

# **Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand**

Ein Beitrag zur substanzschonenden Erhaltung  
historischer Gebäude

Von der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH)

Gunter Linke

aus Halle/Saale

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug

Tag der Disputation: 23. Januar 2024

<https://doi.org/10.26127/BTUOpen-6690>





*„Bei der unterschiedlichen Festigkeit der Hölzer und der Vielheit der wirksamen Einflüsse wäre es von großem Wert, jedes Stück auf Grund einer Besichtigung oder einer in der Praxis leicht durchführbaren Probe zuverlässig beurteilen zu können.“*

*(Hugo Seitz, 1892-1953)*



## Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit systematischen Untersuchungen zur Entwicklung einer Methode zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Deren Notwendigkeit ergibt sich aus der bauaufsichtlichen Forderung, die für die Errichtung von Neubauten geltenden Normen auch im Zuge der Instandsetzung bestehender Konstruktionen anzuwenden. Dazu ist auch Kenntnis über die vorhandene Materialqualität erforderlich. Diese wird in der Praxis meist nur abgeschätzt, da bis dato keine konkreten normativen Regelungen für die Bewertung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen existieren. Tragfähigkeitsreserven und -defizite können so nicht erfasst werden. Dies kann zu unwirtschaftlichen, unverhältnismäßigen und nicht fachgerechten Eingriffen in die Bausubstanz führen. Das ist aus ökonomischer, ökologischer und denkmalpflegerischer Sicht nicht vertretbar.

Das Ziel der Arbeit war die Adaption der in Deutschland geltenden normativen Regeln für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz zur Anwendung in Bestandsbauten. Hauptaugenmerk lag auf der Kombination visueller und zerstörungsfreier/-armer Prüfmethode. Deren zuverlässige Anwendung erfordert ein statistisch abgesichertes Auswertungsmodell. Dahingehend wurde eine ausführliche Literaturstudie zur Festigkeitssortierung von Bauholz, zur Bauzustandsbewertung von Bestandsbauten und der zerstörungsfreien/-armen Prüfung von Holz geführt. Darauf aufbauend erfolgten umfangreiche Materialversuche an Proben in Bauholzdimension zur Anwendbarkeit ausgewählter zerstörungsfreier/-armer Prüfmethode. Die auf dieser Grundlage entwickelte Festigkeitssortiermethode wurde in zusätzlichen Versuchen an altem Bauholz und in bestehenden Konstruktionen erprobt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die visuelle Sortierung für die Erfassung der Holzqualität in-situ nicht zuverlässig genug ist. Gleiches gilt für eine alleinige Anwendung zerstörungsfreier/-armer Prüfmethode. Die Kombination beider Methoden mit Hilfe eines statistisch abgesicherten Auswertungsmodells führt zu einer wesentlich zuverlässigeren Abschätzung der Materialqualität. Die entwickelte Festigkeitssortiermethode ermöglicht darüber hinaus die Anpassung des Untersuchungsumfangs auf die jeweilige Konstruktion und deren spezifischen Anforderungen. Die Erprobung zeigt, dass Tragfähigkeitsreserven und -defizite zuverlässig ermittelt werden können. In den durchgeführten Fallstudien an historischen Holzkonstruktionen ergaben sich Reserven von (17 ... 67) % der Festigkeit sowie von (7 ... 27) % der Steifigkeit. Gleichzeitig konnten einzelnen, auf Grundlage der visuellen Sortierung nicht als Bauholz verwendbare Bauteile einer Festigkeitsklasse nach EN 338 zugeordnet werden.

Die Anwendung der entwickelten Methodik zur in-situ Festigkeitssortierung ist eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen. Sie eröffnet die Möglichkeit, Instandsetzungsmaßnahmen substanzschonender und wirtschaftlicher zu planen.



## Abstract

This thesis is concerned with systematic investigations for the development of a method for strength grading of timber components in existing structures. The need for this arises from the requirement of the building authorities to apply the standards applicable to the erection of new buildings to the repair of existing structures. This also requires knowledge of the existing material quality. In practice, this is usually only estimated, as to date there are no specific standardised regulations for the assessment of timber components in existing structures. Load-bearing capacity reserves and deficits cannot be recognised in this way. This can lead to uneconomical, disproportionate and inappropriate interventions in the building fabric. This is unacceptable from an economic, ecological and conservation point of view.

The aim of the thesis was to adapt the normative German regulations for the strength grading of new construction timber for the application in existing structures. The main focus was on the combination of visual and non-/semi-destructive test methods. Their reliable application requires a statistically validated evaluation model. To this end, a detailed literature study was conducted on the strength grading of structural timber, the assessment of the structural condition of existing buildings and the non-/semi-destructive testing of timber. Based on this, extensive material tests were carried out on samples in the dimension of construction timber to determine the applicability of selected non-/semi-destructive testing methods. The strength grading method developed on this basis was trialled in additional tests on old timber and in existing structures.

The results show that visual grading is not reliable enough for determining wood quality in-situ. The same applies to the sole use of non-/semi-destructive testing methods. The combination of both methods with the help of a statistically analysed evaluation model leads to a much more reliable estimation of the material quality. The developed strength grading method also enables the scope of the test to be adapted to the respective construction and its specific requirements. The trial shows that load-bearing capacity reserves and deficits can be reliably determined. In the case studies carried out on historical timber constructions, reserves of (17 ... 67) % of the strength and (7 ... 27) % of the stiffness were found. At the same time, individual components that could not be used as construction timber on the basis of visual sorting could be assigned to a strength class in accordance with EN 338.

The application of the developed methodology for in-situ strength grading is therefore a significant improvement on current practice in the assessment of existing timber structures. This opens up the possibility of planning redevelopment measures in a more substance-careful and economical way.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ging aus dem persönlichen Interesse für bestehende Holzkonstruktionen und der beruflichen Tätigkeit auf dem Gebiet der Bauzustandserfassung und -bewertung hervor. Einer der wesentlichen Schwerpunkte im Umgang mit bestehenden, teils historischen Holzkonstruktionen ist die Bewertung der Materialqualität verbauten Holzes. Obwohl dies bereits seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten ist, fehlen in den aktuellen bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken einheitliche, konkrete Festlegungen hinsichtlich eines methodischen, praxistauglichen Vorgehens bei der Ermittlung und Bewertung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen im eingebauten Zustand. Durch die Aufarbeitung des Standes der Forschung und Normung zur Festigkeitssortierung im Allgemeinen und der Anwendung zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode im Besonderen sowie durch die Entwicklung einer Methodik zur apparativ unterstützten in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen soll ein Beitrag zur substanzschonenden, fachgerechten und wirtschaftlichen Erhaltung bestehender, historischer Gebäude geleistet werden.

Die Arbeit entstand in den Jahren 2017-2023 am Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg in Kooperation mit der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik, Eberswalde. Beiden Institutionen sei für die ideelle und materielle Forderung gedankt.

Besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die wissenschaftliche Betreuung aussprechen. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug für die fachliche Betreuung und Förderung und so manchen kollegialen Rat. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder, Leiter des Instituts für Baukonstruktion und Holzbau der Technischen Universität Braunschweig für die Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit.

Herzlicher Dank gilt Frau Dr.-Ing. Maria Loebjinski für die wissenschaftlichen Diskussionen und die kollegiale Zusammenarbeit. Ebenso danke ich den Mitarbeitern und Kollegen der VHÖB und des Sachverständigenbüros Prof. Dr.-Ing. W. Rug, Eberswalde für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der umfangreichen materialtechnischen Untersuchungen.

Weiterhin danke ich meiner Familie und allen Freunden für die Jahre der Unterstützung und Hilfe.

Der größte Dank gilt meiner Ehefrau Wibke für die Unterstützung, die Geduld und das aufgebrachte Verständnis auch in schwierigen Phasen und die so manches Mal notwendige Ermunterung.



## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole .....	IV
1. Motivation der Arbeit.....	1
1.1. Ausgangssituation.....	1
1.2. Zielstellung.....	3
2. Festigkeitssortierung von Bauholz .....	4
2.1. Sortierung von Bauholz entsprechend der deutschen und europäischen Normung .....	4
2.2. Die visuelle Festigkeitssortierung .....	8
2.2.1. Historische Entwicklung der Festigkeitssortierung .....	8
2.2.2. Entwicklung der normativen Regelungen zur visuellen Festigkeitssortierung in Deutschland .....	18
2.2.3. Vor- und Nachteile der visuellen Festigkeitssortierung .....	24
2.3. Die maschinelle Festigkeitssortierung .....	27
2.3.1. Entwicklung der maschinellen Festigkeitssortierung .....	27
2.3.2. Vor- und Nachteile der maschinellen Festigkeitssortierung .....	34
2.4. Zusammenfassung .....	35
3. Erfassung des Bauzustandes von bestehenden Holzkonstruktionen .....	37
3.1. Normative Regelungen zur Erfassung des Bauzustandes.....	37
3.1.1. Regelwerke in Deutschland.....	37
3.1.2. Internationale Regelwerke für die Bauzustandsuntersuchung .....	41
3.2. Festigkeitsuntersuchung und Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen .....	53
3.2.1. Regelwerke für die Ermittlung der Materialeigenschaften.....	53
3.2.2. Festigkeitsuntersuchungen mit zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode	55
3.2.3. Einfluss der Alterung auf die Materialkennwerte von Holzbauteilen.....	58
3.3. Zusammenfassung .....	60
4. Zerstörungsfreie und -arme Untersuchung von Holzbauteilen .....	63
4.1. Ultraschall-Impulslaufzeitmessung .....	64
4.1.1. Theoretische Grundlagen .....	64
4.1.2. Messmethoden.....	66
4.1.3. Bisherige Untersuchungen .....	67
Untersuchungen zu wesentlichen Einflussfaktoren.....	70
Untersuchungen zur Fehlstellenerkennung .....	76
Untersuchungen zur Festigkeitssortierung .....	77
4.1.4. Zusammenfassung.....	81
4.2. Untersuchung von Bohrkernproben.....	82
4.2.1. Grundlagen .....	82
4.2.2. Bisherige Untersuchungen .....	82
Prüfmethodik & Einflussfaktoren .....	87
4.2.3. Zusammenfassung.....	89
4.3. Eindringtiefmessung.....	89
4.3.1. Grundlagen .....	89
4.3.2. Bisherige Untersuchungen .....	90
Prüfmethodik & Einflussfaktoren .....	94

4.3.3.	Zusammenfassung.....	97
5.	Untersuchungen zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode für die in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen .....	98
5.1.	Präzisierung der Aufgabenstellung .....	98
5.2.	Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz .....	101
5.2.1.	Gegenstand und Ziel der Untersuchungen .....	101
5.2.2.	Versuchsaufbau und -durchführung .....	101
Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 und DIN 4074-5.....	101	
Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen .....	103	
Zerstörende Materialuntersuchungen nach DIN EN 408 .....	104	
5.2.3.	Ergebnisse und Auswertung.....	107
Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 und DIN 4074-5.....	107	
Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen .....	109	
Zerstörende Materialuntersuchungen nach DIN EN 408 .....	114	
Zusammenfassende Bewertung.....	139	
5.2.4.	Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit .....	140
5.3.	Untersuchungen zur Verwendbarkeit von Bohrkernproben für die Festigkeitssortierung von Bauholz .....	141
5.3.1.	Gegenstand und Ziel der Untersuchungen .....	141
5.3.2.	Versuchsaufbau und -durchführung .....	143
5.3.3.	Ergebnisse und Auswertung.....	143
5.3.4.	Untersuchungen zur erforderlichen Probenanzahl.....	152
5.4.	Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Eindringtiefmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz .....	156
5.4.1.	Gegenstand und Ziel der Untersuchungen .....	156
5.4.2.	Versuchsaufbau und -durchführung .....	157
5.4.3.	Ergebnisse und Auswertung.....	158
5.4.4.	Untersuchungen zur erforderlichen Anzahl der Messungen .....	168
5.5.	Zusammenfassung .....	172
6.	Entwicklung einer Methode zur Festigkeitssortierung von Bauholz in bestehenden Konstruktionen .....	174
6.1.	Methodischer Ansatz .....	174
6.2.	Festlegung der Mess- und Zielgrößen.....	177
6.3.	Regressionsanalyse.....	179
6.4.	Ableitung von Grenzwerten für den Sortierparameter .....	181
6.5.	Festlegung der Vorgehensweise für die in situ-Festigkeitssortierung .....	185
6.6.	Zusammenfassung .....	189
7.	Erprobung der Methode zur in situ-Festigkeitssortierung.....	191
7.2.	Laboruntersuchungen an Holzbauteilen aus historischen Holzkonstruktionen ....	192
7.2.1.	Fallstudie 1 – Dachkonstruktion der Fichtenberg-Oberschule, Berlin.....	192
Objektbeschreibung .....	192	
Durchgeführte Untersuchungen .....	196	
Ergebnisse und Auswertung.....	196	
Schlussfolgerungen.....	204	
7.2.2.	Fallstudie 2 – Deckenkonstruktion des Schlosses Friedenstern, Gotha .....	204
Objektbeschreibung .....	204	

Durchgeführte Untersuchungen .....	206
Ergebnisse und Auswertung.....	207
Schlussfolgerungen.....	214
7.3. Erprobung der Methodik an bestehenden Holzkonstruktionen .....	215
7.3.1. Fallstudie 3 – Dachkonstruktion der „Wunderblutkirche“ St. Nikolai, Bad Wilsnack 215	
Objektbeschreibung .....	215
Durchgeführte Untersuchungen .....	217
Ergebnisse und Auswertung.....	218
Schlussfolgerungen.....	221
7.3.2. Fallstudie 4 – Dachkonstruktion der St.-Nikolai-Kirche, Jüterbog .....	221
Objektbeschreibung .....	221
Durchgeführte Untersuchungen .....	225
Ergebnisse und Auswertung.....	225
Schlussfolgerungen.....	227
7.3.3. Fallstudie 5 – Dachkonstruktion eines Wohnstallhauses, Fehrbellin.....	228
Objektbeschreibung .....	228
Durchgeführte Untersuchungen .....	230
Ergebnisse und Auswertung.....	231
Schlussfolgerungen.....	233
7.4. Zusammenfassung .....	234
8. Zusammenfassung und Ausblick .....	238
8.1. Zusammenfassung der Untersuchungen .....	238
8.2. Forschungsausblick .....	241
Quellenverzeichnis .....	243
Normen, Zulassungen, Richtlinien .....	243
Veröffentlichungen, Bücher.....	247
Sonstige Quellen .....	264
Abbildungsverzeichnis.....	266
Tabellenverzeichnis.....	273
Anlagen.....	276
Anlage 1 – Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen dynamischen Kennwerten der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Kennwerten von Bauholz .....	277
Anlage 2 – Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und kleinen, fehlerfreien Normproben .....	279
Anlage 3 – Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe eines Stahlstiftes und den physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Bauholz ....	281
Anlage 4 – Ergebnisse der Regressionsanalyse zur Ermittlung der Sortierparameter.....	283
Anlage 5 – Vorschlag für eine Richtlinie zur Durchführung der in situ-Festigkeitsortierung .....	296

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole

### Große lateinische Buchstaben

AH	Altholz
AT	Österreich (ISO-Code nach ISO 3166 Alpha-2)
B	Proben in Bauteildimension
BK	Bohrkernproben
C	Festigkeitsklasse für Nadelschnittholz nach DIN EN 338 (bspw. C24)
CEN	Europäisches Komitee für Normung, Brüssel/Belgien
COST	Europäische Wissenschaftsstiftung
CZ	Tschechische Republik (ISO-Code nach ISO 3166 Alpha-2)
D	Festigkeitsklasse für Laubschnittholz nach DIN EN 338 (bspw. D30)
DE	Deutschland (ISO-Code nach ISO 3166 Alpha-2)
DIN	Deutsche Norm, herausgegeben vom Deutschen Institut für Normung e.V. Berlin/Deutschland
E	Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]; Energie [J]
E <sub>0</sub>	Elastizitätsmodul in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>0,mean</sub>	Mittelwert des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>0,mean</sub>	Mittelwert des Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>dyn</sub>	dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>dyn,12</sub>	dynamischer Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega = 12$ % [m/s]
E <sub>dyn,<math>\omega</math></sub>	dynamischer Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega \neq 12$ % [m/s]
E <sub>kin</sub>	kinetische Energie, hier: Schlagenergie [J]
E <sub>m</sub>	Biege-Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>m,g</sub>	Globaler Biege-Elastizitätsmodul nach DIN EN 408 [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>m,g,12</sub>	Globaler Biege-Elastizitätsmodul nach DIN EN 408 bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega = 12$ [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>m,g,<math>\omega</math></sub>	Globaler Biege-Elastizitätsmodul nach DIN EN 408 bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega \neq 12$ [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>m,l,12</sub>	Lokaler Biege-Elastizitätsmodul nach DIN EN 408 bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega = 12$ [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>stat</sub>	statischer Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
EN	Europäische Norm, herausgegeben vom CEN
F <sub>max</sub>	Maximale erreichte Prüflast [N o. kN]
FN	Faserneigung [%]
G	Schubmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
IP	Schätzwert für Materialkennwerte, Sortierparameter („Indicating Property“)
ISO	International Organization für Standardization, Genf/Schweiz
KL	Kenntnisstufe („knowledge level“)
L	Laborprüfung
LS	Sortierklasse für Laubschnittholz nach DIN 4074-5 (bspw. LS 10)
MNO	Mittel-/Nord-/Ost-Europa
MS	Bezeichnung der Sortierklassen für maschinell nach DIN 4074-1:1989 sortiertes Nadelschnittholz (MS 7, MS 10, MS 13, MS17)
NDT	Zerstörungsfreie Prüfmethode (engl.: Non-Destructive Testing)

NH	Neuholz
NP	Portugiesische Norm, herausgegeben vom Instituto Portugues da Qualidade, Caparica/Portugal
S	Sortierklasse für Nadelschnittholz nach DIN 4074-1 (bspw. S 10)
SDT	Zerstörungsarme Prüfmethode (engl.: Semi-Destructive Testing)
SGL	Sortierstufe („strength grading level“)
SIA	Schweizer Norm, herausgegeben vom Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich/Schweiz
S <sub>TP</sub>	Grenzwert des Sortierparameters
TC	Technical Committee, Technisches Gremium des CEN
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen, herausgegeben vom Amt für Standardis
TP	Zielgröße der Sortierung über Sortierparameter
TP <sub>req</sub>	erforderliche Zielgröße (hier: charakteristische Kennwerte nach DIN EN 338)
UNE	Spanische Norm, herausgegeben von der Gesellschaft AENOR, Madrid/Spanien
UNI	Italienische Norm, herausgegeben von Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Mailand/Italien
U <sub>peak</sub>	maximale übertragene elektrische Spannung [mV]
USDA	United States Department of Agriculture, Washington D. C./USA
ONR	Österreichische Normative Regeln, herausgegeben von Austrian Standards International, Wien/Österreich
ÖNORM	Österreichische Norm, herausgegeben von Austrian Standards International, Wien/Österreich

### Kleine lateinische Buchstaben

a	Schalldämpfung
a <sub>1</sub>	Abstand zwischen den Lasteinleitungsstellen bei Biegeversuchen nach DIN EN 408 [mm]
a <sub>2</sub> / a	Abstand zwischen den Lasteinleitungsstellen und den Auflagern bei Biegeversuchen nach DIN EN 408 [mm]
a <sub>3</sub>	Auflagerüberstand bei Biegeversuchen nach DIN EN 408 [mm]
a <sub>TP</sub>	Regressionskoeffizient der Zielgröße
b	Querschnittsbreite [mm]
b <sub>TP</sub>	Regressionskonstante der Zielgröße
d	Dicke [mm]
d / dir	direkte Messung (Ultraschall-Impulslaufzeitmessung)
f	Frequenz [Hz]
f <sub>c,0</sub>	Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,0,BK</sub>	Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von Bohrkernproben [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,0,BK,05</sub>	5%-Quantilwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von Bohrkernproben [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,0,BK,mean</sub>	Mittelwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von Bohrkernproben [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,0,kf</sub>	Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von kleinen, fehlerfreien Druckquadern [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,0,kf,05</sub>	5%-Quantilwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von kleinen, fehlerfreien Druckquadern [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,0,kf,mean</sub>	Mittelwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von kleinen, fehlerfreien Druckquadern [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>c,90,BK</sub>	Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung von Bohrkernproben [N/mm <sup>2</sup> ]

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole

---

$f_m / f_{m,k}$	Biegefestigkeit / charakteristische Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{m,12}$	Biegefestigkeit bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega = 12 \%$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{m,korr}$	Biegefestigkeit bezogen auf eine Referenzhöhe [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{t,0}$	Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_v$	Schub-/Scherfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$h$	Querschnittshöhe [mm]
$h_{ref}$	Referenzhöhe für Biegeprüfkörper [mm], hier: $h_{ref} = 150 \text{ mm}$
$i$	vor Ort, im eingebauten Zustand; indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung
ind	Indirekte Messung (Ultraschall-Impulslaufzeitmessung)
k. A.	keine Angaben
kf	Kleine, fehlerfreie Prüfkörper
$k_{IP}$	globaler Korrekturfaktor zur Absicherung der rechnerischen Sortierparameter
$k_{\vartheta}$	gerätespezifischer Beiwert zur Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit anhand der Temperatur
$k_{vis}$	Korrekturfaktor zur Absicherung der rechnerisch ermittelten Sortierparameter auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens
$k_{p,05}$	Verhältniswert bezogen auf den 5%-Quantilwert der Rohdichte
$k_{p,mean}$	Verhältniswert bezogen auf den Mittelwert der Rohdichte
$k_{\omega}$	gerätespezifischer Beiwert zur Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit anhand der Holzfeuchtigkeit
$\ell$	Länge, Messlänge [mm o. m]
$\ell_a / \ell$	Auflagerabstand bei Biegeversuchen nach DIN EN 408 [mm]
$\ell_c$	überstehende Länge des Stahlstiftes bei der Eindringtiefmessung [mm]
$\ell_{ges}$	Gesamtlänge [mm o. m]
$m$	Masse [g o. kg]
$n$	Anzahl [/]
$p$	prozentualer Anteil [%]
$r$	Korrelationskoeffizient [/]
$r^2$	Bestimmtheitsmaß [/]
$s_x$	Standardabweichung einer beliebigen Kenngröße
$t$	Messtiefe; Tiefe im Allgemeinen [mm]; Faktor der Student'schen t-Verteilung (hier: $t = 1,645$ ); Zeit im Allgemeinen [s]
$t_p$	Eindringtiefe [mm]
$t_{p,12}$	Eindringtiefe bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega = 12 \%$ [mm]
$t_{p,max}$	maximale Eindringtiefe [mm]
$t_{p,\omega}$	Eindringtiefe bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega \neq 12 \%$ [mm]
$t_{schall}$	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]
$v$	Schallausbreitungsgeschwindigkeit [m/s]
$v_{12}$	Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega = 12 \%$ [m/s]
$v_{20}$	Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Temperatur von $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [m/s]
$v_{\vartheta}$	Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Temperatur von $\vartheta \neq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [m/s]
$v_{Prüf}$	Prüf-/Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]
$v_{schall,d,mean}$	Mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei der direkten Messung [m/s]
$v_{schall,d,min}$	Minimale Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei der direkten Messung [m/s]
$v_{schall,i,mean}$	Mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei der indirekten Messung [m/s]
$v_{schall,i,min}$	Minimale Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei der indirekten Messung [m/s]

$V_x$	Variationskoeffizient einer beliebigen Kenngröße
$V_\omega$	Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega \neq 12 \%$ [m/s]
$w$	Durchbiegung [mm]
$w_{\text{korr}}$	korrigierte Durchbiegung [mm]
$x_{\text{max}}$	Maximum einer beliebigen Kenngröße
$x_{\text{mean}}$	Mittelwert einer beliebigen Kenngröße
$x_{\text{min}}$	Minimum einer beliebigen Kenngröße
$z$	zerstörend
$z_a$	zerstörungsarm
$z_f$	zerstörungsfrei

### Große griechische Buchstaben

$\Delta$	Differenz, Messwertabweichung
$\Delta_{\text{lim}}$	Grenzwert der Differenz, Grenzwert der Messwertabweichung
$\Delta_{\text{max}}$	maximale Differenz, maximale Messwertabweichung
$\Delta_{\text{mean}}$	mittlere Differenz, mittlere Messwertabweichung
$\Delta_{\text{min}}$	minimale Differenz, minimale Messwertabweichung

