	Multiplikativ
Modellunsicherheit ständige Last	$\theta_{S,G}$	1	0,05	0,05	N	
Modellunsicherheit Windlast	$\theta_{S,W}$	1	0,10	0,10	N	

Die Grenzzustandsfunktion ist

$$g = k_{mod} \cdot R \cdot \theta_R - (S_G \cdot \theta_{S,G} + S_W \cdot \theta_{S,W}) \cdot / (bh_{net}) \quad (8.10)$$

Tab. 8.19: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im *KL 3*

Aktualisierung entsprechend	$\beta$	$\beta_T^1$	Anmerkungen
<i>KL 1</i>	2,92	3,2	Keine Aktualisierung
<i>KL 2a)</i>	2,95	2,9	Reduktion des Variationskoeffizienten der ständigen Last, & Anpassung der Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau
<i>KL 2b)</i>	3,8	2,9	Aktualisierung der Festigkeitsklasse

<sup>1</sup>Zielgröße

### Auswertung

Bei der Zugfestigkeit des Holzes handelt es sich um eine verhältnismäßig stark streuende Größe. Die Aktualisierung aus Referenzeigenschaften ist demzufolge eine besondere Herausforderung. Aufgrund dessen kann mit der Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes nur ein relativ geringes Potential aktiviert werden, welches nur bei günstigen Lastverhältnissen genutzt werden kann, wenn die Nutzung dieses Potentials nicht über eine Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes für die veränderlichen Einwirkungen erfolgt.

### 8.4.3 Beispiel 8.3: Aktualisierung der Materialfestigkeit eines Sparrenfußpunktes

#### Grundlegendes

Betrachtet wird eine Pfettendachkonstruktion aus dem 19. Jahrhundert aus Rug [251]. Das Konstruktionssystem wird in Abb. 8.6 dargestellt. Betrachtet wird ein Sparrenfußpunkt mit einem Stirnversatz, siehe Abb. 8.7. Nachfolgend wird illustrativ nur der Nachweis der Streben­tragfähigkeit betrachtet.

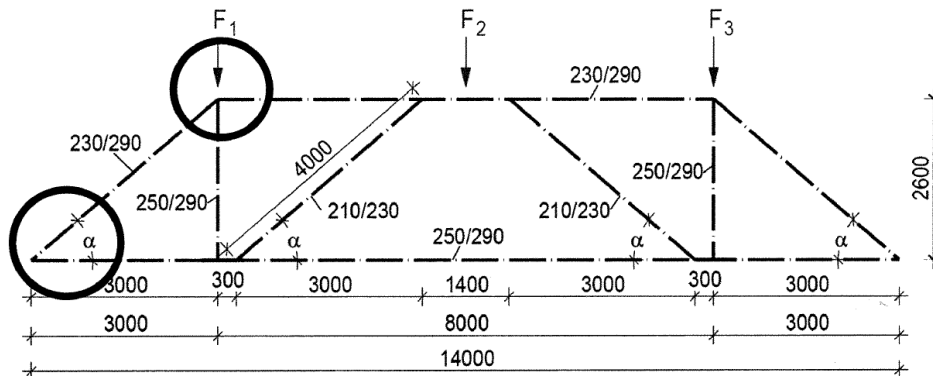


Abb. 8.6: Beispiel 8.3 - Konstruktionssystem aus Rug [251]

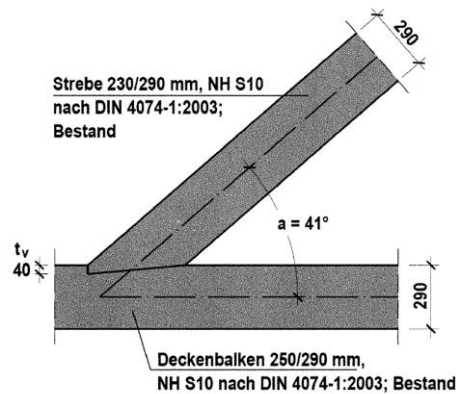


Abb. 8.7: Beispiel 8.3 – Sparrenfußpunkt, Stirnversatz

#### Bewertung im Knowledge Level KL 1

Im Rahmen einer Voruntersuchung wird das Material in die Festigkeitsklasse C24 (Kiefer) zugeordnet. Der Bemessungswert der maximalen Strebenbeanspruchung wird mit  $S_d = 152,43 \text{ kN}$  angegeben. Die charakteristischen Werte für Einwirkung und Widerstand nach Tab. 8.20 werden zugrunde gelegt.

Tab. 8.20: Beispiel 8.3 - Geometrie, benötigte Materialkennwerte & zu berücksichtigende Einwirkungen

Geometrie		Festigkeitsparameter		Einwirkungen	
Sparrenquerschnitt	$h/b = 23/29 \text{ cm}$	Druckfestigkeit in FR	$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$	Ständige Last	$G_k = 73 \text{ kN}$
Deckenbalkenquerschnitt	$h/b = 23/29 \text{ cm}$	Druckfestigkeit rechth. zur FR	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	Schneelast	$Q_{k,S} = 35,9 \text{ kN}$
		Schubfestigkeit	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$		

Aus den in Tab. 8.20 angegebenen Bemessungswiderständen der Materialfestigkeit wird mit Gl. (8.11) die Festigkeit unter einem Winkel zur Faserrichtung, sowie mit Gl. (8.12) der Bemessungswert der

**8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen**

Tragfähigkeit der Stirnfläche nach *Rug & Mönck* [1] bestimmt. Damit ergibt sich die angegebene Auslastung (Tab. 8.21). Maßnahmen zur Verstärkung des Versatzes wären somit nötig.

$$f_{c,\alpha/2,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{2 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha/2\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{2 \cdot f_{v,d}} \cdot \sin^2 \alpha/2 \cdot \cos \alpha/2\right)^2 + \cos^4 \alpha/2}} \quad (8.11)$$

$$R_{S,v,d} = \frac{b \cdot t_v \cdot f_{c,\alpha/2,d}}{\cos \alpha/2} \quad (8.12)$$

**Tab. 8.21: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 1**

Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 1
$\gamma_G = 1,35$	$G_k = 73 \text{ kN}$	$S_d = 152,4 \text{ kN}$	1,42 > 1
$\gamma_Q = 1,50$	$Q_{k,S} = 35,9 \text{ kN}$		
$\gamma_M = 1,30$	$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 14,5 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,9$	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 1,7 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 2,8 \text{ N/mm}^2$	
		$f_{c,\alpha/2,d} = 10,9 \text{ N/mm}^2$	
		$R_{S,v,d,1} = 107,1$	

**Bewertung im Knowledge Level KL 2**

In *Linke, Rug & Pasternak* [207] wird eine Systematik zur Verbesserung der Festigkeitssortierung mittels apparativer Unterstützung vorgestellt. Dieses gliedert sich in vier Sortierstufen nach Tab. 8.22. Dabei erfolgt in *SGL 0* nur eine grobe Überprüfung, die häufig in der Festigkeitsklasse C24 (Nadelholz) resultiert. In der *SGL 1* erfolgt eine vertiefte visuelle Sortierung. *SGL 2* bezieht zusätzlich die Ergebnisse einer Ultraschall-Impulslaufzeitmessung ein. Die Festigkeitsklasse wird über eine multiple Regressionsgleichung bestimmt. Dabei werden Sortierkriterien, die im Bestandsbau weniger relevant nicht für Festigkeitssortierung berücksichtigt sind (siehe dazu auch Kap. 5.1). Zudem erfolgt eine ingenieurmäßige Bewertung des Einflusses der Strukturparameter auf die individuelle Tragfähigkeit im konkreten Beanspruchungsfall des Bauteils (z.B. geringerer Einfluss der Ästigkeit bei reiner Druckbeanspruchung). In der *SGL 3* erfolgt zusätzlich die Berücksichtigung der Rohdichte innerhalb der multiplen Regression zur Bestimmung der Festigkeitsklasse. Für dieses Beispiel wird das folgende Sortierergebnis bei unterschiedlicher apparativer Unterstützung unterstellt, siehe Tab. 8.22. Dieses ergibt sich aus der lokalen Untersuchung des Gebindes.

**Tab. 8.22: Beispiel 8.3 – beispielhafte Ergebnisse einer verbesserten Festigkeitssortierung (lokale Untersuchung)**

Sortierstufe	Zuordnung Sortier-/Festigkeitsklasse	
	Sparren (Strebe)	Deckenbalken (Gurt)
<b>SGL 0</b> <i>ohne Sortierung</i>	S10/C24	S10/C24
<b>SGL 1</b> <i>visuelle Sortierung</i>	S13/C30	S13/C30
<b>SGL 2</b> <i>visuelle Sortierung &amp; Ultraschall</i>	C35	C35
<b>SGL 3</b> <i>visuelle Sortierung, Ultraschall &amp; Rohdichtebestimmung</i>	C45	C45

Bewertung im Knowledge Level KL 2a)

Eine detailliertere visuelle Sortierung ergab die Einstufung des Materials in die Festigkeitsklasse C30 (SGL 1). Für die Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes muss zunächst das Lastverhältnis aus ständiger zu veränderlicher Last geprüft werden. Für Schneelasten ist nach Tab. 4.23

$$\frac{m_x}{x_k} = 1,13 \quad (8.13)$$

$$m_{x,s} = 35,92 \text{ kN} \cdot 1,13 = 40,6 \text{ kN} \quad (8.14)$$

$$LV = \frac{m_q}{m_q + m_g} = \frac{40,6 \text{ kN}}{40,6 \text{ kN} + 73 \text{ kN}} = 0,36 < 0,5 \quad (8.15)$$

Für Druckbeanspruchung in Faserrichtung ist der kalibrierte Teilsicherheitsbeiwert für die diskutierte Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  nach Tab. 8.2. Dieser wird nur auf den charakteristischen Wert der Druckfestigkeit in Faserrichtung angewendet. Die Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_G$  und  $\gamma_M$  sowie die Einstufung in die Festigkeitsklasse C30 führt zu der in Tab. 8.23 angegebenen Auslastung von  $\eta = 1,20 > 1$ .

Tab. 8.23: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2a)

Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2a)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$G_k = 73 \text{ kN}$	$S_d = 141,5 \text{ kN}$	1,20 > 1
$\gamma_Q = 1,50$	$Q_{k,s} = 35,92 \text{ kN}$		
$f_{c,0,k}$ ; $\gamma_{M,opt} = 1,20$	$f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 18,0 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 1,9 \text{ N/mm}^2$	
$f_{c,90,k}$ & $f_{v,k}$ $\gamma_M = 1,30$	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 2,8 \text{ N/mm}^2$	
		$f_{c,\alpha/2,d} = 12,0 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,9$		$R_{S,v,d,1} = 117,7$	

Bewertung im Knowledge Level KL 2b)

Hier wird unterstellt, dass die apparativ unterstützte Festigkeitssortierung mit Ultraschallimpulslaufzeitmessung (SGL 2 nach [207]) zur Einordnung des Holzes in die Festigkeitsklasse C35 führt. Die Auslastung ändert sich nach Tab. 8.24 zu  $\eta = 1,19 > 1$ . Entsprechend führt die Einstufung unter zusätzlicher Bestimmung der Rohdichte und Einordnung in Festigkeitsklasse C45 zu  $\eta = 1,12 > 1$  (Tab. 8.25).

Tab. 8.24: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2b) (SGL 2, C35)

Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2b)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$G_k = 73 \text{ kN}$	$S_d = 141,5 \text{ kN}$	1,19 > 1
$\gamma_Q = 1,50$	$Q_{k,s} = 35,92 \text{ kN}$		
$f_{c,0,k}$ ; $\gamma_{M,opt} = 1,20$	$f_{c,0,k} = 25 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 18,75 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 1,9 \text{ N/mm}^2$	
$f_{c,90,k}$ & $f_{v,k}$ $\gamma_M = 1,30$	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 2,8 \text{ N/mm}^2$	
		$f_{c,\alpha/2,d} = 12,15 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,9$		$R_{S,v,d,1} = 119,3$	



8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen

Tab. 8.25: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2b) (SGL 3, C45)

Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2b)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$G_k = 73 \text{ kN}$	$S_d = 141,5 \text{ kN}$	$1,12 > 1$
$\gamma_O = 1,50$	$Q_{k,S} = 35,92 \text{ kN}$		
$f_{c,0,k}: \gamma_{M,opt} = 1,20$	$f_{c,0,k} = 29 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 21,75 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{c,90,k} = 2,9 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,0 \text{ N/mm}^2$	
$f_{v,90,k} \text{ \& } f_{v,k}$ $\gamma_M = 1,30$	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 2,8 \text{ N/mm}^2$	
		$f_{c,\alpha/2,d} = 12,8 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,9$		$R_{S,v,d,1} = 126,1$	

Bewertung im Knowledge Level KL 2c)

Um eine bessere Abschätzung der Qualität des in der Konstruktion verbauten Materials zu erhalten, wurden mehrere Sparrenfußpunkte ( $n = 36$ ) der Konstruktion untersucht (globale Untersuchung). Es ergeben sich die Werte nach Tab. 8.26.

Tab. 8.26: Beispiel 8.3 – beispielhafte Ergebnisse einer globalen Untersuchung der Sparrenfußpunkte im Tragwerk

Rohdichte				
	$\rho_{mean} [\text{kg/m}^3]$	$s_\rho [\text{kg/m}^3]$	$V_\rho [\%]$	$\rho_k [\text{kg/m}^3]$
Sparren	571,74	97,26	17,01	479,58
Deckenbalken	539,10	104,77	19,43	425,68
Druckfestigkeit in Faserrichtung				
	$f_{c,0,mean} [\text{N/mm}^2]$	$s_{f,c,0} [\text{N/mm}^2]$	$V_{f,c,0} [\%]$	$f_{c,0,k} [\text{N/mm}^2]$
Sparren	49,50	4,80	9,69	44,60
Deckenbalken	48,02	4,99	10,39	42,98
Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung				
	$f_{c,90,mean} [\text{N/mm}^2]$	$s_{f,c,90} [\text{N/mm}^2]$	$V_{f,c,90} [\%]$	$f_{c,90,k} [\text{N/mm}^2]$
Sparren	3,98	0,53	13,34	3,48
Deckenbalken	3,74	0,57	15,27	3,18

Wie beschrieben ist die Korrelation zwischen Referenz- und Zielgröße von starker Bedeutung für die Aktualisierung. Dementsprechend wird für dieses Beispiel nur die Aktualisierung basierend auf der aktualisierten Druckfestigkeit betrachtet, siehe Tab. 8.27. Die ausgewiesene Festigkeit ist der auf Bauteilgröße umgerechnete Wert. Diese Aktualisierung gilt nur für die entsprechend betrachtete Kenngröße, hier die Druckfestigkeit in Faserrichtung.

Tab. 8.27: Beispiel 8.3 – Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  im KL 2c) für ein beispielhaftes Messergebnis

	Aktualisierung basierend auf der Referenzgröße		Anmerkungen
	Druckfestigkeit		
	$\alpha = 0,8$	$\alpha = 0,77$	
$\mu_{x,ref}$	34,34 [N/mm <sup>2</sup> ]		Erwartungswert der Referenzgröße (mit $V = 0,20$ aus charakt. Wert der EN 338 [110] für C45 berechnet)
$V_{x,ref}$	0,20		Variationskoeffizient der Referenzgröße (Druckfestigkeit fehlerfrei) aus JCSS PMC [61]
$V_{y,target}$	0,20		Variationskoeffizient der Zielgröße (Druckfestigkeit Bauteilgröße)
$\rho_{x,y}$	0,8		Annahme Korrelationskoeffizient zwischen Druckfestigkeit fehlerfrei und Druckfestigkeit Bauteilgröße
$x_{meas}$	48,02 [N/mm <sup>2</sup> ]		Erwartungswert der Referenzgröße – Messergebnis
$\gamma_{M,up}$	1,14	1,13	Modifikation basierend auf $\beta_{eval,exis} = 2,9$

Tab. 8.28 zeigt, dass die Tragfähigkeitsbewertung nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt, der Versatz muss verstärkt werden. Die aktualisierte Bewertung zeigt jedoch eine deutlich geringere Überschreitung des Nachweises. Die probabilistische Bewertung in KL 3 gibt weiteren Aufschluss zum Einfluss der Eingangsgrößen.

Tab. 8.28: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 2c) (SGL 3)

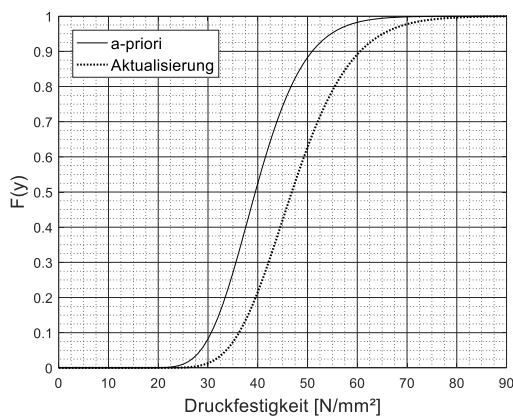
Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2c)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$G_k = 73 \text{ kN}$	$S_d = 141,5 \text{ kN}$	$1,10 > 1$
$\gamma_Q = 1,50$	$Q_{k,S} = 35,92 \text{ kN}$		
$f_{c,0,k}: \gamma_{M,opt} = 1,13$	$f_{c,0,k} = 29 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 22,3 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{c,90,k} = 2,9 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,0 \text{ N/mm}^2$	
$f_{90,k} \text{ \& } f_{v,k}$ $\gamma_M = 1,30$	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 2,8 \text{ N/mm}^2$	
		$f_{c,\alpha/2,d} = 12,9 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,9$		$R_{S,v,d,1} = 126,9$	

### Bewertung im Knowledge Level KL 3

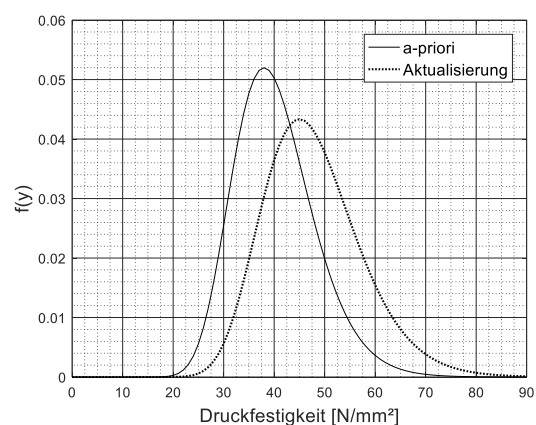
Die Variablen zur Tragfähigkeitsbewertung sollten nicht direkt aus den Versuchsgrößen geschätzt werden, Vorinformationen sind einzubeziehen. Deshalb werden zur Tragfähigkeitsbewertung im KL 3 die Druckfestigkeit in Faserrichtung  $f_{c,0}$  und rechtwinklig zur Faserrichtung  $f_{c,90}$  auf Basis der Testergebnisse mit Bayes'schem Updating aktualisiert, siehe Tab. 8.29, Tab. 8.30, Abb. 8.8 und Abb. 8.9.

Tab. 8.29: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating

	$m_x \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$V_x$	$f_k \text{ [N/mm}^2\text{]}$
<b>Prioriverteilung</b>	40,3	0,2	29,0
<b>Daten</b>	48,0	0,11	39,8
<b>Aktualisierung</b>	47,8	0,2	33,68



a)



b)

Abb. 8.8: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating

(a) kumulative Verteilungsfunktion, b) Verteilungsdichtefunktion)

Tab. 8.30: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung mit Bayes'schem Updating

	$m_x \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$V_x$	$f_k \text{ [N/mm}^2\text{]}$
<b>Prioriverteilung</b>	4,43	0,10	2,9
<b>Daten</b>	3,59	0,16	2,74
<b>Aktualisierung</b>	3,57	0,10	3,0

8. Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen

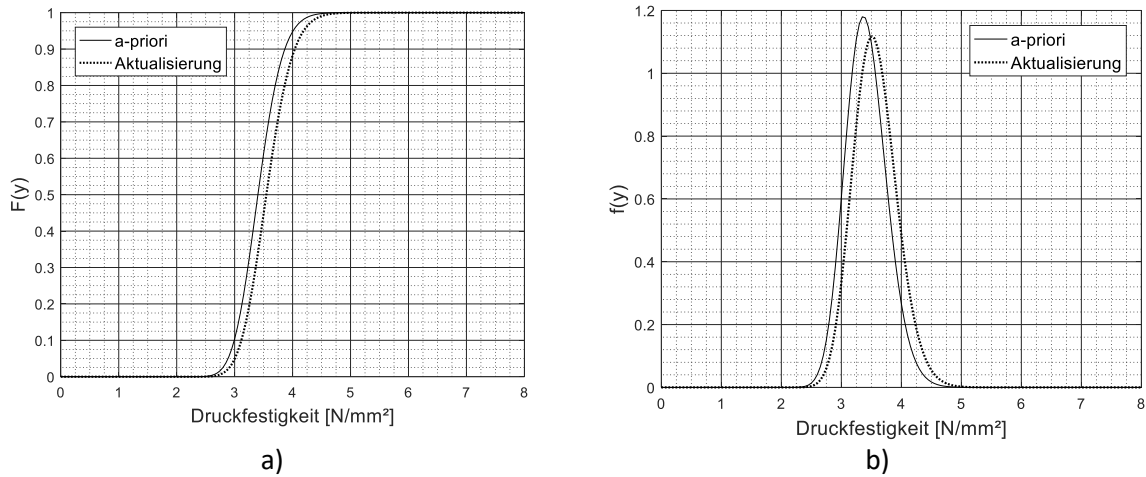


Abb. 8.9: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung mit Bayes’schem Updating (a) kumulative Verteilungsfunktion, b) Verteilungsdichtefunktion)

Wird mit dem aktualisierten charakteristischen Wert der Druckfestigkeit in und rechtwinklig zur Faserrichtung die Tragfähigkeitsbewertung durchgeführt, ergibt sich das Ergebnis nach Tab. 8.31. Zu beachten ist, dass hier nicht der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,up}$  aus KL 2c) zur Anwendung kommen darf, da dieser die Verbesserung der Basisvariablen im Vergleich zum tabellierten Wert berücksichtigt. Es wird der für den Beanspruchungsfall optimierte Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  angewendet. Es ergibt sich  $\eta = 1,08 > 1$  siehe Tab. 8.31.

Tab. 8.31: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im KL 3, semi-probabilistisch mit Bayes’schem Updating

Teilsicherheitsbeiwerte, Modifikationsbeiwert	Charakteristische Werte	Bemessungswerte	Auslastung mit aktualisierten Teilsicherheitsbeiwerten im KL 2c)
$\gamma_{G,up} = 1,20$	$G_k = 73 \text{ kN}$	$S_d = 141,5 \text{ kN}$	1,08 > 1
$\gamma_Q = 1,50$	$Q_{k,s} = 35,92 \text{ kN}$		
$f_{c,0,k}$ : $\gamma_{M,opt} = 1,20$	$f_{c,0,k} = 33,68 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 25,3 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{c,90,k} = 3,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,1 \text{ N/mm}^2$	
$f_{90,k}$ & $f_{v,k}$	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 2,8 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_M = 1,30$		$f_{c,\alpha/2,d} = 13,4 \text{ N/mm}^2$	
$k_{mod} = 0,9$		$R_{S,v,d,1} = 131,4$	

In einem letzten Schritt wird eine probabilistische Tragfähigkeitsbewertung durchgeführt. Diese kann mit den aktualisierten Basisvariablen durchgeführt werden. Die Grenzzustandsfunktion ist

$$g = \frac{b \cdot t_v \cdot k_{mod} \cdot R_{c,0,d} \cdot \theta_{R,c0}}{\sqrt{\left(\frac{k_{mod} \cdot R_{c,0,d} \cdot \theta_{R,c0}}{2 \cdot k_{mod} \cdot R_{c,90,d} \cdot \theta_{R,c90}} \cdot \sin^2 \alpha / 2\right)^2 + \left(\frac{k_{mod} \cdot R_{c,0,d} \cdot \theta_{R,c0}}{2 \cdot k_{mod} \cdot R_{v,d} \cdot \theta_{R,v}} \cdot \sin^2 \alpha / 2 \cdot \cos \alpha / 2\right)^2 + \frac{\cos^4 \alpha}{2}}} - S_G \cdot \theta_G - S_Q \cdot \theta_Q \quad (8.16)$$

In diesem Fall wird jeder Widerstandsvariablen eine eigene Modellunsicherheitsvariable zugewiesen. Für die Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung und für die Schubfestigkeit wird diese höher angesetzt, als für die Druckfestigkeit in Faserrichtung. Die Basisvariablen werden in Tab. 8.32 angegeben.

Tab. 8.32: Beispiel 8.3 – Basisvariablen zur probabilistischen Bewertung in KL 3

Basisvariable	Symbol	$m_x$	Einheit	$V_x$	Vert.	Anm.
Druckfestigkeit in Faserrichtung	$R_{c,0}$	47,8	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,20	LN	Nach JCSS PMC [61]
Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	$R_{c,90}$	3,0	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,10	N	
Schubfestigkeit	$R_v$	1,79	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,25	LN	
Ständige Last	$S_G$	73,9	[kN]	0,07	N	
Veränderliche Last	$S_Q$	40,48	[kN]	0,25	GUM	$T_{ref} = 50a$
Modellunsicherheit Druckfestigkeit in Faserrichtung	$\theta_{R,c0}$	1	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,07	N	
Modellunsicherheit Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	$\theta_{R,c90}$	1	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,15	N	
Modellunsicherheit Scherfestigkeit	$\theta_{R,v}$	1	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,15	N	
Modellunsicherheit ständige Last	$\theta_G$	1	[kN]	0,05	N	
Modellunsicherheit veränderliche Last	$\theta_Q$	1	[kN]	0,10	N	

Die Berechnung mit *FORM* ergab  $\beta = 4,63$ , eine Auswertung mit *Monte Carlo Analyse*  $\beta = 4,44$ .

### Auswertung

Das Beispiel verdeutlicht die verschiedenen Optionen zur Modifikation des Bemessungskonzeptes mit Einbeziehung aktualisierter Informationen aus einer Bestandsaufnahme in situ. Die Berechnung zeigt, dass die Aktualisierung der Festigkeitsklasse und Anwendung des für den Beanspruchungsfall optimierten Teilsicherheitsbeiwert etwas vorteilhafter ist, als die Berücksichtigung der erhöhten Materialfestigkeit nur über den Teilsicherheitsbeiwert. Die in der probabilistischen Auswertung ermittelten Zielwerte liegen deutlich über dem Zielwert, hier sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Zudem zeigt sich, dass bei dieser Grenzzustandsfunktionen die *FORM* und *Monte Carlo Simulation* etwas stärker voneinander abweichen, als dies bei Grenzzustandsgleichungen mit weniger Variablen der Fall war.

## 9. Erkenntnisse und Ausblick

### 9.1 Erkenntnisse

Nachfolgend werden die Erkenntnisse der Arbeit zusammenfassend beleuchtet.

- *Derzeit sind in Deutschland keine normativen Regelungen zur Tragfähigkeitsüberprüfung von Holzkonstruktionen im Bestand vorhanden.*

Die Literaturrecherche ergab einen in den letzten zehn Jahren verstärkten Trend zur Erarbeitung von Normen und Richtlinien zur Bestandsaufnahme und Tragfähigkeitsüberprüfung von Konstruktionen im Bestand (Abb. 2.5 S. 31, Tab. 2.14 S. 31). Im Besonderen zu nennen sind hier die *Technische Spezifikation DIN CEN/TS 17440:2020-10* [45] und im Speziellen für den Holzbau die *DIN EN 17121:2019-10* [43]. Anpassungen des semi-probabilistischen Bemessungskonzeptes für die Tragfähigkeitsüberprüfung von Holzkonstruktionen sind in den Dokumenten bisher nicht enthalten.

- *Einwirkungen können aktualisiert und dies zur Reduktion von Streuungen und Modellunsicherheiten bei der Modellbildung im Bestandsbau genutzt werden.*

Für ständige Einwirkungen kann bei bekanntem Konstruktionsaufbau der Variationskoeffizienten reduziert werden. Für Nutzlasten wurde ein deutlicher Einfluss der belasteten Fläche auf die approximierte Verteilung festgestellt, die Angaben in der Normung liegen etwas auf der sicheren Seite (Tab. 4.10 & Tab. 4.11, S. 77). Für Wind- und Schneelasten wurden vereinfachte Modelle verwendet.

- *Widerstandsmodelle für die (semi)probabilistische Modellierung im Bestandsbau mit Holz lassen sich durch Prüfung in situ aktualisieren.*

Die Literaturstudie ergab, dass der Variationskoeffizient der Holzfestigkeit von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, was die Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen häufig erschwert (Anhang Kap. 10.6, Anhang S. 28 ff.). Die Festigkeitssortierung spielt eine zentrale Rolle. Im Bestandsbau kann das Widerstandsmodell mittels Bestimmung von Referenzeigenschaften aktualisiert werden, um das Tragwerk nicht zu schädigen. Methoden zur Aktualisierung von Zielgrößen basierend auf Referenzgrößen sind vorhanden. Für diese Aktualisierung ist ein hoher Korrelationskoeffizient nötig ( $\rho = 0,8...0,9$ ). Da die Stichprobenzahl im Bestandsbau begrenzt ist, sollten Vorinformationen in die Aktualisierung einbezogen werden. Eine Reduktion des Variationskoeffizienten auf Basis einer gemessenen Referenzeigenschaft kann zur Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes genutzt werden (Kap. 7.4, S. 188 ff.)

- *Der Zuverlässigkeitsindex ist eine operative Vergleichsgröße, die stark abhängig von den Modellannahmen ist und eine Vergleichbarkeit nur zwischen klar definierten und vergleichbaren Bemessungssituationen ermöglicht.*

Zur Abschätzung des impliziten Sicherheitsniveaus und maßgebender Einflussfaktoren wurden Zuverlässigkeitsanalysen mit Parameterstudien für definierte Beanspruchungsfälle durchgeführt (Kap. 6, S. 136 ff.). Die Materialeigenschaften besitzen durch vergleichsweise große Streuungen einen starken

Einfluss auf die erreichte Zuverlässigkeit. Zudem führt ein hoher Anteil veränderlicher Lasten insbesondere in Verbindung mit einer Zugbeanspruchung zu niedrigen rechnerischen Zuverlässigkeiten. Im Referenzzeitraum  $T_{ref} = 50a$  wirken sich hohe Anteile von Schnee- und Nutzlasten besonders negativ auf die Zuverlässigkeit aus. Der in *DIN EN 1990:2020-12* angegebene Zielzuverlässigkeitsindex für den Bezugszeitraum  $T_{ref} = 50a$  und Schadensfolgeklasse CC 2 wird in den betrachteten Beanspruchungssituationen unter Anwendung der geltenden Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_G = 1,35$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_M = 1,30$ ) in den seltensten Fällen erreicht. Für die untersuchten Beanspruchungssituationen stellt sich mit den aktuellen Teilsicherheitsbeiwerten ein mittlerer Zuverlässigkeitsindex von etwa  $b \approx 3,2$  ( $T_{ref} = 50a$ ) ein.

- *Die aktuelle Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte führt zu verhältnismäßig starken Schwankungen der Zuverlässigkeit.*

Basierend auf den Ergebnissen der vereinfachten Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten (Kap. 7.3.1, S. 178 ff.) und der Zuverlässigkeitsanalysen (Kap. 6, S. 136 ff.) ist die Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen abhängig von der Art der Einwirkung zu empfehlen. Eine Unterscheidung nach der beanspruchten Materialeigenschaft auf der Widerstandsseite ist für Bauholz auf Grund der Anisotropie des Materials zielführend. Die steigende Komplexität der Normung steht der besseren Ausnutzung des Materials gegenüber.

- *Der Zuverlässigkeitsindex sollte für den Bestandsbau nicht nach *DIN EN 1990:2010-12* fest angenommen, sondern für den Bestandsbau angepasst werden.*

Die Zuverlässigkeitsanalysen ergaben, dass der in *DIN EN 1990:2010-12* angegebene Zielzuverlässigkeitsindex für den Bezugszeitraum von  $T_{ref} = 50a$  in der Schadensfolgeklasse CC2 für die untersuchten Belastungen und Beanspruchungen in der großen Mehrheit der Untersuchungsfälle nicht eingehalten wird. Anhand des ermittelten Zuverlässigkeitsniveaus werden Anpassungen des Zielzuverlässigkeitsindex für den Bestandsbau auf Basis von Literaturvorschlägen diskutiert (Kap. 7.2, S. 170 ff.) und ein Vorschlag für ein Bewertungs- und ein Mindestniveau abgeleitet (Tab. 7.7, S. 177). Somit wird ein Bereich für den akzeptierten Zielzuverlässigkeitsindex für unterschiedliche Maßnahmen im Bestand vorgeschlagen ( $\beta = 2,5 \dots 3,2$ ,  $T_{ref} = 50a$ ).

- *Durch die Entwicklung angepasster Bemessungsregeln für den Bestandsbau können Tragfähigkeitsreserven erschlossen werden.*

Die Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten mit festen Sensitivitätsfaktoren kann um verschiedene Aspekte erweitert werden (in Abhängigkeit von einer gemessenen Referenzgröße, Aktualisierung der Sensitivitätsfaktoren aus einer Zuverlässigkeitsanalyse, Anpassung unter Berücksichtigung einer aktualisierten Kenntnis über eine Basisvariable). Dennoch lässt diese Methode immer einige Aspekte unberücksichtigt (Art des Grenzzustandes, Schwankungen anderer Basisvariablen). Eine Möglichkeit zur Nutzung von Tragfähigkeitsreserven ist somit die Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten für unter-

schiedliche Beanspruchungssituationen. Bei der probabilistischen Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten handelt es sich um ein Optimierungsproblem über eine Auswahl von Beanspruchungsfällen. Für Holz als anisotropes Material lassen sich bei Verwendung festigkeitsabhängiger Teilsicherheitsbeiwerte Tragfähigkeitsreserven von bis zu 15% erschließen. Basierend auf einem für den Bestandsbau angepassten Zielzuverlässigkeitsniveau wurden Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,opt} = 1,15...1,25$  je nach Beanspruchung kalibriert (Tab. 7.40, S. 219). Weiter führt die Einbeziehung aktualisierter Materialeigenschaften aus einer Bestandsaufnahme in situ zur Reduktion von Unsicherheiten. Die Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte an Beispielrechnungen ergab eine deutliche Verbesserung der Tragfähigkeitsbewertung bei Einbeziehung aktualisierter Informationen und Optimierung der Bewertung entsprechend der Beanspruchungssituation, in Abhängigkeit von den Randbedingungen ca. 5-30%.

- *Die praxisorientierte Strukturierung der Optionen zur Modifikation des Bemessungskonzeptes für die Tragfähigkeitsüberprüfung von Holzbauteilen im Bestand in ein Stufenkonzept ermöglicht die Anpassung der Tragfähigkeitsüberprüfung an die Umstände im individuellen Projekt.*

Ein Anwendungskonzept zur Tragfähigkeitsbewertung von Holzkonstruktionen im Bestand unter Berücksichtigung verschiedener Kenntnisstufen wurde entwickelt (Abb. 8.2 S. 232, Tab. 8.3 S. 235). Die Aufteilung der Optionen für eine aktualisierte Bemessung in *Knowledge Levels* ermöglicht die Berücksichtigung individueller Wissensstände je nach Projekt. Für die Anwendung komplexerer probabilistischer Methoden zur optimierten Tragfähigkeitsüberprüfung muss eine entsprechende Qualifizierung der Fachleute durchgeführt werden.

## 9.2 Forschungsausblick

Zur umfassenden Abdeckung der Beanspruchungen von Holzbauteilen im Bestand sind weitere Untersuchungen nötig. Dazu gehören Analysen der Bauteilnachweise bei Stabilitätsgefährdung (Knicken, Biegedrillknicken). Hierbei ist eine Reihe möglicher Kombinationen geometrischer Parameter mit Auswirkung auf die Bauteilschlankheit zu untersuchen. Die Untersuchung von Bauteilen unter kombinierter Beanspruchung aus Druck und Biegung ohne Stabilitätsgefährdung dient als Voruntersuchung, auf der aufgebaut werden kann.

Des Weiteren sind Verbindungen häufig die kritischen Stellen in der Tragfähigkeitsbewertung. Schub- und Scherbeanspruchungen sowie Beanspruchungen quer zur Faserrichtung sind zu untersuchen. Statistische Daten dieser Materialfestigkeiten sowie anzusetzender Modellunsicherheiten liegen aktuell nur geringem Umfang vor. Diese Lücke gilt es zu schließen und umfangreiche Zuverlässigkeitsuntersuchungen für Bauteilanschlüsse (Holz-Holz) sind durchzuführen.

In dieser Arbeit wurde die Optimierung der Teilsicherheitsbeiwerte im Hinblick auf relevante Lastkombinationen und Lastverhältnisse durchgeführt. Ein weiterer Ansatz bezieht die Gewichtung der Beanspruchungsfälle über ökonomische Kriterien ein, siehe beispielsweise *Baravalle* [85] oder *Diamantidis*,

Holický, Sýkora [252]. Dabei werden unterschiedliche Bauteiltypen über ihre Versagenskosten und die Kosten der technischen Maßnahme (z.B. Austausch, Reparatur) gewichtet, sodass eine ökonomisch optimale Lösung gefunden werden kann. Die Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für den Bestandsbau kann um diesen Aspekt erweitert werden.

Des Weiteren kann im Zuge von Umnutzungen die Forderung nach einer Warmbemessung entstehen. Eine probabilistische Bewertung dieser Beanspruchung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden und sollte in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

Von Bedeutung ist ebenso die bessere Quantifizierung der erhöhten Materialkenntnis, die aus einer apparativ unterstützten Festigkeitssortierung in situ resultiert. Die zerstörungsfreie bis zerstörungsarme Prüfung zur verbesserten Festigkeitssortierung des verbauten Materials birgt auch aus statistischer Sicht Potential zur Verbesserung der Tragfähigkeitsbewertung. Die Sortierung hat entscheidenden Einfluss auf das Materialmodell innerhalb der Festigkeitsklasse. Durch die in Abb. 9.1 aufgezeigten Wege sind Aktualisierungen der Teilsicherheitsbeiwerte bzw. des probabilistischen Materialmodells möglich. Gekennzeichnet ist die aufgestellte Einteilung in *Knowledge Levels (KL)*.

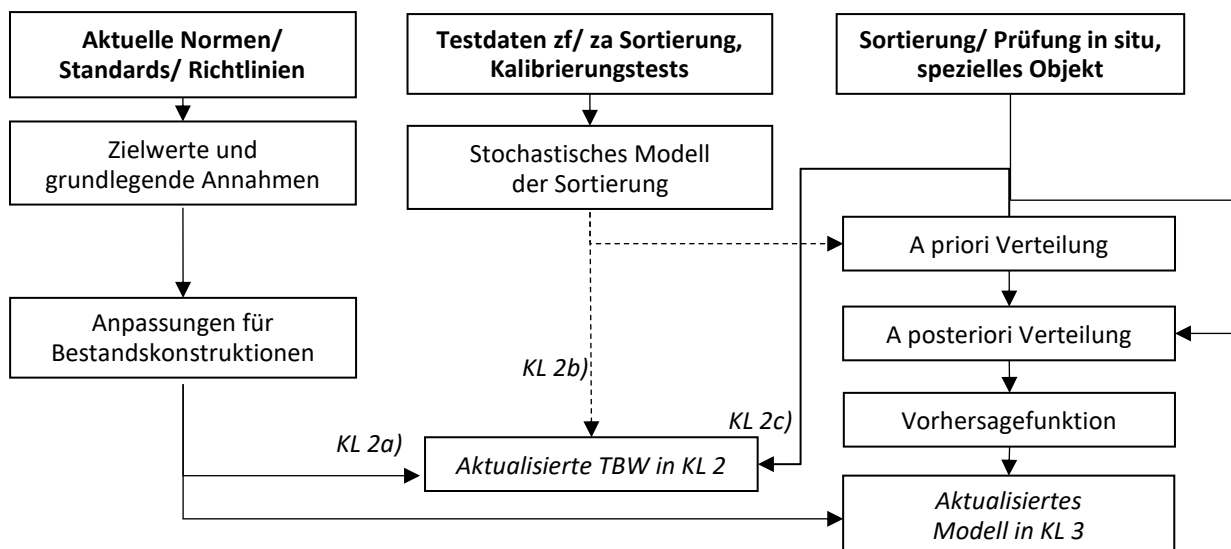


Abb. 9.1: Aktualisierung des Materialmodells abh. vom Sortierverfahren, erweitert aus Loebjinski, Rug & Pasternak [217]

Zur Nutzung dieses Potentials sind standardisierte Regelungen zur apparativ unterstützten Sortierung in situ nötig. Somit könnte zukünftig abhängig von den technischen Hilfsmitteln mittels Kalibrierungstests ein *a priori* Modell entwickelt werden, welches durch Prüfung in situ am speziellen Objekt aktualisiert werden kann. Dies kann im Rahmen des Bayes'schen Updating auf Basis der gemessenen Referenzeigenschaften unter Berücksichtigung von Vorinformationen geschehen. Auch eine Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_M$  durch Aufstellung eines Materialmodells in Abhängigkeit von der Sortiermethode wäre damit möglich.

Die Weiterentwicklung eines verantwortungsbewussten Umgangs mit Energie und Ressourcen ist eine der zentralen volkswirtschaftlichen Aufgabenstellungen. Der substanzschonende Erhalt bestehender Konstruktionen auf Basis einer möglichst realitätsnahen Bewertung der Tragfähigkeit stellt einen wichtigen Beitrag zu diesem Ziel dar.





### III. Literaturverzeichnis

- [1] W. Rug und W. Mönck, *Holzbau: Bemessung und Konstruktion*, 16. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), *Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen: Ausgabe 2017/1*. Verfügbar: [https://www.dibt.de/de/geschaeftsfelder/data/MVV\\_TB.pdf#pagemode=bookmarks](https://www.dibt.de/de/geschaeftsfelder/data/MVV_TB.pdf#pagemode=bookmarks) (08.11.2017).
- [3] DIN 1055-100:2001-03, *Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*, 2001.
- [4] Bauministerkonferenz, *Musterbauordnung -MBO-*. Verfügbar: <http://www.bauordnungen.de/Musterbauordnung.pdf> (06.11.2017).
- [5] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, *Statistischer Bericht: F II 1 - m 03/18*. Baugenehmigungen im Land Brandenburg März 2018. Verfügbar: [https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat\\_berichte/2018/SB\\_F02-01-00\\_2018m03\\_BB.pdf](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2018/SB_F02-01-00_2018m03_BB.pdf).
- [6] Holzbau Deutschland. Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes, *Holz im Wandel der Erfordernisse für das Bauen*. Verfügbar: [http://www.holzbau-deutschland.de/mit\\_holz\\_bauen/holzbau\\_im\\_wandel/](http://www.holzbau-deutschland.de/mit_holz_bauen/holzbau_im_wandel/) (06.11.2017).
- [7] Die Bundesregierung, *Denkmalschutz und Baukultur*. Verfügbar: [https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Bundesregierung/BeauftragtefuerKulturundMedien/kultur/kunstKulturfoerderung/foerderbereiche/erhaltungDenkmaeler/\\_node.html](https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Bundesregierung/BeauftragtefuerKulturundMedien/kultur/kunstKulturfoerderung/foerderbereiche/erhaltungDenkmaeler/_node.html) (30.01.2017).
- [8] V. Návarová, "Chapter 3: Procedures for the Assessment of Existing Structures" in *Basics for assessment of existing structures*, M. Holický, Hrsg. 1. Aufl, Prague: Klokner Institute, Czech Technical University in Prague, 2013, S. 30–45.
- [9] H. Cruz, D. Yeomans, E. Tsakanika, N. Macchioni, A. Jorissen, M. Touza, M. Mannucci und P. B. Lourenço, "Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures", *International Journal of Architectural Heritage*, Band 9, Nr. 3, 2013.
- [10] K. Lißner und W. Rug, "Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitt der DIN 1052: August 2004 (aktualisierte Fassung aus dem Jahre 2004 unter Berücksichtigung der Einführung der Eurocodes)", 2015.
- [11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, "Belastungsversuche an Betonbauwerken", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 2000.
- [12] K. Lißner und W. Rug, *Holzbausanierung beim Bauen im Bestand*, 2. Aufl: Springer Verlag, 2018.
- [13] Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU), "Hinweise und Beispiele zum Vorgehen beim Nachweis der Standsicherheit beim Bauen im Bestand", Apr. 2008.

- [14] H. Pasternak und T. Brettschneider, "Inspection and Maintenance of Structures of Large Failure Consequence Class - Example Tropical Island", *Scientific Journal of Civil Engineering*, Band 9, Nr. 1, 2020.
- [15] VDI 6200, *Standsicherheit von Bauwerken. Regelmäßige Überprüfung*, 2010.
- [16] DIN EN 1990:2010-12, *Grundlagen der Tragwerksplanung*, 2010.
- [17] *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)*, 2011.
- [18] DBV, "Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile. Modified Partial Safety Factors for Reinforced Concrete Members", Berlin, Merkblätter Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein. Bauen Im Bestand, 2013.
- [19] E. Brühwiler, "Das neue Schweizer Normenwerk zum Umgang mit bestehenden Tragwerken", *Stahlbau*, Band 80, Nr. 6, S. 379–388, 2011.
- [20] E. Brühwiler, "SIA Normen für bestehende Tragwerke: Verständigung und Grundsätze" in *Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT2014, Bauen im Bestand*, 2014, S. 11–45.
- [21] SIA 269:2011, *Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken*, 2011.
- [22] R. Steiger, "Neue Schweizer Baunormenreihe SIA 269 zur Erhaltungsplanung bestehender Tragwerke" in *8. Grazer Holzbau-Fachtagung (8. GraHFT'09): Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen*, holz.bau forschungs gmbh, Hrsg, Graz, 2009, E-1-E-22.
- [23] Holzbau Schweiz, Verband Schweizer Holzbau-Unternehmungen, *Holzbautabellen. Beispielsammlung*. Verfügbar: [http://issuu.com/lignum/docs/hbt\\_beispielsammlung](http://issuu.com/lignum/docs/hbt_beispielsammlung).
- [24] SIA 269/1:2011, *Erhaltung von Tragwerken - Einwirkungen*, 2011.
- [25] SIA 269/5:2011, *Erhaltung von Tragwerken - Holzbau*, 2011.
- [26] C. Fuhrmann, "Norm SIA 269/5. Erhaltung von Tragwerken - Holzbau" in *Dokumentation SIA, D 0240, Erhaltung von Tragwerken - Vertiefung und Anwendung: Unterlagen zu den Einführungskursen*, H. Bahnholzer, Hrsg, Zürich, 2011, S. 101–116.
- [27] European Commission, Joint Research Centre, "New European technical rules for the assessment and retrofitting of existing structures", European Commission, Joint Research Centre, Luxembourg, EUR, Scientific and technical research series, 2015.
- [28] UNI 11138:2004, *Cultural Heritage. Wooden Artefacts. Load-bearing structures of buildings - Criteria for the preliminary evaluation, design and execution of works*, 2004.
- [29] UNI 11119:2004, *Cultural Heritage. Wooden Artefacts. Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members*, 2004.
- [30] ONR 24009:2013, *Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Hochbauten*, 2013.
- [31] N. Scholten und T. Vrouwenvelder, "Eurocodes and Structural Safety of the Existing Buildings – Considering the Publication of the Dutch NEN 8700" in *Civil Engineering` 13: 4thInternational Scientific Conference Proceedings, Vol. 4*, 2013, S. 49–55.

- [32] T. Vrouwenvelder und N. Scholten, "Assessment Criteria for Existing Structures", *Structural Engineering International*, Band 20, Nr. 1, S. 62–65, 2010.
- [33] C. J. Turkstra, *Theory of Structural Design Decisions: Study No. 2*. Ontario, Canada, 1970.
- [34] M. Holický und D. Diamantidis, Hrsg, *Innovative methods for the assessment of existing structures*, 1. Aufl. Prague: Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, 2013.
- [35] R. Steiger und J. Köhler, "Development of new Swiss standards for the assessment of existing load bearing structures" in *Conference Meeting 41 of CIB-W18, Canada*, CIB-W18, Hrsg, 2008.
- [36] R. E. Melchers, *Structural reliability analysis and prediction*, 2. Aufl. Chichester: Wiley, 1999.
- [37] Ellingwood, B, R, "Reliability-based condition assessment and LRFD for existing structures", *Structural Safety*, Band 18, Nr. 2/3, S. 67–80, 1996.
- [38] D. Diamantidis, Hrsg, *Probabilistic assessment of existing structures: A publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS)*. Cachan: RILEM Publications, 2001.
- [39] J. Schneider und H. P. Schlatter, *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure*, 2. Aufl. Zürich, Stuttgart: vdf Hochschulverlag AG an der ETH; B.G. Teubner, 1996.
- [40] ISO 13822:2010(E), *Bases for design of structures - Assessment of existing structures*, 2010.
- [41] ISO 2394:2015(E), *General principles on reliability for structures*, 2015.
- [42] R. Caspeele, R. Steenbergen und M. Sýkora, "Partial factor methods for existing concrete structures: fib Bulletin no. 80", *Fédération internationale du béton, fib Bulletin 80*, 2016.
- [43] DIN EN 17121:2019-12, *Erhaltung des kulturellen Erbes – Historische Holzkonstruktionen – Leitlinien für die Bewertung vor Ort*, 2019.
- [44] E. Perria und M. Sieder, "Six-Steps Process of Structural Assessment of Heritage Timber Structures: Definition Based on the State of the Art", *Buildings*, Band 10, Nr. 6, S. 109, 2020.
- [45] DIN CEN/TS 17440:2020-10, *Bewertung und Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken*, 2020.
- [46] "Assessment of Existing Structures: The second draft of TS", CEN/TC 250 WG2, Apr. 2017.
- [47] FprCEN/TS 17440:2020, *Bewertung und Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken*.
- [48] M. Loebjinski, G. Linke, W. Rug und H. Pasternak, "Evaluation of existing timber structures – Current standards for the assessment and evaluation in Germany and Europe" in *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS)*, Guimarães, Portugal, 2019, S. 884–893.
- [49] M. Loebjinski, W. Rug und H. Pasternak, "Zuverlässigkeitsbewertung von Holzbauteilen im Bestand", *Bauingenieur*, Band 92, S. 65–73, 2017.
- [50] F. Stauder, "Zuverlässigkeitskonzept für bestehende Tragwerke im Wasserbau" Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2015.
- [51] M. Mayer, *Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1926.

- [52] J. Dahl und G. Spaethe, "Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauwerken", Berlin, Schriftenreihe der Bauforschung Reihe Technik und Organisation Heft 36, 1969.
- [53] R. Rackwitz, "Reliability Assessment of Multi-Member Structures" in *NATO ASI Series E, Applied sciences*, Band 215, *Reliability-based design of engineered wood structures: [proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures, Florence, Italy, 2 - 5 June 1991]*, J. Bodig, Hrsg, Dordrecht: Kluwer, 1992, S. 47–73.
- [54] Ellingwood, B, R, "Status of Reliability-Based Design in North America: Impact for Engineered Wood Constructions" in *NATO ASI Series E, Applied sciences*, Band 215, *Reliability-based design of engineered wood structures: [proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures, Florence, Italy, 2 - 5 June 1991]*, J. Bodig, Hrsg, Dordrecht: Kluwer, 1992, S. 3–19.
- [55] Murzewski. Janusz, *Sicherheit der Baukonstruktionen*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1974.
- [56] JCSS, *About JCSS*. Verfügbar: [http://www.jcss.byg.dtu.dk/About\\_JCSS](http://www.jcss.byg.dtu.dk/About_JCSS) (29.03.2016).
- [57] W. Rug, Hrsg, *Holzbau im Bestand: Ausgewählte historische Bemessungs- und Konstruktionsnormen von 1917 bis 2007*, 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [58] DIN, "Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen an bauliche Anlagen (Grusbau)", DIN, Berlin, Köln, 1981.
- [59] JCSS, "Probabilistic Model Code: Part 1 - Basis of Design", Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [60] JCSS, "Probabilistic Model Code: Part 2 - Load Models", Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [61] JCSS, "Probabilistic Model Code: Part 3 - Resistance Models", Joint Committee on Structural Safety, 2006.
- [62] E. J. Plate, *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1993.
- [63] G. Spaethe, *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*, 2. Aufl. Wien: Springer-Verlag, 1992.
- [64] A. M. Fischer, "Bestimmung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte zur semiprobabilistischen Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen im Bestand" Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2010.
- [65] M. H. Faber und M. G. Stewart, "Risk assessment for civil engineering facilities: Critical overview and discussion", *Reliability Engineering & System Safety*, Band 80, Nr. 2, S. 173–184, 2003.
- [66] S. G. Reid, "Risk Assessment", University of Sydney, School of Civil and Mining Engineering, Research Report 591, 1989.

- [67] R. Pottharst, G. König und H. Weigler, Hrsg, *Zur Wahl eines einheitlichen Sicherheitskonzepts für den konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin: Ernst, 1977.
- [68] A. Der Kiureghian und O. Ditlevsen, "Aleatory or epistemic? Does it matter?", *Structural Safety*, Band 31, S. 105–112, 2009.
- [69] R. Rackwitz und K. Zilch, "Zuverlässigkeit von Tragwerken" in *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit*, K. Zilch, C. J. Diederichs, R. Katzenbach, und K. J. Beckmann, Hrsg. 2. Aufl, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, S. 337–378.
- [70] E. Basler, "Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken", ETH Zurich, 1960.
- [71] C. A. Cornell, "A Probability-Based Structural Code", *ACI Journal*, Band 66, Nr. 12, S. 974–985, 1969.
- [72] S. Glowienka, "Zuverlässigkeit von Mauerwerkswänden aus großformatigen Steinen: Probabilistische Analyse von großformatigem Mauerwerk aus Kalksandstein und Porenbeton mit Dünnbettvermörtelung" Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2007.
- [73] A. M. Hasofer und N. C. Lind, "An Exact and Invariant First-Order Reliability Format", *American Society of Civil Engineers/ Engineering Mechanics Division*, Band 100, Nr. 1, S. 111–121, 1974.
- [74] I. Pertermann, R. Puthli, T. Ummenhofer und T. Vrouwenvelder, "Risikoorientierte Bemessung von Tragstrukturen: Bedeutungsbeiwert bei der Differenzierung der Zuverlässigkeit für unterschiedliche Schadens- bzw. Versagensfolgeklassen", *Stahlbau*, Band 81, Nr. 3, S. 212–218, 2012.
- [75] L. Fischer, *Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen: Ein Leitfaden für Bauingenieure, Architekten und Studenten*. Bautechnik Sonderheft. Berlin: Ernst & Sohn, 2001.
- [76] E. Paloheimo und M. Hannus, "Structural Design Based on Weighted Fractiles", *Journal of the Structural Division*, Band 100, Nr. St7, S. 1367–1378, 1974.
- [77] M. Holický, J. V. Retief, D. Diamantidis und C. Viljoen, "On Standardization of the Reliability Basis of Structural Design", Vancouver, 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, 2015.
- [78] G. Steck, "Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung" Dissertation, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1982.
- [79] W. Bosshard, "Structural Safety: a matter of decision and control", *IABSE surveys = Revue AIPC = IVBH Berichte*, Nr. 3, S. 9–79, 1979.
- [80] K. Dolinski, *First Order Second Moment Approximation in Reliability of Structural Systems; Critical Review and some Reliability Bounds*, 1982.
- [81] J. D. Sørensen, "Structural Reliability" Lecture Notes - JCSS Advanced Course on System Risk Modelling and Analysis, Aalborg University, 2018.

- [82] M. Hohenbichler, *Mathematische Grundlagen der Zuverlässigkeitsmethode Erster Ordnung, und einige Erweiterungen*, 1984.
- [83] A. J. Driving, "Zur Berechnung von Bauwerken mit rein ökonomischer Wertigkeit nach einer ökonomisch-probabilistischen Methode" in *Berechnung von Baukonstruktionen nach Grenzzuständen: Untersuchungen zur Berechnungsmethodik*, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1977.
- [84] O. Klingmüller und U. Bourgund, *Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1992.
- [85] M. Baravalle, "Risk and Reliability Based Calibration of Structural Design Codes" Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2017.
- [86] M. Sýkora, D. Diamantidis, M. Holicky und K. Jung, "Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects", *Structure and Infrastructure Engineering*, Nr. 13, S. 181–194, 2017.
- [87] J. Köhler, "Lecture 4: Evaluation of Structural Performance - Optimization", Norwegian University of Science and Technology, Training School COST Action FP1402: "Probabilistic Modelling and Reliability Assessment in Timber Engineering", 2016.
- [88] D. Diamantidis und P. Bazzurro, "Safety acceptance criteria for existing structures", Stanford University, USA, Conference: Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, 2007.
- [89] DIN EN 1990/NA:2010-12, *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*, 2010.
- [90] DIN EN 1995-1-1:2010-12, *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, 2010.
- [91] DIN EN 1995-1-1:2013-08/NA, *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, 2013.
- [92] T. Arnbjerg-Nielsen, M. Karlsson und O. Ditlevsen, "Calibration of Partial Safety Factors" in *Colloquium Delft.: Basis of Design and Actions on Structures. Background and application of Eurocode 1*, IABSE, Hrsg, 1996, S. 243–250.
- [93] P. Thoft-Christensen und M. J. Baker, *Structural reliability-theory and its applications*. Berlin: Springer, 1982.
- [94] I. Pertermann, R. Puthli, T. Ummenhofer und T. Vrouwenvelder, "Risikoorientierte Bemessung von Tragstrukturen - Geplante Nutzungsdauer", *Stahlbau*, Band 81, Nr. 7, S. 530–537, 2012.
- [95] I. Pertermann, R. Puthli und T. Ummenhofer, "Risikoorientierte Bemessung von Tragstrukturen - Kombinationsbeiwert für ständige Lasten", *Stahlbau*, Band 81, Nr. 10, S. 780–784, 2012.
- [96] D. Proske, "Zur Unsicherheit der Abschätzung natürlicher Einwirkungen", *Bautechnik*, Band 92, Nr. 12, S. 854–859, 2015.

- [97] H. O. Madsen, "Fundamentals of Reliability Assessment" in *NATO ASI Series E, Applied sciences*, Band 215, *Reliability-based design of engineered wood structures: [proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures, Florence, Italy, 2 - 5 June 1991]*, J. Bodig, Hrsg, Dordrecht: Kluwer, 1992, S. 21–45.
- [98] R. Rackwitz, "Einwirkungen auf Bauwerke" in *Der Ingenieurbau*, G. Mehlhorn, Hrsg, Berlin: Ernst, 1996, S. 73–416.
- [99] H. O. Madsen, S. Krenk und N. C. Lind, *Methods of structural safety*. Mineola, NY: Dover Publ, 1986.
- [100] E. J. Gumbel, *Statistics of extremes*. New York, NY: Columbia Univ. Press, 1958.
- [101] J. Grünberg, *Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau: Erläuterungen zu DIN 1055-100*, 1. Aufl. Berlin: Beuth, 2004.
- [102] D. Diamantidis und H. O. Madsen, "Evaluation of Load Combination Criteria in Structural Codes" in *IABSE Proceedings P-114/87*, S. 109–120.
- [103] J. Ferry Borges und M. Castanheta, *Structural Safety*, 2. Aufl. Lisbon, 1971.
- [104] W. Schobbe, *Konzept zur Definition und Kombination von Lasten im Rahmen der deutschen Sicherheitsrichtlinie*. Berlin, München: Ernst, 1982.
- [105] M. Badstube, W. Rug und R. Plessow, "Holzbau: 22. Jahrestag der Arbeitsgruppe "Timber Structures" des internationalen Rates für Bauforschung" Teil 2, Bauakademie Institut für Industriebau, Berlin, Bauforschung Baupraxis 280, 1989.
- [106] J. Nier, "Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an alten Bauhölzern und daraus abgeleitete Erkenntnisse zur Tragfähigkeitsbeurteilung (Dissertation)", Leipzig, 1994.
- [107] J. D. Sørensen, "Code Calibration and Timber Experience", Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Aalborg, COST Action E24, 2001.
- [108] DIN 68364:2003, *Kennwerte von Holzarten. Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*, 2003.
- [109] DIN EN 1991-1-1:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*, 2010.
- [110] DIN EN 338:2016-07, *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*, 2016.
- [111] F. Kollmann, *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Erster Band. Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit*: Springer-Verlag, 1951.
- [112] DIN 52182, *Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte*, 1976.
- [113] K.-H. Götz, D. Hoor, K. Möhler und J. Natterer, *Holzbau Atlas*. Augsburg: J. P. Himmer GmbH & Co. KG, 1978.
- [114] CIB, "Actions on Structures: Live Loads in Buildings", CIB Report W81, 1989.



- [115] R. Rackwitz, "Theoretische Grundlagen für die Bestimmung des Bemessungswertes von Bauteilwiderständen aus Versuchen", Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau (LKI) Technische Universität München, München, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, 1979.
- [116] Maes, Marc, A. und K. Breitung, "Reliability-Based Tail Estimation" in *IUTAM Symposium on Probabilistic Structural Mechanics: Advances in Structural Reliability Methods*, San Antonio, Texas, 1993, S. 335–346.
- [117] JCSS, "Probabilistic Model Code: Part 2 - Load Models" Part 2.12 Snow Load, Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [118] Comité Euro-Internatioanal du Béton (CEB), "Common unified Rules for Different Types of Construction and Materials", Bulletin d'information No 116-E Vol. 1, 1976.
- [119] DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12, *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*, 2010.
- [120] J. D. Sørensen, S. Svensson und B. D. Stang, "Reliability-based calibration of load duration factors for timber structures", *Structural Safety*, Band 27, S. 153–169, 2005.
- [121] D. Honfi, "Serviceability of floor loads", *Structural Safety*, Band 50, S. 27–38, 2014.
- [122] DIN EN 1991-1-3:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten*, 2010.
- [123] DIN EN 1991-1-3:2010-12/NA, *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten*, 2010.
- [124] J. Botha, Retief, Johan, V. und C. Viljoen, "Hierarchical Bayesian wind load models for reliability assessment and calibration of standards" in *Conference Proceedings, 12th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, Vienna: TU-Verlag, 2017, S. 2470–2479.
- [125] DIN EN 1991-1-4:2010-12, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*, 2010.
- [126] DIN EN 1991-1-4:2010-12/NA, *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*, 2010.
- [127] G. König und D. Hosser, "Praktische Beispiele und Hinweise zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen nach den Empfehlungen des NABau", *Bauingenieur*, Band 57, S. 459–467, 1982.
- [128] P. B. Lourenço, H. S. Sousa, R. D. Brites und L. C. Neves, "In situ measured cross section geometry of old timber structures and its influence on structural safety", *Mater Struct*, Band 46, Nr. 7, S. 1193–1208, 2013.

- [129] M. Hansen, *Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004.
- [130] T. Vrouwenvelder, "Reliability Based Code calibration - The use of the JCSS Probabilistic Model Code", Joint Committee of Structural Safety, Workshop on Code Calibration, Zürich, 2001.
- [131] J. Köhler, J. D. Sørensen und M. H. Faber, "Probabilistic modelling of timber structures", *Structural Safety*, Band 29, Nr. 4, S. 255–267, 2007.
- [132] JCSS, "Probabilistic Model Code: Part 2 - Load Models" Part 2.13 Wind, Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [133] T. Vrouwenvelder, "Developments towards full probabilistic design codes", *Structural Safety*, Band 24, S. 417–432, 2002.
- [134] M. H. Faber, J. Köhler und J. D. Sørensen, "Probabilistic modelling of graded timber material properties", *Structural Safety*, Band 26, S. 295–309, 2004.
- [135] W. Rug, "EC 5 und Bauen im Bestand" in *Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT2014, Bauen im Bestand*, 2014, S. 129–155.
- [136] K. Lißner und W. Rug, *Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitt der DIN 1052: August 2004*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005.
- [137] K. Lißner und W. Rug, "Ergänzende Erläuterungen für Bauten im Bestand" in *Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*, H. J. Blaß, Hrsg. 2. Aufl: DGfH Innovations- und Service GmbH, 2004, S. 201–217.
- [138] H. Brüninghoff und P. Dietsch, Hrsg, *Assessment of timber structures: COST action E55 - Modelling of the performance of timber structures*. Aachen: Shaker Verlag, 2010.
- [139] R. Steiger, J. Köhler, G. Fink und P. Dietsch, "General Procedures in the Assessment of Structures" in *Berichte aus dem Bauwesen, Assessment of timber structures: COST action E55 - Modelling of the performance of timber structures*, H. Brüninghoff und P. Dietsch, Hrsg, Aachen: Shaker Verlag, 2010, S. 10–13.
- [140] G. Linke, W. Rug und H. Pasternak, "Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden: Bericht zum Stand der Technik", *Bauingenieur*, Band 92, Nr. 5, S. 229–236, 2017.
- [141] P. Hoffmeyer, "Holz als Baustoff" in *Holzbauwerke nach Eurocode 5. Bemessung und Baustoffe. Step 1*, Informationsdienst Holz, Hrsg, Düsseldorf: Fachverlag Holz, 1995, S. 1–22.
- [142] DIN 4074-1:2012-06, *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz*, 2012.
- [143] DIN 4074-5:2008-12, *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz*, 2008.

- [144] P. Glos, "Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen" Dissertation, Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, 1978.
- [145] M. H. Kessel, M. Huse, R. Marutzky und B. Plinke, "Festigkeitsortierung von Kantholz mit Ultraschall, Anforderungen an Geräte und Personal, Vorbereitung zur Zulassung nach DIN 4074/prEN 519", Labor für Holztechnik LHT, Fachhochschule Hildesheim/Holzminden, Hildesheim und Braunschweig, 1997.
- [146] M. Blosen und U. Lohmann, *Holzlexikon: 15700 Stichwörter*, 4. Aufl. Hamburg: Nikol, 2015.
- [147] F. Kollmann, "Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper", Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Forschungsbericht 520, 1967.
- [148] M. H. Kessel und J. L. Sandoz, "Zur Effizienz der Festigkeitssortierung von Fichtenkantholz: Vergleich europäischer Normen", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Nr. 47, S. 279–284, 1989.
- [149] J. Köhler, "Reliability of Timber Structures", Institute of Structural Engineering. Swiss Federal Institute of Technology, 2007.
- [150] M. K. Sandomeer und R. Steiger, "Potential der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz" in *Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale: Kapitel 05 – Forst und Sägeindustrie*, Zukunft Holz, Hrsg, 2009, S. 361–370.
- [151] P. Glos, "Holz im technischen Einsatz, Perspektiven der Sortierung und Qualitätssicherung" in *Internationales Holzbauforum*, Garmisch-Partenkirchen, 1995.
- [152] G. Linke, W. Rug und H. Pasternak, "Strength grading of timber in historic structures - material testing concerning the application of the ultrasonic-time-of-flight measurement" in *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATiS)*, Guimarães, Portugal, 2019, S. 589–598.
- [153] M. Loebjinski, "Nachweis der Standsicherheit von bestehenden Holzkonstruktionen mit modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten - unveröffentlicht" Masterarbeit (unveröffentlicht), Institut für Bauingenieurwesen, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus, 2015.
- [154] M. Piazza und M. Riggio, "Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures", *Journal of Building Appraisal*, Band 4, Nr. 3, S. 267–296, 2008.
- [155] Sousa, Hélder Manuel da Silva e, "Methology for Safety Evaluation of Existing Timber Elements" Dissertation, Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2013.
- [156] H. J. Blaß und M. Frese, *Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl, 2002.