### Kleine griechische Buchstaben

$\vartheta$	Temperatur [°C]
$\vartheta_{p\&\phi}$	Bezugstemperatur [°C], üblicherweise $J_{\text{ref}} = 20 \text{ °C}$
$\mu$	Poissonzahl
$\alpha$	Winkel, Last-Faser-Winkel [°]
$\lambda$	Wellenlänge [mm]
$\rho$	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> o. kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{12}$	Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega \neq 12 \%$ [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{BK}}$	Rohdichte von Bohrkernproben [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{BK},05}$	5%-Quantilwert der Rohdichte von Bohrkernproben [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{BK,mean}}$	Mittelwert der Rohdichte von Bohrkernproben [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{BT}}$	Rohdichte von Prüfkörpern in Bauteildimension [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{BT},05}$	5%-Quantilwert der Rohdichte von Prüfkörpern in Bauteildimension [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{BT,mean}}$	Mittelwert der Rohdichte von Prüfkörpern in Bauteildimension [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	charakteristische Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{kf}}$	Rohdichte von kleinen, fehlerfreien Druckquader [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{TP}}$	aus Eindringtiefe rechnerisch ermittelte Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_\omega$	Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit von $\omega \neq 12 \%$ [g/cm <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	Holzfeuchtigkeit [%]
$\omega_{\text{ref}}$	Bezugsholzfeuchtigkeit [%], üblicherweise $\omega_{\text{ref}} = 12 \%$

### Sonstige Symbole

$\emptyset$	Durchmesser [mm]
$\diamond$	grundlegende Angaben in der Literatur
$\blacklozenge$	detaillierte Angaben in der Literatur



# 1. Motivation der Arbeit

## 1.1. Ausgangssituation

Die in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Bemessungsnormen (Eurocodes) gelten grundsätzlich für die Errichtung von Neubauten. Im Zuge von Sanierungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen an bestehenden Konstruktionen müssen die hierfür gegebenenfalls erforderlichen Trag- und Funktionsfähigkeitsnachweise entsprechend den aktuell bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken geführt werden (vgl. [Rug, 2014]). Dazu heißt es in der DIN EN 1990:2021, Abschnitt 1.1 (4) sowie in der DIN EN 1995-1-1/NA:2013, NCI zu 1.1.2 (NA.5) konkret:

*„EN 1990 kann auch zur Beurteilung des Tragverhaltens bestehender Bauwerke, bei Instandsetzungs- und Umbaumaßnahmen oder bei beabsichtigten Nutzungsänderungen angewendet werden.“ [DIN EN 1990:2021, S. 13]*

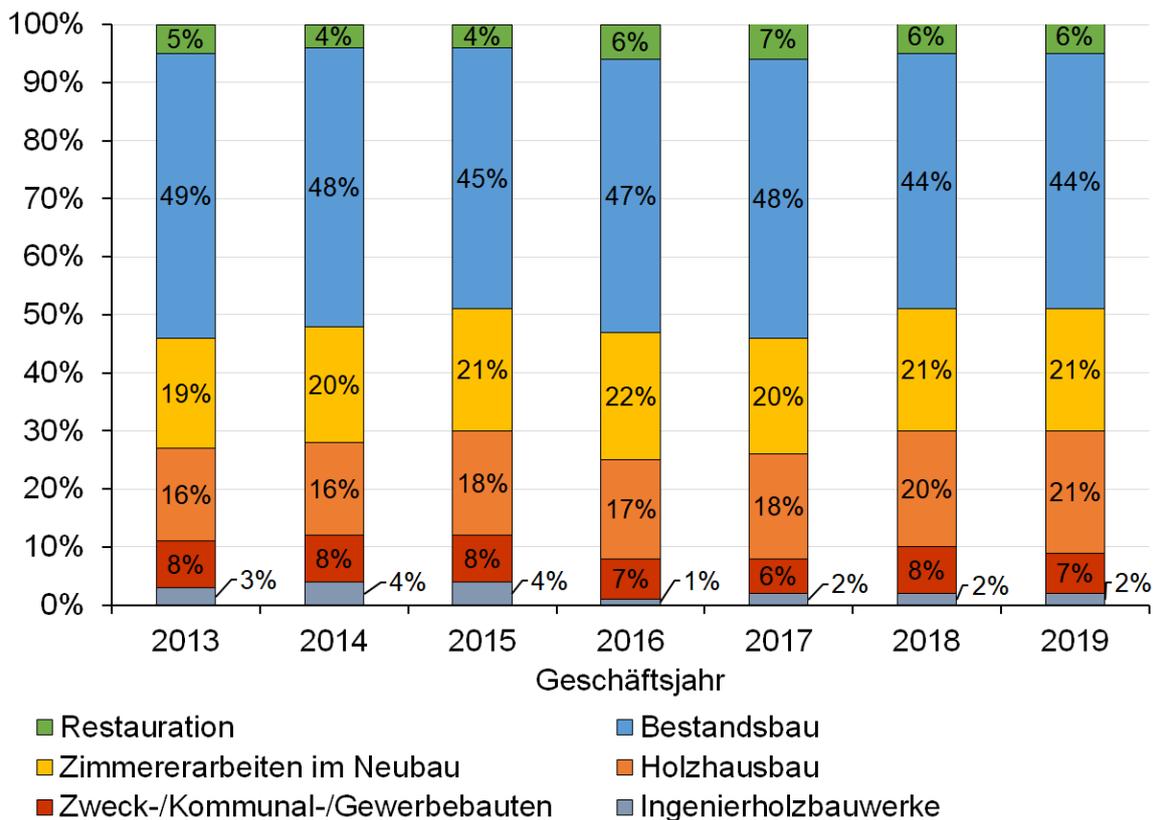
*„DIN EN 1995-1-1 gilt [...] sinngemäß für Bauten im Bestand, soweit in den speziellen Normen nichts anderes bestimmt ist.“ [DIN EN 1995-1-1/NA:2013, S. 11]*

Die stringente Anwendung der für den Nachweis der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von neuen Holzkonstruktionen geltenden Regelungen für die Bewertung von bestehenden Konstruktionen ist jedoch kritisch zu betrachten. Für die Nachweisführung müssen Eingangsgrößen wie beispielsweise die Einwirkungen und die Materialqualität festgelegt werden. In der Praxis werden für Bestandsbauten meist nur die für Neubauten vorgegeben normativen Annahmen getroffen. Eine zuverlässige und genaue Erfassung der notwendigen Eingangsgrößen erfolgt in den seltensten Fällen. In der Folge können beispielsweise Tragfähigkeitsreserven aber auch -defizite nicht zuverlässig aufgedeckt und bei der Bewertung der Konstruktion berücksichtigt werden. Dies führt unter Umständen zu unwirtschaftlichen, unverhältnismäßigen bis hin zu nicht fachgerechten Eingriffen in die bestehende Bausubstanz. Insbesondere im Fall von denkmalgeschützten, historischen Konstruktionen ist dies nicht vertretbar.

Die Notwendigkeit einer substanzschonenden Erhaltung und Instandsetzung bestehender Konstruktionen ergibt sich nicht nur aus kulturgeschichtlichen und denkmalpflegerischen Gesichtspunkten. Das Bauen im Bestand umfasste im Zeitraum 2015-2020 nach Angaben des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung ca. (60...70) % des gesamten Hochbauvolumens im Wohnungs- und Gewerbebau (vgl. [BBSR, 2021]). Allein im Holzbau beträgt der Umsatzanteil an Baumaßnahmen in Bestandsbauten (44...49) % (s. Abbildung 1). Gleichzeitig verursachte das Bauwesen nach Angaben des Umweltbundesamtes in den letzten zwei Jahrzehnten (55...64) % des jährlichen Nettoabfallaufkommens (vgl. [UBA, 2021]). Das entspricht etwa (185...250) Millionen Tonnen. Allein im Jahr 2016 fielen 2,4 Millionen Tonnen Abbruchholz an (s. [Döring/Mantau, 2018]). Das entspricht etwa einem Drittel des gesamten Altholzvolumens<sup>1</sup> im Jahr 2016. Der substanzschonende Umgang mit bestehenden Konstruktionen bietet somit auch die Möglichkeit, einen Beitrag zur Reduzierung des Abfallaufkommens und zur Ressourcenschonung beizutragen.

---

<sup>1</sup> Das gesamte Altholzvolumen umfasst neben Abbruchholz auch Holzabfälle aus holzverarbeitenden Betrieben sowie holzbasierte Abfälle aus Gewerbe und Privathaushalten.



Datenquelle: Holzbau Deutschland (Hrsg.): Lageberichte 2016-2021

**Abbildung 1: Umsatzanteile der Leistungsbereiche des Zimmerer- und Holzbaugewerbes (eigene Darstellung)**

Die Grundlage für eine substanzschonende Instandhaltung und -setzung bestehender Gebäude ist eine umfassende und genaue Bauzustandsuntersuchung und -bewertung. Hierdurch können die tatsächlich vorhandenen Einwirkungen (insbesondere Eigenlasten), die konstruktive Durchbildung und die vorhandene Materialqualität zuverlässig quantifiziert werden. Die Ermittlung der vorhandenen Tragfähigkeit von Holzbauteilen ist dabei von besonderer Bedeutung. Bei neuem Bauholz erfolgt dies üblicherweise durch eine Festigkeitssortierung. Bei Holzbauteilen in bestehenden, teils denkmalgeschützten Gebäuden können die für neues Bauholz entwickelten Sortierverfahren jedoch nicht oder nur mit großen Einschränkungen angewendet werden. Im Wesentlichen betrifft dies die eingeschränkte Einsehbarkeit der Bauteile, die fehlende Personalqualifizierung sowie das Fehlen von im Altbau flexibel handhabbarer sowie kalibrierter und zertifizierter Gerätetechnik (vgl. [Lißner/Rug, 2015]).

In den vergangenen zwei Jahrzehnten ist auf internationaler Ebene ein Entwicklungstrend zu beobachten, der sich mit der Erstellung von Richtlinien und Regelwerken für die Erfassung und Bewertung des Bauzustandes von bestehenden Konstruktionen und Tragwerken befasst. Als Vorreiter ist hier die Schweiz zu nennen, welche mit der SIA 269:2011 eine ganze Normenreihe für die Erfassung und Bewertung von Tragwerken herausgegeben hat. Die SIA 269-5:2011 befasst sich im Speziellen mit bestehenden Holzkonstruktionen. Die italienische Norm UNI 11119:2004 befasst sich darüber hinaus detailliert mit der Untersuchung und Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Bis dato existieren in Deutschland keine derartig detaillierten und bauaufsichtlich eingeführten Verfahren oder Regelwerke für bestehende Holzkonstruktionen.

## 1.2. Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Hierbei soll das in Deutschland bauaufsichtlich eingeführte normative System der Festigkeitssortierung hinsichtlich des aktuellen europäischen Entwicklungstrends überprüft und für die Anwendung an bestehenden Konstruktionen adaptiert werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der kombinierten Anwendung einer visuellen Untersuchung und Sortierung sowie ausgewählten zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n).

Hierdurch soll eine zuverlässige Bestimmung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen ermöglicht werden. Dies ist allein auf Grundlage einer visuellen Sortierung nicht möglich, da zwischen den visuell feststellbaren, oberflächlich messbaren Sortiermerkmalen und den tatsächlichen Festigkeitseigenschaften von Holz nur geringe Korrelationen bestehen (s. a. [Glos, 1995], [Sandomeer/Steiger, 2009]). Daraus resultieren eine geringe Trennschärfe sowie eine reduzierte Leistungs- und Aussagefähigkeit. Durch eine zusätzliche, unterstützende Anwendung von zerstörungsfreien/-armen Mess- und Prüfmethode(n) zur Ermittlung von Materialeigenschaften kann eine wesentliche Verbesserung der Effizienz erreicht werden, wie dies bereits bei der maschinellen Sortierung von neuem Holz untersucht und belegt worden ist (vgl. [Denzler/Glos, 2009]).

Die Grundlage für die Anwendung von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n) zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist eine Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Des Weiteren ist eine Quantifizierung der statistischen Zusammenhänge zwischen den zerstörungsfrei/-arm ermittelten Messgrößen und den tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten erforderlich. Aus diesen Anforderungen leiten sich folgende Untersuchungsschwerpunkte ab:

- 1) Quantifizierung der methodenspezifischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie Offenlegung von potenziellen Fehlerquellen ausgewählter zerstörungsfreier/-armer Prüfmethode(n)
- 2) Entwicklung statistisch abgesicherter Modelle zur Auswertung von Ergebnissen aus zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n)
- 3) Festlegung von Rahmenbedingungen für die zuverlässige Anwendung von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n)

Diese Schwerpunkte werden in vergleichenden Materialuntersuchungen betrachtet. Gegenstand sind dabei Proben in Bauteildimension aus Fichten-, Kiefern- und Eichenholz (Herkunft: MNO-Europa). Die Ergebnisse dieser grundlegenden Untersuchungen sollen der Entwicklung einer Methode zur Erfassung und Bewertung bestehender Holzkonstruktionen dienen, welche sowohl die Anforderungen der in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Regelwerke erfüllt als auch dem aktuellen internationalen Entwicklungstrend folgt.

Die in situ-Festigkeitssortierung soll sich durch die Kombination einer auf die Gegebenheiten in bestehenden Holzkonstruktionen angepassten visuellen Festigkeitssortierung und der Ermittlung der Materialkennwerte durch zuverlässige zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode(n) auszeichnen. Hierdurch soll die Grundlage für eine genauere und zuverlässigere Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen sowie deren substanzschonende sowie ökonomisch und ökologisch sinnvolle Erhaltung geschaffen werden.

## 2. Festigkeitssortierung von Bauholz

### 2.1. Sortierung von Bauholz entsprechend der deutschen und europäischen Normung

Entsprechend der zum aktuellen Zeitpunkt in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten europäischen Bemessungsnorm für Holzkonstruktionen DIN EN 1995-1-1:2010<sup>2</sup> darf nur Bauholz für tragende Holzbauteile verwendet werden, welches nach DIN EN 14081-1 nach der Festigkeit sortiert wurde (s. [DIN EN 1995-1-1:2010], Abschnitt 3.2 (1)P).

Die DIN EN 14081-1 legt die allgemeinen Anforderungen an die Festigkeitssortierung und die Kennzeichnung von festigkeitssortiertem Bauholz fest. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der visuellen Festigkeitssortierung. Detaillierte Angaben zu den anzuwendenden Sortierkriterien und deren Grenzwerte sind in dieser Norm jedoch nur für die Kontrolle von maschinell nach der Festigkeit sortiertem Bauholz und für ausgewählte visuelle Sortierkriterien aufgeführt. Die schlussendlich zu berücksichtigenden Sortierkriterien und die dazugehörigen Grenzwerte werden in den nationalen Sortiervorschriften geregelt.

Diese europaweit geltenden Anforderungen werden von den in Deutschland eingeführten Sortiervorschriften für Nadel- und Laubschnittholz DIN 4074-1 und DIN 4074-5 erfüllt (s. [DIN 20000-5:2016], Abschnitt 4.2).

Bei der Festigkeitssortierung von Bauholz wird grundlegend zwischen der visuellen und der maschinellen Sortierung unterschieden. Die visuelle Sortierung konzentriert sich auf die an der Bauteiloberfläche sichtbaren und visuell erfass- und messbaren festigkeitsverringernenden Merkmale wie beispielsweise Äste, Jahrringbreite, Faserneigung, Risse. Zusätzlich werden biotische Schädigungen (Fäule, Insektenfraß) und Verformungen (Längs-/Querkrümmungen, Verdrehungen) berücksichtigt. Entsprechend der Ausprägung dieser hauptsächlich wuchsbedingten Eigenschaften wird das Bauholz in drei Sortierklassen eingeteilt (Nadelholz: „S“-Klassen; Laubholz: „LS“-Klassen). Unterschieden wird in Bauholz mit geringer (S 7, LS 7), üblicher (S 10, LS 10) sowie überdurchschnittlicher Tragfähigkeit (S 13, LS 13). Wird die visuelle Sortierung in Kombination mit apparativen, zerstörungsfreien Messmethoden angewendet, so kann auch eine Sortierung in die Klasse S 15/LS 15 erfolgen (s. [DIN 4074-1:2012] und [DIN 4074-5:2008], Abschnitt 7.2).

Im Wesentlichen handelt es sich bei der „apparativ unterstützten visuellen Sortierung“ nach DIN 4074-1/-5 um eine kombinierte Anwendung der Sortierkriterien der Sortierklasse S10/LS10 sowie der gerätespezifischen Einstellwerte der verwendeten Mess- und Prüfapparaturen (vgl. [DIN 4074-1:2012] und [DIN 4074-5:2008], Abschnitt 7.3.1). Die Anforderungen an die hierfür verwendeten Apparate und deren Prüfung sind in der DIN 4074-3 geregelt. Zusätzlich ist für die Anwendung der apparativ unterstützten Festigkeitssortierung ein Eignungsnachweis des sortierenden Personals sowie der Werkseinrichtungen erforderlich. Konkrete Festlegungen hierzu werden in der DIN 4074-4 getroffen.

Die Zuordnung der visuell festgestellten Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – und damit die Festlegung der für die Bemessung erforderlichen charakteristischen

---

<sup>2</sup> Die vorliegende Arbeit beinhaltet sowohl datierte als auch undatierte Verweisungen auf Normen. Datierte Verweisungen beziehen sich auf die konkrete Fassung der jeweiligen Norm. Undatierte Verweisungen beziehen sich auf die Norm im Allgemeinen.

Materialkennwerte – ist in der DIN EN 1912 geregelt. Darin wird bestimmten Holzsortimenten eine Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 zugeordnet (s. Tabelle 1). Als Holzsortiment ist dabei die Kombination aus Holzart, Herkunft, verwendeter Sortiervorschrift und festgestellter Sortierklasse zu verstehen.

**Tabelle 1: Zuordnung von visuell nach der Festigkeit sortiertem Bauholz zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 am Beispiel von mitteleuropäischem Nadelschnittholz (Auszug aus [DIN EN 1912:2013], Tabelle 1)**

Festigkeitsklasse	Land, das die Sortiervorschrift veröffentlicht	Sortierklasse	Handelsname der Holzart	Herkunft	Botanische Kennzeichnung
C35	DE/AT	S 13, S 13K	Douglasie	DE/AT	54
C30	DE/AT/CZ	S 13, S 13K	Fichte	MNO-Europa	47
			Kiefer		22
			Tanne		1
			Lärche		15
C24	DE/AT	S 10, S 10K	Douglasie	DE/AT	54
	DE/AT/CZ	S 10, S 10K	Fichte Kiefer Tanne Lärche	MNO-Europa	47 22 1 15
C18	DE/AT	S 7, S 7K	Fichte	MNO-Europa	22
			Kiefer		47
C16	DE/AT/CZ	S 7, S 7K	Douglasie	DE/AT	54
	DE/AT/CZ	S 7, S 7K	Tanne Lärche	MNO-Europa	1 15

Die in der DIN EN 1912 geregelten Zuordnungen der visuell festgestellten Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 gelten nur für die dort aufgeführten Holzsortimente. Liegen andere Kombinationen vor, so muss die Zuordnung anhand der nach DIN EN 384 ermittelten charakteristischen Kennwerte zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 erfolgen (s. [DIN EN 1912:2013], Abschnitt 6).

Wird das Bauholz maschinell nach der Festigkeit sortiert, ist eine Übertragung von Sortier- in Festigkeitsklassen nicht erforderlich. Anhand der zerstörungsfrei gemessenen Kennwerte wird eine direkte Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 vorgenommen. Die heutzutage verfügbare stationäre Anlagentechnik verwendet neben optischen Messverfahren auch zerstörungsfreie Prüfmethode zur Bestimmung der Materialeigenschaften. Zum Einsatz kommen dabei Durchbiegungsverfahren, Durchstrahlungsverfahren (bspw. Röntgen-/Kernstrahlung, Mikrowellen) und dynamische Messmethoden wie Eigenfrequenzmessung, Spannungswellen und Ultraschallverfahren (vgl. [Glos, 1995] und [Sandomeer/Steiger, 2009]). Die maschinelle Sortierung darf jedoch nur von Betrieben vorgenommen werden, welche über fachkundiges Personal und zertifizierte Anlagentechnik verfügen. Die Anforderungen dazu sind auf europäischer Ebene in den Normen DIN EN 14081-2 und DIN EN 14081-3 geregelt.

Eine dritte Möglichkeit für die Festigkeitssortierung von Schnittholz ist die direkte Zuordnung von Bauholz zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der nach DIN EN 384 ermittelten charakteristischen Werte der physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Diese

Methode der Festigkeitssortierung kommt beispielsweise zur Anwendung, wenn bisher normativ nicht geregelte Holzsortimente nach der Festigkeit sortiert und in die bestehenden Normen aufgenommen werden sollen.

Grundlage für die Festigkeitssortierung anhand der nach DIN EN 384 ermittelten charakteristischen Materialkennwerte bilden Ergebnisse aus Materialversuchen an Prüfkörpern in Bauteildimension. Die Versuchsdurchführung muss dabei nach DIN EN 408 erfolgen. Die Zuordnung eines Holzsortimentes oder einer Holzgrundgesamtheit zu einer bestimmten Festigkeitsklasse kann dann erfolgen, wenn die charakteristischen Werte der Versuchsergebnisse mindestens den normativ geregelten charakteristischen Kennwerten der Festigkeitsklasse entsprechen (s. [DIN EN 338:2016], Abschnitt 6.2.2).

Im Falle von vorwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteilen – d.h. Kantholz und hochkant biegebeanspruchte Bretter/Bohlen – erfolgt die Zuordnung zu den Festigkeitsklassen (Nadelholz: C-Klassen; Laubholz: D-Klassen) anhand der Rohdichte, der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls. Bei vorwiegend auf Zug beanspruchten Bauteilen – üblicherweise Lamellen für die Brettschichtholzproduktion – werden analog die Rohdichte, die Zugfestigkeit und der Zug-Elastizitätsmodul für die Zuordnung zu einer Festigkeitsklasse (T-Klassen, bis dato nur für Nadelholz normativ geregelt) verwendet.

Das in Deutschland bauaufsichtlich eingeführte und normativ geregelte System der Festigkeitssortierung ist in Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt.

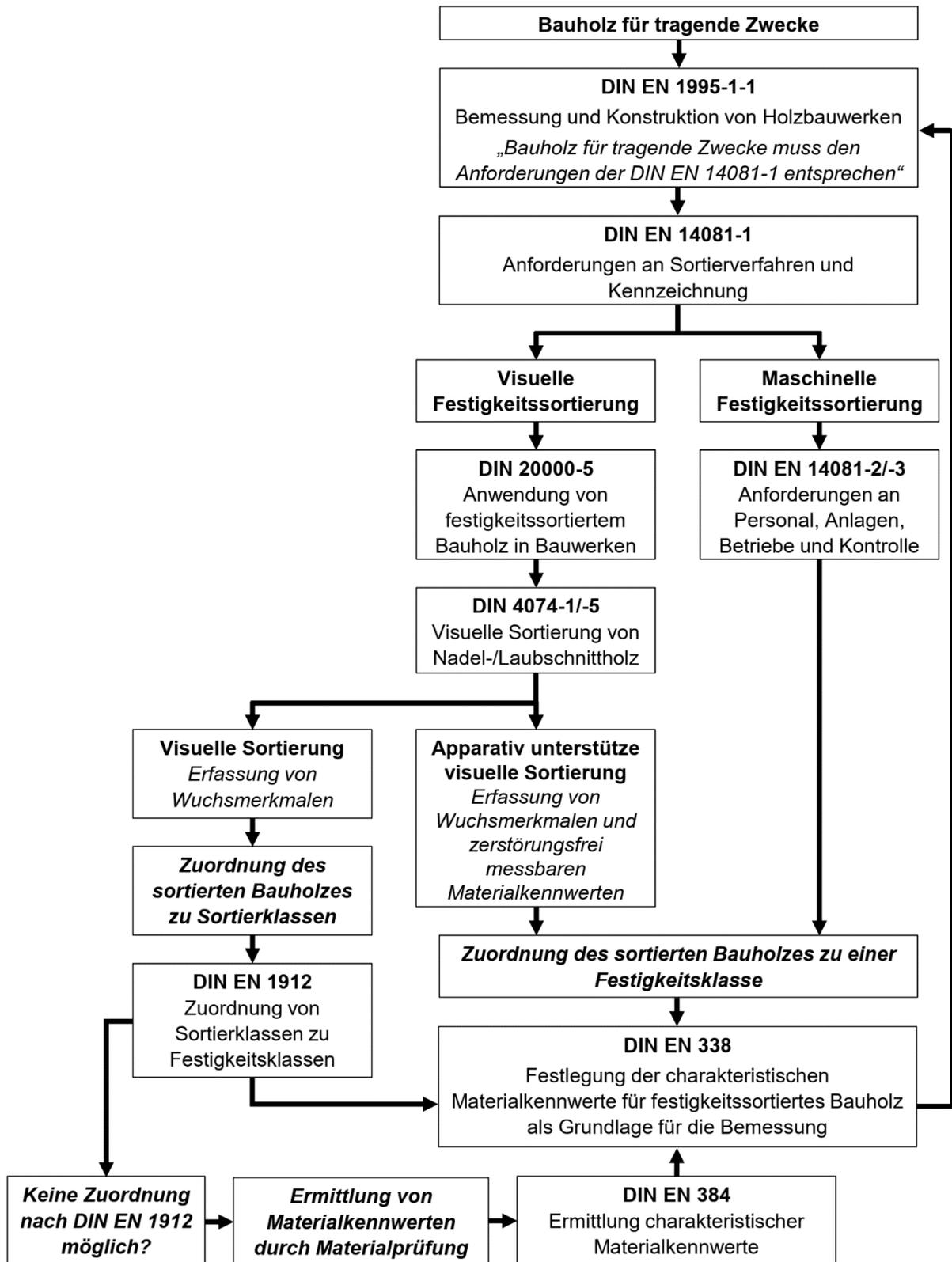


Abbildung 2: Bauaufsichtlich und normativ geregeltes System der Festigkeitssortierung in Deutschland (eigene Darstellung)

## 2.2. Die visuelle Festigkeitssortierung

### 2.2.1. Historische Entwicklung der Festigkeitssortierung

Der Rohstoff Holz ist einer der ältesten durch den Menschen genutzten und regional verfügbaren Baustoffe. Dies belegen neben archäologischen Funden von hölzernen Brunnen aus der Steinzeit (s. [Elburg, 2013]) und den Pfahlbauten der Bronze- & Eisenzeit (s. [Denkmalpflege BW, 2011]) auch die zahlreichen bis heute bestehenden Holzkonstruktionen wie bspw. die Dachkonstruktionen unzähliger Sakral- und Repräsentativbauten (s. Abbildung 3).



**Abbildung 3: Teil der Dachkonstruktion der „Wunderblutkirche“ St. Nikolai, Bad Wilsnack/Brandenburg, erbaut ca. 1520 (Bildquelle: Linke, 2018)**

Die wesentliche Voraussetzung für die Verwendung eines Baustoffes ist die Kenntnis über dessen Tragfähigkeit. Bei Bauholz wird dies durch die teils erheblichen Streuungen der Materialeigenschaften erschwert. Diese Streuungen resultieren maßgeblich aus dem strukturellen Aufbau, d.h. aus der Anisotropie des Werkstoffes in Verbindung mit den durch die Wachstumsmerkmale hervorgerufenen Inhomogenitäten (bspw. Äste, Faserneigungen). Zusätzlich werden sie von Standort- und Wuchsbedingungen beeinflusst. Nicht zuletzt können die Rohstoffgewinnung, der Transport sowie die weitere Verarbeitung einen Einfluss auf die Tragfähigkeit von Holzbauteilen haben.

Aus diesem Grund ist eine vorherige Abschätzung der Tragfähigkeit erforderlich. Traditionell erfolgte dies auf Grundlage von Erfahrungswerten und des Fachwissens der Sägewerker und der am Bau beteiligten Zimmerleute. Dabei wurden die Holzbauteile entsprechend ihrer späteren Verwendung und der vorgesehenen Einbausituation und Beanspruchung beurteilt. Hierfür gab es jedoch keine einheitlichen Verfahren. Es wurde sich vielmehr auf die subjektive Einschätzung und das traditionelle Wissen der Verarbeiter verlassen.

Erste Versuche der Vereinheitlichung der historisch gewachsenen und auf subjektiven Einschätzungen beruhenden Methoden zur Bewertung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen wurden im 19. Jahrhundert unternommen. So erschien beispielsweise im Jahr 1880 in Schweden der erste bekannte Sortierleitfaden für Kiefernholz (vgl. [Thunell, 1971]). Die auf diese Weise entstandenen Gebräuche haben sich zum Teil bis heute erhalten. Die in Deutschland im Holzhandel üblichen Handelsbräuche wurden im Jahr 1950 zusammengefasst und als „Tegernseer Gebräuche“ veröffentlicht (s. [Tegerns. Gebr., 1985]). Derartige Richtlinien und Handelsbräuche stellen jedoch hauptsächlich eine Sortierung von Holz nach dem Aussehen und nicht nach der Tragfähigkeit dar. Zwar werden ausgewählte Holz- und Wuchsmerkmale wie Färbung, Äste, Risse und Baumkante berücksichtigt, die Vorgehensweise und zugrundeliegenden Grenzwerte eignen sich jedoch nicht unmittelbar zur Abschätzung der Tragfähigkeit.

Um eine quantitative Abschätzung der Tragfähigkeit von Bauholz zu ermöglichen, ist eine genaue Kenntnis und gründliche Erforschung der Zusammenhänge zwischen den Materialkennwerten und Wuchseigenschaften erforderlich. Erste systematische Materialuntersuchungen im deutschsprachigen Raum erfolgten zum Ende des 19. Jahrhunderts (vgl. [Augustin, 2004] & [Rug, 2006]). Als Vorreiter ist hier LUDWIG VON TETMAJER (\* 1850, † 1905) zu nennen, der sich am Zürcher Polytechnikum<sup>3</sup> neben der Untersuchung von metallischen Baustoffen auch mit der Erforschung von Bauholz beschäftigte (vgl. [Augustin, 2004]). In Deutschland befassten sich vor allem die Technischen Universitäten und Hochschulen in Berlin, München, Hannover und Stuttgart mit der Untersuchung des Baustoffes Holz (vgl. [Rug, 2006]).

Die in diesen umfassenden Materialuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse flossen zu Beginn des 20. Jahrhunderts in die ersten amtlichen Vorschriften zur Festlegung einheitlicher zulässiger Materialkennwerte für Bauholz ein (s. a. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Kennwerte von Bauholz nach ausgewählten amtlichen Bauvorschriften des frühen 20. Jahrhunderts (nach [Bronneck, 1927])**

	Sachsen, 1911		Bayern, 1918		Preußen, 1919			
	Nadelholz	Eiche	Nadelholz	Eiche	Fichte	Tanne	Kiefer	Eiche
	Rohdichte (lufttrocken) [kg/m <sup>3</sup> ]							
	550	800	550	900	550	550	650	850
	-		-					
	600		650					
Beanspruchungsart	Zulässige Spannung in [N/mm <sup>2</sup> ]							
Zug parallel zur Faser	10	12	10	12	9	8	10	12
Druck parallel zur Faser	7	9	6	9	5	5	6	8
Druck quer zur Faser	2	4	3	5	-	-	-	-
Biegung	9	11	10	12	9	8	10	10
Abscheren parallel zur Faser	1	2	1,5	2	0,8	0,8	1	1
Abscheren quer zur Faser	3	6	3	5	-	-	-	-

<sup>3</sup> Heutzutage Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)

Die erste dieser Vorschriften wurde im Jahr 1911 in Sachsen im Rahmen einer Verordnung zum „*Allgemeinen Baugesetz*“ erlassen. Wenige Jahre später folgten im Jahr 1918 in Bayern die „*Oberpolizeiliche Vorschriften für die Aufstellung und Prüfung von Tragfähigkeitsnachweisen bei Bauwerken*“ und im Jahr 1919 in Preußen die „*Bestimmungen über die bei Hochbauten anzunehmenden Belastungen und die zulässigen Beanspruchungen der Baustoffe*“ (s. [Bronneck, 1927], vgl. a. [Augustin, 2004] und [Rug, 2006]).

Zwar wurde in den amtlichen Bauvorschriften des frühen 20. Jahrhunderts bereits Unterscheidungen zwischen den Festigkeitseigenschaften von Nadel- und Laubholz – in den preußischen Vorschriften sogar zwischen einzelnen Nadelholzarten – getroffen, eine Unterteilung in mehrere Qualitätssortimente erfolgte dabei jedoch nicht. Die Anforderungen an die Qualität des verwendeten Bauholzes wurde nur allgemein beschrieben. So heißt es beispielsweise in den Mitteilungen des Deutschen Holzbau-Vereins wie folgt:

*„Wird das Holz zu Baukonstruktionen verwendet, so muss es in seiner Struktur vollkommen gesund sein. Die äußeren Kennzeichen für gutes Holz lassen sich im Allgemeinen mit dem Auge, Ohr, Geruch und Gefühl wahrnehmen.“ [Jackson, 1920, S. 9]*

Dieses Zitat zeigt deutlich, dass sich die Beurteilung der Materialqualität trotz der Fortschritte auf dem Gebiet der Materialforschung weiterhin grundlegend auf die Erfahrungen der Zimmerleute stützte.

Das Fehlen einheitlicher Vorschriften zur Qualität von Bauholz führte dazu, dass dessen tatsächliche Tragfähigkeit nicht ausgenutzt werden konnte. HUGO SEITZ (\* 1892, † 1953) beschrieb 1929 dieses Problem wie folgt:

*„Da sich praktisch somit die Holzauselese darauf beschränken wird, Stücke mit offensichtlichen Mängeln auszuscheiden, hat es keinen Sinn, wenn der Konstrukteur von Durchschnittswerten der Festigkeit seines Baustoffes ausgeht, er muss sich vielmehr stets die unteren Grenzwerte vergegenwärtigen, die nach Ausschluß der mit groben Fehlern behafteten Stücke eintreten können.“ [Seitz, 1929, S. 98]*

Der daraus resultierende wenig wirtschaftliche Einsatz von Bauholz stellte zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein Hindernis für den noch jungen Ingenieurholzbau dar. Dies gilt insbesondere für die Erarbeitung und Einführung von einheitlichen Berechnungsvorschriften für Holzkonstruktionen. Um diesen Umstand zu beseitigen, wurden in den 1920er Jahren weitere systematische Untersuchungen zum Tragverhalten von Bauholz durchgeführt – bspw. 1922 durch RICHARD BAUMANN (\* 1879, † 1928) an der Technischen Hochschule Stuttgart und 1925 durch MILOS RÔS (\* 1879, † 1962) an der Eidgenössischen Materialprüfanstalt (EMPA) Zürich. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen ging bereits eine starke Beeinflussung der Festigkeit durch Wuchsmerkmale hervor. Eine genauere, quantitative Bewertung erfolgte jedoch nicht (vgl. [Augustin, 2004]). Dies sollte Gegenstand der zukünftigen Forschung sein.

Allen voran sind hier die Untersuchungen aus den Jahren 1927/28 an der Technischen Hochschule Stuttgart unter Leitung von OTTO GRAF (\* 1881, † 1956) zu nennen, welche auf Initiative der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft durchgeführt wurden. Der Hintergrund dieser umfassenden Materialversuche war die Erweiterung des Kenntnisstandes zur Festigkeit und Tragfähigkeit von Holzbauteilen sowie die Untersuchung von wesentlichen, die Festigkeit beeinflussenden Materialeigenschaften. Die Untersuchungsergebnisse wurden genutzt, um die

1926 erlassenen „*Vorläufigen Bestimmungen für Holztragwerke*“ [DRG, 1926] wissenschaftlich zu untermauern (s. [Schaechterle, 1929-1], [Schaechterle, 1929-2] und [Rug, 2016]).

Eines der wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen von GRAF in den Jahren 1927/28 war die Darlegung des festigkeitsreduzierenden Einflusses einiger Wuchsmerkmale. So konnte er eine signifikante Reduzierung der Zugfestigkeit infolge von Ästen und anderen Wuchsmerkmalen, welche eine Änderung des Faserverlaufes bewirken, feststellen. Gleiches gilt für den Jahrringaufbau (vor allem Jahrringbreite und Spätholzanteil). Des Weiteren zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Festigkeitseigenschaften (vgl. [Schaechterle, 1929-1] und [Schaechterle, 1929-2]).

Auch außerhalb von Europa wurde intensiv auf dem Gebiet der Materialfestigkeit von Bauholz geforscht. So ist beispielsweise 1923 in den USA das Department Circular 295 „*Basic Grading Rules and Working Stresses for Structural Timbers*“ durch das United States Department of Agriculture herausgegeben worden. In dieser Richtlinie wird bereits in vier Sortierklassen unterschieden (s. a. [USDA C295, 1923], S. 10f):

- Extra Select (S1): für höchstbeanspruchte Bauteile in Eisenbahn-/Industriebauten
- Select (S2): für den allgemeinen Einsatz in Eisenbahn-/Industriebauten und Konstruktionen mit hoher Beanspruchung
- Standard (S3): für den allgemeinen Einsatz in Holzkonstruktionen mit normaler Beanspruchung
- Common (S4): für den allgemeinen Einsatz in kleineren Holzkonstruktionen mit untergeordneter Beanspruchung

Die Zuordnung der Holzbauteile zu den Sortierklassen erfolgte anhand der vorhandenen Wuchs- und Bauteilmerkmale. Diese wurden unterschieden in Merkmale, welche die Tragfähigkeit beeinträchtigen und solche, die das Erscheinungsbild beeinträchtigen (s. Abbildung 4). Letztere sollten allerdings nur berücksichtigt werden, sofern dies durch die vorgesehene Anwendung notwendig wird.

Abhängig von der Ausprägung der in Abbildung 4 aufgeführten Wuchs- und Bauteilmerkmale wird eine Zuordnung zu einer der vier Sortierklassen vorgenommen. Die Festlegung der entsprechenden zulässigen Spannungen und Elastizitätsmoduln erfolgt anhand der für die Sortierklasse „Select (S2)“ tabellierten Materialkennwerte. Die Materialkennwerte der übrigen Sortierklassen „Extra Select (S1)“, „Standard (S3)“ und „Common (S4)“ können dann auf Grundlage der für die Sortierklasse „Select (S2)“ zulässigen Werte grafisch ermittelt werden (s. Abbildung 5).

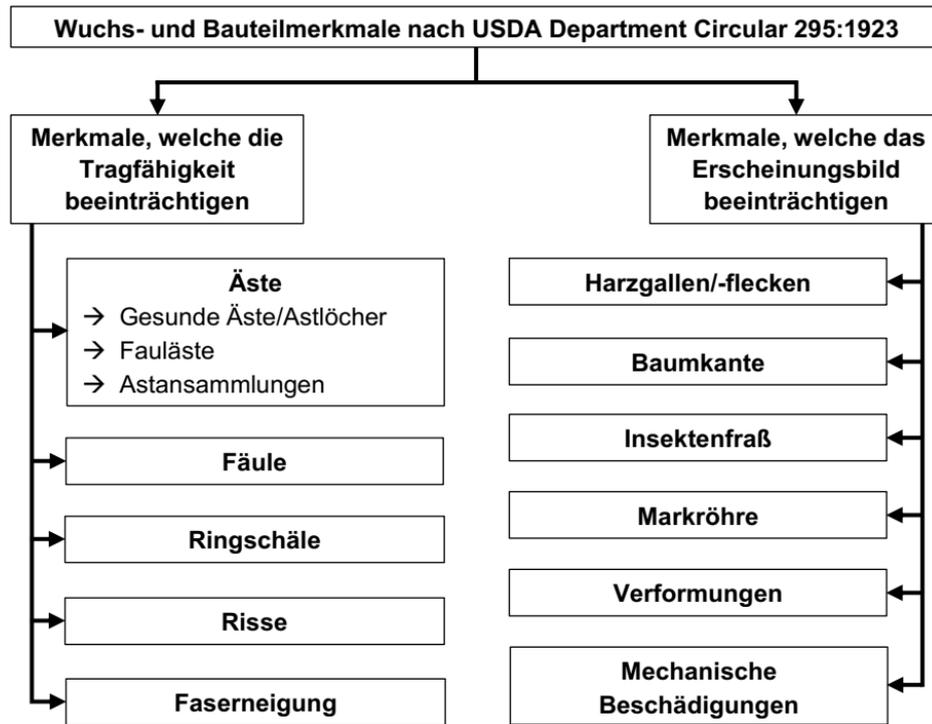


Abbildung 4: Schematisierung der Wuchs- und Bauteilmerkmale zur Sortierung von Bauholz nach USDA Department Circular 295 (nach [USDA C295, 1923], S. 6ff, eigene Darstellung)

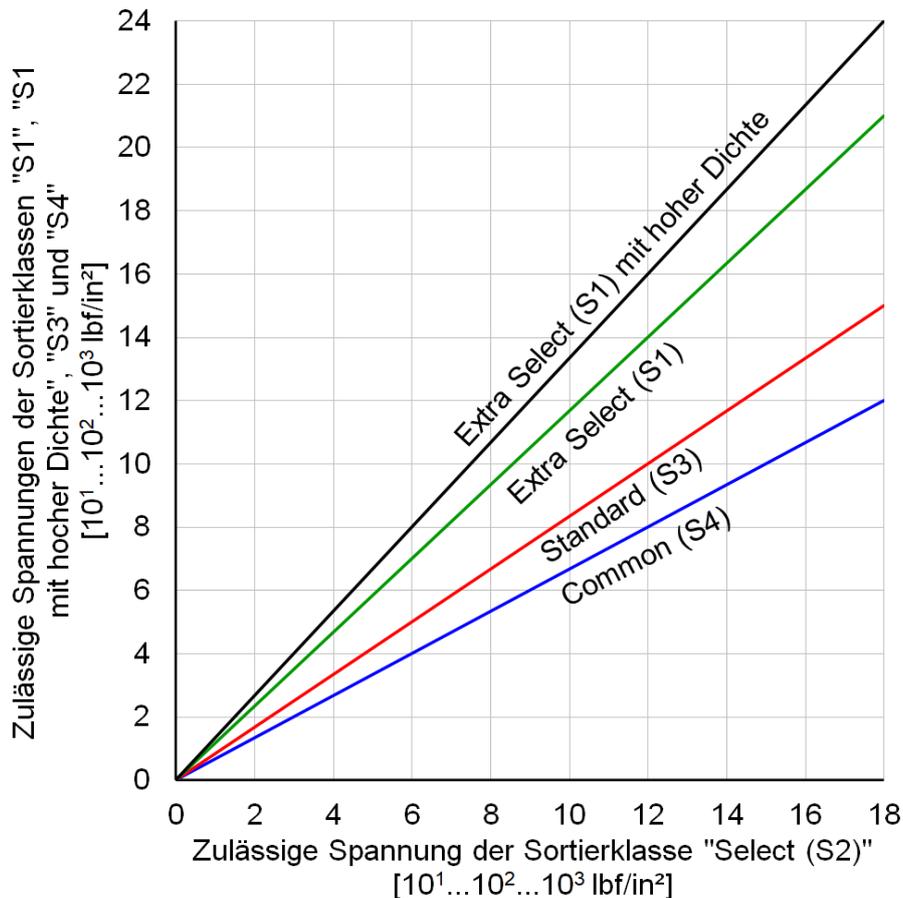


Abbildung 5: Zusammenhang der zulässigen Spannungen der Sortierklassen nach USDA C295 (nach [USDA C295, 1923], Fig. 1)

Bemerkenswert ist hierbei, dass nicht nur zwischen einzelnen Holzarten (17 Nadel- und 19 Laubholzarten) und einzelnen Materialkennwerten (Biegefestigkeit, Scherfestigkeit, Druckfestigkeit parallel/quer zur Faser, Elastizitätsmodul) unterschieden wird. Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Materialeigenschaften wird über eine Differenzierung in drei Einsatzbereiche<sup>4</sup> berücksichtigt. Unterschieden wird hierbei in:

- feuchte oder nasse Einsatzbereiche (z.B. Docks, Pfähle, Schwellen)
- Außenbereich ohne Bodenkontakt (z.B. Brücken, offene Schuppen/Hallen)
- Innenbereich ohne Feuchtebeanspruchung (z.B. Industrie-/Lagergebäude)

Vier Jahre nach Veröffentlichung der USDA Department Circular 295 wurde die Sortiernorm ASTM D 25 „*Standard Methods for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*“ in den USA eingeführt.

Die Festlegungen des Department Circular 295 [USDA C295, 1923], vor allem die Vorgehensweise bei der Sortierung von Bauholz, können – gemessen an dem damaligen internationalen Stand der Forschung – zurecht als fortschrittlich bezeichnet werden. Dies wird insbesondere deutlich, wenn man sie mit den Anforderungen der 1926 in Deutschland „*Vorläufigen Bestimmungen für Holztragwerke (BH)*“ [DRG, 1926] vergleicht. Dort wird die Qualität des Bauholzes noch allgemein beschrieben:

*„Das Schnittholz muss gesund und möglichst astfrei sein und darf keine durchgehenden Risse aufweisen. Gesunder Splint ist wie Kernholz zu bewerten. Hölzer mit nur kleinen und festverwachsenen (zarten) Ästen sind benutzbar. Hölzer mit faulen, losen oder ausgefallenen Ästen dagegen sind zu verwerfen. [...] Hölzer, deren Fasern mehr als 1:20 gegen die Längsachse geneigt verlaufen, sind von der Verwendung ausgeschlossen.“ [DRG, 1926, Abschnitt I. 3.]*

Eine Sortierung in unterschiedliche Klassen – ähnlich des Department Circular 295 [USDA C295, 1923] – ist anhand dieser Vorschrift noch nicht möglich. Lediglich hinsichtlich des Auftretens von Wald- bzw. Baumkante wird in fünf sogenannte Schnittklassen unterschieden:

*„Das Bauholz wird in 5 Schnittklassen geliefert:*

- a) scharfkantiges Holz ohne jede Waldkante;*
- b) scharfkantiges Holz, bei dem kleine Waldkanten bis zu 5% der größeren Querschnittsseite auf ganz kurze Längen vorkommen dürfen;*
- c) vollkantiges Holz, bei dem Waldkanten, und zwar bis 15% der größeren Querschnittsseite vorkommen dürfen. [...]*
- d) Holz mit üblichen Waldkanten, die bis 25% der größeren Querschnittsseite betragen dürfen;*
- e) baumkantiges Holz, das auf die ganze Länge Waldkanten besitzen darf, doch auf jeder Seite auf die ganze Länge in mindestens 5 cm Breite von der Säge gestreift sein muß.“ [DRG, 1926, Abschnitt I. 5.]*

---

<sup>4</sup> Die im USDA Department Circular 295 deklarierten Einsatzbereiche sind im weitesten Sinne vergleichbar mit den heutzutage zu berücksichtigenden Nutzungsklassen nach DIN EN 1995-1-1:2010.

Des Weiteren zeigt sich bei genauerer Betrachtung der Festlegungen der Department Circular 295 [USDA C295, 1923], dass sich das grundlegende Vorgehen nur unwesentlich von den heutzutage geltenden Vorschriften für die visuelle Sortierung von Bauholz unterscheidet.

Die Fortschrittlichkeit der in den USA geltenden Sortiervorschriften wurde auch in Deutschland erkannt. Ausgehend von den in den Untersuchungen im Auftrag der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft gewonnenen Erkenntnissen begann GRAF Ende der 1920er Jahre verstärkt auf die Unzulänglichkeiten der Handelsbräuche und das Erfordernis einer Sortierung hinzuweisen. Er begründete dies in seinem 1935 erschienenen Aufsatz *„Warum brauchen wir Güteklassen für deutsches Holz?“* im Wesentlichen mit der starken Streuung der Rohdichte innerhalb eines Stammes, innerhalb des Holzes eines Wuchsgebietes und zwischen den Wuchsgebieten sowie dem signifikanten Einfluss der Schrägfasrigkeit und der Ästigkeit auf die Tragfähigkeit von Bauholz (vgl. [Graf, 1935]).

Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen in den Jahren 1927/28 (s. a. [Schaechterle, 1929-1], [Schaechterle, 1929-2]) stellt GRAF fest, dass die wesentlichen tragfähigkeitsbeeinflussenden Wuchsmerkmale durch Inaugenscheinnahme oder durch einfache Prüfverfahren festgestellt und quantitativ erfasst werden können. Auch führt er an, dass die „Hauptauslese“ (d.h. Vorsortierung) bereits visuell und händisch erfolgen kann. Die Bestimmung der Rohdichte durch Probenentnahme ist nach GRAF nur erforderlich, wenn Bauholz mit hoher Tragfähigkeit sortiert werden soll (s. a. [Graf, 1935]).

Im Weiteren schlägt er vor, dass eine Sortierung in zwei Klassen erfolgen solle – in gewöhnliches Bauholz und in Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit – und gibt hierfür Vorschläge für die zu berücksichtigenden Sortiermerkmale und Grenzwerte an. Deren praktische Eignung soll an schadensfrei bestehenden Konstruktionen und an Schadensfällen nachgewiesen werden (vgl. [Graf, 1935]).