- [157] R. H. Leicester, "The Development of LSD Codes for Structural Timber" in *NATO ASI Series E, Applied sciences*, Band 215, *Reliability-based design of engineered wood structures: [proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures, Florence, Italy, 2 - 5 June 1991]*, J. Bodig, Hrsg, Dordrecht: Kluwer, 1992, S. 91–124.
- [158] P. Glos und R. Diebold, "Einfluss verschiedener Sortierbedingungen auf die Biegefestigkeit von Bauholz - Kantholz: Abschlußbericht 84 510", Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V, München, 1987.
- [159] R. Apitz, "Beitrag zur Bestimmung der Festigkeitskennwerte von Bauholz bei Biegebeanspruchung für eine Bemessung nach der Methode der Grenzzustände" Dissertation, Ingenieurhochschule Wismar, Wismar, 1985.
- [160] DIN EN 384:2019-02, *Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*, 2019.
- [161] K. Lißner und W. Rug, "Nachweisführungen zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in historischen Gebäuden" in *Europäischer Sanierungskalender*, 2007, S. 251–276.
- [162] M. Hösl und P. Dietsch, "Assessment of Timber Structures" in *Berichte aus dem Bauwesen, Assessment of timber structures: COST action E55 - Modelling of the performance of timber structures*, H. Brüninghoff und P. Dietsch, Hrsg, Aachen: Shaker Verlag, 2010, S. 14–21.
- [163] R. Steiger, "Biege-, Zug und Druckversuche an Schweizer Fichtenholz", Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Zürich, 1995.
- [164] M. H. Kessel und J. L. Sandoz, "Zur Effizienz der Festigkeitssortierung von Fichtenkantholz: Einfluss der Klassengrenzen der Sortierparameter", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Band 47, S. 279–284, 1989.
- [165] G. Fink und J. Köhler, "Probabilistic modelling of the tensile related material properties of timber boards and finger joint connections", *Eur. J. Wood. Prod*, Band 75, S. 335–346, 2010.
- [166] R. Steiger, "Versuche an Fichten-Kanthölzern: Biegemoment-Normalkraft-Interaktion", Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Zürich, IBK-Bericht 209, 1995.
- [167] R. Steiger, "Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung: Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall" Promotionsarbeit, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Zürich, 1996.
- [168] P. Glos und N. Burger, "Einfluss der Holzabmessungen auf die Zugfestigkeit von Bauschnittholz", Institut für Holzforschung der Universität München, 1995.

- [169] J. Köhler, A. Frangi und R. Steiger, "On the role of stiffness properties for ultimate limit state design of slender columns" in *Conference Meeting 41 of CIB-W18, Canada*, CIB-W18, Hrsg, 2008, S. 1–10.
- [170] K. Kránitz, W. Sonderegger, C.-T. Bues und P. Niemz, "Effects of aging on wood: a literature review", *Wood Sci Technol*, Band 50, Nr. 1, S. 7–22, 2016.
- [171] W. Mönck, *Schäden an Holzkonstruktionen*, 2. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH, 1995.
- [172] W. Rug und A. Seemann, "NDT. Strength of old timber: Test cores from 50-400 year old timber indicates strength of old timbers corresponds to that of new", *Building Research and Information*, Band 19, S. 31–37, 1991.
- [173] U. Walthelm, "Experimentell ermittelte Festigkeits- und Brucheigenschaften von Holz in alten Bauwerken", *Bauingenieur*, Band 63, S. 273–275, 1988.
- [174] K. Erler, *Alte Holkonstruktionen. Beurteilen und Sanieren*. Berlin, München: Verlag für Bauwesen GmbH, 1993.
- [175] R. Görlacher, *Historische Holztragwerke. Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen*. Karlsruhe: Engelhardt & Bauer Druck- und Verlagsgesellschaft, 1999.
- [176] L. W. Wood, "Relation of Strength of Wood to Duration of Load", Forests Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA 1951.
- [177] R. G. Pearson, "The Effect of Duration of Load on the Bending Strength of Wood", *Holzforschung*, Band 26, Nr. 4, S. 153–158, 1972.
- [178] H. J. Larsen und E. Theilgaard, "Code Rules Concerning Strength and Loading Time" in *Meeting seven. Stockholm, Sweden*, CIB-W18, Hrsg, 1977.
- [179] B. Madsen und J. D. Barret, "Time-Strength Relationship for Lumber", The University of British Columbia. Department of Civil Engineering, Vancouver, British Columbia, Structural Research Series 13, 1976.
- [180] J. Köhler und G. Fink, "Aspects of code based design of timber structures" in *Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research: Meeting 48*, 2015, S. 391–402.
- [181] C. C. Gerhards, "Time-Related Effects of Loading on Wood Strength: A Linear Cumulative Damage Theory", *Wood Science*, Band 11, Nr. 3, S. 139–144, 1979.
- [182] R. O. Foschi und Z. C. Yao, "Another look at three duration of load models" in *Proceedings of the 19th meeting international council for research and innovation in building and construction working commission W18 - timber structures*, CIB-W18, Florenz, Italien, 1986.
- [183] L. F. Nielsen, "Lifetime and residual strength of wood subjected to static and variable load. Part II: Applications and design", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Band 58, S. 141–152, 2000.
- [184] P. Niemz, "Über einige Erkenntnisse zum Kriechverhalten von Vollholz", *Holztechnologie*, Band 21, S. 195–199, 1980.

- [185] H. S. Sousa, J. M. Branco und P. B. Lourenço, "A Holistic Methodology for Probabilistic Safety Assessment of Timber Elements Combining Onsite and Laboratory Data", *International Journal of Architectural Heritage*, Band 10, Nr. 5, S. 526–538, 2015.
- [186] W. Rug und A. Seemann, "Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen", *Holztechnologie*, Band 30, Nr. 2, S. 69–73, 1989.
- [187] G. E. Marchand, "Vergleichende Untersuchungen des Biegeverhaltens von kleinen fehlerfreien Fichtenholzproben und großen Fichtenbalken" Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1982.
- [188] J. Ehlbeck und R. Görlacher, "Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an altem Konstruktionsholz" in *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke: Baugefüge, Konstruktionen, Werkstoffe*, F. Wenzel, Hrsg, Berlin: Ernst, 1988, S. 235–248.
- [189] J. Natterer, G. Marchand und W. Fux, "Statistisch gesicherte Untersuchungen von Verformungskenngrößen Biegebeanspruchter Bauteile aus Schweizer Holz", École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1982.
- [190] R. Apitz, "Zum Festigkeitsverhalten von Bauholz bei Biegebeanspruchung", Berlin, Mitteilung Nr 1/86 des Fachausschusses Ingenieurholzbau bei der KdT und des Institutes für Industriebau, 1986.
- [191] M. Kiesel, "Stellungnahme zu den Festigkeitsklassen Eurocode 5 in Auswertung eines stochastischen Modells der Holzsortierung: 22. Jahrestagung der AG "Timber Structures" Berlin 25.-28. Sept. 1989, Folge 2" in *Bauforschung - Baupraxis*, Bauakademie der DDR, Bauinformation Berlin, Hrsg, 1990, S. 8–11.
- [192] N. Burger, *Einfluß der Holzabmessungen auf die Festigkeit von Schnittholz unter Zugbeanspruchung in Faserrichtung*. Zugl.: München, Techn. Univ, Diss, 1998. Aachen: Shaker, 1998.
- [193] P. Glos, R. Diebold und A. Schleifer, "Höherwertige Nutzung von Bauholz aus einheimischen Laub- und Nadelhölzern durch maschinelle Sortierverfahren: Abschlussbericht 98511 and die Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF) über ds Projekt "X 32"", Institut für Holzfoschung der Universität München, München, 2000.
- [194] A. Ranta-Maunus, "Strength of European timber: Part 1. Analysis of growth areas based on existing test results", VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
- [195] A. Ranta-Maunus, J. K. Denzler und P. Stapel, "Strength of European Timber: Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project", VTT Technical Research Centre of Finland, 2011.
- [196] P. Stapel, "Strength grading of timber with regard to different grading methods" Dissertation, Fachgebiet Holztechnologie, Technische Universität München, München, 2013.

- [197] G. Linke und S. Mühlisch, "Versuchsbericht: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand - Vergleichende Materialuntersuchungen an Neuholz -" Holzart: Kiefer (PNSY) (unveröffentlicht), VHÖB - Versuchsanstalt für Holzbau & ökologische Bautechnik UG, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde, Jan. 2019.
- [198] G. Linke und S. Mühlisch, "Versuchsbericht: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand - Vergleichende Materialuntersuchungen an Neuholz -" Holzart: Fichte (PCAB) (unveröffentlicht), VHÖB - Versuchsanstalt für Holzbau & ökologische Bautechnik UG, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde, Mar. 2019.
- [199] O. Graf, "Aus Versuchen mit Bauholz und mit hölzernen Bauteilen", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Band 4, Nr. 10, S. 347–359, 1941.
- [200] P. Glos, "Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke. Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung", Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau (LKI). Technische Universität München, München, 1981.
- [201] J. D. Sørensen und P. Hoffmeyer, "Statistical Analysis of Data for Timber Strengths", Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Structural Reliability Theory 206, 2001.
- [202] M. Kiesel, "Beitrag zur Ermittlung der Verteilungsfunktion der Festigkeitseigenschaften des Bauholzes unter besonderer Berücksichtigung des Festigkeitsverhaltens bei der Druckbeanspruchung für eine Bemessung nach Der Methode der Grenzzustände", Technische Hochschule Wismar, 1988.
- [203] W. Rug, M. Badstube und W. Kofent, "Holzbau: 22. Jahrestag der Arbeitsgruppe "Timber Structures" des Internationalen Rates für Bauforschung" Teil 1, Bauakademie Institut für Industriebau, Berlin, Bauforschung Baupraxis 279, 1989.
- [204] Z. Li, M. Loebjinski und H. Pasternak, "Statistischer Maßstabeffekt und seine Bedeutung für die Zuverlässigkeit im Stahlbau, Teil 2- Zuverlässigkeitsanalyse", *Bautechnik*, 2020.
- [205] P. Glos und B. Lederer, "Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte", Technische Universität München; Institut für Holzforschung, München 98508, 2000.
- [206] G. Linke und S. Mühlisch, "Versuchsbericht: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand - Vergleichende Materialuntersuchungen an Neuholz -" Holzart: Eiche (QCXE) (unveröffentlicht), VHÖB - Versuchsanstalt für Holzbau & ökologische Bautechnik UG, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde, Jan. 2019.
- [207] G. Linke, W. Rug und H. Pasternak, "Strength grading of structural timber in existing structures – Study on the apparatus supported grading with the ultrasonic time-of-flight measurement (in

- preparation)" in *Proceedings of the 4th International Conference on Protection of Historical Constructions (PROHITECH)*, Athens, Greece, 2020.
- [208] H. S. Sousa, J. S. Machado, J. M. Branco und Lourenço, Paulo, B, "Onsite assessment of structural timber members by means of hierarchical models and probabilistic models", *Construction and Building Materials*, Band 101, S. 1185–1196, 2015.
- [209] R. Apitz, "Vorschlag von Festigkeitsklassen für Nadel-schnittholz und Möglichkeiten der Sortierung" in Heft 205, *Bauforschung - Baupraxis*, Bauakademie der DDR, Hrsg, 1987, S. 22–24.
- [210] R. Apitz, "Ermittlung von Festigkeitswerten für Vollholz bei der Beanspruchungsart Biegung durch Versuche: Zwischenbericht zum Teilthema", Sektion Technologie des Bauwesens, WB Bemessung von Baukonstruktionen, Ingenieurhochschule Wismar, Wismar, 1982.
- [211] M. Kiesel, "Beitrag zur Verteilungsfunktion der Festigkeitseigenschaften des Nadelholzes bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung" Dissertation, Technische Hochschule Wismar, 1989.
- [212] S. Pöhlmann und R. Rackwitz, "Zur Verteilungsfunktion von Werkstoffeigenschaften bei kontinuierlich durchgeführten Sortierungen", *Materialprüfung*, Band 23, Nr. 8, S. 277–278, 1981.
- [213] DIN 14081-1:2011-05, *Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, 2011.
- [214] DIN EN 14358:2016-11, *Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*, 2016.
- [215] L. Fischer, "Charakteristische Werte - ihre Bedeutung und Berechnung: Diskussion einiger aktueller Sachverhalte zur neuen Normengeneration", *Bauingenieur*, Nr. 78, S. 179–186, 2003.
- [216] M. Schäper, "Zur Anwendung der logarithmischen Normalverteilung in der Materialprüfung", *Bautechnik*, Band 87, Nr. 9, S. 541–549, 2010.
- [217] M. Loebjinski, W. Rug und H. Pasternak, "The Influence of Improved Strength Grading In Situ on Modelling Timber Strength Properties", *Buildings*, Band 10, Nr. 2, S. 30, [https://www.mdpi.com/journal/buildings/special\\_issues/Structural\\_Assessment\\_Timber\\_Structures](https://www.mdpi.com/journal/buildings/special_issues/Structural_Assessment_Timber_Structures), 2020.
- [218] DIN 4074-3:2008-12, *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 3: Apparate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von Schnittholz; Anforderungen und Prüfung*.
- [219] J. L. Sandoz, "Grading of Construction timber by ultrasound", *Wood Science and Technology*, Band 23, S. 95–108, 1989.
- [220] M. H. Kessel, B. Plinke, R. Augustin und M. Huse, "Strength grading of construction timber with large cross sections" in *Proceedings: WCTE '98; World Conference on Timber Engineering, August 17 - 20, 1998, Montreux, Switzerland*, J. Natterer, Hrsg. 1. Aufl, Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998, S. 557–562.



- [221] J. L. Sandoz und Y. Benoit, "Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement" in *COST E 53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products*, Waschau, Polen, 2007.
- [222] A. Hanhijärvi, A. Ranta-Maunus und G. Turk, *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques: Report of the Combigrade-project - phase 1*. Espoo: VTT, 2005.
- [223] M. Holický und Vorlíček, "Statistical procedures for design assisted by testing" in *Colloquium Delft.: Basis of Design and Actions on Structures. Background and application of Eurocode 1*, IABSE, Hrsg, 1996, S. 317–326.
- [224] S. Svensson, "Lecture 10: Measurements and Tests" Lecture Notes - Training School COST Action FP 1402: "Probabilistic Modelling and Reliability Assessment in Timber Engineering, Trondheim / Skarøya, Norway, Sep. 2016.
- [225] I. van Straalen und T. Vrouwenvelder, "Comparison of statistical evaluation results" in *Colloquium Delft.: Basis of Design and Actions on Structures. Background and application of Eurocode 1*, IABSE, Hrsg, 1996, S. 327–334.
- [226] M. Loebjinski, "Untersuchung des Einflusses der Stichprobenzahl auf die Aktualisierung der Holzfestigkeit bei Bayes'schem Updating" in *Holzbau Forschung + Praxis: Doktorandenkolloquium 05. - 06. März 2020*, U. Kuhlmann, J. Gauß, S. Mönch, und J. Töpler, Hrsg, Stuttgart, 2020, S. 161–168.
- [227] M. Baravalle und J. Köhler, "A framework for estimating the implicit safety level of existing design codes" in *Conference Proceedings, 12th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, Vienna: TU-Verlag, 2017, S. 1037–1046.
- [228] J. Köhler und G. Fink, "Timber specific code calibration" in *Berichte aus dem Bauwesen, Basis of Design Principles for Timber Structures: A state-of-the-art report by COST Action FP1402/ WG 1*, G. Fink, D. Honfi, J. Kohler, und P. Dietsch, Hrsg. 1. Aufl, Herzogenrath: Shaker, 2018, S. 29–41.
- [229] M. Baravalle, M. Mikoschek, F. Colling und J. Köhler, "Calibration of simplified safety formats for structural timber design", *Construction and Building Materials*, Band 152, S. 1051–1058, 2017.
- [230] J. Köhler, "Probabilistic Models for the Timber Material Properties of Interest" in *Berichte aus dem Bauwesen, Assessment of timber structures: COST action E55 - Modelling of the performance of timber structures*, H. Brüninghoff und P. Dietsch, Hrsg, Aachen: Shaker Verlag, 2010, S. 110–118.
- [231] S. M. Holzer, *Statische Beurteilung historischer Tragwerke: Band 2: Holzkonstruktionen*. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn a Wiley brand, 2015.

- [232] M. Holický, "Operational approach to assessment of existing structures" in *Conference Proceedings, 12th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, Vienna: TU-Verlag, 2017, S. 2511–2520.
- [233] M. Matousek und J. Schneider, *Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems von Bauwerken*. Basel, s.l.: Birkhäuser Basel, 1976.
- [234] D. E. Allen, "Safety criteria for the evaluation of existing structures", *IABSE reports*, Nr. 67, S. 77–84, 1993.
- [235] L. Schueremans, *Probabilistic Evaluation of Structural Unreinforced Masonry*, 2001.
- [236] Construction Industry Research and Information Association, "Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes: seminar edition" 63, 1977.
- [237] L. Schueremans und D. van Gemert, "Assessing the safety of existing structures: Reliability based assessment framework, examples and application", *Journal of Civil Engineering and management*, Band X, Nr. 2, S. 131–141, 2004.
- [238] R. Steenbergen, M. Sýkora, D. Diamantidis, M. Holický und T. Vrouwenvelder, "Economic and human safety reliability levels for existing structures", *Structural Concrete*, Band 16, Nr. 3, S. 323–332, 2015.
- [239] D. Diamantidis und M. Holický, "Reliability Differentiation in the Eurocodes", Czech National Agency of the Leonardo da Vinci Programme (LdV NA), CZ/08/LLP-LdV/TOI/134020 "Transfer of Innovations, 2010.
- [240] D. Diamantidis, M. Holický und K. Jung, "Assessment of existing structures - On the applicability of the JCSS recommendations" in *Aspects of Structural Reliability*, M. H. Faber, T. Vrouwenvelder, und K. Zilch, Hrsg, München: Herbert Utz Verlag, 2007, S. 15–18.
- [241] D. Diamantidis, M. Holický und M. Sýkora, "Reliability and Risk Acceptance Criteria for Civil Engineering Structures" in Vol. 16, No. 2, paper #8, *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava: Civil Engineering Series*, 2016.
- [242] J. Köhler, "Die Aktualisierung als zentrales Element in den Erhaltungsnormen - Aspekte der Probabilistik" in *Dokumentation SIA, D 0240, Erhaltung von Tragwerken - Vertiefung und Anwendung: Unterlagen zu den Einführungskursen*, H. Bahnholzer, Hrsg, Zürich, 2011, S. 33–36.
- [243] M. Loebjinski, J. Köhler, W. Rug und H. Pasternak, "Development of an optimisation-based and practice orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures" in *6th International Symposium on Life-cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering (IALCCE)*, London: CRC Press, 2019, S. 353–360.
- [244] M. Loebjinski, G. Linke, W. Rug und H. Pasternak, "Redevelopment of a wooden roof construction under preservation order" in *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS)*, Guimarães, Portugal, 2019, S. 912–921.

- [245] H. Raiffa und R. Schlaifer, *Applied statistical decision theory*. New York, Chichester: Wiley, 2000.
- [246] A. Goris und J. Voigt, *Stahlbetonbau-Praxis - Tragwerksplanung im Bestand: Band 3: Werterhaltung - Historische Baukonstruktionen und Regelwerke - Schutz und Instandsetzung - Bewertung von Betontragwerken - Verstärkungen und Ertüchtigungen - Befestigungstechnik Bauwerk-Basis-Bibliothek*, 2. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [247] "Eurocode - Basis of structural and geotechnical design: Working document", CEN/TC 250 WG 2 prEN 1990:2018.
- [248] J. Scheer, H. Pasternak und M. Hofmeister, "Gebrauchstauglichkeit - (k)ein Problem?", *Bauingenieur*, Band 69, S. 99–106, 1994.
- [249] B. Kasal und T. Tannert, *In situ Assessment of Structural Timber: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST*: Springer Netherlands, 2011.
- [250] H. J. Blaß und M. Frese, "Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung: Forschungsbericht", Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, 2002.
- [251] W. Rug, "Instandsetzung des Holztragwerks einer historischen Glashütte", *Bautechnik*, Band 75, Nr. 8, 559-565, 1998.
- [252] D. Diamantidis, M. Holický und M. Sýkora, "Target Reliability Levels Based on Societal, Economic and Environmental Consequences of Structural Failure" in *Conference Proceedings, 12th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, Vienna: TU-Verlag, 2017, S. 644–653.
- [253] R. Fahrni, G. de Sanctis und A. Frangi, "Comparison of reliability- and design-based code calibrations", *Structural Safety*, Band 88, S. 102005, 2021.
- [254] C. C. Gerhards, "Effect of duration of loading on strength of wood and wood-based materials", Forests Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA, 1977.
- [255] K. Pearson, "Contribution to the Mathematical Theory of Evolution - II. Skew Variation in Homogeneous Material", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, S. 343–414, [https://bayes.wustl.edu/Manual/Pearson\\_1895.pdf](https://bayes.wustl.edu/Manual/Pearson_1895.pdf), 1895.
- [256] T. W. Anderson und D. A. Darling, "Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Processes", *The Annals of Mathematical Statistics*, Band 23, Nr. 2, S. 193–212, [https://www.jstor.org/stable/2236446?seq=1#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/2236446?seq=1#metadata_info_tab_contents), 1952.
- [257] Y. Ciupack, "Untersuchungen zur Bedeutung und Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen am Beispiel von Stahlklebverbindungen" Dissertation, Fachgebiet Stahl- und Holzbau, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2016.

- [258] K. Stange, T. Deutler und P.-T. Wilrich, *Bayes-Verfahren: Schätz- und Testverfahren bei Berücksichtigung von Vorinformationen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1977.
- [259] G. Fink, "Lecture 11: Assessment of Timber Structures" Lecture Notes - Training School COST Action FP1402: "Probabilistic Modelling and Reliability Assessment in Timber Engineering", Trondheim / Skarøya, Norway, Sep. 2016.
- [260] W. Struck, "Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau: Forschungsbericht 58", Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin, 1979.
- [261] J. Köhler, "Quantitative Assessment - Updating" in *Berichte aus dem Bauwesen, Assessment of timber structures: COST action E55 - Modelling of the performance of timber structures*, H. Brüninghoff und P. Dietsch, Hrsg, Aachen: Shaker Verlag, 2010, S. 120–134.
- [262] M. Schubert, "Lecture 09: Probabilistic models/ Parameter estimation" Lecture Notes - Training School COST Action FP1402: "Probabilistic Modelling and Reliability Assessment in Timber Engineering", Trondheim / Skarøya, Norway, Sep. 2016.
- [263] P. Glos und R. Spengler, "Festigkeitseigenschaften von Bauschnittholz aus gesunden und unterschiedlich stark erkrankten Fichten", Institut für Holzforschung der Universität München, 1985.
- [264] P. Niemz, *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co, 1993.
- [265] P. Glos und A. Gamm, "Untersuchung der Festigkeit von Fichten-Bauholz nach Schädlingsbefall infolge von Waldschäden: Abschlussbericht 85502", Institut für Holzforschung der Universität München, Forschungsbericht im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München, 1987.
- [266] R. Apitz, "Ermittlung von Festigkeitswerten für Vollholz bei der Beanspruchungsart Biegung durch Versuche: Zwischenbericht zum Teilthema", Ingenieurhochschule Wismar, Sektion Technologie des Bauwesens, WB Bemessung von Baukonstruktionen, Wismar, 1982.
- [267] Dlubal Software GmbH, *Schneelastzonen, Windzonen und Erdbebenzonen*. Verfügbar: <https://www.dlubal.com/de/loesungen/online-dienste/schnee-wind-erdbeben-lastzonen>.

## IV. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Struktur der Arbeit – schematische Darstellung.....	3
Abb. 2.1: Einzelaspekte für die Beurteilung der Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in Altbauten aus <i>Lißner &amp; Rug</i> [10] .....	5
Abb. 2.2: Illustration des Dreiphasenansatzes aus <i>Diamantidis</i> [38] und <i>Schneider &amp; Schlatter</i> [39]..	21
Abb. 2.3: Benötigte Schritte für die Bestandsaufnahme und die Planung von Interventionsmaßnahmen bei historischen Holzkonstruktionen aus <i>Cruz et al.</i> [9] .....	23
Abb. 2.4: Generic procedure of assessment and retrofitting of existing structures aus <i>JRC Science and Policy Report</i> [27] (Kapitelverweise beziehen sich auf Kapitel im zitierten Bericht) .....	26
Abb. 2.5: Ausgewählte Regelwerke zum Bauen im Bestand – chronologische Darstellung, überarbeitet aus <i>Loebjinski, Linke, Rug &amp; Pasternak</i> [48] .....	31
Abb. 3.1: Einwirkung und Widerstand im eindimensionalen Fall .....	39
Abb. 3.2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit Grenzzustandsgerade, Zuverlässigkeitsindex, Wichtungsfaktoren aus <i>Pertermann, Puthli, Ummenhofer &amp; Vrouwenvelder</i> [74] .....	40
Abb. 3.3: Verteilungsdichten und Gleichung des Grenzzustandes im Raum standardisierter Zufallsgrößen (y-Raum) im zweidimensionalen Fall aus <i>Spaethe</i> [63] .....	41
Abb. 3.4: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden, aus <i>DIN EN 1990:2010-12 Anhang C</i> [16] .....	43
Abb. 3.5: Ablauf zur iterativen Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$ in Anlehnung an <i>Schneider &amp; Schlatter</i> [39] .....	46
Abb. 3.6: Abnahme des relativen Materialverbrauchs mit wachsender Flexibilität des Normformats bei gleicher zuverlässiger Versagenswahrscheinlichkeit aus <i>Spaethe</i> [63] .....	52
Abb. 4.1: Beispielhafte Zufallsfolge für einen Lastprozess mit diskreten Lastdauern aus <i>Spaethe</i> [63] .....	60
Abb. 4.2: Stetiger Lastprozess mit Niveaurate und Verteilungsfunktionen der Momentan- und Maximalwerte in Anlehnung an <i>Spaethe</i> [63] und <i>Glowienka</i> [72].....	61
Abb. 4.3: Erneuerungsprozess mit Pausen in Anlehnung an <i>Spaethe</i> [63] .....	62
Abb. 4.4: Lastkombination bei Rechteckprozessen aus <i>Schobbe</i> [104] .....	65
Abb. 4.5: Rohdichte-Feuchtigkeits-Schaubild für Holz aus <i>Kollmann</i> [111].....	70
Abb. 4.6: Typische Nutzlastverteilung im Hochbau aus <i>Rackwitz</i> [98] .....	72
Abb. 4.7: Approximation der Gumbelverteilung an die empirischen Verteilung für die Nutzung „Lobby“ im Bezugs-zeitraum $T_{ref} = 1a$ ohne Gewichtung (links) und mit Gewichtung (rechts), $A = A_0$ .....	77
Abb. 4.8: Charakteristischer Geschwindigkeitsdruck aus <i>DIN EN 1991-1-4/NA</i> und vereinfachtes stochastisches Modell.....	84

Abb. 5.1: Normstruktur zur Festigkeitssortierung und zur Festlegung charakteristischer Werte im Holzbau .....	90
Abb. 5.2: Abschnittsmodell für die Variation der Biegefestigkeit in Längsrichtung aus <i>JCSS</i> <i>Probabilistic Model Code</i> [61] .....	100
Abb. 5.3: Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom Winkel zur Faserrichtung, berechnet am Beispiel C24 (mit KLED kurz, NKL 1), Werte nach <i>DIN EN 338:2016-07</i> [110], Berechnung nach <i>DIN E</i> <i>N1995-1-1</i> [90] bzw. <i>DIN EN 1995-1-1/NA</i> [91] .....	101
Abb. 5.4: Zeitfestigkeit von Holz in Abhängigkeit von der Belastungsdauer (x-Achse logarithmiert)	104
Abb. 5.5: Phasen des Kriechens aus <i>Niemz</i> [184] .....	106
Abb. 5.6: Ganzheitliche Methodik zur Standsicherheitsanalyse, Bewertung und Aktualisierung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen unter Kombination verschiedener Informationsebenen aus <i>Sousa, Branco &amp; Lourenço</i> [185] .....	109
Abb. 5.7: Arbeitsschritte zur Entwicklung eines probabilistischen Widerstandsmodells für Bauholz	110
Abb. 5.8: Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Biegefestigkeit für sortiertes Bauholz und fehlerfreies Holz, logarithmische Normalverteilung; fehlerfrei : Fichte, Kiefer, Tanne, aus <i>DIN 68364:2003-05</i> [108]; Bauholz: charakt. Wert aus <i>DIN EN 338:2016-07</i> [110] <i>Festigkeitsklasse C24</i> , $V_R$ nach <i>JCSS PMC</i> [61] .....	114
Abb. 5.9: Einfluss eines Fehlers auf Versuchsdaten, simuliert mit $x_k = 24 \text{ N/mm}^2$ , $V_x = 0,25$ (LN), $m_\tau = 0$ $\text{N/mm}^2$ , $\sigma_\tau = \sigma_x$ (N), Verteilungsdichtefunktion mit Histogramm (a) und kumulative Verteilungsfunktion (b) .....	120
Abb. 5.10: Lognormalverteilung und Weibullverteilung bei identischem charakteristischem Wert (5%- Quantil) für $V_R = 0,2$ (a) und $V_R = 0,3$ (b) .....	121
Abb. 5.11: Anpassung im unteren Wertebereich der Lognormalverteilung mittels gewichteter Methode der kleinsten Fehlerquadrate für den Datensatz <i>Fichte, Festigkeitsklasse C30</i> , <i>Sortierung mit indirekter US Messung</i> aus <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [198] (a) Verteilungsdichtefunktion, b) Verteilungsfunktion) (Biegefestigkeit) .....	123
Abb. 5.12: Anpassung im unteren Wertebereich der Lognormalverteilung und der Weibullverteilung mittels zensierter Maximum-Likelihood-Methode, vergleichend Lognormalverteilung aus Berechnung der Momente aus der Stichprobe ohne Gewichtung („LN MOM“) Datensatz: <i>Fichte, Festigkeitsklasse C30, Sortierung mit indirekter US Messung</i> aus <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [198] (a) Verteilungsdichtefunktion, b) Verteilungsfunktion) (Biegefestigkeit) .....	123
Abb. 5.13: Anpassung im unteren Wertebereich der Logarithmischen Normalverteilung mittels gewichteter Methode der kleinsten Fehlerquadrate, vergleichend Lognormalverteilung aus Berechnung der Momente aus der Stichprobe ohne Gewichtung („LN MOM“), Datensatz:	

*Druckfestigkeit, unsortiert* aus Steiger [163] (a) Verteilungsdichtefunktion, b) Verteilungsfunktion) ..... 124

Abb. 5.14: Anpassung im unteren Wertebereich der Logarithmischen Normalverteilung und der Weibullverteilung mittels zensierter Maximum-Likelihood-Methode, vergleichend Lognormalverteilung aus Berechnung der Momente aus der Stichprobe ohne Gewichtung („LN MOM“), Datensatz *Druckfestigkeit, unsortiert* aus Steiger [163] (a) Verteilungsdichtefunktion, b): Verteilungsfunktion)..... 124

Abb. 5.15: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung, Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [198] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])..... 129

Abb. 5.16: Entwicklung des charakteristischen Wertes und des Bemessungswertes abhängig von der Stichprobenanzahl für die Student'sche t-Verteilung und die logarithmische Normalverteilung aus *Svensson* [224] ..... 130

Abb. 6.1: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren für  $V_G = 0,10$  (b) abhängig vom Variationskoeffizienten der Festigkeit für eine ständige Beanspruchung im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  ..... 142

Abb. 6.2: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last + Nutzlast abhängig von  $V_R$  für  $V_N = 25\%$  (a) und  $V_N = 0,40$  (b) hervorgehoben sind  $LA_G = 0,70$  und  $LA_Q = 0,50$ . 144

Abb. 6.3: Sensitivitätsfaktoren abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$  für ständige Beanspruchung + Nutzlast für  $V_N = 0,25$ ,  $LA_G = 0,70$  (links) und  $LA_G = 0,50$  (rechts),  $T_{ref} = 50a$  ..... 144

Abb. 6.4: Sensitivitätsfaktoren abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$  für ständige Beanspruchung + Nutzlast für  $V_N = 0,40$ ,  $LA_G = 0,70$  (links) und  $LA_G = 0,50$  (rechts),  $T_{ref} = 50a$  ..... 144

Abb. 6.5: Einteilung der Gewichtungskategorien für die Nutzlastbeanspruchung ..... 145

Abb. 6.6: Zuverlässigkeitsindex für ständige Last + Schneelast (a) bzw. ständige Last + Windlast (b) abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ ,  $T_{ref} = 50a$ , hervorgehoben ist jeweils  $LA_Q = 0,50$  ..... 146

Abb. 6.7: Sensitivitätsfaktoren für ständige Beanspruchung + Schneelast (a) bzw. ständige Last + Windlast (b) abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ , beispielhaft für  $LA_G = 0,5$   $T_{ref} = 50a$  ..... 146

Abb. 6.8: Zuverlässigkeitsindex für ständige Last + Schneelast (a) bzw. ständige Last + Windlast (b) abh. vom Variationskoeffizienten der Festigkeit  $V_R$ ,  $T_{ref} = 50a$ , hervorgehoben ist jeweils  $LA_Q = 0,50$  Festigkeit normalverteilt ..... 147

Abb. 6.9: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,20$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall einachsige Beanspruchung ..... 148

Abb. 6.10: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,20$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall einachsige Beanspruchung, 3D-Ansicht..... 148

Abb. 6.11: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall einachsige Beanspruchung ..... 149

Abb. 6.12: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Windlast in z-Richtung) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $h/b = 1/2$  ..... 150

Abb. 6.13: Zuverlässigkeitsindex (a) in 3D- Ansicht und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Windlast in z-Richtung) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$ , Lastfall Doppelbiegung,  $h/b = 1/2$ ..... 150

Abb. 6.14: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Windlast in z-Richtung) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Anteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungs-zeitraum  $T_{ref} = 50a$  für  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung,  $h/b = 1/2$ , korrelierte Widerstandsvariablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 151

Abb. 6.15: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung, a) eine Variable für die Biegefestigkeit in z- und y- Richtung, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 153

Abb. 6.16: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung, a) eine Variable für die Biegefestigkeit in z- und y- Richtung, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 153



Abb. 6.17: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b):  $b/h = 1/1$  ..... 154

Abb. 6.18: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1/1$  ..... 155

Abb. 6.19: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $b/h = 1/2$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 155

Abb. 6.20: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $b/h = 1/2$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$ ,  $LA_G = 0,5$  ..... 156

Abb. 6.21: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b):  $b/h = 1/1$  ..... 157

Abb. 6.22: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_R = 0,25$ ,  $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1/1$ , ..... 157

Abb. 6.23: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_N = 0,40$ ,  $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 159

Abb. 6.24: Sensitivitätsfaktoren abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last,  $LA_G = 0,5$ ,  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_N = 0,40$ ,  $b/h = 1/2$ ,  $LA_G = 0,5$ , Lastfall Doppelbiegung, a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 159

Abb. 6.25: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} = 0,25$ ,  $V_{R,c} = 0,20$ , Lastfall Druck & Biegung,  $b/h = 1/2$  Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für  $LA_G = 0,5$  ..... 160

Abb. 6.26: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Schneelast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum  $T_{ref} = 50a$ ,  $V_{R,m} =$

0,25, $V_{R,c} = 0,20$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	161
Abb. 6.27: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_{R,m} = 0,25$ , $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/2$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	162
Abb. 6.28: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_R = 0,25$ , $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	163
Abb. 6.29: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_{R,m} = 0,25$ , $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,40$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/2$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	164
Abb. 6.30: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_{R,m} = 0,25$ , $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,40$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	164
Abb. 6.31: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_{R,m} = 0,25$ , $V_{R,t} = 0,30$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/2$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	165
Abb. 6.32: Zuverlässigkeitsindex (a) und Sensitivitätsfaktoren (b) abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_{R,m} = 0,25$ , $V_{R,t} = 0,30$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung, $b/h = 1/1$ , Sensitivitätsfaktoren beispielhaft für $LA_G = 0,5$ .....	166
Abb. 6.33: Zuverlässigkeitsindex abhängig vom Lastanteil der veränderlichen Last 1 (Nutzlast) an der gesamten veränderlichen Last für verschiedene Lastanteile der ständigen Last an der	

Gesamtlast im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50a$ , $V_{R,m} = 0,22$ , $V_{R,t} = 0,26$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Druck & Biegung, a: $b/h = 1/2$ , b: $b/h = 1/1$ .....	166
Abb. 7.1: Zweischrittverfahren zur Normungskalibrierung aus <i>Vrouwenvelder</i> [130] .....	169
Abb. 7.2: Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit vom Bezugszeitraum.....	175
Abb. 7.3: Vorgehen zur Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten mit der <i>Design Value Method</i> ( <i>DVM</i> ).....	179
Abb. 7.4: Teilsicherheitsbeiwert für Widerstandsgrößen $\gamma_M$ mit der <i>Design Value Method</i> ( <i>DVM</i> ) ..	182
Abb. 7.5: Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen $\gamma_G$ mit der <i>Design Value Method</i> ( <i>DVM</i> ) .....	182
Abb. 7.6: Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen $\gamma_Q$ mit der <i>Design Value Method</i> ( <i>DVM</i> ).....	182
Abb. 7.7: Anpassungsfaktor $\omega_\gamma$ und $\gamma_{M,mod}$ abhängig vom Verhältnis des im Bestand ermittelten Variationskoeffizienten der Festigkeit $V_{R,alt}$ zum im Neubau zugrunde gelegten Wert ( $V_{R,neu}$ $= 0,15$ ), $\beta_{t,neu} = 3,8$ , $\alpha_R = 0,8$ , $V_{\theta,R} = 0,05$ , logarithmische Normalverteilung, <i>APFM</i> aus <i>fib</i> [42] .....	184
Abb. 7.8: Anpassungsfaktor $\omega_\gamma$ und $\gamma_{G,mod}$ abhängig vom Verhältnis des im Bestand ermittelten Variationskoeffizienten der ständigen Einwirkung $V_{G,alt}$ zum im Neubau zugrunde gelegten Wert ( $V_{G,neu} = 0,10$ ), $\beta_{Neubau} = 3,8$ , $\alpha_E = -0,7$ , $V_{\theta,G} = 0,05$ , Normalverteilung, <i>APFM</i> aus <i>fib</i> [42] .....	185
Abb. 7.9: Anpassungsfaktoren für den Teilsicherheitsbeiwert für veränderlicher Einwirkungen (Nutz-/ Schneelast: $V_{Q,neu} = 0,25$ , Windlast: $V_{Q,neu} = 0,16$ , $\alpha_E = -0,7$ , $t''_{ref} = t'_{ref}$ ), <i>APFM</i> aus <i>fib</i> [42] .	186
Abb. 7.10: Beispielhafte Verteilungsdichtefunktion mit charakteristischem Wert und Bemessungswert.....	190
Abb. 7.11: Beispielhafte Verteilungsdichtefunktion mit Aktualisierung.....	191
Abb. 7.12: Prinzipielle Darstellung komplementärer Ziele bei der Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Prozess der Normungskalibrierung .....	194
Abb. 7.13: Modellparameter zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten (TBW) im Bestandsbau	195
Abb. 7.14: Schritte zur Kalibrierung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,opt}$ .....	199
Abb. 7.15: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ) (rot – aktueller Wert nach <i>DIN EN</i> <i>1995-1-1:2010-12</i> , Vollholz) .....	199
Abb. 7.16: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ), LAG nach Tab. 7.21 – Variante a (50,40,10) (rot – aktueller Wert nach <i>DIN EN 1995-1-1:2010-12</i> , Vollholz) .....	202

Abb. 7.17: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G$  nach Tab. 7.21 – Variante b (35,50,15) (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 202

Abb. 7.18: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 202

Abb. 7.19: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last und Nutzlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 204

Abb. 7.20: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck), Nutzlast (Druck) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 206

Abb. 7.21: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,9$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 209

Abb. 7.22: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 211

Abb. 7.23: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices,  $LA_G$  nach Tab. 7.32 ( $\Delta\beta = 0,1$ ) (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 213

Abb. 7.24: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices,  $LA_G = 0,5$  ( $\Delta\beta = 0,1$ ) (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 213

Abb. 7.25: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 215

Abb. 7.26: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices ( $\Delta\beta = 0,1$ ),  $LA_G = 0,5$  (rot – aktueller Wert nach *DIN EN 1995-1-1:2010-12*, Vollholz) ..... 217

Abb. 7.27: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Druck, (Berechnung mit *FORM*), a) Schneelast, b) Nutzlast ..... 221

Abb. 7.28: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Druck, Schnee- und Windlast (Berechnung mit *FORM*)..... 222

Abb. 7.29: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,16$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Druck, Windlast (Berechnung mit *FORM*)..... 222

Abb. 7.30: a) Einschubdecke, b) Halber Windelboden, Zeichnung nach *Lißner & Rug* [12] ..... 223

Abb. 7.31: a) Ganzer Windelboden, b): Berliner Decke, Zeichnung nach *Lißner & Rug* [12] ..... 223

Abb. 7.32: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Biegebeanspruchung, Nutzlast mit  $V_N = 0,25$  (Berechnung mit *FORM*), a)  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ , b)  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  ..... 224

Abb. 7.33: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Schnee- und Windlast (Berechnung mit *FORM*), a)  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ , b)  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  ..... 224

Abb. 7.34: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, ständige Last und Windlast (Berechnung mit *FORM*)..... 225

Abb. 7.35: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei 100%-iger Querschnittsauslastung, Doppelbiegung, ständige Last und Windlast (Berechnung mit *FORM*)..... 226

Abb. 7.36: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, Doppelbiegung, ständige Last, Schnee- und Windlast (Berechnung mit *FORM*), a)  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ , b)  $\gamma_{M,opt} = 1,20$  ..... 226

Abb. 7.37: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,23$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, Druck & Biegung, a) Schnee- und Windlast, b) Nutz- und Windlast (Berechnung mit *FORM*)..... 227

Abb. 7.38: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, Druck & Biegung, a) Schnee- und Windlast, b) Nutz- und Windlast (Berechnung mit *FORM*)..... 227

Abb. 7.39: Zuverlässigkeitsindex bei Anwendung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,25$ ) bei einhundertprozentiger Querschnittsauslastung, einachsige Beanspruchung, Zug, Windlast (Berechnung mit *FORM*) ..... 228

Abb. 8.1: Vorschlag für die Einordnung einer modifizierten Tragfähigkeitsüberprüfung für den Holzbau im Bestand in die aktuelle Normung ..... 229

Abb. 8.2: Konzept für die Überprüfung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen beim Bauen im Bestand .....	230
Abb. 8.3: Beispiel 8.1 – System Berliner Decke im Querschnitt aus <i>Lißner &amp; Rug</i> [12] (a) und idealisiertes statisches System (b) .....	236
Abb. 8.4: Beispiel 8.1 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating (a) kumulative Verteilungsfunktion, b) Verteilungsdichtefunktion).....	240
Abb. 8.5: Beispiel 8.2 – Hängesäule .....	242
Abb. 8.6: Beispiel 8.3 - Konstruktionssystem aus <i>Rug</i> [251] .....	245
Abb. 8.7: Beispiel 8.3 – Sparrenfußpunkt, Stirnversatz.....	245
Abb. 8.8: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating (a) kumulative Verteilungsfunktion, b) Verteilungsdichtefunktion).....	249
Abb. 8.9: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung mit Bayes'schem Updating (a) kumulative Verteilungsfunktion, b) Verteilungsdichtefunktion) .....	250
Abb. 9.1: Aktualisierung des Materialmodells abh. vom Sortierverfahren, erweitert aus <i>Loebjinski, Rug &amp; Pasternak</i> [217] .....	255
Abb. 10.1: Beispiel "Zugstab unter ständiger Belastung" – Zuverlässigkeitsindex mittels Monte-Carlo-Methode .....	12
Abb. 10.2: Beispiel "Zugstab unter ständiger Belastung" – Versagenswahrscheinlichkeit mittels Monte-Carlo-Methode.....	12
Abb. 10.3: Beispiel 3.6 - einfaches Belastungsbild .....	13
Abb. 10.4: Beispielhafte Kostenoptimierung in Abhängigkeit von Konstruktions- und Versagenskosten .....	13
Abb. 10.5: Dübelbodendecke aus <i>Lißner &amp; Rug</i> [12] .....	14
Abb. 10.6: Aufbau Dachkonstruktion ohne Dämmung .....	15
Abb. 10.7: Aufbau Dachkonstruktion mit Dämmung.....	16
Abb. 10.8: Bayesian probabilistic assessment of structures aus <i>Diamantidis</i> [38].....	24
Abb. 10.9: Beispielhaftes Bayes'sches update (links: Verteilungsdichtefunktion $f(x)$ , rechts: Verteilungsfunktion $F(x)$ ) .....	26
Abb. 10.10: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung Versuchsdaten aus <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [198] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152]).....	43
Abb. 10.11: Verteilungsdichtefunktionen für Fichtenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung Versuchsdaten aus <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [198] (stoch. M. – stochastisches Modell der Sortierung nach <i>Pöhlmann &amp; Rackwitz</i> [212], MM - Momentenmethode) .....	43

Abb. 10.12: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [198] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])..... 44

Abb. 10.13: Verteilungsdichtefunktionen für Fichtenproben und Sortierung mittels direkter US  
 Messung Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [198] (stoch. M. – stochastisches Modell der  
 Sortierung nach *Pöhlmann & Rackwitz* [212], MM - Momentenmethode) ..... 44

Abb. 10.14: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels Rohdichtemessung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [198] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen 5%-Quantilwert nach *DIN EN 338:2016-07*  
 [110])..... 45

Abb. 10.15: Verteilungsdichtefunktionen für Fichtenproben und Sortierung mittels  
 Rohdichtemessung Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [198] (stoch. M. – stochastisches  
 Modell der Sortierung nach *Pöhlmann & Rackwitz* [212], MM - Momentenmethode)..... 45

Abb. 10.16: Referenz- und Zielgröße für Kiefernproben und Sortierung mittels indirekter US Messung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [197] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])..... 46

Abb. 10.17: Referenz- und Zielgröße für Kiefernproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [197] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])..... 46

Abb. 10.18: Referenz- und Zielgröße für Kiefernproben und Sortierung mittels Rohdichtemessung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [197] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen 5%-Quantilwert nach *DIN EN 338:2016-07*  
 [110])..... 47

Abb. 10.19: Referenz- und Zielgröße für Eichenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [206] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])..... 48

Abb. 10.20: Verteilungsdichtefunktionen für Eichenproben und Sortierung mittels indirekter US  
 Messung Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [206] (stoch. M. – stochastisches Modell der  
 Sortierung nach *Pöhlmann & Rackwitz* [212], MM - Momentenmethode) ..... 48

Abb. 10.21: Referenz- und Zielgröße für Eichenproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
 Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [206] (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen  
 Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])..... 49

Abb. 10.22: Verteilungsdichtefunktionen für Eichenproben und Sortierung mittels direkter US  
 Messung Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [206] (stoch. M. – stochastisches Modell der  
 Sortierung nach *Pöhlmann & Rackwitz* [212], MM - Momentenmethode) ..... 49

Abb. 10.23: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,1$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 50

Abb. 10.24: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,2$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 50

Abb. 10.25: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,3$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 50

Abb. 10.26: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,4$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 51

Abb. 10.27: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,5$  links:  $V_R = 0,20$ , rechts:  $V_R = 0,25$ ..... 51

Abb. 10.28: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,6$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 51

Abb. 10.29: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,7$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 52

Abb. 10.30: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,8$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 52

Abb. 10.31: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,9$  a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$  ..... 52

Abb. 10.32: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$  a)  $LV_Q=0,1$ , b)  $LV_Q=0,2$  ..... 53

Abb. 10.33: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$  a)  $LV_Q=0,3$ , b)  $LV_Q=0,4$  ..... 53

Abb. 10.34: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$  a)  $LV_Q=0,5$ , b)  $LV_Q=0,6$  ..... 53

Abb. 10.35: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$  a)  $LV_Q=0,7$ , b)  $LV_Q=0,8$  ..... 54

Abb. 10.36: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$ ,  $LV_Q=0,9$ ..... 54

Abb. 10.37: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,1$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 55

Abb. 10.38: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$  links: eine Variable, rechts: zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 55

Abb. 10.39: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 55



IV. Abbildungsverzeichnis

Abb. 10.40: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,4$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 56

Abb. 10.41: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,5$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 56

Abb. 10.42: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,6$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 56

Abb. 10.43: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 57

Abb. 10.44: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 57

Abb. 10.45: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$  a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ ) ..... 57

Abb. 10.46: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 58

Abb. 10.47: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 58

Abb. 10.48: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 58

Abb. 10.49: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,4$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 59

Abb. 10.50: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,5$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 59

Abb. 10.51: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,6$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 59

Abb. 10.52: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 60

Abb. 10.53: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 60

Abb. 10.54: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$  a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 60

Abb. 10.55: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 61

Abb. 10.56: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 61

Abb. 10.57: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 61

Abb. 10.58: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 62

Abb. 10.59: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,5$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 62

Abb. 10.60: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 62

Abb. 10.61: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,7$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 63

Abb. 10.62: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,8$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 63

Abb. 10.63: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$  ..... 63

Abb. 10.64: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 64

Abb. 10.65: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 64

Abb. 10.66: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 64

Abb. 10.67: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 65

Abb. 10.68: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,5$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 65

Abb. 10.69: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 65

Abb. 10.70: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,7$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 66

Abb. 10.71: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,8$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 66

Abb. 10.72: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 66

Abb. 10.73: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 67

IV. Abbildungsverzeichnis

Abb. 10.74: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 67

Abb. 10.75: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 67

Abb. 10.76: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 68

Abb. 10.77: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,5$ ; a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 68

Abb. 10.78: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 68

Abb. 10.79: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,7$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 69

Abb. 10.80: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,8$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 69

Abb. 10.81: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 69

Abb. 10.82: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 70

Abb. 10.83: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 70

Abb. 10.84: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 70

Abb. 10.85: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 71

Abb. 10.86: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,5$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 71

Abb. 10.87: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 71

Abb. 10.88: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 72

Abb. 10.89: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$  ..... 72

Abb. 10.90: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $b/h = 1/2$ , a)  $b/h = 1$  ..... 72

Abb. 10.91: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,1$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	73
Abb. 10.92: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,2$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	73
Abb. 10.93: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,3$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	73
Abb. 10.94: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,4$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	74
Abb. 10.95: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,5$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	74
Abb. 10.96: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,6$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	74
Abb. 10.97: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,7$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	75
Abb. 10.98: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,8$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	75
Abb. 10.99: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,9$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	75
Abb. 10.100: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,1$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	76
Abb. 10.101: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,2$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	76
Abb. 10.102: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,3$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	76
Abb. 10.103: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,4$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	77
Abb. 10.104: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,5$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	77
Abb. 10.105: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,6$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	77
Abb. 10.106: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,7$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	78
Abb. 10.107: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast, $h/b = 2$ , $LV_Q = 0,8$ , a) $b/h = 1/2$ , b) $b/h = 1$ .....	78

**IV. Abbildungsverzeichnis**

Abb. 10.108: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 78

Abb. 10.109: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 79

Abb. 10.110: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 79

Abb. 10.111: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 79

Abb. 10.112: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 80

Abb. 10.113: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,5$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 80

Abb. 10.114: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 80

Abb. 10.115: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 81

Abb. 10.116: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 81

Abb. 10.117: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 81

Abb. 10.118: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 82

Abb. 10.119: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 82

Abb. 10.120: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 82

Abb. 10.121: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 83

Abb. 10.122: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,5$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 83

Abb. 10.123: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 83

Abb. 10.124: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 84

Abb. 10.125: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 84

Abb. 10.126: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$ ..... 84

## V. Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Gründe für eine Neubewertung der Tragfähigkeit bestehender Konstruktionen in Anlehnung an <i>Návarová</i> [8] und <i>Cruz et al.</i> [9] .....	4
Tab. 2.2: Zeitintervalle für die regelmäßige Überprüfung (Anhaltswerte) aus <i>VDI 6200:2010</i> [15] .....	7
Tab. 2.3: Übersicht zu den Stufen der Überprüfung aus <i>VDI 6200:2010</i> [15] .....	8
Tab. 2.4: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{C,mod}$ abhängig vom Variationskoeffizienten der Betondruckfestigkeit $V_{R,C}$ und des Bewehrungsstahls $V_{R,S}$ aus <i>DBV Merkblatt 2013</i> [18] .....	10
Tab. 2.5: Schrittweise Verfahren bei der Überprüfung aus <i>SIA 269:2011 Anhang A</i> [21] .....	12
Tab. 2.6: Aktualisierte Lastbeiwerte für den Nachweis der Tragsicherheit aus <i>SIA 269:2011</i> [21] .....	13
Tab. 2.7: Schritte der Bestandsaufnahme aus <i>UNI 11138:2004</i> [28] .....	16
Tab. 2.8: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite aus <i>NEN 8700:2011-12</i> , zitiert nach <i>Vrouwenvelder &amp; Scholten</i> [32] .....	19
Tab. 2.9: Mindestwerte für den Zuverlässigkeitsindex aus <i>NEN 8700:2010-12</i> , zitiert nach <i>Scholten &amp; Vrouwenvelder</i> [31] .....	20
Tab. 2.10: Wissenslevel ( <i>Knowledge Level - KL</i> ) bei bestehenden Konstruktionen aus <i>JRC Science and Policy Report 2015</i> [27] .....	27
Tab. 2.11: Teilsicherheitsbeiwerte für Materialwiderstand aus <i>JRC Science and Policy Report</i> [27] .....	28
Tab. 2.12: Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Last aus <i>JRC Science and Policy Report</i> [27] .....	28
Tab. 2.13: Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Last ( $T_{ref} = 50$ J.) aus <i>JRC Science and Policy Report</i> [27] .....	28
Tab. 2.14: Nationale und internationale Normen und Richtlinien zur Bewertung von Bestandstragwerken .....	31
Tab. 2.15: Vergleich modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für Bestandsbauten aus <i>Loebjinski, Rug &amp; Pasternak</i> [49] .....	32
Tab. 3.1: Einordnung probabilistischer Verfahren aus <i>Glowienka</i> [72] .....	43
Tab. 3.2: $K_{Fj}$ -Faktoren für Einwirkungen, aus <i>DIN EN 1990:2010-12, Tab. B.3</i> [16] .....	54
Tab. 3.3: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex $\beta$ aus <i>DIN EN 1990:2010-12</i> [16] .....	54
Tab. 3.4: Zielwert des Zuverlässigkeitsindex $\beta$ für Bauteile <sup>a</sup> mit RC 2 –Anforderungen aus <i>DIN EN 1990:2010-12</i> [16] .....	55
Tab. 4.1: Kombinationsschema und Lastwechselzahlen zur Kombination mehrere veränderlicher Lasten aus <i>Schobbe</i> [104] .....	65
Tab. 4.2: Empfohlene Verteilungsfunktion für die Rohdichte von Holz nach verschiedenen Untersuchungen .....	68

Tab. 4.3: Variationskoeffizient $V_x$ der Rohdichte von Holz aus verschiedenen Untersuchungen.....	68
Tab. 4.4: Mittlere Kennwert der Rohdichte von Nadel- und Laubhölzern aus <i>DIN 68364</i> [108] und <i>JCSS Probabilistic Mode Code Teil 2.1</i> [60] .....	69
Tab. 4.5: Faktoren $f$ zur Erhöhung des Eigengewichtes in Abh. vom Feuchtegehalt, abgeleitet von <i>Kollmann</i> [111].....	70
Tab. 4.6: Erwartungswert und Variationskoeffizient des Eigengewichtes bei verschiedenen Deckenkonstruktionen.....	71
Tab. 4.7: Werte für $\kappa$ aus verschiedenen Quellen.....	74
Tab. 4.8: Parameter für Nutzlasten (Momentanwerte) in Abhängigkeit von der Nutzungskategorie aus <i>JCSS PMC</i> [60].....	76
Tab. 4.9: Statistische Kenngrößen der Momentanwerte der Nutzlastanteile auf Basis von Tab. 4.8 ..	76
Tab. 4.10: Parameter der approximierten Gumbelverteilung für ausgewählte Nutzungsarten, $T_{ref} = 50a$ .....	77
Tab. 4.11: Parameter der approximierten Gumbelverteilung für ausgewählte Nutzungsarten, $T_{ref} = 1a$ .....	77
Tab. 4.12: Parameter für die Nutzlastverteilung aus der Literatur ( $T_{ref} = 50a$ ) [kN/m <sup>2</sup> ] .....	78
Tab. 4.13: Parameter zur Modellierung von Nutzlasten – Festlegung für diese Arbeit ( $T_{ref} = 50a$ ).....	79
Tab. 4.14: Form- und Oberflächenkoeffizient für die Schneebeanspruchung aus <i>JCSS PMC Teil 2.12</i> [60].....	80
Tab. 4.15: Formbeiwert $\mu_1$ und $\mu_2$ aus <i>DIN EN 1991-1-3:2010-12</i> [122] .....	81
Tab. 4.16: Werte für den Faktor $C_t$ für die Schneebeanspruchung aus <i>JCSS PMC Teil 2.12</i> [60] .....	81
Tab. 4.17 Werte für $C_r$ zur Berücksichtigung des Windeinflusses in Abhängigkeit vom Dachneigungswinkel aus <i>JCSS</i> [60] .....	81
Tab. 4.18 Statistische Parameter der Windgeschwindigkeit aus <i>Spaethe</i> [63] – Auszug .....	83
Tab. 4.19: Charakteristische Werte der Böengeschwindigkeit aus <i>König &amp; Hosser</i> [127] .....	84
Tab. 4.20: Statistische Parameter für Modellunsicherheiten der Einwirkung $\theta_E$ nach verschiedenen Autoren .....	86
Tab. 4.21: Festlegung zur Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite .....	87
Tab. 4.22: Statistische Parameter zur Modellierung von Einwirkungen .....	87
Tab. 4.23: Verhältnis $m_x/x_k$ für verschiedene Lasten bei Annahme einer Gumbelverteilung.....	87
Tab. 5.1: Anpassung der Sortierkriterien in der <i>DIN 4074-1</i> bei Novellierung der Norm .....	92
Tab. 5.2: Bewertung der Sortierkriterien der <i>DIN 4074-1</i> für die Anwendbarkeit auf den Bestandsbau .....	93
Tab. 5.3: Vergleich der Grenzwerte für Sortierkriterien der <i>UNI 11119:2004</i> mit der <i>DIN 4074-1:2012-06</i> [153].....	95



Tab. 5.4: Bewertung der in der <i>UNI 11119:2004</i> [29] nur qualitativ oder nicht enthaltenen Sortierkriterien.....	95
Tab. 5.5: Techniken der Bauzustandsanalyse aus <i>Lißner &amp; Rug</i> [12], Bewertung der Techniken aus <i>Lißner &amp; Rug</i> [12] ergänzt mit <i>Hösl &amp; Dietsch</i> [162] .....	97
Tab. 5.6: Betrachtungsebenen von Bauholz aus <i>Köhler</i> [149] .....	99
Tab. 5.7: Einflussfaktoren auf die Zug- und Druckfestigkeit in Faserrichtung (+ positiver Zhg.; - negativer Zhg.) und Berücksichtigung in der Bemessung.....	102
Tab. 5.8: Reduktion der Festigkeit unter 50 Jahren Langzeitbelastung nach verschiedenen Berechnungsansätzen .....	105
Tab. 5.9: Prozentuale Abminderung von $k_{mod}$ in NKL 3 in Bezug auf den Wert in NKL 1 bzw. 2 abhängig von der Klasse der Lasteinwirkungsdauer .....	105
Tab. 5.10: $k_{mod}$ Werte für verschiedene Lastfälle aus <i>Sørensen, Svensson &amp; Stang</i> [120] .....	106
Tab. 5.11: Beziehung zwischen den Referenzeigenschaften und anderen Eigenschaften aus <i>Probabilistic Model Code</i> [61], Erwartungswerte und Variationskoeffizienten .....	108
Tab. 5.12: Probabilistische Modelle für die Referenzeigenschaften für Bauholz aus <i>Probabilistic Model Code</i> [61] .....	108
Tab. 5.13: Materialbeziehungen nach <i>DIN EN 384:2019-02</i> [160].....	108
Tab. 5.14: Variationskoeffizienten der Festigkeit für unsortiertes Nadelholz als kleine fehlerfreie Proben – Zusammenfassung der Literaturstudie.....	111
Tab. 5.15: Variationskoeffizienten der Festigkeit für unsortiertes Nadelholz in Bauteilgröße – Zusammenfassung der Literaturstudie .....	111
Tab. 5.16: Variationskoeffizienten der Festigkeit für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen – Zusammenfassung der Literaturstudie .....	113
Tab. 5.17: Variationskoeffizienten der Festigkeit für kleine fehlerfreie Proben aus Laubholz – Zusammenfassung der Literaturstudie .....	115
Tab. 5.18: Variationskoeffizienten der Festigkeit für Laubholz in Bauteilabmessungen, unsortiert – Zusammenfassung der Literaturstudie .....	115
Tab. 5.19: Variationskoeffizienten der Festigkeit für visuell sortiertes Laubholz in Bauteilabmessungen – Zusammenfassung der Literaturstudie .....	116
Tab. 5.20: Verteilungsfunktionen für Bauholz nach verschiedenen Literaturangaben .....	118
Tab. 5.21: Verteilungsparameter der logarithmischen Normalverteilung bei unterschiedlichen Sortierverfahren – Stochastisches Modell der Sortierung, Untersuchung mit Versuchsdaten aus <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [197, 198, 206] .....	126
Tab. 5.22: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Festigkeitseigenschaft und Schallgeschwindigkeit .....	126

Tab. 5.23: Parametervergleich bei Anwendung der Momentenmethode und dem Stochastischen Modell der Sortierung.....	128
Tab. 5.24: Parameter für Festigkeitseigenschaften in verschiedenen Festigkeitsklassen nach aktuellen Regelwerken .....	131
Tab. 5.25: Streuung des Erwartungswertes bei 1.000 Simulationen [N/mm <sup>2</sup> ], erweitert aus [226] ..	132
Tab. 5.26: Streuung des Erwartungswertes bei 100.000 Simulationen [N/mm <sup>2</sup> ], erweitert aus [226] .....	132
Tab. 5.27: Variationskoeffizienten der Modellunsicherheit auf Widerstandsseite $\theta_R$ .....	133
Tab. 5.28: Statistische Parameter für Modellunsicherheiten $\theta_E$ in Abhängigkeit vom Schnittgrößentyp aus JCSS [61].....	134
Tab. 5.29: Parameter zur statistischen Modellierung von Bauholz auf Widerstandsseite .....	135
Tab. 5.30: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten $\rho$ von Holzfestigkeiten aus JCSS PMC [61] .....	135
Tab. 6.1: Übersicht über betrachtete Beanspruchungen für Bauteile im Bestand aus Holz .....	137
Tab. 6.2: Probabilistische Parameter der Basisvariablen für den Bezugszeitraum $T_{ref} = 50a$ (Grundzeitintervall).....	141
Tab. 6.3: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten $\rho$ der Holzfestigkeiten aus JCSS PMC [61].....	141
Tab. 6.4: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Spannung aus ständiger Beanspruchung für ausgewählte Variationskoeffizienten der Festigkeit $V_R$ .....	142
Tab. 6.5: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast, $V_N = 0,25$ .....	143
Tab. 6.6: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast, $V_N = 0,40$ .....	143
Tab. 6.7: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast...	145
Tab. 6.8: Zuverlässigkeitsindex für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Windlast.....	145
Tab. 6.9: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,20$ , Lastfall einachsige Beanspruchung .....	147
Tab. 6.10: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , Lastfall einachsige Beanspruchung .....	148
Tab. 6.11: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast, $h/b = 1/2$ .....	150
Tab. 6.12: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast, $h/b = 1/2$ , korrelierte Widerstandsvariablen ( $\rho = 0,8$ ).....	151
Tab. 6.13: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , $b/h = 1/2$ , Lastfall Doppelbiegung .....	152
Tab. 6.14: Zuverlässigkeitsindex beispielhaft für $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/2$ , Biegefestigkeit als zwei, korrelierte Variablen.....	152
Tab. 6.15: Zuverlässigkeitsindex beispielhaft für $V_R = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/1$ .....	154
Tab. 6.16: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,22$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/2$ .....	155

**V.Tabellenverzeichnis**

Tab. 6.17: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/2$ .....	156
Tab. 6.18: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , $V_N = 0,25$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/1$ .....	156
Tab. 6.19: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ , $V_N = 0,40$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/2$ .....	158
Tab. 6.20: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,22$ , $V_N = 0,40$ , Lastfall Doppelbiegung, $b/h = 1/2$ .....	158
Tab. 6.21: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,c} = 0,20$ , Verhältnis $b/h = 1/2$ , Lastfall Druck & Biegung .....	160
Tab. 6.22: Zuverlässigkeitsindex für $V_R = 0,25$ und $V_{R,c} = 0,20$ , Verhältnis $b/h = 1/1$ , Lastfall Druck & Biegung .....	160
Tab. 6.23: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,25$ , Verhältnis $b/h = 1/2$ , Lastfall Druck & Biegung .....	162
Tab. 6.24: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,25$ , Verhältnis $b/h = 1/1$ , Lastfall Druck & Biegung .....	162
Tab. 6.25: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,40$ , Verhältnis $b/h = 1/2$ , Lastfall Druck & Biegung .....	163
Tab. 6.26: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,c} = 0,20$ , $V_N = 0,40$ , Verhältnis $b/h = 1/1$ , Lastfall Druck & Biegung .....	163
Tab. 6.27: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,t} = 0,30$ , Verhältnis $b/h = 1/2$ , Lastfall Zug & Biegung .....	165
Tab. 6.28: Zuverlässigkeitsindex für $V_{R,m} = 0,25$ und $V_{R,t} = 0,30$ , Verhältnis $b/h = 1/1$ , Lastfall Zug & Biegung .....	165
Tab. 7.1: Verteilung der 692 erfassten Fälle mit Bauwerksschäden nach Bauwerksart und Zeitpunkt der Schadensentdeckung aus <i>Matousek &amp; Schneider</i> [233].....	171
Tab. 7.2: Anpassung der Zielzuverlässigkeit für den Bestandsbau in verschiedenen Normen.....	172
Tab. 7.3: Die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmende Faktoren nach <i>Schueremans</i> [235], zusammengestellt durch <i>Schueremans</i> nach genannten Quellen.....	173
Tab. 7.4: Zuverlässigkeitsniveau nach Zuverlässigkeitsklasse im Betrachtungszeitraum $T_{ref} = 50 a$ ... 174	174
Tab. 7.5: Mindestzuverlässigkeitsindices aus <i>ISO 2394:2015</i> [41] für $T_{ref} = 1 a$ und Umrechnung auf $T_{ref} = 50 a$ .....	174
Tab. 7.6: Anpassung der Zuverlässigkeitsindices aus <i>ISO 2394</i> [41] für den Bestand aus <i>Diamantidis, Holický &amp; Jung</i> [240] .....	175
Tab. 7.7: Vorschlag für Zielzuverlässigkeiten in Abhängigkeit von der Maßnahmenkategorie, Schadensfolgeklasse CC 2 .....	177
Tab. 7.8: Zielzuverlässigkeitsindex abhängig von der Restnutzungsdauer .....	178
Tab. 7.9: Ergebnisse der vereinfachten Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten mit der <i>DVM (Design Value Method)</i> .....	181

Tab. 7.10: Beispielhafte Anpassungen des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_M$ mit der APFM ( $V_{R,neu} = 0,25$ )	185
Tab. 7.11: Beispielhafte Anpassungen des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_G$ mit der APFM, ( $V_{G,neu} = 0,10$ )	185
Tab. 7.12: Lastfaktoren für die Bauwerksbewertung aus Allen [234]	187
Tab. 7.13: Anpassungsfaktoren für Teilsicherheitsbeiwerte aus Allen [234]	187
Tab. 7.14: Beispielhafte Annahmen für eine Aktualisierung des Materialwiderstands	191
Tab. 7.15: Übertragungsfaktoren zur Berücksichtigung begrenzter Stichprobenzahlen nach Fischer [64]	192
Tab. 7.16: Vorschlag für Übertragungsfaktoren bei Bildung des Werkstoffmodells mittels Bayes'schem Updating unter begrenzten Stichprobenzahlen, Mindeststichprobenzahl nach geprüfter Festigkeitseigenschaft	192
Tab. 7.17: Matrix der Optimierungsfälle abhängig von Last und Beanspruchung mit beispielhaften Bauteilen und Nummerierung der entsprechenden Abschnitte in den folgenden Unterkapiteln	194
Tab. 7.18: Probabilistische Parameter der Basisvariablen für den Bezugszeitraum $T_{ref} = 50a$ (Grundzeitintervall)	197
Tab. 7.19: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung	200
Tab. 7.20: Anteil der Nutzlast an der Gesamtlast $LA_Q = q_k / (g_k + q_k)$ für verschiedene Deckenkonstruktionen	200
Tab. 7.21: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für Druck- und Biegestäbe unter Eigenlast & Nutzlast	201
Tab. 7.22: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung	203
Tab. 7.23: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Doppelbiegung unter Eigenlast, Nutzlast und Windlast	204
Tab. 7.24: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung unter Eigenlast, Nutz- und Windlast in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung	205
Tab. 7.25: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung unter Eigenlast, Nutzlast und Windlast (ohne Stabilitätsversagen)	205
Tab. 7.26: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck in Stabachse), Nutzlast (Druck in Stabachse) und Windlast (Biegung) für verschiedene	

Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung .....	206
Tab. 7.27: Lastverhältnisse aus ständiger Last und Windlast $LA_Q = q_k/(g_k + q_k)$ für verschiedene Dachneigungswinkel und Windlastzonen.....	207
Tab. 7.28: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Biegung aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung .....	208
Tab. 7.29: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung .....	209
Tab. 7.30: Lastverhältnisse aus ständiger Last und Schneelast $LA_Q = q_k/(g_k + q_k)$ für verschiedene Dachneigungswinkel und Schneelastzonen.....	210
Tab. 7.31: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung .....	211
Tab. 7.32: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für einachsige Beanspruchung aus Eigenlast, Schnee- und Windlast (ohne Stabilitäts- und Schubversagen) aus einer Abschätzung von Schneelastzonen und Dachneigungswinkeln.....	212
Tab. 7.33: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für einachsige Beanspruchung unter Eigenlast & kombinierter Schnee- und Windlast (ohne Stabilitäts- und Schubversagen) mit fixem Anteil ständiger Lasten.....	213
Tab. 7.34: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Biegung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung .....	214
Tab. 7.35: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Doppelbiegung aus Eigenlast & Schnee- und Windlast (ohne Stabilitäts- und Schubversagen) mit fixem Anteil ständiger Lasten .....	215
Tab. 7.36: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last (starke Achse), Schneelast (starke Achse) und Windlast (schwache Achse) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung.....	216

Tab. 7.37: Lastfälle und Wichtungsfaktoren für die Optimierung von Teilsicherheitsbeiwerten für kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung unter Eigenlast, Schneelast und Windlast (ohne Stabilitätsversagen) .....	216
Tab. 7.38: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung aus ständiger Last (Druck in Stabachse), Schneelast (Druck in Stabachse) und Windlast (Biegung) für verschiedene Zielzuverlässigkeitsindices und Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit in Bewertungs- und Instandsetzungslevel, $\gamma_G = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ – Zusammenfassung .....	217
Tab. 7.39: Zusammenfassung zur Kalibrierung des Teilsicherheitsbeiwertes für ausgewiesene Holzfestigkeiten $\gamma_{M,opt}$ abhängig von Last und Beanspruchung – Bewertungslevel (Schadensfolgeklasse CC 2).....	218
Tab. 7.40: Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,opt}$ für die Bewertung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Holz in Bestandstragwerken (Querschnittsnachweise) ...	219
Tab. 7.41: Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,opt}$ für die Bewertung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Holz in Bestandstragwerken (Querschnittsnachweise), Set mit verbesserter praktischer Handhabbarkeit.....	220
Tab. 8.1: Anwendungsvoraussetzungen für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte im Bestandsbau mit Holz im <i>Knowledge Level (KL) 2</i> .....	231
Tab. 8.2: Vorschlag für modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,opt}$ für die Bewertung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Holz in Bestandstragwerken (Querschnittsnachweise) – <i>Knowledge Level (KL) 2a</i> ) .....	232
Tab. 8.3: Zusammenfassung der Stufen der Tragfähigkeitsüberprüfung.....	235
Tab. 8.4: Beispiel 8.1 - Geometrie, benötigte Materialkennwerte & zu berücksichtigende Einwirkungen .....	236
Tab. 8.5: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 1</i> .....	236
Tab. 8.6: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2a</i> ) .....	237
Tab. 8.7: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2b</i> ) .....	238
Tab. 8.8: Beispiel 8.1 – Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_M$ im <i>KL 2c</i> ) für beispielhafte Messergebnisse .....	239
Tab. 8.9: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2c</i> ).....	239
Tab. 8.10: Beispiel 8.1 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating.....	240
Tab. 8.11: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2c</i> ).....	240
Tab. 8.12: Beispiel 8.1 - Parameter zur probabilistischen Bewertung (alle Variablen in $[N/mm^2]$ ).....	241
Tab. 8.13: Beispiel 8.1 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 3</i> .....	241

Tab. 8.14: Beispiel 8.2 - Geometrie, benötigte Materialkennwerte & zu berücksichtigende Einwirkungen .....	242
Tab. 8.15: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 1</i> .....	242
Tab. 8.16: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2a)</i> .....	243
Tab. 8.17: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2b)</i> .....	243
Tab. 8.18: Beispiel 8.2 - Parameter zur probabilistischen Bewertung (alle Variablen in $[N/mm^2]$ )....	244
Tab. 8.19: Beispiel 8.2 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 3</i> .....	244
Tab. 8.20: Beispiel 8.3 - Geometrie, benötigte Materialkennwerte & zu berücksichtigende Einwirkungen .....	245
Tab. 8.21: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 1</i> .....	246
Tab. 8.22: Beispiel 8.3 – beispielhafte Ergebnisse einer verbesserten Festigkeitssortierung (lokale Untersuchung) .....	246
Tab. 8.23: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2a)</i> .....	247
Tab. 8.24: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2b)</i> (SGL 2, C35).....	247
Tab. 8.25: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2b)</i> (SGL 3, C45).....	248
Tab. 8.26: Beispiel 8.3 – beispielhafte Ergebnisse einer globalen Untersuchung der Sparrenfußpunkte im Tragwerk .....	248
Tab. 8.27: Beispiel 8.3 – Aktualisierung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_M$ im <i>KL 2c)</i> für ein beispielhaftes Messergebnis.....	248
Tab. 8.28: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 2c)</i> (SGL 3) .....	249
Tab. 8.29: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit Bayes'schem Updating.....	249
Tab. 8.30: Beispiel 8.3 – Aktualisierung der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung mit Bayes'schem Updating.....	249
Tab. 8.31: Beispiel 8.3 – Ergebnis der Tragfähigkeitsbewertung im <i>KL 3, semi-probabilistisch mit          Bayes'schem Updating</i> .....	250
Tab. 8.32: Beispiel 8.3 – Basisvariablen zur probabilistischen Bewertung in <i>KL 3</i> .....	251
Tab. 10.1: Ausgangsannahmen für die Beispielrechnung .....	7
Tab. 10.2: Ausgangsparameter für die iterative Bemessung .....	8
Tab. 10.3: Ergebnisse der iterativen Berechnung – Rackwitz-Fießler Algorithmus .....	10
Tab. 10.4: Ergebnisse der iterativen Berechnung – alternative FORM-Methode.....	11
Tab. 10.5: Beispiel 3.6 - Ausgangsannahmen.....	12
Tab. 10.6: Berechnung der statistischen Parameter einer Deckenkonstruktion - Beispiel Dübelbodendecke .....	15
Tab. 10.7: Daten für das Beispiel Eigengewicht einer Dachkonstruktion – ohne Dämmung.....	15

Tab. 10.8: Daten für das Beispiel Eigengewicht einer Dachkonstruktion .....	16
Tab. 10.9: Daten für das Beispiel Eigengewicht einer Dachkonstruktion – mit Dämmung .....	17
Tab. 10.10: Beispiele für die Kombination verschiedener Informationstypen aus Köhler [261] .....	24
Tab. 10.11: Verteilungsparameter des beispielhaften Bayes'schen Updating .....	26
Tab. 10.12: Variationskoeffizient $V_R$ unterschiedlicher Festigkeiten von Nadelholz (Vollholz) - fehlerfreies Holz.....	28
Tab. 10.13: Variationskoeffizient $V_R$ unterschiedlicher Festigkeiten von Nadelholz (Vollholz) - Holz in Bauteilabmessungen, unsortiert.....	29
Tab. 10.14: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit $V_R$ für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen, Sortierung in Güteklassen .....	31
Tab. 10.15: Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit $V_R$ für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen („mittlere Qualität“ nach JCSS der GK II/ C 24 zugeordnet).....	33
Tab. 10.16: Variationskoeffizienten der Zugfestigkeit $V_R$ für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen („mittlere Qualität“ nach JCSS der GK II/ C 24 zugeordnet).....	34
Tab. 10.17: Variationskoeffizient $V_R$ unterschiedlicher Festigkeiten von Laubholz (unsortiert) .....	35
Tab. 10.18: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit $V_R$ für visuell sortiertes Laubholz in Bauteilabmessungen.....	36
Tab. 10.19: Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit $V_R$ für mit Ultraschall sortiertes NH (Neuholz) in Bauteilabmessungen).....	37
Tab. 10.20: Variationskoeffizienten der Zugfestigkeit $V_R$ für maschinell sortiertes NH (Neuholz) in Bauteilabmessungen.....	37
Tab. 10.21: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit $V_R$ für maschinell sortiertes NH (Neuholz) in Bauteilabmessungen.....	38
Tab. 10.22: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Apitz</i> [210] - alle Holzarten .....	39
Tab. 10.23: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Apitz</i> [210] - Fichtenproben.....	39
Tab. 10.24: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Apitz</i> [210] - Kiefernproben .....	39
Tab. 10.25: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Apitz</i> [210] - Lärchenproben .....	39
Tab. 10.26: Statistischer Anpassungstest für Druckversuche nach <i>Kiesel</i> [211] .....	40
Tab. 10.27: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [198] – Fichte (visuelle Sortierung) .....	40
Tab. 10.28: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [197] – Kiefer (visuelle Sortierung) .....	40
Tab. 10.29: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> [206] – Eiche (visuelle Sortierung) .....	40
Tab. 10.30: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Steiger</i> [163].....	41



Tab. 10.31: Statistischer Anpassungstest für Druckversuche nach <i>Steiger</i> [163] .....	41
Tab. 10.32: Statistischer Anpassungstest für Zugversuche nach <i>Steiger</i> [163].....	41
Tab. 10.33: Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> – Fichte, direkte US-Messung [198], $\rho = 0,44$ .....	42
Tab. 10.34: Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> – Fichte, indirekte US-Messung [198], $\rho = 0,42$ .....	42
Tab. 10.35: Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> – Eiche, direkte US-Messung [206], $\rho = 0,69$ .....	42
Tab. 10.36: Anpassungstest für Biegeversuche nach <i>Linke &amp; Mühlisch</i> – Eiche, indirekte US-Messung [206], $\rho = 0,72$ .....	42
Tab. 10.37: Last aus ständiger Last bei 1 kN/m <sup>2</sup> für verschiedene Dachneigungswinkel .....	85
Tab. 10.38: Last aus Schnee anhand der Lage deutscher Großstädte für verschiedene Dachneigungswinkel .....	85
Tab. 10.39: Last aus Wind für verschiedene Dachneigungswinkel .....	86
Tab. 10.40: Lastverhältnisse Schneelast/ Windlast/ Ständige Last für verschiedene Dachneigungswinkel .....	86
Tab. 10.41: Angenommene prozentuale Verteilung der Schneelastzonen in Deutschland .....	86
Tab. 10.42: Angenommene prozentuale Verteilung der Dachneigungswinkel in Deutschland .....	86
Tab. 10.43: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ .....	87
Tab. 10.44: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G$ nach Tab. 7.21 – Variante a .....	87
Tab. 10.45: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G$ nach Tab. 7.21 – Variante b.....	88
Tab. 10.46: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast (Kategorie A1, A2, A3, B1) abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ , $V_N = 0,25$ .....	88
Tab. 10.47: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} =$ $1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,4$ , $V_N = 0,25$ .....	89
Tab. 10.48: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} =$ $1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ , $V_N = 0,25$ .....	89

Tab. 10.49: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,6$ , $V_N = 0,25$ .....	89
Tab. 10.50: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,4$ , $V_N = 0,25$ .....	90
Tab. 10.51: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ , $V_N = 0,25$ .....	90
Tab. 10.52: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,6$ , $V_N = 0,25$ .....	90
Tab. 10.53: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,9$ .....	91
Tab. 10.54: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last und Schneelast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,4$ .....	91
Tab. 10.55: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last und Schneelast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,6$ .....	91
Tab. 10.56: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last und Schneelast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ .....	92
Tab. 10.57: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G$ nach Tab. 7.32 .....	92
Tab. 10.58: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,4$ .....	93
Tab. 10.59: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ .....	93
Tab. 10.60: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast, $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,6$ .....	93
Tab. 10.61: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung), $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,4$ .....	94
Tab. 10.62: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung), $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ .....	94

Tab. 10.63: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung), $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,6$ .....	94
Tab. 10.64: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung), $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,4$ .....	95
Tab. 10.65: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung), $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,5$ .....	95
Tab. 10.66: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,opt}$ für Druck & Biegung ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung $\gamma_{G,up} = 1,20$ , $\gamma_Q = 1,50$ , $LA_G = 0,6$ .....	95
Tab. 10.67: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Schneelast – Bewertungslevel .....	96
Tab. 10.68: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Druckbeanspruchung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast – Bewertungslevel .....	96
Tab. 10.69: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel .....	97
Tab. 10.70: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast – Bewertungslevel	97
Tab. 10.71: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Biegebeanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast– Bewertungslevel .....	98
Tab. 10.72: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Biegebeanspruchung/ Einfachbiegung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel .....	98
Tab. 10.73: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel .....	99

---

Tab. 10.74: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast– Bewertungslevel .....	100
Tab. 10.75: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen kombinierte Druck- & Biegebeanspruchung durch Druck aus ständiger Last + Schneelast bzw. Nutzlast, Biegung aus Windlast – Bewertungslevel .....	101
Tab. 10.76: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels <i>Monte Carlo Simulation</i> bei $30 \cdot 10^6$ Realisationen für Zugbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel	101



## 10. Anhang

### 10.1 Zusammenstellung zur Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten

#### 10.1.1 Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten aus Bemessungswerten

Teilsicherheitsbeiwerte können aus Bemessungswert und charakteristischem Wert unter Anwendung der Angaben der *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] mit Zielzuverlässigkeit und fixen Sensitivitätsfaktoren vereinfacht bestimmt werden. Die Zusammenhänge für die gängigen Verteilungsfunktionen der Basisvariablen auf Einwirkungs- bzw. Widerstandsseite werden nachfolgend hergeleitet.

#### **Bestimmung von charakteristischen Werten**

Die Berechnung von charakteristischen Werten ist abhängig von der Verteilungsfunktion. Bei *Spaethe* [63] lässt sich eine Zusammenstellung der Berechnung der charakteristischen Werte für verschiedene Verteilungsfunktionen finden. Die Anwendung der Standardnormalverteilung zur Einbeziehung des Quantils gilt so prinzipiell nur bei „unendlich“ großer Stichprobenanzahl. Bei realen Untersuchungen mit begrenzter Stichprobenanzahl ist die Student'sche t-Verteilung zu verwenden. Berechnungshinweise für charakteristische Materialwerte im Holzbau sind in *DIN EN 14358:2016-11* [214] zu finden. Der charakteristische Wert einer **Normalverteilung** kann mit

$$x_k = m_x + \sigma_x \cdot \Phi^{-1}(q) \quad (10.1)$$

bestimmt werden, wobei  $m_x$  der Mittelwert,  $\sigma_x$  die Standardabweichung,  $\Phi^{-1}$  die Inverse der Standardnormalverteilung und  $q$  das Quantil ist. Mit

$$V_x = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (10.2)$$

ergibt sich

$$x_k = m_x + V_x \cdot m_x \cdot \Phi^{-1}(q) = m_x \cdot (1 + V_x \cdot \Phi^{-1}(q)) \quad (10.3)$$

Der charakteristische Wert einer **logarithmischen Normalverteilung** bestimmt sich mit

$$x_k = \exp(m_u + \sigma_u \cdot \Phi^{-1}(q)) \quad (10.4)$$

mit den Parametern  $m_u$  und  $\sigma_u$ , welche bestimmt werden können aus

$$m_u = \ln(m_x) - \frac{\sigma_u^2}{2} \quad (10.5)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \quad (10.6)$$

Diese in Gl. (10.4) ergibt

$$x_k = m_x \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_u^2}{2} + \sigma_u \cdot \Phi^{-1}(q)\right) \quad (10.7)$$

und mit Gl. (10.2)

$$x_k = m_x \cdot \exp\left(-\frac{\ln(V_x^2 + 1)}{2} + \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \cdot \Phi^{-1}(q)\right) \quad (10.8)$$

Das Vorzeichen vor dem zweiten Term im Exponenten hängt von der Definition des Perzentils der Standardnormalverteilung ab. Bei Berechnung des 5%-Quantils der Standardnormalverteilung ergibt sich ein negativer Wert. In der Literatur ist dieser Wert oft tabellarisch zu finden. Der Wert für das 5%-Quantil wird häufig positiv angegeben, dann muss das Vorzeichen in Gl. (10.8) entsprechend geändert werden. Vereinfacht gilt zudem

$$\sigma_u = V_x \quad (10.9)$$

und damit wird aus Gl. (10.7)

$$x_k = m_x \cdot \exp\left(-\frac{V_x^2}{2} + V_x \cdot \Phi^{-1}(q)\right) \quad (10.10)$$

Für  $V_x < 20\%$  kann der Term  $-0,5V_x^2$  vernachlässigt werden [72]. Damit wird

$$x_k = m_x \cdot \exp(V_x \cdot \Phi^{-1}(q)) \quad (10.11)$$

Der charakteristische Wert der **Gumbelverteilung** (Extremwertverteilung Typ 1, Größtwerte) kann aus

$$x_k = u - \frac{1}{a}(\ln(-\ln q)) \quad (10.12)$$

mit den Parametern

$$a = \frac{\pi}{\sigma_x \sqrt{6}} \quad (10.13)$$

$$u = m_x - \frac{0,5772}{a} \quad (10.14)$$

zu

$$x_k = m_x - \frac{0,5772}{\pi} \cdot \sigma_x \sqrt{6} - \frac{\sigma_x \sqrt{6}}{\pi} \cdot (\ln(-\ln(q))) \quad (10.15)$$

bestimmt werden. Unter Verwendung von Gl. (10.2) ergibt sich

$$x_k = m_x - \frac{0,5772}{\pi} \cdot V_x m_x \sqrt{6} - \frac{V_x m_x \sqrt{6}}{\pi} \cdot (\ln(-\ln(q))) \quad (10.16)$$

$$x_k = m_x \cdot \left(1 - \frac{V_x \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln(-\ln(q)))\right) \quad (10.17)$$

Der charakteristische Wert ständiger Einwirkungen darf nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] als Mittelwert (Normalverteilung) angesetzt werden, wenn sich die Einwirkung während der Nutzungszeit nicht wesentlich ändert und die Variationskoeffizient gering ist. Auch für Vorspannungen werden die charakteristischen Werte nach *Rackwitz & Zilch* [69] als Mittelwerte festgelegt.

Veränderliche klimatische Einwirkungen (z. B. Windlast, Schneelast) werden nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] als Werte mit 50-jähriger mittlerer Wiederkehrdauer und einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2% der Extremwertverteilung als charakteristisch festgelegt. Zu Nutzlasten trifft die aktuelle *DIN EN 1990:2010-12* [16] keine Aussage. Abweichend zu sonstigen veränderlichen

Einwirkungen wird nach *Rackwitz & Zilch* [69] bei außergewöhnlicher Beanspruchung eine mittlere Wiederkehrdauer von 500 Jahren angenommen.

Charakteristische Werte der Widerstände entsprechen in der Regel dem 5%-Quantil der Verteilung, meist einer logarithmischen Normalverteilung oder einer Weibullverteilung. Die vorangestellten Formeln implizieren die Annahme einer gegen unendlich laufenden Stichprobenanzahl.

### **Bestimmung von Bemessungswerten**

Bemessungswerte (Designwerte) sind ebenfalls abhängig von der Verteilungsfunktion. Sie sind für gängige Verteilungen in *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] oder in der Literatur definiert. Für eine **Normalverteilung** kann der Bemessungswert aus

$$x_d = m_x - \alpha\beta\sigma_x \quad (10.18)$$

bestimmt werden. Unter Verwendung von (10.2) ergibt sich

$$x_d = m_x \cdot (1 - \alpha\beta V_x) \quad (10.19)$$

Der Bemessungswert kann bei Vorliegen einer **logarithmischen Normalverteilung** aus

$$x_d = m_x \cdot \exp\left(-0,5 \cdot \ln(1 + V_x^2) - \alpha \cdot \beta \cdot \sqrt{\ln(1 + V_x^2)}\right) \quad (10.20)$$

bestimmt werden. Da im Holzbau der Variationskoeffizient der Festigkeitseigenschaft >20% sein kann, darf der Term  $0,5V_x^2$  nicht vernachlässigt werden.

Der Bemessungswerte einer **Gumbelverteilung** kann aus

$$x_d = u - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\{-\ln \Phi(-\alpha\beta)\} \quad (10.21)$$

bestimmt werden. Mit Gl. (10.13) und Gl. (10.14) wird

$$x_d = m_x - \frac{0,5772}{\pi} \sigma_x \cdot \sqrt{6} - \frac{\sigma_x \sqrt{6}}{\pi} \cdot \ln\{-\ln \Phi(-\alpha\beta)\} \quad (10.22)$$

und unter Verwendung von Gl. (10.2)

$$x_d = m_x \cdot \left(1 - \left(\frac{V_x \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln\{-\ln \Phi(-\alpha\beta)\})\right)\right) \quad (10.23)$$

### **Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten für gängige Verteilungen mit festen Sensitivitätsfaktoren**

Unter Verwendung der vorangestellten Gleichungen werden die Zusammenhänge zur Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte für verschiedene Verteilungsfunktionen hergeleitet.



### Einwirkungsseite – Normalverteilung

Aus Gl. (10.4) und Gl. (10.19) bestimmt sich der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen und normalverteilte Modellunsicherheiten nach Gl. (10.24). Für normalverteilte Widerstandsgrößen (z.B. Modellunsicherheit auf der Widerstandsseite), ist der Zusammenhang reziprok zu verwenden.

$$\gamma_G = \frac{E_d}{E_k} = \frac{m_E \cdot (1 - \alpha_E \beta V_E)}{m_E \cdot (1 + V_E \cdot \Phi^{-1}(q))} = \frac{1 - \alpha_E \beta V_E}{1 + V_E \cdot \Phi^{-1}(q)} \quad (10.24)$$

### Einwirkungsseite – Gumbelverteilung

Aus Gl. (10.17) und Gl. (10.23) bestimmt sich der Teilsicherheitsbeiwert für gumbelverteilte Einwirkungen nach Gl. (10.25).

$$\gamma_Q = \frac{E_d}{E_k} = \frac{m_E \cdot \left( 1 - \left( \frac{V_E \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln\{-\ln \Phi(-\alpha_E \beta)\}) \right) \right)}{m_E \cdot \left( 1 - \frac{V_E \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln(-\ln(q)^T)) \right)} \quad (10.25)$$

$$\gamma_E = \frac{1 - \left( \frac{V_E \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln\{-\ln \Phi(-\alpha_E \beta)\}) \right)}{1 - \frac{V_E \sqrt{6}}{\pi} \cdot (0,5772 + \ln(-\ln(q)^T))}$$

### Widerstandsseite – logarithmische Normalverteilung

Aus Gl. (10.8) und Gl. (10.23) bestimmt sich der Teilsicherheitsbeiwert für logarithmisch normalverteilte Widerstandsgrößen nach Gl. (10.26).

$$\gamma_M = \frac{R_k}{R_d} = \frac{m_R \cdot \exp\left(-\frac{\ln(V_R^2 + 1)}{2} + \sqrt{\ln(V_R^2 + 1)} \cdot \Phi^{-1}(q)\right)}{m_R \cdot \exp\left(-0,5 \cdot \ln(1 + V_R^2) - \alpha_R \cdot \beta_t \cdot \sqrt{\ln(1 + V_R^2)}\right)} \quad (10.26)$$

$$\gamma_M = \exp(V_R \cdot (\alpha_R \beta_t + \Phi^{-1}(q)))$$

#### 10.1.2 Bestimmung von charakteristischen und Bemessungswerten aus Versuchen

Die Bemessung bzw. Überprüfung von Konstruktionen kann durch Versuche unterstützt werden. Dazu sollte die Verfügbarkeit von Vorinformationen und die Anzahl der durchgeführten Tests berücksichtigt werden. Der **charakteristische Wert** einer Stichprobe ist nach *DIN EN 14358:2016-11* [214] bei Zugrundelegung einer Normalverteilung für das 5%-Quantil

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) s_y \quad (10.27)$$

mit dem Mittelwert

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (10.28)$$

und der Standardabweichung

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0,05\bar{y} \right. \quad (10.29)$$

und bei logarithmischen Normalverteilung (5%-Quantil)

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad (10.30)$$

mit dem Mittelwert

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (10.31)$$

und der Standardabweichung

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \bar{y})^2}, 0,05 \right. \quad (10.32)$$

zu bestimmen. Dabei sind  $m_i$  die voneinander unabhängigen Prüfergebnisse. Werte für  $k_s$  sind nach *DIN EN 14358:2016-11* [214] abhängig von der Stichprobenanzahl  $n$  zu bestimmen. Dieser Ansatz darf nur zur Anwendung kommen, wenn die Stichprobe der angenommenen Verteilungsfunktion (Normalverteilung bzw. logarithmische Normalverteilung) entspricht. Andernfalls ist der nichtparametrische Ansatz zu verwenden. Dabei ist nach *DIN EN 14358:2016-11* [214]

$$m_k = y_{0,5} \left( 1 - \frac{k_{0,5,0,75}V}{\sqrt{n}} \right) \quad (10.33)$$

wobei  $y_{0,5}$  das aus den gereihten Prüfwerten zu bestimmende 5%-Quantil, und  $k_{0,5,0,75}$  der Faktor nach Gl. (10.34) ist.

$$k_{0,5,0,75} = \frac{0,49n + 17}{0,28n + 7,1} \quad (10.34)$$

Angaben zur Berechnung von **Bemessungswerten** aus Versuchen sind in *DIN EN 1990:2010 Anhang D* [16] gegeben. Bemessungswerte normalverteilter Größen sind aus

$$X_d = \eta_d \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} m_x \{l - k_n V_x\} \quad (10.35)$$

und lognormalverteilte Größen aus

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \exp[m_y - k_n s_y] \quad (10.36)$$

zu bestimmen. Die Berechnung von  $X_k(n)$  erfolgt prinzipiell identisch, wie in *DIN EN 14358:2016-11*, wobei die tabellarisierten Angaben für den Beiwert  $k_s(n)$  (entsprechend  $k_n$  in *DIN EN 1990:2010-12*) leicht voneinander abweichen. Weiter ist  $\eta_d$  ein Faktor für Modellunsicherheiten,  $m_x$  der Mittelwert der Variable aus Versuchen,  $m_y$  der Mittelwert berechnet aus den logarithmierten Einzelwerte und  $s_y$  der Schätzwert für die Standardabweichung  $\sigma$ . Die Berechnung von  $s_y$  hängt vom Grad der Informationen ab. So darf für aus Vorinformationen bekannte  $V_x$  der Wert für  $s_y$  nach *DIN EN 1990:2010-12* angenommen werden zu

$$s_y = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \approx V_x \quad (10.37)$$

Wenn  $V_x$  nicht aus Vorinformationen bekannt ist, dann ist  $s_y$  entsprechend Gl. (10.35) zu berechnen.

### 10.1.3 Probabilistische Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten

Bei dieser Methode werden die Teilsicherheitsbeiwerte einem iterativen Prozess anhand eines Optimierungskriteriums bestimmt. Die Werte werden anfänglich geschätzt und durch den Vergleich der damit berechneten Zuverlässigkeit mit der Zielzuverlässigkeit bewertet. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden dann iterativ unter Verwendung des Kriteriums

$$\sum_{i=1}^n w_i (\beta_i - \beta_t)^2 \stackrel{!}{=} \text{Min} \quad (10.38)$$

bestimmt. Dabei sind  $\beta_i$  die erreichte Zuverlässigkeit des jeweiligen Grenzzustandes,  $\beta_t$  die Zielzuverlässigkeit und  $w_i$  der Wichtungsfaktor für die jeweilige Bemessungssituation.

Der Zuverlässigkeitsindex in der jeweiligen Bemessungssituation kann mittels eines der vorangestellten Verfahren berechnet werden. Dabei kann die Versagenswahrscheinlichkeit für jeden Grenzzustand explizit erfasst werden. Die Sensitivität der Zuverlässigkeit in den Bemessungssituationen muss nicht mehr über fixe Faktoren geschätzt werden, sondern wird innerhalb der Zuverlässigkeitsanalyse bestimmt. Anhand der Wichtungsfaktoren  $w_i$  wird die Bedeutung einzelnen Bemessungssituationen für das Kalibrierungsziel einbezogen. In der Berechnung können ein oder mehrere Sicherheitsbeiwerte iterativ optimiert werden. Die Berechnungszeit ist abhängig vom Umfang der zu berücksichtigten Bemessungssituationen und kann schnell umfangreich werden.

*Fahrni, Sanctis & Frangi* [253] führten vergleichende Untersuchungen zwischen probabilistischer Optimierung und bemessungsbasierter Kalibrierung (design-based calibration) durch. Letztere resultiert in deutlich verkürzten Rechenzeiten und kann zur Entwicklung eines Normungsformates dienen. Aufgrund der deutlichen Abweichungen der errechneten Zuverlässigkeitsindices sollte jedoch zur finalen Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte die probabilistische Optimierung verwendet werden.

## 10.2 Beispiele zur Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden

### 10.2.1 Zugstab unter ständiger Beanspruchung mit FORM

#### Ausgangsannahmen

Das vorgestellte Beispiel ist in *Loebjinski, Rug & Pasternak* [49] zu finden. Betrachtet wird ein Zugstab (Rechteckquerschnitt) unter ständiger Belastung. Folgende Annahmen werden für dieses Beispiel zugrunde gelegt (Tab. 10.1). Für dieses Beispiel werden die Modellunsicherheiten vernachlässigt.

Tab. 10.1: Ausgangsannahmen für die Beispielrechnung

Annahme	Quelle
<b>Material</b>	Nadelholz C24, Fichte $f_{t,0,k} = 14 \text{ N/mm}^2$
	Nutzungsstufe 1, nur ständige Belastung $k_{mod} = 0,6$
<b>Geometrie</b>	$b = 120 \text{ mm}$ $h = 200 \text{ mm}$ $A_{net} = 24000 \text{ mm}^2$
<b>Teilsicherheitsbeiwerte</b>	$\gamma_G = 1,35$ - ständige Einwirkung $\gamma_M = 1,30$ - Materialwiderstand

#### Berechnung der Einwirkung für 100%-ige Querschnittsauslastung

Bemessungswert des Materialwiderstands ist

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 14 \text{ N/mm}^2}{1,3} = 6,46 \quad (10.39)$$

mit  $k_{mod}$  dem Modifikationsbeiwert zur Berücksichtigung der Nutzungsstufe und  $f_{t,0,k}$  dem charakteristischen Wert des Materialwiderstandes. Für eine 100%-ige Querschnittsauslastung ergibt sich

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = 1 \quad (10.40)$$

Der Effekt der Einwirkung ergibt sich zu

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_{t,0,d}}{A_{net}} \quad (10.41)$$

mit  $F_{t,0,d}$  dem Bemessungswert der Einwirkung. Aus Umstellung der Nachweisgleichung

$$F_{t,0,d} = f_{t,0,d} \cdot A \quad (10.42)$$

wird der Bemessungswert der Einwirkung  $F_{t,0,d}$  bestimmt zu

$$F_{t,0,d} = \gamma_G \cdot F_{t,0,k} \quad (10.43)$$

und die charakteristische Einwirkung  $F_{t,0,k}$  zurückgerechnet

$$F_{t,0,k} = \frac{f_{t,0,d} \cdot A_{net}}{\gamma_G} = \frac{6,46 \text{ N/mm}^2 \cdot 120 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm}}{1,35} = 1148,44 \text{ N} \quad (10.44)$$

#### Grenz Zustandsgleichung und Transformation der Basisvariablen

Die Auswirkung der Einwirkung  $E$  und der dem entgegengesetzte Widerstand  $R$  errechnen sich mit

$$E = \frac{F_{t,0}}{A_{net}} \quad (10.45)$$

$$R = k_{mod} \cdot f_{t,0} \quad (10.46)$$

Daraus ergibt sich:

$$g = R - E = \left( k_{mod} \cdot f_{t,0} \cdot \left( \frac{F_{t,0}}{A} \right) \right) \quad (10.47)$$

Modellunsicherheiten werden vernachlässigt, es ist  $x_1 = f_{t,0}$  und  $x_2 = F_{t,0}$ . Ständige Einwirkungen werden als 50%-Quantil in der Normung angegeben. Auch für andere Quantile bestimmt sich der charakteristische Wert der Normalverteilung nach Gl. (10.48). Der Variationskoeffizient der Rohdichte und damit des Eigengewichtes wird mit  $V_E = 10\%$  nach PMC [59] angenommen. In der DIN 68364:2003-05 [108] findet für Fichte ein Wert von  $V_E = 9,7\%$ .

$$m_{x2} = \frac{F_{t,0,k}}{(1 + \Phi^{-1}(0,50) \cdot V_{x2})} = 114844,44N \quad (10.48)$$

Der Mittelwert des Widerstandes wird aus der Rückrechnung des 5%-Quantils für die Zugfestigkeit bestimmt. Widerstandsgrößen werden in der Regel als logarithmisch normalverteilt angesehen, so auch in diesem Beispiel. Dafür ergibt sich die Berechnung des Mittelwertes unter Verwendung des Variationskoeffizienten ( $V_R = 30\%$  nach JCSS [61]) nach Gl. (10.49):

$$m_{x1} = \frac{f_{t,0,k}}{e^{(-\Phi^{-1}(0,05) \cdot V_{x1} - 0,5 \cdot V_{x1}^2)}} = 23,987N/mm^2 \quad (10.49)$$

Die Berechnung der Zuverlässigkeit erfolgt nach dem Rackwitz-Fießler-Algorithmus. Nicht-normalverteilte Größen müssen dabei durch normalverteilte Größen im Bemessungspunkt approximiert werden. Hier wird die ständige Einwirkung als normalverteilt, die Zugfestigkeit als lognormalverteilt modelliert, demzufolge muss nur die Widerstandsgröße umgerechnet werden. Dies erfolgt nach Spaethe [63] mit

$$\sigma_{u1} = \sqrt{\ln \left( 1 + \left( \frac{\sigma_{x1}}{m_{x1}} \right)^2 \right)} = 0,2936 \quad (10.50)$$

$$m_{u1} = \ln(m_{x1}) - \frac{\sigma_{u1}^2}{2} = 3,1344 \quad (10.51)$$

Die Parameter für die Berechnung der Zuverlässigkeit werden in Tab. 10.2 zusammengestellt:

Tab. 10.2: Ausgangsparameter für die iterative Bemessung

i	$m_{xi} = E[x_i]$	$\sigma_{xi} = (\text{Var}[x_i])^{1/2}$	$V_x$	Parameter		Typ	Bemerkung
1	23,987	7,196	0,30	$m_{u,i} = 3,134$	$\sigma_{u,1} = 0,2936$	LN	Widerstand
2	114844,44	11484,44	0,10	$= m_{xi}$	$= \sigma_{xi}$	N	Einwirkung

### Berechnung des Zuverlässigkeitsindex

Die folgende Berechnung lehnt sich an ein Beispiel in Spaethe [63] an.

(1) Startvektor bestimmen, es werden die Mittelwerte als Startwerte gewählt

$$x^{(0)} = \begin{pmatrix} 23,987 \\ 114844,44 \end{pmatrix} \quad (10.52)$$

(2) Transformation in den Standardnormalraum mit den Punkten, an denen Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion übereinstimmen, da hier nach *Spaethe* [63] eine gute Näherung erreicht wird.

$$F_{x_1}(x_1^{(0)}) = \varphi\left(\frac{x_1^* - m_{x_1}^*}{\sigma_{x_1}^*}\right) = \varphi\left(\frac{\ln(23,987) - 3,1344}{0,2936}\right) = \varphi(0,1468) = 0,5583 \quad (10.53)$$

$$f_{x_1}(x_1^{(0)}) = \frac{1}{\sigma_{x_1}^*} \phi\left(\frac{x_1^* - m_{x_1}^*}{\sigma_{x_1}^*}\right) = \frac{1}{23,987 \cdot 0,2936} \phi(0,1468) = 0,056 \quad (10.54)$$

Standardabweichung und Mittelwert der äquivalenten Normalverteilung sind

$$\sigma_{x_1}^{*(0)} = \frac{1}{f_{x_1}(x_1^{(0)})} \phi\left(\varphi^{-1}\left(F_{x_1}(x_1^{(0)})\right)\right) = \frac{1}{0,056} \phi(\varphi^{-1}(0,5583)) = 7,042 \quad (10.55)$$

$$m_{x_1}^{*(0)} = x_{x_1}^{(0)} - \sigma_{x_1}^{*(0)} \varphi^{-1}\left(F_{x_1}(x_1^{(0)})\right) = 23,987 - 7,107 \cdot \varphi^{-1}(0,5583) = 22,953 \quad (10.56)$$

$$\sigma_{x_2}^{*(0)} = 11484,44 \quad (10.57)$$

$$m_{x_2}^{*(0)} = 114844,44 \quad (10.58)$$

Da die Einwirkung ( $x_2$ ) als normalverteilt modelliert wird, erfolgt keine Umrechnung.

(3) Berechnung des zugehörigen Vektors  $y^{(k)}$  im standardisierten Raum

$$y_1^{(k)} = \frac{x_1^{(k)} - m_{x_1}^{*(k)}}{\sigma_{x_1}^{*(k)}} = \frac{23,987 - 22,953}{7,402} = 0,147 \quad (10.59)$$

$$y_2^{(k)} = \frac{x_2^{(k)} - m_{x_2}^{*(k)}}{\sigma_{x_2}^{*(k)}} = \frac{114844,44 - 114844,44}{11484,44} = 0 \quad (10.60)$$

(4) Berechnung der Grenzzustandsgleichung und der Ableitungen im Bemessungspunkt

$$h(y^{(0)}) = g(x^{(0)}) = \left(k_{mod} \cdot x_1^0 \left(\frac{x_2^0}{A}\right)\right) = 9,607 \quad (10.61)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y_1} \Big|_{y^{(0)}} = \frac{\partial g}{\partial x_1} \Big|_{x^{(0)}} \cdot \sigma_{x_1}^{*(0)} = k_{mod} \cdot \sigma_{x_1}^{*(0)} = 0,6 \cdot 7,0415 = 4,2249 \quad (10.62)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y_2} \Big|_{y^{(0)}} = \frac{\partial g}{\partial x_2} \Big|_{x^{(0)}} \cdot \sigma_{x_2}^{*(0)} = -\frac{1}{A} \cdot \sigma_{x_2}^{*(0)} = -\frac{1}{24000} \cdot 11484,44 = -0,478 \quad (10.63)$$

(5) Koeffizienten der Tangentialhyperebene an  $h(y) = 0$  im Punkt  $y^{(k)}$

(Sensitivitätsfaktoren und Sicherheitsindex)

$$\alpha_i^{(k)} = \frac{-\frac{\partial h}{\partial y_i} \Big|_{y = y^{(k)}}}{\left(\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h}{\partial y_j} \Big|_{y = y^{(k)}}\right)^2\right)^{1/2}} \quad (10.64)$$

$$\alpha_1^{(0)} = \frac{-4,2249}{\sqrt{4,2249^2 + 0,478^2}} = -0,994 \quad (10.65)$$

$$\alpha_2^{(0)} = \frac{0,478}{\sqrt{4,2249^2 + 0,478^2}} = 0,113 \quad (10.66)$$

$$\beta^{(0)} = \frac{h(y^{(k)}) - \sum_{j=1}^m y_j^{(k)} \frac{\partial h}{\partial y_j} \Big|_{y=y^{(k)}}}{\left( \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial h}{\partial y_j} \Big|_{y=y^{(k)}} \right)^2 \right)^{1/2}} = \frac{9,607 - 0,147 \cdot 4,2249 - 0 \cdot 0,478}{\sqrt{4,2249^2 + 0,478^2}} = 2,114 \quad (10.67)$$

(6) Verbessertes Näherungsvektor

$$x_i^{(k+1)} = m_{xi}^{*(k)} + \alpha_i^{(k)} \cdot \sigma_{xi}^{*(k)} \cdot \beta^{(k)} \quad (10.68)$$

$$x_1^{(1)} = 22,9535 - 0,993 \cdot 7,042 \cdot 2,114 = 8,17 \quad (10.69)$$

$$x_2^{(1)} = 114844,44 + 0,113 \cdot 11484,44 \cdot 2,114 = 117587,87 \quad (10.70)$$

Dieser Vektor ist Startpunkt für die weitere Iteration. Er wird anstelle der Erwartungswerte in Schritt (2) verwendet. Es ergeben sich folgende Iterationsergebnisse:

Tab. 10.3: Ergebnisse der iterativen Berechnung – Rackwitz-Fießler Algorithmus

k	$m_{x1}^{*(k)}$	$m_{x2}^{*(k)}$	$\sigma_{x1}^{*(k)}$	$\sigma_{x2}^{*(k)}$	$x_1^{(k)}$	$x_2^{(k)}$	$\beta^{(k)}$	$\alpha_1 = \alpha_R$	$\alpha_2 = \alpha_E$
0	22,9535	114844,44	7,0415	11484,44	23,987	114844,44	2,114	-0,993	0,113
1	16,612	114844,44	2,397	11484,44	8,165	117587,87	3,419	-0,949	0,316
2	17,280	114844,44	2,594	11484,44	8,836	127241,206	3,429	-0,956	0,294
3	17,225	114844,44	2,577	11484,44	8,779	126416,325	3,429	-0,956	0,296
4	17,230	114844,44	2,579	11484,44	8,784	126485,12	3,429	-0,955	0,295
5	17,229	114844,44	2,578	11484,44	8,783	126479,078	3,429	-0,955	0,295

Unter den getroffenen Annahmen stellt sich ein Zuverlässigkeitsniveau von  $\beta = 3,43$  ein, dies deckt sich mit der Vergleichsrechnung mit dem Programm *COMREL 9.00* der Firma *SYSREL*. In Bezug auf den Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta_t = 3,8$  aus *DIN EN 1990:2010-12 Anhang C* [16] wäre der erzielte Wert zu niedrig und der Nachweis somit nicht erfüllt. Eine Diskussion dieses Zielwertes wird in Kap. 7.2 vorgenommen.

### 10.2.2 Zugstab unter ständiger Beanspruchung – alternative FORM Berechnung

Zum Vergleich wird das vorangegangene Beispiel mit der alternativen Methode erneut vorgerechnet.

Als Startwerte für die Iteration werden der Einheitsvektor im Standardnormalraum verwendet:

$$u^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10.71)$$

Die Grenzzustandsfunktion im standardisierten Raum mit Variablentransformation lautet

$$g^{(0)} = \left( k_{mod} \cdot \exp(\sigma_{u,1} \cdot u_1 + m_{u,1}) \right) \left( \frac{(\sigma_2 \cdot u_2 + m_2)}{A} \right) = 13,281 \quad (10.72)$$

Die Funktion wird partiell nach den Variablen  $u_1$  und  $u_2$  abgeleitet und die Werte mittels der gewählten Startwerte bestimmt:

$$a_1^{(0)} = \frac{\partial g(x)}{\partial u_1} = \sigma_{u,1} \cdot \exp(\sigma_{u,1} \cdot u_1 + m_{u,1}) = 9,044 \quad (10.73)$$

$$a_2^{(0)} = \frac{\partial g(x)}{\partial u_2} = -\frac{\sigma_2}{A} = -0,479 \quad (10.74)$$

Daraus bestimmt sich der Zuverlässigkeitsindex zu

$$\beta(u^{(0)}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 1,414 \quad (10.75).$$

Zur Bestimmung des verbesserten Näherungsvektors wird der Faktor  $\lambda$  berechnet:

$$\lambda^{(0)} = \frac{(a_1^0 \cdot u_1^0 + a_2^0 \cdot u_2^0) - g(x)^0}{(a_1^0)^2 + (a_2^0)^2} = -0,057 \quad (10.76)$$

Der verbesserte Näherungsvektor lautet

$$u_1^{(1)} = a_1^{(0)} \cdot \lambda^{(0)} = -0,513 \quad (10.77)$$

$$u_2^{(1)} = a_2^{(0)} \cdot \lambda^{(0)} = 0,027 \quad (10.78)$$

Tab. 10.4: Ergebnisse der iterativen Berechnung – alternative FORM-Methode

Iteration	$u_1$	$u_2$	$\beta$	$g(u)$	$a_1$	$a_2$	$\lambda$
1	1,000	1,000	<b>1,414</b>	13,218	9,044	-0,479	-0,057
2	-0,513	0,027	<b>0,514</b>	7,054	5,800	-0,479	-0,297
3	-1,720	0,142	<b>1,726</b>	3,463	4,069	-0,479	-0,627
4	-2,552	0,300	<b>2,570</b>	1,584	3,187	-0,479	-0,950
5	-3,026	0,454	<b>3,060</b>	0,664	2,773	-0,479	-1,171
6	-3,248	0,560	<b>3,296</b>	0,257	2,599	-0,479	-1,284
7	-3,337	0,614	<b>3,393</b>	0,094	2,532	-0,479	-1,331
8	-3,370	0,637	<b>3,429</b>	0,034	2,507	-0,479	-1,349
9	-3,381	0,645	<b>3,442</b>	0,012	2,498	-0,479	-1,355
10	-3,386	0,648	<b>3,447</b>	0,004	2,495	-0,479	-1,357
11	-3,387	0,649	<b>3,449</b>	0,001	2,494	-0,479	-1,358
12	-3,388	0,650	<b>3,449</b>	0,001	2,494	-0,479	-1,358
13	-3,388	0,650	<b>3,450</b>	0,000	2,494	-0,479	-1,358
14	-3,388	0,650	<b>3,450</b>	0,000	2,494	-0,479	-1,359
15	-3,388	0,650	<b>3,450</b>	0,000	2,494	-0,479	-1,359

Es stellt sich  $\beta = 3,45$  ein. Die Sensitivitätsfaktoren im Bemessungspunkt sind  $\alpha_1 = -0,98$  und  $\alpha_2 = 0,19$ .

Beide Berechnungsansätze konvergieren zum selben Ergebnis

### 10.2.3 Zugstab unter ständiger Beanspruchung mit Monte-Carlo-Simulation

Das Beispiel „Zugstab unter ständiger Belastung“ (Kap. 10.2.1) wird in Form einer Simulation aufbereitet (Abb. 10.1 und Abb. 10.2). Deutlich wird, dass die Anzahl der Simulationen von großer Bedeutung für das Ergebnis ist. Ab einer gewissen Anzahl nimmt die Genauigkeit jedoch nicht mehr zu. Es ergibt sich ein etwas höherer Wert für den Zuverlässigkeitsindex im Vergleich zur FORM-Berechnung, welcher jedoch gering und auf die Modellierungsunterschiede zurückzuführen ist.



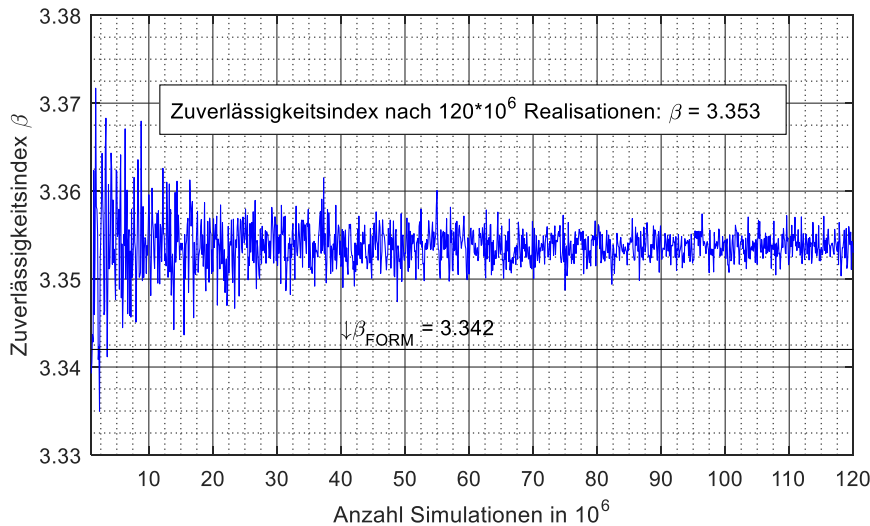


Abb. 10.1: Beispiel "Zugstab unter ständiger Belastung" – Zuverlässigkeitsindex mittels Monte-Carlo-Methode

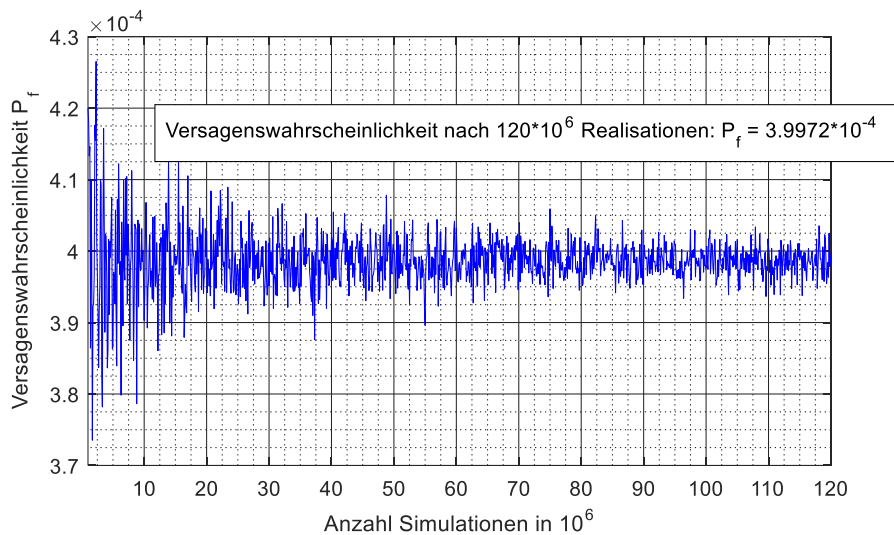


Abb. 10.2: Beispiel "Zugstab unter ständiger Belastung" – Versagenswahrscheinlichkeit mittels Monte-Carlo-Methode

### 10.2.4 Probabilistische Kostenoptimierung

Das nachfolgende Beispiel basiert auf Unterlagen aus [87]. Betrachtet wird als einfaches Beispiel ein Träger auf zwei Stützen belastet durch eine Streckenlast. Die Querschnittshöhe wurde schrittweise erhöht und die Entwicklung der Gesamtkosten betrachtet. Damit ist  $z_d = h$  in Gl. (3.38). Annahmen für die Kosten wurden ingenieurmäßig geschätzt. Einwirkung und Widerstand werden vereinfacht normalverteilt modelliert. Die Modellierungsannahmen sind in Tab. 10.5 enthalten, Abb. 10.3 zeigt das Belastungsbild.

Tab. 10.5: Beispiel 3.6 - Ausgangsannahmen

Geometrie		Lasten		Widerstand		Kosten			
$b$ [m]	$l$ [m]	$\mu_s$ [N/m]	$V_s$	$f_k$ (5% Quant.) [N/mm <sup>2</sup> ]	$V_R$	$C_0$	$C_1$	$C_{constr}(h)$	$H$
0,2	6,0	2	0,2	30	0,25	200	5000	$C_0 + C_1 \cdot h$	$10 \cdot 10^6$

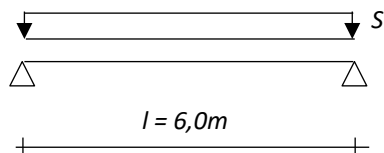


Abb. 10.3: Beispiel 3.6 - einfaches Belastungsbild

Abb. 10.4 illustriert das Ergebnis abhängig von der Querschnittshöhe  $h$ . Der optimale Punkt des Optimierungsproblems ist beim Minimum der Gesamtkostenkurve erreicht.

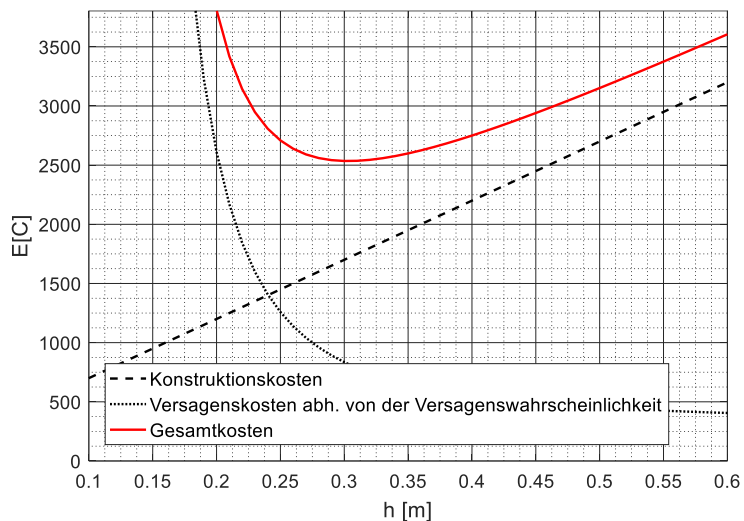


Abb. 10.4: Beispielhafte Kostenoptimierung in Abhängigkeit von Konstruktions- und Versagenskosten

## 10.3 Beispielrechnungen zum Eigengewicht von Decken- und Dachkonstruktionen

### 10.3.1 Eigengewicht von Holzbalkendecken

Für Holzbalkendecken werden Eigenlasten und Streuungen von Füllstoffen benötigt. Erwartungswerte und Streuungen für relevante Materialien können *Rackwitz* [98] und *DIN EN 1991-1-1:2010-12* entnommen werden. Im Folgenden werden verschiedene Deckenkonstruktionen hinsichtlich Erwartungswert und Variationskoeffizient des Eigengewichtes untersucht. Es können nicht alle in der Praxis vorhandenen Konstruktionen dargestellt werden, durch die Auswahl wird ein repräsentativer Überblick gegeben. Hintergrundinformationen zu den Deckenkonstruktionen können in *Lißner & Rug* [12] nachgelesen werden.

Erwartungswert und Variationskoeffizient der Rohdichte für verschiedene Holzarten sind in *DIN 68364:2003-05* [108] enthalten. *DIN EN 1991-1-1:2010-12* enthält Wichten für Holz abhängig von der Festigkeitsklasse, jedoch keine Variationskoeffizienten. Statistische Werte der weiteren Konstruktionselemente sind *Rackwitz* [98] und der *DIN EN 1991-1-1:2010-12* [109] entnommen bzw. ingenieurmäßig geschätzt. Die Zusammenfassung der einzelnen Elemente erfolgt anhand der Annahme statistischer Unabhängigkeit. Die Berechnung wird beispielhaft für die Dübelbodendecke gezeigt und für die restlichen Konstruktionen zusammengefasst. Die Berechnungen werden für unterschiedliche Angaben für Erwartungswerten des Eigengewichtes und Variationskoeffizienten durchgeführt.

Bei Dübelbodendecken werden die Balken direkt aneinander gedübelt. Tragfähigkeit und Wärmedämmfähigkeit sind dadurch sehr hoch, der Holzbedarf jedoch ebenfalls [12]. Die Konstruktion wird in Abb. 10.5 dargestellt.

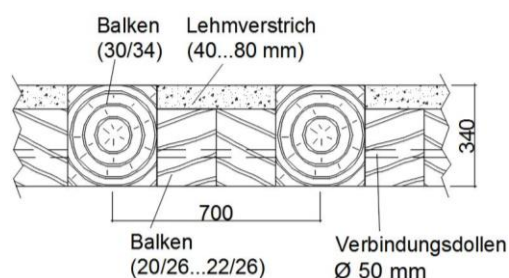


Abb. 10.5: Dübelbodendecke aus *Lißner & Rug* [12]

Die Parameter aus Tab. 10.6 werden zugrunde gelegt. Da die Holzart vorgegeben wird, wird der Erwartungswert der Rohwichte des Holzes aus *DIN 68364* [108] entnommen, siehe Tab. 4.4.

Tab. 10.6: Berechnung der statistischen Parameter einer Deckenkonstruktion - Beispiel Dübelbodendecke

Bauteil	Geometrie	$E[G]$	Ref. $E[G]$	$V_G$	Ref. $V_{E[G]}$	$\sigma_{E[G]}$
Holzbalken C24, S10, Kiefer	30/34 cm Achsabstand: 70 cm	$(5,2 \text{ kN/m}^3 * 0,30 \text{ m} * 0,34 \text{ m}) / 0,70 \text{ m}$ <b>= 0,76 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,128	DIN EN 68384 [108]	<b>0,097</b>
Holzbalken C24, S10, Kiefer	2 x 20/30 cm Achsabstand: 70 cm	$(5,2 \text{ kN/m}^3 * 0,40 \text{ m} * 0,30 \text{ m}) / 0,70 \text{ m}$ <b>= 0,89 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN EN 1991-1-1 [109]	0,128	DIN EN 68384 [108]	<b>0,114</b>
Lehmverstrich	4/40 cm Achsabstand: 70 cm	$(20 \text{ kN/m}^3 * 0,4 \text{ m} * 0,04 \text{ m}) / 0,7 \text{ m}$ <b>= 0,46 kN/m<sup>2</sup></b>	Rackwitz [98]	0,10	Rackwitz [98]	<b>0,046</b>

Es ergibt sich für Erwartungswert und Streuung der Konstruktion:

$$E[G] = E[G_{Balken}] + E[G_{Balken}] + E[G_{Lehmverstrich}] = 2,11 \text{ kN/m}^2 \quad (10.79)$$

$$Var[G] = 0,097^2 + 0,114^2 + 0,046^2 = 0,025 [\text{kN/m}^2]^2 \quad (10.80)$$

$$V[G_{Decke}] = \frac{\sqrt{0,025}}{2,11} \approx 0,074 = 7,4\% \quad (10.81)$$

Wie beschrieben ist der Gesamtvariationskoeffizient geringer als der der einzelnen Teile.

### 10.3.2 Eigengewicht von Dachaufbauten

#### Konstruktion mit Fichtenholz ohne Dämmung

Besonders relevant für die Betrachtung sind leichte Dächer, bei denen ein hoher Anteil veränderlicher Lasten vorliegt. Lasten werden in Bezug auf die Dachfläche bestimmt. Beispielhaft sei eine übliche Dachaußenhaut wie folgt aufgebaut:

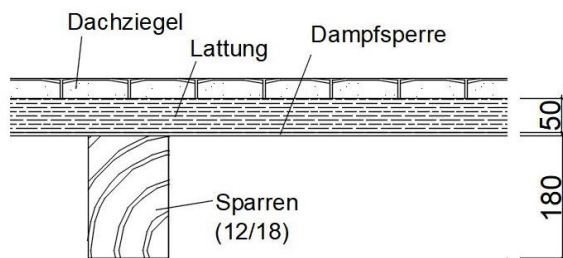


Abb. 10.6: Aufbau Dachkonstruktion ohne Dämmung

Für die Annahme von Fichtenholz ergibt sich nach Tab. 10.7.

Tab. 10.7: Daten für das Beispiel Eigengewicht einer Dachkonstruktion – ohne Dämmung

Bauteil	Geometrie	$E[G]$	Ref. $E[G]$	$V_G$	Ref. $V_G$	$\sigma_G$
Dach- ziegel		<b>0,55 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN EN 1991-1-1/NA [119]	0,05	Orientiert an Rackwitz [98]	<b>0,03</b>
Lattung C24, S10, Fichte	30/50 mm Achsabstand: 35 mm	$(4,6 \text{ kN/m}^3 * 0,03 \text{ m} * 0,05 \text{ m}) / 0,035 \text{ m}$ <b>= 0,20 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,097	DIN 68364 [108]	<b>0,02</b>
Sparren C24, S10, Fichte	12/18 cm Achsabstand: 80 cm	$(4,6 \text{ kN/m}^3 * 0,12 \text{ m} * 0,18 \text{ m}) / 0,80 \text{ m}$ <b>= 0,124 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,097	DIN 68364 [108]	<b>0,012</b>

10. Anhang

$$E[G] = E[G_{Dachziegel}] + E[G_{Lattung}] + E[G_{Sparren}] = 0,874 \text{ kN/m}^2 \quad (10.82)$$

$$\text{Var}[G] = 0,03^2 + 0,002^2 + 0,12^2 = 0,0014 [\text{kN/m}^2]^2 \quad (10.83)$$

$$V[G_{Decke}] = \frac{\sqrt{0,0014}}{0,874} \approx 0,043 = 4,3\% \quad (10.84)$$

### Eigengewicht von Dachaufbauten

#### – Konstruktion mit Kiefernholz ohne Dämmung

Zum Vergleich wird die Dachkonstruktion mit Kiefernholz betrachtet (Tab. 10.8).

Tab. 10.8: Daten für das Beispiel Eigengewicht einer Dachkonstruktion

Bauteil	Geometrie	$E[G]$	Ref. $E[G]$	$V_G$	Ref. $V_G$	$\sigma_G$
Dachziegel		<b>0,55 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN EN 1991-1-1/NA [119]	0,05	Orientiert an Rackwitz [98]	<b>0,03</b>
Lattung C24, S10, Kiefer	30/50 mm Achsabstand: 35 mm	$(5,2 \text{ kN/m}^3 * 0,03 \text{ m} * 0,05 \text{ m}) / 0,035 \text{ m}$ <b>= 0,22 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,128	DIN 68364 [108]	<b>0,03</b>
Sparren C24, S10, Kiefer	12/18 cm Achsabstand: 80 cm	$(5,2 \text{ kN/m}^3 * 0,12 \text{ m} * 0,18 \text{ m}) / 0,80 \text{ m}$ <b>= 0,14 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,128	DIN 68364 [108]	<b>0,02</b>

Anm.: Evtl. vorhandene Dampfsperre, Unterspannbahn und Dämmung sind vernachlässigbar.

$$E[G] = E[G_{Dachziegel}] + E[G_{Lattung}] + E[G_{Sparren}] = 0,91 \text{ kN/m}^2 \quad (10.85)$$

$$\text{Var}[G] = 0,03^2 + 0,03^2 + 0,02^2 = 0,0022 [\text{kN/m}^2]^2 \quad (10.86)$$

$$V[G_{Decke}] = \frac{\sqrt{0,0022}}{0,91} \approx 0,052 = 5,2\% \quad (10.87)$$

### Eigengewicht von Dachaufbauten

#### – Konstruktion mit Fichtenholz mit Dämmung

Die Konstruktion aus Bsp. 4.2 wird vergleichend mit einer Dämmung aus Glaswolle-Matten betrachtet (Abb. 10.7 und Tab. 10.9).