Etwa zur selben Zeit, befasste sich auch ERNST GABER (\* 1881, † 1952) mit der Frage der Sortierung von Bauholz. 1936 schrieb er in seinem Aufsatz *„Der Einfluß von Fehlern auf die Holzfestigkeit nach Versuchen und Rechnung“* dazu:

*„Die Fortentwicklung des Holzbaues setzt auch eine Verbesserung des Baustoffes Holz voraus. Das durch Verbesserung der Forstwirtschaft erreichbare Ziel steht noch in weiter Ferne. Es ist aber schon heute möglich, durch verbesserten Sägewerksbetrieb und sorgfältige Auslese der Balken und Bretter ein erstklassiges Bauholz zu gewinnen. Allerdings sind wir zur Zeit noch nicht in der Lage, bei der Auslese die gleichen strengen Grundsätze anzuwenden wie in Nordamerika.“* [Gaber, 1936, S. 64]

Weiterhin schlägt GABER vor, das Bauholz vorerst in lediglich drei Klassen zu sortieren (s. a. [Gaber, 1936]):

1. Klasse:       Hochwertiges Bauholz für den Ingenieurholzbau
2. Klasse:       Gewöhnliches Bauholz für den normalen Hochbau
3. Klasse:       unsortiertes Bauholz

Dabei sollte sich die Sortierung streng an dem späteren Verwendungszweck orientieren und den Einfluss der Wuchsmerkmale auf die Tragfähigkeit berücksichtigen. Die bisher üblichen Sortiermethoden und -kriterien waren hierfür unzulänglich:

*„Den Ausschlag gibt die Forderung nach genügender Tragkraft und ausreichender Beständigkeit. Die Tragkraft ist abhängig nicht so sehr von der Festigkeit des fehlerfreien Holzes als von der Festigkeit der zur verwendenden Balken und Stäbe, die immer eine Reihe von mehr oder minder vermeidbaren Mängeln und Fehlern haben. Als Fehler sollte beim Holz aber nur das angesprochen werden, was seine Tragkraft herabsetzt, während alle anderen Mißstände, die nur das Aussehen beeinträchtigen, hier nur Mängel sind. Ein vermeidbarer Fehler ist die Waldkante und vielleicht der Riß. Meist unvermeidliche Fehler aber sind Äste und Schrägfaser.“ [Gaber, 1936, S. 64]*

In seinen Untersuchungen befasste sich GABER mit dem Einfluss von Wuchsmerkmalen auf die Tragfähigkeit von Fichten- und Tannenholz in Bauteildimension. Als maßgebliche Merkmale betrachtete er die Schrägfasrigkeit, die Baumkante sowie die Ästigkeit (Einzeläste). Deren Einfluss wurde sowohl experimentell als auch durch Vergleichsrechnungen untersucht. Wesentliche Untersuchungsergebnisse waren Folgende (vgl. [Gaber, 1936], [Gaber, 1937]):

- 1) Die Schrägfasrigkeit führt zu einer Abweichung des Lastangriffes von der Faserrichtung. Hieraus resultiert eine anteilige Beanspruchung quer zur Faserrichtung, der nur geringe Festigkeiten entgegengesetzt werden können. Zusätzlich wirken in gewissem Maße auch Schubbeanspruchungen parallel zur Faserrichtung. Der Einfluss der Schrägfasrigkeit ist bei Zug- und Biegestäben deutlicher erkennbar als bei Druckstäben. Bereits geringe Faserneigungen bewirken eine Festigkeitsminderung, die über die Vergleichsrechnung nicht nachgewiesen werden konnten. Gleichzeitig sind die rechnerischen Festigkeitsminderungen generell größer als die in den Versuchen festgestellten.
- 2) Die Ästigkeit bewirkt sowohl eine Schwächung des Querschnittes als auch eine lokal begrenzte, jedoch stark ausgeprägte Schrägfasrigkeit. Daher ist der Einfluss insbesondere bei Biegestäben im Bereich des größten Biegemomentes sowie im Bereich der Randspannungen maßgebend.
- 3) Bei gleichzeitiger Berücksichtigung des Einflusses von Ästigkeit und Schrägfasrigkeit wurden Reduzierungen der Tragfähigkeit von ca. 50% festgestellt.
- 4) Die Wald- bzw. Baumkante besitzt keinen direkten Einfluss auf die Festigkeit, sondern stellt vielmehr eine Querschnittsschwächung dar. Ihr tragfähigkeitsmindernder Einfluss wird bei Biege- und Druckstäben maßgebender als bei Zugstäben. Für hochwertiges Bauholz sollte daher ausschließlich scharfkantig geschnittenes Holz verwendet werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse seiner Untersuchungen schlägt GABER folgende zulässige Abminderung der Tragfähigkeit durch vorhandene Wuchsmerkmale vor (vgl. [Gaber, 1937]):

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1. Klasse (hochwertiges Bauholz): | zulässige Abminderung auf 2/3 der Festigkeit von fehlerfreiem Holz |
| 2. Klasse (gewöhnliches Bauholz): | zulässige Abminderung auf 1/2 der Festigkeit von fehlerfreiem Holz |
| 3. Klasse (unsortiertes Bauholz): | zulässige Abminderung auf 1/3 der Festigkeit von fehlerfreiem Holz |

Auch GRAF führte seine Untersuchungen zur Festigkeit von Bauholz und dessen Sortierung nach der Tragfähigkeit fort. In seinem 1938 erschienen Aufsatz *„Tragfähigkeit der Bauhölzer*

und der Holzverbindungen“ fasste er den seinerzeit aktuellen Stand der Forschung der Materialeigenschaften von Bauholz wie folgt zusammen (s. a. [Graf, 1938]):

- 1) Die meisten Untersuchungen zur Festigkeit von Holz befassten sich mit der Druckfestigkeit von fehlerfreiem Holz und der Beziehung zur Rohdichte. Die Ergebnisse können daher nur für geradfaseriges, astfreies Bauholz verwendet werden. Gleichzeitig wird daraus jedoch deutlich, dass bei der Sortierung von Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit die Rohdichte berücksichtigt werden muss.
- 2) Der Einfluss der Faserneigung muss zwingend bei der Sortierung von Bauholz berücksichtigt werden, da sich bereits bei einer Faserneigung von 1:8 (ca. 11 %) die Druckfestigkeit um ca. 1/3 verringert. Bezüglich der Zugfestigkeit ist der Einfluss noch größer.
- 3) Äste besitzen ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf die Druck- und Zugfestigkeit. Versuche an Prüfkörpern in Bauholzdimension zeigten, dass bei Einhaltung der vorläufigen Grenzwerte der Güteklasse I etwa 1/3 höhere Festigkeiten ausgenutzt werden können als bei der Güteklasse II.
- 4) Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit kann nicht pauschal für alle Festigkeiten festgelegt werden. So besteht beispielsweise bei der Druckfestigkeit ein annähernd geradliniger Zusammenhang. Bei Zugbeanspruchung hingegen nimmt die Festigkeit mit abnehmender Feuchtigkeit zwar zu, sinkt aber ab einer Holzfeuchtigkeit von 8-10 % erneut ab.
- 5) Die Tragfähigkeit von biegebeanspruchten Bauteilen ist stark abhängig von den Wuchseigenschaften. Bei geradfaserigen Hölzern entspricht das Tragverhalten im Wesentlichen dem druckbeanspruchter Bauteile. Ist eine ausgeprägte Schrägfasrigkeit oder Ästigkeit vorhanden, so wird das Tragverhalten maßgeblich durch die Zugfestigkeit beeinflusst.

In den weiteren Jahren führte GRAF Untersuchungen zum Einfluss der Baumkante [Graf, 1939] und der Schwindrisse [Graf, 1940] durch. Auf Grundlage seiner Untersuchungsergebnisse bestätigte sich, dass die Baumkante nur einen untergeordneten Einfluss auf die Tragfähigkeit besitzt (vgl. [Gaber, 1936], [Gaber, 1937]). Eine Festlegung von Grenzwerten für die Baumkante sei daher ausgehend von den Festigkeitseigenschaften nicht erforderlich. Als Ursache wird der Umstand angeführt, dass sich im Bereich der Baumkante tragfähiges Holz befindet, welches bei scharfkantig geschnittenen Balken entfernt wird (vgl. [Graf, 1940]). Lediglich die passgenaue Ausführung von Anschlüssen und Gewährleistung einer ausreichenden Verbindungsfläche erfordern eine Begrenzung der Baumkante (vgl. [Graf, 1939]). Schwindrisse hingegen führen bei biegebeanspruchten Bauteilen zu einer signifikanten Abminderung der Schubtragfähigkeit, wenn diese horizontal im Bauteil verlaufen (vgl. [Graf, 1940], [Graf, 1941]).

Im Zusammenhang mit der Überarbeitung der Holzbau-Bemessungsnorm DIN 1052 Ende der 1930er Jahre wurde auch die Frage der Erforderlichkeit einer Sortierung von Bauholz erörtert (s. DIN 1052:1930 in [Rug, 2016]). Die wesentliche Neuerung der 1940 eingeführten Fassung der DIN 1052 war die Einführung der Güteklassen entsprechend der 1939 eingeführten Sortiervorschrift DIN 4074 (vgl. [Graf, 1941]).

*„Es ist eine alte Gepflogenheit der Baumeister und der Handwerker, das Holz nach den Wuchseigenschaften auszusuchen; vor allem wird dabei die Ästigkeit und der Faserverlauf (krumm oder verdreht oder gerade gewachsen) beachtet. Die Auslese geschah nach örtlichen Erfahrungen, mehr oder minder beeinflusst von den wirtschaftlichen Verhältnissen des*

*Holzmarktes oder des Verbrauchers. Die übliche Auslese ist von viel Willkür begleitet. Es war nötig, auf grund von zahlenmäßigen Feststellungen anzugeben, welche Ästigkeit und welcher Faserverlauf gleichzeitig vorhanden sein dürfen, wenn das Holz bestimmte Anstrengungen ertragen soll.“ [Graf, 1944-1, S. 22]*

Weiterführend zu der von GRAF und GABER vorgeschlagenen Einteilung in drei Klassen – hochwertiges Bauholz, gewöhnliches Bauholz und unsortiertes Bauholz (s. [Graf, 1935], [Gaber, 1936]) – wurde nach DIN 4074:1939 das Bauholz in drei Güteklassen sortiert:

Güteklasse I: Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit

Güteklasse II: Bauholz mit gewöhnlicher Tragfähigkeit

Güteklasse III: Bauholz mit geringer Tragfähigkeit

Für die Entwicklung der ersten in Deutschland eingeführten normativen Sortiervorschrift waren die Untersuchungen der 1920er und 1930er maßgeblich. Die wesentlichen Kriterien, anhand derer die Tragfähigkeit des Bauholzes abgeschätzt wurde, waren die Rohdichte, die Jahrringbreite, der Faserverlauf sowie die Ästigkeit. Des Weiteren wurden Einflussfaktoren, wie die Holzfeuchtigkeit, die Schnittklasse (Baumkante) sowie der allgemeine Zustand des Holzbauteiles, berücksichtigt.

Die Berücksichtigung des tragfähigkeitsreduzierenden Einflusses der Schrägfasrigkeit und der Ästigkeit bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit stellte sich dabei als schwierigste Aufgabe dar (vgl. [Graf, 1941]). Die in der DIN 4074:1939 angegebenen Grenzwerte sind zum einen aus Laborversuchen abgeleitet worden. Zum anderen aber wurden Holzbauteile in bestehenden, ordnungsgemäß ausgeführten Konstruktionen, die ihre zugewiesene Tragfunktion augenscheinlich schadfrei erfüllten, hinsichtlich der Ausprägung des Faserverlaufes und der vorhandenen Äste untersucht (s. [Graf, 1944-2]). Ebenso untersuchte man Holzbauteile aus Konstruktionen, bei denen es zu einem Bauteilversagen kam (vgl. [Graf, 1935]).

Der Einfluss der Rohdichte auf die Festigkeitseigenschaften, der aus zahlreichen Untersuchungen abgeleitet werden konnte, wurde durch die Festlegung einer Mindestrohndichte für Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (Güteklasse I nach DIN 4074:1939) berücksichtigt. Hierdurch sollte Bauholz, welches zwar weitestgehend fehlerfrei ist, aber eine zu geringe Rohdichte aufweist, aussortiert werden. Als Indikator für die Rohdichte eignet sich auch die Jahrringbreite (s. [Graf, 1944-1]).

Einen weiteren Fortschritt stellt die Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchtigkeit auf die Tragfähigkeit dar. Dem wird durch Unterscheidung in drei Zustände Rechnung getragen (s.a. [DIN 4074:1939]) – frisch ( $\omega > 30 \%$ ), halbtrocken ( $\omega = 30 \dots 20 \%$ ) und trocken ( $\omega \leq 20 \%$ ). Neben der Beeinflussung der Tragfähigkeit werden dadurch auch zwei weitere Umstände berücksichtigt. Zum einen soll durch die Begrenzung der Holzfeuchtigkeit der Schutz der Holzbauteile vor holzerstörenden Organismen im eingebauten Zustand gewährleistet werden. Zum anderen können bestimmte Merkmale – d.h. Schwindrisse und Verformungen – erst im trockenen Zustand vollständig erfasst und bewertet werden (s. [Graf, 1941]).

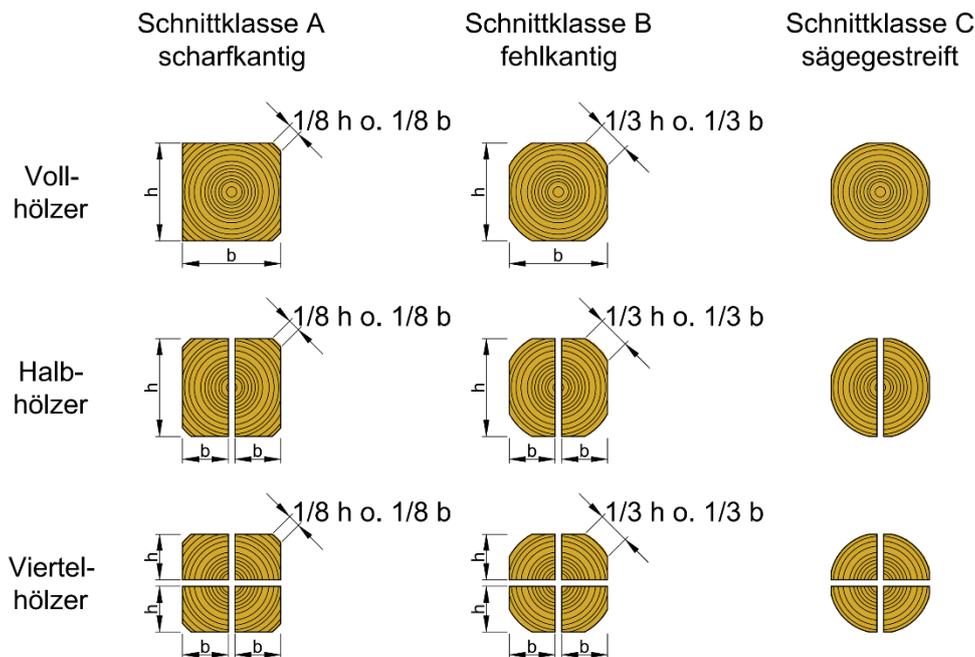
Die Wirtschaftlichkeit der Sortierung von Bauholz nach der Tragfähigkeit kann durch die Begrenzung und in gewisser Weise durch die Zulässigkeit der Baumkante verbessert werden. Eine Begrenzung der Baumkante ist im Wesentlichen nur für die Herstellung von

formschlüssigen Verbindungen und Anschlüssen erforderlich (vgl. a. [Gaber, 1936], [Gaber, 1937], [Graf, 1939]). Hierzu wurden die Schnittklassen eingeführt. Diese orientieren sich stark an den Festlegungen der „Vorläufigen Bestimmungen für Holztragwerke (BH)“ [DRG, 1926]. Unterschieden wird dabei jedoch nicht mehr wie bisher in fünf, sondern nur noch in drei Klassen (s. Abbildung 6). Durch die eingeschränkte Zulässigkeit von Baumkante ist auch die Verwendung von schwachen Hölzern wirtschaftlich möglich (vgl. [Graf, 1944-1]).

**Tabelle 3: Schnittklassen nach DIN 4074:1939 (nach [Graf, 1944-2], Tab. 3)**

Schnittklasse	Zulässige Anzahl von Fehlkanten	Größte zulässige Breite als Bruchteil der größten Querschnittsabmessung (schräg gemessen)
A: scharfkantiges Bauholz	2	1/8
B: fehlkantiges Bauholz	4	1/3 <sup>1)</sup>
C: sägegestreiftes Bauholz	Dieses Bauholz muß an allen vier Seiten durchlaufend von der Säge gestreift sein	

<sup>1)</sup> wobei aber in jedem Querschnitt mindestens 1/3 jeder Querschnittsseite von Baumkante frei sein muß



**Abbildung 6: Schnittklassen und Grenzwerte für zulässige Baumkante nach DIN 4074:1939 (nach [Graf, 1944-2], Abb. 5)**

Generell weist GRAF darauf hin, dass die strenge Anwendung und Einhaltung der Regelungen der DIN 4074 zwingend erforderlich ist, um die bestmögliche technologische und wirtschaftliche Nutzung von Bauholz zu gewährleisten (s. [Graf, 1941]).

### 2.2.2. Entwicklung der normativen Regelungen zur visuellen Festigkeitssortierung in Deutschland

Die Einführung der ersten Fassung der DIN 4074 im Jahr 1939 ermöglichte eine wesentlich effizientere und wirtschaftlichere Nutzung von Holz als Baustoff. Erst durch eine differenzierte Beurteilung der Tragfähigkeit konnten Holzbauteile hinsichtlich ihrer Funktion sowie der angenommenen Beanspruchung ausgewählt werden. Des Weiteren war es durch die Einteilung in

die drei Güteklassen nun möglich, eine größere Bandbreite an Schnittholz als tragende Holzbauteile zu verwenden.

Die grundlegenden Festlegungen und Herangehensweisen wurden später auch in andere europäische Normen übernommen. Beispielhaft sind hier die 1951 erschienene österreichische ÖNORM B 4100-2 und die 1953 erschienene schweizerische SIA 163 zu nennen (vgl. [Meierhofer/Richter, 1989-1], [Augustin, 2004]).

Bemerkenswert ist, dass bereits in der 1939 eingeführten Fassung der DIN 4074 eine Vielzahl verschiedener Sortiermerkmale berücksichtigt wurde, wie die nachfolgende Auflistung zeigt:

- Allgemeine Beschaffenheit: Fäule (Rot- und Weißfäule), Verfärbungen (rote und braune Streifen, Bläue), Ringschäle, Blitz-/Frostrisse, Insektenfraß
- Schnittklasse (Baumkante)
- Maßhaltigkeit
- Holzfeuchtigkeit
- Mindestrohndichte und Jahrringbreite (für Güteklasse I)
- Äste (Einzeläste & Astansammlungen)
- Faserverlauf
- (Längs-)Krümmungen

Bei genauerer Betrachtung der Sortiermerkmale fällt jedoch auf, dass diese aus heutiger Sicht noch unvollständig und die entsprechenden Grenzwerte noch recht allgemein gehalten sind. So werden Schwindrisse noch nicht berücksichtigt, obwohl ihr tragfähigkeitsmindernder Einfluss bereits in vorangegangenen Untersuchungen belegt werden konnte (vgl. [Graf, 1940], [Graf, 1941]). Auch hinsichtlich der Verformungen werden nur Längskrümmungen der Bauteile berücksichtigt. Des Weiteren beziehen sich die Festlegungen der DIN 4074:1939 nur auf Kantholzquerschnitte aus Nadelholz. Laubschnittholz sowie andere Bauteilquerschnitte (Bretter, Bohlen und Baurundholz) werden in dieser Fassung noch nicht berücksichtigt.

Die zweite, 1958 erschiene Fassung der DIN 4074 umfasste schon zwei Teile und galt für Bauschnittholz (s. [DIN 4074-1:1958]) und Baurundholz (s. [DIN 4074-2:1958]) aus Nadelholz. Laubholz fand in dieser Fassung noch keine Berücksichtigung.

Auch wurde versucht, die Unzulänglichkeiten der ersten Fassung zu beseitigen und die technologischen Fortschritte der Zwischenzeit zu berücksichtigen. Die wesentlichen Änderungen und Neuerungen der DIN 4074-1/-2:1958 sind nachfolgend aufgelistet.

### **Sortierung von Brettern und Bohlen:**

*Bedingt durch die Fortschritte in der Entwicklung der Brettschichtholzbauweise wurden die Gütebedingungen auch auf Bretter und Bohlen erweitert. Die angegebenen Sortiermerkmale sind nun allgemeingültig für Kantholz und Bretter/Bohlen zu betrachten. Die Sortiermerkmale Äste – d. h. Einzeläste und Astansammlungen – werden sogar differenziert für Kanthölzer und Bretter/Bohlen betrachtet (vgl. [DIN 4074-1, 1958], Tabelle 2, Ziffer 7.1.1-7.2.2).*

### **Allgemeine Beschaffenheit von Schnittholz:**

Die Bewertung der „Allgemeinen Beschaffenheit“ – das umfasst Fäule, Verfärbungen, Insektenfraß, Blitz-/Frostrisse und Ringschäle sowie Mistelbefall – erfolgt nun differenziert nach der vorgesehenen Einbausituation. Unterschieden wird dabei in „Hölzer ohne Schutzbehandlung“ zur Verwendung in trockener Einbausituation sowie in „Hölzer mit Holzschutz gemäß DIN 68800“ für die Verwendung im Freien und im Feuchtbereich. (vgl. [DIN 4074-1, 1958], Tabelle 2, Ziffer 1).

### **Sortierung von Baurundholz:**

Bei der Sortierung von Baurundholz wird ebenfalls in die Güteklassen I, II und III unterschieden. Berücksichtigt werden dabei die Sortiermerkmale „Allgemeine Beschaffenheit“ (unterteilt analog den Gütebedingungen für Bauschnittholz), „Feuchtigkeitsgehalt“, „Mindestwichte“, „Jahringbreite“, „Äste“ (Einzeläste und Astansammlungen) und „Krümmung“ (Längskrümmung) (vgl. [DIN 4074-2, 1958]).

Trotz der aufgeführten Änderungen und Neuerungen sind nicht alle Defizite beseitigt worden:

- 1) Schwindrisse sind noch nicht als Sortiermerkmal enthalten, obwohl der tragfähigkeitsmindernde Einfluss nachgewiesen ist
- 2) Verformungen außer der Längskrümmung – d. h. Querkrümmungen und Verdrehungen – werden noch nicht berücksichtigt
- 3) Die Festlegungen gelten nur für Nadelschnitt-/rundholz, Holzbauteile aus Laubholz bleiben noch unberücksichtigt

Die Festlegungen der überarbeiteten Fassung der DIN 4074-1:1958 fanden auch außerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Anwendung. Der 1963 in der Deutschen Demokratischen Republik eingeführte Fachbereich-Standard TGL 117-0767 orientierte sich sehr eng an der DIN 4074-1:1958. So entspricht der überwiegende Teil der berücksichtigten Sortiermerkmale und deren Grenzwerte den Festlegungen der DIN 4074-1. Wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Normen sind zum einen, dass die „zulässigen Holzfehler“<sup>5</sup> nicht nach einer etwaigen Holzschutzmittelbehandlung der zu sortierenden Holzbauteile differenziert werden. Zum anderen enthält die TGL 117-0767:1963 keine Festlegungen hinsichtlich der Holzfeuchtigkeit.

Die Einführung der überarbeiteten Fassung der Holzbaubemessungsnorm DIN 1052 im Jahr 1988 sowie die Entwicklungen auf dem Gebiet der maschinellen Sortierung machten eine erneute Überarbeitung der Sortiervorschriften für Bauholz erforderlich. Ein Jahr später wurde dann die dritte Fassung der DIN 4074 eingeführt. Diese umfasste nun vier Teile. Die neu hinzugekommenen Normenteile befassten sich mit den Anforderungen und Eignungsnachweisen von Anlagen und Betrieben für die maschinelle Sortierung (s. [DIN 4074-3:1989], [DIN 4074-4:1989]). Die DIN 4074-2:1958 wurde nicht überarbeitet.

Die Festlegungen zur visuellen Sortierung von Nadelschnittholz sind in der 1989 eingeführten Fassung der DIN 4074-1 deutlich detaillierter formuliert, wie die nachfolgende Auflistung zeigt.

---

<sup>5</sup> Entspricht der „Allgemeinen Beschaffenheit“ der DIN 4074-1:1958

### **Einführung der Sortierklassen:**

Anstelle der bisher verwendeten Güteklassen wurde die Bezeichnung der Sortierklassen eingeführt. Unterschieden wird nun in die Sortierklassen S 7 (entspricht Güteklasse III, Schnittholz mit geringer Tragfähigkeit), S 10 (entspricht Güteklasse II, Schnittholz mit üblicher Tragfähigkeit) und S 13 (entspricht Güteklasse I, Schnittholz mit überdurchschnittlicher Tragfähigkeit). Die Bezeichnung der Sortierklassen zeigt gleichzeitig die zugehörige zulässige Biegespannung an – beispielsweise Holz der Sortierklasse S 10 besitzt eine zulässige Biegespannung von 10 N/mm<sup>2</sup>.

### **Unterteilung von Schnittholz:**

Schnittholz wird in vier Gruppen eingeteilt – Latten, Bretter, Bohlen und Kantholz. Hierzu werden erstmals auch konkrete geometrische Verhältnisse geregelt (vgl. [DIN 4074-1:1989], Tabelle 1). Die Sortiermerkmale und deren Grenzwerte sind differenziert nach Kanthölzern und Brettern/Bohlen/Latten geregelt (vgl. [DIN 4074-1:1989], Tabellen 2-3).

### **Verfahren zur Messung der Sortiermerkmale:**

Erstmals werden sämtliche Sortiermerkmale und deren Messverfahren in der Sortiervorschrift erläutert. Hierdurch wird eine bessere praktische Umsetzbarkeit der Sortierregeln gewährleistet, so dass die Sortierung flächendeckender angewendet werden kann.

### **Allgemeine Beschaffenheit von Schnittholz:**

Die „Allgemeine Beschaffenheit“ wurde in mehrere Sortiermerkmale aufgeteilt – Verfärbungen, Druckholz, Insektenfraß und Mistelbefall. Zum Teil sind dazu messbare Grenzwerte festgelegt worden (vgl. [DIN 4074-1:1989], Tabellen 2-3, Ziffer 6-9).

### **Ästigkeit:**

Die Ästigkeit wird bei Kanthölzern nur noch über Einzeläste ermittelt. Astansammlungen finden aber bei Brettern, Bohlen und Latten weiterhin Anwendung (vgl. [DIN 4074-1:1989], Abschnitt 4.2).

### **Faserneigung:**

Die Faserneigung wird an Schwindrissen oder mittels eines Ritzgerätes gemessen. Eine Unterscheidung der Grenzwerte bei unterschiedlichen Messverfahren erfolgt nicht mehr (vgl. [DIN 4074-1:1989], Abschnitt 4.4).

### **Schwindrisse:**

Schwindrisse sind als Sortiermerkmal aufgenommen worden. Eine Begrenzung der Rissgeometrie erfolgte jedoch noch nicht (vgl. [DIN 4074-1:1989], Tabellen 2-3, Ziff. 5).

### **Verformungen:**

Bezüglich der zu berücksichtigenden Verformungen ist bei Kanthölzern die Verdrehung hinzugekommen. Bei Brettern, Bohlen und Latten ist zusätzlich die Querkrümmung zu beachten (vgl. [DIN 4074-1:1989], Tabellen 2-3, Ziffer 10).

### **Markröhre:**

Bei Brettern, Bohlen und Latten muss nun auch das Vorhandensein der Markröhre berücksichtigt werden (vgl. [DIN 4074-1:1989], Tabelle 3, Ziffer 11). Hierdurch wird die deutlich

*geringere Festigkeit des juvenilen Holzes, welches sich durch breitere Jahrringe um die Markröhre erkennen lässt, einbezogen. Dies kann insbesondere bei kleinen Querschnitten zu einer signifikanten Reduzierung der Tragfähigkeit führen.*

Die wesentliche Neuerung der DIN 4074-1:1989 ist jedoch die Festlegung von Anforderungen an die maschinelle Sortierung. Dies umfasst die möglichen Sortierklassen (MS 7 bis MS 17), die zusätzlich visuell zu erfassenden Sortiermerkmale, welche durch Sortiermaschinen nicht zuverlässig erfasst werden können sowie Anforderungen an die verwendeten Sortiermaschinen und die Kennzeichnung. Zusätzlich legen die DIN 4074-3/-4:1989 Anforderungen an Sortieranlagen, deren Prüfung sowie an die Eignung der sortierenden Betriebe fest. Die maschinelle Sortierung wird an anderer Stelle ausführlich betrachtet (s. Abschnitt 2.3).

Im Zuge der europaweiten Harmonisierung der nationalen und europäischen Normen wurde die DIN 4074 erneut überarbeitet und an die EN 14081-1 angepasst (vgl. [Glos/Torno, 2009], [DIN 4074-1:2003]). Die Festlegungen hinsichtlich der visuellen Sortierung von Nadelschnittholz wurden weiter differenziert. Beispielsweise wurde eine Messbezugsfeuchte von  $\omega < 20\%$  festgelegt und in trockensortiertes und nicht trockensortiertes Schnittholz unterschieden. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal liegt darin, dass die Sortiermerkmale „Schwindrisse“ und „Krümmung“ bei nicht trockensortiertem Holz unberücksichtigt bleiben, da deren Ausprägung durch Quell- und Schwindverformungen beeinflusst wird (vgl. [DIN 4074-1:2003], Tabellen 2 bis 4, Fußnote b). Für Schwindrisse wurden auch erstmals Grenzwerte für die Risstiefe angegeben. Somit wird der in Versuchen beobachteten Tragfähigkeitsreduzierung in der Sortierung Rechnung getragen (s. bspw. [Graf, 1940], [Graf, 1941]). Weiterhin wurden die Definitionen einzelner Sortiermerkmale präzisiert – bspw. Baumkante und Verfärbungen.

Auch die unterschiedlichen Schnittholzarten werden nun differenzierter betrachtet. Bei Brettern und Bohlen wird entsprechend der vorgesehenen Beanspruchung unterschieden. Vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen werden wie Kantholz behandelt und sortiert. Des Weiteren wurden eigene Sortierkriterien für Latten festgelegt.

Mit der dritten Überarbeitung der DIN 4074 wurde auch der Teil 5 dieser Normenreihe für die Sortierung von Laubschnittholz eingeführt. Diese orientierte sich stark an der Sortierung von Nadelschnittholz nach DIN 4074-1:2003. Maßgebend für die Erarbeitung der Sortiermerkmale und -kriterien für Laubschnittholz waren die Untersuchungen von GLOS und LEDERER. Diese untersuchten neben der Tragfähigkeit von Eichen- und Buchenschnittholz auch deren Beeinflussung durch Wuchsmerkmale. Auf Grundlage ihrer Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass die Sortierung von Laubschnittholz unter Ansatz der für Nadelschnittholz geltenden Regelungen möglich ist (vgl. [Glos/Lederer, 2000]).

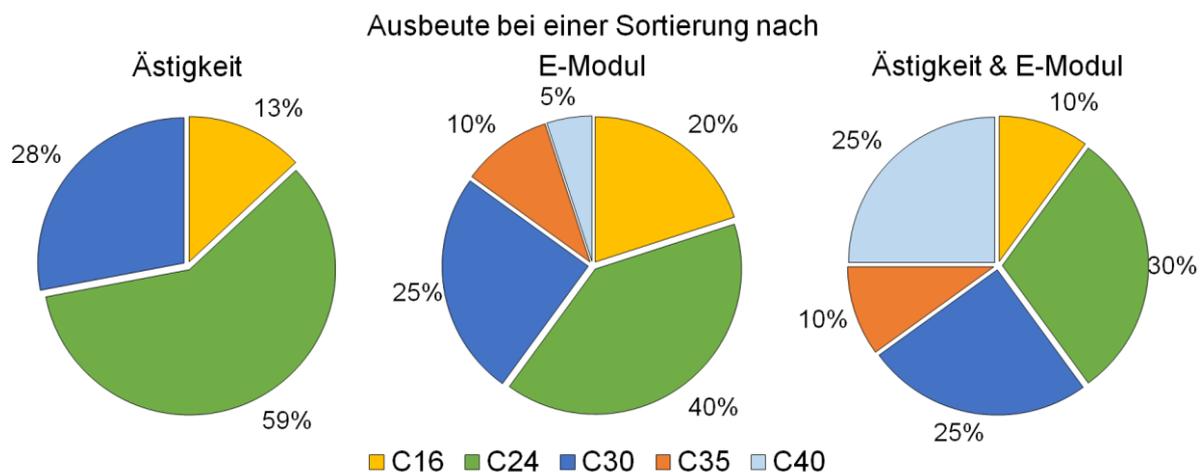
Mit fortschreitender Entwicklung der europäischen Normen wurden auch die in Deutschland geltenden Sortiervorschriften angepasst und für den praktischen Einsatz weiterentwickelt. Die letzte grundlegende Überarbeitung erfolgte im Jahr 2008. Die wesentlichen Änderungen waren die Streichung der Regelungen zur maschinellen Sortierung, Kennzeichnung und zum Übereinstimmungsnachweis sowie deren Überführung in europäische Normen (vgl. [DIN 4074-1:2008] und [DIN 4074-5:2008], S. 3). Anstelle der maschinellen Sortierung wurde die apparativ unterstützte Sortierung in die DIN 4074 aufgenommen. Analog zur maschinellen Sortierung in den vorangegangenen Fassungen ist eine Sortierung in höhere Klassen möglich, als es durch eine ausschließlich visuelle Sortierung möglich ist. Hintergrund sind die geringen

Korrelationen zwischen den visuell feststellbaren Sortiermerkmalen und den Festigkeits-/Steifigkeitseigenschaften (s. Tabelle 4; vgl. a. [Glos, 1995], [Denzler/Glos, 2009], [Sando-meer/Steiger, 2009]).

**Tabelle 4: Zusammenhang zwischen zerstörungsfrei messbaren Schätzwerten der Festigkeit (Indicating properties „IP“) und zerstörend gemessenen Festigkeiten (aus [Denzler/Glos, 2009])**

Schätzwert der Festigkeit (IP)	Bestimmtheitsmaß (R <sup>2</sup> )
Jahrringbreite	0,15 ... 0,35
Ästigkeit	0,15 ... 0,35
Rohdichte	0,20 ... 0,40
Eigenfrequenz, Ultraschallgeschwindigkeit	0,30 ... 0,55
Elastizitätsmodul, statisch	0,40 ... 0,65
Elastizitätsmodul, dynamisch	0,30 ... 0,55
Ästigkeit & Rohdichte	0,40 ... 0,60
Ästigkeit & Elastizitätsmodul	0,55 ... 0,75
Ästigkeit, Rohdichte & Elastizitätsmodul	0,55 ... 0,80

Dies hat zur Folge, dass Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse  $\geq$  C35 nach DIN EN 338) durch eine rein visuelle Sortierung nicht sortiert werden kann (s. Abbildung 7, vgl. [Blaß/Görlacher, 1996]).



**Abbildung 7: Vergleich der Ausbeute der Sortierung nach verschiedenen Kriterien (nach [Blaß/Görlacher, 1996])**

Das Verfahren der apparativ unterstützten visuellen Sortierung wurde unter anderem durch BLAß und FRESE in den Jahren 2000-2002 untersucht (s. [Blaß/Frese, 2002], [Blaß/Frese, 2004]). Im Ergebnis konnte die prinzipielle Eignung dieses kombinierten Sortierverfahrens belegt werden. Das von ihnen vorgeschlagene Verfahren bestand im Wesentlichen aus der Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls, der Ermittlung der Rohdichte und der Sortierung anhand der Merkmale Ästigkeit, Faserneigung, Risse, Baumkante, Krümmung, Verfärbungen & Fäule sowie Insektenfraß. Als Grenzwerte wurden die für Kantholz und Bretter/Bohlen geltenden Kriterien der Sortierklasse S 10 verwendet. Dabei stellten sie auch fest, dass der gänzliche Verzicht auf eine visuelle Sortierung zu einem erkennbaren Abfall der charakteristischen Festigkeit des Probenmaterials führte (vgl. [Blaß/Frese, 2002]).

Das von BLAß und FRESE vorgeschlagene Verfahren fand im Wesentlichen unverändert Einzug in die DIN 4074-1/-5:2008. Die Anforderungen nach DIN 4074-3/-4:2008, die an die verwendeten Apparaturen sowie an die Eignung der sortierenden Betriebe gestellt werden, entsprechen grundlegend den Anforderungen, welche in den vorangegangenen Fassungen an die maschinelle Sortierung gestellt wurden.

Im Jahr 2012 wurde die DIN 4074-1 geringfügig überarbeitet. Konkret wurde die für Fichten- und Douglasienholz zulässige Abhängigkeit der Ästigkeitsgrenzwerte von der Jahrringbreite gestrichen (s. [DIN 4074-1:2012]). Die DIN 4074-2 wurde im Jahr 2021 erstmalig überarbeitet. Die wesentlichen Änderungen betreffen die Messbezugsholzfeuchte, der Ersatz der Güteklassen durch Sortierklassen für Baurundholz sowie die Konkretisierung der Sortierkriterien und deren Messung (s. [DIN 4074-2:2021]). Festlegungen zur Übertragung der Sortierklassen nach DIN 4074-2 in Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 fehlen jedoch bis dato.

### **2.2.3. Vor- und Nachteile der visuellen Festigkeitssortierung**

Die Entwicklung der visuellen Sortierung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stellte einen grundlegenden Fortschritt in der Verwendung von Schnittholz als Baustoff dar. Die Sortierung von Bauholz ermöglichte eine wesentlich genauere Abschätzung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen, als dies bis dato auf der Grundlage von Erfahrungswerten und Handelsgebräuchen möglich war. Dadurch konnten Holzbauteile gezielt entsprechend der vorgesehenen Beanspruchung ausgewählt und eingesetzt werden (vgl. [Graf, 1944], [Gaber, 1936]). Dies ermöglichte eine optimale und vor allem wirtschaftliche Holzverwendung. Hierdurch wurden nicht zuletzt auch die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus im Allgemeinen gesteigert (vgl. [Graf, 1944]).

Die Qualität und Leistungsfähigkeit eines Sortierverfahrens können nach [Meierhofer/Richter, 1988] grundlegend anhand ihrer Differenziertheit (d.h. der Anzahl der möglichen Klassen), an dem Investitions- und Arbeitsaufwand sowie der daraus resultierenden Wirtschaftlichkeit beurteilt werden.

Wendet man diese Bewertungskriterien auf die visuelle Festigkeitssortierung an, zeigt sich, dass eine für heutige Verhältnisse geringe Trennschärfe vorliegt, da nur eine Sortierung in drei Klassen möglich ist. Andererseits kann die visuelle Festigkeitssortierung aber mit einem relativ geringen Aufwand durchgeführt werden, da lediglich geschultes Personal und einfache Hilfsmittel für die Sortierung benötigt werden.

Diese doch oberflächliche Bewertung der visuellen Festigkeitssortierung berücksichtigt jedoch nicht den vollen Umfang ihrer Vorteile, die im Wesentlichen nachfolgend aufgeführt sind.

#### ***Umfang der Sortierkriterien:***

*Die normativen Festlegungen berücksichtigen zahlreiche Sortiermerkmale. Neben sehr häufig vorzufindenden Wuchseigenschaften – bspw. Äste, Faserneigungen, Baumkante und Risse – können auch selten auftretende Merkmale – bspw. Wipfelbruch, mechanische Beschädigungen, Einschlüsse und Stammverletzungen – erfasst und bei der Sortierentscheidung berücksichtigt werden.*

**Messung der Sortierkriterien:**

*Die visuelle Festigkeitssortierung wird mit einem „intelligenten Messsystem“ durchgeführt, denn der Sortierende hat die Möglichkeit, die normativen Festlegungen an die individuellen Gegebenheiten eines jeden Stückes Schnittholz anzupassen.*

**Einbindung in den Produktions- und Verarbeitungsprozess:**

*Die visuelle Festigkeitssortierung kann flexibel in den Verarbeitungsprozess eingebunden werden. So kann das Schnittholz direkt nach der Herstellung im Sägewerk oder auch erst bei der weiteren Verarbeitung sortiert werden.*

*Das Sortierergebnis ist einfach nachzuvollziehen, da nur von außen sichtbare Merkmale berücksichtigt werden. In Verbindung mit der oben beschriebenen flexiblen Einsetzbarkeit besteht so während des gesamten Verarbeitungsprozesses die Möglichkeit einer Nachkontrolle und Optimierung – beispielsweise durch Auskappen von Schwach-/Fehlstellen. Des Weiteren besteht in gewissem Umfang die Möglichkeit einer nachträglichen Kontrolle im eingebauten Zustand.*

**Aufwand der Sortierung:**

*Wie bereits erwähnt ist für die Durchführung der visuellen Festigkeitssortierung nur ein geringer Kostenaufwand erforderlich, da keine aufwändigen technischen Anlagen benötigt werden.*

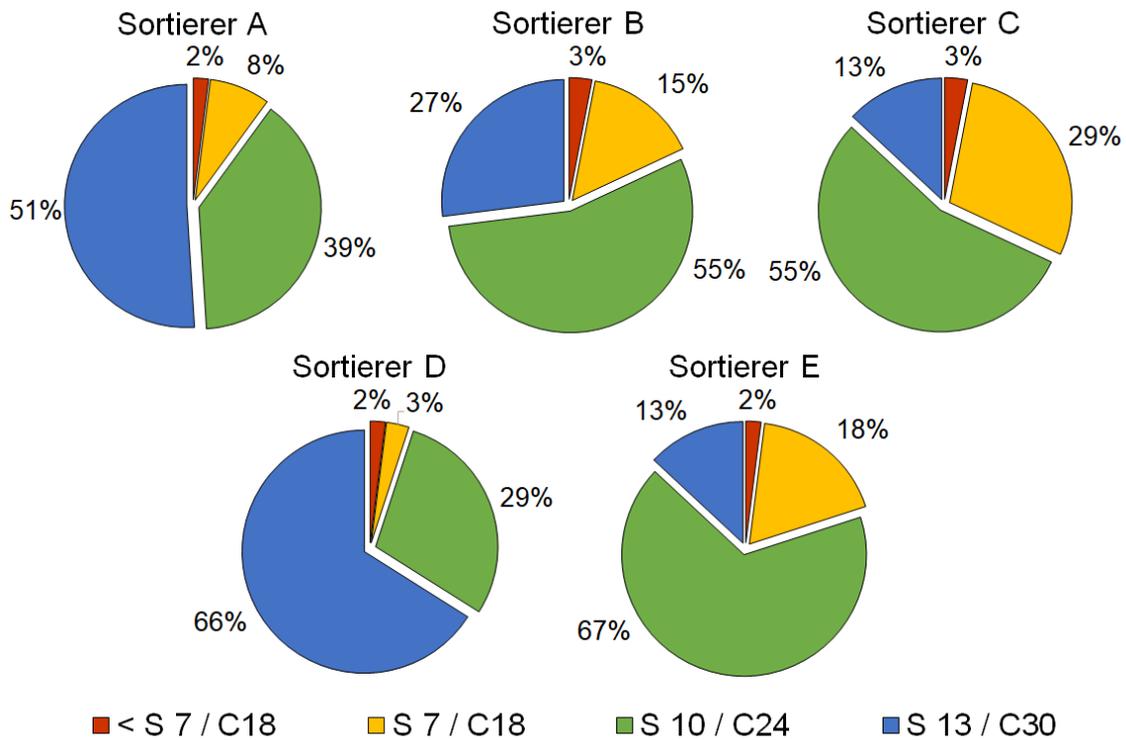
Trotz der aufgeführten Vorteile ist die visuelle Festigkeitssortierung noch fernab von einem genauen und wirtschaftlichen Sortierverfahren, wie die nachfolgende Auflistung zeigt.

**Genauigkeit der Sortierung:**

*Die Erfassung der Sortiermerkmale – insbesondere die Messgenauigkeit – und damit auch das Sortierergebnis ist in hohem Maße abhängig von der subjektiven Einschätzung des Sortierenden (vgl. [Solar, 1988]). Lässt man beispielsweise dieselbe Stichprobe Schnittholz von mehreren Personen sortieren, so wird festzustellen sein, dass jeder Sortierende zu einem anderen Sortierergebnis kommt (vgl. [Augustin, 1998], [Augustin, 2004] und Abbildung 8).*

*Die Subjektivität der visuellen Sortierung führt dazu, dass die tatsächliche Tragfähigkeit des Bauholzes nicht zuverlässig genug abgeschätzt wird und sowohl über- als auch unterschätzt werden kann. Darüber hinaus ist die zuverlässige Sortierung von Bauholz mit überdurchschnittlicher Tragfähigkeit (Sortierklasse S 13/LS 13 nach DIN 4074-1/5) nur bei exakter und sorgfältiger Anwendung der normativen Festlegungen möglich (vgl. [Blaß/Frese, 2002], [Blaß/Frese, 2004], [Pischl, 1998]).*

*Die praktische Anwendbarkeit der visuellen Festigkeitssortierung ist nur gegeben, wenn die Regelungen entsprechend einfach gehalten werden. Dies führt dazu, dass die visuelle Festigkeitssortierung generell nur eine grobe Abschätzung der Tragfähigkeit von Bauholz ermöglicht (vgl. [Diebold, 1997]). Die daraus resultierende Aussageungenauigkeit erfordert eine Absicherung der rechnerisch nutzbaren Tragfähigkeit. Hieraus können wirtschaftliche Einbußen entstehen (vgl. [Denzler/Glos, 2009]).*



**Abbildung 8: Vergleich des Sortierergebnisses bei Sortierung einer Stichprobe durch mehrere Personen (nach [Augustin, 1998] und [Augustin, 2004])**

**Trennschärfe der Sortierung:**

Die Trennschärfe der visuellen Festigkeitssortierung ist beschränkt. So kann nach DIN 4074 nur in drei Klassen unterschieden werden. Des Weiteren geht die Zuordnung der Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen meist nicht über die Festigkeitsklasse C30 nach DIN EN 338 hinaus. Die Ursache hierfür ist der Umstand, dass wesentliche Einflussfaktoren auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Bauholz rein visuell nicht erkannt werden können. Dies betrifft insbesondere die Rohdichte, welche lediglich anhand der Jahringbreite grob abgeschätzt werden kann. Dies hat zum einen zur Folge, dass die Ausbeute von Bauholz mit überdurchschnittlicher Tragfähigkeit (Sortierklasse S 13/LS 13 nach DIN 4074-1/5 bzw. C30/D30 nach DIN EN 338) vergleichsweise gering ausfällt (vgl. [Blaß/Frese, 2002], [Blaß/Frese, 2004]). Zum anderen ist eine Sortierung von Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse C35/D35 nach DIN EN 338 und höher) auf Grundlage der visuellen Festigkeitssortierung nicht möglich (vgl. [Blaß/Görlacher, 1996], [Blaß/Frese, 2002], [Blaß/Frese, 2004]). Das potenziell vorhandene hochtragfähige Bauholz wird dadurch generell unterschätzt (s. [Sandomeer/Steiger, 2009]).

**Wirtschaftlichkeit der Sortierung:**

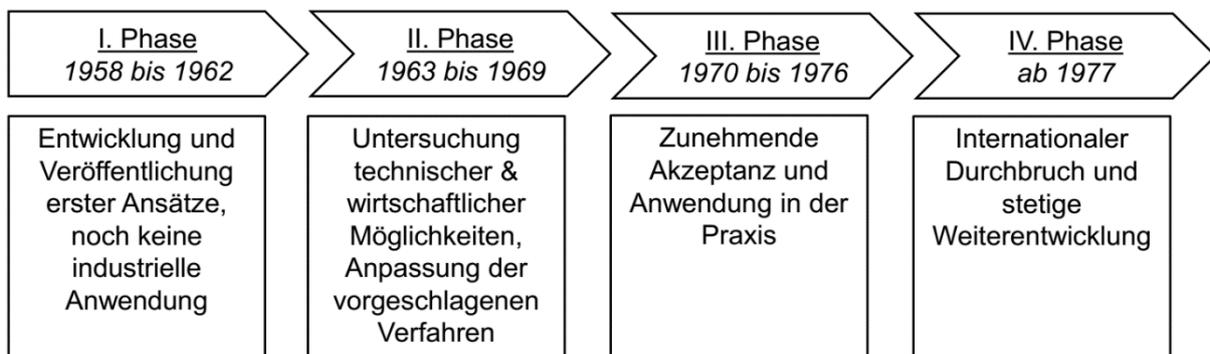
Die Wirtschaftlichkeit der visuellen Sortierung wird maßgeblich durch den hohen zeitlichen Aufwand beschränkt. Dies hat zur Folge, dass die visuelle Festigkeitssortierung für Produktionsprozesse mit hohen Durchlaufgeschwindigkeiten – bspw. die Brettschichtholzproduktion – ungeeignet ist (vgl. [Sandomeer/Steiger, 2009] & [Görlacher, 1997]). Des Weiteren entsteht durch den hohen zeitlichen Aufwand trotz geringer Investitionskosten ein hoher finanzieller Aufwand. Dies kann ebenfalls zu Unwirtschaftlichkeit führen (vgl. [Thunell, 1955]).