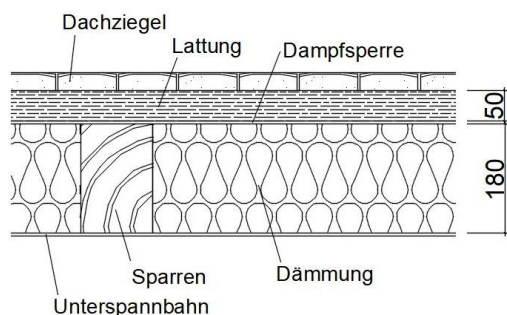


Abb. 10.7: Aufbau Dachkonstruktion mit Dämmung

Tab. 10.9: Daten für das Beispiel Eigengewicht einer Dachkonstruktion – mit Dämmung

Bauteil	Geometrie	$E[G]$	Ref. $E[G]$	$V_G$	Ref. $V_G$	$\sigma_G$
Dachziegel		<b>0,55 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN EN 1991-1-1/NA [119]	0,05	Orientiert an Rackwitz [98]	<b>0,03</b>
Lattung C24, S10, Fichte	30/50 mm Achsabstand: 35 mm	$(4,6 \text{ kN/m}^3 * 0,03 \text{ m} * 0,05 \text{ m}) / 0,035 \text{ m}$ <b>= 0,20 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,097	DIN 68364 [108]	<b>0,02</b>
Sparren C24, S10, Fichte	12/18 cm Achsabstand: 80 cm	$(4,6 \text{ kN/m}^3 * 0,12 \text{ m} * 0,18 \text{ m}) / 0,80 \text{ m}$ <b>= 0,124 kN/m<sup>2</sup></b>	DIN 68364 [108]	0,097	DIN 68364 [108]	<b>0,012</b>
Dämmung		$(1,5 \text{ kN/m}^3 * 0,68 \text{ m} * 0,18 \text{ m}) / 0,80 \text{ m}$ <b>= 0,23 kN/m<sup>2</sup></b>	Herstellerangabe, ungünstig	0,1	ungünstig geschätzt	<b>0,023</b>

Anm.: Evtl. vorhandene Dampfsperren und Unterspannbahnen sind vernachlässigbar.

$$E[G] = E[G_{\text{Dachziegel}}] + E[G_{\text{Lattung}}] + E[G_{\text{Sparren}}] + E[G_{\text{Dämmung}}] = 1,104 \text{ kN/m}^2 \quad (10.88)$$

$$\text{Var}[G] = 0,03^2 + 0,02^2 + 0,012^2 + 0,023^2 = 0,002 [\text{kN/m}^2]^2 \quad (10.89)$$

$$V[G_{\text{Decke}}] = \frac{\sqrt{0,002}}{1,104} \approx 0,041 = 4,1\% \quad (10.90)$$

## 10.4 Formelmäßige Zusammenhänge zur Berücksichtigung des Effekts der Langzeitbelastung

Wood [176] führte 126 Langzeittests an kleinen fehlerfreien Proben der Douglas-Fichte (6% und 12% Holzfeuchte) über einen Zeitraum von acht Jahren durch. Die Ergebnisse wurden im Jahre 1951 publiziert. Es wurde zum einen eine konstante Belastung über einen definierten Zeitraum und zum anderen eine konstante Erhöhung der Last bis zum Versagen gefahren. Beide Versuche werden mit dem folgenden Zusammenhang

$$f_t = \frac{108,4}{x^{0,04635}} + 18,3 \quad (10.91)$$

abgebildet, wobei  $x$  die Zeit in Sekunden ist. Bei Umrechnung auf die Zeitangabe in Stunden und bezogen auf eins für die Anfangsfestigkeit ergibt sich

$$f_t = 0,7416 \cdot t^{-0,04635} + 0,183 \quad (10.92)$$

Mit  $t$  der Zeit in Stunden. Wood [176] betont, dass die Schlussfolgerungen ohne weitere Untersuchungen nicht auf anderen Holzarten oder frisch gefälltes (nicht getrocknetes) Holz übertragen werden sollten. Einige extrapolierende Untersuchungen würde ein ähnliches Verhalten der Biegefestigkeit anderer Holzarten zeigen, weitere Untersuchungen seien jedoch nötig. Die dem Graphen nach Pearson [177] zugrundeliegende Berechnungsformel ist:

$$f_t = 0,915 - 0,07 \cdot \log(t) \quad (10.93)$$

Diese wurde aus der Auswertung mehrerer Untersuchungen und Bestimmung der Regressionsgleichung aus linearer Regression gewonnen. Höher ausgelastetes Holz (ca. 90% Auslastung) versagt zudem schneller. Pearson konnte anhand der Auswertung verschiedener Untersuchungen keinen Grenzwert für die Abnahme der Festigkeit feststellen. Bei einer Auslastung von unter 50% der Kurzzeitfestigkeit sei die Langzeitfestigkeit für übliche Standzeiten jedoch ausreichend.

Larsen & Theilgaard [178] stellen den Berechnungsansatz für eine Langzeitbelastung in den skandinavischen Ländern dar, dieser ist für den Zeitraum  $t \geq 1h$

$$f_t = 1 - 0,08 \cdot \log(t) \quad (10.94)$$

Madsen & Barret [179] führen umfangreiche Test (Biegebelastung) durch. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die Ergebnisse der Wood Kurve (Madison Concept) zu ungünstig seien. Die Autoren betonen, dass eine Extrapolation des Graphen weit über die untersuchten Testzeiträume (7 Stunden, 7 Tage, 70 Tage, 365 Tage) hinaus nicht sinnvoll sei, vor allem, weil dann die Festigkeit irgendwann auf null sinken würde, was nicht der Realität entspricht. Die Autoren vermuten, dass die Kurve an einem bestimmten Punkt wieder abflachen wird, dies sei jedoch durch weitere Untersuchungen zu bestätigen. Anhand der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die durchschnittliche Festigkeit nach zwei Monaten bei ca. 85% und nach einem Jahr bei ca. 75% der Kurzzeitfestigkeit liegt. Bei konservativer Exploration der Ergebnisse beträgt die Festigkeit nach 50 Jahre ca. 55% der Kurzzeitfestigkeit. Es ergibt sich die Mittelwertkurve aus den von Madsen & Barret untersuchten Spannungsniveaus nach Steck zu [78]:

$$f_t = 0,5679 \cdot 10^{0,2454 - \cos(15 \log(t))} \quad (10.95)$$

Madsen & Barret stellten keine Unterschiede der Langzeitfestigkeit bei trockenem und feuchtem Holz fest. Die Abnahme der Langzeitfestigkeit ist jedoch von der Spannungsgröße abhängig. Zudem trat das Versagen zumeist im Bereich von Strukturstörungen (Ästen) auf. Nach Steck [78] ist die Anwendung der Ergebnisse von Madsen/ Barrett bedenklich, da die Ergebnisse nur für den Lastfall ständige Last gelten, der Einfluss von Klimaschwankungen und des Querschnitts unbekannt ist und die Ergebnisse streng genommen nur für Bauholz aus Douglas-Fichte gelten.

C. C. Gerhards [254] wertet eine Vielzahl von Untersuchungen zur Langzeitbelastung auf Vollholz und Holzwerkstoffe aus. Er schlussfolgert, dass die Festigkeitseigenschaften unterschiedlich stark von einer Langzeitbelastung beeinflusst werden, so bestehe der größte Einfluss auf die Scherfestigkeit. Er leitet unterschiedliche Zusammenhänge für Biegung/ Druck, Abscheren und Zug rechtwinklig zur Faserrichtung für kleine fehlerfreie Proben ab. Zudem schlussfolgert er aus der Studie, dass die Lastdauer in exponentieller Beziehung mit der Spannung und die Maximallast in exponentieller Beziehung mit der Belastungsrate steht. Zudem sei die Biegefestigkeit von Vollholz weniger vom Effekt der Langzeitbelastung beeinflusst, als die Biegefestigkeit von Holzwerkstoffen. Es ist zu betonen, dass die Untersuchungen des Vollholzes an fehlerfreien Kleinkörpern durchgeführt wurden.

Alle angegebenen Berechnungsformeln gelten für die Zeit  $t$  in Stunden. Nach 50 Jahren unter Langzeitbelastung liegen die Festigkeiten nach allen Berechnungsansätzen bei knapp unter 60%.



## 10.5 Methoden der Parameterschätzung auf Grundlage von Versuchsdaten

### 10.5.1 Momentenmethode (MOM)

Die Momentenmethode wurde erstmal von *Karl Pearson* (1857-1936) in [255] verwendet. Bei dieser Methode wird die Schätzung der Parameter anhand der aus der Stichprobe ermittelten Momente durchgeführt [67], dies gilt für diskrete Variablen. Mittelwert  $\bar{x}$  und Standardabweichung  $s$  werden mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10.96)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10.97)$$

mit  $x_i$  den Einzelementen und der Anzahl der Einzelemente  $n$  berechnet. Für *erwartungstreue Schätzer*<sup>6</sup> werden sogenannte Biaskorrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Stichprobenanzahl verwendet. Diese werden bei *Plate* [62] angegeben mit  $\alpha_{bt}$  für den Variationskoeffizienten

$$\alpha_{bt} = \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (10.98)$$

$\alpha_{st}$  für den Schiefekoeffizienten

$$\alpha_{st} = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} \quad (10.99)$$

und  $\alpha_{kt}$  für die Kurtosis

$$\alpha_{kt} = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \quad (10.100)$$

Die Stichprobenanzahl hat einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Dadurch können Schätzfehler entstehen. Zur Überprüfung der Vertrauenswürdigkeit der Schätzung wird das Konfidenzintervall verwendet. Dazu wird zunächst davon ausgegangen, dass der gesuchte Parameter Stichprobe dem Parameter der Grundgesamtheit entspricht und anschließend der Bereich (größer bzw. kleiner als der Parameter der Grundgesamtheit), in dem der Parameter liegen kann [62]. Durch Vergleich mit einem festgelegten Grenzwert wird die Schätzung bewertet. Das Konfidenzniveau für die Bestimmung charakteristischer Werte aus Versuchen beträgt nach *DIN EN 14358:2016* [214]  $\alpha = 0,75$ , dies ist nach *DIN EN 1990:2010-12* [16] der übliche Wert.

### 10.5.2 Maximum-Likelihood-Methode (MLM)

Im *Probabilistic Model Code* [59] empfiehlt das *Joint Committee on Structural Safety (JCSS)* die Anwendung der Maximum Likelihood-Methode für die Schätzung von Verteilungsparametern aus Versuchsdaten, wobei ggf. andere Methoden zu Vergleichszwecken hinzugezogen werden sollen. Zunächst

<sup>6</sup> Nach *Plate* handelt es sich um einen erwartungstreuen Schätzer „[...] wenn sein Erwartungswert der theoretisch Parameter  $u_g$  der Gesamtheit ist“ [62].

muss die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit geschätzt werden. Die Likelihoodfunktion entsteht dann durch Multiplikation der Dichten der Parameter wie beispielsweise nach *Plate* [62]

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n | \lambda_1, \lambda_2, \dots) \cdot (dx)^n \quad (10.101)$$

$$= f(x_1 | \lambda_1, \lambda_2, \dots) f(x_2 | \lambda_1, \lambda_2, \dots) \dots f(x_n | \lambda_1, \lambda_2, \dots) (dx)^n$$

mit  $\lambda_i$  den Parametern der Dichtefunktion. Die Parameterschätzung erfolgt durch Logarithmieren und partielles Ableiten der Funktion, da so das Maximum der Funktion in Abhängigkeit der entsprechenden Parameter nach Gl. (10.102) ermittelt werden kann.

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \lambda_1} = 0, \frac{\partial \ln(L)}{\partial \lambda_2} = 0, \dots, \frac{\partial \ln(L)}{\partial \lambda_n} = 0 \quad (10.102)$$

### 10.5.3 Tail-fit mit zensierter Maximum-Likelihood Methode

Bei der Modellierung von Basisvariablen müssen diese insbesondere im für die Zuverlässigkeitsanalyse relevanten Bereich eine gute Approximation an die Daten erfahren. Dies ist von besonderer Bedeutung für die Qualität des Analyseergebnisses. So müssen Einwirkungen im oberen und Festigkeitseigenschaften im unteren Wertebereich mit möglichst kleinem Fehler modelliert werden.

Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, eine ist die Anpassung von Verteilungen mittels zensierter Maximum-Likelihood Methode (im Folgenden mit *censMLM* abgekürzt). Die Methode ist in *Faber, Köhler & Sørensen* [134] für die Modellierung von Festigkeitseigenschaften (d.h. für eine Anpassung im unteren Wertebereich) beschrieben. Die Likelihood-Funktion besteht aus zwei Teilen, wobei zum einen der Definitionsbereich bis zu einem festgelegten Grenzwert direkt (*L1*) und darüber hinaus indirekt (*L2*) betrachtet wird. Damit wird

$$L1 = \prod_{i=1}^j f(x_i | \theta) \quad (10.103)$$

$$L2 = P(X \geq x_G | \theta)^{n-j} \quad (10.104)$$

mit

$$P(X \geq x_G | \theta) = 1 - F(x_G | \theta) \quad (10.105)$$

Dabei ist *L1* die Wahrscheinlichkeit der *j* Beobachtungen kleiner gleich des Grenzwertes  $x_G$ . *L2* ist die Wahrscheinlichkeit der Werte, welche über dem Grenzwert liegen.  $1-F(x_G | \theta)$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert den Grenzwert überschreitet,  $\theta$  sind die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion. Zudem ist *n* die Anzahl aller Beobachtungen. Die Parameter der angepassten Verteilung können unter Lösung der Optimierungsaufgabe

$$\max_{\theta} (L1 \cdot L2) \quad (10.106)$$

gefunden werden. Als Grenzwert werden von *Faber, Köhler & Sørensen* [134] die unteren 30% der Daten empfohlen. Die Parameter werden als normalverteilt angenommen. Zur Anwendung der Methode muss ein großer Datensatz vorliegen, da die direkte Anpassung für weniger als ein Drittel der Daten erfolgt.

### 10.5.4 Tail-fit mit gewichteter Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Eine Methode zur Erzielung einer verbesserten Anpassung der Verteilung in Bereichen von besonderem Interesse ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit entsprechender Gewichtung. Die Methode ist in *Maes & Breitung* [116] beschrieben. Es können verschiedene Gewichtungskriterien zum Einsatz kommen, je nachdem in welchem Bereich die Daten stärker gewichtet werden sollen. So muss bei einer Anpassung im oberen Wertebereich der Fehler bezogen auf  $-\log(1 - F(x))$  minimiert werden, entsprechend werden die Daten mit diesem Kriterium gewichtet und anschließend mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Anpassung durchgeführt.

### 10.5.5 Schätzung der Eignung von Verteilungsfunktionen – Anderson-Darling-Test

Mit dem in *Anderson & Darling* [256] beschriebenen Anpassungstest kann eine Schätzung der Güte der Anpassung einer stetigen Verteilung an eine Stichprobe erfolgen. Dazu werden zwei Hypothesen aufgestellt. Die Nullhypothese  $H_0$  sagt aus, dass die getestete Verteilungsfunktion nicht abgelehnt wird. Die Hypothese  $H_1$  als Umkehrung der Nullhypothese beinhaltet die Ablehnung der getesteten Verteilung auf Basis der Datenlage. Dabei ist zu differenzieren, dass bei Annahme der Hypothese  $H_0$  dies nicht heißt, dass die Datenmenge der theoretischen Verteilung entspricht, sondern nur, dass diese auf Basis der Daten nicht abgelehnt wird.

Die sortierten Testgrößen werden anhand der zu testenden hypothetischen Verteilungsfunktion in eine Gleichverteilung transformiert. In der Schreibweise nach *Ciupack* [257] ist die Testgröße  $T$

$$T = \sqrt{-n - S} \quad (10.107)$$

$$\text{mit } S = \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot i - 1}{n} \cdot [\ln(F(X_i)) + \ln(1 - F(X_{n+1-i}))] \quad (10.108)$$

$S$  ist der Abstand der sortierten, in eine Gleichverteilung transformierten, Testdaten zur Gleichverteilung der theoretischen Verteilungsfunktion. Der Vergleichswert (kritischer Wert) wird abhängig vom Vertrauensniveau  $\alpha$  bestimmt. Für eine akzeptierte Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ist nach [257]

$$k_{0,05} = \frac{0,752}{1 + \frac{3}{4 \cdot n} + \frac{9}{4 \cdot n^2}} \quad (10.109)$$

### 10.5.6 Bayes'sches Updating

Eine Methode zur Aktualisierung probabilistischer Modelle auf Grundlage von Versuchsdaten ist das Bayes'sche Updating. Dieses Verfahren ermöglicht es, experimentell gewonnene Daten und weitere Zusatzinformationen in die Betrachtung einzubeziehen. Ziel ist, Ausgangs- und Zusatzinformationen vereinigt als Gesamtinformation zu berücksichtigen, siehe auch [258]. Dies ist vor allem für den Bestandsbau von Bedeutung, da hier Erfahrungswerte vorliegen und Daten an der bestehenden Konstruktion ermittelt werden können. Die Ausgangsdaten bzw. das Ausgangswissen werden in der sogenannten Priorifunktion (*a priori-Verteilung*) erfasst. Werden zusätzliche Daten ermittelt, werden diese

in der Posteriorifunktion (*a posteriori*-Verteilung) erfasst. Das Prinzip lässt sich nach *Rackwitz* [115] aus der Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit herleiten:

$$P(z|\theta) \cdot P'(\theta) = P(\theta|z) \cdot P(z) \quad (10.110)$$

Dabei ist  $P(\theta|z)$  die gesuchte Posterioriwahrscheinlichkeit. Durch Umstellen ergibt sich:

$$P''(\theta) = P(\theta|z) = \frac{P(z|\theta) \cdot P'(\theta)}{P(z)} \quad (10.111)$$

Wird  $P(z)$  mittels des Satzes der absoluten Wahrscheinlichkeiten ersetzt, kann nach *Rackwitz* [115]

$$P(z) = \sum_{j=1}^n P(z|\theta) \cdot P'(\theta) \quad (10.112)$$

geschrieben werden. Damit wird

$$P''(\theta) = \frac{P(z|\theta) \cdot P'(\theta)}{\sum_{j=1}^n P(z|\theta) \cdot P'(\theta)} \quad (10.113)$$

Ausgedrückt durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen kann für die Posterioriverteilung  $f''_{\theta}(\theta|\hat{x})$  schreiben

$$f''_{\theta}(\theta|\hat{x}) = \frac{f'_{\theta}(\theta)L(\hat{x}|\theta)}{\int f'_{\theta}(\theta)L(\hat{x}|\theta)d\theta} \quad (10.114)$$

geschrieben werden, wobei  $f'_{\theta}(\theta)$  die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Zufallsvariablen basierend auf Vorinformationen ist (Schreibweise nach [259]).  $L(\theta|\hat{x})$  die Likelihoodfunktion, nach *Spaethe* [63] die Wahrscheinlichkeit das Ergebnis  $\theta$  zu beobachten, wenn  $\theta = \theta$  ist. Diese ist nach *Spaethe* das Produkt der Wahrscheinlichkeitsdichten der  $n$  Einzelereignisse

$$L(\hat{x}|\theta) = \prod_{i=1}^n f_x(x_i|\theta) \quad (10.115)$$

In Gl. (10.114) ist  $\int f'_{\theta}(\theta)L(\theta|\hat{x})d\theta$  eine sogenannte Normalisierungskonstante. Mit der Posteriorifunktion kann die aktualisierte Funktion  $f'''(x)$  nach [259] wie folgt berechnet werden

$$f'''(x) = \int f_x(x|\theta)f''_{\theta}(\theta|\hat{x})d\theta \quad (10.11)$$

mit  $f''_{\theta}(\theta|\hat{x})$  der *a posteriori* Wahrscheinlichkeitsdichte und  $f_x(x|\theta)$  der Wahrscheinlichkeitsdichte von  $x$  abhängig von  $\theta$ . Durch schrittweise Verbesserung der Daten kann eine Zuschärfung der Parameter erreicht werden. Dabei wird die Posteriorifunktion des vorherigen Schrittes im Folgeschritt jeweils zur Priorifunktion [71]. Für Normalverteilungen existieren analytische Lösungen.

Für diese Arbeit wird die analytische Lösung wie in *Fink* [85] oder *Köhler, Sørensen & Faber* [86] beschrieben, angewendet. Da angenommen werden kann, dass Priori- und Posteriorifunktion zu selben Verteilungstyp gehören, handelt es sich bei der Priorifunktion um eine konjugierte Prioriverteilung.

10. Anhang

Nach *JCSS Probabilistic Model Code* [59] können die mit dieser Methode bestimmten Wahrscheinlichkeiten als korrekt angesehen werden, wenn ihnen eine große Anzahl an Entscheidungssituationen vorgeht. Die Wahrscheinlichkeiten können nach [59] auch bei sorgfältiger Analyse jedoch nur dann korrekt sein, wenn intuitive Entscheidungen nicht systematisch trendhaft in eine Richtung getroffen werden. In [59] wird betont, dass wo Datengrundlagen fehlen, statistische Parameter nicht deterministisch, sondern als Zufallsparametern angenommen werden, welche nicht auf Entscheidungen einzelnen Ingenieure, sondern Expertengruppen beruhen. Sind Daten vorhanden, werden Schätzungen auf dieser Basis verbessert. Weitere Details zum Bayes'schem Updating finden sich unter anderem in [223], [260] und [36]. Teil 3 des *Probabilistic Model Code* [61] enthält Hilfsmittel zur Ermittlung charakteristischer Werte anhand des Bayes'schen Updating. Insbesondere beim Bauen im Bestand stellt die Möglichkeit der schrittweisen Verfeinerung der Modellbildung durch Einbeziehung zusätzlicher Informationen ein großes Potential dar. Abb. 10.8 entnommen aus einer Veröffentlichung des *JCSS* [38] stellt den Vorgang schematisch dar.

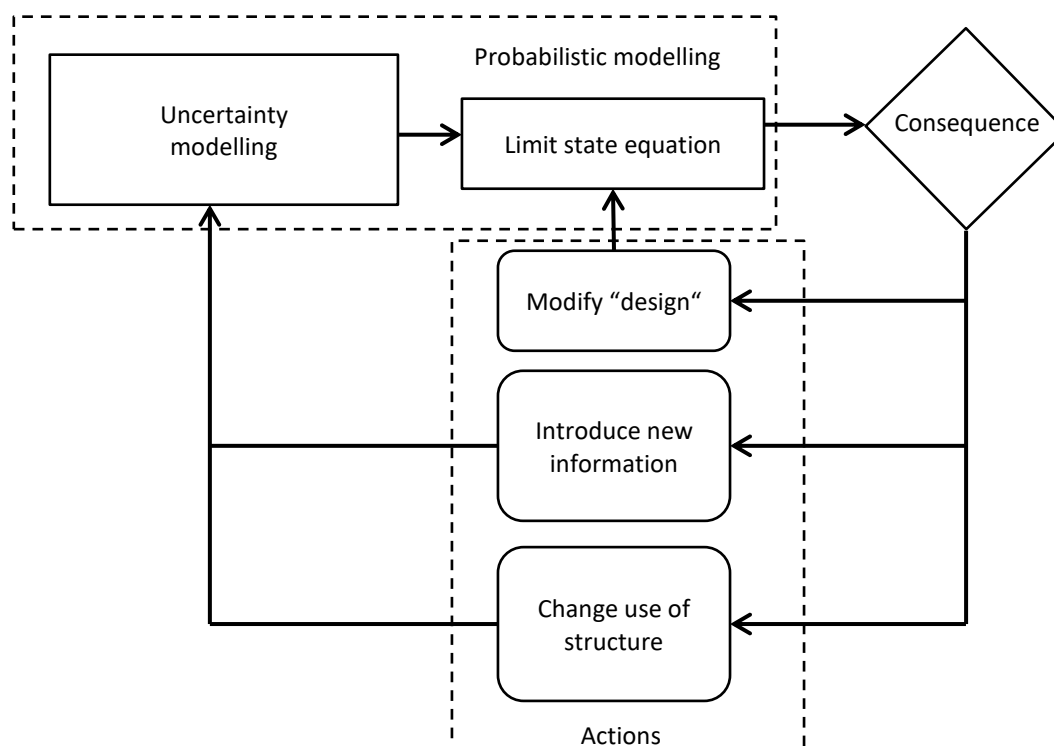


Abb. 10.8: Bayesian probabilistic assessment of structures aus *Diamantidis* [38]

Für die Methoden des Bayes'schen Updating muss nach dem vorliegenden Informationstyp, d. h. direkte (bzgl. Zielgröße) oder indirekte (bzgl. Referenzgröße) Informationen unterschieden werden, siehe beispielsweise Tab. 10.10 nach *Köhler* [261].

Tab. 10.10: Beispiele für die Kombination verschiedener Informationstypen aus *Köhler* [261]

	Direkt	Indirekt
<b>Gleicher Typ</b>	Prüfung von Materialeigenschaften	Sortierung durch Referenzeigenschaft
<b>Ungleicher Typ</b>	Probebelastung	Inspektion

Für aufgezeigte Lösungswege abhängig vom Typ der Information siehe beispielsweise *Köhler, Faber & Sørensen* [131]. Handelt es sich um direkte Informationen und gleichen Verteilungstyp der a priori Information und der zusätzlich berücksichtigten Daten („natural conjugate prior“, siehe *Köhler* [261]), bestehen analytische Lösungen. Siehe dazu *Raiffa & Schlaifer* [245] und das folgende Beispiel.

### **Beispiel: Bayes'sches Updating**

Das Bayes'sche Updating wird anhand eines einfachen Beispiels verdeutlicht. Angewendet wird die analytische Lösung für Informationen gleichen Verteilungstyps nach *Raiffa & Schlaifer* [245] und beruht auf den Unterlagen [262], [259]. Basierend auf Vorinformationen werde eine Zufallsgröße (beispielsweise die Druckfestigkeit eines Holzbauteils aus Nadelholz) als logarithmisch normalverteilt mit dem charakteristischen Wert (5%-Quantil) von  $x_{k,prior} = 21 \text{ N/mm}^2$  und dem Variationskoeffizienten  $V_{prior} = 0,20$  angenommen. Daraus ergeben sich die Momente der a-priori Verteilung zu

$$\mu_{prior} = \frac{x_{k,prior}}{\exp(\Phi^{-1}(0,05) \cdot V_{prior})} = 29,18 \text{ N/mm}^2 \quad (10.117)$$

$$\sigma_{prior} = V_{prior} \cdot \mu_{prior} = 5,83 \text{ N/mm}^2 \quad (10.118)$$

Alle Berechnungen werden im Raum standardisierter Zufallsgrößen durchgeführt. Die Berechnung der Verteilungsparameter im Normalraum ergibt  $\sigma_{u,prior} = 0,20 \text{ N/mm}^2$  und  $\mu_{u,prior} = 3,35 \text{ N/mm}^2$ . Am Untersuchungsobjekt werden vier Messungen (beispielsweise Bohrkernentnahmen) durchgeführt, es ergeben sich die Ergebnisse  $x = [35,1 \quad 34,3 \quad 33,2 \quad 36,1] \text{ N/mm}^2$ .

Eine logarithmische Normalverteilung wird unterstellt. Somit liegt derselbe Verteilungstyp vor und eine analytische Berechnung ist möglich. Die Einheiten werden im Folgenden ausgelassen. Der Erwartungswert der a-posteriori Funktion ergibt sich über die Gewichtung der Mittelwerte aus a-priori Funktion und Testergebnissen anhand der Stichprobenzahl mit

$$\mu_{post} = \frac{n_{dat} \cdot \bar{x} + n' \cdot \mu_{prior}}{n''} \quad (10.119)$$

mit  $\bar{x}$  dem Mittelwert der logarithmierten Testergebnisse,  $n_{dat}$  der Anzahl der Tests, sowie

$$n' = \frac{\sigma_{prior}^2}{\sigma'} \quad (10.120)$$

und

$$n'' = n' + n_{dat} \quad (10.121)$$

mit  $\sigma'$  der Unsicherheit der Information, abzuschätzen aus Erfahrungswerten (hier  $\sigma' = 0,10$  angenommen). Das zweite Moment der a posteriori Funktion berechnet sich mit

$$\sigma_{post} = \frac{\sigma_{prior}}{\sqrt{n''}} \quad (10.122)$$

Damit berechnet sich  $\mu_{post} = 3,45$  und  $\sigma_{post} = 0,07$ . Die aktualisierte Verteilungsfunktion (predictive model) ergibt sich unter Beibehaltung des Erwartungswertes der a-posteriori Funktion ( $\mu_{pred} = 3,43$ ) und Berücksichtigung der Unsicherheiten aus dem Aktualisierungsprozess in der Standardabweichung mit

$$\sigma_{pred} = \sqrt{\sigma_{post}^2 + \sigma_{prior}^2} = 0,21 \quad (10.123)$$

Abb. 10.9 zeigt Verteilungsdichte- und Verteilungsfunktion für dieses Beispiel für die aus dem Updating-Verfahren bestimmten logarithmischen Normalverteilungen. Tab. 10.11 stellt die Parameter zusammen.

Tab. 10.11: Verteilungsparameter des beispielhaften Bayes'schen Updating

Funktion	$\mu$ [N/mm <sup>2</sup> ]	V [-]	$x_k$ (5%-Quantil LN) [N/mm <sup>2</sup> ]
a-priori	29,18	0,20	21,00
a-posteriori	34,68	0,04	32,69
Aktualisierung	32,23	0,21	22,32

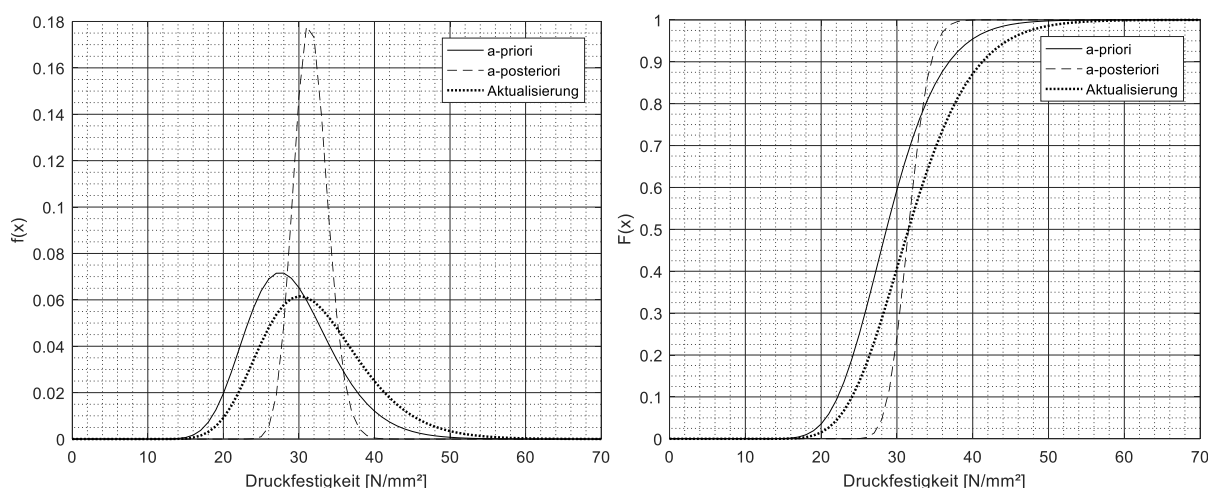


Abb. 10.9: Beispielhaftes Bayes'sches update (links: Verteilungsdichtefunktion  $f(x)$ , rechts: Verteilungsfunktion  $F(x)$ )

Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Informationen zur Aktualisierung des Modells ist abhängig vom Informationstyp, d.h. direkte (Zielvariable) oder indirekte (Referenzvariable) Information. Weitere Ausführungen zum Bayes'schem Updating können beispielsweise Köhler, Sørensen & Faber [131] entnommen werden.

### 10.5.7 Bestimmung von Verteilungsparametern aus Referenzeigenschaften - Stochastisches Modell der Sortierung

Ein stochastisches Modell zur Berücksichtigung des Sortiervorganges zur Ableitung des Materialmodells findet sich bei Pöhlmann & Rackwitz [212]. Die Zielvariable sei  $Y$ . Diese ist über ein lineares Regressionsmodell mit der Referenzgröße  $X$  verbunden, welche durch Tests bestimmt werden kann. Im Rahmen dieser Untersuchungen können Fehler auftreten, es wird somit eine mit Fehlern behaftete Größe  $Z$  gemessen, sodass

$$Z = X + \tau \quad (10.124)$$

dabei ist  $\tau$  ein normalverteilter Fehlerterm mit  $\tau \sim N(0, \sigma_\tau^2)$ . Die Zielvariable  $Y$  ist nicht von  $\tau$  abhängig. Es wird angenommen, dass die gemessene Variable  $X$  normalverteilt ist mit  $N(0, \sigma_E^2)$ . Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Variable  $Y$  in einer Festigkeitsklasse wird nach *Rackwitz & Pöhlmann* [212] abgeleitet mittels

$$f_y(y) \frac{1}{K} \frac{\sigma}{\sigma_\tau \sigma_E} \varphi \left( \frac{y - a}{b} - \frac{a}{b} - \mu_E \right) / \sigma_M \left( \Phi \left( \frac{C_o}{\sqrt{1 + C_I^2}} \right) - \Phi \left( \frac{C_u}{\sqrt{1 + C_I^2}} \right) \right) \quad (10.125)$$

mit

$$\sigma = \frac{\sigma_\tau \sigma_E}{b \sigma_M} \quad (10.126)$$

$$\sigma_M^2 = \left( \frac{\sigma_\tau^2}{b^2} + \sigma_E^2 \right) \quad (10.127)$$

$$m = \frac{(y - a) / \sigma_E^2 / b + \mu_E / \sigma_E^2}{1 / (\sigma_E^2 / b^2) + 1 / \sigma_E^2} \quad (10.128)$$

Die Parameter zur Einbeziehung der Klassengrenzen sind

$$C_o = \frac{g_o - m}{\sigma_\tau} \quad (10.129)$$

$$C_u = \frac{g_u - m}{\sigma_\tau} \quad (10.130)$$

$$C_I = -\frac{\sigma}{\sigma_\tau} \quad (10.131)$$

Dabei sind  $g_o$  bzw.  $g_u$  die Klassengrenzen des Sortierparameters für die Klasse. Die Regressionsgerade berechnet sich mit

$$y = a + bx + \varepsilon > 0 \quad (10.132)$$

mit den Parametern der linearen Regressionsbeziehung  $a$  und  $b$ . Die Normalisierungskonstante  $K$  kann berechnet mit

$$K = \Phi \left( -\frac{C'_o}{\sqrt{1 + C_1'^2}} \right) - \Phi \left( -\frac{C'_u}{\sqrt{1 + C_1'^2}} \right) \quad (10.133)$$

Dabei sind die Parameter

$$C'_o = \frac{g_o - \mu_E}{\sigma_\tau} \quad (10.134)$$

$$C'_u = \frac{g_u - \mu_E}{\sigma_\tau} \quad (10.135)$$

$$C_1' = -\frac{\sigma_E}{\sigma_\tau} \quad (10.136)$$

Die Verteilungsfunktion kann aus (10.125) mittels numerischer Integration berechnet werden [191].



## 10.6 Literaturstudie zum Variationskoeffizienten der Festigkeit

### 10.6.1 Nadelholz – unsortiert

#### Fehlerfreies Holz aus kleinen Prüfkörpern

 Tab. 10.12: Variationskoeffizient  $V_R$  unterschiedlicher Festigkeiten von Nadelholz (Vollholz) - fehlerfreies Holz

Autor bzw. Hrsg.	Jahr	Ref.	Holzart	n	Variationskoeffizient $V_R$ <sup>1</sup>			
					Druck	Zug	Biegung	
<b>Fehlerfreies Holz – kleine Prüfkörper</b>								
<b>Altholz</b>								
<i>Rug &amp; Seemann</i> <sup>2</sup>	1989	[186]	Kiefer, Fichte	480	0,22	-	-	
<i>Nier</i>	1994	[106]	NH, aus Bauteilstichprobe (46-309a)	1072	0,18	-	-	
			Fichte	528	0,21	-	-	
			Tanne	164	0,15	-	-	
			Kiefer	380	0,15	-	-	
		[106]	NH, aus Bauteilstichprobe (46-309a)	298	-	0,35	-	
			Fichte	196	-	0,34	-	
			Tanne	70	-	0,31	-	
			Kiefer	59	-	0,38	-	
		[106]	NH, aus Bauteilstichprobe (46-309a)	746	-	-	0,26	
			Fichte	389	-	-	0,28	
			Tanne	113	-	-	0,23	
			Kiefer	244	-	-	0,25	
	[106]	NH, Institut für Archäologie (46-609a)	1863	0,25	-	-		
	<b>Obere Grenze</b>					<b>0,25</b>	<b>0,38</b>	<b>0,28</b>
	<b>Untere Grenze</b>					<b>0,15</b>	<b>0,31</b>	<b>0,23</b>
	<b>Neuholz</b>							
<i>Kollmann</i>	1967	[147]	Fichte	-	0,06	0,10	-	
<i>ČSSR Standard</i> Zitiert nach <i>Apitz</i>	1969	[159]	Kiefer	-	-	-	0,17	
<i>ČSSR Standard</i> Zitiert nach <i>Apitz</i>	1969	[159]	Fichte	-	-	-	0,15	
<i>UDSSR Standard</i> Zitiert nach <i>Apitz</i>	1978	[159]		-	-	-	0,15	
<i>Glos &amp; Spengler</i> <sup>3</sup>	1985	[263]	Fichte	1288	-	-	0,08	
				770	-	0,23	-	
<i>Rug &amp; Seemann</i>	1991	[172]	Fichte	75	0,12	-	-	
<i>DIN 68364:2003-05</i> (Werte ebenso in <i>Niemz</i> [264])	2003	[108]	Fichte	-	0,14	-	0,14	
			Tanne	-	0,12	-	0,13	
			Kiefer	-	0,20	-	0,19	
			Lärche	-	0,16	-	0,17	
<b>Obere Grenze</b>					<b>0,20</b>	<b>0,10</b>	<b>0,19</b>	
<b>Untere Grenze</b>					<b>0,06</b>	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>	

<sup>1</sup> Druck- und Zugfestigkeit in Faserrichtung

<sup>2</sup> Splintholz durch tierische Schädlinge geschädigt

<sup>3</sup> Da die Schädigung keinen Einfluss auf die Festigkeitsklasse zeigte, werden die Ergebnisse aller Schadklassen aufgeführt

## Holz in Bauteilabmessungen, unsortiert

Tab. 10.13: Variationskoeffizient  $V_R$  unterschiedlicher Festigkeiten von Nadelholz (Vollholz) - Holz in Bauteilabmessungen, unsortiert

Autor bzw. Hrsg.	Jahr	Ref.	Holzart	n	Variationskoeffizient $V_R^1$		
					Druck	Zug	Biegung
<b>Bauholz – unsortiert</b>							
<b>Altholz</b>							
<i>Ehlbeck &amp; Görlacher</i> <sup>2</sup>	1987	[188]	Kiefer, Tanne, Fichte	17	-	-	0,35
<i>Rug &amp; Seemann</i>	1989	[186]	Kiefer	20	-	-	0,17
<i>Nier</i> <sup>3</sup>	1994	[106]	Kiefer, Tanne, Fichte	46	-	-	0,33
<b>Neuholz</b>							
<i>Natterer, Marchand, Fux</i> <sup>4</sup>	1982	[189]	Fichte, Klima 1	201	-	-	0,30
			Fichte, Klima 2	204	-	-	0,31
<i>Glos &amp; Spengler</i> <sup>5a</sup>	1985	[263]	Fichte	198	-	-	0,19
				288	-	0,26	-
<i>Glos, Gamm &amp; Fuchs</i> <sup>5</sup>	1986	[158]	Kiefer	153	-	-	0,38
<i>Glos &amp; Gamm</i> <sup>6</sup>	1987	[265]	Fichte	340	0,16	-	-
				288	-	0,43	-
				280	-	-	0,29
<i>Glos &amp; Diebold</i> <sup>7</sup>	1987	[158]	Fichte	173	-	-	0,33
<i>Apitz</i>	1985	[159]	Lärche, Kiefer, Fichte	311	-	-	0,38
<i>Apitz</i>	1986	[190]	Lärche, Kiefer, Fichte	354	-	-	0,35
<i>Kiesel</i>	1990	[191]	Kiefer	728	0,20	0,35	0,30
<i>Glos &amp; Burger</i> <sup>8</sup>	1995	[168]	Fichte	750	-	0,31-0,52	-
		[168]	Douglasie	200	-	0,29-0,38	-
<i>Burger</i> <sup>11</sup>	1998	[192]	NH, Voruntersuchungen	3207	-	0,44	-
			Fichte, Tanne, zus. Untersuchungen	733	-	0,31-0,52	-
<i>Kessel et al.</i>	1998	[145]	Fichte	434	-	-	0,26
<i>Glos, Diebold &amp; Schleifer</i>	2000	[193]	Fichte	208	-	-	0,27
			Kiefer	202	-	-	0,38
			Lärche	152	-	-	0,35
			Douglasie	211	-	-	0,35
<i>Ranta-Maunus</i>	2009	[194]	Fichte, Finnland	2846	-	-	0,26
			Fichte, Finnland	611	-	0,34	-
			Fichte, Russland	1031	-	-	0,28
			Fichte, Russland	186	-	0,29	-
			Fichte, Estland	535	-	-	0,28
			Fichte, Lettland	300	-	-	0,25
			Fichte, Schweden	4261	-	-	0,30
			Fichte, Daten TUM Nord	456	-	-	0,37
			Fichte, Daten TUM, West	1437	-	-	0,32
			Fichte, Daten TUM, Ost	1645	-	-	0,34
			Kiefer, Daten TUM Nord	421	-	-	0,31
			Kiefer, Daten TUM Süd	429	-	-	0,23
			Kiefer, Finnland	849	-	-	0,31
			Kiefer, Russland	379	-	-	0,34
			NH, Slowenien, Werk 1	100	-	-	0,30
NH, Slowenien, Werk 2	100	-	-	0,40			
NH, Slowenien, Werk 3	100	-	-	0,27			

Tab. 10.13: Variationskoeffizient  $V_R$  unterschiedlicher Festigkeiten von Nadelholz (Vollholz) - Holz in Bauteilabmessungen, unsortiert, Fortsetzung

Autor bzw. Hrsg.	Jahr	Ref.	Holzart	n	Variationskoeffizient $V_R^1$		
					Druck	Zug	Biegung
<b>Bauholz – Fehlerbehaftetes Holz – unsortiert</b>							
<b>Neuholz</b>							
<i>Ranta-Maunus, Denzler, Stapel</i>	2011	[195]	Fichte, alle	2776	-	-	0,32
			Fichte, Schweden	210	-	-	0,35
			Fichte, Polen	433	-	-	0,31
			Fichte, Slowenien,	1163	-	-	0,30
			Fichte, Frankreich	118	-	-	0,26
			Fichte, Slowakei	213	-	-	0,33
			Fichte, Rumänien	321	-	-	0,31
			Fichte, Ukraine	204	-	-	0,29
			Fichte, alle	1854	-	0,43	-
			Fichte, Schweden	218	-	0,38	-
			Fichte, Polen	222	-	0,38	-
			Fichte, Slowenien	104	-	0,44	-
			Fichte, Schweiz	447	-	0,44	-
			Fichte, Slowakei	215	-	0,40	-
			Fichte, Rumänien	319	-	0,42	-
			Fichte, Ukraine	329	-	0,44	-
			Kiefer, alle	430	-	-	0,39
			Kiefer, Schweden	209	-	-	0,34
			Kiefer, Polen	221	-	-	0,43
			Kiefer, alle	1115	-	0,46	-
			Kiefer, Schweden	211	-	0,39	-
			Kiefer, Polen	217	-	0,45	-
			Kiefer, Finnland	257	-	0,39	-
			Kiefer, Russland	174	-	0,43	-
Kiefer, Frankreich	257	-	0,42	-			
<i>Stapel<sup>10</sup> Paper I</i>	2013	[196]	Kiefer, Polen	219	-	-	0,42
			Kiefer, Schweden	209	-	-	0,34
			Fichte, UK	607	-	-	0,31
			Fichte, Zentraleuropa	1880	-	-	0,33
			Fichte, Osteuropa	840	-	-	0,31
			Fichte, Frankreich	115	-	-	0,26
			Fichte, Polen	433	-	-	0,31
			Fichte, Schweden	345	-	-	0,36
			Fichte, Slowenien	1125	-	-	0,30
			Douglasie, Zentraleuropa	324	-	0,50	-
			Lärche, Zentraleuropa	326	-	0,47	-
			Kiefer, Zentraleuropa	264	-	0,42	-
			Kiefer, Finnland	257	-	0,39	-
			Kiefer, Frankreich	239	-	0,41	-
			Kiefer, Polen	456	-	0,44	-
			Kiefer, Russland	171	-	0,43	-
			Kiefer, Schweden	206	-	0,39	-
			Fichte, Zentraleuropa	2895	-	0,40	-
			Fichte, Osteuropa	844	-	0,42	-
			Fichte, Lettland	106	-	0,38	-
Fichte, Polen	219	-	0,37	-			
Fichte, Schweden	211	-	0,38	-			
Fichte, Slowenien	104	-	0,44	-			

**Tab. 10.13: Variationskoeffizient  $V_R$  unterschiedlicher Festigkeiten von Nadelholz (Vollholz) - Holz in Bauteilabmessungen, unsortiert, Fortsetzung**

Linke & Mühlisch	2019	[198]	Fichte	303	-	-	0,35
Linke & Mühlisch	2019	[197]	Kiefer	300	-	-	0,36
<b>Obere Grenze</b>					<b>0,20</b>	<b>0,52</b>	<b>0,40</b>
<b>Untere Grenze</b>					<b>0,16</b>	<b>0,29</b>	<b>0,17</b>

<sup>1</sup> Druck- und Zugfestigkeit in Faserrichtung

<sup>2</sup> zwei Ausreißerwerte ausgelassen

<sup>3</sup> inkl. Hölzer mit Querschnittsschwächung

<sup>4</sup> Klima 1: 20°C, rel. Luftf. 65%, Klima 2: 20°C, rel. Luftf. 30%

<sup>5</sup> Werte an immisionsgeschädigtem Holz ermittelt

<sup>5a</sup> Da die Schädigung keinen Einfluss auf die Festigkeitsklasse zeigte, werden die Ergebnisse aller Schadklassen aufgeführt

<sup>6</sup> Werte an Holz mit Schädlingsbefall ermittelt

<sup>7</sup> Äste in der Zugzone angeordnet

<sup>8</sup> Werte abh. von versch. Längen/ Querschnittsgrößen

<sup>9</sup> Werte für Anpassung an die Lognormalverteilung

<sup>10</sup> Teilweise Überschneidung der Werte mit [195] möglich

<sup>11</sup> Ergebnisse für alle Prüfkörperabmessungen

## 10.6.2 Nadelholz – visuell sortiert

### Variationskoeffizient der Biegefestigkeit – Visuelle Sortierung

**Tab. 10.14: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_R$  für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen, Sortierung in Güteklassen**

Autor	Jahr	Ref.	Sortiernorm	Holzart	Güte- bzw. Sortierklasse							
					Güteklasse nach		GKI/ S13/ T3		GKII/ S10/ T2		GKIII/ S7/ T1	
					$V_{R,m}$	n	$V_{R,m}$	n	$V_{R,m}$	n		
Graf <sup>1</sup> QS 28/28	1941	[199]	DIN 4074	Fichte	0,16	8	-	-	-	-		
			DIN 1052									
Graf <sup>1</sup> QS 21/21	1941	[199]	DIN 4074	Fichte	0,06	5						
			DIN 1052									
Glos <sup>2</sup>	1981	[200]	DIN 4074	NH allg.	-	-	0,25- 0,30	-	-	-		
			DIN 1052									
Natterer, Marchand, Fux; Klima 1 <sup>6</sup>	1982	[189]	SIA 164	Fichte	-	-	0,28	100	0,28	75		
Natterer, Marchand, Fux; Klima 2 <sup>6</sup>	1982	[189]	SIA 164	Fichte	-	-	0,28	94	0,28	68		
Apitz	1985	[266]	TGL 117-0767	alle	0,34	98	0,39	141	0,36	74		
			TGL 33135									
			TGL 117-0767	Lärche	0,22	17	0,41	10	-	2		
			TGL 33135									
			TGL 117-0767	Kiefer	0,33	73	0,37	102	0,39	55		
			TGL 33135									
TGL 117-0767	Fichte	0,47	6	0,27	28	0,23	16					
TGL 33135												
Glos & Diebold (Daten aus)	1987	[158]										
Glos & Spengler <sup>3,4</sup>	1985		DIN 4074	Fichte	0,23	21	0,21	53	0,23	25		
			DIN 1052									
Glos, Gamm & Fuchs <sup>3,4</sup>	1986		DIN 4074	Kiefer	0,24	38	0,31	58	0,41	35		
			DIN 1052									
Glos & Gamm <sup>3,5</sup>	1987		DIN 4074	Fichte	0,25	24	0,19	43	0,22	31		
			DIN 1052									
Glos & Diebold <sup>2</sup>	1987		DIN 4074	Fichte	0,19	35	0,26	47	0,25	49		
		DIN 1052										

10. Anhang

Tab. 10.14: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_R$  für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen, Sortierung in Güteklassen - Fortsetzung

Autor	Jahr	Ref.	Sortiernorm Güteklasse nach	Holz- art	Güte- bzw. Sortierklasse					
					GKI/ S13/ T3		GKI/ S13/ T3		GKI/ S13/ T3	
					$V_{R,m}$	n	$V_{R,m}$	n	$V_{R,m}$	n
<i>Sørensen &amp; Hoffmeyer</i> <sup>7,8</sup>	2001	[201]	DS483, 1999							
Datenbank C				Fichte	0,19	44	0,24	106	0,20	80
Datenbank H				Fichte	-	-	0,19	60	0,24	265
Datenbank I				Fichte	0,21	117	0,28	152	0,32	194
Datenbank J				Fichte	0,21	78	0,23	78	0,23	109
JCSS <sup>9</sup>	2006	[61]	-	-	-	-	0,25	-	-	-
<i>Stapel, Paper II</i>	2013	[196]	DIN 4074-1	Fichte	0,26	287	0,29	1225	0,29	697
<i>Stapel, Paper III</i>		[196]	DIN 4074-1	Kiefer	-	-	0,29	246	0,28	185
				Fichte	-	-	-	-	0,26	832
				Douglasie	-	-	96	0,28	-	-
			Fichte	0,20	1391	0,31	4773	-	-	
<i>Linke &amp; Mühlisch</i>	2019	[198]	DIN 4074-1	Fichte	0,22	33	0,33	170	0,28	61
		[197]		Kiefer	0,16	34	0,29	108	0,32	86
<b>Oberer Wert</b>					<b>0,47</b>		<b>0,41</b>		<b>0,39</b>	
<b>Unterer Wert</b>					<b>0,06</b>		<b>0,19</b>		<b>0,20</b>	

<sup>1</sup> Balken ohne Schwindrisse

<sup>2</sup> Auswertung von Untersuchungen verschiedener Autoren

<sup>3</sup> Bei der Sortierung wurden einige Proben aussortiert, die den Klassen nicht zugeordnet werden konnten

<sup>4</sup> Die Werte wurden an immisionsgeschädigtem geschädigtem Holz ermittelt

<sup>5</sup> Die Werte wurden an Holz mit Schädlingsbefall ermittelt

<sup>6</sup> Klima 1: 20°C, rel. Luftf. 65%, Klima 2: 20°C, rel. Luftf. 30%

<sup>7</sup> Werte für Anpassung an die Lognormalverteilung

<sup>8</sup> Holz nach nordischen T-Regeln sortiert: T1 → C 18, T2 → C24, T3 → C30 [201]

<sup>9</sup> „mittlere Qualität“ der Klasse C 24 zugeordnet

### Variationskoeffizient der Druckfestigkeit – Visuelle Sortierung

Tab. 10.15: Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit  $V_R$  für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen („mittlere Qualität“ nach JCSS der GK II/ C 24 zugeordnet)

Autor	Jahr	Ref.	Sortiernorm	Holzart	Güte- bzw. Sortierklasse					
					GKI/ S13/ T3		GKI/ S13/ T3		GKI/ S13/ T3	
					$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n
Graf <sup>1</sup> QS 28/28	1941	[199]	DIN 4074	Fichte	0,08	8	-	-	-	-
			DIN 1052							
Graf <sup>1</sup> QS 21/21	1941		DIN 4074	Fichte	0,09	5				
			DIN 1052							
Glos <sup>2</sup>	1981	[200]	DIN 4074	NH allg.	-	-	0,16- 0,20	-	-	-
			DIN 1052							
Kiesel <sup>3</sup>	1988	[202]	TGL 117- 0767	Kiefer	0,19	144	0,22	28	0,22	16
			TGL 33135							
Kiesel (Zusammenfassung der Werte unterschiedlicher Holzarten nach Rug, Badstube & Kofent)	1989	[203]	TGL 117- 0767	-	0,20	542	0,20	124	0,22	41
			TGL 33135							
Sørensen & Hoffmeyer <sup>4,5</sup>	2001	[201]		Fichte						
			DS483, 1999							
Datenbank J			EN 338		0,15	189	0,14	147	0,17	86
JCSS	2006	[61]	-	-	-	-	0,20	-	-	-
<b>Obere Grenze</b>					<b>0,20</b>		<b>0,22</b>		<b>0,22</b>	
<b>Untere Grenze</b>					<b>0,08</b>		<b>0,14</b>		<b>0,17</b>	

<sup>1</sup> Balken ohne Schwindrisse

<sup>2</sup> Auswertung von Untersuchungen verschiedener Autoren

<sup>3</sup> Berechnung aus der Teilstichprobe Kiefer

<sup>4</sup> Werte für Anpassung an die Lognormalverteilung

<sup>5</sup> Holz nach nordischen T-Regeln sortiert: T1 → C 18, T2 → C24, T3 → C30 [201]

### Variationskoeffizient der Zugfestigkeit – Visuelle Sortierung

Tab. 10.16: Variationskoeffizienten der Zugfestigkeit  $V_R$  für visuell sortiertes Nadelholz (Neuholz) in Bauteilabmessungen („mittlere Qualität“ nach JCSS der GK II/ C 24 zugeordnet)

Autor	Jahr	Ref.	Sortiernorm Festigkeits- klasse nach	Holz- art	Güte- bzw. Sortierklasse					
					GKI/ S13/ T3		GKI/ S13/ T3		GKI/ S13/ T3	
					$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n
Glos <sup>1</sup>	1981	[200]	DIN 4074	NH	-	-	0,30-	-	-	-
			DIN 1052		0,40	23	-	-		
Rug, Badstube & Kofent <sup>2</sup>	1989	[203]	TGL 117- 0767	-	0,38	95	0,40	23	-	-
			TGL 33135				0,46	21		
Burger <sup>5</sup> Vorunter- suchungen	1998	[192]	DIN 4074	NH	0,37	1037	0,39	1295	0,41	481
			-				-	-	-	
Sørensen & Hoffmeyer <sup>3,4</sup>	2001	[201]								
Datenbank C**			DS483, 1999	Fichte	0,21	11	0,35	42	0,43	108
Datenbank J <sup>+</sup>			EN 338	Fichte	0,22	32	0,28	47	0,26	54
JCSS	2006	[61]	-	-	-	-	0,30	-	-	-
Stapel Paper II	2013	[196]								
Lamellen			DIN 4074-1	NH	0,33	674	0,34	1786	0,34	502
Bretter			EN 338		0,32	484	0,36	1326	0,37	1152
<b>Obere Grenze</b>					<b>0,38</b>		<b>0,46</b>		<b>0,43</b>	
<b>Untere Grenze</b>					<b>0,21</b>		<b>0,28</b>		<b>0,26</b>	

<sup>1</sup> Auswertung von Untersuchungen verschiedener Autoren

<sup>2</sup> Werte von Brettern zur Herstellung von Brettschichtholz, nur Werte ohne Keilzinkung

<sup>3</sup> Werte für Anpassung an die Lognormalverteilung

<sup>4</sup> Holz nach nordischen T-Regeln sortiert: T1 → C 18, T2 → C24, T3 → C30 [201]

<sup>5</sup> Ergebnisse für alle Prüfkörperabmessungen

\* Vorsortierung durchgeführt, + keine Vorsortierung durchgeführt

### 10.6.3 Laubholz - unsortiert

Tab. 10.17: Variationskoeffizient  $V_R$  unterschiedlicher Festigkeiten von Laubholz (unsortiert)

Autor bzw. Hrsg.	Jahr	Ref.	Holzart	n	Variationskoeffizient $V_x$ <sup>1</sup>		
					Druck	Zug	Biegung
<b>Fehlerfreies Holz</b>							
<b>Altholz</b>							
<i>Rug &amp; Seemann</i>	1991	[172]	Eiche	52	~0,08	-	-
<i>Sousa</i>	2013	[155]	Kastanie	48	0,17	-	-
				96	-	0,27	-
<b>Neuholz</b>							
<i>Kollman</i>	1967	[147]	Buche	-	0,10	0,23	-
<i>Rug &amp; Seemann</i>	1991	[172]	Eiche	25	0,08	-	-
			Buche	25	0,15	-	-
<i>DIN 68364:2003-05</i>	2003	[108]	Eiche	-	0,16	-	0,17
			Buche	-	0,12	-	0,09
<b>Obere Grenze</b>					<b>0,17</b>	<b>0,27</b>	<b>0,17</b>
<b>Untere Grenze</b>					<b>0,08</b>	<b>0,23</b>	<b>0,09</b>
<b>Bauholz</b>							
<b>Altholz</b>							
<i>Ehlbeck &amp; Görlacher</i>	1987	[188]	Eiche	4	-	-	0,27
<i>Sousa</i>	2013	[155]	Kastanie	51			0,45 <sup>2</sup>
				<i>Altholz- balken</i>	2013		Kastanie
<b>Neuholz</b>							
<i>Glos &amp; Lederer</i>	2000	[205]	Eiche 40x80	167	-	-	0,34
			Eiche 60x120	82	-	-	0,28
			Eiche 60x180	90	-	-	0,26
			Alle BPK Eiche	339	-	-	0,32
			Buche 35x70	54	-	-	0,29
			Buche 60x120	119	-	-	0,31
			Buche 60x175	52	-	-	0,32
			Alle BPK Buche	225	-	-	0,32
			Buche 32x120	104	-	0,50	-
			Buche 32x160	115	-	0,43	-
			Buche alle ZPK	219	-	0,46	-
<i>Glos, Diebold, Schleifer</i>	2000	[193]	Buche	219	-	0,46	-
			Buche	225	-	-	0,32
			Eiche	339	-	-	0,32
<i>Stapel Paper III</i>	2013	[196]	Ahorn	459	-	-	0,33
			Esche	324	-	-	0,23
			Pappel	467	-	-	0,33
<i>Linke &amp; Mühlisch</i>	2019	[206]	Eiche	301	-	-	0,35
<b>Obere Grenze</b>					-	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>
<b>Untere Grenze</b>					-	<b>0,43</b>	<b>0,11</b>

<sup>1</sup> Druck- und Zugfestigkeit in Faserrichtung

<sup>2</sup> Die Auswahl der Segmente der Kanthölzer zum Zuschnitt der Bretter erfolgte unter Berücksichtigung einer regelmäßigen Verteilung der Holzmerkmale, was laut des Autors zu einem höheren Wert führte



### 10.6.4 Laubholz – visuell sortiert

 Tab. 10.18: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_R$  für visuell sortiertes Laubholz in Bauteilabmessungen

Autor	Jahr	Holzart	Sortier- norm	Ref.	Sortierklasse/ Festigkeitsklasse					
					LS 13/ class I <sup>1</sup>		LS 10/ class II <sup>1</sup>		LS 7/ class III <sup>1</sup>	
					$V_{R,m}$	n	$V_{R,m}$	n	$V_{R,m}$	n
<i>Sousa (Altholz)</i>	2013	Kastanie	UNI 11119	[155]	0,23	-	0,26	-	0,45	-
<i>Stapel Paper III</i>	2013	Ahorn	DIN 4074-5	[196]	0,28	242	0,31	311		
		Pappel			0,21	216	0,26	317		
		Esche			0,18	207	0,21	257		
<i>Linke &amp; Mühlisch</i>	2019	Eiche	DIN 4074-5	[206]	0,21	56	0,27	115	0,32	66
<b>Obere Grenze</b>					<b>0,28</b>		<b>0,31</b>		<b>0,45</b>	
<b>Untere Grenze</b>					<b>0,18</b>		<b>0,21</b>		<b>0,32</b>	

<sup>1</sup> Klasse nach UNI 11119:2004

### 10.6.5 Auswahl von Untersuchungen zur maschinellen Sortierung von Nadelholz

Eine Zuordnung der Güteklassen nach DIN 1052 (Sortierung nach DIN 4074) bzw. nach TGL 33 135 (Sortierung nach TGL 117-0767) zu den Festigkeitsklassen der DIN EN 338 erfolgt wie ausgewiesen. Wenn vorhanden, werden die Ergebnisse bei visueller Sortierung vergleichend aufgeführt.

#### Variationskoeffizient der Druckfestigkeit

Tab. 10.19: Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit  $V_R$  für mit Ultraschall sortiertes NH (Neuholz) in Bauteilabmessungen)

Autor	Jahr	Ref.	Holzart	Verfahren/ Gerät	Güteklasse bzw. Festigkeitsklasse													
					C40		C35		C30		C27		C24		C22		C18	
					$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n	$V_{R,c}$	n
Steiger	1995	[217]	Fichte	Ultraschallimpuls- laufzeitmessung	0,18	58	0,15	30			0,20	26			0,22	16		
<b>Oberer Wert</b>					-		-		-		-		-		-		-	
<b>Unterer Wert</b>					-		-		-		-		-		-		-	

#### Variationskoeffizient der Zugfestigkeit

Tab. 10.20: Variationskoeffizienten der Zugfestigkeit  $V_R$  für maschinell sortiertes NH (Neuholz) in Bauteilabmessungen

Autor	Jahr	Ref.	Holzart	Verfahren/ Gerät	Güteklasse bzw. Festigkeitsklasse													
									GK I				GK II				GK III	
					$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n	$V_{R,t}$	n
Rug, Badstube & Kofent <sup>1</sup>	1989	[235]	NH	Visuell	-	-	-	-	0,38	95	-	-	0,40	23	-	-	-	-
				Maschinell	-	-	-	-	-	-	-	0,46	21	-	-	-	-	-
					C40		C35		C30		C27		C24		C22		C18	
Steiger	1995	[217]	Fichte	Ultraschallimpuls- laufzeitmessung	0,25	84	0,26	25	-	-	0,35	25	-	-	0,41	7	-	-
Burger Voruntersuchungen	1998	[192]	NH	Maschinell	-	-	-	-	0,26	626	-	-	0,29	739	-	-	-	-
Sørensen & Hoffmeyer <sup>2,3</sup> Datenbank C**	2001	[226]	Fichte	Visuell	-	-	-	-	0,21	11	-	-	0,35	42	-	-	0,4	108
				Cook-Bolinder	-	-	-	-	0,40	203	-	-	0,37	14	-	-	-	-
				Computermatic	-	-	-	-	0,32	152	-	-	0,27	58	-	-	-	-
<b>Obere Grenze</b>					-		-		<b>0,40</b>		-		<b>0,46</b>		-		-	
<b>Untere Grenze</b>					-		-		<b>0,26</b>		-		<b>0,27</b>		-		-	

<sup>1</sup> Werte von Brettern zur Herstellung von Brettschichtholz, nur nicht keilgezinktes Holz

<sup>2</sup> Werte für Anpassung an die Lognormalverteilung

<sup>3</sup> Holz nach nordischen T-Regeln sortiert: T1 → C 18 , T2 → C24, T3 → C30 [226]

\* Vorsortierung durchgeführt, + keine Vorsortierung durchgeführt

10. Anhang

Variationskoeffizient der Biegefestigkeit

Tab. 10.21: Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit VR für maschinell sortiertes NH (Neuholz) in Bauteilabmessungen

Autor	Jahr	Ref.	Holzart	Verfahren/ Gerät	Güteklasse bzw. Festigkeitsklasse														
					-		-		GK I		-		GK II		-		GK III		
					V <sub>R,m</sub>	n	V <sub>R,m</sub>	n	V <sub>R,m</sub>	n	V <sub>R,m</sub>	n	V <sub>R,m</sub>	n	V <sub>R,m</sub>	n	V <sub>R,m</sub>	n	
Apitz (Zitiert nach Rug, Badstube & Kofent)	1985	[235]	Fichte Kiefer Lärche	Visuell	-	-	-	-	0,33	95	-	-	0,40	142	-	-	0,35	73	
				Masch. - k. A.	-	-	-	-	0,24	54	-	-	0,37	155	-	-	0,39	99	
					-	-	-	-	Klasse 1		-	-	Klasse 2		-	-	Klasse 3		
Kessel & Sandoz	1989	[164]	Fichte	Visuell	-	-	-	-	0,204	-	-	-	0,243	-	-	-	0,241	-	
				Visuell+Rohdichte	-	-	-	-	0,202	-	-	-	0,234	-	-	-	0,24	-	
				Ultraschall	-	-	-	-	0,184	-	-	-	0,205	-	-	-	0,219	-	
					C40		C35		C30		C27		C24		C22		C18		
Steiger	1995	[217]	Fichte	Ultraschallimpuls- laufzeitmessung	0,25	46	0,10	28	-	-	0,12	40	-	-	0,25	18	-	-	
Kessel	1998	[145]	Fichte	Modell 3 <sup>4</sup>	-	-	-	-	0,19	4	-	-	0,18	175	-	-	0,20	183	
				Modell 4 <sup>5</sup>	-	-	-	-	0,18	13	-	-	0,19	262	-	-	0,23	133	
Sørensen & Hoffmeyer <sup>1,2</sup>																			
Datenbank B <sup>+</sup>	2001	[226]	Fichte	Cook-Bolinder	-	-	-	-	0,31	228	-	-	0,32	46	-	-	-	-	
Datenbank C <sup>**</sup>			Fichte	Visuell	-	-	-	-	-	0,19	44	-	-	0,24	106	-	-	-	-
				Cook-Bolinder	-	-	-	-	0,22	209	-	-	0,18	29	-	-	-	-	
				Computermatic	-	-	-	-	0,20	-	-	-	0,19	-	-	-	0,21	-	
Datenbank F <sup>+</sup>			Fichte Kiefer	Dynagrade	-	-	-	-	-	0,24	725	-	-	0,30	819	-	-	0,32	218
Datenbank H <sup>+</sup>				Fichte	Visuell	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,19	60	-	-	-
	Cook-Bolinder	-	-		-	-	0,31	386	-	-	0,32	22	-	-	-	-			
Linke & Mühlisch <sup>3</sup>	2019	[224]	Fichte	Visuell	-	-	-	-	0,22	33	-	-	0,33	170	-	-	0,28	61	
				Ultraschallimpuls- laufzeitmessung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
				direkt	-	-	-	-	0,31	88	-	-	0,37	65	-	-	0,38	31	
				indirekt	-	-	-	-	0,29	84	-	-	0,42	51	-	-	0,38	46	
<b>Obere Grenze</b>					-	-	-	-	<b>0,31</b>	-	-	<b>0,42</b>	-	-	<b>0,39</b>	-	-		
<b>Untere Grenze</b>					-	-	-	-	<b>0,20</b>	-	-	<b>0,18</b>	-	-	<b>0,21</b>	-	-		

<sup>1</sup> Werte für Anpassung an die Lognormalverteilung

<sup>2</sup> Holz nach nordischen T-Regeln sortiert: T1 → C 18, T2 → C24, T3 → C30 [226]

<sup>3</sup> Es liegen außerdem Untersuchungen an Kiefernproben vor, die aufgrund geringer Korrelation zwischen Ultraschallimpulslaufzeit und Biegefestigkeit nicht einbezogen werden

<sup>4</sup> multiple Korrelation aus Rohdichte und Schallgeschwindigkeit, nicht konditioniert

<sup>5</sup> multiple Korrelation aus Rohdichte, Schallgeschwindigkeit & Ästigkeit, nicht konditioniert

\* Vorsortierung durchgeführt, + keine Vorsortierung durchgeführt

## 10.7 Anderson-Darling-Test für Versuchsdaten

### 10.7.1 Visuell sortierte Proben

Versuchsdaten aus Apitz 1982 [210]

Tab. 10.22: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Apitz [210] - alle Holzarten

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
GK I	96	0	0,38	0,75	1	2,18	0,75	0	0,40	0,75
GK II	140	1	0,97	0,75	1	0,77	0,75	1	0,76	0,76
GK III	73	0	0,33	0,74	0	0,72	0,74	0	0,31	0,75
Alle	310	1	1,11	0,75	1	1,88	0,75	0	0,58	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt

T – Testgröße

0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

cv – kritischer Wert

Tab. 10.23: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Apitz [210] - Fichtenproben

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
GK I	6	0	0,22	0,63	0	0,26	0,63	0	0,26	0,71
GK II	28	0	0,36	0,73	0	0,48	0,73	0	0,34	0,74
GK III	16	0	0,30	0,71	0	0,32	0,71	0	0,36	0,73
Alle	50	0	0,32	0,74	0	0,28	0,74	0	0,34	0,75

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt

T – Testgröße

0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

cv – kritischer Wert

Tab. 10.24: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Apitz [210] - Kiefernproben

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
GK I	73	0	0,52	0,74	1	1,88	0,74	0	0,52	0,75
GK II	102	1	0,95	0,75	1	1,16	0,75	0	0,75	0,75
GK III	55	0	0,35	0,74	0	0,61	0,74	0	0,29	0,75
Alle	230	1	1,11	0,75	1	2,65	0,75	1	0,70	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt

T – Testgröße

0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

cv – kritischer Wert

Tab. 10.25: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Apitz [210] - Lärchenproben

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
GK I	17	0	0,23	0,71	0	0,24	0,71	0	0,32	0,73
GK II	10	0	0,45	0,69	0	0,38	0,69	0	0,47	0,72
GK III	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alle	29	0	0,19	0,73	0	0,39	0,73	0	0,20	0,74

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt

T – Testgröße

0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

cv – kritischer Wert

10. Anhang

Versuchsdaten aus Kiesel 1989 [211]

Tab. 10.26: Statistischer Anpassungstest für Druckversuche nach Kiesel [211]

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
GK I	144	0	0,29	0,75	1	0,81	0,75	0	0,71	0,76
GK II	28	0	0,48	0,73	0	0,25	0,73	0	0,76	0,74
GK III	18	1	1,23	0,72	1	0,83	0,72	1	1,21	0,73
Alle	190	0	0,38	0,75	1	1,42	0,75	0	0,40	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch 2019 [197, 198, 206]

Tab. 10.27: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch [198] – Fichte (visuelle Sortierung)

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
C 30	264	0	0,50	0,75	1	2,39	0,75	0	0,36	0,76
C 24	33	0	0,35	0,73	1	0,82	0,73	0	0,26	0,74
C 18	170	0	0,33	0,75	1	2,20	0,75	0	0,25	0,76
Alle	61	0	0,20	0,74	1	1,01	0,74	0	0,19	0,75

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.28: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch [197] – Kiefer (visuelle Sortierung)

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
C 30	228	0	0,71	0,75	1	2,22	0,75	0	0,53	0,76
C 24	34	0	0,49	0,73	1	0,96	0,73	0	0,32	0,74
C 18	108	0	0,39	0,75	1	1,14	0,75	0	0,34	0,75
Alle	86	0	0,40	0,75	0	0,50	0,75	0	0,40	0,75

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.29: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch [206] – Eiche (visuelle Sortierung)

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
D 40	237	0	0,43	0,75	1	2,54	0,75	0	0,48	0,76
D 30	56	0	0,30	0,74	0	0,20	0,74	0	0,56	0,75
D 24	115	0	0,42	0,75	1	1,08	0,75	0	0,42	0,75
Alle	66	0	0,32	0,74	1	1,22	0,74	0	0,38	0,75

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

## 10.7.2 Mittels Ultraschall-Impulslaufzeitmessung sortierte Proben

Versuchsdaten aus Steiger [163]

Tab. 10.30: Statistischer Anpassungstest für Biegeversuche nach Steiger [163]

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
C40	46	1	1,48	0,74	1	1,18	0,74	1	1,47	0,75
C35	28	1	0,89	0,73	0	0,65	0,73	1	1,57	0,74
C27	40	1	1,00	0,74	0	0,72	0,74	1	2,48	0,75
C22	18	0	0,26	0,72	0	0,52	0,72	0	0,25	0,73
Alle	132	1	7,6	0,75	1	4,6	0,75	1	8,9	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.31: Statistischer Anpassungstest für Druckversuche nach Steiger [163]

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
C40	58	0	0,29	0,74	0	0,55	0,74	0	0,40	0,75
C35	30	0	0,39	0,73	0	0,27	0,73	0	0,66	0,74
C27	26	0	0,19	0,73	0	0,37	0,73	0	0,21	0,74
C22	16	0	0,54	0,71	0	0,28	0,71	1	0,82	0,73
Alle	130	0	0,35	0,75	0	0,34	0,75	1	1,00	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.32: Statistischer Anpassungstest für Zugversuche nach Steiger [163]

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
C40	84	0	0,74	0,74	0	0,43	0,74	1	0,99	0,75
C35	25	0	0,47	0,72	0	0,28	0,73	0	0,54	0,74
C27	25	1	1,30	0,73	0	0,50	0,73	1	1,27	0,74
C22	7	1	0,41	0,65	1	0,30	0,65	1	0,40	0,71
Alle	123	1	0,91	0,75	0	0,37	0,75	1	1,03	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

10. Anhang

Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [197, 198, 206]

Tab. 10.33: Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch – Fichte, direkte US-Messung [198],  $\rho = 0,44$

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
> C 30	105	0	0,55	0,75	1	2,16	0,75	0	0,43	0,75
C 30	88	0	0,41	0,75	1	1,45	0,75	0	0,53	0,75
C 24	65	0	0,50	0,74	1	0,84	0,74	0	0,46	0,75
C 18	38	0	0,31	0,74	0	0,18	0,74	0	0,23	0,74
Alle	303	0	0,65	0,75	1	2,77	0,75	0	0,34	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.34: Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch – Fichte, indirekte US-Messung [198],  $\rho = 0,42$

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
> C 30	116	0	0,42	0,75	1	1,75	0,75	0	0,35	0,75
C 30	84	0	0,37	0,74	1	0,77	0,74	0	0,43	0,75
C 24	51	0	0,32	0,74	0	0,71	0,74	0	0,22	0,75
C 18	46	0	0,53	0,74	0	0,16	0,74	0	0,40	0,75
Alle	303	0	0,65	0,75	1	2,77	0,75	0	0,34	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.35: Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch – Eiche, direkte US-Messung [206],  $\rho = 0,69$

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
> D 40	132	0	0,52	0,74	1	1,11	0,74	0	0,64	0,75
D 40	21	1	0,77	0,74	1	2,59	0,74	0	0,64	0,75
D 35	43	0	0,36	0,74	0	0,45	0,74	0	0,39	0,75
D 30	45	1	0,75	0,72	1	1,21	0,72	0	0,71	0,74
Alle	301	0	0,37	0,75	1	14,1	0,75	1	0,95	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

Tab. 10.36: Anpassungstest für Biegeversuche nach Linke & Mühlisch – Eiche, indirekte US-Messung [206],  $\rho = 0,72$

Klasse	n	Die Nullhypothese „die Datenmenge ist der Verteilungsfunktion N/LN/WB zugeordnet“ wird								
		Normalverteilung			Lognormalverteilung			Weibullverteilung		
			T	cv		T	cv		T	cv
> D 40	112	1	0,77	0,75	1	3,51	0,74	0	0,59	0,75
D 40	20	0	0,21	0,72	0	0,31	0,72	0	0,25	0,75
D 35	42	0	0,41	0,74	1	1,24	0,74	0	0,31	0,75
D 30	47	0	0,62	0,74	1	1,17	0,74	0	0,51	0,75
Alle	301	0	0,37	0,75	1	14,1	0,75	1	0,95	0,76

1 – die Nullhypothese wird abgelehnt  
0 – die Nullhypothese wird nicht abgelehnt

T – Testgröße  
cv – kritischer Wert

## 10.8 Auswertung von Versuchsergebnissen mit einem Stochastischen Modell der Sortierung

### Fichtenproben

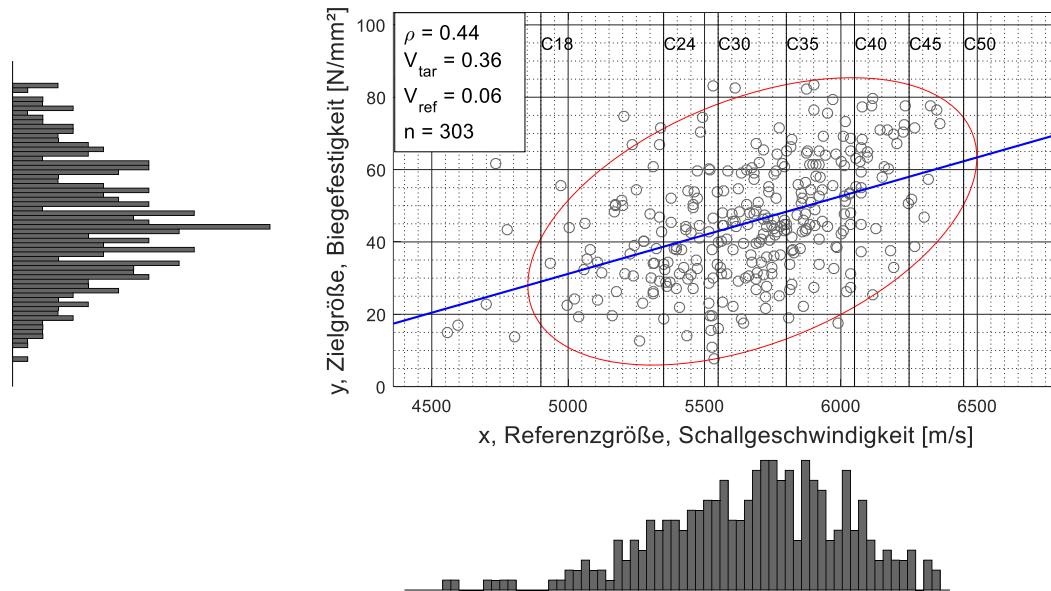


Abb. 10.10: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung  
Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198]  
(rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])

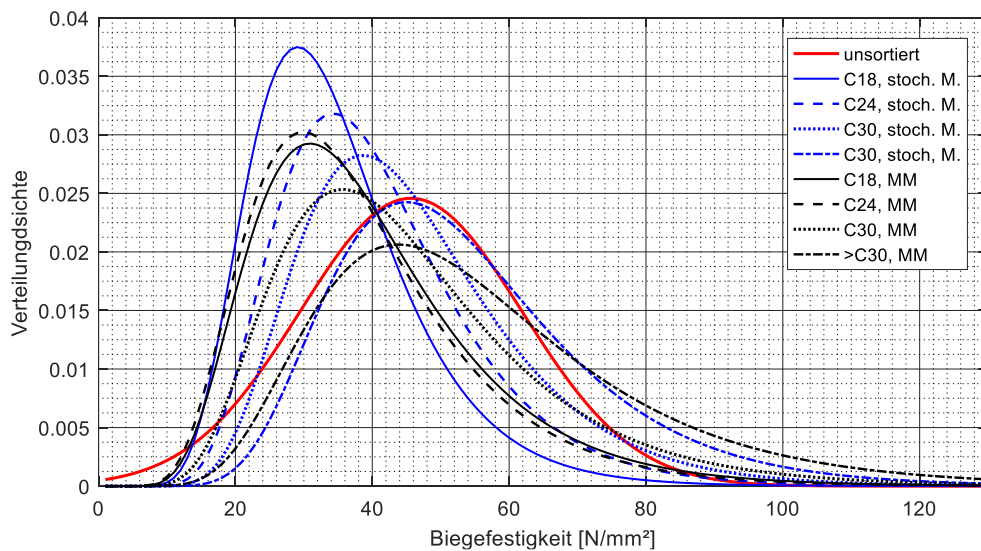


Abb. 10.11: Verteilungsdichtefunktionen für Fichtenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung  
Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198]  
(stoch. M. – stochastisches Modell der Sortierung nach Pöhlmann & Rackwitz [212], MM - Momentenmethode)



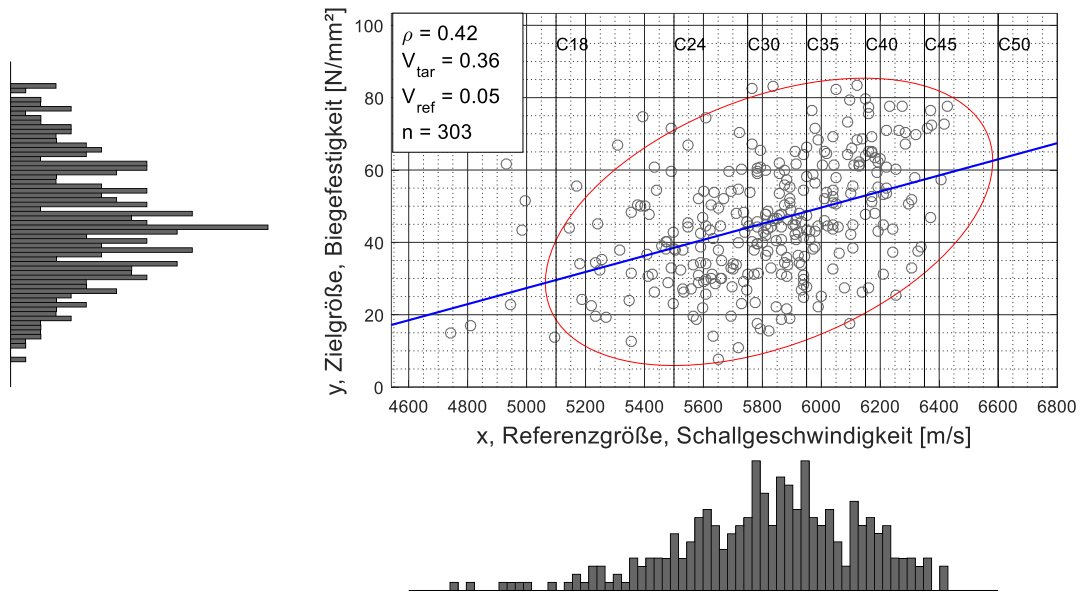


Abb. 10.12: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198]  
(rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])

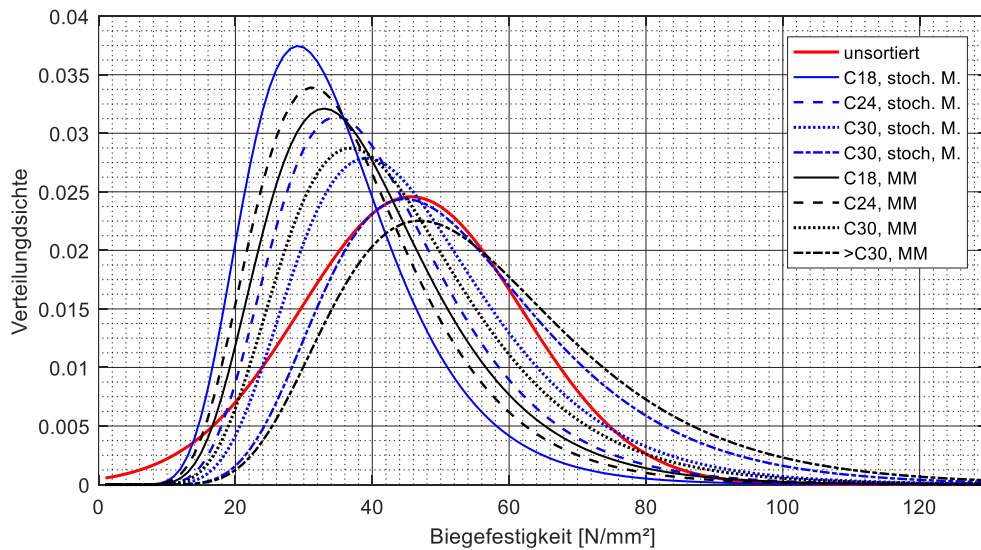
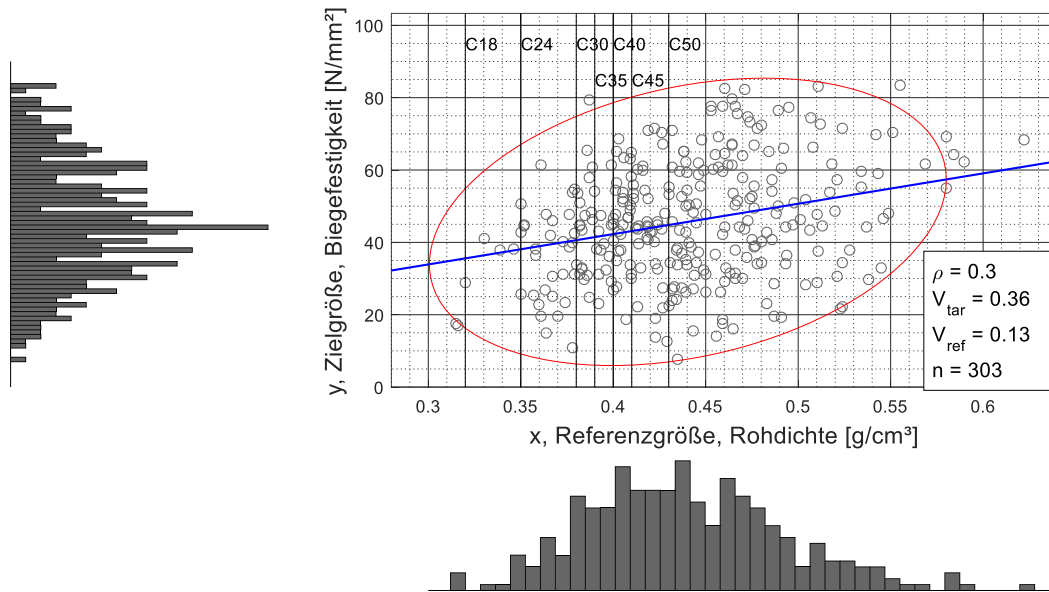
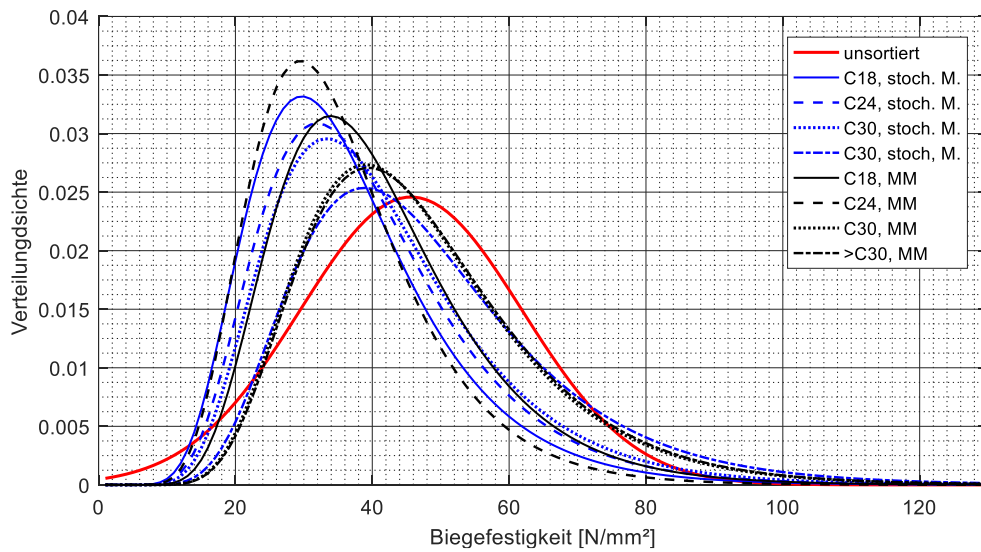


Abb. 10.13: Verteilungsdichtefunktionen für Fichtenproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198]  
(stoch. M. – stochastisches Modell der Sortierung nach Pöhlmann & Rackwitz [212], MM - Momentenmethode)

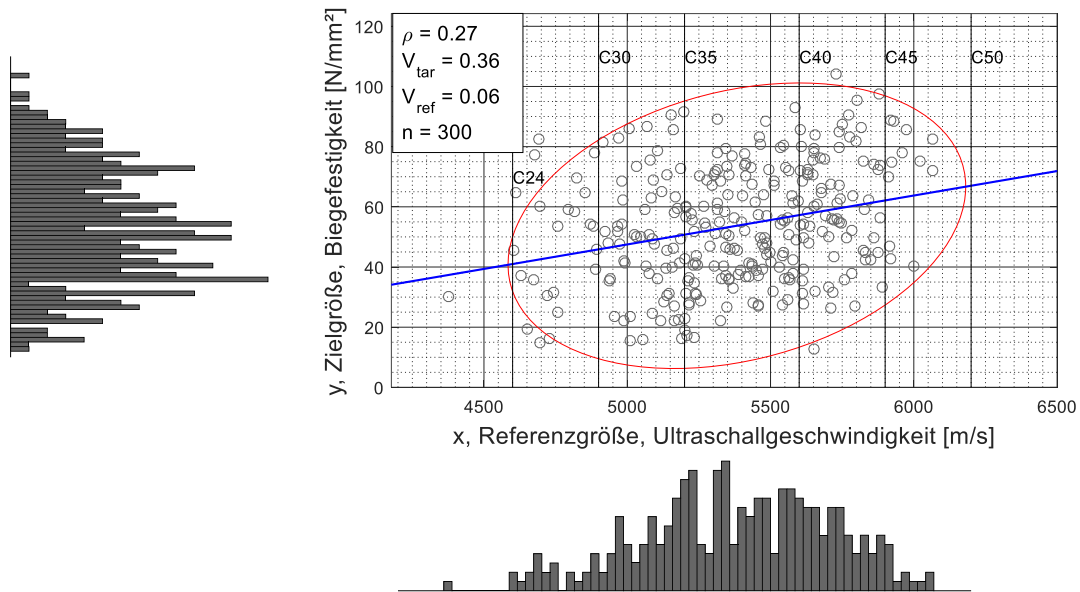


**Abb. 10.14: Referenz- und Zielgröße für Fichtenproben und Sortierung mittels Rohdichtemessung**  
**Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198]**  
 (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen 5%-Quantilwert  
 nach DIN EN 338:2016-07 [110])

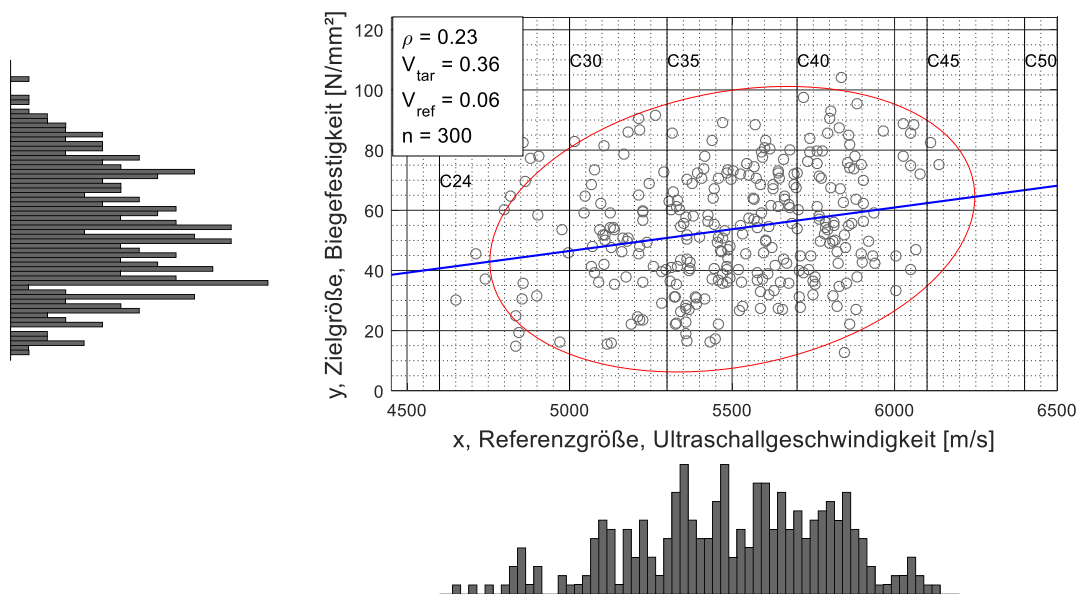


**Abb. 10.15: Verteilungsdichtefunktionen für Fichtenproben und Sortierung mittels Rohdichtemessung**  
**Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [198]**  
 (stoch. M. – stochastisches Modell der Sortierung nach Pöhlmann & Rackwitz [212], MM - Momentenmethode)

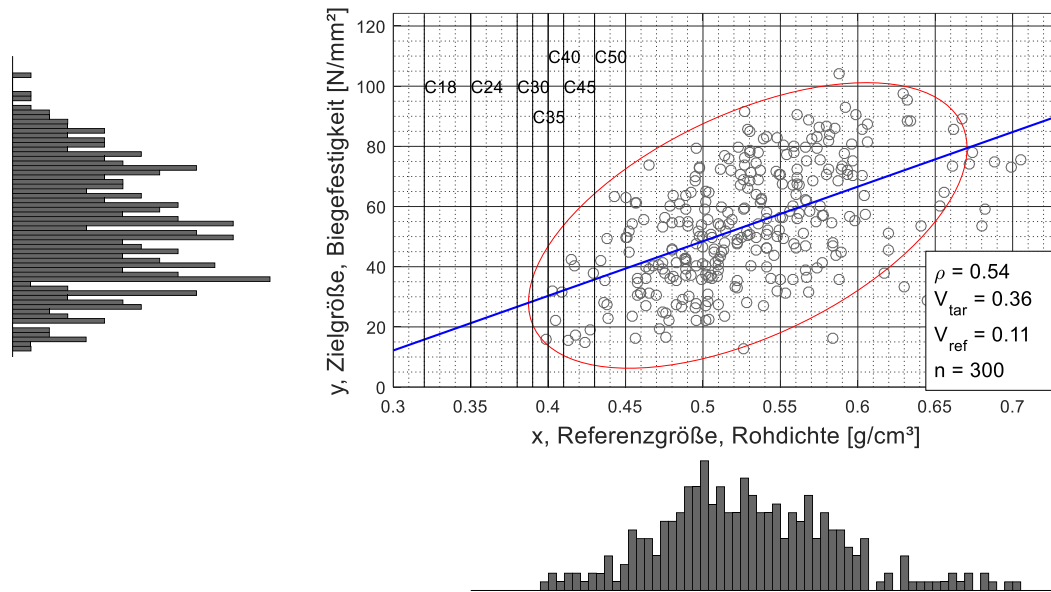
**Kiefernproben**



**Abb. 10.16: Referenz- und Zielgröße für Kiefernproben und Sortierung mittels indirekter US Messung**  
**Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [197]**  
 (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])



**Abb. 10.17: Referenz- und Zielgröße für Kiefernproben und Sortierung mittels direkter US Messung**  
**Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [197]**  
 (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])



**Abb. 10.18: Referenz- und Zielgröße für Kiefernproben und Sortierung mittels Rohdichtemessung**  
**Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [197]**  
 (rot - 95% Konfidenzintervall; blau - lineare Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen 5%-Quantilwert  
 nach DIN EN 338:2016-07 [110])

Für die Kiefernproben ist kein Vergleich mit der Momentenmethode möglich, da in den betrachteten Klassen keine Proben vorlagen.

Eichenproben

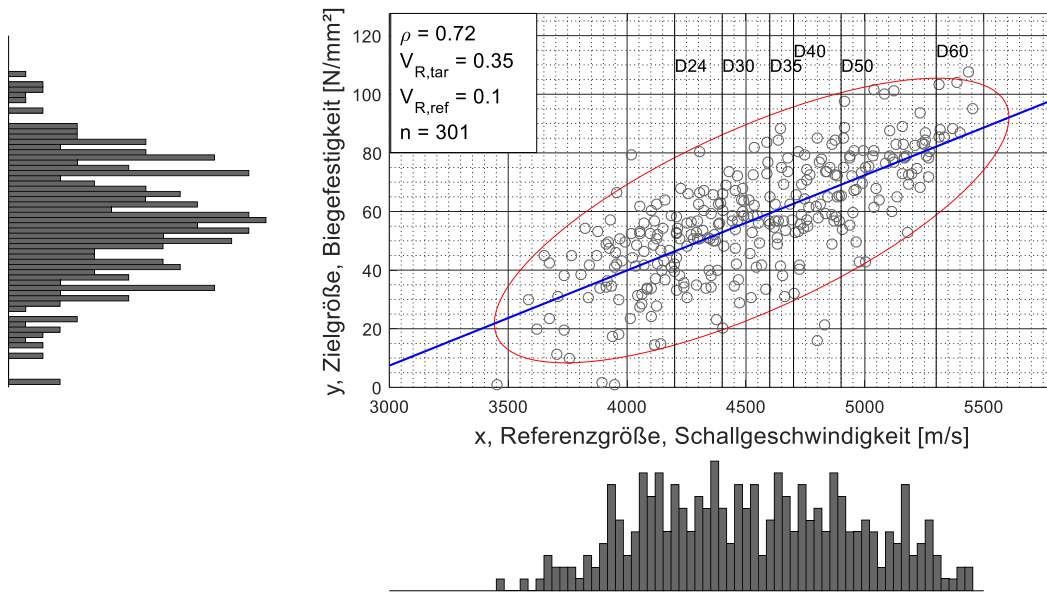


Abb. 10.19: Referenz- und Zielgröße für Eichenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung  
Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [206]  
(rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])

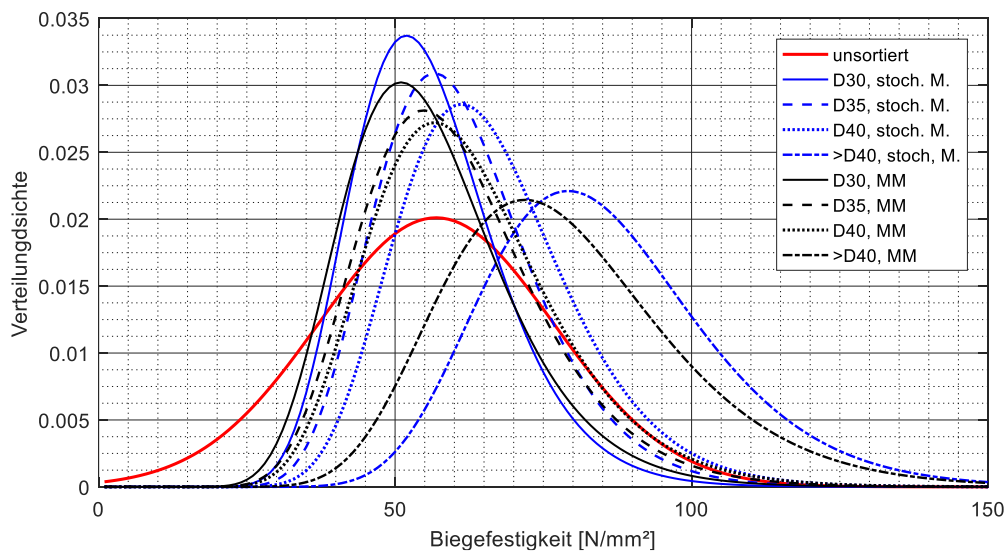
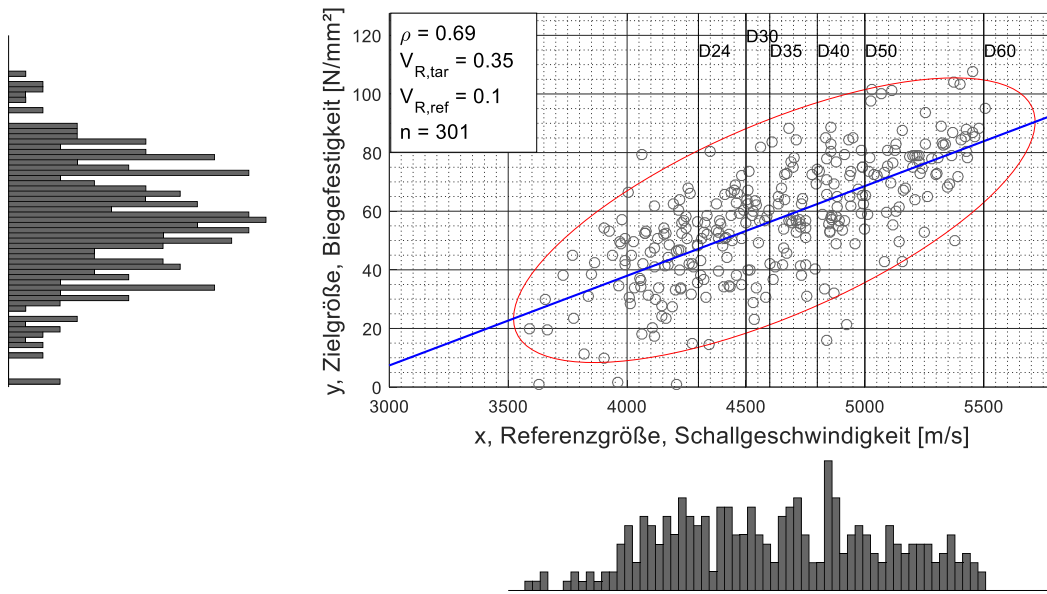
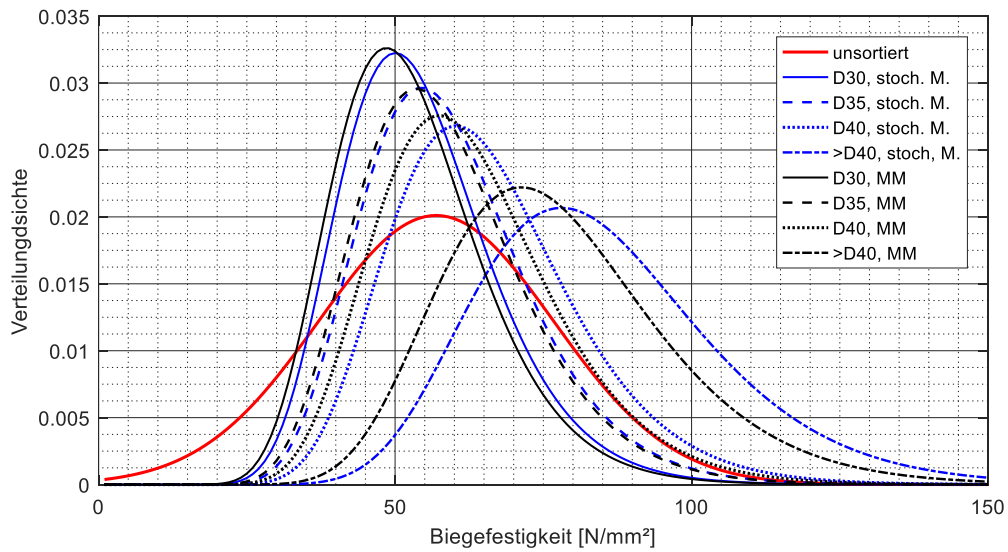


Abb. 10.20: Verteilungsdichtefunktionen für Eichenproben und Sortierung mittels indirekter US Messung  
Versuchsdaten aus Linke & Mühlisch [206]  
(stoch. M. – stochastisches Modell der Sortierung nach Pöhlmann & Rackwitz [212], MM - Momentenmethode)



**Abb. 10.21:** Referenz- und Zielgröße für Eichenproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [206]  
(rot - 95% Konfidenzintervall; blau - linearen Regressionsgerade; schwarz - Klassengrenzen nach [152])



**Abb. 10.22:** Verteilungsdichtefunktionen für Eichenproben und Sortierung mittels direkter US Messung  
Versuchsdaten aus *Linke & Mühlisch* [206]  
(stoch. M. – stochastisches Modell der Sortierung nach *Pöhlmann & Rackwitz* [212], MM - Momentenmethode)

## 10.9 Sensitivitätsanalysen

### 10.9.1 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast

#### Einfluss des Variationskoeffizienten der Festigkeit und der Lastanteile

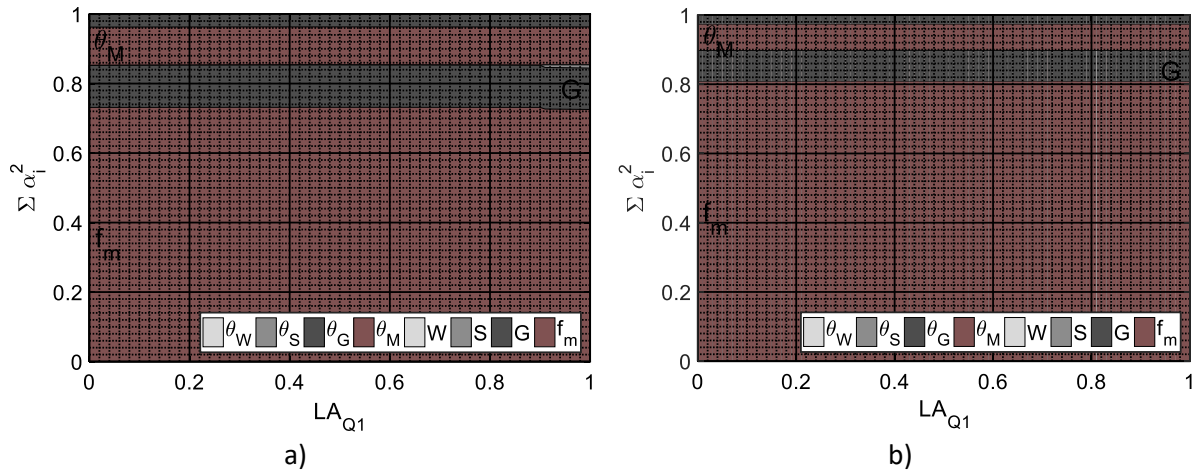


Abb. 10.23: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,1$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

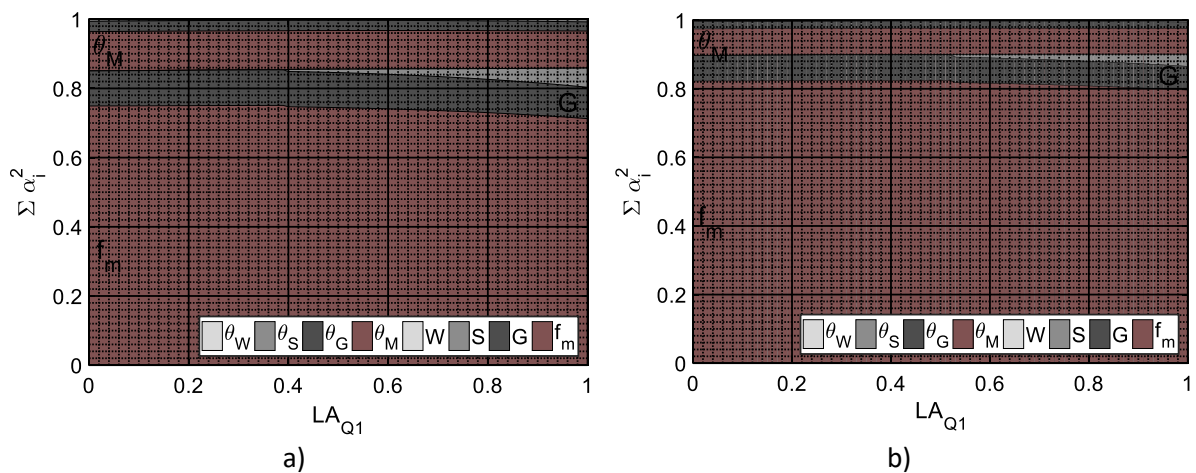


Abb. 10.24: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,2$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

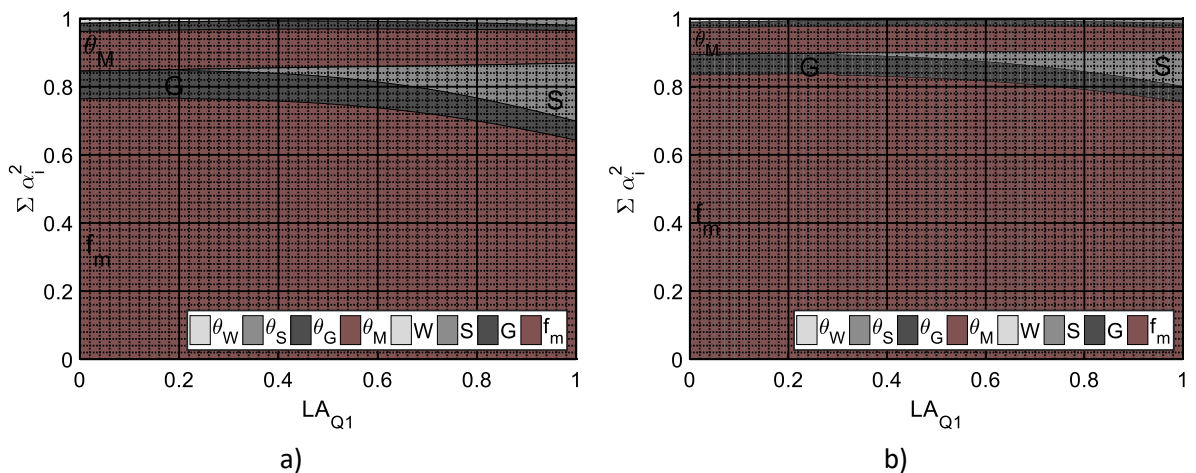


Abb. 10.25: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,3$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

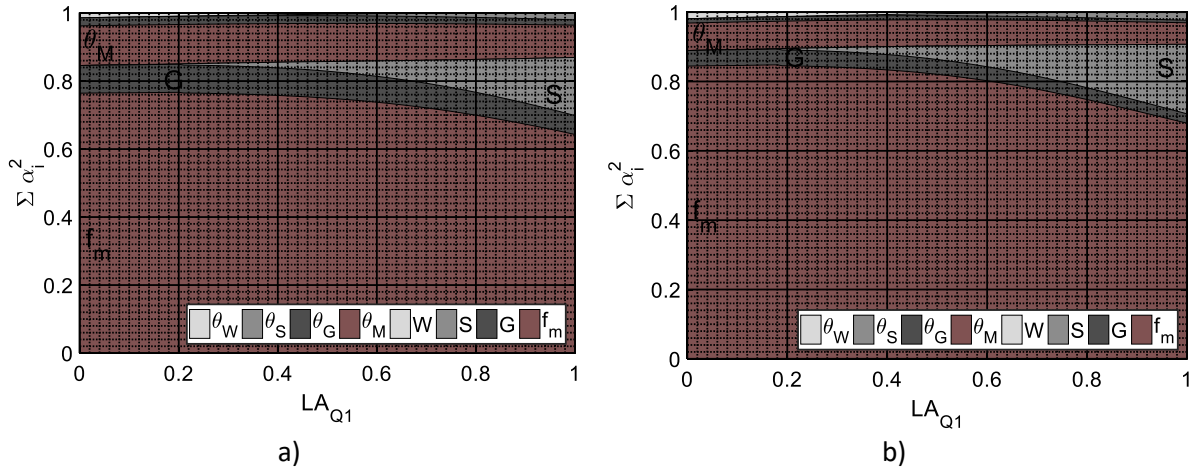


Abb. 10.26: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,4$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

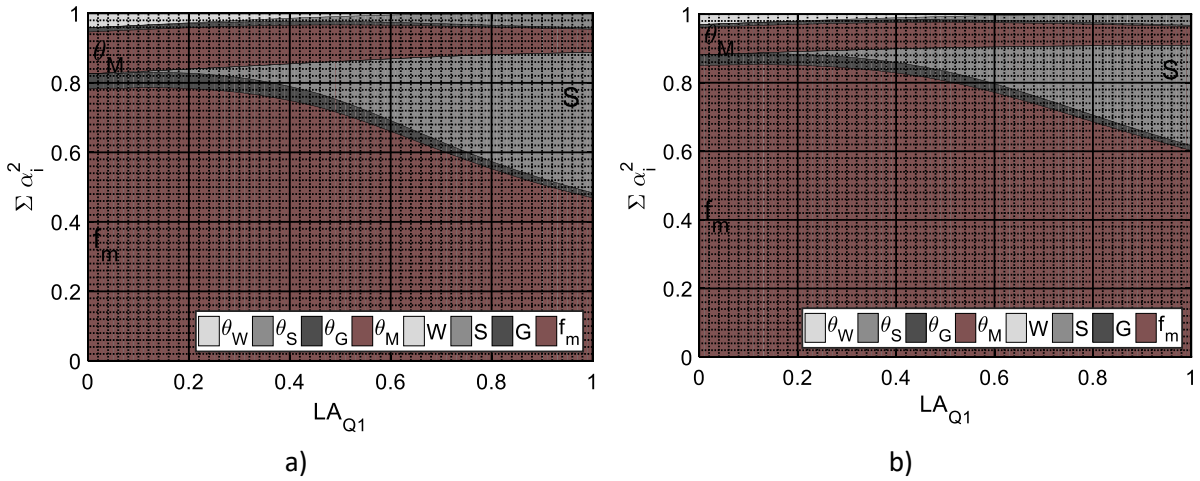


Abb. 10.27: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,5$   
links:  $V_R = 0,20$ , rechts:  $V_R = 0,25$

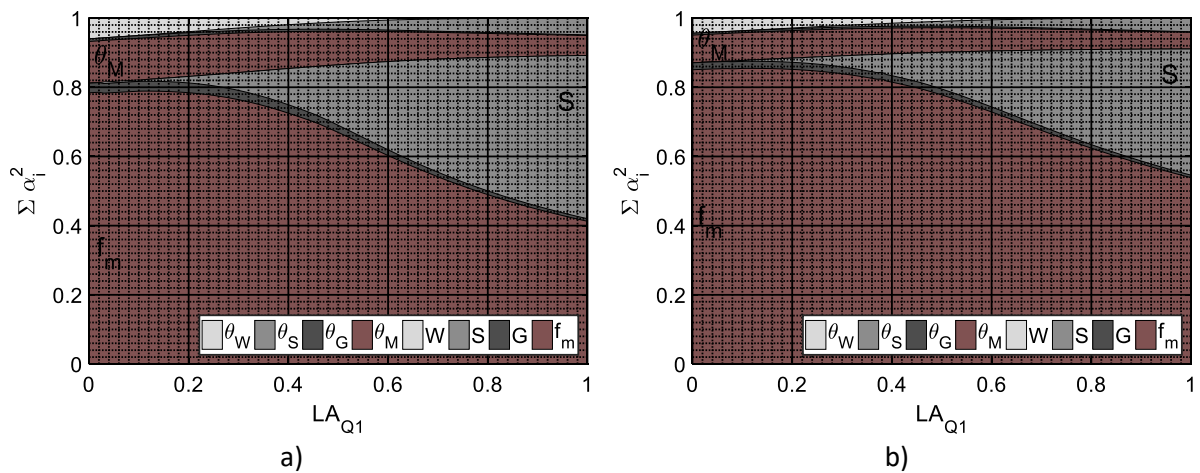


Abb. 10.28: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,6$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$



10. Anhang

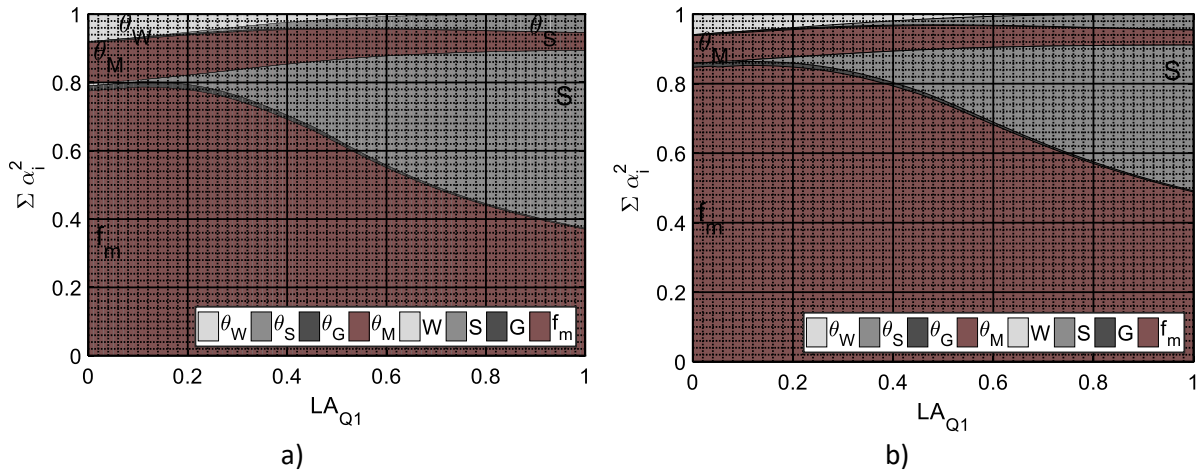


Abb. 10.29: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,7$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

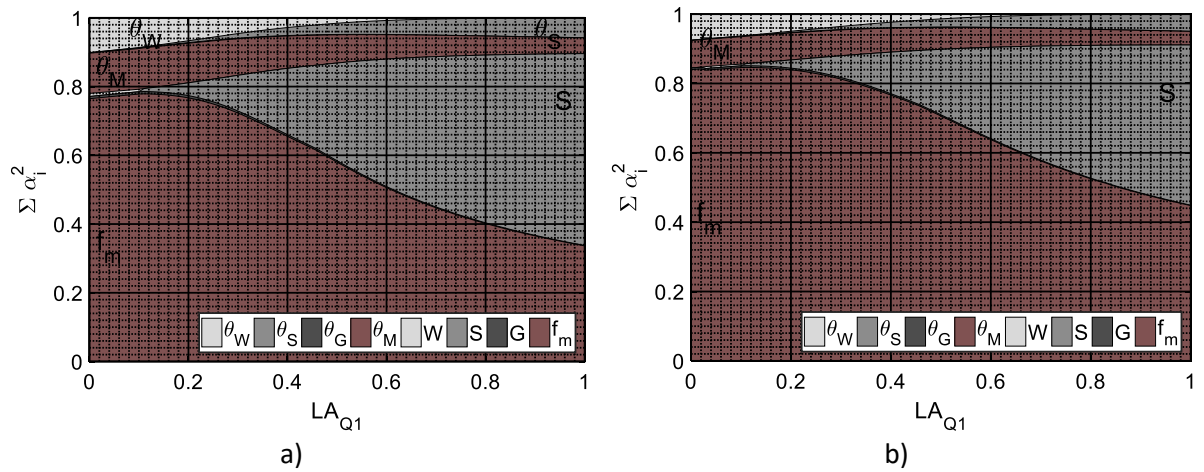


Abb. 10.30: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,8$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

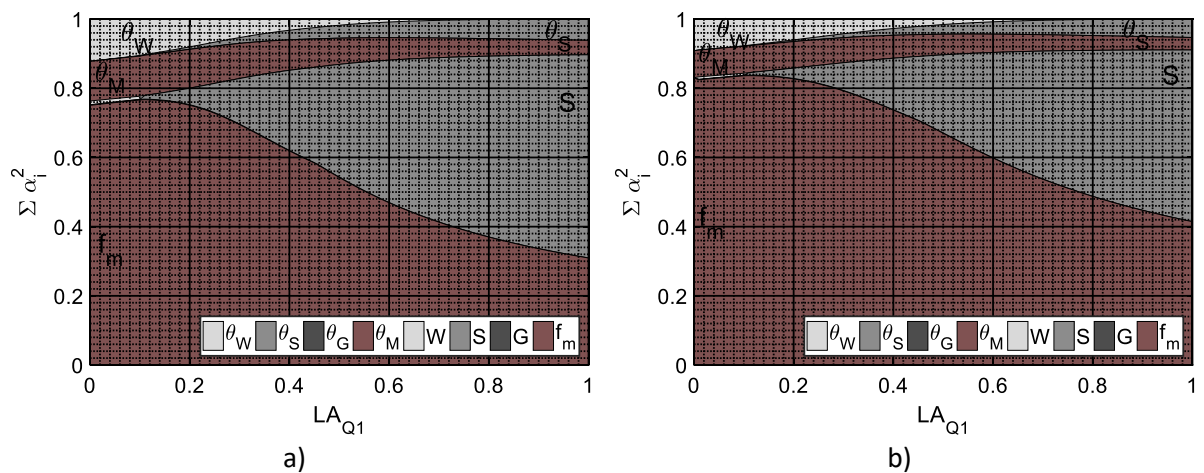


Abb. 10.31: Sensitivitätsfaktoren bei Einfachbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $LV_Q = 0,9$   
a)  $V_R = 0,20$ , b)  $V_R = 0,25$

### 10.9.2 Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast

Verhältnis  $h/b = 2$

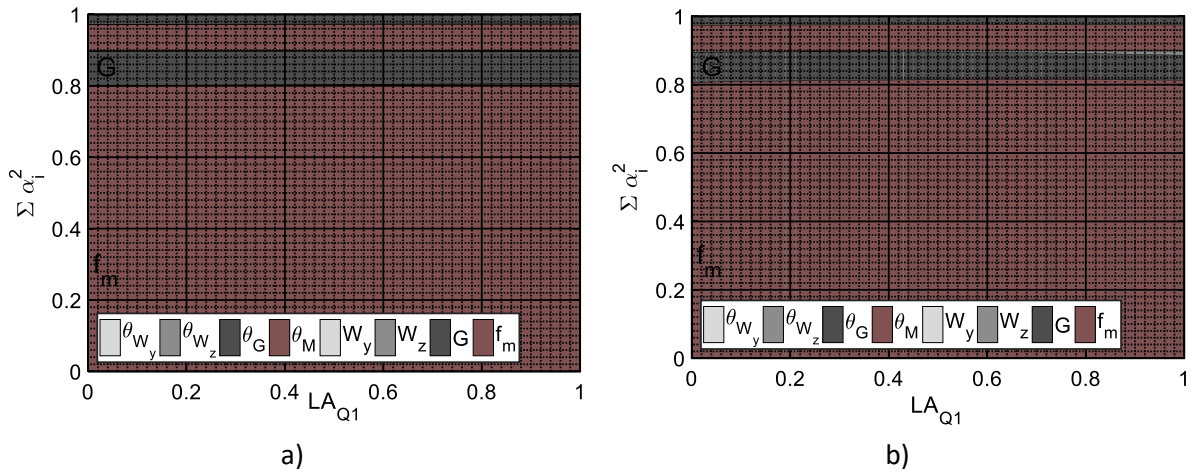


Abb. 10.32: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$   
a)  $LV_Q=0,1$ , b)  $LV_Q=0,2$

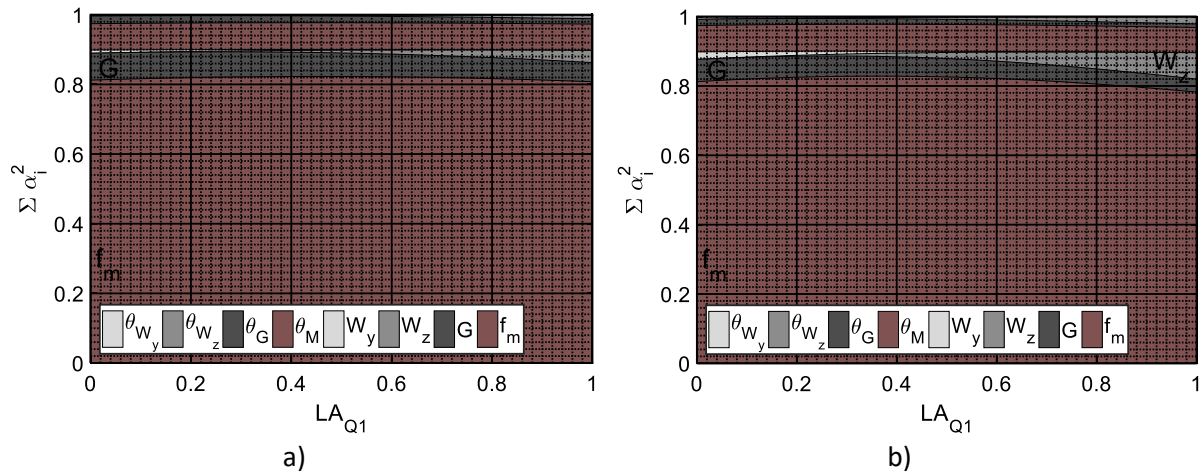


Abb. 10.33: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$   
a)  $LV_Q=0,3$ , b)  $LV_Q=0,4$

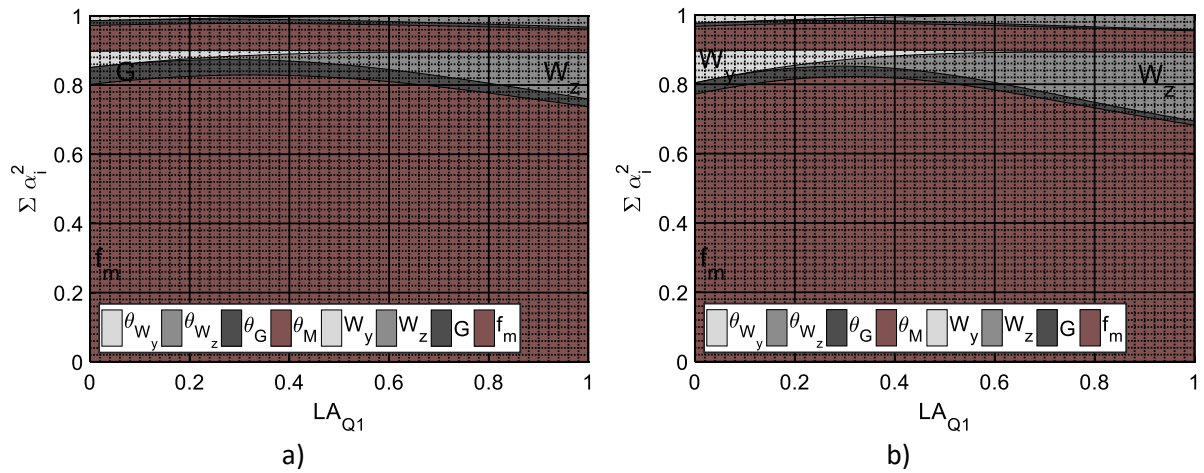


Abb. 10.34: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$   
a)  $LV_Q=0,5$ , b)  $LV_Q=0,6$

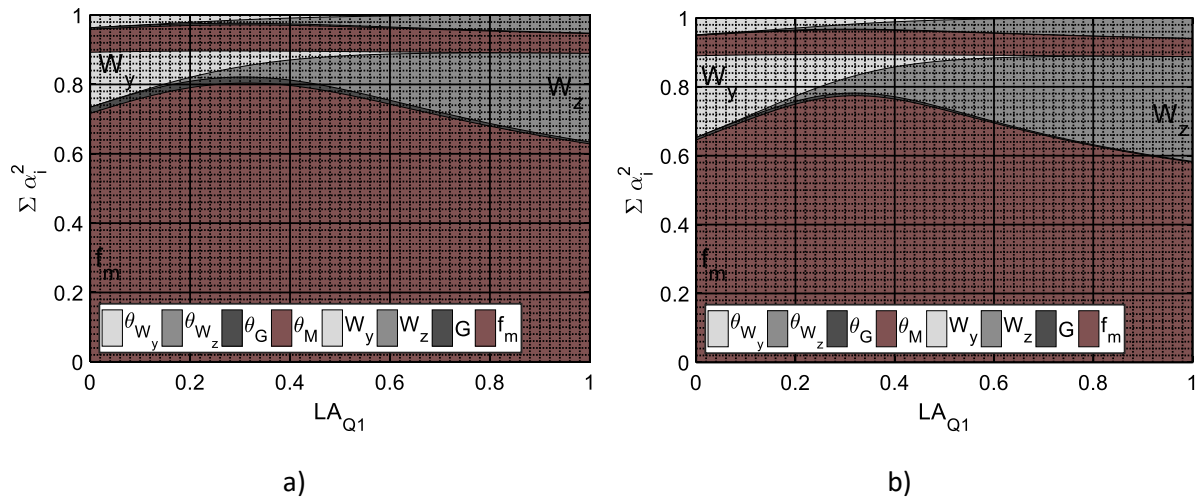


Abb. 10.35: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$   
a)  $LV_Q=0,7$ , b)  $LV_Q=0,8$

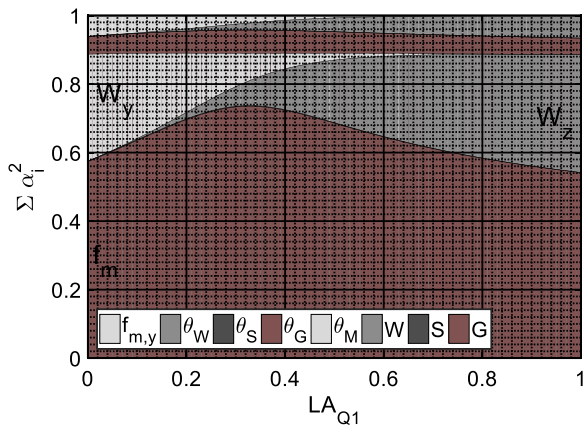


Abb. 10.36: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last & Windlast,  $h/b=2$ ,  $V_R=0,25$ ,  $LV_Q=0,9$

### 10.9.3 Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast

Vergleich der Modellierung der Biegefestigkeit in y- und z- Richtung als eine oder zwei korrelierte Variablen, Einfluss der Lastanteile

Verhältnis  $h/b = 2$

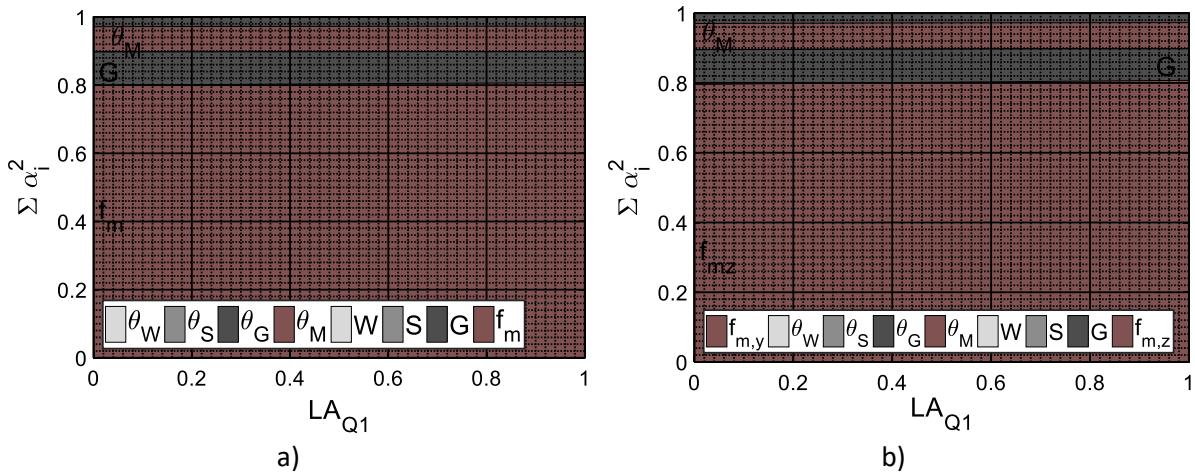


Abb. 10.37: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,1$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ )

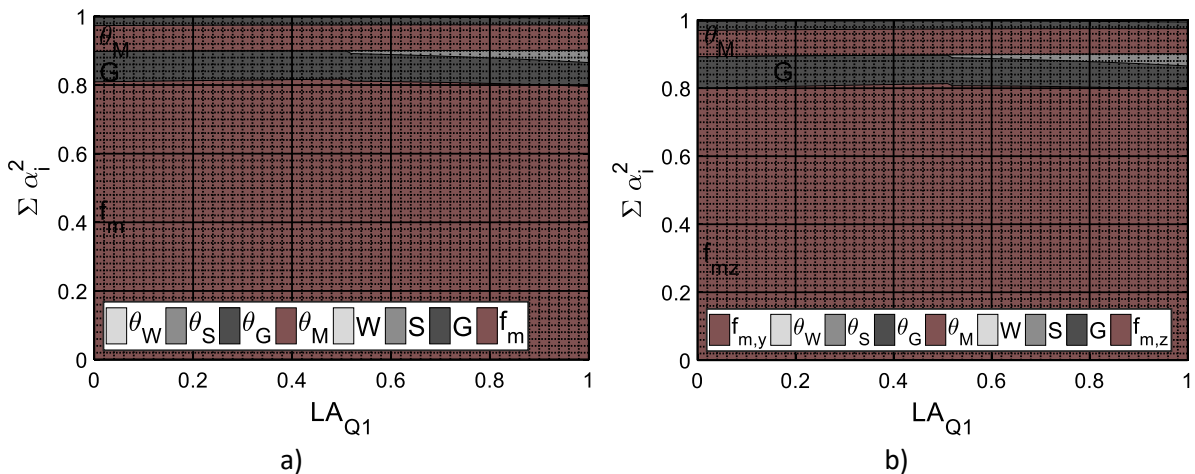


Abb. 10.38: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$   
links: eine Variable, rechts: zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ )

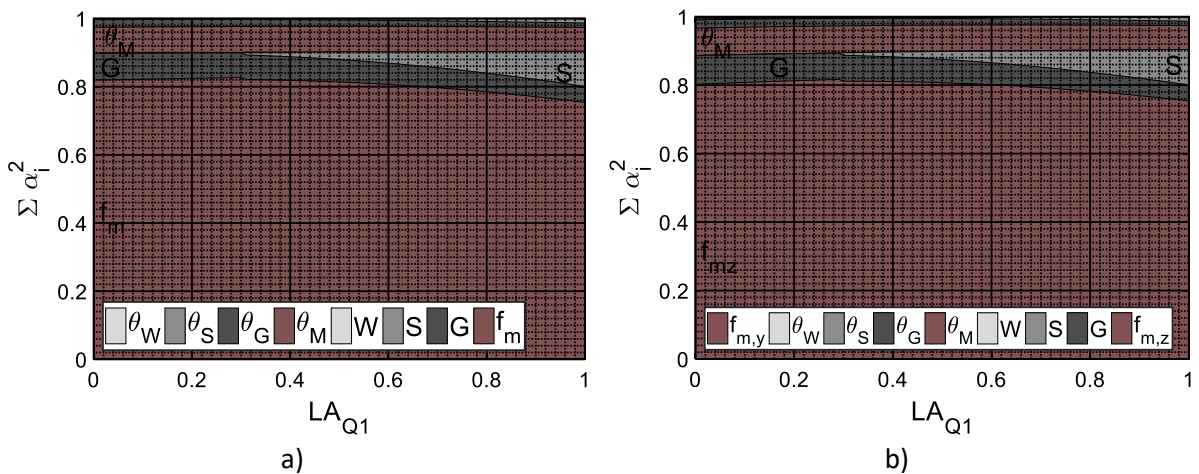


Abb. 10.39: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho = 0,8$ )