Die oben aufgeführten Vor- und Nachteile einer rein visuellen Festigkeitssortierung verdeutlichen, dass diese zwar ein probates Mittel zur Abschätzung und Bewertung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen ist, eine objektive und genauere Feststellung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften jedoch zusätzlicher Methoden bedarf. Dieses Defizit kann nur durch den Einsatz zerstörungsfreier Methoden erfolgen, wie es bei der apparativ unterstützten visuellen und der maschinellen Festigkeitssortierung der Fall ist (vgl. [Palm, 1995], [Pischl, 1997], [Denzler/Glos, 2009], [Sandomeer/Steiger, 2009]).

## 2.3. Die maschinelle Festigkeitssortierung

### 2.3.1. Entwicklung der maschinellen Festigkeitssortierung

Die im Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Defizite der visuellen Festigkeitssortierung stellten Hindernisse für die fortschreitende Entwicklung des Ingenieurholzbaus zu Beginn der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dar. Aufgrund zunehmender Produktionsgeschwindigkeiten und der stetig wachsenden Bedeutung der Qualitätssicherung war eine Weiterentwicklung der traditionell geprägten visuellen Festigkeitssortierung unumgänglich. Zusätzlich stieg die Nachfrage nach Bauholz mit hoher Tragfähigkeit. Um diesen Forderungen gerecht zu werden und um die Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit der Holzsortierung zu steigern, wurde seit den 1950er/60er Jahren vor allem in den USA, Australien und Großbritannien verstärkt an der Entwicklung einer maschinellen Festigkeitssortierung gearbeitet (s. [Denzler/et al., 2005], [Denzler/Glos, 2009]). In den 1970er Jahren erkannte auch die Brettschichtholz-Industrie im deutschsprachigen Raum das Potential der maschinellen Festigkeitssortierung (s. [Glos, 2000]). Nach [Glos/Schulz, 1980] lässt sich die internationale Entwicklung der maschinellen Festigkeitssortierung im Wesentlichen in vier Phasen darstellen (s. Abbildung 9).



**Abbildung 9: Entwicklung der maschinellen Festigkeitssortierung (nach [Glos, 2000], eigene Darstellung)**

Bis die ersten Sortieranlagen Praxisreife erreichten, dauerte es in Deutschland etwa weitere 15 Jahre. In den Jahren 1980-1983 wurde der Nutzen der maschinellen Festigkeitssortierung in umfassenden Festigkeitsuntersuchungen nachgewiesen (vgl. [Glos, 2000]). Die Ergebnisse der systematischen Erforschung flossen in den darauffolgenden Jahren in die Überarbeitung der DIN 4074 ein. Die 1989 eingeführte Fassung der DIN 4074 enthielt mit den Teilen DIN 4074-3:1989 und DIN 4074-4:1989 die ersten normativen Regelungen zur maschinellen Festigkeitssortierung. Erstmals wurden Anforderungen an deren Durchführung, an die zum Einsatz kommenden Sortieranlagen und deren Prüfung, aber auch an die Eignung der sortierenden Betriebe festgelegt (s. a. Abschnitt 2.2.2).

Zu diesem Zeitpunkt waren noch keine Sortiermaschinen in Deutschland bauaufsichtlich zugelassen, geschweige denn auf dem Markt verfügbar. Daher erfolgte die Erarbeitung der normativen Regelungen der DIN 4074-3/-4:1989 hauptsächlich auf Grundlage erster Forschungsergebnisse und nicht wie sonst üblich anhand des Standes der Technik. Dabei musste berücksichtigt werden, dass die Normen eine Entwicklung ermöglichen und gleichzeitig begleitend steuern können (vgl. [Glos, 2000]).

Die normativen Regelungen der DIN 4074-3/-4 blieben in den folgenden Jahren in den grundlegenden Festlegungen unverändert (vgl. [DIN 4074-3:2003], [DIN 4074-4:2003]). Im Zuge der Harmonisierung der europäischen Normen wurde die maschinelle Festigkeitssortierung aus den deutschen Regelwerken gestrichen und durch die apparative Unterstützung der visuellen Festigkeitssortierung ersetzt (s. Abschnitt 2.2.2, vgl. [DIN 4074-3:2008], [DIN 4074-4:2008]). Die maschinelle Festigkeitssortierung wird seit 2006 über die europäischen Normen DIN EN 14081-2:2006 und DIN EN 14081-3:2006 geregelt. Diese Regelungen sind bis heute unverändert gültig (vgl. [DIN EN 14081-2:2018], [DIN EN 14081-3:2018]).

Die Grundlage der maschinellen Festigkeitssortierung bilden die Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften von Holz und zerstörungsfrei messbaren Kennwerten. Wie im Abschnitt 2.2.2 bereits erläutert, bestehen zwischen den visuell erkenn- und messbaren Sortiermerkmalen und den tatsächlichen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften nur geringe Korrelationen (s. a. Tabelle 4). Daraus resultiert eine relativ große Aussageungenauigkeit hinsichtlich der Materialeigenschaften sowie – da das Sortierergebnis auf der sicheren Seite liegen soll – eine generelle Unterschätzung der Tragfähigkeit der Holzbauteile. Um die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften jedoch möglichst genau und zuverlässig abschätzen zu können, müssen Kennwerte herangezogen werden, welche eine möglichst enge Beziehung zu den Materialeigenschaften aufweisen (s. [Denzler/Glos, 2009]). Eine zusätzliche Erhöhung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Vorhersage wird durch die gleichzeitige Verwendung mehrerer Kennwerte erreicht (vgl. [Denzler/et al., 2005]).

Zahlreiche Untersuchungen zeigten, dass die Rohdichte einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit und die Steifigkeit von Holz besitzt (s. Abbildung 10). Die Bestimmung der Rohdichte von Holzbauteilen ist maschinell einfach durchzuführen. Der Zusammenhang zwischen den Festigkeitseigenschaften und der Rohdichte ist relativ stark ausgeprägt. Laut [Glos, 1995] u.a. liegt der Korrelationskoeffizient zur Biege-, Zug- und Druckfestigkeit von Brettern und Bohlen in einem Bereich von  $r = (0,5...0,6)$ . Im Zusammenspiel mit der Bestimmung visuell erfass- und messbarer Sortiermerkmale – wie beispielsweise der Ästigkeit – ergibt sich eine deutliche Verbesserung des Zusammenhanges (s. Abbildung 11). Dies erlaubt eine genauere und zuverlässigere Abschätzung der Festigkeitseigenschaften (s. Tabelle 5).

Weiterhin wird aus Tabelle 5 ersichtlich, dass der Elastizitätsmodul als alleinstehendes Sortiermerkmal den stärksten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften besitzt (s. a. Abbildung 12). Auch wird ersichtlich, dass die gleichzeitige Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls und der Rohdichte zu keiner Verbesserung des Zusammenhanges führt. Die Kombination aus Elastizitätsmodul und Ästigkeit hingegen liefert die beste Korrelation zu den Festigkeitseigenschaften. Jedoch ist auch hier die Verbesserung des Zusammenhanges im Vergleich zur Verwendung des Elastizitätsmoduls als alleiniges Sortiermerkmal gering. Eine Erklärung hierfür wird in [Glos, 1995] nicht gegeben.

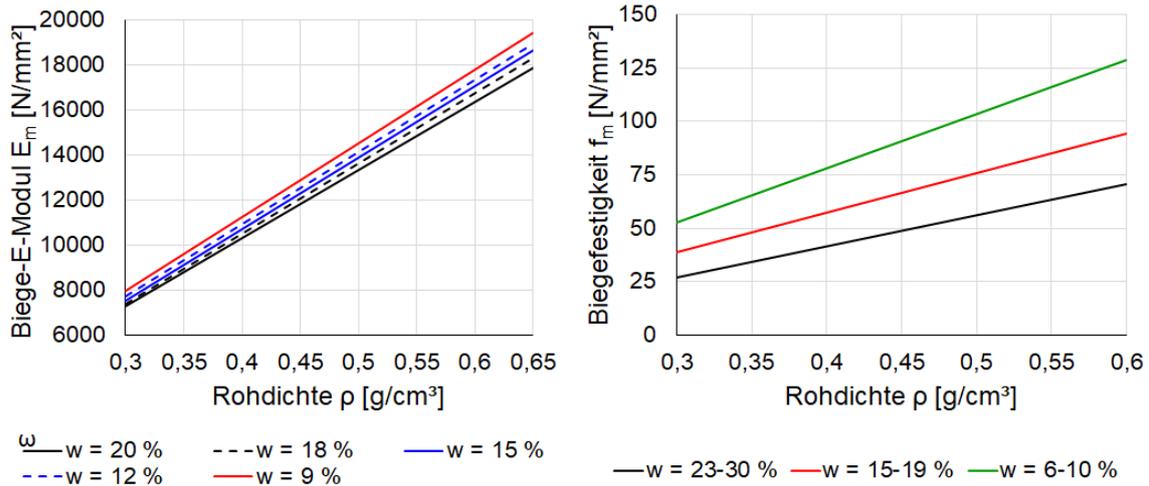


Abbildung 10: Einfluss der Rohdichte auf die Festigkeit und Steifigkeit von schwedischer Kiefer nach Untersuchungen von THUNELL und SCHLYTER (nach [Kollmann, 1982])

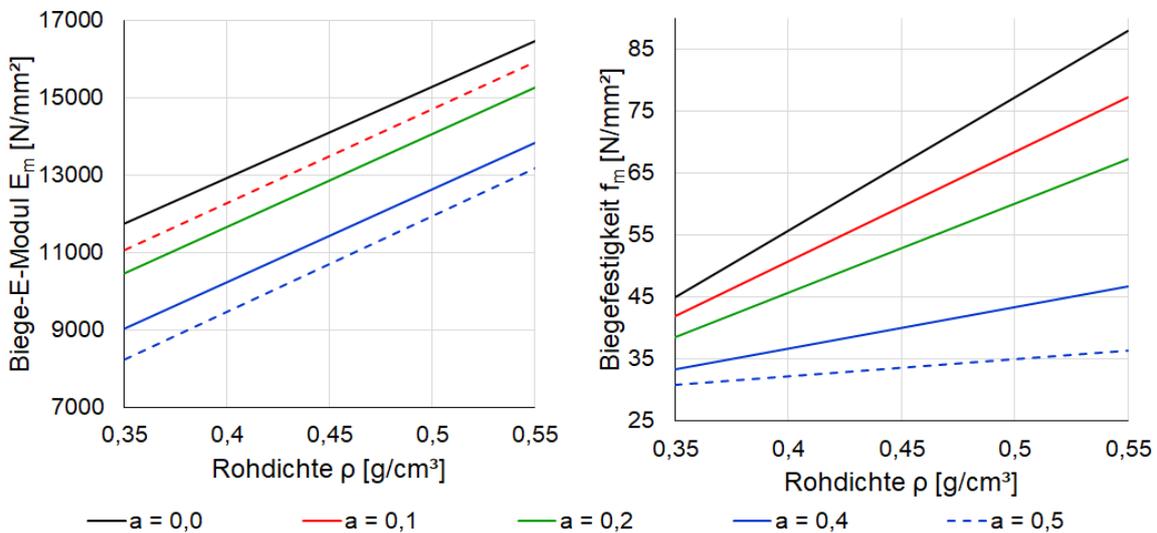
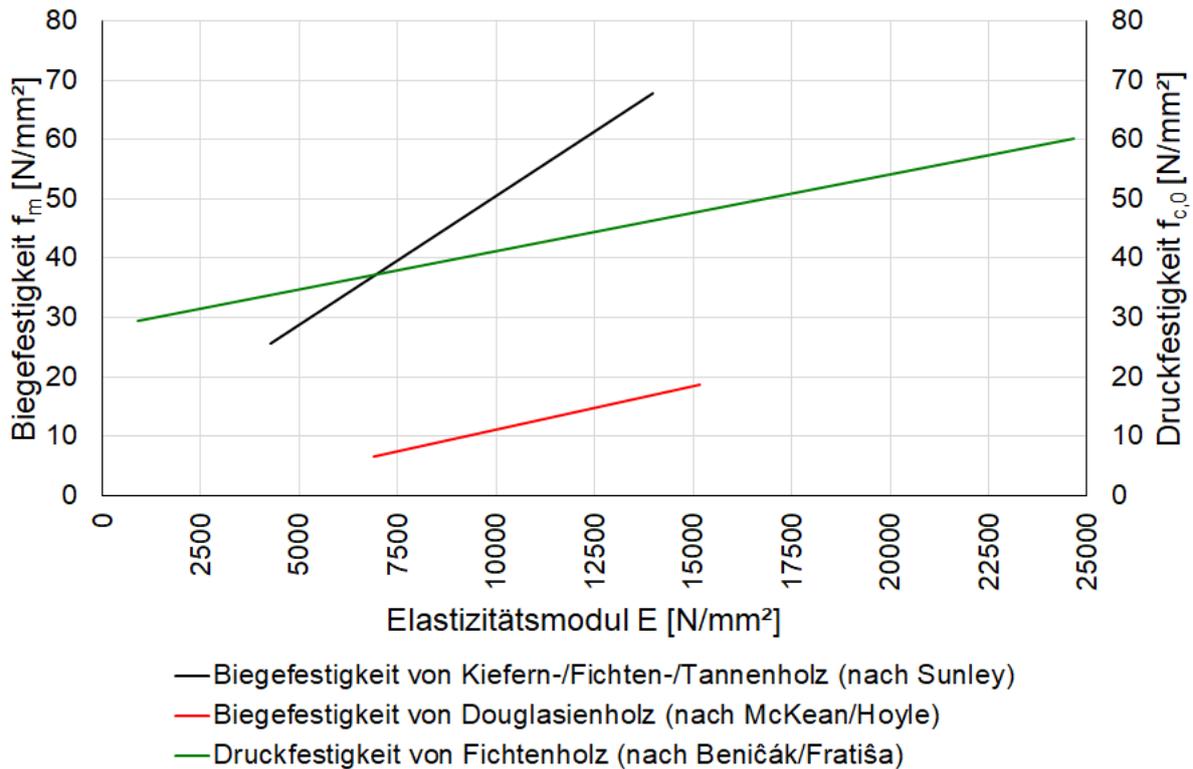


Abbildung 11: Einfluss der Rohdichte und der Ästigkeit ( $a$ ) auf die Festigkeit und Steifigkeit von Holz nach Untersuchungen von GLOS/GAMM an 280 Balken aus Fichtenholz (nach [Glos/Gamm, 1987])

Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten möglicher Sortierkriterien und Festigkeitseigenschaften ermittelt an Brettern und Bohlen aus europäischem Nadelholz (aus [Glos, 1995])

Sortierparameter	Korrelation mit		
	Biegefestigkeit	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit
Ästigkeit	0,5	0,6	0,4
Faserneigung	0,2	0,2	0,1
Rohdichte	0,5	0,5	0,6
Jahringbreite	0,4	0,5	0,5
Ästigkeit & Jahringbreite	0,5	0,6	0,5
Ästigkeit & Rohdichte	0,7-0,8	0,7-0,8	0,7-0,8
Elastizitätsmodul	0,7-0,8	0,7-0,8	0,7-0,8
Elastizitätsmodul & Rohdichte	0,7-0,8	0,7-0,8	0,7-0,8
Elastizitätsmodul & Ästigkeit	>0,8	>0,8	>0,8



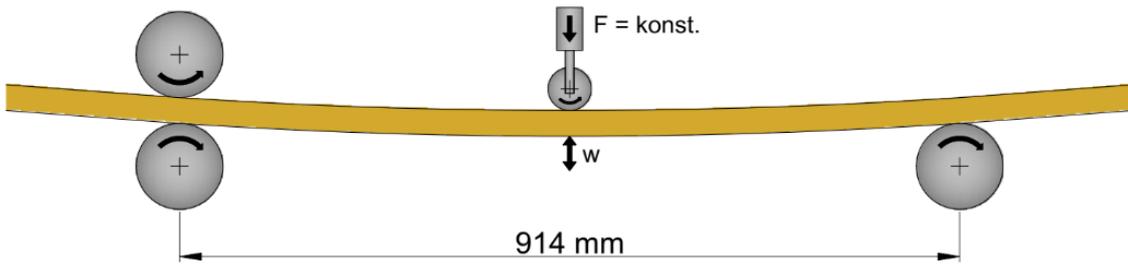
**Abbildung 12: Einfluss des Elastizitätsmoduls auf die Festigkeit von Nadelholz nach Untersuchungen von SUNLEY, McKEAN/HOYLE und BENIČÁK/FRATIŠA (nach [Kufner, 1977])**

Der enge Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und den Festigkeitseigenschaften führte dazu, dass das Biegeprinzip das älteste und bis heute am häufigsten verwendete Messverfahren für die maschinelle Festigkeitssortierung ist (vgl. u.a. [Denzler/et al., 2005], [Palm, 1995], [Solar, 1988]). Bei diesem Verfahren werden die Holzbauteile im elastischen Bereich auf Biegung beansprucht. Aus der Durchbiegung und der Rückstellkraft kann dann der Biege-Elastizitätsmodul als globaler Kennwert für die Materialqualität der Bauteile ermittelt werden. Dieses Sortierverfahren kann im Durchlauf zum Einsatz kommen, wodurch hohe Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 150 m/min realisierbar sind.

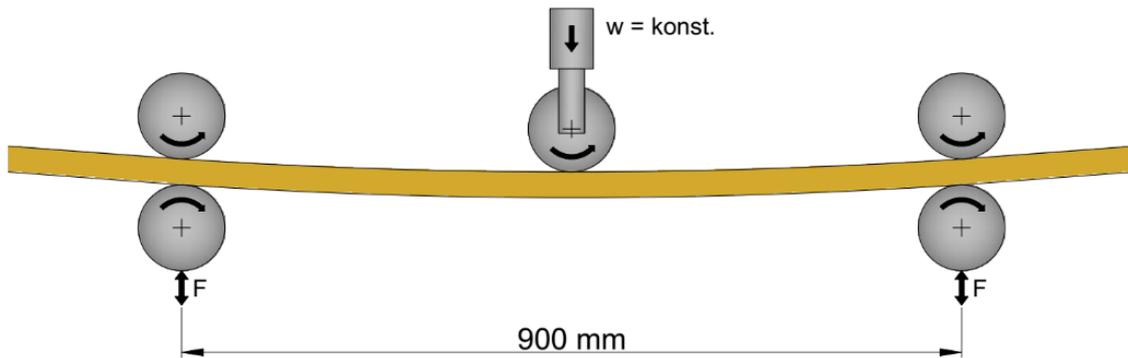
Je nach Bauart der Sortieranlage erfolgt die Durchbiegung entweder mit konstanter Kraft (bspw. Typ „Computermatic“) oder mit konstanter Durchbiegung (bspw. Typ „Cook-Bolinder“ oder „EuroGreComat“). Erfolgt die Durchbiegung in beide Richtungen (bspw. Typ „Continuos Lumber Tester“ oder „Raute Timber Grader“), wird das Sortierergebnis zusätzlich abgesichert. Die unterschiedlichen Arbeitsweisen sind in Abbildung 13 dargestellt.

Das Biegeprinzip besitzt jedoch unabhängig von der verwendeten Methode gewisse Unschärfen. So können beispielsweise nur begrenzte Querschnittsdicken sortiert werden. Üblicherweise liegt die Grenze bei  $d = 55 \dots 80$  mm (s. u.a. [Denzler/et al., 2005], [Glos, 2000], [Sandomeer/Steiger, 2009]). Des Weiteren werden die Enden der Holzbauteile sowie eventuelle Vorkrümmungen nicht erfasst. Diese müssten zusätzlich visuell ermittelt und bewertet werden, was zu einer Verschlechterung des Sortierergebnisses führen kann (vgl. [Solar, 1988]). Ebenso können verdeckte Vorschädigungen, die zur Reduzierung der Tragfähigkeit führen können, nicht ausgeschlossen werden (vgl. [Denzler/Glos, 2009]).

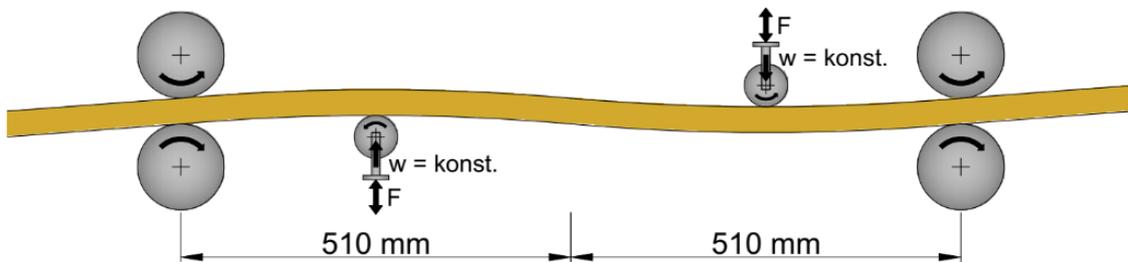
Computermatic  
Messung der Durchbiegung bei konstanter Kraft



EuroGreComat 704  
Messung der Rückstellkraft bei konstanter Durchbiegung



Raute Timber Grader  
Messung der Rückstellkraft bei konstanter Durchbiegung



**Abbildung 13: Schematische Darstellung der Arbeitsweise ausgewählter Sortiermaschinen (nach [Denzler, 2007], eigene Darstellung)**

Um diese Einschränkungen zu beseitigen und um weitere tragfähigkeitsbeeinflussende Merkmale erfassen zu können, wurden bis dato mehrere zerstörungsfreie Prüfmethode auf ihre Eignung für die maschinelle Festigkeitssortierung hin untersucht (s. a. Tabelle 6).

Die zahlreichen Untersuchungen auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Ermittlung von Materialkennwerten haben dazu geführt, dass in modernen Sortieranlagen neben dem Durchbiegungsverfahren hauptsächlich Durchschallungs-/Durchstrahlungsverfahren sowie optische Methoden angewendet werden (s. a. Tabelle 7 und [Denzler/et al., 2005], [Denzler/Glos, 2009], [Bacher, 2008], [Stapel/Rais, 2010]).