10. Anhang

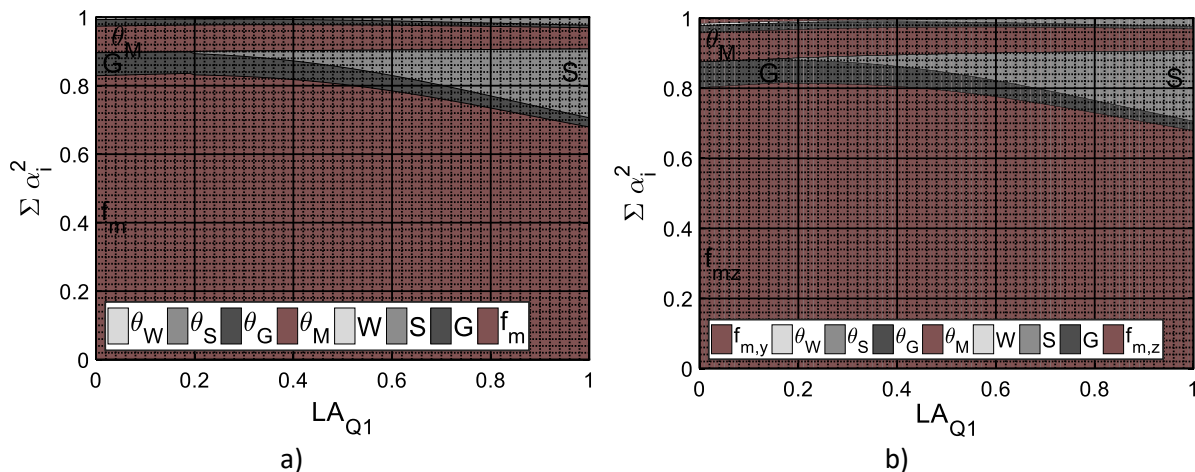


Abb. 10.40: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2, LV_Q=0,4$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho=0,8$ )

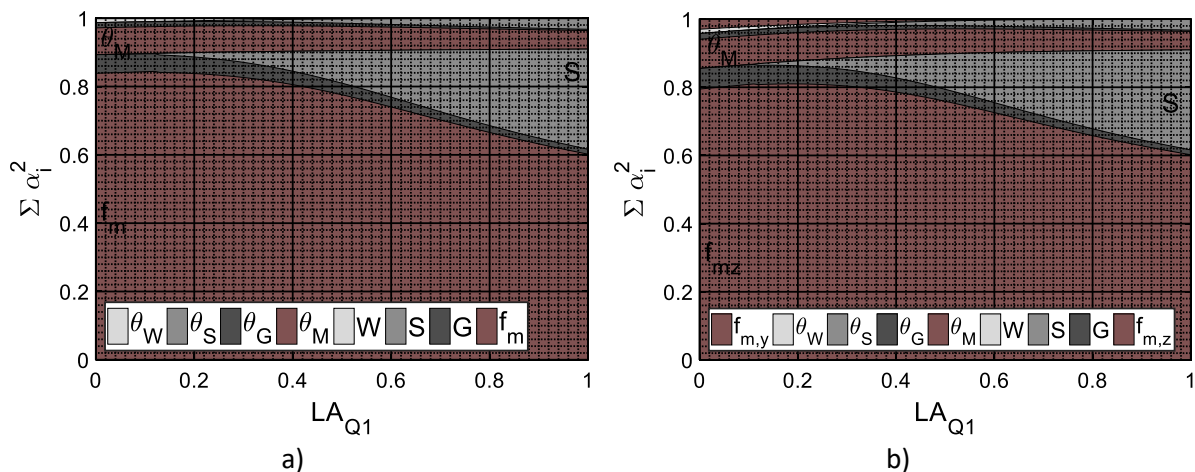


Abb. 10.41: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2, LV_Q=0,5$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho=0,8$ )

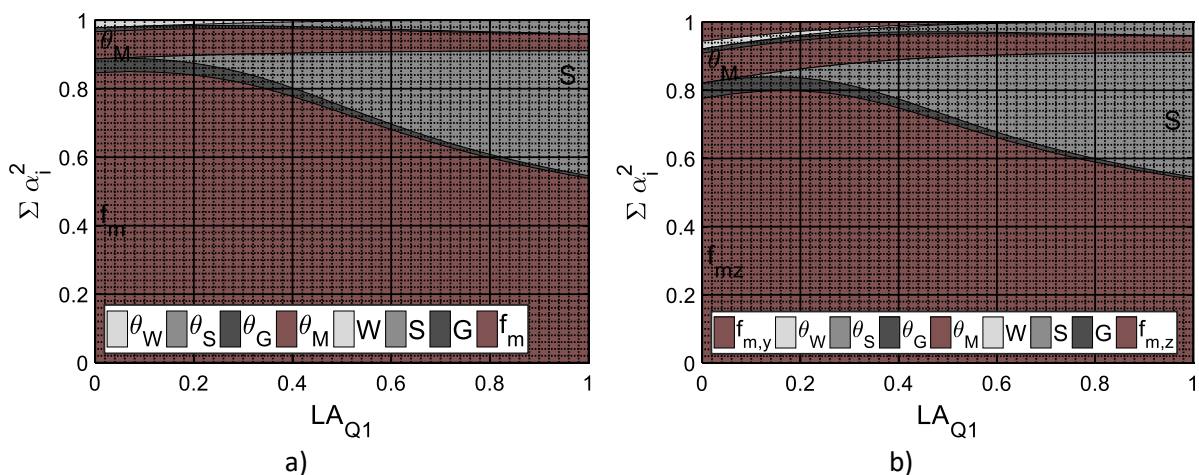


Abb. 10.42: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2, LV_Q=0,6$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho=0,8$ )

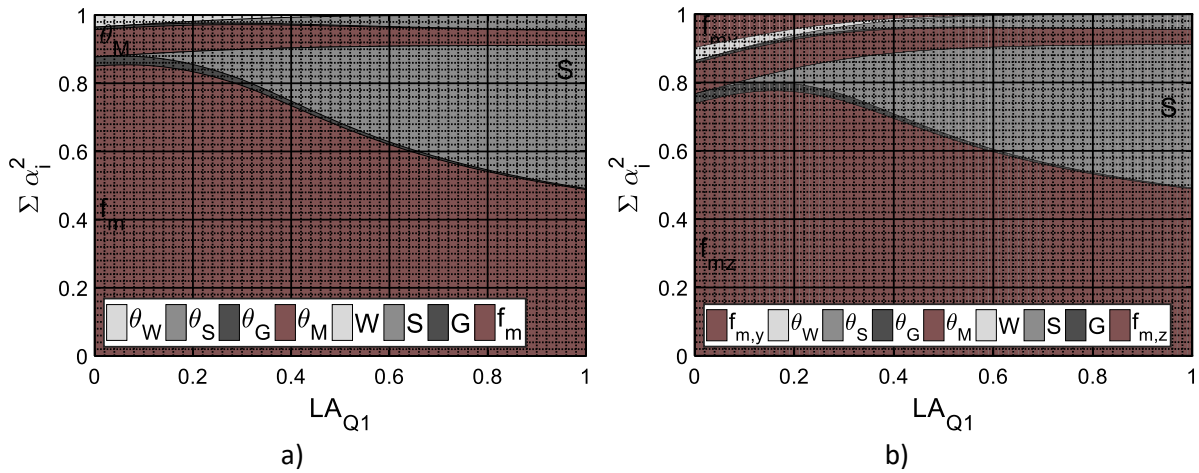


Abb. 10.43: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,7$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho=0,8$ )

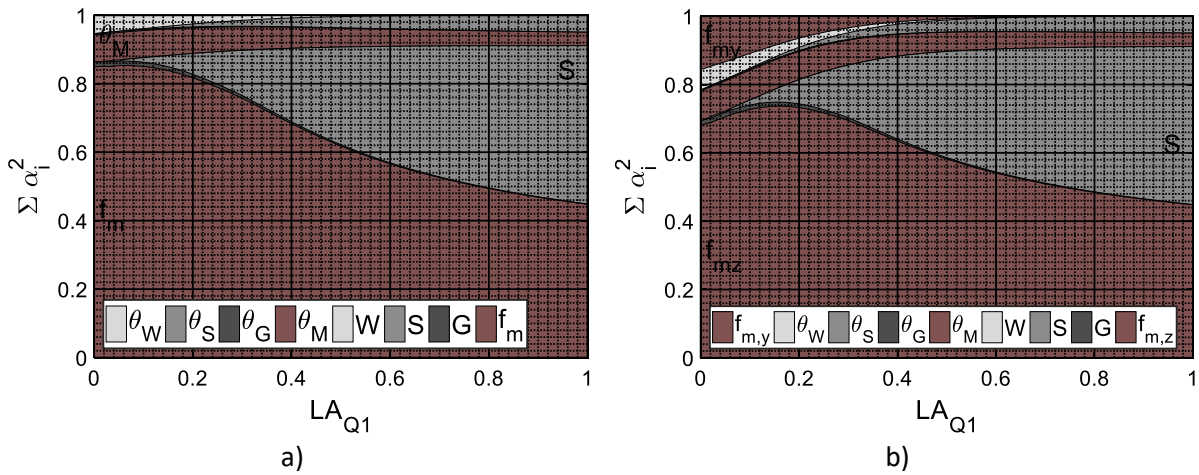


Abb. 10.44: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,8$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho=0,8$ )

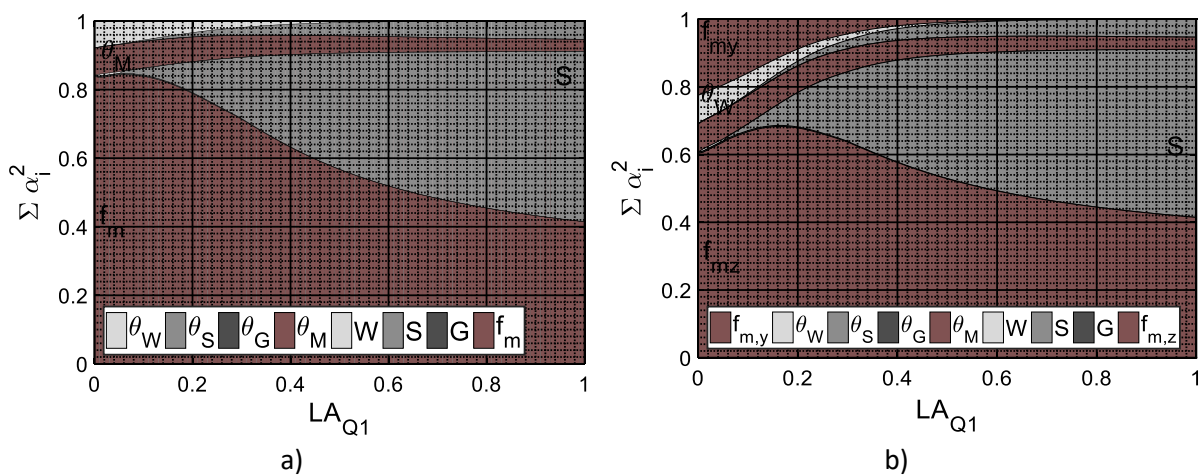


Abb. 10.45: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,9$   
a) eine Variable, b) zwei korrelierte Variablen ( $\rho=0,8$ )

## Einfluss einer Reduktion des Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit

Modellierung der Biegefestigkeit in beide Richtungen als eine Variable

Verhältnis  $h/b = 2$

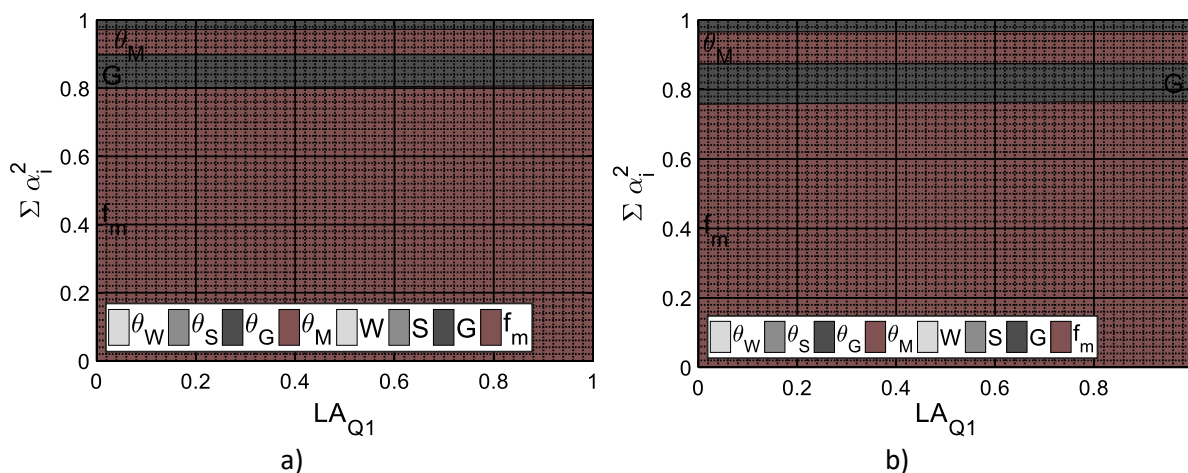


Abb. 10.46: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$   
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

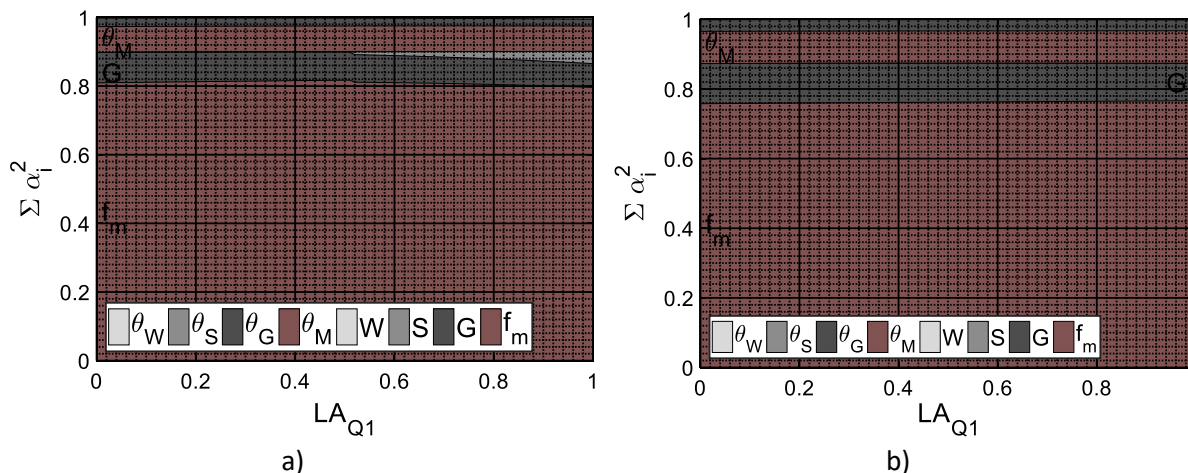


Abb. 10.47: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$   
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

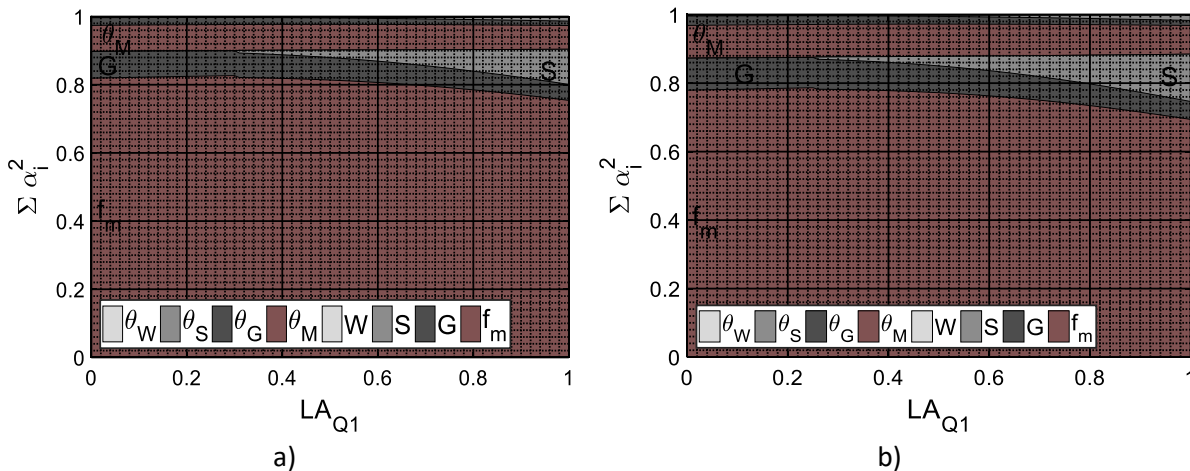


Abb. 10.48: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$   
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

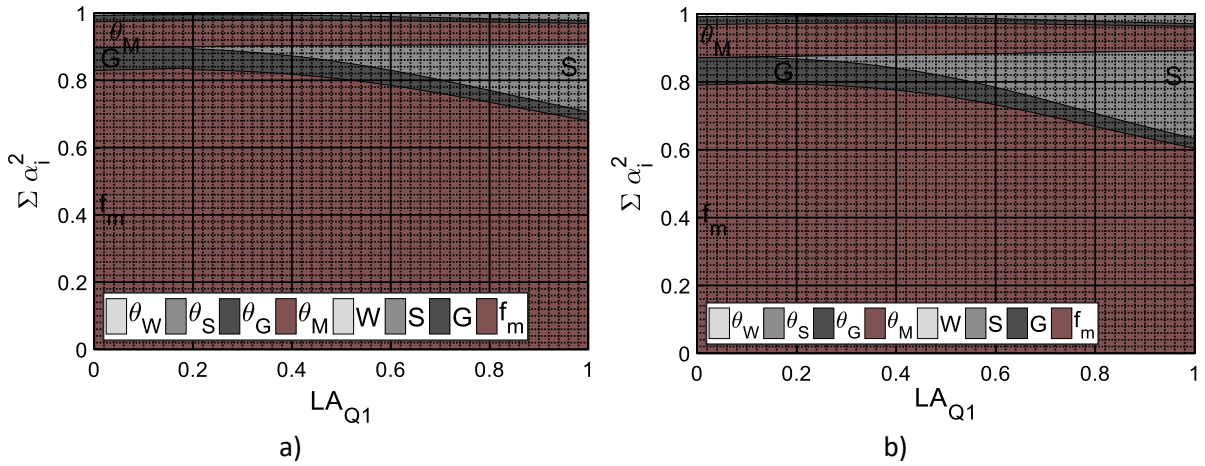


Abb. 10.49: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,4$   
a)  $V_R=0,25$ , b)  $V_R=0,22$

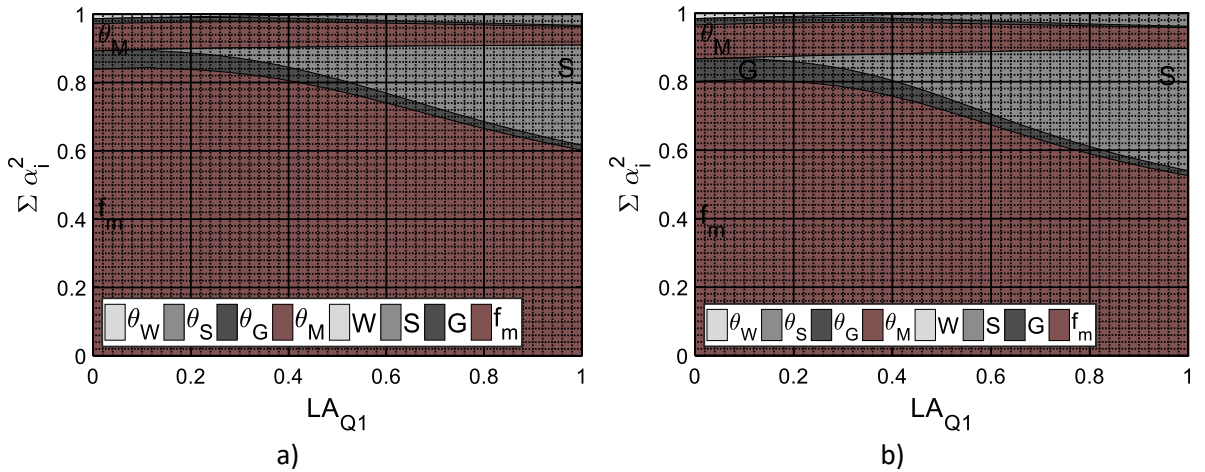


Abb. 10.50: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,5$   
a)  $V_R=0,25$ , b)  $V_R=0,22$

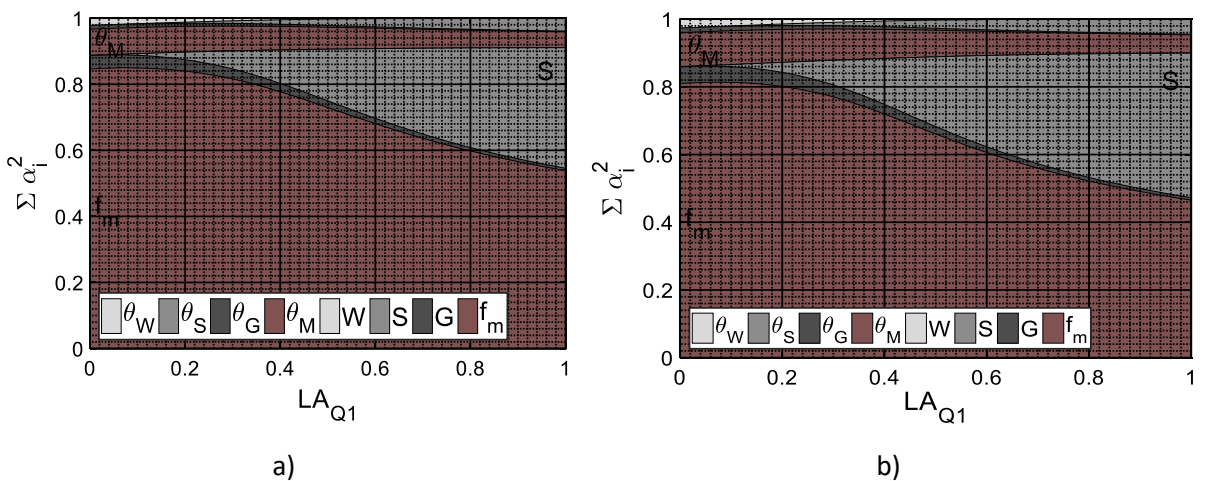


Abb. 10.51: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,6$   
a)  $V_R=0,25$ , b)  $V_R=0,22$



10. Anhang

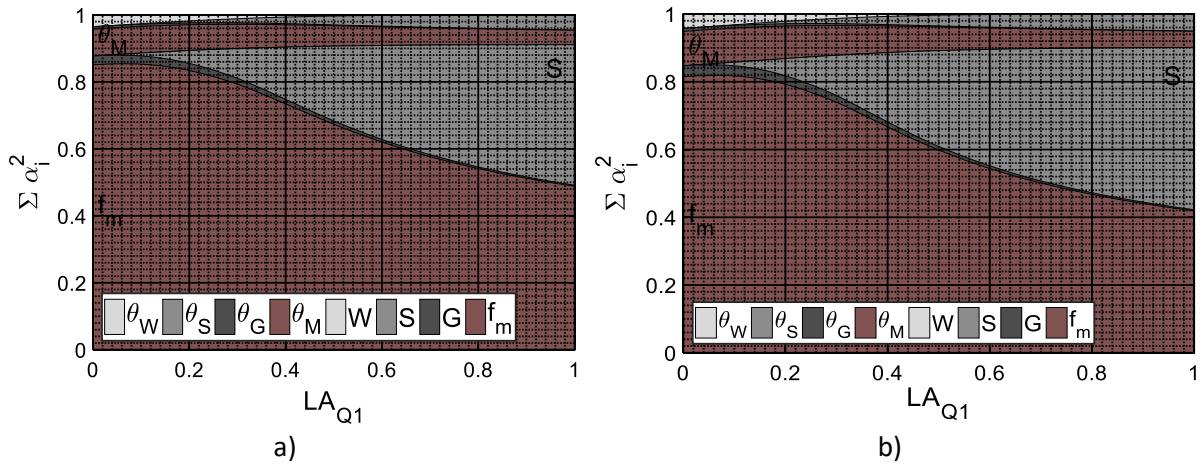


Abb. 10.52: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,7$   
a)  $V_R=0,25$ , b)  $V_R=0,22$

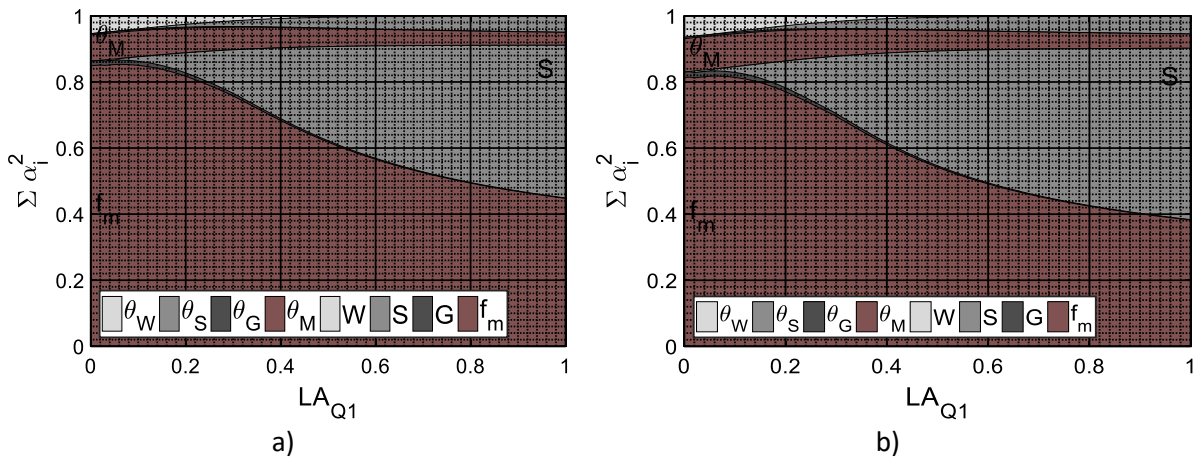


Abb. 10.53: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,8$   
a)  $V_R=0,25$ , b)  $V_R=0,22$

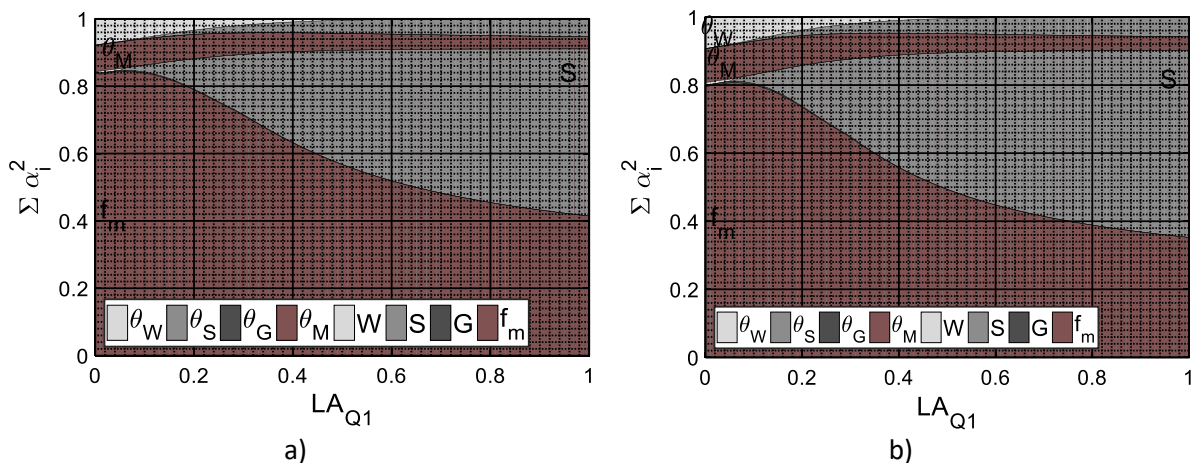


Abb. 10.54: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,9$   
a)  $V_R=0,25$ , b)  $V_R=0,22$

## Einfluss einer Reduktion des Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit

Modellierung der Biegefestigkeit in beide Richtungen als eine Variable

Verhältnis  $h/b = 1$

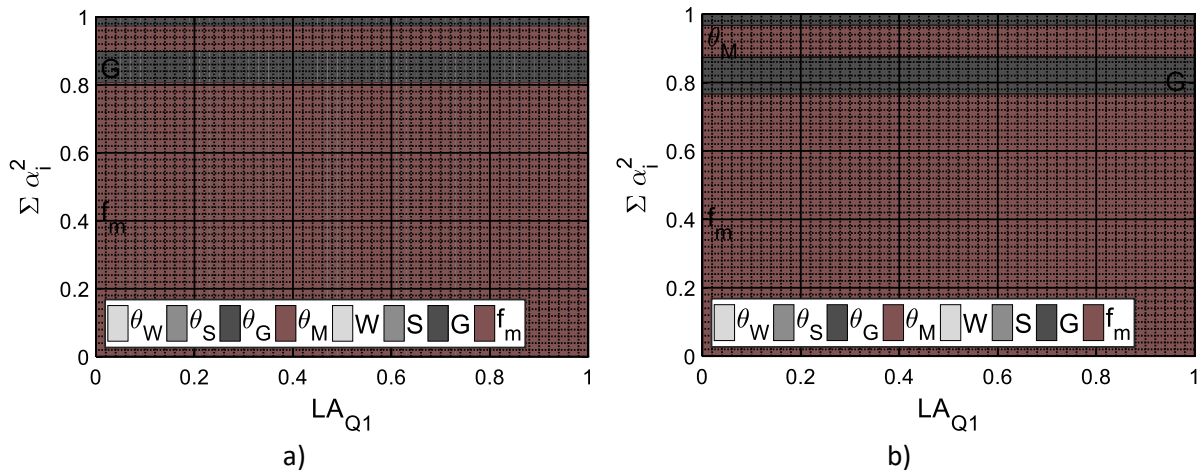


Abb. 10.55: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,1$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

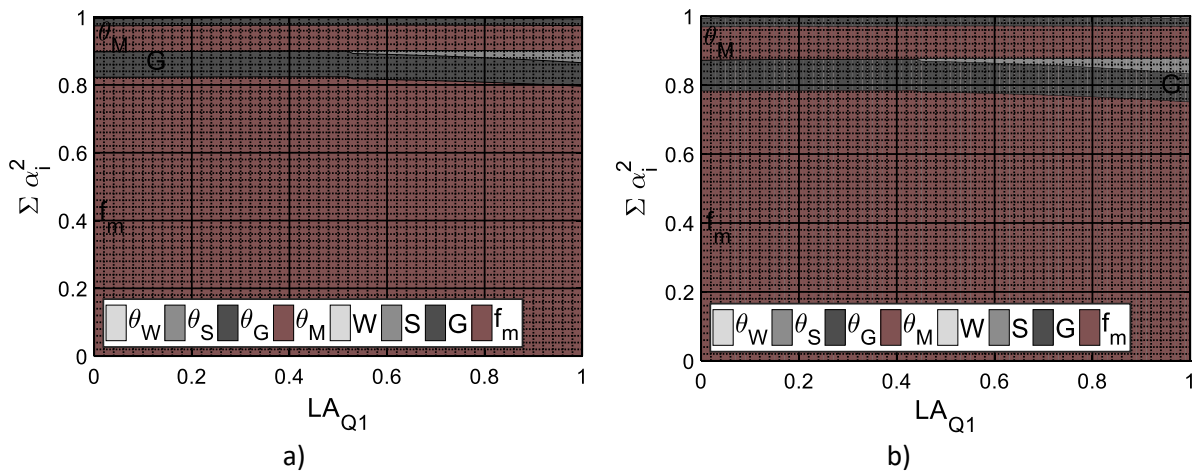


Abb. 10.56: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,2$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

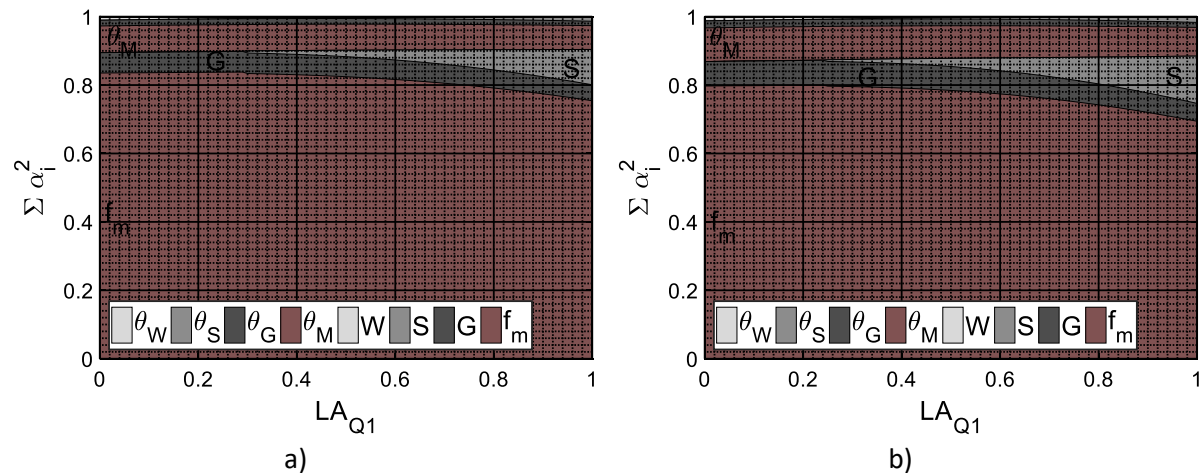


Abb. 10.57: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,3$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

10. Anhang

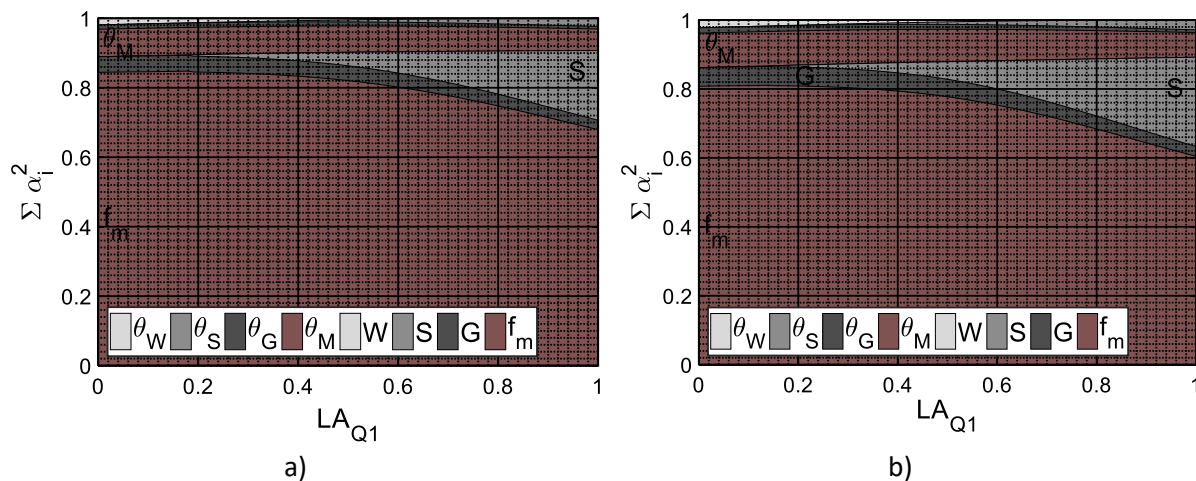


Abb. 10.58: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,4$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

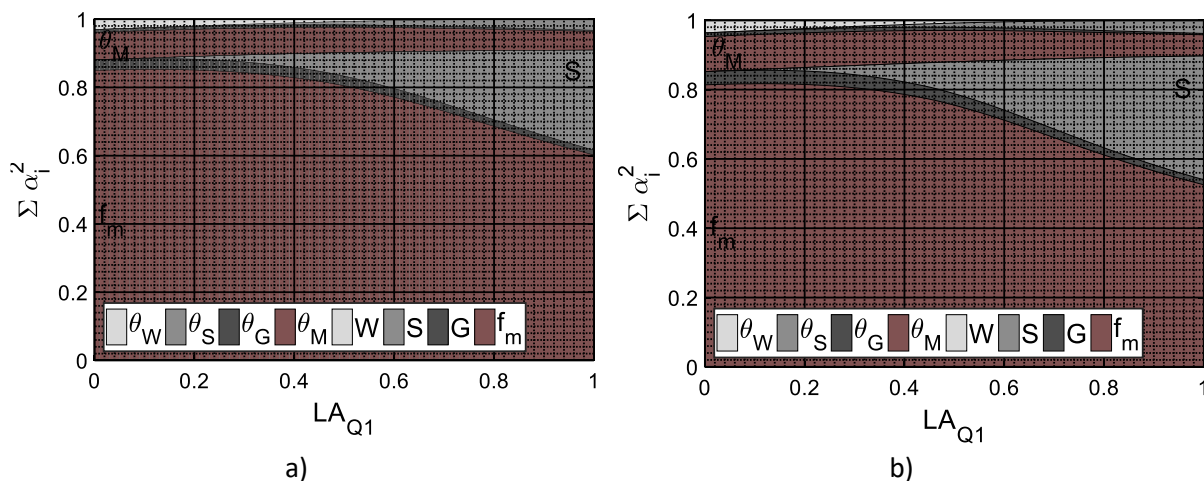


Abb. 10.59: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,5$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

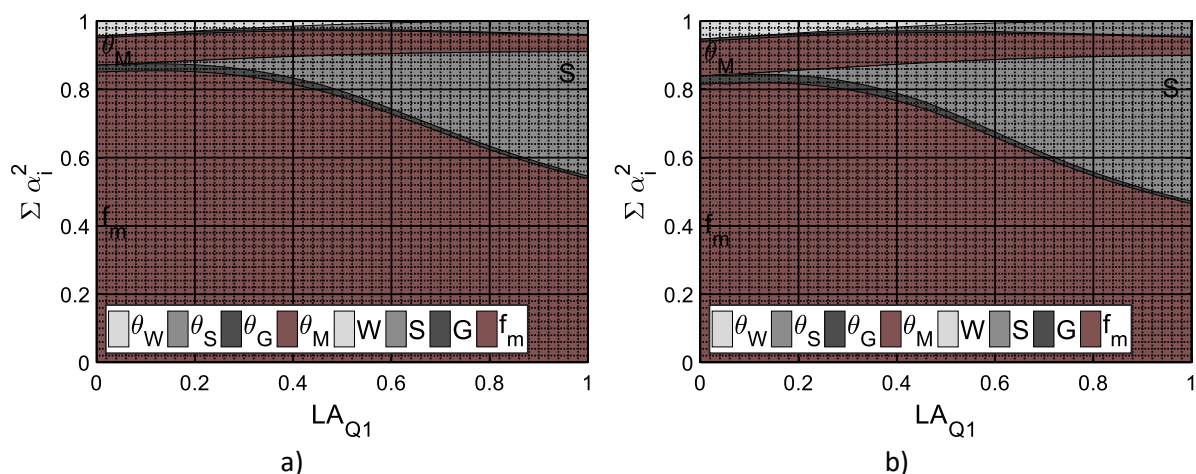


Abb. 10.60: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,6$ , a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

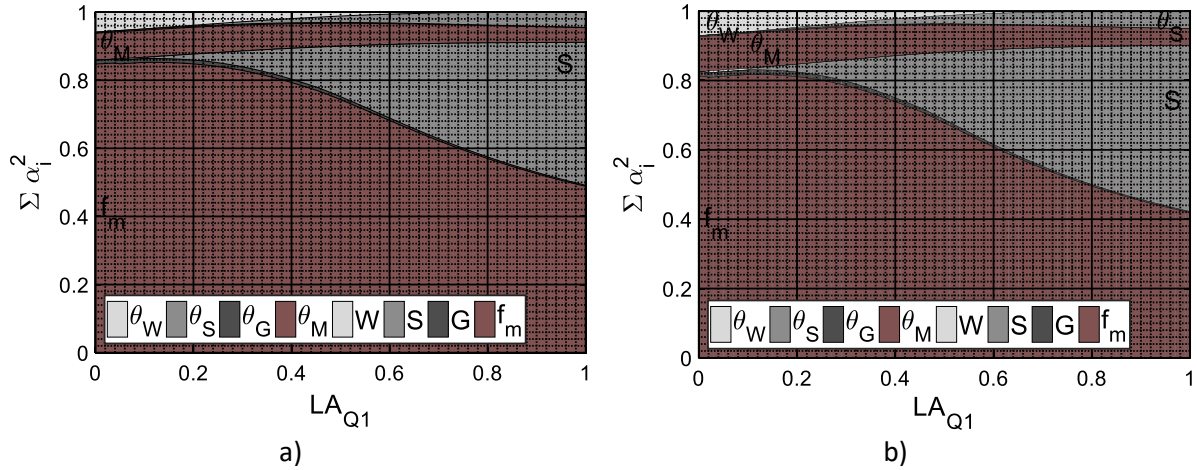


Abb. 10.61: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

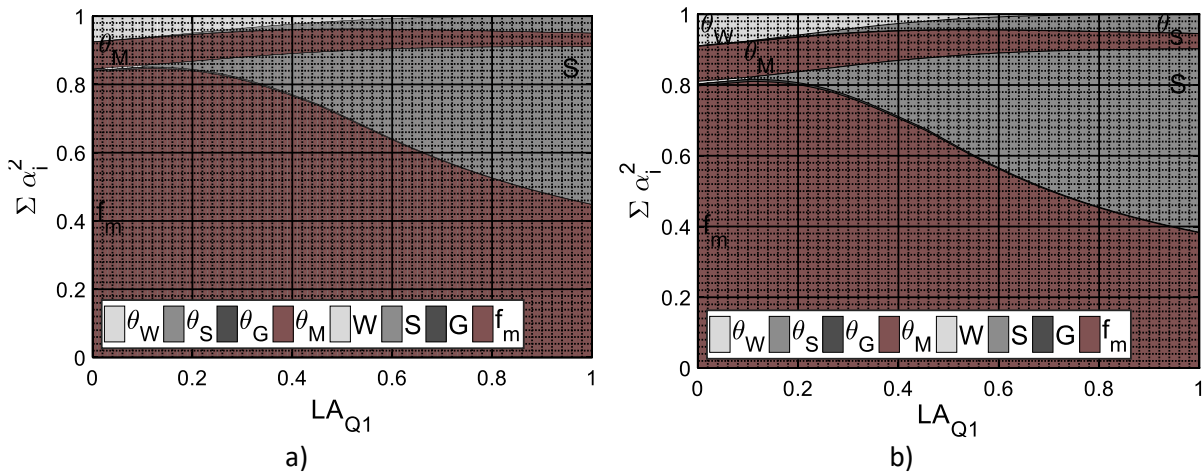


Abb. 10.62: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

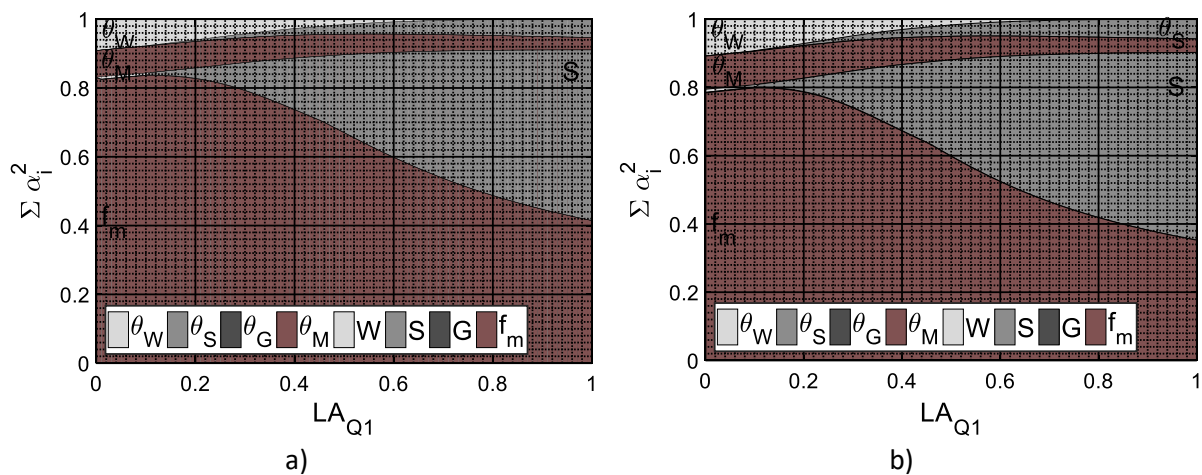


Abb. 10.63: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 1$ ,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $V_R = 0,25$ , b)  $V_R = 0,22$

### 10.9.4 Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast

#### Einfluss des Querschnittsverhältnisses und der Lastanteile

Variationskoeffizient der Nutzlast:  $V_N = 0,25$

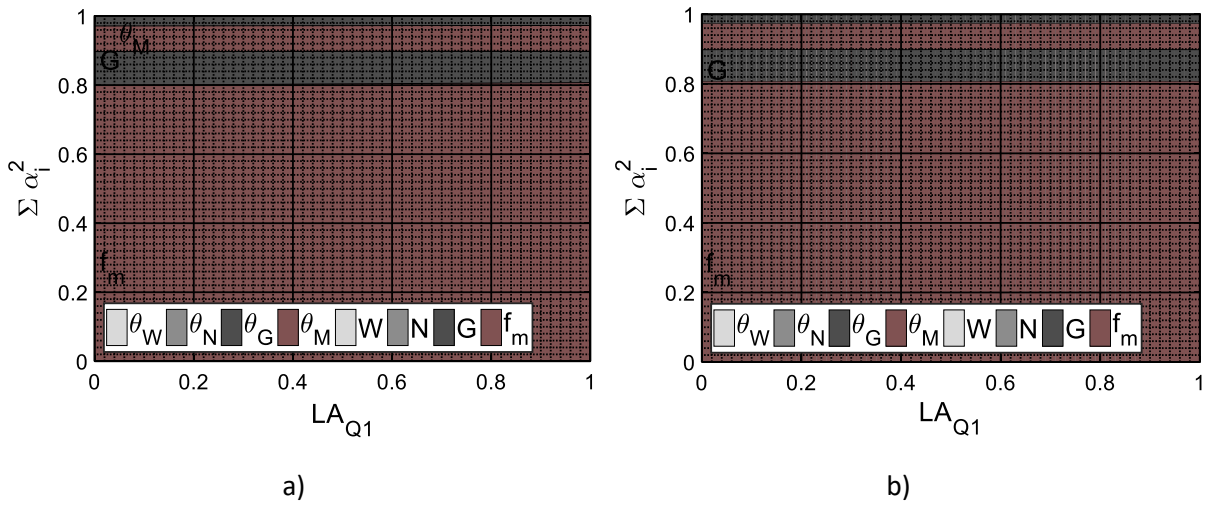


Abb. 10.64: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,1$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

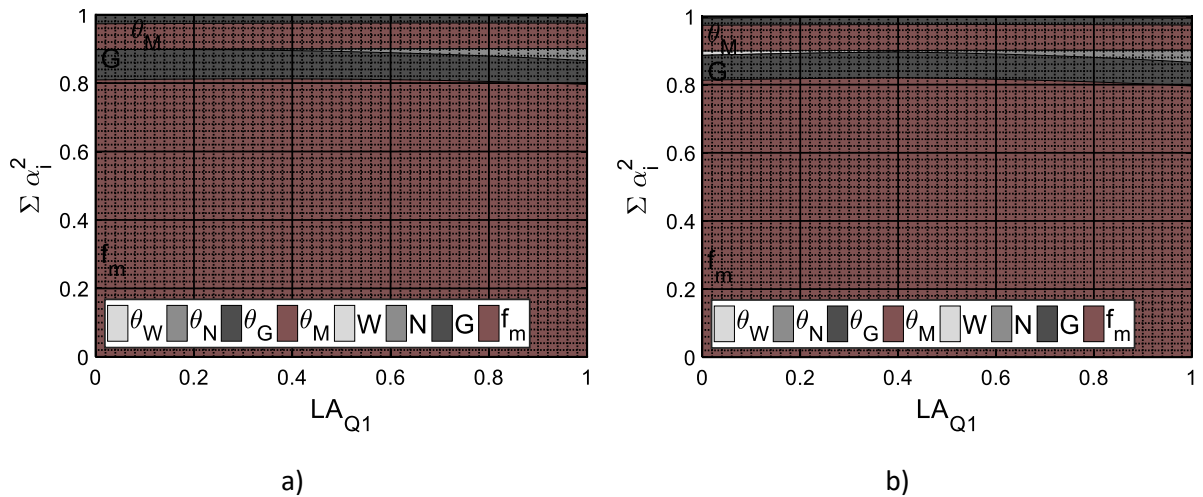


Abb. 10.65: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,2$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

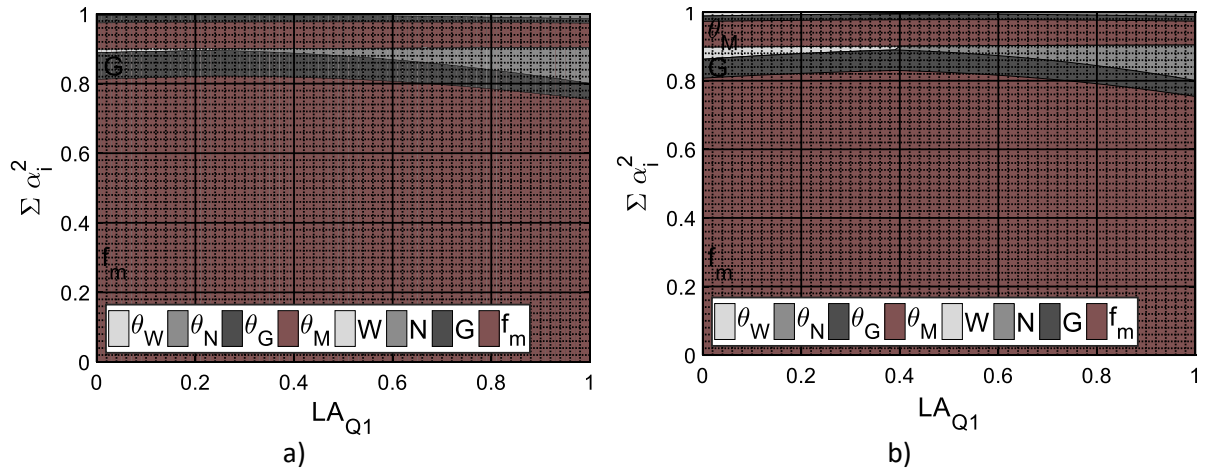


Abb. 10.66: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,3$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

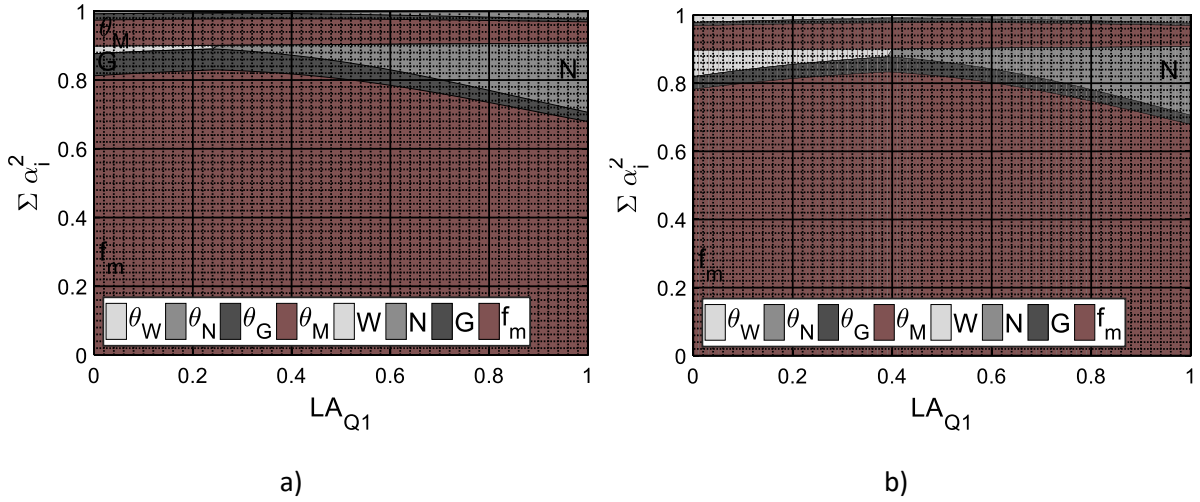


Abb. 10.67: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,4$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

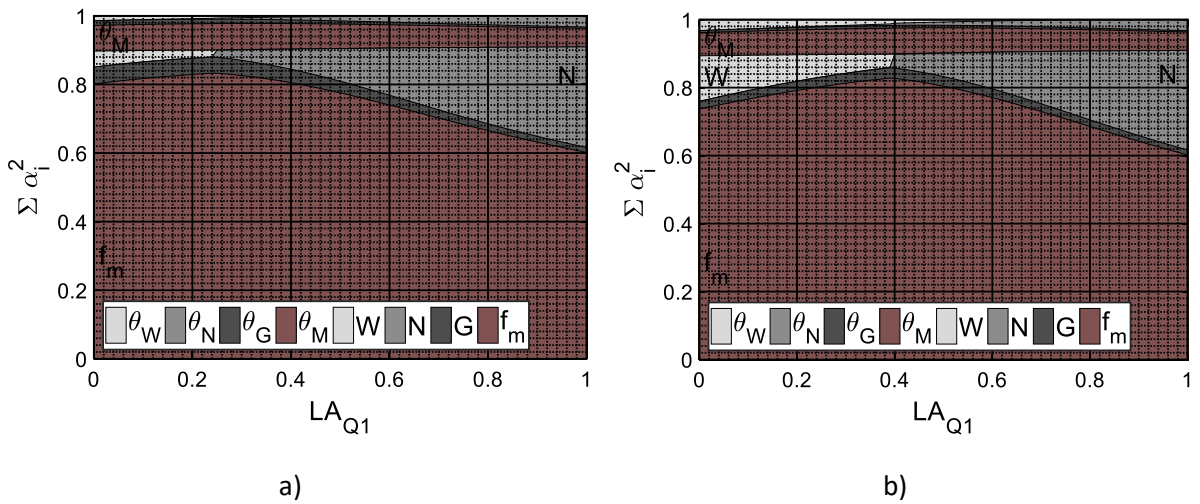


Abb. 10.68: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,5$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

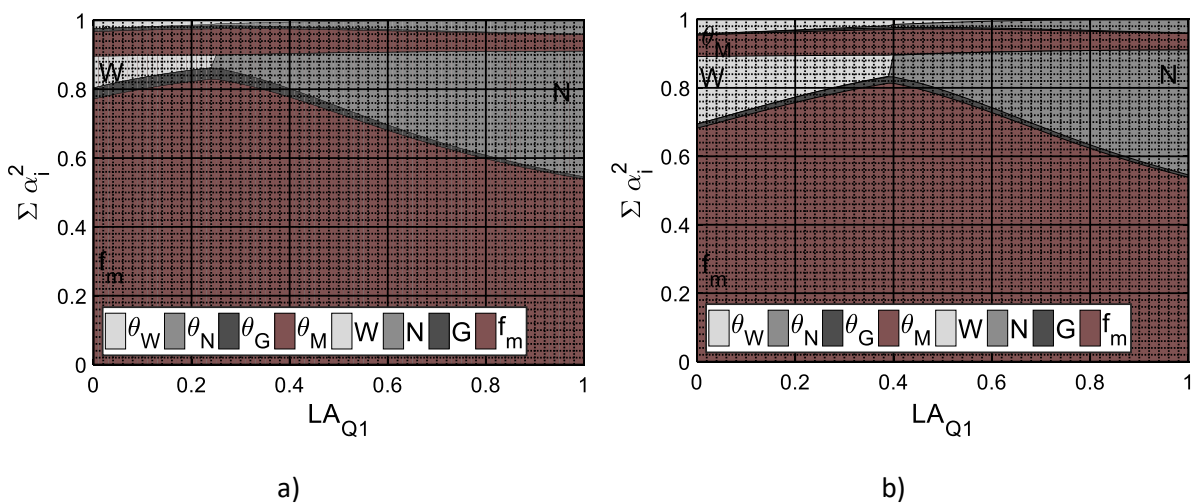


Abb. 10.69: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,6$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

10. Anhang

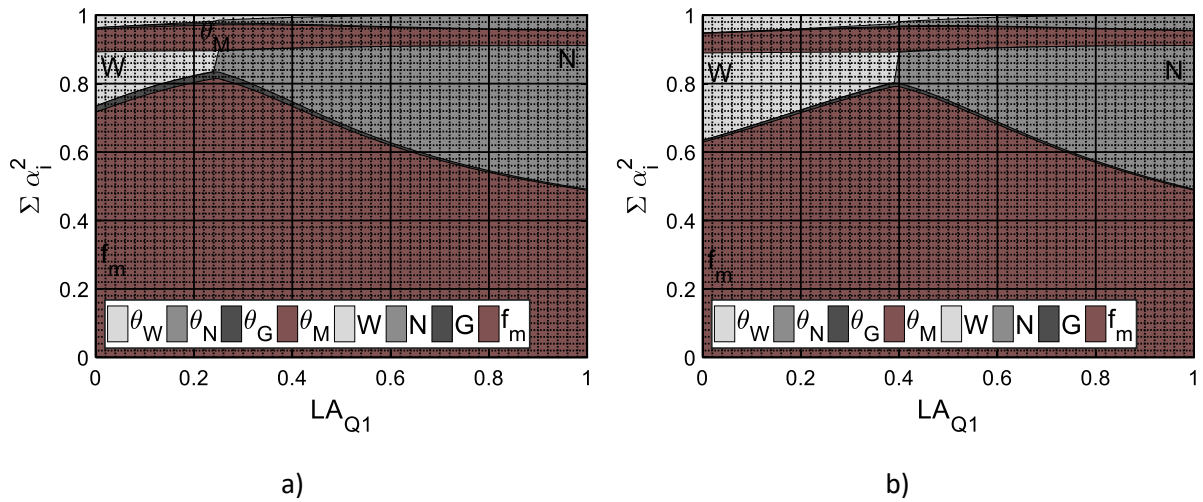


Abb. 10.70: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

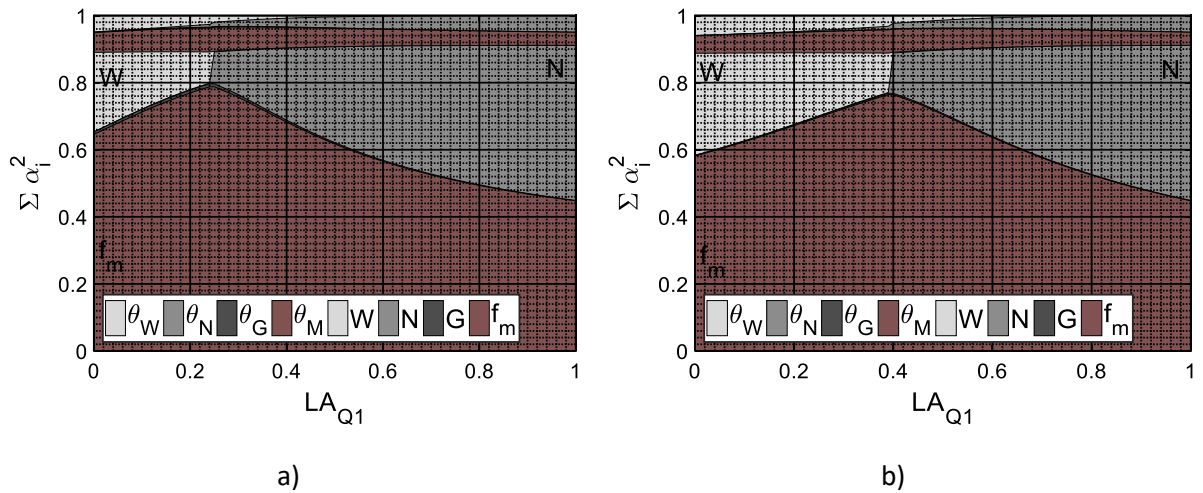


Abb. 10.71: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

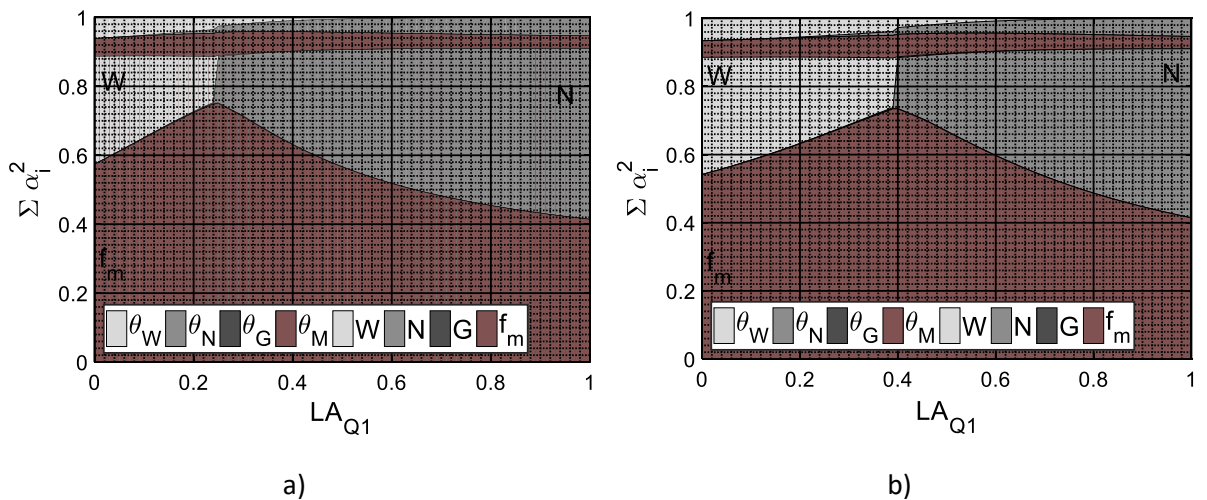


Abb. 10.72: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

## Einfluss des Querschnittsverhältnisses und des Lastanteils der ständigen Last

Variationskoeffizient der Nutzlast:  $V_N = 0,40$

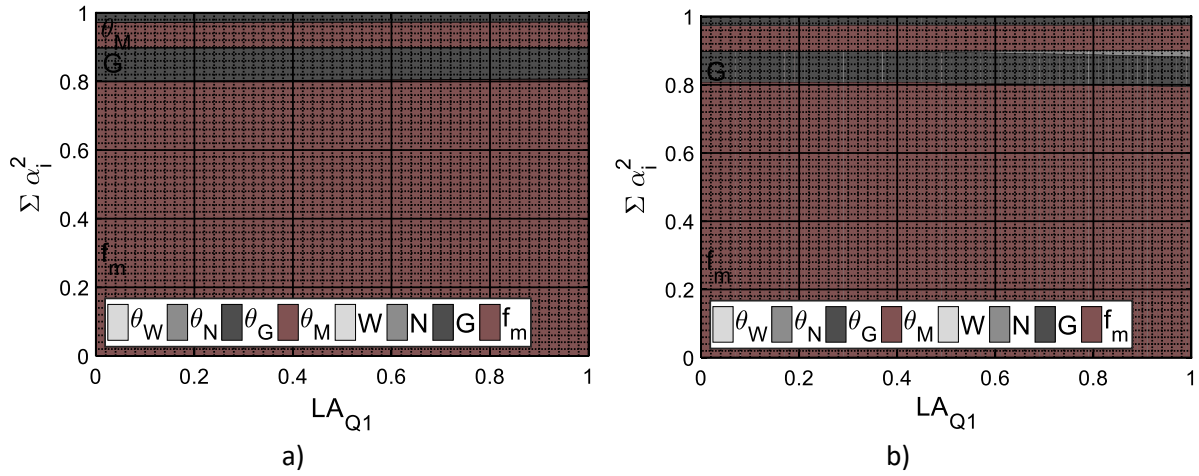


Abb. 10.73: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,1$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

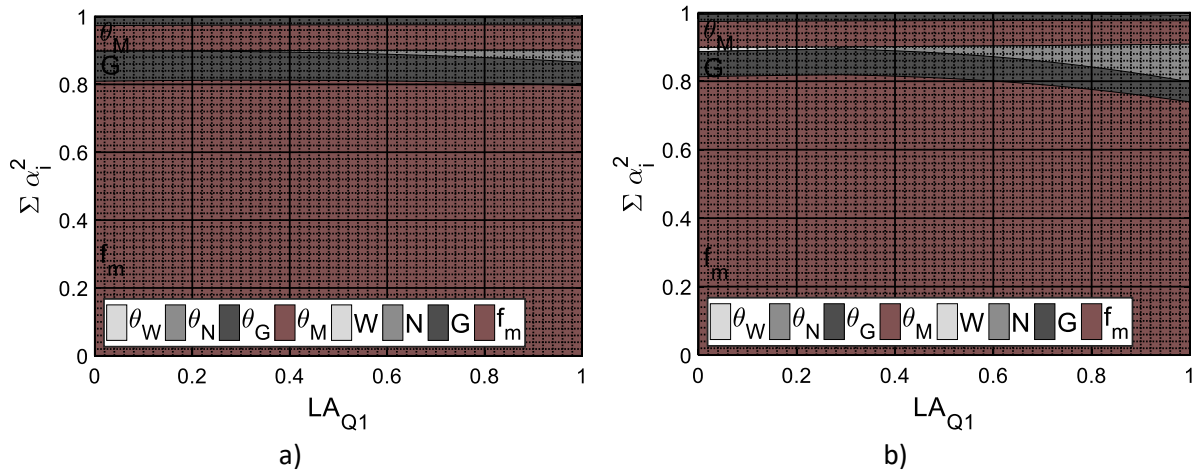


Abb. 10.74: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,2$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

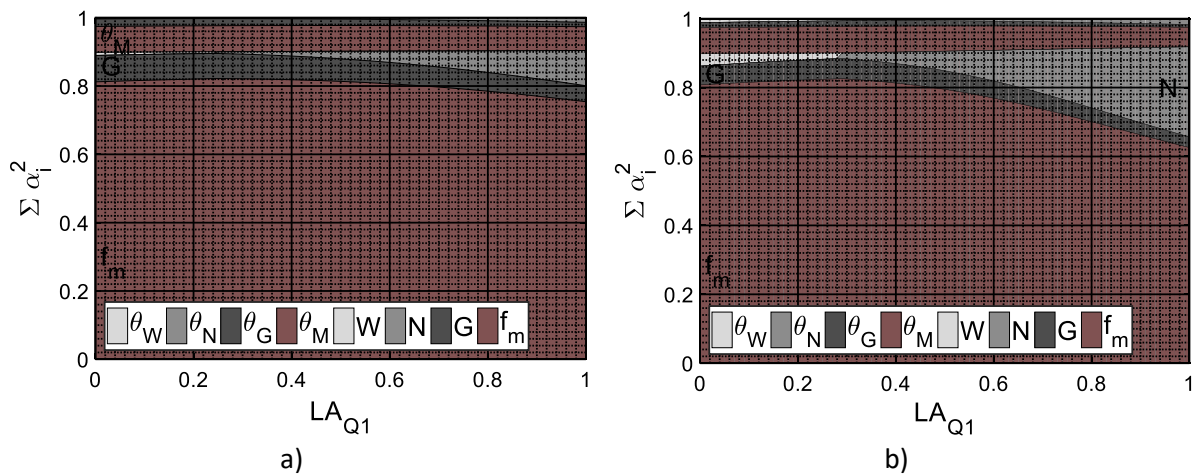


Abb. 10.75: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,3$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$



10. Anhang

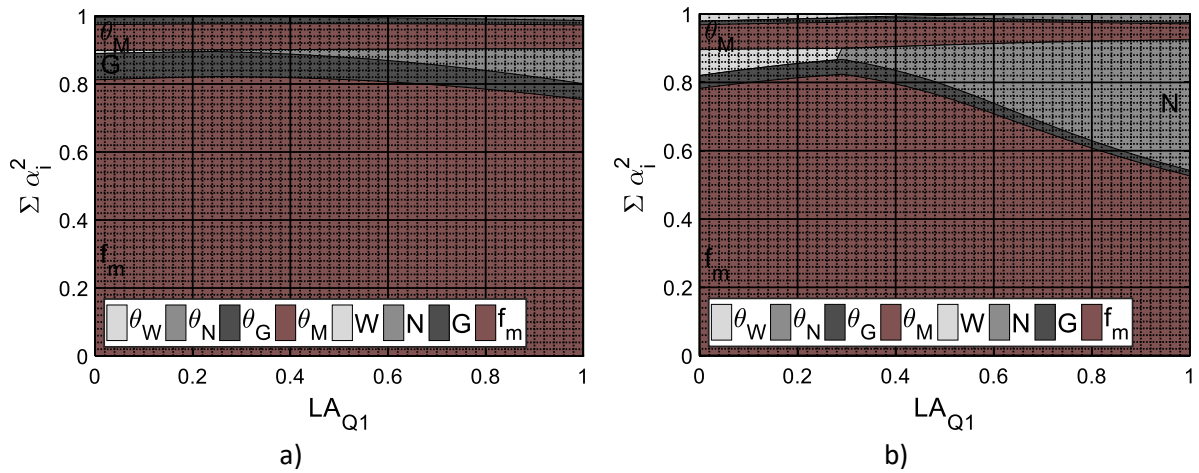


Abb. 10.76: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,4$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

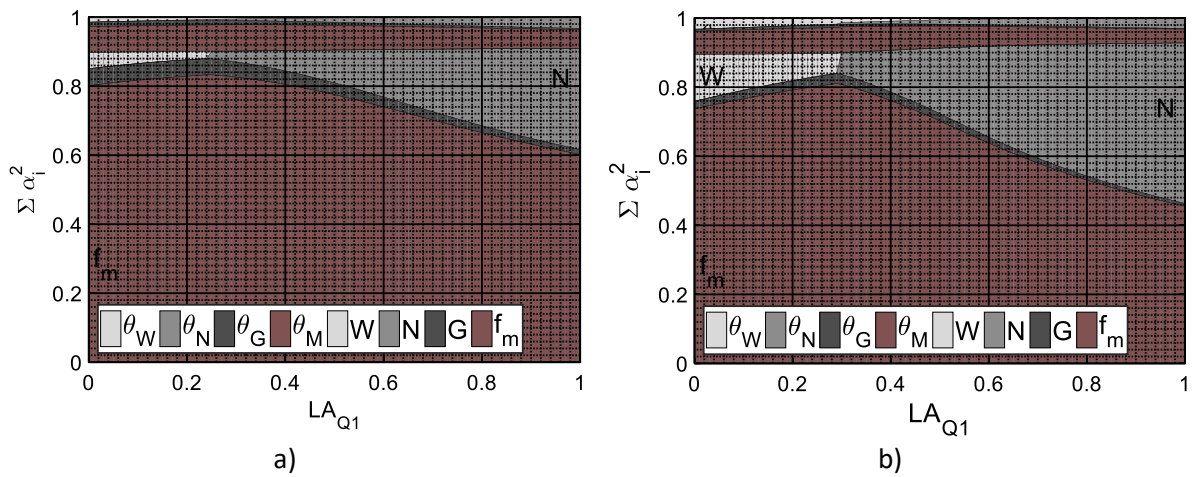


Abb. 10.77: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,5$ ;  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

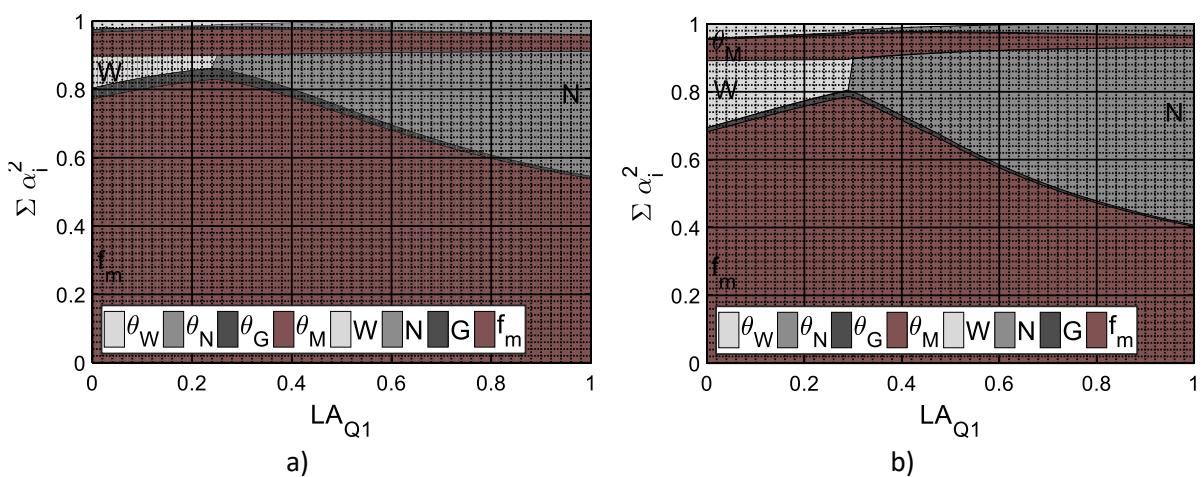


Abb. 10.78: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,6$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

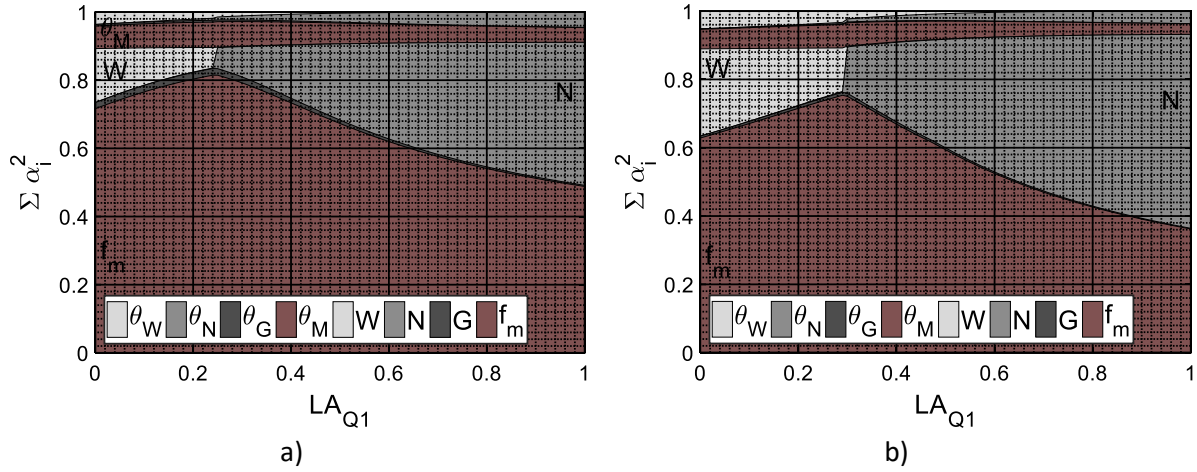


Abb. 10.79: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

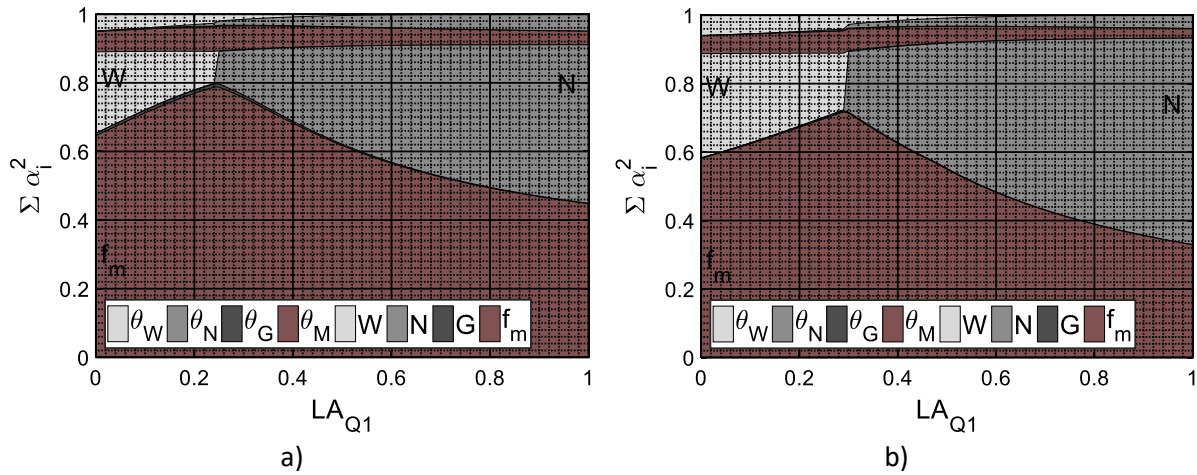


Abb. 10.80: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

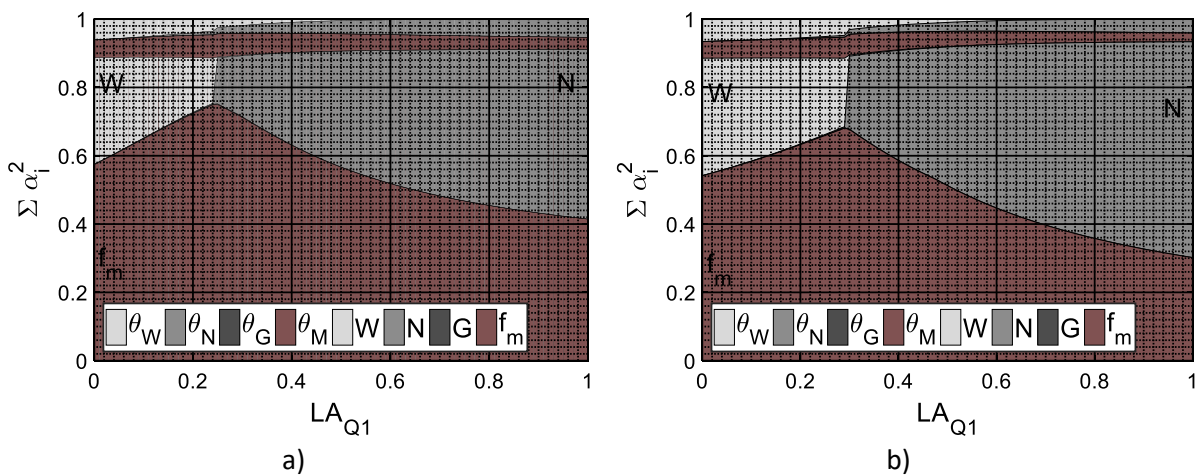


Abb. 10.81: Sensitivitätsfaktoren bei Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

### 10.9.5 Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast

#### Einfluss des Querschnittsverhältnisses und der Lastanteile

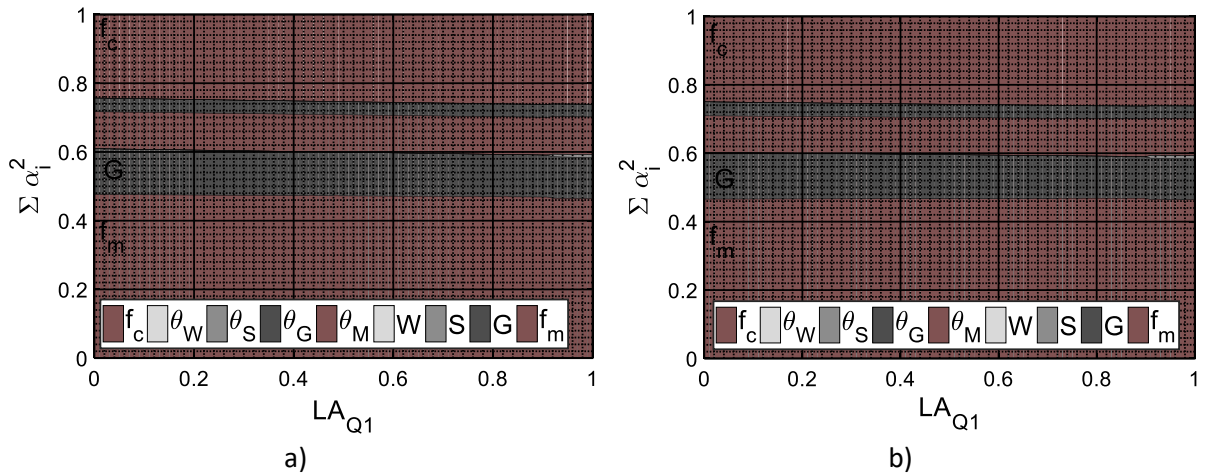


Abb. 10.82: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,1$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

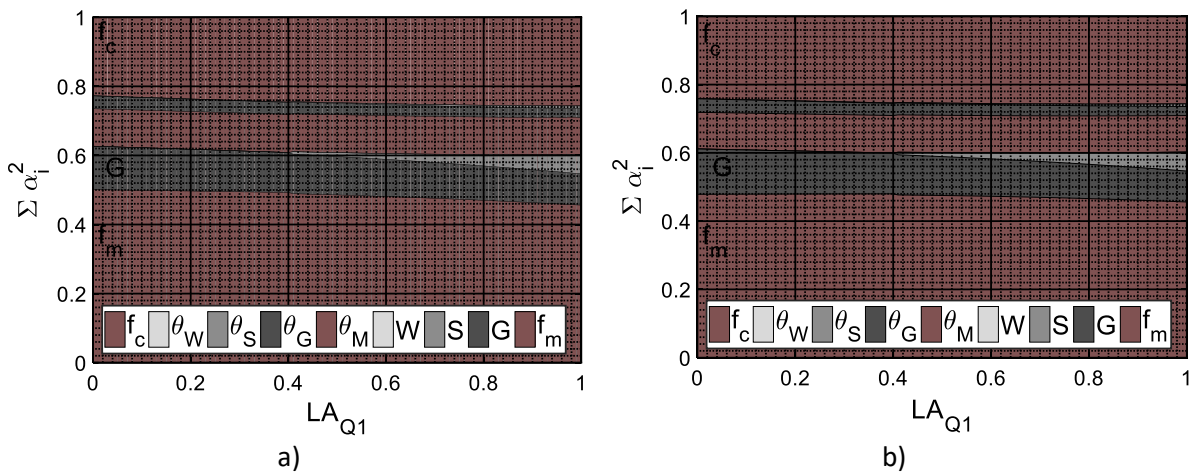


Abb. 10.83: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,2$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

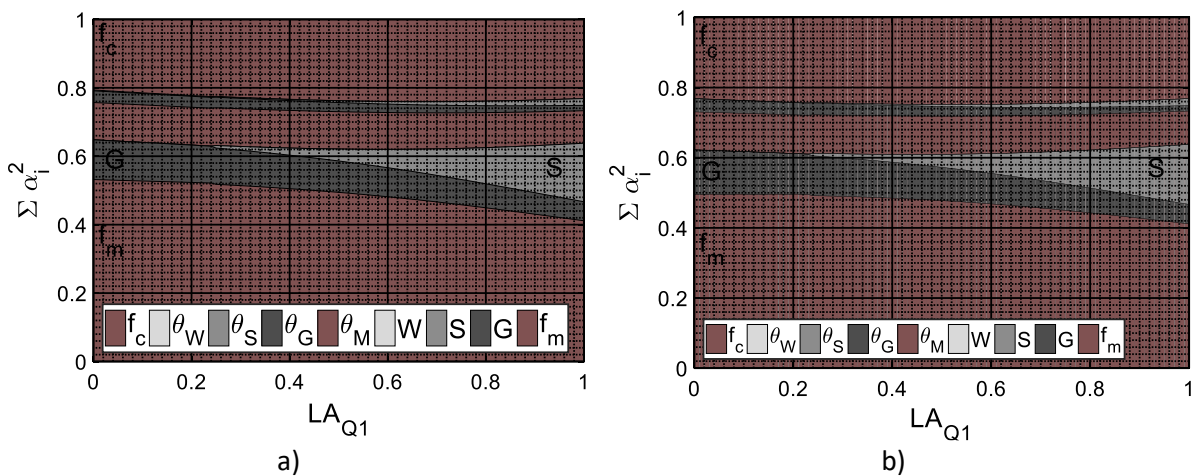


Abb. 10.84: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,3$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

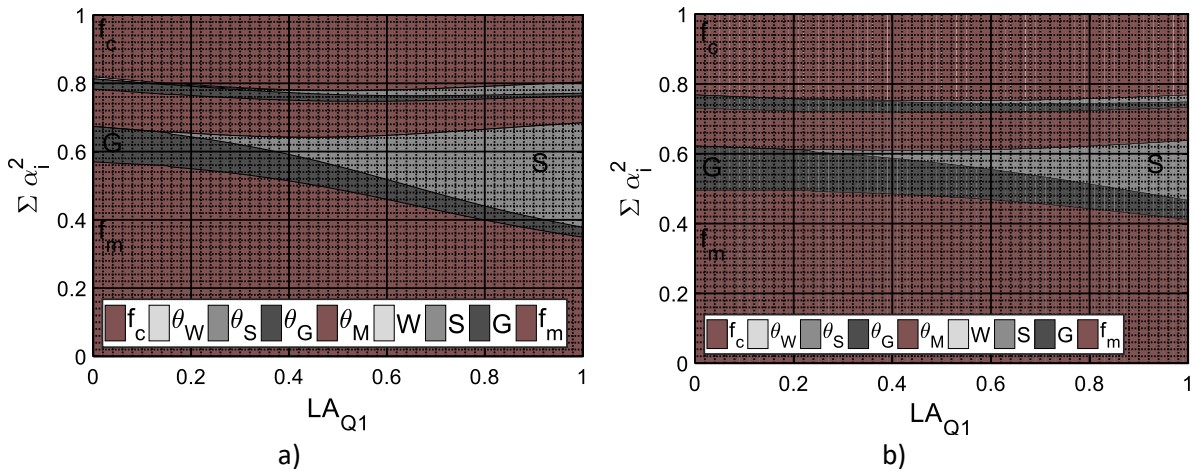


Abb. 10.85: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,4$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

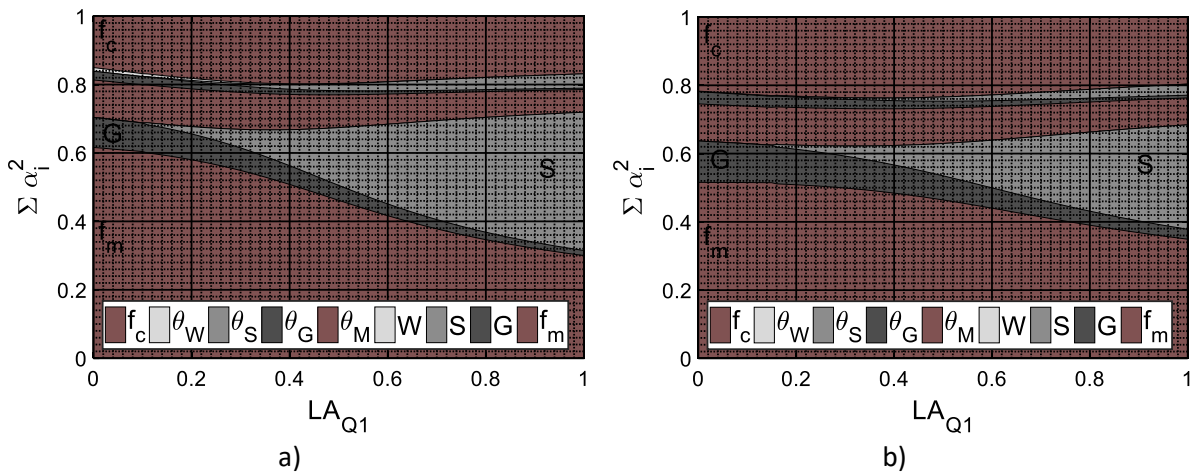


Abb. 10.86: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,5$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

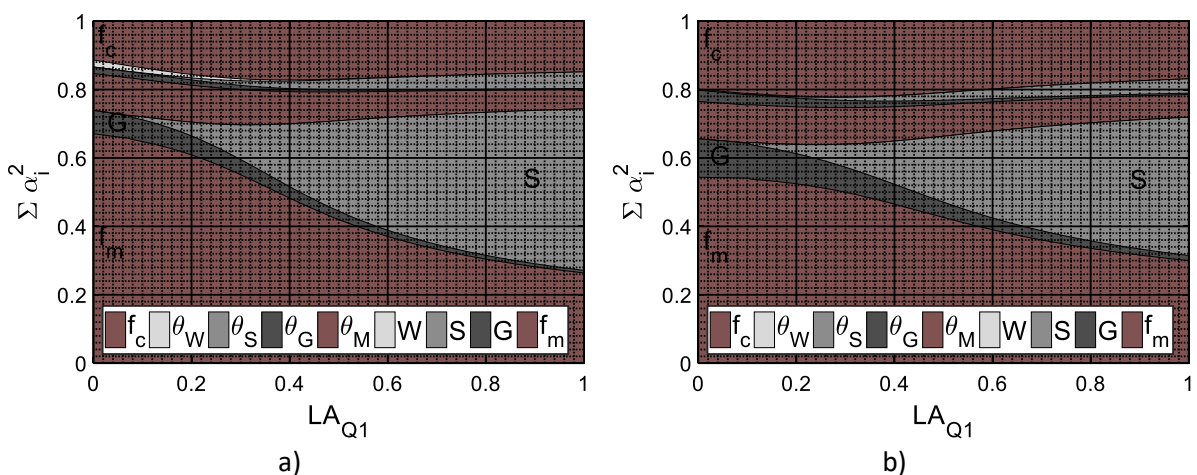


Abb. 10.87: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,6$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

10. Anhang

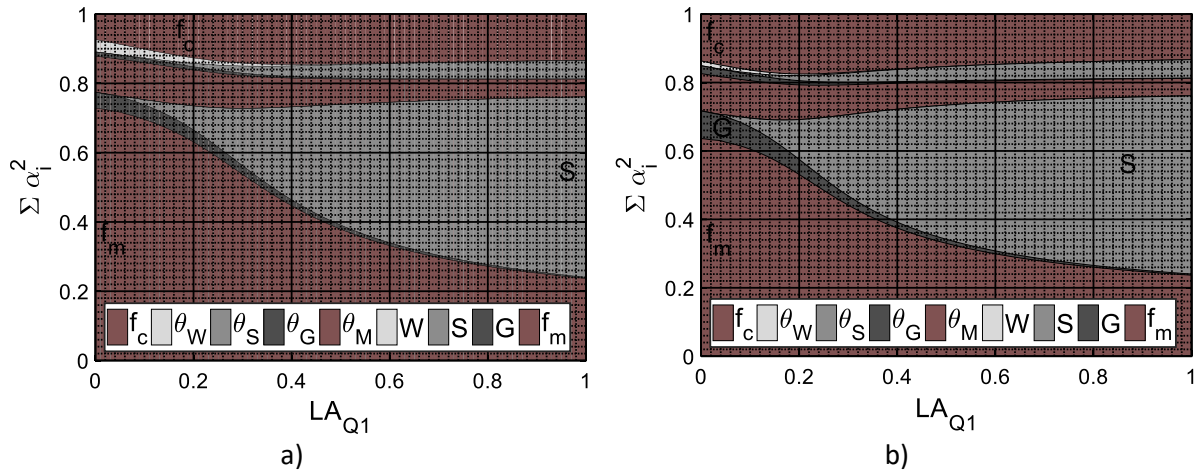


Abb. 10.88: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

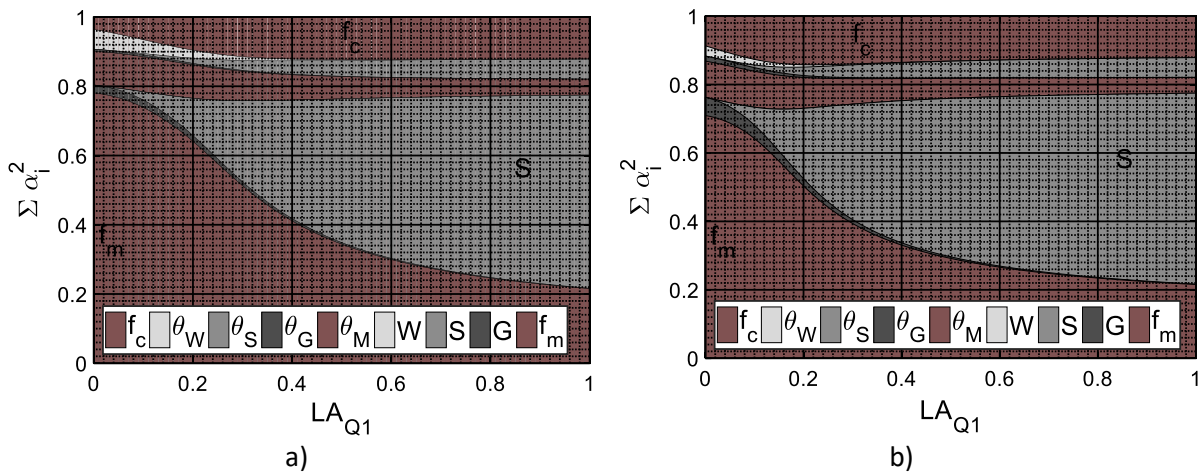


Abb. 10.89: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

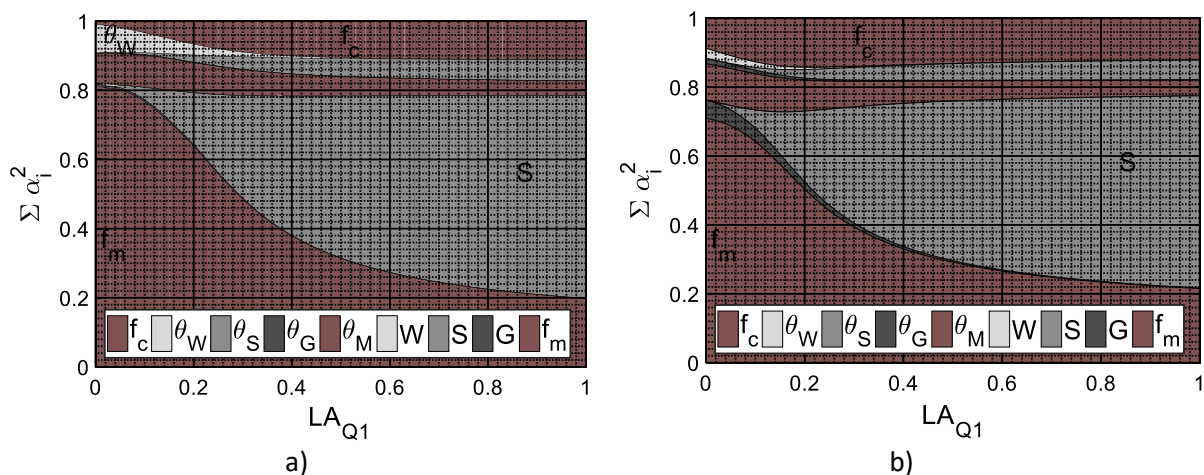


Abb. 10.90: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Schneelast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , a)  $b/h = 1$

### 10.9.6 Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast

#### Einfluss des Querschnittsverhältnisses und der Lastanteile

Verhältnis  $h/b = 2$ , Variationskoeffizient der Nutzlast  $V_N = 0,25$

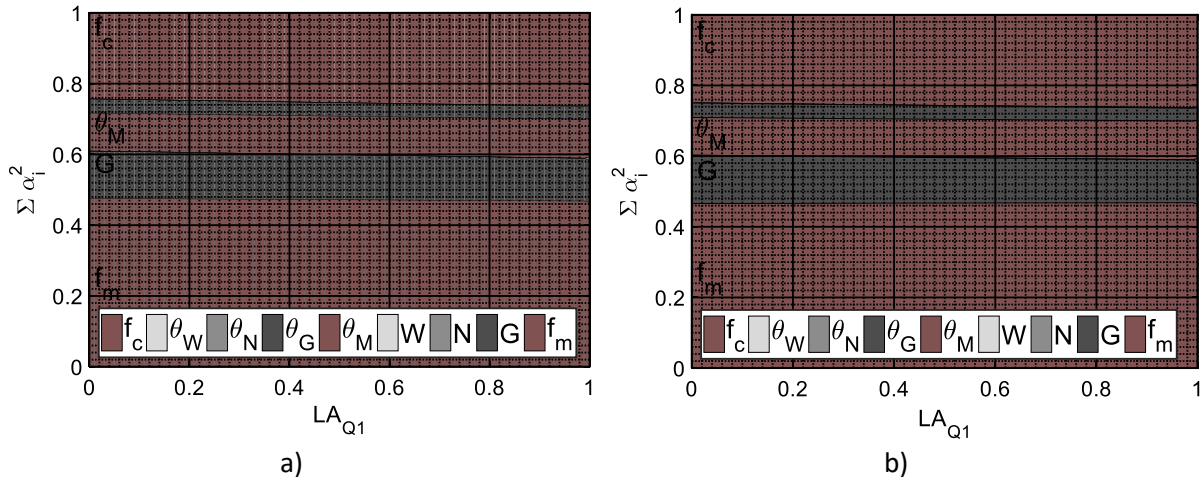


Abb. 10.91: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q = 0,1$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

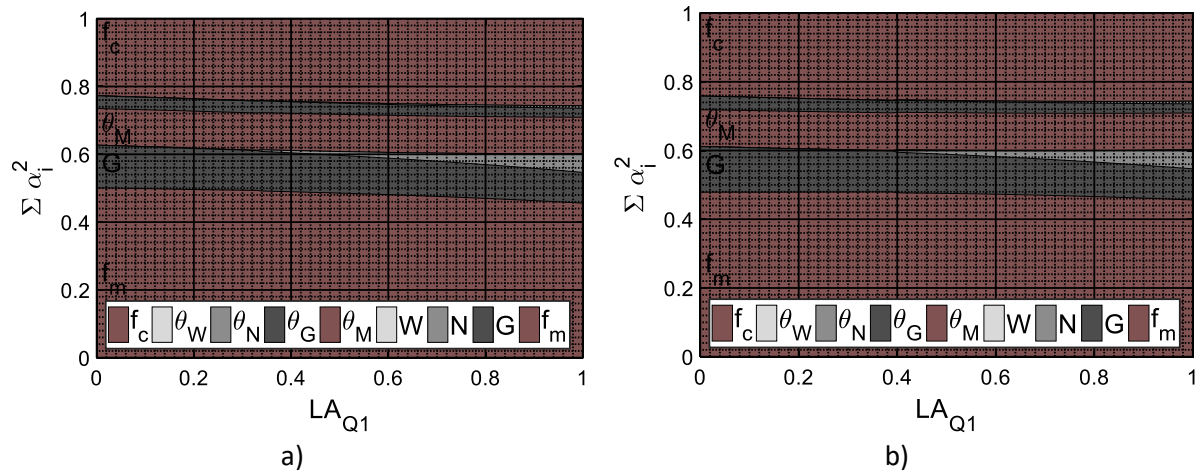


Abb. 10.92: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q = 0,2$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

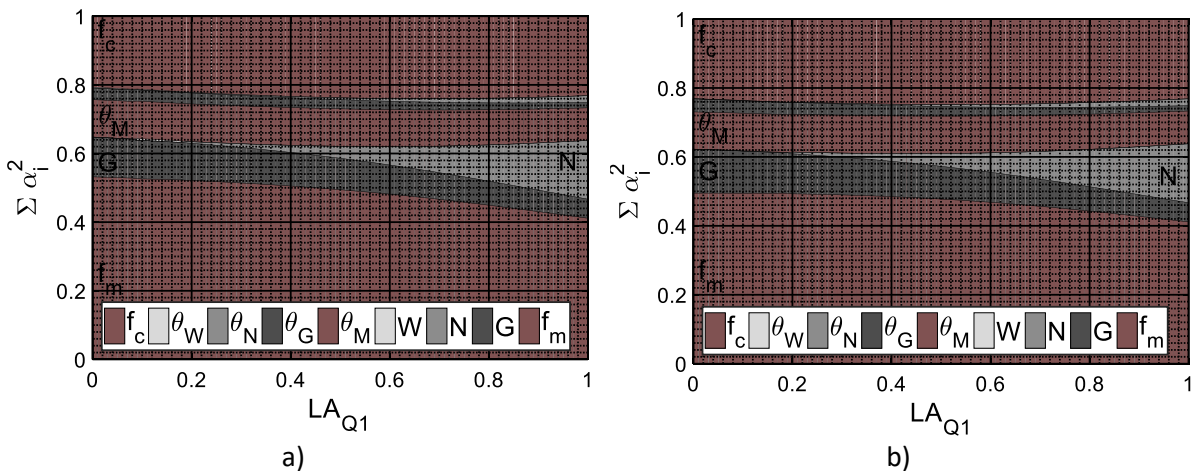


Abb. 10.93: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q = 0,3$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

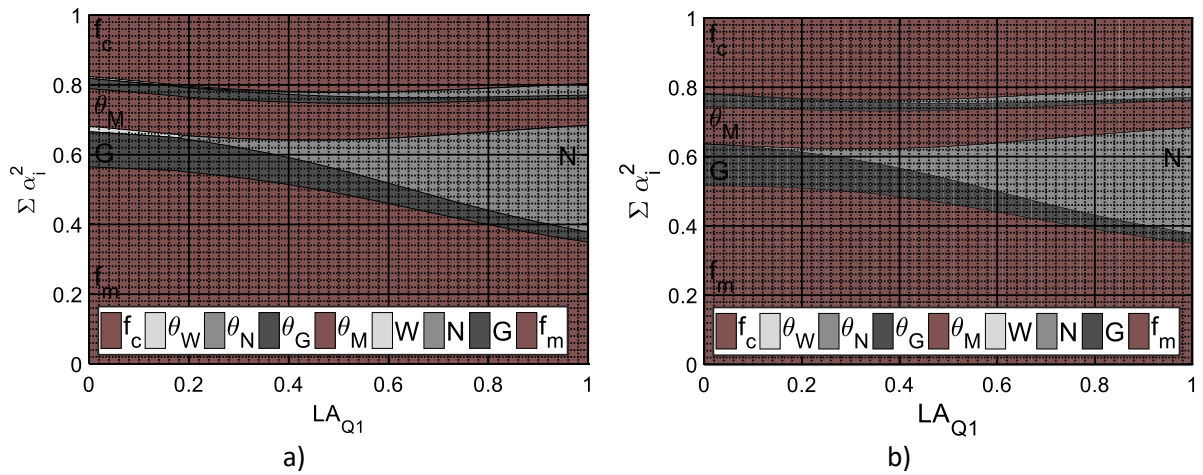


Abb. 10.94: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,4$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

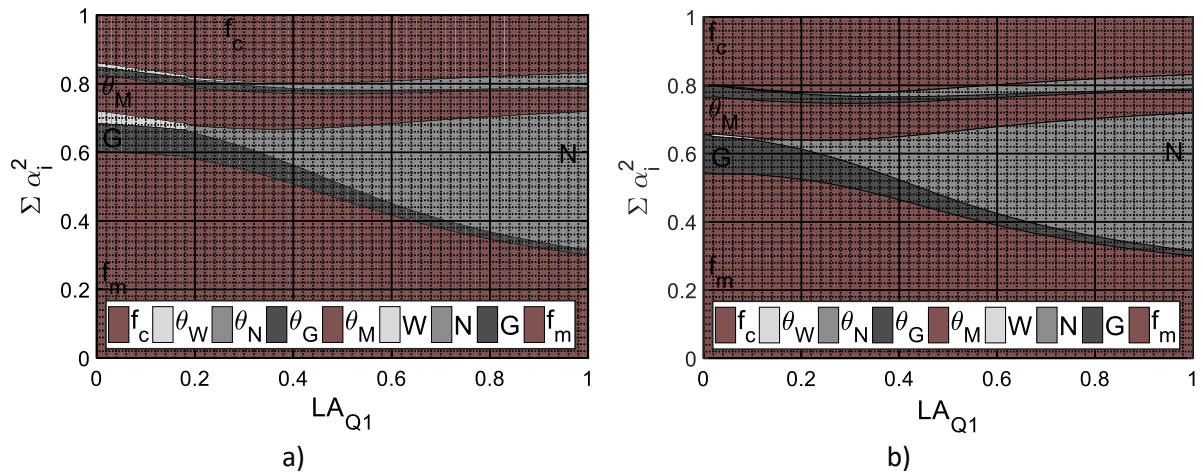


Abb. 10.95: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,5$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

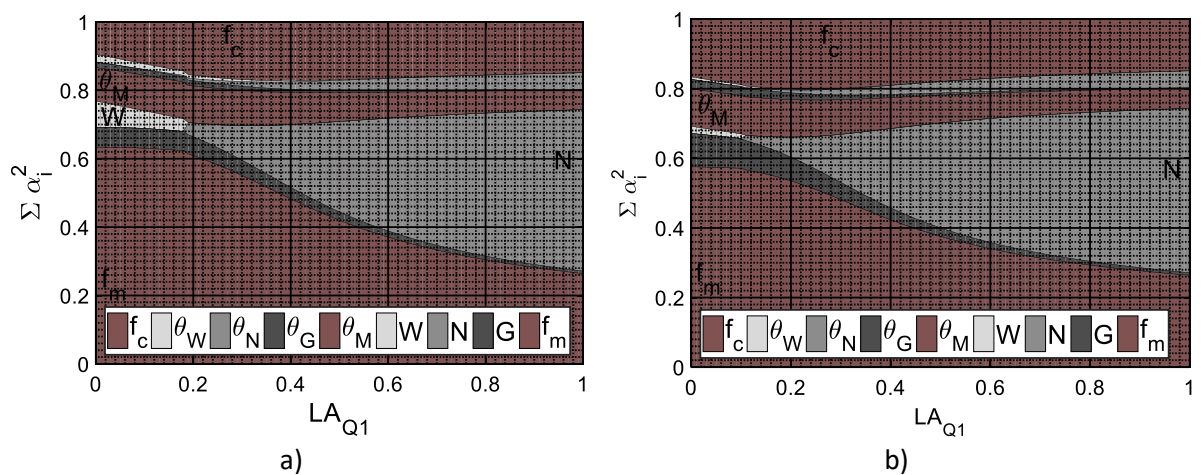


Abb. 10.96: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,6$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

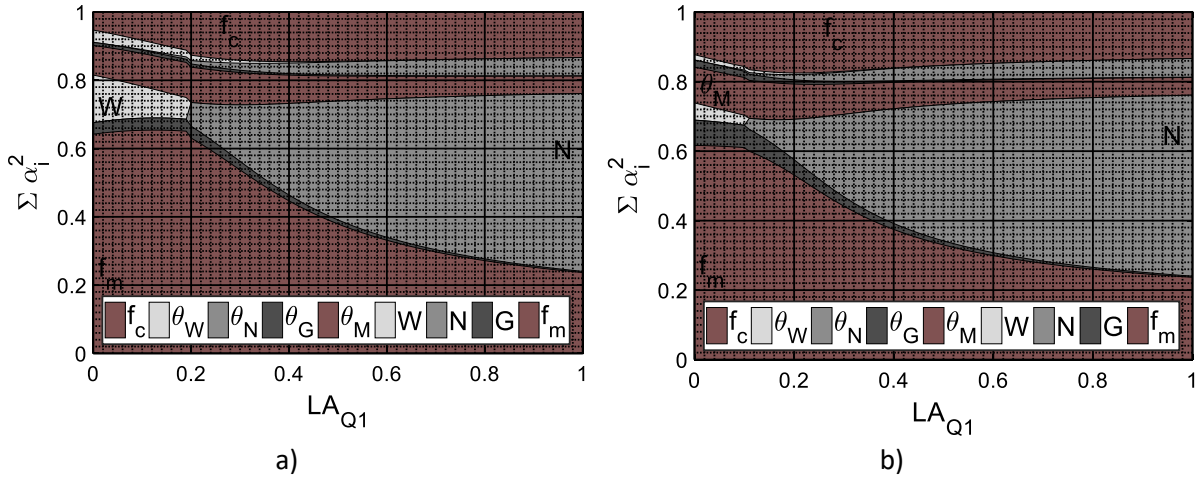


Abb. 10.97: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

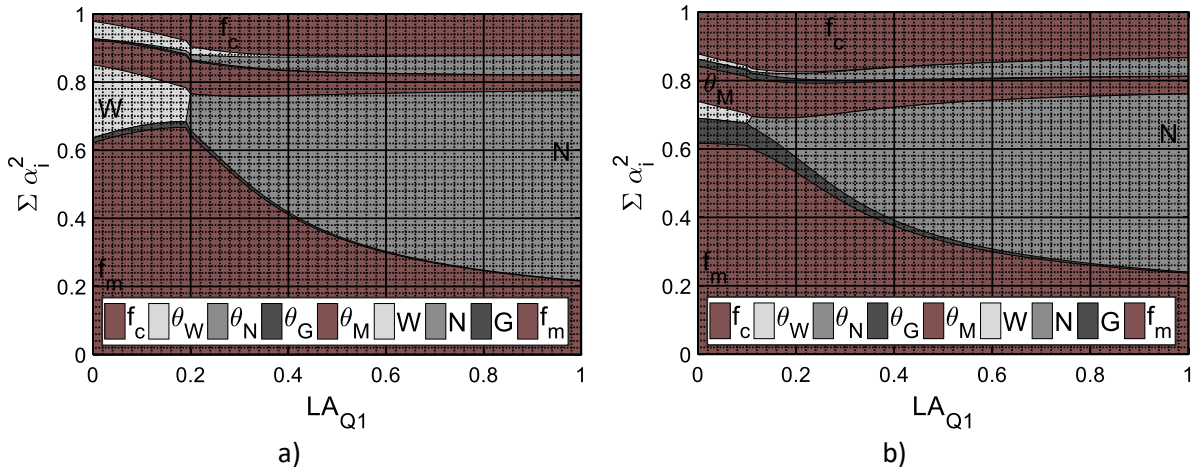


Abb. 10.98: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

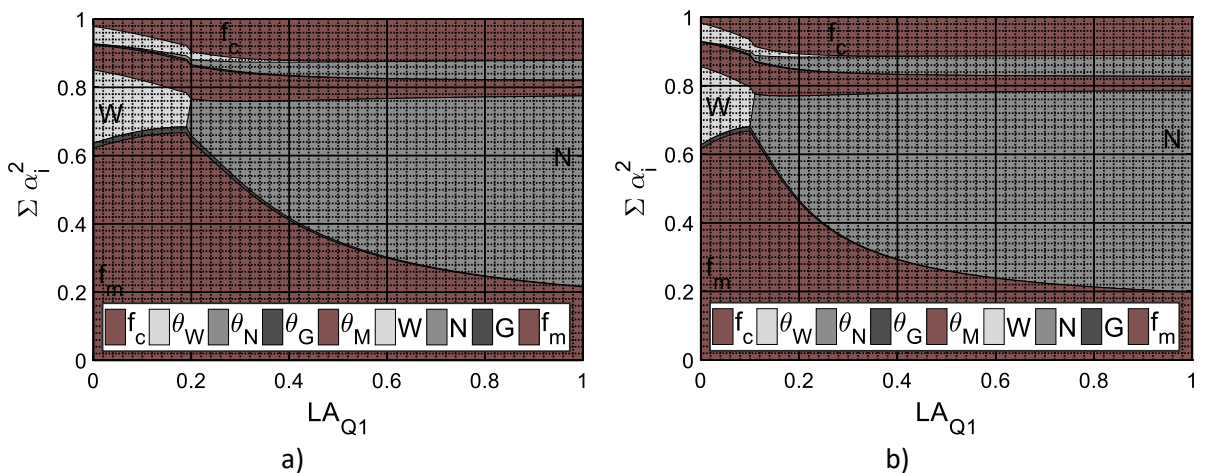


Abb. 10.99: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$



## Einfluss des Querschnittsverhältnisses und der Lastanteile

Variationskoeffizient der Nutzlast  $V_N = 0,40$

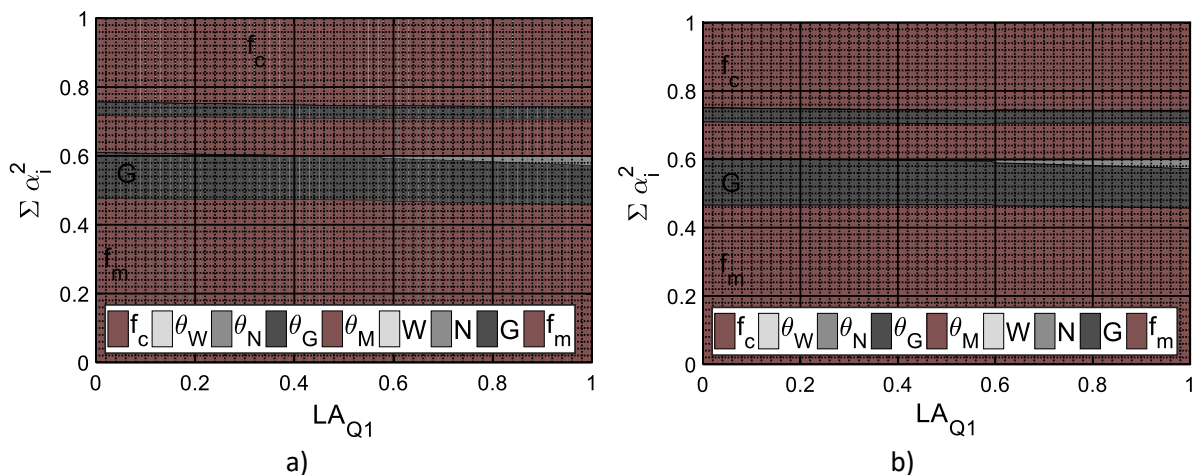


Abb. 10.100: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2, LV_Q = 0,1$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

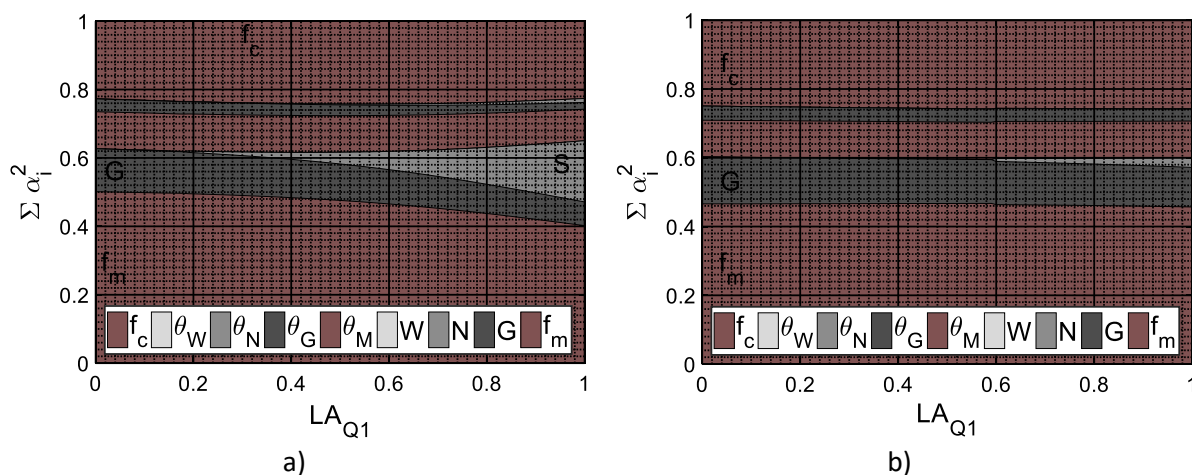


Abb. 10.101: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2, LV_Q = 0,2$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

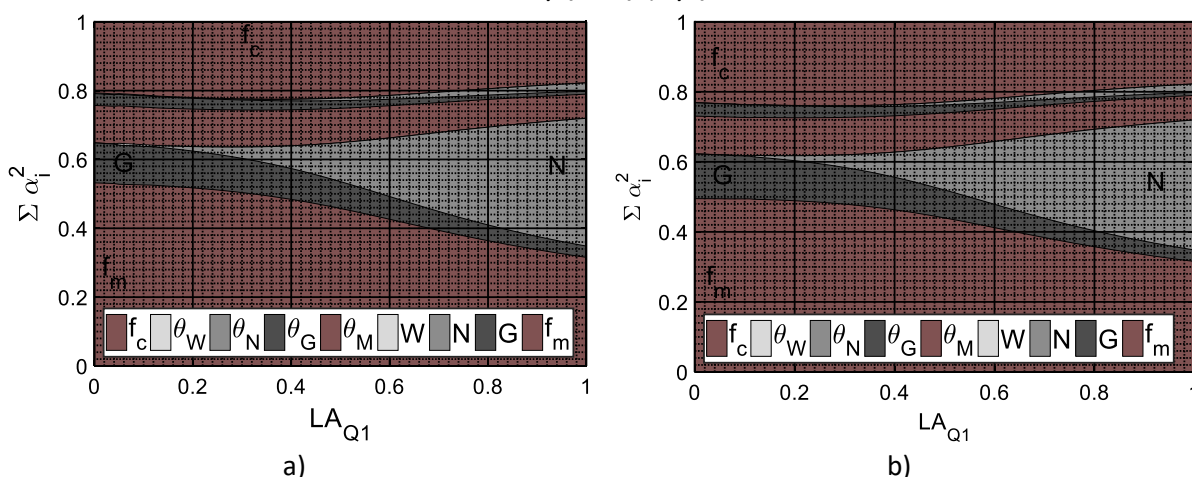


Abb. 10.102: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2, LV_Q = 0,3$ , a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

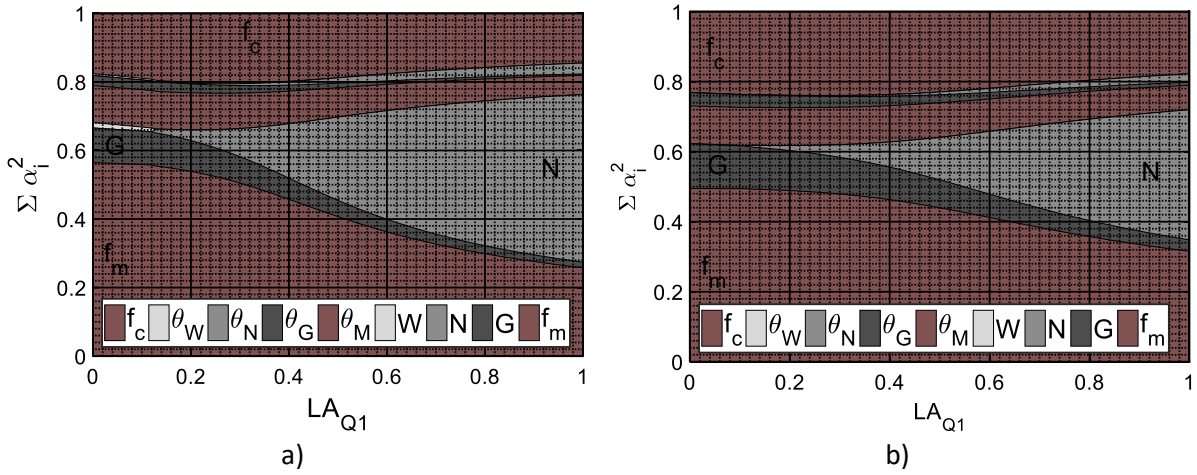


Abb. 10.103: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,4$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

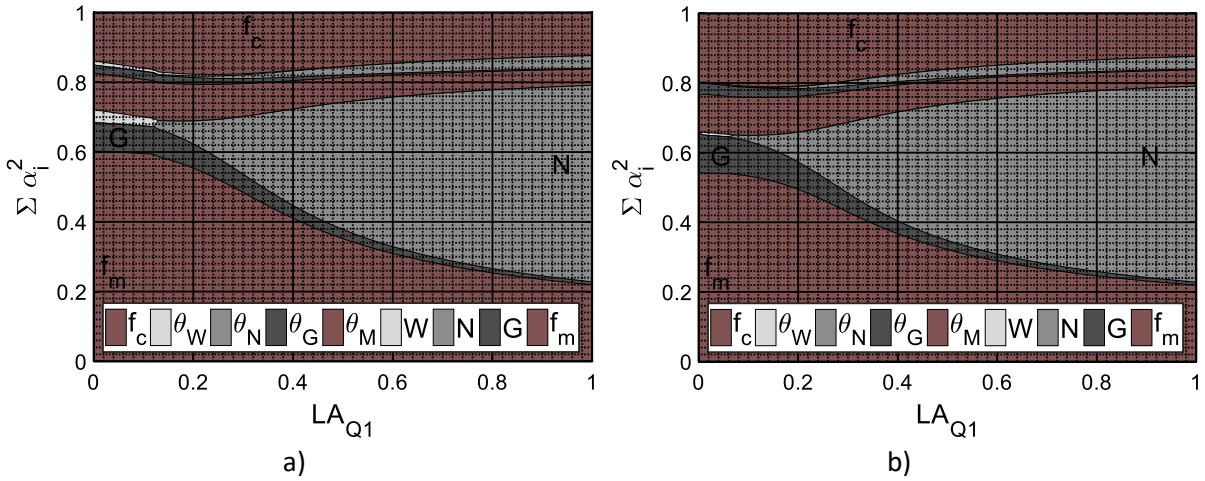


Abb. 10.104: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,5$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

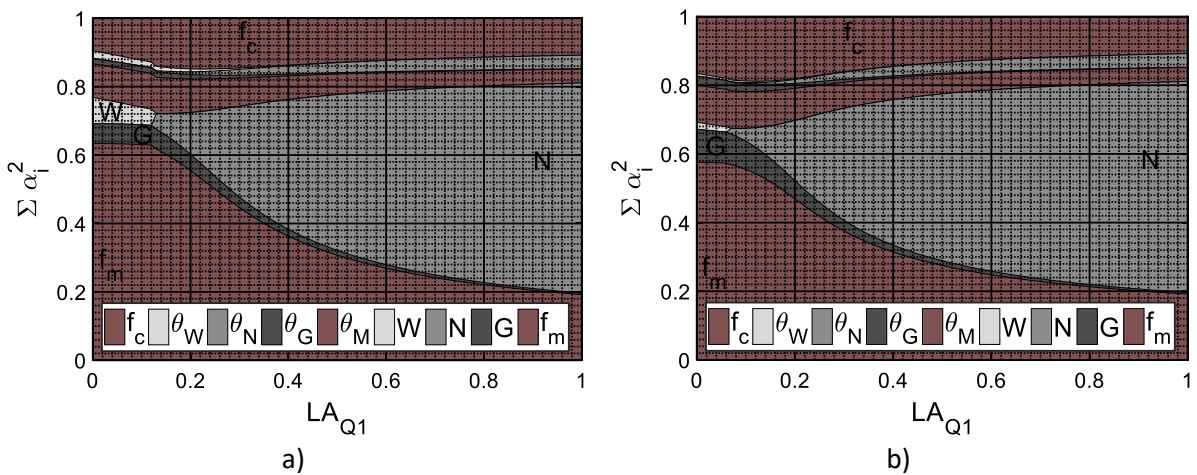


Abb. 10.105: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,6$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

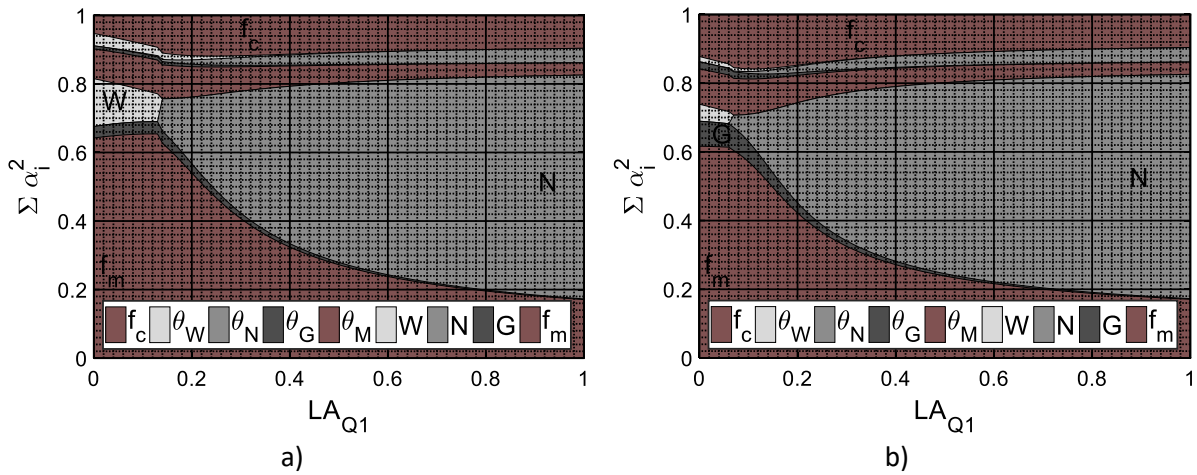


Abb. 10.106: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

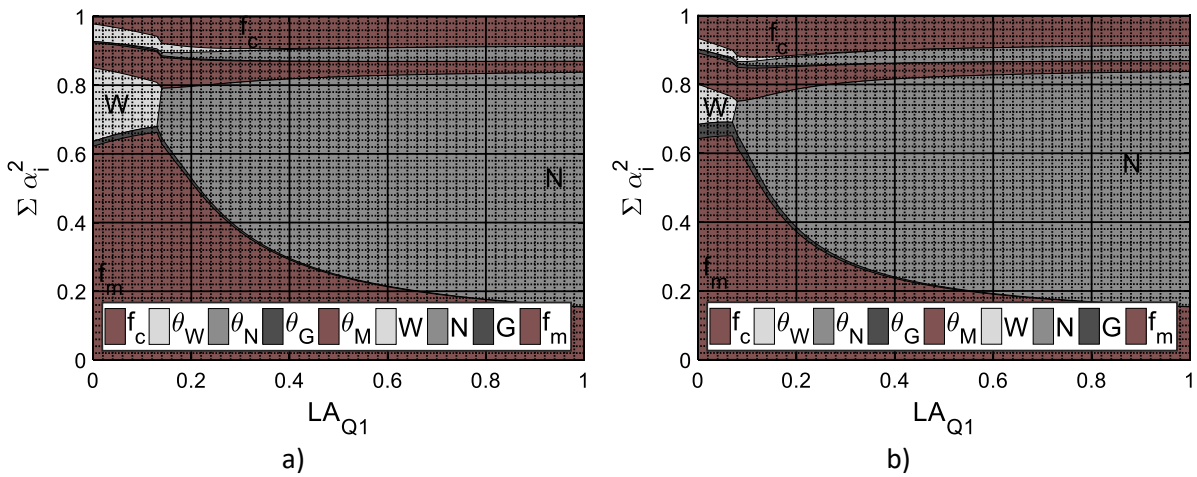


Abb. 10.107: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

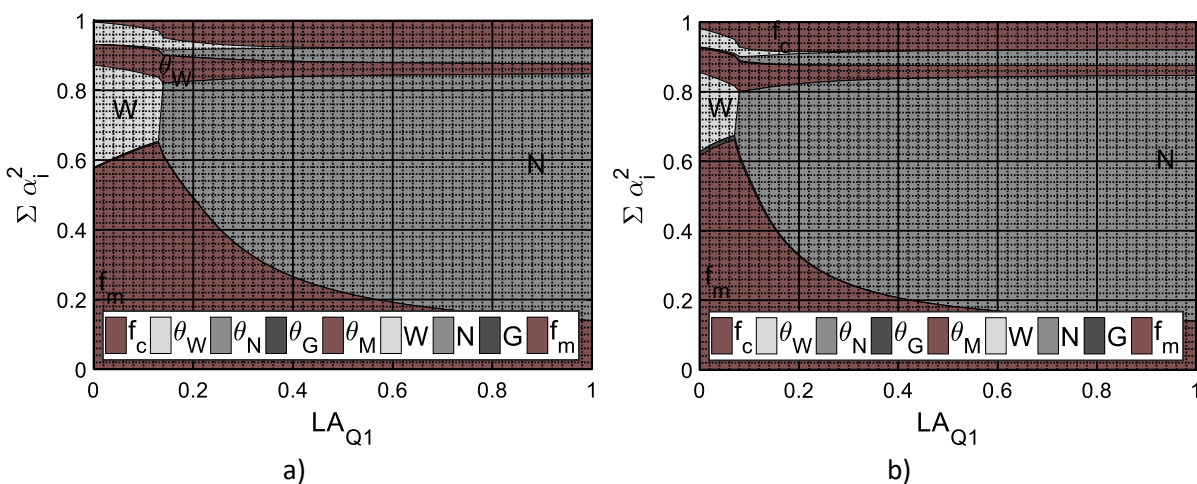


Abb. 10.108: Sensitivitätsfaktoren bei Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Windlast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

### 10.9.7 Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,

#### Einfluss des Querschnittsverhältnisses und der Lastanteile

Variationskoeffizient der Nutzlast  $V_N = 0,25$

Variationskoeffizient der Biegefestigkeit  $V_{R,m} = 0,25$ , Variationskoeffizient der Zugfestigkeit  $V_{R,t} = 0,30$

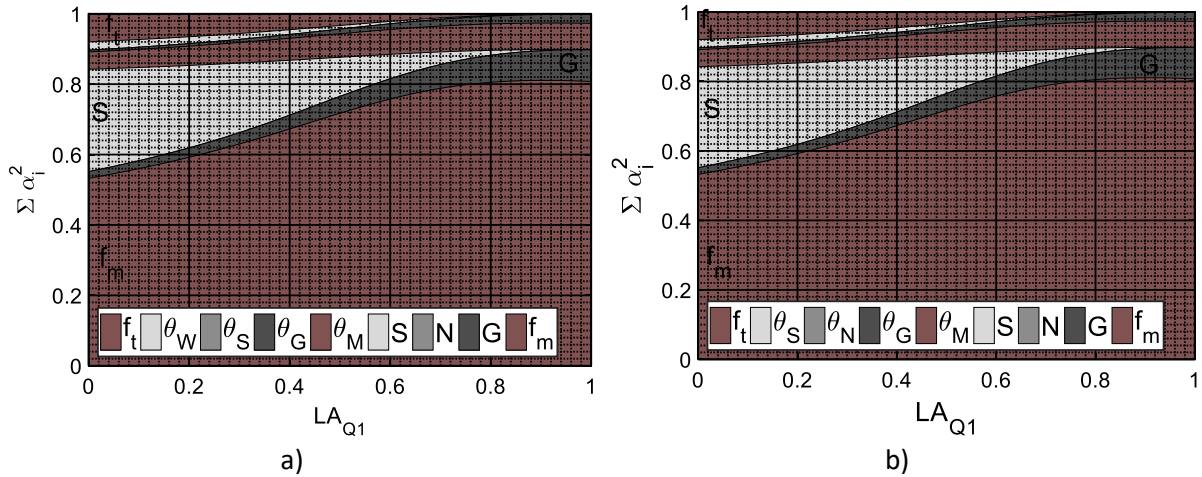


Abb. 10.109: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

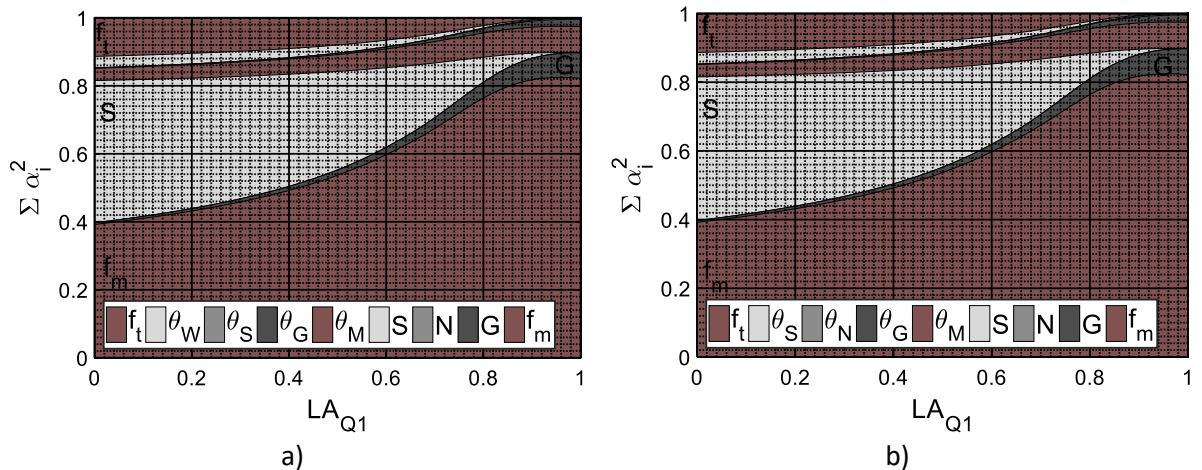


Abb. 10.110: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

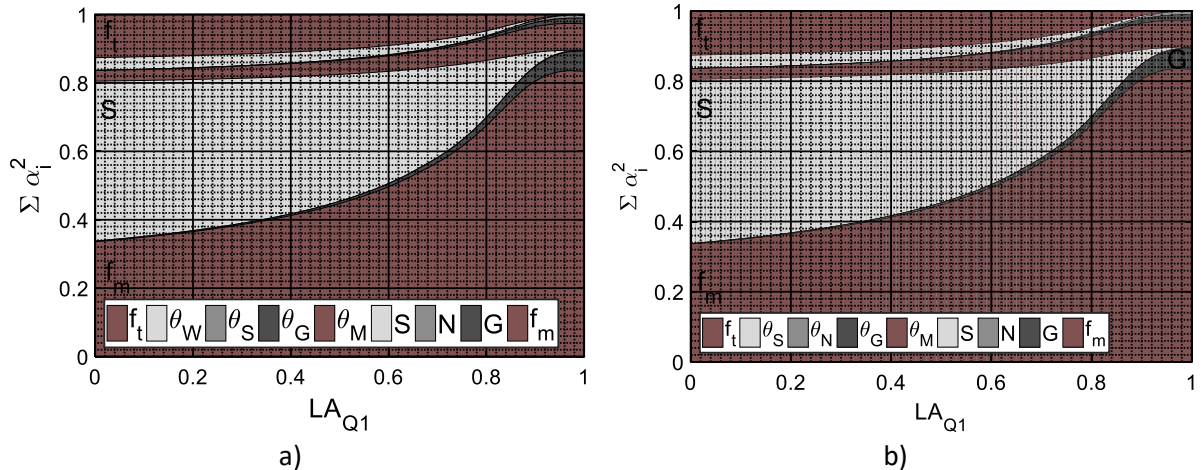


Abb. 10.111: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

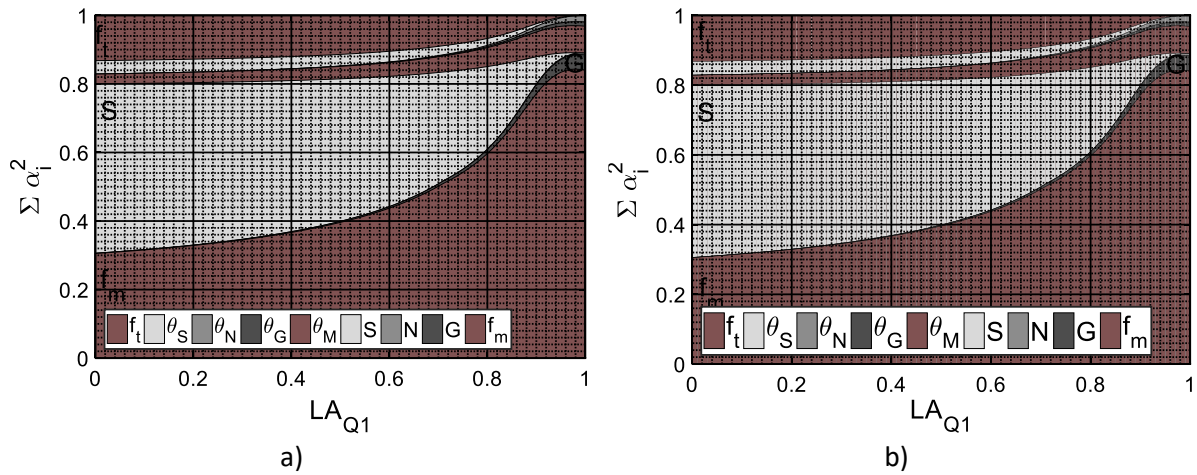


Abb. 10.112: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,4$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