**Tabelle 6: Ausgewählte, für die maschinelle Festigkeitssortierung nutzbare Messmethoden**

Messmethoden	Erfassbare Kenngrößen	Ausgewählte weiterführende Literatur
Längsschwingungen/ Eigenfrequenz- messung	- Elastizitätsmodul	[Görlacher, 1984], [Plinke, 2005], [Denzler/Glos, 2009], [Ross, 2015]
Durchschallung (Ultraschall)	- Elastizitätsmodul - Strukturstörungen	[Boström, 1994], [Steiger, 1995-1], [Gehri, 1995], [Gehri, 1998], [Beall, 2000], [Divos/et al., 2000], [Karsulovic/et al., 2000], [Sandoz/Benoit, 2007], [Ross, 2015]
Durchstrahlung (Röntgen/ Computer- tomographie)	- Rohdichte - Strukturstörungen	[Krohn/Palm, 1981], [Kolb/Gruber, 1981], [Boström, 1994], [Görlacher, 1997], [Beall, 2000], [Brandstätter, 2000], [Schajer, 2001], [Plinke, 2005], [Denzler/Glos, 2009]
Mikrowellen	- Rohdichte - Ästigkeit - Faserneigung - Holzfeuchtigkeit	[James/et al., 1985], [Boström, 1994], [Beall, 2000], [Baradit/et al., 2006], [Lundgren/et al., 2006], [Bogosanovic/ et al., 2010], [Denzler/Weidehiller, 2015], [Schlotzhauer/et al., 2018]
Elektrische Verfahren	- Faserneigung - Holzfeuchtigkeit	[Schlotzhauer/et al., 2018]
Optische Verfahren	- Faserneigung („Tracheiden-Effekt“) - Oberflächenmerkmale - Verformungen - Querschnitt	[Åstrand/Åström, 2000], [Beall, 2000], [Pölzleitner/Schwingshaki 2000], [Schickhofer, 2000], [Schickhofer/Augustin, 2000], [Ross, 2015], [Schlotzhauer/et al., 2018]
Thermographie	- Dichte - Strukturstörungen - Fäule	[Tanaka/Divos, 2000], [Wyckhuysse/Maldague, 2002], [Plinke, 2005]

**Tabelle 7: Methoden der maschinellen Sortierung (nach [Denzler, 2007], [Denzler/et al., 2005], [Krzosek/Bacher, 2011])**

Sortiermethode	Ermittelte Kennwerte	Beispiele für Sortieranlagen
Durchbiegung	- Elastizitätsmodul	EuroGreComat 704; Grademaster 403 ; Metriguard 7200 HCLT; Computermatic MK5B
Schwingungs- messung	- Elastizitätsmodul	EuroGreComat 706; Dynagrade; Microtec ViSCAN; Brookhuis MTG
Durchschallung	- Elastizitätsmodul	Metriguard 2350; Triomatic
Durchstrahlung	- Rohdichte & Ästigkeit	EuroGrecomat 702/704/706 ; Grademaster 403; Microtec GoldenEye
Optische Ver- fahren	- Ästigkeit, Strukturstörungen - Oberflächenmerkmale - Verformungen	WoodEye Strength Grader; RS-BoardScannerQ; Micortec Curvescan

Generell wird bei der maschinellen Festigkeitssortierung unabhängig von der angewendeten Sortiermethode in zwei Arbeitsweisen unterschieden. Sortieranlagen können entweder maschinen- oder ausgabekontrolliert arbeiten (vgl. [DIN EN 14081-2:2018], [DIN EN 14081-3:2018]). Üblicherweise kommen maschinenkontrollierte Sortieranlagen zum Einsatz, wobei Einstellwerte festgelegt werden, welche im Wesentlichen als Grenzwerte der Sortierparameter (Schätzwert der Festigkeit) zu verstehen sind. Diese waren bis 2016 in der DIN EN 14081-4 jeweils für separate Sortieranlagen festgelegt (s. [DIN EN 14081-4:2009] und Tabelle 8).

**Tabelle 8: Einstellwerte für maschinenkontrollierte Sortiersysteme am Beispiel der Anlage „Goldene 702“ (Auszug aus DIN EN 14081-4 nach [Denzler, 2007])**

Land	Holzart	Querschnitt [mm]	Klasse	Einstellwerte	Bemerkung
DE AT CZ	Fichte Tanne	$30 \leq t_n \leq 50$ $95 \leq t_n \leq 280$	L 25 <sup>1)</sup> L 17 <sup>2)</sup>	L 25: $IP \geq 21,6$ L 17: $21,6 > IP \geq 16,9$	L 25: - $f_{t,k} = 14,50 \text{ N/mm}^2$ - $E_{t,mean} = 11000 \text{ N/mm}^2$ - $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ L 17: - $f_{t,k} = 11,00 \text{ N/mm}^2$ - $E_{t,mean} = 9000 \text{ N/mm}^2$ - $\rho_k = 320 \text{ kg/m}^3$ Holztemperatur: $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$ Holzfeuchte: 7 – 15 % Sortiergeschw.: bis 450 m/min Oberfläche: gehobelt/sägerau
1) entspricht Festigkeitsklasse T14,5 nach DIN EN 338:2016, Tabelle 2					
2) entspricht Festigkeitsklasse T11 nach DIN EN 338:2016, Tabelle 2					

Mit Zurückziehung der DIN EN 14081-4 im Jahr 2016 wurden die Festlegungen der Einstellwerte in die DIN EN 14081-2 übernommen. Dort werden jedoch keine maschinenspezifischen, sondern methodenspezifische Festlegungen getroffen. Des Weiteren werden nur noch Einstellwerte für Sortieranlagen angegeben, welche mit Schwingungsmessung und Rohdichtebestimmung arbeiten (vgl. [DIN EN 14081-4:2009] und Tabelle 9).

**Tabelle 9: Einstellwerte für maschinenkontrollierte Sortiersysteme am Beispiel von Festigkeitsklassen für Nadelholz basierend auf der Schwingungsmessung (Auszug aus [DIN EN 14081-2:2018], Tabelle D.2)**

Land	Holzart	Querschnitt [mm]	Klasse	Einstellwerte	Bemerkung
DE AT CZ	Fichte Tanne	$32 \leq t_n \leq 50$ $85 \leq t_n \leq 240$ Mindestquerschnittsfläche von $3600 \text{ mm}^2$	C24 C18	C24: $IP \geq 13100$ C18: $IP \geq 9550$	Holztemperatur: $> -10 \text{ }^\circ\text{C}$ Holzfeuchte: 6 – 22 % Sortiergeschw.: bis 450 m/min Oberfläche: gehobelt/sägerau

Die Maschineneinstellwerte müssen aus umfassenden Materialuntersuchungen abgeleitet werden, wobei sowohl die Holzart und das Herkunftsgebiet als auch die Schnittholzdimensionen und jeweiligen Sortierklassen zu berücksichtigen sind (vgl. [Sandomeer/Steiger, 2009]). Derartige Untersuchungen können jedoch nur anhand von Stichproben geführt werden. Um die Repräsentativität dennoch zu gewährleisten, wurden Richtlinien entwickelt, welche in die aktuell gültige Fassung der DIN EN 14081-2 aufgenommen worden sind (s. [DIN EN 14081-2:2018], Anhang A). Im Wesentlichen sind bei der Festlegung der Probennahme-Strategie die Größe des Wuchsgebietes, etwaige bekannte Streuungen und die Praxisnähe der untersuchten Prüfkörper zu berücksichtigen.

Die maschinenkontrollierte Arbeitsweise besitzt jedoch einen grundlegenden Nachteil. Eine nachträgliche Anpassung der Maschineneinstellwerte anhand festgestellter Streuungen ist nicht oder nur durch erneute Prüfungen möglich (vgl. [Sandomeer/Steiger, 2009]).

Die ausgabekontrollierte Arbeitsweise kann diesen Nachteil kompensieren. Die Festlegung der Einstellwerte erfolgt durch den Herstellerbetrieb. Hierbei können die Ergebnisse der laufenden Produktionskontrolle – d.h. zerstörende Prüfung einer Stichprobe, beispielsweise aus der Tagesproduktion – genutzt werden, um die Einstellwerte laufend zu modifizieren und damit zu optimieren. Die ausgabekontrollierte Arbeitsweise ist jedoch nur bei entsprechenden Ausbeuten der einzelnen Sortierklassen sinnvoll (vgl. [Sandomeer/Steiger, 2009]).

### **2.3.2. Vor- und Nachteile der maschinellen Festigkeitssortierung**

Die maschinelle Festigkeitssortierung wurde mit dem Ziel entwickelt, die Nachteile und Unzulänglichkeiten der visuellen Sortierung zu beseitigen. Unter Anwendung der Bewertungskriterien nach [Meierhofer/Richter, 1988] stellt die maschinelle Festigkeitssortierung eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der Trennschärfe und des Arbeitsaufwandes dar. Diese Verbesserung ist jedoch mit höheren Investitionskosten verbunden, was wiederum einen Nachteil gegenüber der visuellen Festigkeitssortierung darstellt. Bei dieser ersten Bewertung kommen jedoch die wesentlichen Vorteile nicht zum Tragen:

#### ***Umfang und Messung der Sortiermerkmale:***

*Die Erfassung der Sortiermerkmale und Messgrößen erfolgt objektiv.*

#### ***(Wiederhol-)Genauigkeit und Trennschärfe der Sortierung:***

*Das Sortierergebnis ist wiederholgenau und reproduzierbar, sofern keine Änderungen an den Maschineneinstellungen vorgenommen werden. Die kombinierte Erfassung von Wuchsmerkmalen und apparativ messbaren Kennwerten lässt eine genauere und zuverlässigere Abschätzung der Materialqualität zu. Die Trennschärfe ist bei entsprechenden Maschineneinstellungen wesentlich höher. Des Weiteren ist eine direkte Sortierung in Festigkeitsklassen möglich.*

#### ***Einbindung in den Produktions- und Verarbeitungsprozess:***

*Die maschinelle Festigkeitssortierung kann im Durchlauf mit hoher Geschwindigkeit durchgeführt werden und ist daher für industrielle Herstellungsprozesse geeignet. Der Arbeitsaufwand ist geringer als bei der visuellen Sortierung.*

Gleichzeitig weist die maschinelle Festigkeitssortierung aber auch Nachteile gegenüber der visuellen Sortierung auf:

#### ***Erfassung seltener Sortierkriterien:***

*Seltener auftretende Wuchsmerkmale (bspw. Wipfelbruch, mechanische Beschädigungen, Einschlüsse, Stammverletzungen) können nicht zuverlässig erkannt und erfasst werden. Dadurch kann das Sortierergebnis negativ beeinflusst werden.*

#### ***Flexibilität der Sortierung:***

*Die sortierbaren Querschnitte sind begrenzt. Insbesondere große Querschnitte, wie sie im zimmermannsmäßigen Holzbau und bei denkmalpflegerischen Instandsetzungsarbeiten typisch sind, können mit den bis dato verfügbaren Anlagen nicht sortiert werden.*

*Die verwendeten Messsysteme können normative Festlegungen nicht eigenständig interpretieren und auf individuelle Gegebenheiten anpassen.*

*Die maschinelle Festigkeitssortierung kann nur bedingt flexibel in den Verarbeitungsprozess eingebunden werden.*

**Reproduzierbarkeit der Sortierung:**

*Das Sortierergebnis ist nicht ohne Weiteres nachvollziehbar und nachprüfbar. Daher ist eine aufwendige Produktionskontrolle und regelmäßige Kalibrierung der Maschineneinstellung erforderlich.*

**Wirtschaftlicher Aufwand:**

*Die Investitionskosten sind im Vergleich zur visuellen Festigkeitssortierung hoch.*

Die oben aufgeführten Vorteile einer maschinellen Festigkeitssortierung verdeutlichen, dass die wesentlichen Nachteile der visuellen Festigkeitssortierung hinsichtlich der Anforderungen an industrielle Fertigungsprozesse beseitigt werden. Dennoch bestehen Nachteile hinsichtlich der Anwendung für die Sortierung von Bauteilen mit selteneren Wuchsmerkmalen und größeren Querschnitten. Des Weiteren bedürfen die Anlagen einer deutlich aufwendigeren Kalibrierung und regelmäßigen Eignungsprüfung. Ebenso ist qualifiziertes Personal erforderlich. Die Wirtschaftlichkeit ist daher außerhalb der industriellen Anwendung nicht gegeben.

## **2.4. Zusammenfassung**

Die Sortierung von Holzbauteilen nach deren Tragfähigkeit ist die normative Grundlage für deren Verwendung als tragende Bauteile in Holzkonstruktionen (s. [DIN EN 1995-1-1:2010], Abschnitt 3.2 (1)P). Diese Sortierung dient zum einen der Festlegung rechnerisch anzusetzender Materialkennwerte und zum anderen der Eingrenzung deren Streuung. Für neues Bauholz liegen hierfür mit den Normenreihen DIN EN 14081 und DIN 4074 umfängliche europäische und nationale Regelwerke vor. Grundlegend wird dabei in die visuelle und die maschinelle Festigkeitssortierung unterschieden.

Die visuelle Festigkeitssortierung berücksichtigt an der Bauteiloberfläche erkennbare und händisch messbare Wuchs- und Bauteilmerkmale. Deren Bewertung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Materialqualität und Tragfähigkeit erfolgt anhand von Grenzwerten für die Merkmalsausprägung (s. [DIN 4074-1:2012], [DIN 4074-5:2008]). Bis in die 1920er Jahre wurde die Tragfähigkeit von Bauholz ausschließlich anhand von traditionellem Wissen der Sägewerker und Zimmerleute beurteilt. Die dem zugrunde liegenden Handelsgebräuche waren jedoch nur bedingt geeignet, um eine zuverlässige Abschätzung der Materialeigenschaften zu zulassen. Angestoßen durch die Entwicklung des Ingenieurholzbaus befasste man sich in Europa und den USA seit den 1920er Jahren zunehmend mit der Erforschung der Materialeigenschaften und dem Tragverhalten von Holzbauteilen. Erste Regelwerke für eine visuelle Beurteilung der Materialqualität wurden in den Jahren 1923 in den USA und 1926 in Deutschland veröffentlicht (s. [USDA C295, 1923], [DRG, 1926]). In den 1930er Jahren folgten weitere Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzbauteilen vor allen durch OTTO GRAF und ERNST GABER. Deren Ergebnisse flossen in die 1939 erschienene erste Fassung der Sortiernorm DIN 4074 ein. Die normativen Festlegungen zur visuellen Sortierung wurden auch in den darauffolgenden Jahrzehnten stetig auf Grundlage weiterer Untersuchungen weiterentwickelt.

Trotz der wesentlichen Vorteile der visuellen Sortierung – insbesondere der Umfang der zu bewertenden Wuchs- und Bauteilmerkmale und deren flexible Einbindung in den

Produktionsprozess – ist deren Aussagegenauigkeit vergleichsweise gering. Dieses Defizit resultiert maßgeblich aus den vergleichsweise schwach ausgeprägten Beziehungen zwischen den visuell erkenn- und messbaren Wuchsmerkmalen und den Materialkennwerten. Die visuelle Sortierung ist daher eher eine grobe Abschätzung der Materialqualität (vgl. [Diebold, 1997]).

Um die Defizite der visuellen Sortierung auszugleichen, wurde in den 1950-60er Jahren verstärkt mit der Untersuchung von Prüfmethoden zur zerstörungsfreien Ermittlung von Materialkennwerten begonnen (s. [Denzler/et al., 2005], [Denzler/Glos, 2009]). Diese Forschungsarbeiten führten in den 1970-80er Jahren zur Entwicklung der maschinellen Festigkeitssortierung (s. [Glos/Schulz, 1980]), welche seit 1989 in Deutschland normativ geregelt ist (s. [DIN 4074-3:1984], [DIN 4074-4:1989]). Dabei werden die engen Zusammenhänge zwischen zerstörungsfrei messbaren Kennwerten und den Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften für die Sortierung von Holzbauteilen genutzt. Neben der Messung der Durchbiegung im Durchlaufverfahren kommen in modernen Anlagen auch zunehmend dynamische Messmethoden (Schwingungs- und Schalllaufzeitmessungen), Durchstrahlung (Röntgen, Computertomografie) sowie optische Verfahren zur Anwendung. Die aktuellen normativen Regelungen umfassen neben Anforderungen an die ausführenden Betriebe auch konkrete Anforderungen an die Sortieranlagen (s. [DIN EN 14081-2:2018], [DIN EN 14081-3:2018]). Des Weiteren werden Festlegungen hinsichtlich der Maschineneinstellungen und deren Herleitung getroffen.

Die maschinelle Festigkeitssortierung besitzt im Vergleich zur visuellen Sortierung wesentliche Vorteile. So wird beispielsweise die Sortierentscheidung objektiv anhand festgelegter Maschineneinstellungen getroffen. Dadurch weist die maschinelle Festigkeitssortierung eine wesentlich höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit auf. Des Weiteren ist die Trennschärfe deutlich höher, da die Maschineneinstellwerte für beliebige Festigkeitsklassen abgeleitet werden können. Des Weiteren erlauben die hohen Durchlaufgeschwindigkeiten die Einbindung in industrielle Herstellungsprozesse. Gleichzeitig weist die maschinelle Festigkeitssortierung gegenüber der visuellen Sortierung auch Nachteile auf. So können beispielsweise nicht alle Wuchs- und Bauteilmerkmale maschinell erfasst und bewertet werden. Ebenso sind die sortierbaren Querschnittsdimensionen begrenzt. Des Weiteren ist das Sortierergebnis nur reproduzierbar, sofern eine regelmäßige Kalibrierung und aufwendige Produktionskontrolle erfolgt.

### **3. Erfassung des Bauzustandes von bestehenden Holzkonstruktionen**

#### **3.1. Normative Regelungen zur Erfassung des Bauzustandes**

Die Instandsetzung von bestehenden Holzkonstruktionen erfordert üblicherweise eine Bewertung deren Trag- und Funktionsfähigkeit. Diese Notwendigkeit kann aus verschiedenen Umständen resultieren (vgl. [JRC, 2015], [DIN EN 17121:2019], [Rug, 2018], [ISO 13822:2010]):

- Änderung der vorgesehenen Nutzung oder der aufzunehmenden Lasten
- Schädigung der Konstruktion durch holzerstörende Organismen oder Brandeinwirkung
- mechanische Beschädigungen oder Verformungen aus ungünstigen Eingriffen in das Tragwerk, beispielsweise durch Überlastung oder Änderungen der konstruktiven Durchbildung
- Abweichungen zwischen der ursprünglichen Ausführungs-/Tragwerksplanung und der konstruktiven Bauausführung
- Sicherstellung der Standsicherheit unter außergewöhnlichen Beanspruchungen (Brandfall, seismische Aktivitäten)
- Feststellung von Tragfähigkeitsdefiziten im Zuge planmäßiger Bauzustandsprüfungen

Unabhängig von der Ursache müssen bei der Bewertung bestehender Konstruktionen die für Neubauten bauaufsichtlich geltenden Regelwerke und Bemessungsnormen sinngemäß angewendet werden (vgl. [DIN EN 1990:2021], Abschnitt 1.1 (4) und [DIN EN 1995-1-1/NA:2013], Abschnitt NCI zu 1.1.2 (NA.5)). Die Voraussetzung für eine zuverlässige Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit ist die möglichst exakte Erfassung und Bewertung des Bauzustandes (s. a. [Lißner/Rug, 2015], [Lißner/Rug, 2018]). Weiterhin führt der Verzicht auf eine umfassende Bauzustandserfassung zu einer konservativeren Einschätzung (s. u.a. [Lißner/Rug, 2018]). Die Folge sind unwirtschaftliche, wenig substanzschonende und nicht fachgerechte Instandsetzungsmaßnahmen (s. bspw. [Görlacher, 1992], [Ehlbeck/Görlacher, 1993], [Rinn, 2006], [Anthony/et al., 2009], [Machado, 2013]).

Mit Hilfe von zuverlässigkeitstheoretischen Methoden können die Nachweismethoden angepasst werden (s. a. [Loebjinski/et al., 2017]). Die Berücksichtigung der auf diesem Wege gewonnenen Tragfähigkeitsreserven ermöglicht eine zuverlässigere und vor allem realistischere Bewertung bestehender Konstruktionen (s. a. [Loebjinski/et al., 2018-1] und [Loebjinski, 2021]). Dadurch wird eine substanzschonende und fachgerechte Instandsetzung ermöglicht. Die Erfassung des Bauzustandes – insbesondere die Feststellung der vorhandenen Materialqualität – spielt hierbei eine zentrale Rolle.

##### **3.1.1. Regelwerke in Deutschland**

Die grundsätzliche Herangehensweise an die Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen ist zum jetzigen Zeitpunkt in Deutschland noch nicht in Form eines bauaufsichtlich eingeführten Regelwerkes verankert. Die Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) gab im Jahr 2008 allgemeine, baustoff- und bauartunabhängige Hinweise für den Standsicherheitsnachweis beim Bauen im Bestand heraus (s. [ARGEBAU, 2008]). Diesen Hinweisen entsprechend ist es möglich, die Standsicherheit von

bestehenden Konstruktionen auf Grundlage der zum Zeitpunkt ihrer Errichtung geltenden Bemessungsregelungen zu bewerten<sup>6</sup>. Werden jedoch Tragfähigkeitsdefizite festgestellt oder ist eine Änderung der konstruktiven Gegebenheiten vorgesehen, sind die erforderlichen Nachweise für Verstärkungen oder konstruktive Veränderungen entsprechend den aktuell bauaufsichtlich eingeführten Bemessungsregeln<sup>7</sup> zu führen. Eine Aktualisierung der Eingangsgrößen durch die Ermittlung vorhandener Einwirkungen und der Materialqualität in situ ist in diesem Zusammenhang nicht vorgesehen.

Zusätzlich veröffentlichte der Verein Deutscher Ingenieure VDI e.V. eine Richtlinie zur regelmäßigen Überprüfung der Standsicherheit von Bauwerken (s. [VDI 6200:2010]). Die darin getroffenen Festlegungen sind ebenfalls baustoff- und bauartunabhängig und gehen nur bedingt auf die Besonderheiten von Holzkonstruktionen ein. Des Weiteren dient diese Richtlinie hauptsächlich der Erfassung des Bauzustandes im Zuge einer regelmäßigen Bauwerksüberwachung. Eine Standsicherheitsbewertung anhand aktualisierter Eingangsgrößen – insbesondere die Ermittlung der vorhandenen Tragfähigkeit – wird zwar im Zusammenhang mit der eingehenden Überprüfung durch eine fachkundige Person vorgeschlagen, konkrete Festlegungen dazu werden jedoch nicht getroffen. Eine Bauzustandserfassung, welche streng nach [VDI 6200:2010] durchgeführt wird ist daher nicht geeignet, um eine zuverlässige Bewertung der Standsicherheit bestehender Konstruktionen vorzunehmen.

Weitere Festlegungen zur Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Holzkonstruktionen werden von der Wissenschaftlich-technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) im WTA-Merkblatt 7-2 getroffen (s. [WTA 7-2:2019]). Diese konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Erfassung der konstruktiven Gegebenheiten sowie vorhandener Schädigungen. Die Ermittlung der vorhandenen Materialqualität ist zwar im Zuge der Bauzustandserfassung vorgesehen, jedoch beschränkt sich diese auf die visuelle Sortierung, welche in der Regel ausreichend sei (vgl. [WTA 7-2:2019], Abschnitt 3.5.1). Ausgehend vom aktuellen Entwicklungsstand der Festigkeitssortierung von Holzbauteilen ist dies jedoch nicht der Fall (s. a. Abschnitte 2.2 und 2.3, v. a. Tabelle 5). Insbesondere bei teilweise verdeckt eingebauten Bauteilen ist eine rein visuelle Festigkeitssortierung unzureichend, um die Tragfähigkeit der Bauteile hinreichend genau zu ermitteln. Tragfähigkeitsreserven und -defizite können so nicht zuverlässig aufgedeckt werden, was gerade bei hochbeanspruchten Holzbauteilen zu einer unzuverlässigen Tragfähigkeitsbewertung führen kann.

Der Einsatz von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode zur Ermittlung der für den Nachweis der Standsicherheit relevanten Materialkennwerte wird nur peripher behandelt (vgl. [WTA 7-2:2019], Abschnitt 3.5.1). Zwar werden ausgewählte Prüfmethode hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten und -grenzen betrachtet, jedoch handelt es sich hierbei überwiegend um Methoden, welche nur qualitative Aussagen über den Zustand und die Materialqualität von Holzbauteilen zulassen (vgl. [WTA 7-2:2019], Tabelle A.3). Eine zuverlässige, quantitative

---

<sup>6</sup> Eine Zusammenstellung historischer Konstruktions- und Bemessungsnormen für den Holzbau von 1917 bis 2007 ist bspw. in [Rug, 2016] zu finden.

<sup>7</sup> Gemeint sind damit die aktuellen Technischen Baubestimmungen entsprechend der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBT) sowie der Verwaltungsvorschriften Technische Baubestimmungen (VV TB) der Länder.

Erfassung von Materialkennwerten und damit eine Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist hierdurch nicht möglich.

Unabhängig von dem aktuellen Stand der Normung in Deutschland hat sich in den vergangenen 25 Jahren im deutschsprachigen Raum eine Vorgehensweise für die Erfassung und Bewertung der Funktionsfähigkeit von bestehenden Holzkonstruktionen entwickelt (s. Abbildung 14). Obwohl diese Vorgehensweise nicht in Richtlinien und Regelwerken verankert ist, ist sie doch weitestgehend eine Allgemein anerkannte Regel der Technik.

Über die Funktionsfähigkeitsprüfung von Holzbauteilen und -konstruktionen hinaus hat sich ebenfalls eine Katalogisierung bestehender Konstruktionen und Bewertung deren Bauzustandes anhand verschiedener Bewertungsmatrizen etabliert (s. bspw. [Erlers/Müller, 1984], [KDT-Ri, 1985], [DRG, 1990], [Erlers, 1993], [Lißner/Rug, 2000], [Abels, 2012], [Meisel/et al., 2013], [Mosoarca/Keller, 2018]). Im Ergebnis einer derartigen Bewertung kann dann eine Zustandsnote vergeben oder die Konstruktion einer Bauzustandsstufe zugeordnet werden. Dieses Vorgehen ist unter anderem an die *„Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076“* [RI-EBW-PRÜF 2017] angelehnt, welche der Überwachung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Verkehrswegen dient. Vergleichbare bauaufsichtlich eingeführte normative Regeln für bestehende Holzkonstruktionen existieren bis dato nicht.