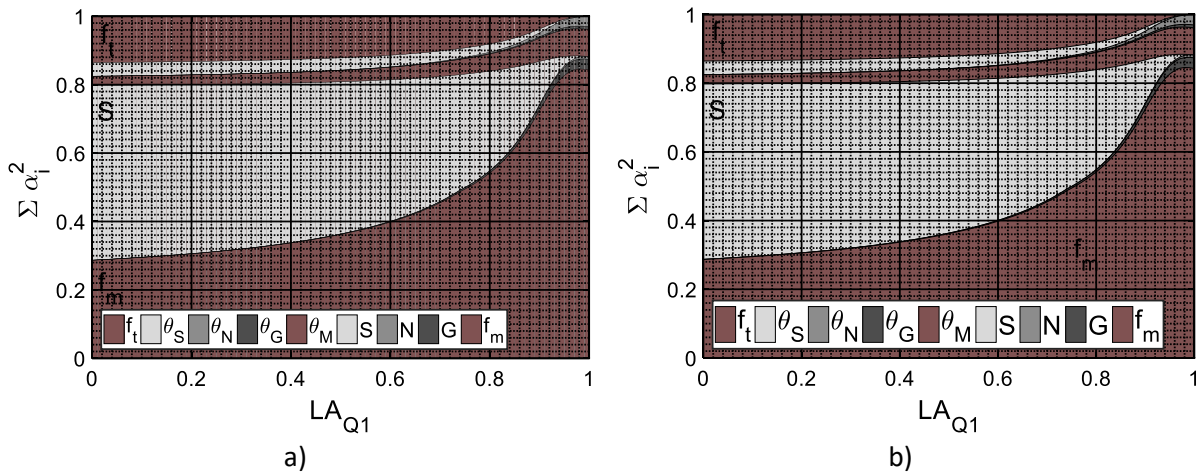


Abb. 10.113: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,5$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

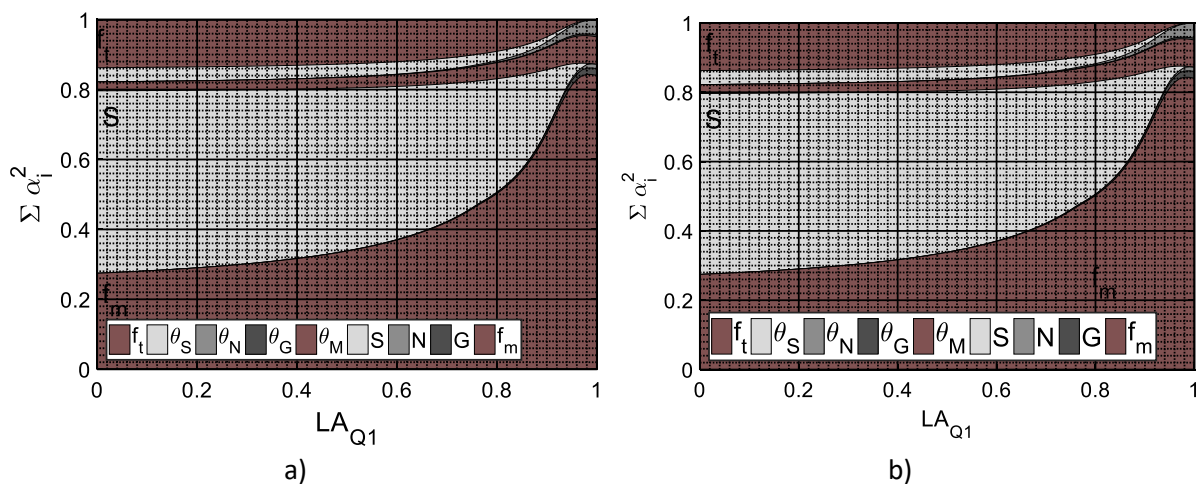


Abb. 10.114: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,6$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

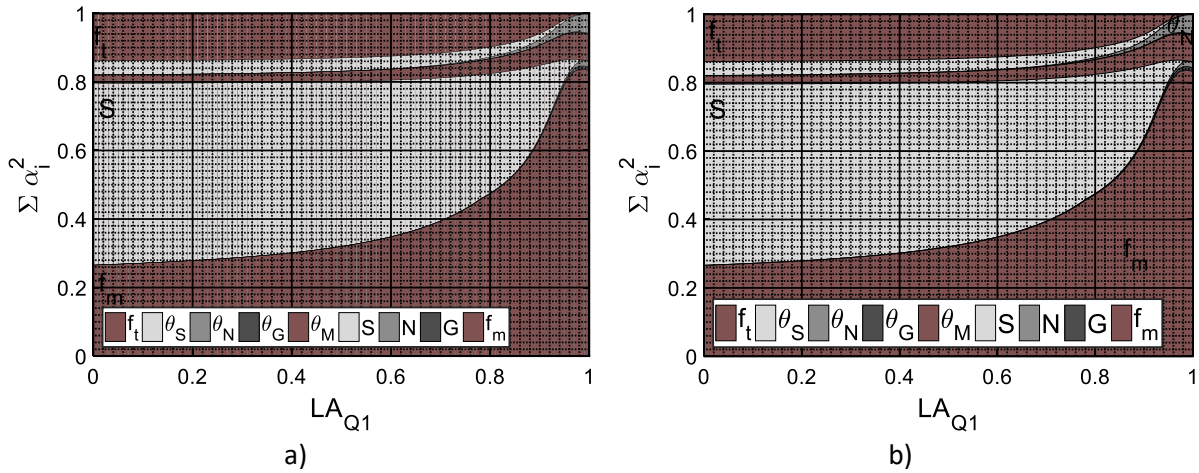


Abb. 10.115: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

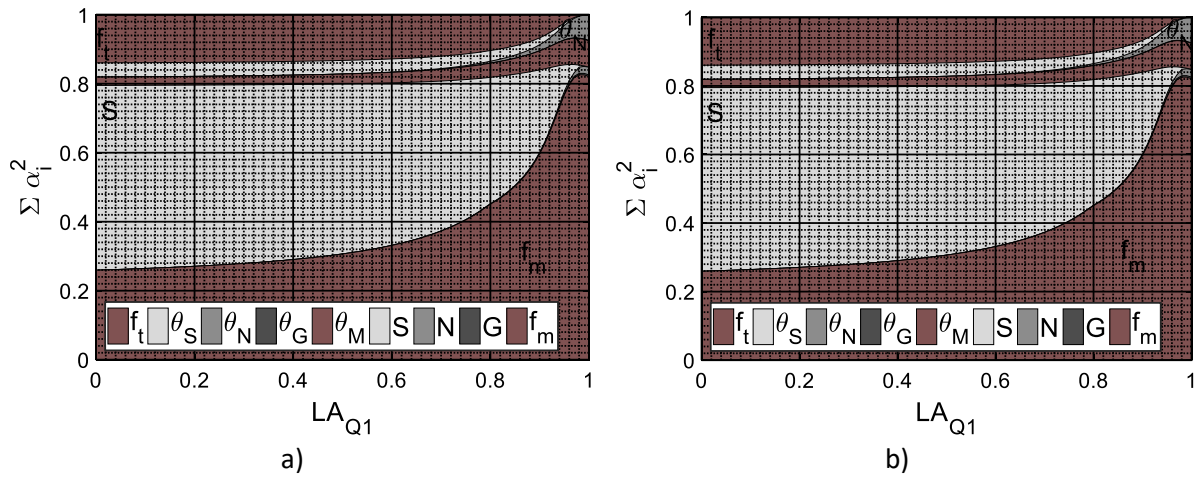


Abb. 10.116: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

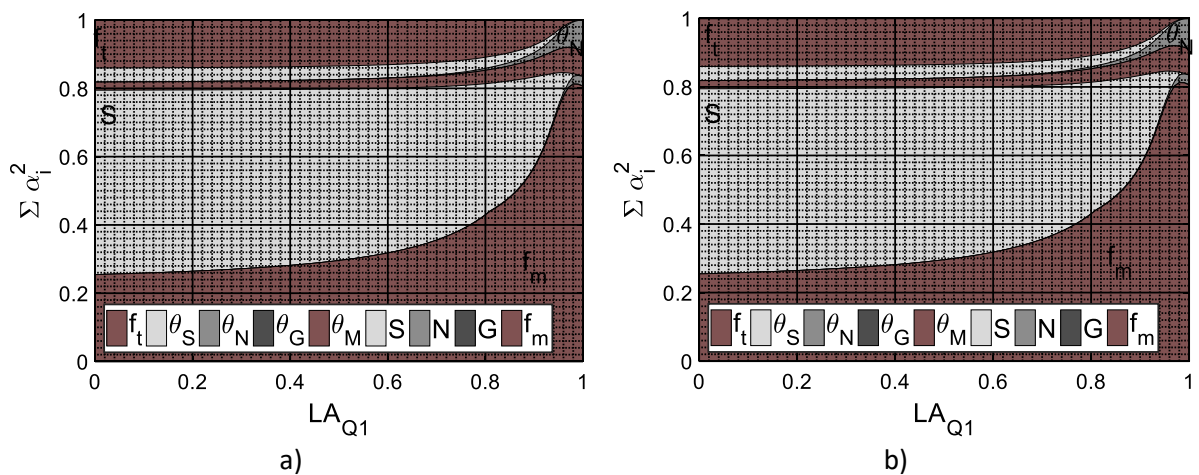


Abb. 10.117: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

10. Anhang

Variationskoeffizient der Nutzlast  $V_N = 0,25$

Variationskoeffizient der Biegefestigkeit  $V_{R,m} = 0,22$ , Variationskoeffizient der Zugfestigkeit  $V_{R,t} = 0,26$

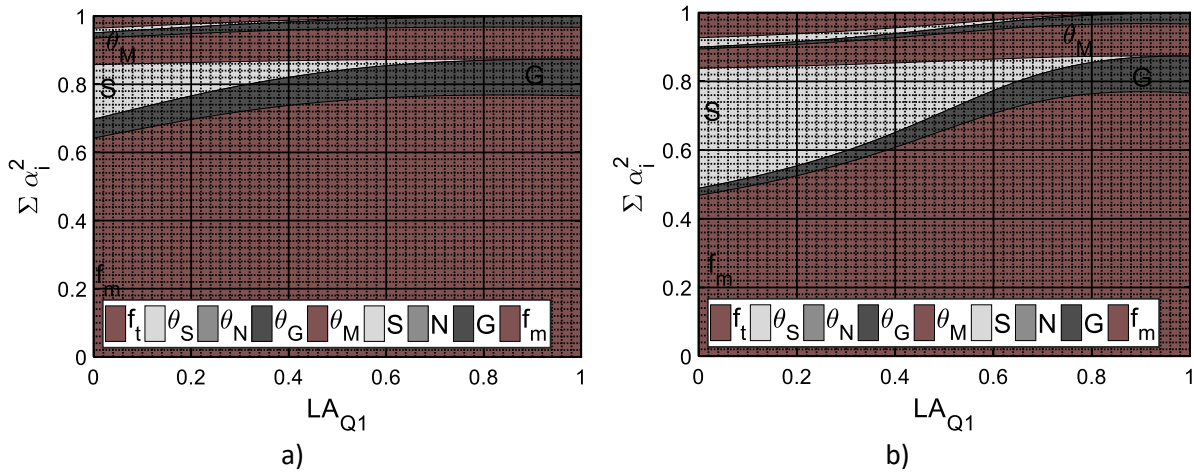


Abb. 10.118: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,1$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

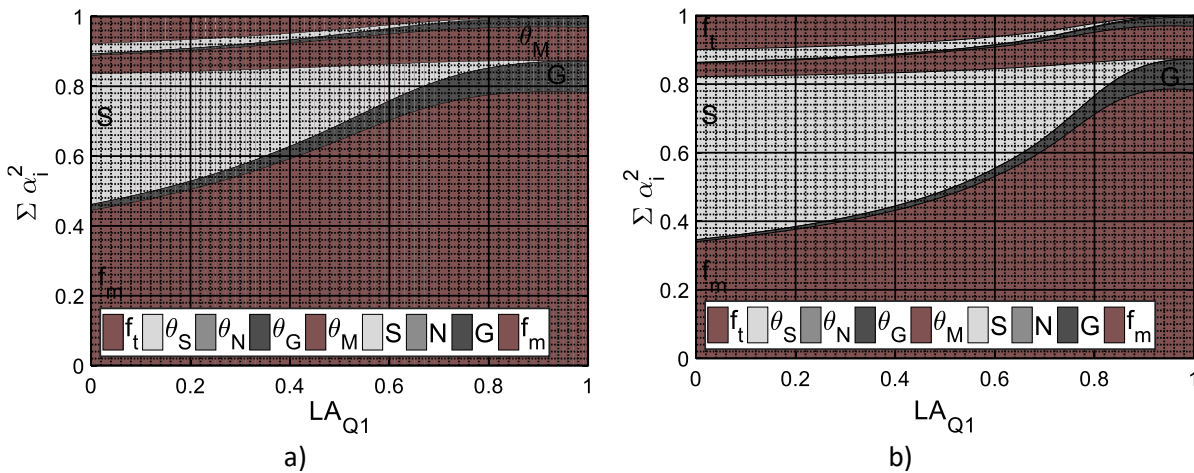


Abb. 10.119: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,2$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

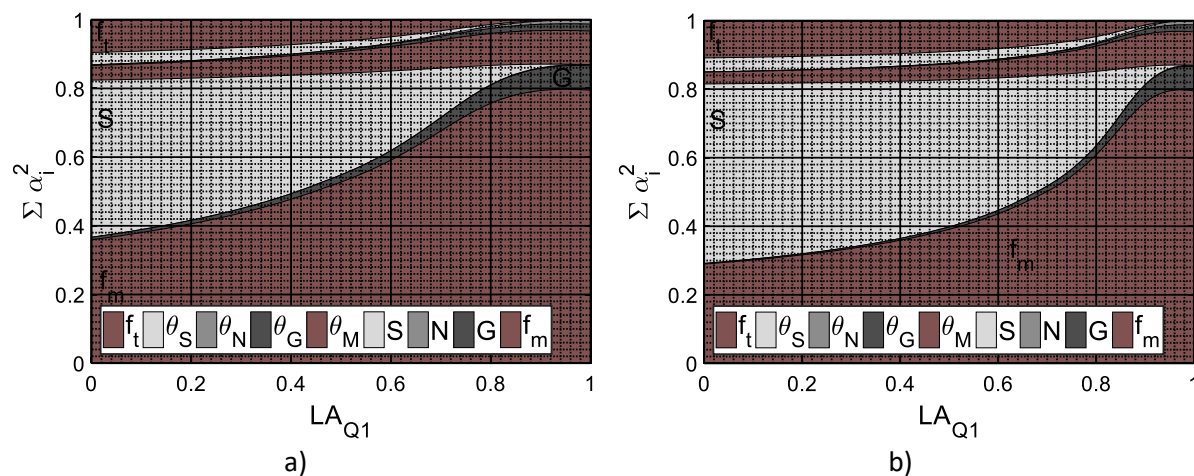


Abb. 10.120: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,3$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

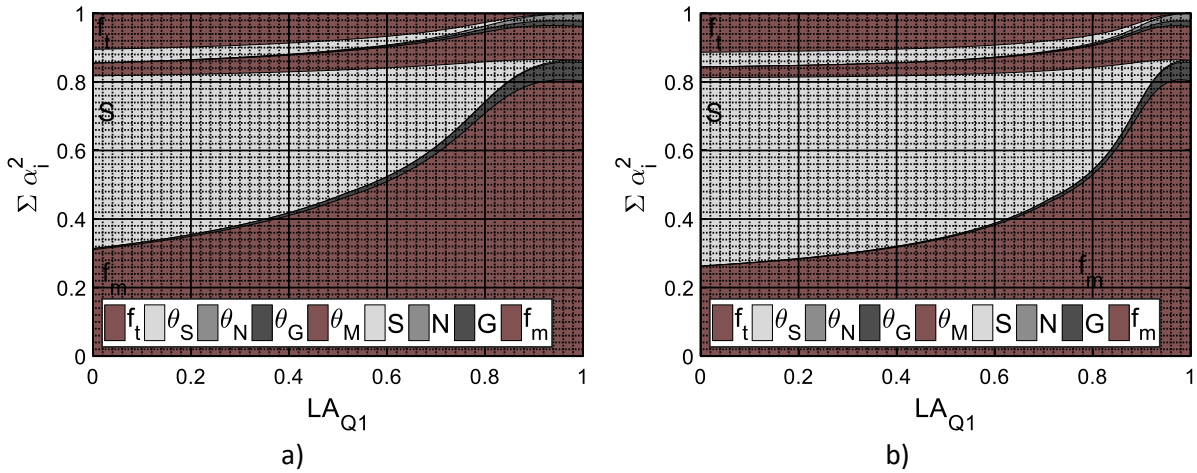


Abb. 10.121: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,4$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

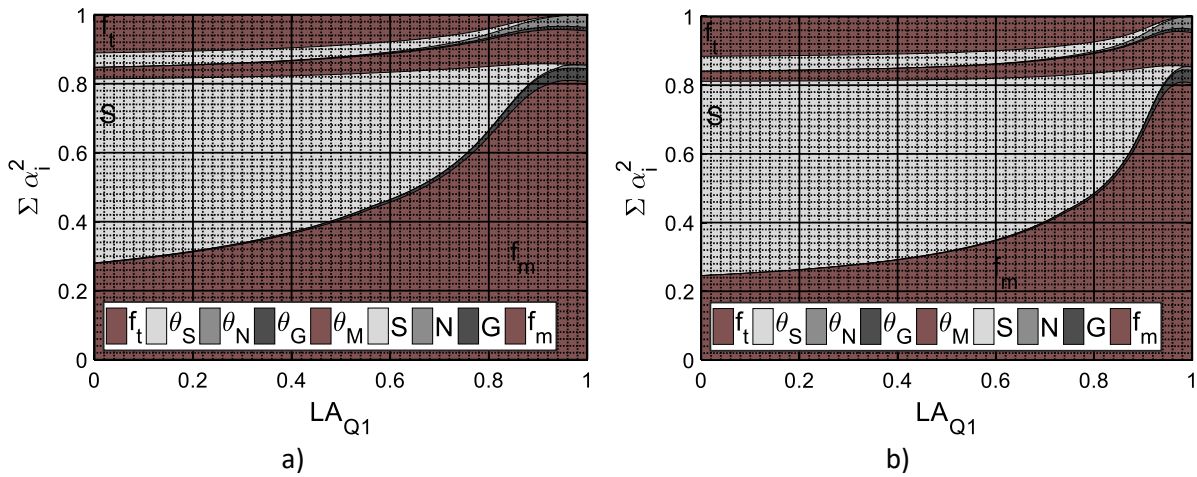


Abb. 10.122: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,5$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$

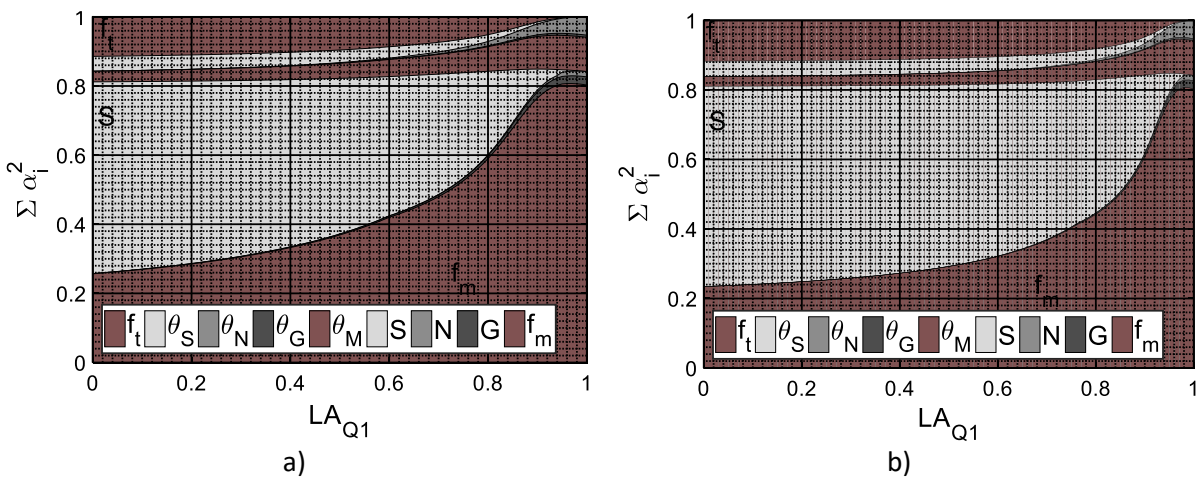


Abb. 10.123: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b=2$ ,  $LV_Q=0,6$ ,  
a)  $b/h=1/2$ , b)  $b/h=1$



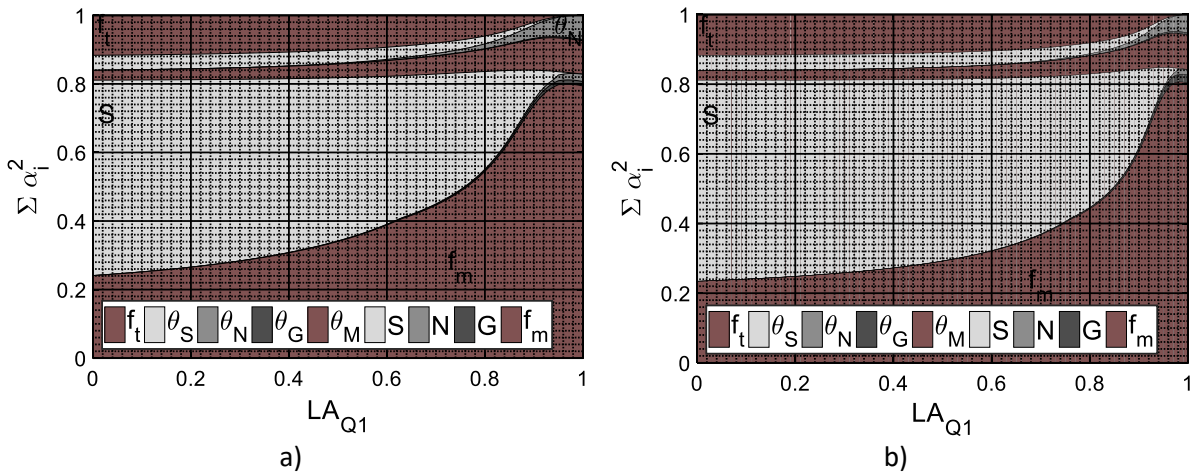


Abb. 10.124: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,7$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

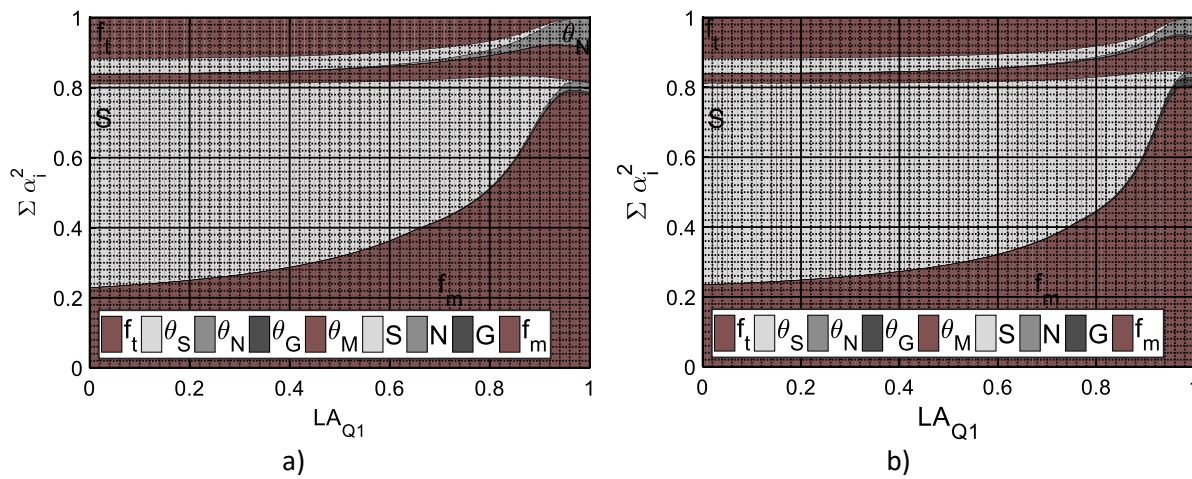


Abb. 10.125: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,8$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

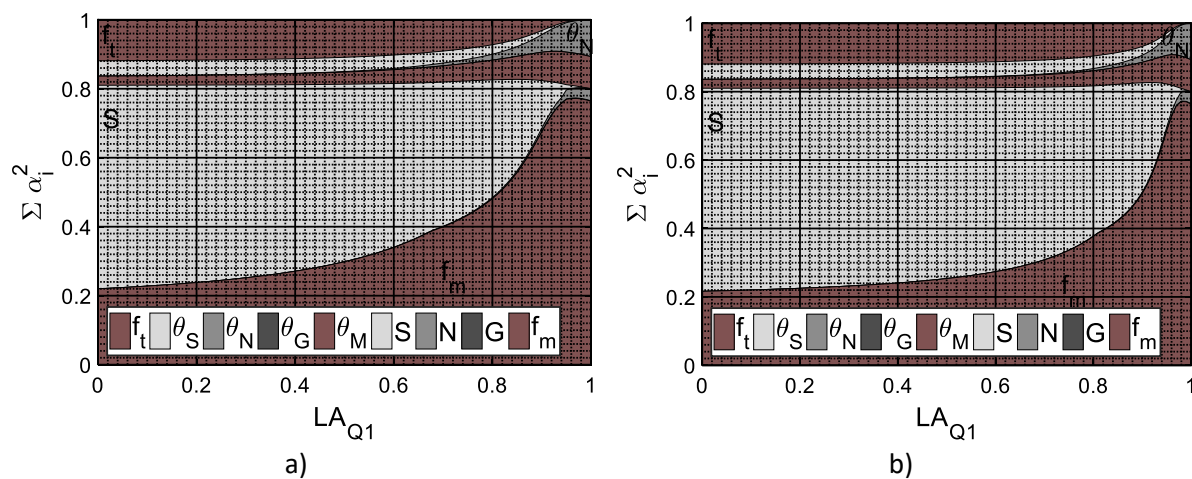


Abb. 10.126: Sensitivitätsfaktoren bei Zug & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast & Schneelast,  $h/b = 2$ ,  $LV_Q = 0,9$ ,  
a)  $b/h = 1/2$ , b)  $b/h = 1$

## 10.10 Herleitung von Lastverhältnissen und Wichtungsfaktoren für Belastung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast für tragende Dachbauteile

### 10.10.1 Lastverhältnisse

Auf Basis der Herleitung in Kap. 4.2 wird eine Dacheigenlast von  $1 \text{ kN/m}^2$  angenommen. Dies liegt aufgrund der statistisch größeren Unsicherheit der veränderlichen Einwirkungen auf der sicheren Seite. Damit können zur Bildung der Lastverhältnisse die Werte nach Tab. 10.37 angenommen werden.

Tab. 10.37: Last aus ständiger Last bei  $1 \text{ kN/m}^2$  für verschiedene Dachneigungswinkel

Dachneigungswinkel				
$\leq 30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
0,87	0,77	0,64	0,50	0,26

Für die Herleitung relevanter Lastverhältnisse wurden die Schneelastwerte der folgenden deutschen Großstädte zugrunde gelegt (Tab. 10.38).

Tab. 10.38: Last aus Schnee anhand der Lage deutscher Großstädte für verschiedene Dachneigungswinkel

Zone	Städte*	Dachneigungswinkel				
		$\leq 30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$\geq 60^\circ$	
<b>1</b>	Dortmund	0,24	0,08	0,03	0,00	
	Düsseldorf	0,21	0,07	0,03	0,00	
	Köln	0,22	0,08	0,03	0,00	
	Mainz	0,24	0,08	0,03	0,00	
	Karlsruhe	0,26	0,09	0,04	0,00	
	Nürnberg	0,45	0,16	0,06	0,00	
	Ulm	0,71	0,25	0,10	0,00	
	<b>Grenzwert</b>		0,58	0,20	0,08	0,00
<b>1a</b>	Regensburg	0,61	0,21	0,09	0,00	
	Augsburg	0,92	0,32	0,13	0,00	
	München	0,98	0,34	0,14	0,00	
	<b>Grenzwert</b>		0,73	0,25	0,10	0,00
<b>2</b>	Hamburg	0,29	0,10	0,04	0,00	
	Magdeburg	0,34	0,12	0,05	0,00	
	Berlin	0,36	0,13	0,05	0,00	
	Hannover	0,34	0,12	0,05	0,00	
	Leipzig	0,41	0,14	0,06	0,00	
	Kassel	0,50	0,17	0,07	0,00	
	Saarbrücken	0,63	0,22	0,09	0,00	
	Stuttgart	0,67	0,23	0,09	0,00	
	Freiburg	0,74	0,26	0,10	0,00	
	<b>Grenzwert</b>		0,76	0,26	0,11	0,00
	<b>2a</b>	Siegen	0,89	0,31	0,12	0,00
		<b>Grenzwert</b>		0,95	0,33	0,13
	<b>3</b>	Garmisch-Patenkirchen	3,52	1,22	0,49	0,00
Lindau		1,60	0,56	0,22	0,00	
<b>Grenzwert</b>			0,99	0,34	0,14	0,00

\*in der Bemessung ist die Zuordnung zur Norddeutschen Tiefebene gesondert zu prüfen

10. Anhang

Damit ergibt sich für die Windlast in Deutschland relevanten Windlastzonen die Werte nach Tab. 10.39.

Tab. 10.39: Last aus Wind für verschiedene Dachneigungswinkel

Zone	Beschreibung	Dachneigungswinkel				
		$\leq 30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
1	Binnenland	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
2	Binnenland	0,65	0,65	0,65	0,65	0,52
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	0,85	0,85	0,85	0,68
3	Binnenland	0,8	0,8	0,8	0,8	0,64
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,05	1,05	1,05	0,84
4	Binnenland	0,95	0,95	0,95	0,95	0,76
	Küste der Nord- und Ostsee, Inseln der Ostsee	1,25	1,25	1,25	1,25	1,00
	Inseln der Nordsee	1,4	1,4	1,4	1,4	1,12

Unter den vorangestellten Annahmen ergeben sich die folgenden Verhältnisse aus Schneelast, Windlast und Eigenlast (Tab. 10.40).

Tab. 10.40: Lastverhältnisse Schneelast/ Windlast/ Ständige Last für verschiedene Dachneigungswinkel

Schneelastzone SLZ	Dachneigungswinkel					
	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	
SLZ 1	0,34/0,24/0,42	0,16/0,33/0,51	0,08/0,40/0,52	0/0,50/0,50	0/0,61/0,39	Binnenland
	0,24/0,47/0,29	0,10/0,58/0,32	0,05/0,65/0,30	0/0,74/0,26	0/0,81/0,19	Küste
SLZ 1a	0,42/0,21/0,37	0,21/0,31/0,48	0,11/0,39/0,50	0/0,50/0,50	0/0,61/0,39	Binnenland
	0,30/0,42/0,27	0,14/0,56/0,30	0,06/0,64/0,30	0/0,74/0,26	0/0,81/0,19	Küste
SLZ 2	0,36/0,24/0,40	0,17/0,33/0,50	0,09/0,40/0,51	0/0,50/0,50	0/0,61/0,39	Binnenland
	0,25/0,46/0,29	0,11/0,58/0,31	0,05/0,65/0,30	0/0,74/0,26	0/0,81/0,19	Küste
SLZ 3	0,72/0,10/0,18	0,49/0,20/0,21	0,30/0,31/0,39	0/0,50/0,50	0/0,61/0,39	Binnenland
	0,61/0,24/0,15	0,36/0,41/0,33	0,19/0,55/0,26	0/0,74/0,26	0/0,81/0,19	Küste

### 10.10.2 Wichtungsfaktoren

Den Schneelastzonen wird anhand graphischer Abschätzung der geltenden Schneelastzonen in Deutschland die prozentuale Verteilung nach Tab. 10.41 unterstellt. Diese ergibt sich aus einer Auswertung des Kartenmaterials in [267] mit einem Geoinformationssystem (GIS).

Tab. 10.41: Angenommene prozentuale Verteilung der Schneelastzonen in Deutschland

Schneelastzone	Überschläglicher Anteil in Gesamtdeutschland
SLZ 1	16,2 %
SLZ 1a	5,2 %
SLZ 2	66,6 %
SLZ 3	9,1 %

Es werden Dachneigungswinkel mit folgender prozentualer Verteilung nach Tab. 10.42 angenommen. Diese Annahmen sind etwas ungünstig im Hinblick auf einen verhältnismäßig großen Anteil flacher Dächer gewählt, da sich dies ungünstig auf die Zuverlässigkeit auswirkt.

Tab. 10.42: Angenommene prozentuale Verteilung der Dachneigungswinkel in Deutschland

Dachneigungswinkel	Annahme
$\alpha \leq 30^\circ$	40%
$\alpha = 40^\circ$	20%
$\alpha = 50^\circ$	20%
$\alpha = 60^\circ$	10%
$\alpha = 75^\circ$	10%

## 10.11 Umfangreiche Kalibrierungsergebnisse

### 10.11.1 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.43: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13
	2,6	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16
	2,7	1,10	1,10	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20
	2,8	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23	1,24
	2,9	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,28
	3,0	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,32
	3,1	1,19	1,20	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36
	3,2	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,29	1,30	1,32	1,34	1,35	1,37	1,39	1,40

Anmerkungen:

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.2 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.44: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G$  nach Tab. 7.21 – Variante a

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11
	2,6	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15
	2,7	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19
	2,8	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27
	3,0	1,20	1,21	1,22	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,32
	3,1	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35	1,36
	3,2	1,27	1,27	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,34	1,35	1,37	1,38	1,39	1,41

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.21 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

10. Anhang

Tab. 10.45: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G$  nach Tab. 7.21 – Variante b

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12
	2,6	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16
	2,7	1,13	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20
	2,8	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24
	2,9	1,19	1,20	<b>1,20</b>	1,21	1,22	1,22	1,23	<b>1,24</b>	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
	3,0	1,23	1,23	1,24	1,25	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33
	3,1	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,37	1,38
	3,2	1,29	1,30	<b>1,31</b>	1,32	1,33	1,34	1,35	<b>1,36</b>	1,37	1,39	1,40	1,41	1,43

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.21 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.  
Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.46: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast (Kategorie A1, A2, A3, B1) abhängig vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10
	2,6	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14
	2,7	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,18
	2,8	1,16	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,19	1,19	<b>1,19</b>	1,20	1,21	1,21	1,22	<b>1,23</b>	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27
	3,0	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31
	3,1	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31	1,33	1,34	1,35	1,36
	3,2	1,29	1,29	<b>1,30</b>	1,31	1,32	1,33	1,34	<b>1,35</b>	1,36	1,37	1,38	1,39	1,41

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.21 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.  
Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.3 Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast und Windlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.47: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\underline{LA_G} = 0,4$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14
	2,6	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,17
	2,7	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,2	1,2	1,21
	2,8	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25
	2,9	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
	3,0	1,21	1,22	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34
	3,1	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,33	1,34	1,35	1,37	1,38
	3,2	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35	1,37	1,38	1,4	1,41	1,43

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.48: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\underline{LA_G} = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12
	2,6	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16
	2,7	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,2
	2,8	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24
	2,9	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28
	3,0	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32
	3,1	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35	1,36
	3,2	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36	1,37	1,39	1,41

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.49: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\underline{LA_G} = 0,6$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,1	1,11	1,12
	2,6	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15
	2,7	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19
	2,8	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27
	3,0	1,16	1,17	1,18	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31
	3,1	1,19	1,20	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,31	1,32	1,34	1,35
	3,2	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36	1,38	1,39

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.4 Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast und Windlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.50: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\underline{LA_G} = 0,4$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,15	1,16
	2,6	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,16	1,17	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19
	2,7	1,17	1,18	1,18	1,18	1,19	1,19	1,19	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	1,22
	2,8	1,20	1,20	1,21	1,21	1,21	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,25	1,26
	2,9	1,23	1,23	1,23	1,24	1,24	1,25	1,25	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	1,30
	3,0	1,25	1,26	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	1,29	1,30	1,31	1,32	1,32	1,33
	3,1	1,28	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31	1,32	1,33	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37
	3,2	1,31	1,31	1,32	1,33	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.  
Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.51: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\underline{LA_G} = 0,5$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,09	1,09	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13
	2,6	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16
	2,7	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19
	2,8	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26
	3,0	1,21	1,21	1,22	1,22	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,29
	3,1	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33
	3,2	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,36	1,37

Anmerkungen:

Ergebnisse abh. vom Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_{R,m}$  ausgewiesen

Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit  $V_{R,c} = 0,8 \cdot V_{R,m}$  angenommen

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.52: Kalibrierter Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung aus ständiger Last, Nutzlast (Kat. A1, A2, A3, B1) & Windlast abh. vom Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\underline{LA_G} = 0,6$ ,  $V_N = 0,25$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12
	2,6	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15
	2,7	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18
	2,8	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21
	2,9	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24
	3,0	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28
	3,1	1,21	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31
	3,2	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,35

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.23 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.

Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.5 Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.53: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,9$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11
	2,6	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14
	2,7	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18
	2,8	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22
	2,9	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25
	3,0	1,14	1,15	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29
	3,1	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,32	1,34
	3,2	1,19	1,21	1,22	1,23	1,25	1,26	1,28	1,29	1,31	1,33	1,34	1,36	1,38

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.6 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.54: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last und Schneelast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,4$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12
	2,6	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16
	2,7	1,16	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,21
	2,8	1,20	1,20	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,24	1,25
	2,9	1,23	1,24	1,24	1,24	1,25	1,24	1,26	1,26	1,27	1,28	1,28	1,29	1,30
	3,0	1,27	1,27	1,28	1,28	1,29	1,29	1,30	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35
	3,1	1,31	1,31	1,32	1,32	1,33	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40
	3,2	1,35	1,35	1,36	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,40	1,42	1,43	1,44	1,45

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.55: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last und Schneelast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,6$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09
	2,6	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13
	2,7	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17
	2,8	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21
	2,9	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25
	3,0	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29
	3,1	1,21	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33
	3,2	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35	1,36	1,38

**Anmerkungen:**

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren



### 10.11.7 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last und Schneelast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.56: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last und Schneelast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,5$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10
	2,6	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14
	2,7	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,18
	2,8	1,16	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,19	1,19	1,19	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27
	3,0	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31
	3,1	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31	1,33	1,34	1,35	1,36
	3,2	1,29	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,41

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.8 Einachsige Beanspruchung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.57: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G$  nach Tab. 7.32

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11
	2,6	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15
	2,7	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18
	2,8	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22
	2,9	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26
	3,0	1,15	1,16	1,17	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30
	3,1	1,18	1,19	1,20	1,21	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,30	1,31	1,33	1,34
	3,2	1,20	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35	1,37	1,39

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen nach Tab. 7.21 zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.58: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,4$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13
	2,6	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17
	2,7	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21
	2,8	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25
	2,9	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29
	3,0	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33
	3,1	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35	1,36	1,38
	3,2	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36	1,37	1,39	1,40	1,42

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.59: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,5$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12
	2,6	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16
	2,7	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20
	2,8	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,21	1,22	1,23	1,24
	2,9	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,28
	3,0	1,18	1,18	1,19	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,32
	3,1	1,20	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35	1,36
	3,2	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,34	1,35	1,37	1,39	1,40

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.60: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für einachsige Spannung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast,  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,6$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12
	2,6	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15
	2,7	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19
	2,8	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,14	1,15	1,15	1,16	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27
	3,0	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29	1,31
	3,1	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35
	3,2	1,21	1,22	1,24	1,25	1,27	1,28	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36	1,38	1,39

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.9 Doppelbiegung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.61: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung),  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,4$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14
	2,6	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,17
	2,7	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21
	2,8	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25
	2,9	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
	3,0	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34
	3,1	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35	1,37	1,38
	3,2	1,26	1,27	1,28	1,30	1,31	1,32	1,34	1,35	1,36	1,38	1,39	1,41	1,43

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.62: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung),  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,5$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,06	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12
	2,6	1,08	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16
	2,7	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20
	2,8	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24
	2,9	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28
	3,0	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32
	3,1	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35	1,36
	3,2	1,23	1,25	1,26	1,27	1,28	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36	1,37	1,39	1,41

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.63: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Doppelbiegung aus ständiger Last (z-Richtung), Schneelast (z-Richtung) und Windlast (y-Richtung),  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,6$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12
	2,6	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15
	2,7	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19
	2,8	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
	2,9	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27
	3,0	1,16	1,17	1,18	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,30	1,31
	3,1	1,19	1,20	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,31	1,32	1,34	1,35
	3,2	1,22	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,30	1,31	1,33	1,34	1,36	1,38	1,39

Anmerkungen:

Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung. Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

### 10.11.10 Druck & Biegung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast

Grün schattiert sind Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} \leq \gamma_M = 1,3$ , rot schattiert Ergebnisse mit  $\gamma_{M,opt} > \gamma_M = 1,3$ .

Tab. 10.64: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung),  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,4$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,14	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,16	1,17	1,17
	2,6	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,18	1,18	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,20
	2,7	1,19	1,19	1,19	1,20	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24
	2,8	1,21	1,22	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,24	1,25	1,25	1,26	1,27	1,27
	2,9	1,24	1,24	1,25	1,25	1,26	1,26	1,27	<b>1,27</b>	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31
	3,0	1,27	1,27	1,28	1,28	1,29	1,29	1,30	1,31	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35
	3,1	1,29	1,30	1,30	1,31	1,32	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39
	3,2	1,32	1,33	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	<b>1,37</b>	1,38	1,39	1,40	1,42	1,43

Ergebnisse abh. vom Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_{R,m}$  ausgewiesen  
Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit  $V_{R,c} = 0,8 \cdot V_{R,m}$  angenommen

Tab. 10.65: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung),  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,5$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13
	2,6	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17
	2,7	1,14	1,14	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20
	2,8	1,16	1,17	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,22	1,23
	2,9	1,19	1,19	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	<b>1,23</b>	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26
	3,0	1,21	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30
	3,1	1,23	1,24	1,25	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31	1,32	1,33
	3,2	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	<b>1,32</b>	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37

Anmerkungen:

Ergebnisse abh. vom Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_{R,m}$  ausgewiesen  
Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit  $V_{R,c} = 0,8 \cdot V_{R,m}$  angenommen Der Kalibrierung liegen die Annahmen wie ausgewiesen zugrunde, Abweichungen erfordern eine angepasste Kalibrierung.  
Aktualisierung der Festigkeit mit  $n < 30$  erfordert die Anwendung von Übertragungsfaktoren

Tab. 10.66: Kalibrierter Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,opt}$  für Druck & Biegung ständiger Last (Druck), Schneelast (Druck) und Windlast (Biegung  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $LA_G = 0,6$

		Variationskoeffizient der Materialfestigkeit $V_R$												
		0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Zielzuverlässigkeitsindex $\beta_t$	2,5	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12
	2,6	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15
	2,7	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19
	2,8	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22
	2,9	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	<b>1,21</b>	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25
	3,0	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
	3,1	1,22	1,22	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32
	3,2	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29	<b>1,30</b>	1,31	1,32	1,33	1,34	1,36

Ergebnisse abh. vom Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit  $V_{R,m}$  ausgewiesen  
Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit  $V_{R,c} = 0,8 \cdot V_{R,m}$  angenommen

## 10.12 Verifizierung der Kalibrierungsergebnisse

### 10.12.1 Druckbeanspruchung ohne Stabilitätsgefahr

#### Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Nutz- oder Schneelasten

Tab. 10.67: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Schneelast – Bewertungslevel

Veränderl. Last	$G_k$ [kN]	$Q_k$ [kN]	Breite $b$ [cm]	Höhe $h$ [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_{Q^2}$
Nutzlast $k_{mod} = 0,8$	215	200	20	20	1,00	2,89	0,51
	250	175	20	20	1,00	2,92	0,44
	300	135	20	20	1,00	3,03	0,34
	320	118	20	20	1,00	3,08	0,29
	350	95	20	20	1,00	3,09	0,23
	400	55	20	20	1,00	3,10	0,13
	450	15	20	20	1,00	3,05	0,04
Schneelast $k_{mod} = 0,9$	250	220	20	20	1,00	2,89	0,50
	300	180	20	20	1,00	2,97	0,40
	320	165	20	20	1,00	3,01	0,37
	350	140	20	20	1,00	3,05	0,31
	400	100	20	20	1,00	3,11	0,22
	450	60	20	20	1,00	3,12	0,13

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

#### Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Lastkombination aus Schnee- und Windlast

Tab. 10.68: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Druckbeanspruchung aus ständiger Last, Schnee- und Windlast – Bewertungslevel

Veränderl. Last	$G_k$ [kN]	$S_k$ [kN]	$W_k$ [kN]	Breite $b$ [cm]	Höhe $h$ [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_{G^2}$	$LA_{Q1}$
Schnee + Wind $k_{mod} = 1,0$	300	270	40	20	20	1,00	2,85	0,47	0,87
	300	250	70	20	20	1,00	2,91	0,46	0,79
	300	200	155	20	20	1,00	3,05	0,43	0,58
	300	190	170	20	20	1,00	3,07	0,43	0,54
	450	160	20	20	20	1,00	2,94	0,69	0,89
	450	145	50	20	20	1,00	2,97	0,67	0,75
	450	125	80	20	20	1,00	3,02	0,67	0,62
	450	115	100	20	20	1,00	3,04	0,66	0,55
	550	88	10	20	20	1,00	2,93	0,83	0,90
	550	80	20	20	20	1,00	2,95	0,83	0,81
	550	70	35	20	20	1,00	2,98	0,83	0,68
	550	60	55	20	20	1,00	2,98	0,82	0,55

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

## Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast

Tab. 10.69: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Druckbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel

Veränderl. Last	$G_k$ [kN]	$Q_k$ [kN]	Breite $b$ [cm]	Höhe $h$ [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_Q^2$
Windlast $k_{mod} = 1,0$	450	125	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>3,06</b>	<b>0,23</b>
	400	165	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>3,08</b>	<b>0,31</b>
	350	205	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>3,09</b>	<b>0,39</b>
	270	265	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>3,10</b>	<b>0,51</b>
	200	325	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>3,01</b>	<b>0,64</b>
	150	365	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>2,95</b>	<b>0,72</b>
	80	420	0,2	0,2	<b>1,00</b>	<b>2,92</b>	<b>0,85</b>

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,16$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

## 10.12.2 Biegung, Doppelbiegung oder Druck & Biegung ohne Stabilitätsgefahr

### Einfachbiegung

#### Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast

Tab. 10.70: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Nutzlast – Bewertungslevel

Fall	Charakteristische Werte (für semi-prob. NW)			Balken- abstand $d$ [m]	Stütz- weite $l$ [m]	$b$ [cm]	$h$ [cm]	NW mod. TBW <sup>2</sup>	$A = A_0 = 20m^2$		$A = 1000m^2$	
	EG Decke [kN/m <sup>2</sup> ]	Ständige Last [kN/m <sup>2</sup> ]	Nutz- last <sup>1</sup> [kN/m <sup>2</sup> ]						$\beta$	$LA_Q$ 3	$\beta$	$LA_Q$ 3
<b>Wohnraumnutzung A2 – Biegebalken</b>												
1a)	2,09	1,00	2,00	0,9	6,8	20	26	<b>0,99</b>	<b>3,18</b>	<b>0,37</b>	<b>4,11</b>	<b>0,23</b>
1b)	1,86	1,00	2,00	0,9	6,1	18	24	<b>1,00</b>	<b>3,15</b>	<b>0,38</b>	<b>4,14</b>	<b>0,25</b>
1c)	3,90	1,00	2,00	0,8	5,7	18	24	<b>1,00</b>	<b>3,17</b>	<b>0,29</b>	<b>3,86</b>	<b>0,18</b>
1d)	2,68	1,00	2,00	1,0	6,4	20	27	<b>1,00</b>	<b>3,16</b>	<b>0,33</b>	<b>3,97</b>	<b>0,20</b>
<b>Büronutzung B1 – Biegebalken</b>												
1a)	2,09	1,00	2,00	0,9	6,8	20	26	<b>0,99</b>	<b>2,52</b>	<b>0,44</b>	<b>3,62</b>	<b>0,31</b>
1b)	1,86	1,00	2,00	0,9	6,1	18	24	<b>1,00</b>	<b>2,48</b>	<b>0,46</b>	<b>3,61</b>	<b>0,33</b>
1c)	3,90	1,00	2,00	0,7	6,1	18	24	<b>1,00</b>	<b>2,63</b>	<b>0,36</b>	<b>3,48</b>	<b>0,24</b>
1d)	2,68	1,00	2,00	0,9	6,7	20	27	<b>0,99</b>	<b>2,60</b>	<b>0,40</b>	<b>3,59</b>	<b>0,28</b>

<sup>1</sup> In der prob. Überprüfung Verteilungsparameter entsprechend der Nutzlastmodellierung nach Kap. 4.4!

<sup>2</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,23$

<sup>3</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

#### Biegebeanspruchung aus unter ständiger Last, Schneelast und Windlast

Die Bezeichnung in Tab. 10.71 bezieht sich auf:

2a) WLZ 1, 2b) WLZ 2 Binnenland, 2c) WLZ 2 Küste, 2d) WLZ 3 Binnenland, 2e) WLZ 3 Küste, 2f) WLZ 4 Binnenland, 2g) WLZ 4 Küste, 2h) WLZ 4 Inseln. Zudem erfasst die Tabelle zur Veranschaulichung des Grenzbereiches nur Lastanteile der ständigen Last von  $LA_G = 0,50 \dots 0,60$ , sowie Schnee als führende veränderliche Last.

10. Anhang

Tab. 10.71: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Biegebeanspruchung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast – Bewertungslevel

Fall	Charakt. Werte			S-Abstand <i>d</i> [m]	Stützweite <i>l</i> [m]	Breite <i>b</i> [cm]	Höhe <i>h</i> [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_{\sigma}^2$	$LA_{Q1}^2$
	Ständ. Last [kN/m <sup>2</sup> ]	Schneelast [kN/m <sup>2</sup> ]	Windlast [kN/m <sup>2</sup> ]								
Schneelastzone 1											
2a)	1,0	0,52	0,10	1,0	7,1	10	20	1,00	3,00	0,59	0,84
2b)	1,0	0,52	0,13	1,0	7,0	10	20	0,99	3,01	0,58	0,81
2c)	1,0	0,52	0,17	1,0	7,0	10	20	1,00	3,03	0,56	0,76
2d)	1,0	0,52	0,16	1,0	7,0	10	20	1,00	3,04	0,57	0,77
2e)	1,0	0,52	0,21	1,0	6,9	10	20	0,99	3,05	0,55	0,72
2f)	1,0	0,52	0,19	1,0	7,0	10	20	1,01	3,01	0,56	0,74
2g)	1,0	0,52	0,25	1,0	6,9	10	20	1,01	3,04	0,54	0,69
2h)	1,0	0,52	0,28	1,0	6,8	10	20	0,99	3,12	0,53	0,66
Schneelastzone 2											
2a)	1,0	0,68	0,10	1,0	6,7	10	20	1,00	2,97	0,53	0,88
2b)	1,0	0,68	0,13	1,0	6,7	10	20	1,01	2,95	0,52	0,85
2c)	1,0	0,68	0,17	1,0	6,6	10	20	0,99	3,01	0,51	0,81
2d)	1,0	0,68	0,16	1,0	6,6	10	20	0,99	3,01	0,51	0,81
2e)	1,0	0,68	0,21	1,0	6,6	10	20	1,01	2,98	0,50	0,77
2f)	1,0	0,68	0,19	1,0	6,6	10	20	1,00	3,00	0,51	0,79
2g)	1,0	0,68	0,25	1,0	6,5	10	20	0,99	3,05	0,49	0,74
2h)	1,0	0,68	0,28	1,0	6,5	10	20	1,00	3,02	0,48	0,72

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,23$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

Biegebeanspruchung aus ständiger Last und Windlast

Tab. 10.72: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Biegebeanspruchung/Einfachbiegung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel

DN	WLZ	$g_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$g_{k,DF}$	$q_p$	$c_{pe,10}$	$q_{k,DF}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Stützweite <i>l</i> [m]	QS [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_{Q^2}$
60°	1 Binnenland	1,0	0,5	0,5	0,7	0,35	10,7	12/20	0,99	2,99	0,43
	2 Binnenland	1,0		0,65		10,0	0,99	2,99	0,50		
		Küste		1,0		0,85	9,3	1,00	2,96	0,56	
	3 Küste	1,0		1,05		0,74	8,7	12/20	0,99	2,96	0,62
	4 Küste	1,0		1,25		0,88	8,2	12/20	0,99	2,96	0,66
		Inseln d. Nordsee		1,0		1,40	0,98	7,9	12/20	0,99	2,95
75°	1 Binnenland	1,0	0,34	0,5	0,8	0,40	11,3	12/20	0,99	2,99	0,56
	2 Binnenland	1,0		0,65		10,4	0,99	2,98	0,62		
		Küste		1,0		0,85	9,5	12/20	0,99	2,96	0,68
	3 Küste	1,0		1,05		0,84	8,8	12/20	0,99	2,94	0,73
	4 Küste	1,0		1,25		1,00	8,2	12/20	0,99	2,95	0,76
		Inseln d. Nordsee		1,0		1,40	1,12	7,9	12/20	1,00	2,89

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

## Doppelbiegung

### Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast

Tab. 10.73: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Doppelbiegung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel

Fall	Charakt. Werte			Abstand <i>d</i> [m]	Stütz- weite <i>l</i> [m]	Brei- te <i>b</i> [cm]	Höhe <i>h</i> [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_G^2$	$LA_Q^2$
	Ständ. Last [kN/m <sup>2</sup> ]	Windlast z-R. [kN/m <sup>2</sup> ]	Windlast y-R. [kN/m <sup>2</sup> ]								
Mit $g_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$											
1a)	0,5	0,10	0,20	1,0	10,8	10	20	1,00	3,04	0,61	0,33
1b)	0,5	0,13	0,20	1,0	10,5	10	20	0,99	3,10	0,58	0,39
1c)	0,5	0,17	0,20	1,0	10,2	10	20	0,99	3,11	0,56	0,46
1d)	0,5	0,16	0,20	1,0	10,3	10	20	1,00	3,17	0,56	0,44
1e)	0,5	0,21	0,20	1,0	10,0	10	20	1,00	3,09	0,53	0,51
1f)	0,5	0,19	0,20	1,0	10,1	10	20	1,00	3,07	0,54	0,49
1g)	0,5	0,25	0,20	1,0	9,7	10	20	1,00	3,09	0,51	0,56
1h)	0,5	0,28	0,20	1,0	9,5	10	20	1,00	3,10	0,49	0,58
Mit $g_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$											
2a)	1,0	0,10	0,20	1,0	8,4	10	20	1,00	2,98	0,76	0,33
2b)	1,0	0,13	0,20	1,0	8,3	10	20	1,01	2,98	0,74	0,39
2c)	1,0	0,17	0,20	1,0	8,1	10	20	0,99	3,04	0,71	0,46
2d)	1,0	0,16	0,20	1,0	8,2	10	20	1,01	2,97	0,72	0,44
2e)	1,0	0,21	0,20	1,0	8,0	10	20	1,01	3,01	0,69	0,51
2f)	1,0	0,19	0,20	1,0	8,1	10	20	1,00	3,03	0,70	0,49
2g)	1,0	0,25	0,20	1,0	7,9	10	20	1,00	3,03	0,67	0,56
2h)	1,0	0,28	0,20	1,0	7,8	10	20	1,00	3,04	0,66	0,58
Mit $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$											
3a)	2,0	0,10	0,20	1,0	6,3	10	20	1,01	2,90	0,86	0,33
3b)	2,0	0,13	0,20	1,0	6,3	10	20	1,01	2,90	0,85	0,39
3c)	2,0	0,17	0,20	1,0	6,2	10	20	0,99	2,96	0,83	0,46
3d)	2,0	0,16	0,20	1,0	6,2	10	20	1,01	2,91	0,84	0,44
3e)	2,0	0,21	0,20	1,0	6,1	10	20	1,00	2,95	0,82	0,51
3f)	2,0	0,19	0,20	1,0	6,2	10	20	1,01	2,92	0,83	0,49
3g)	2,0	0,25	0,20	1,0	6,1	10	20	1,01	2,94	0,80	0,56
3h)	2,0	0,28	0,20	1,0	6,0	10	20	1,00	2,96	0,79	0,58

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,20$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte



### Doppelbiegung aus ständiger Last und Schneelast in z-Richtung und Windlast in y-Richtung

Tab. 10.74: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Doppelbiegung aus ständiger Last, Schneelast und Windlast– Bewertungslevel

Fall	Charakt. Werte			S-Ab- stand <i>d</i> [m]	Stütz- weite <i>l</i> [m]	Breite <i>b</i> [cm]	Höhe <i>h</i> [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_G^2$	$LA_{Q1}^2$
	Stän. Last [kN/m <sup>2</sup> ]	Schnee- last [kN/m <sup>2</sup> ]	Wind- last [kN/m <sup>2</sup> ]								
Schneelastzone 1, $g_k = 1 \text{ kN/m}^2$											
1a)	1,0	0,52	0,10	1,0	7,16	10	20	1,00	2,99	0,59	0,84
1b)	1,0	0,52	0,13	1,0	7,14	10	20	1,00	2,99	0,58	0,81
1c)	1,0	0,52	0,17	1,0	7,12	10	20	1,00	2,99	0,57	0,76
1d)	1,0	0,52	0,16	1,0	7,12	10	20	1,00	3,00	0,57	0,77
1e)	1,0	0,52	0,21	1,0	7,08	10	20	1,00	3,00	0,55	0,72
1f)	1,0	0,52	0,19	1,0	7,10	10	20	1,00	3,00	0,56	0,74
1g)	1,0	0,52	0,25	1,0	7,05	10	20	1,00	3,01	0,54	0,69
1h)	1,0	0,52	0,28	1,0	7,02	10	20	1,00	3,03	0,53	0,66
Schneelastzone 1, $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$											
2a)	2,0	0,52	0,10	1,0	5,68	10	20	1,00	3,03	0,74	0,84
2b)	2,0	0,52	0,13	1,0	5,67	10	20	1,00	3,03	0,73	0,81
2c)	2,0	0,52	0,17	1,0	5,65	10	20	1,00	3,04	0,72	0,76
2d)	2,0	0,52	0,16	1,0	5,65	10	20	1,00	3,04	0,73	0,77
2e)	2,0	0,52	0,21	1,0	5,63	10	20	1,00	3,05	0,71	0,72
2f)	2,0	0,52	0,19	1,0	5,65	10	20	1,00	3,03	0,72	0,74
2g)	2,0	0,52	0,25	1,0	5,62	10	20	1,00	3,05	0,70	0,69
2h)	2,0	0,52	0,28	1,0	5,61	10	20	1,00	3,05	0,69	0,66
Schneelastzone 2, $g_k = 1 \text{ kN/m}^2$											
3a)	1,0	0,68	0,10	1,0	6,78	10	20	1,00	2,94	0,53	0,88
3b)	1,0	0,68	0,13	1,0	6,75	10	20	1,00	2,95	0,52	0,85
3c)	1,0	0,68	0,17	1,0	6,73	10	20	1,00	2,95	0,51	0,81
3d)	1,0	0,68	0,16	1,0	6,73	10	20	1,00	2,96	0,52	0,82
3e)	1,0	0,68	0,21	1,0	6,70	10	20	1,00	2,96	0,50	0,77
3f)	1,0	0,68	0,19	1,0	6,72	10	20	1,00	2,95	0,51	0,79
3g)	1,0	0,68	0,25	1,0	6,68	10	20	1,00	2,97	0,49	0,74
3h)	1,0	0,68	0,28	1,0	6,65	10	20	1,00	2,98	0,48	0,72
Schneelastzone 2, $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$											
4a)	2,0	0,68	0,10	1,0	5,48	10	20	1,00	3,02	0,70	0,88
4b)	2,0	0,68	0,13	1,0	5,47	10	20	1,00	3,02	0,69	0,85
4c)	2,0	0,68	0,17	1,0	5,45	10	20	1,00	3,03	0,68	0,81
4d)	2,0	0,68	0,16	1,0	5,46	10	20	1,00	3,02	0,68	0,82
4e)	2,0	0,68	0,21	1,0	5,44	10	20	1,00	3,03	0,67	0,77
4f)	2,0	0,68	0,19	1,0	5,45	10	20	1,00	3,03	0,67	0,79
4g)	2,0	0,68	0,25	1,0	5,42	10	20	1,00	3,04	0,66	0,74
4h)	2,0	0,68	0,28	1,0	5,42	10	20	1,00	3,04	0,65	0,72
Schneelastzone 2, $g_k = 1 \text{ kN/m}^2$											
5a)	2,0	0,68	0,10	1,0	8,0	18	22	0,96	3,10	0,70	0,88
5b)	2,0	0,68	0,13	1,0	8,0	18	22	0,97	3,09	0,69	0,85
5c)	2,0	0,68	0,17	1,0	8,0	18	22	0,98	3,07	0,68	0,81
5d)	2,0	0,68	0,16	1,0	8,0	18	22	0,97	3,07	0,68	0,82
5e)	2,0	0,68	0,21	1,0	8,0	18	22	0,99	3,06	0,67	0,77
5f)	2,0	0,68	0,19	1,0	8,0	18	22	0,98	3,06	0,67	0,79
5g)	2,0	0,68	0,25	1,0	8,0	18	22	1,00	3,04	0,66	0,74
5h)	2,0	0,68	0,28	1,0	8,0	18	22	1,00	3,03	0,65	0,72

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,23$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

## Druck & Biegung

### Druckbeanspruchung aus ständiger Last, Schneelast bzw. Nutzlast und Biegebeanspruchung aus Windlast

Tab. 10.75: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen kombinierte Druck- & Biegebeanspruchung durch Druck aus ständiger Last + Schneelast bzw. Nutzlast, Biegung aus Windlast – Bewertungslevel

Fall	Charakt. Werte			Knicklänge $l_{eff}$ [m]	Breite $b$ [cm]	Höhe $h$ [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_G^2$ (Spannung aus EG)	$LA_{Q1}^2$ (Spannung aus S)
	Ständige Last [kN]	Schneelast [kN]	Windlast [kN/m <sup>2</sup> ]							
Kombination mit Schnee- bzw. Nutzlast großer Raum (Verteilungsparameter mit $V_S$ bzw. $V_N = 0,25$ )										
1a)	220,0	110,0	5,0	1,0	160	160	1,01	3,12	0,60	0,83
1b)	200,0	127,0	5,0	1,0	160	160	1,01	3,05	0,54	0,85
1c)	180,0	140,0	5,0	1,0	160	160	0,99	3,03	0,50	0,86
1d)	220,0	105,0	10,0	1,0	160	160	1,01	3,15	0,57	0,70
1e)	200,0	120,0	10,0	1,0	160	160	1,01	3,10	0,52	0,73
1f)	180,0	135,0	10,0	1,0	160	160	1,00	3,05	0,47	0,75
1g)	220,0	96,0	15,0	1,0	160	160	1,00	3,22	0,54	0,59
1h)	200,0	112,0	15,0	1,0	160	160	1,00	3,16	0,50	0,63
1i)	180,0	130,0	15,0	1,0	160	160	1,01	3,06	0,44	0,67
Kombination mit Nutzlast – kleiner Raum (entsprechend Fall 1, aber Verteilungsparameter mit $V_N = 0,40$ )										
2a)	220,0	110,0	5,0	1,0	160	160	1,01	2,68	0,58	0,84
2b)	200,0	127,0	5,0	1,0	160	160	1,01	2,56	0,53	0,86
2c)	180,0	140,0	5,0	1,0	160	160	0,99	2,50	0,48	0,87
2d)	220,0	105,0	10,0	1,0	160	160	0,99	2,71	0,55	0,72
2e)	200,0	120,0	10,0	1,0	160	160	1,01	2,61	0,50	0,74
2f)	180,0	135,0	10,0	1,0	160	160	1,00	2,52	0,46	0,77
2g)	220,0	96,0	15,0	1,0	160	160	1,00	2,81	0,53	0,61
2h)	200,0	112,0	15,0	1,0	160	160	1,00	2,68	0,48	0,64
2i)	180,0	130,0	15,0	1,0	160	160	1,01	2,54	0,43	0,68

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,23$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte

### 10.12.3 Zugbeanspruchung

#### Zugbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast

Tab. 10.76: Überprüfung der erzielten Zuverlässigkeit beispielhafter Beanspruchungssituationen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte mittels *Monte Carlo Simulation* bei  $30 \cdot 10^6$  Realisationen für Zugbeanspruchung aus ständiger Last und Windlast – Bewertungslevel

Veränderl. Last	$G_k$ [kN]	$Q_k$ [kN]	Breite $b_{net}$ [cm]	Höhe $h_{net}$ [cm]	NW mod. TBW <sup>1</sup>	$\beta$	$LA_Q^2$
Windlast $k_{mod} = 1,0$	350	30	0,2	0,2	1,00	2,88	0,08
	300	70	0,2	0,2	1,00	2,94	0,20
	260	100	0,2	0,2	1,00	3,00	0,29
	200	150	0,2	0,2	1,00	3,01	0,45
	150	190	0,2	0,2	1,00	3,00	0,58
	100	230	0,2	0,2	1,00	2,98	0,72
	50	270	0,2	0,2	1,00	2,94	0,85

<sup>1</sup>  $\gamma_{G,up} = 1,20$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{M,opt} = 1,25$

<sup>2</sup> bezogen auf die Erwartungswerte