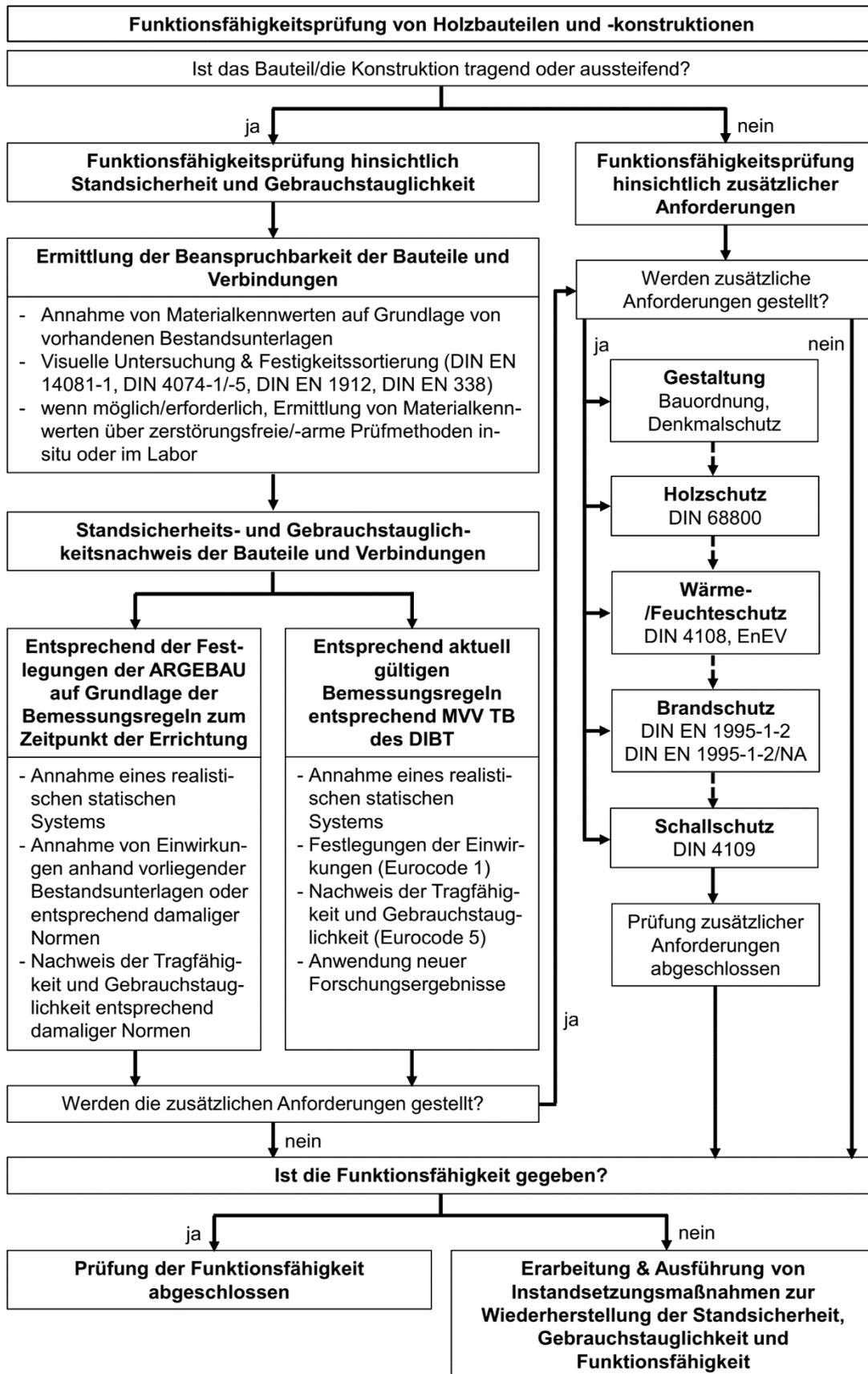


Abbildung 14: Schema der Funktionsfähigkeitsprüfung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen (nach [Rug, 2018], dort Abbildung 12, mit eigenen Ergänzungen)

### 3.1.2. Internationale Regelwerke für die Bauzustandsuntersuchung

Auf internationaler Ebene ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten ein Entwicklungstrend zu beobachten, welcher sich mit der Erstellung von Regelwerken und Richtlinien für die Erfassung und Bewertung des Bauzustandes von bestehenden Konstruktionen und Tragwerken befasst.

#### *Italienische Regelwerke*

In Italien wurde im Jahr 2004 mit der UNI 11119 ein spezielles Regelwerk herausgegeben, welches detailliert die Erfassung des Bauzustandes bestehender Holzkonstruktionen behandelt. Der Zweck dieser Norm ist die Festlegung von Zielen, Methoden und Bewertungskriterien von denkmalgeschützten Tragwerken. Das Ziel einer jeden Bauzustandserfassung sollte das Erlangen von möglichst weitreichenden Informationen über das Tragwerk sein. Dies umfasst grundlegende Maßnahmen, wie die Holzartenbestimmung und Holzfeuchtemessung, die Erfassung der Tragwerks-/Bauteilgeometrie sowie die Untersuchung hinsichtlich biotischer oder mechanischer Schädigungen. Darüber hinaus wird explizit eine Festigkeitssortierung des verbauten Holzes gefordert. Diese kann sowohl global für das gesamte Tragwerk als auch lokal für einzelne Bauteile oder Tragwerkssegmente vorgenommen werden (vgl. [UNI 11119:2004], Abschnitt 4). Da die für neues Bauholz entwickelten Sortiermethoden nicht problemlos auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen übertragen werden können, werden in der UNI 11119:2004 diesbezügliche Ausnahmeregelungen und Präzisierungen getroffen (s. [UNI 11119:2004], Abschnitt 1).

Die Festigkeitssortierung soll dabei als Kombination aus einer visuellen Sortierung und der zerstörungsfreien Bestimmung von mindestens einer physikalisch-mechanischen Materialeigenschaft erfolgen (vgl. [UNI 11119:2004], Abschnitt 7.5). In Ausnahmefällen kann die Festigkeitssortierung auch ausschließlich über zerstörungsfreie Prüfmethoden erfolgen (vgl. [UNI 11119:2004], Abschnitt 7.5.1.2). Die dafür vorgesehene allgemeine Vorgehensweise ist in Abbildung 15 dargestellt.

Die auf diesem Wege gewonnenen Informationen werden im Weiteren genutzt, um die Standsicherheit der bestehenden Konstruktionen entsprechend den Festlegungen der UNI 11138:2004 zu beurteilen. Diese Norm befasst sich mit der Standsicherheitsbewertung und Planung von Sicherheits- und Instandsetzungsmaßnahmen. Die Bestimmung der vorhandenen Materialeigenschaften ist Voraussetzung für die Standsicherheitsbewertung (vgl. [UNI 11138:2004], Abschnitt 4.3).

Die der visuellen Sortierung zugrunde zu legenden Sortiermerkmale und Grenzwerte sind in Tabelle 10 aufgeführt. Der Vergleich dieser Grenzwerte mit den Grenzwerten nach DIN 4071-1:2012 und DIN 4074-5:2008 zeigt, dass die Sortiermerkmale „Einzeläste“ und „Baumkante“ in der UNI 11119:2004 deutlich strenger begrenzt sind. Zusätzlich müssen Astansammlungen berücksichtigt werden, was nach DIN 4071-1:2012 und DIN 4074-5:2008 nur bei Brettern und Bohlen erforderlich ist. Die Grenzwerte der Faserneigung entsprechen tendenziell den Grenzwerten der deutschen Sortiervorschriften. Des Weiteren wird das Sortierkriterium „Schwindrisse“ in der UNI 11119:2004 nur qualitativ bewertet und nicht entsprechend der vorhandenen, messbaren Tiefe begrenzt. Generell fällt auf, dass nach UNI 11119:2004 nur eine begrenzte Anzahl an Sortiermerkmalen berücksichtigt werden muss. Die Sortiermerkmale „Krümmungen“, „Verfärbungen, Fäule“ und „Insektenfraß“ sind nicht anzuwenden, obwohl diese auch bei eingeschränkter Zugänglichkeit erfasst und bewertet werden könnten.

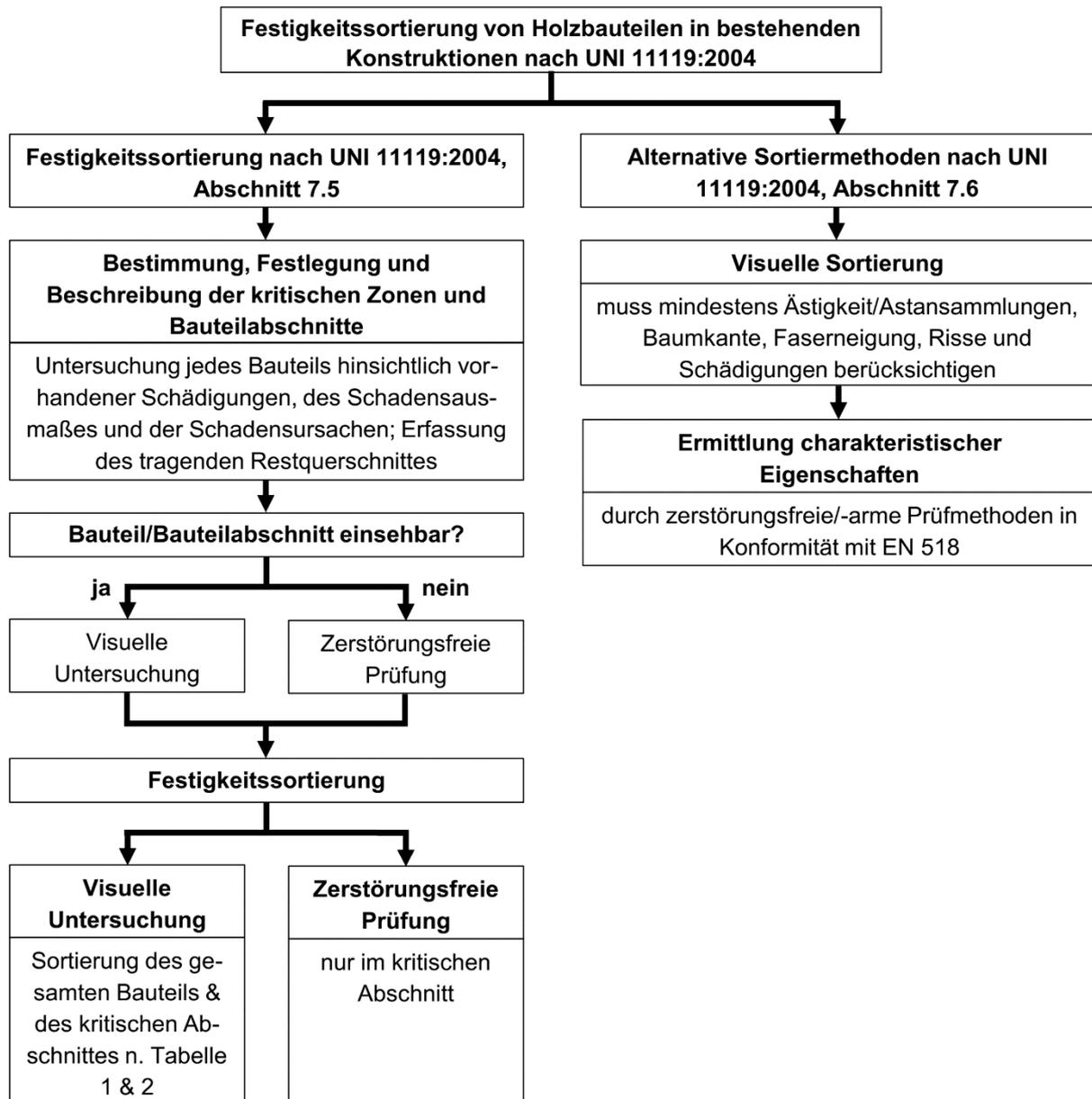


Abbildung 15: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen nach [UNI 11119:2004], Abschnitt 7.5 & 7.6 (eigene Darstellung)

Tabelle 10: Sortiermerkmale und Grenzwerte nach [UNI 11119:2004], Tabelle 1

Sortiermerkmal	Sortierklasse I	Sortierklasse II	Sortierklasse III
Baumkante	1/8 b	1/5 b	1/3 b
Beschädigungen, Frostrisse, Ringschäle	unzulässig	unzulässig	begrenzt zulässig
Einzeläste	1/5 b, ≤ 50 mm	1/3 b, ≤ 70 mm	1/2 b
Astansammlung	2/5 b	2/3 b	3/4 b
Faserneigung radial gemessen	7 %	12 %	20 %
Faserneigung tangential gemessen	10 %	20 %	33 %
Schwindrisse	zulässig, wenn sie nicht über die Markröhre hinaus gehen		

### **Schweizer Regelwerke**

Mit der SIA 269 wurde 2011 in der Schweiz eine ganze Normenreihe herausgegeben, welche sich mit der Erfassung und Bewertung von bestehenden Tragwerken befasst. Diese löste die bisherige SIA-Richtlinie SIA 462:1994 „*Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke*“ ab (s. [Brühweiler, 2011]). Die neue SIA 269-5:2011 befasst sich konkret mit bestehenden Holzkonstruktionen. Bezüglich der Überprüfung der Standsicherheit bestehender Konstruktionen wird dort explizit eine Aktualisierung der Eingangsgrößen gefordert. Dies sind im Wesentlichen Einwirkungen, Baustoffeigenschaften und die Tragwerksgeometrie. Die Aktualisierung der Baustoffeigenschaften soll entsprechend der baustoffspezifischen Bestandsbaunormen erfolgen (s. [SIA 269:2011], Abschnitt 4.3.1).

Für bestehende Holzkonstruktionen erfolgt dies über eine handnahe, visuelle Begutachtung und Sortierung oder über die Korrelation der Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte mit den Ergebnissen sogenannter spezieller Untersuchungen (s. [SIA 269/5:2011], Abschnitt 3.1). Die „Klassierung“ – d.h. Zuordnung der Holzbauteile zu Festigkeitsklassen – kann entsprechend der für neues Bauholz geltenden Vorschriften erfolgen (s. [SIA 269/5:2011], Abschnitt 3.2.1.1 und [SIA 265:2012], Abschnitt 3.3.1.1).

Die im Rahmen der Zustandserfassung geforderten Untersuchungen richten sich laut SIA 269/5:2011, Abschnitt C.1 nach dem für die Standsicherheitsbewertung und Instandsetzung erforderlichen Kenntnisstand über das Holztragwerk. Unterschieden wird dabei in „beschränkter“, „normaler“ und „umfassender Kenntnisstand“. Hinsichtlich der Aktualisierung der Baustoffeigenschaften werden die in Tabelle 11 aufgeführten Festlegungen getroffen. Bei den zur Erlangung eines „umfassenden“ Kenntnisstandes geforderten Untersuchungen handelt es sich um zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode, welche von einer visuellen Begutachtung über in situ-Prüfungen bis hin zur Entnahme und labortechnischen Untersuchung von Probenmaterial reichen (s. Tabelle 12 und vgl. [SIA 269/5:2011], Anhang C, Tabelle 3).

**Tabelle 11: Festlegungen zur Aktualisierung der Baustoffeigenschaften im Zuge einer Bauzustandserfassung anhand des Kenntnisstandes (nach [SIA 269/5:2011], Abschnitt C.1)**

Kenntnisstand	Aktualisierung der Baustoffeigenschaften anhand von...
„beschränkt“	Annahmen aufgrund von Projektunterlagen oder entsprechend üblichen Bauweise zur Zeit der Errichtung
„normal“	Angaben aufgrund von Konstruktionsplänen oder aufgrund einer Untersuchung von 50% der Bauteile und Verbindungen in den am stärksten gefährdeten/beanspruchten Bereichen
„umfassend“	Angaben aufgrund von Ausführungsplänen und Berichten oder aufgrund einer umfassenden Untersuchung mit speziellen Methoden (siehe Ziffer C.2) von rund 80% der Bauteile und Verbindungen in den am stärksten gefährdeten/beanspruchten Bereichen

**Tabelle 12: Methoden für die Bauzustandserfassung von Holzkonstruktionen (auszugsweise entnommen aus [SIA 269/5:2011], Anhang C, Tabelle 3; ergänzt um die Bemerkungen nach [Lißner/Rug, 2018])**

Methoden	Untersuchungsziele	Bemerkung
Visuelle Untersuchung	Allgemeine Ausführung, Abgleich zwischen Bauwerksunterlagen und Ausführung, allgemeiner Bauzustand, Schädigungen, Baustoffeigenschaften	in situ/zf
Vermessung	Erfassen der aktuellen Geometrie, Abmessungen und Verformungen des Tragwerks inkl. Details für die Tragwerksanalyse	in situ/zf
Holzfeuchtemessung	Holzfeuchtigkeit, Lokalisierung von Feuchteschäden	in situ/zf
Bohrwiderstandsmessung	Beurteilung der Baustoffeigenschaften, Auffinden von verdeckten Schädigungen (Korrelation zw. Rohdichte und Festigkeit/Steifigkeit)	in situ/zf
Eindringwiderstandsmessung	Beurteilung der Baustoffeigenschaften, Auffinden von verdeckten Schädigungen (Korrelation zw. Rohdichte und Festigkeit/Steifigkeit)	in situ/zf
Ausziehwiderstandsmessung	Beurteilung der Baustoffeigenschaften, Auffinden von verdeckten Schädigungen (Korrelation zw. Rohdichte und Festigkeit/Steifigkeit)	in situ/zf
Ultraschall-Laufzeitmessung	Beurteilung der Baustoffeigenschaften, Auffinden von verdeckten Schädigungen (Korrelation zw. Schallgeschwindigkeit und Festigkeit/Steifigkeit)	in situ/zf
Dehnungsmessung	Einschätzung des aktuellen Beanspruchungszustandes	in situ/zf/z
Belastungsverfahren	Einschätzung des Trag- und Verformungsvermögens, Kalibrierung des Tragmodells	in situ/zf/z
Darrverfahren	Holzfeuchte, Darrdichte	Labor/za
Entnahme und Untersuchung von Bohrkerne	Beurteilung der Baustoffeigenschaften, Auffinden von verdeckten Schädigungen (Korrelation zw. Rohdichte und Festigkeit/Steifigkeit)	Labor/za
Makroskopische/mikroskopische Untersuchungen	Bestimmung der Holzart, Bestimmung der Pilz- oder Insektenart, Zustand der Oberflächenbehandlung	in situ/zf Labor/za
Chemische Untersuchung	Art des Klebstoffes, Holzschutzmittelbelastung, Pilzbelastung	Labor/za
Dendrochronologische Untersuchung	Holzalter	Labor/za
in situ ... Untersuchung in-situ durchführbar; Labor ... Untersuchung im Labor; zf ... zerstörungsfreie Methode; za ... zerstörungssarme Methode; z ... zerstörende Methode		

### Österreichische Regelwerke

Mit der österreichischen ONR 24009 ist 2013 ein weiteres nationales Regelwerk zur Bewertung der Standsicherheit bestehender Konstruktionen entstanden. Im Gegensatz zu den Festlegungen der SIA 269/5:2011 und der UNI 11119:2004 & UNI 11138:2004 sind die Regelungen der ONR 24009:2013 jedoch nicht baustoffspezifisch verfasst. Dennoch gilt auch hier das Grundprinzip, dass die Bewertung der Standsicherheit auf Grundlage des festgestellten Bauzustandes vorgenommen werden soll. Hinsichtlich der Erfassung des Bauzustandes bezieht sich die ONR 24009:2013 auf die Festlegungen der ÖNORM B 1998-3:2013, Anhang B (vgl. [ONR 24009:2013], Abschnitte 4.3 und 4.7). Analog den Festlegungen der SIA 269/5:2011

leitet sich der erforderliche Untersuchungsumfang aus dem Kenntnisstand über die bestehende Konstruktion ab (vgl. [ONR 24009:2013], Abschnitt 4.3).

Die Ermittlung von tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten soll erfolgen, wenn Abweichungen zwischen den vorhandenen Planungsunterlagen und der Ausführung der bestehenden Konstruktion festgestellt werden (vgl. [ONR 24009:2013], Abschnitt 5.3.3). Darüber hinaus wird die Ermittlung von Materialeigenschaften auch dann empfohlen, wenn Tragfähigkeitsreserven für die zu führenden Standsicherheitsnachweise genutzt werden sollen (vgl. [ONR 24009:2013], Abschnitt 4.7).

### ***Internationale Regelwerke***

Die im Vorangegangenen beschriebenen Festlegungen der schweizerischen, italienischen und österreichischen Normen für die Standsicherheitsbewertung bestehender Konstruktionen sind im Wesentlichen deckungsgleich mit den Festlegungen der ISO 13822:2010. Im Abschnitt 4.6 dieser Norm wird empfohlen, Standsicherheitsbewertungen von bestehenden Konstruktionen auf Grundlage von vorhandenen Planungsunterlagen zu führen. Bestehen jedoch berechtigte Zweifel an der Übereinstimmung zwischen Planungsunterlagen und der tatsächlichen Ausführung, sollte eine Aktualisierung der Ausgangswerte vorgenommen werden (vgl. [ISO 13822:2010], Abschnitt 4.6.2). Dies geschieht über eine entsprechende Bauzustandsuntersuchung unter besonderer Berücksichtigung hinsichtlich der Materialqualität. Das Führen von Standsicherheitsnachweisen anhand in situ ermittelter Materialkennwerte sollte generell der Verwendung von Angaben aus Planungsunterlagen vorgezogen werden (vgl. [ISO 13822:2010], Abschnitt 5.3.1).

Die Untersuchung muss dabei so geplant werden, dass daraus aktualisierte Materialkennwerte oder Verteilungen von tragwerksrelevanten Kennwerten resultieren, welche die strukturellen Eigenschaften der bestehenden Konstruktion beeinflussen (vgl. [ISO 13822:2010], Abschnitt 4.6.2). Die hierbei zum Einsatz kommenden Untersuchungsmethoden können sowohl zerstörungsfrei als auch zerstörungssarm oder sogar zerstörend sein, müssen aber den jeweiligen geltenden Vorschriften entsprechen. Ferner sollte die Beprobung so realitätsnah wie möglich vorgenommen werden, um eine direkte Verwendbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten (vgl. [ISO 13822:2010], Abschnitte 5.3.3 und 5.3.4). Der Einfluss eventuell vorhandener Schädigungen durch biotische Schadorganismen, Umwelteinflüsse oder vergangene Ereignisse – bspw. Brandfall oder Erdbeben – muss berücksichtigt werden (vgl. [ISO 13822:2010], Abschnitt 5.3.1).

### ***Europäische Regelwerke***

Auch in weiteren europäischen Ländern wurden in den vergangenen zehn Jahren Regelwerke eingeführt, welche sich mit der Bauzustandserfassung und Instandsetzung von bestehenden Konstruktionen befassen (s. Tabelle 13 und [JRC, 2015]).

Der Vergleich der international vorhandenen Regelwerke zeigt eine große Schnittmenge hinsichtlich der Festlegungen zur Vorgehensweise bei der Standsicherheitsbewertung bestehender Konstruktionen. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Anforderungen an die Aktualisierung der Eingangsgrößen und der Bestimmung der Materialeigenschaften des verbauten Holzes. Dennoch existieren bis dato keine international oder europaweit einheitlichen normativen Regelungen zum Umgang mit bestehenden Konstruktionen im Allgemeinen und der Ermittlung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen im Besonderen.

Des Weiteren ist der Entwicklungsstand der in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Regelwerke für eine umfassende Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Holzkonstruktionen nicht ausreichend (s. a. Abschnitt 3.1.1).

**Tabelle 13: Beispiele für Regelwerke zum Umgang mit bestehenden Konstruktionen (auszugsweise entnommen aus [JRC, 2015], Kapitel II, S. 25 ff)**

Land	Regelwerk	Bemerkungen
Griechenland	Code of Interventions (KANN.EPE)/2013	Regelwerk zur Absicherung der Stand-sicherheit im Erdbebenfall; Konstruktions-/baustoffunabhängig; Aktualisierung der Materialeigenschaften wird empfohlen
Niederlande	NEN 8700:2011 – Assessment of existing structures in case of reconstruction and disapproval – basic Rules	Regelwerk zur Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen; Konstruktions-/baustoffunabhängig; Aktualisierung der Materialeigenschaften wird empfohlen
Spanien	CTE DB SE Annex D: Spanish Technical Building Code – Basic Document: Structural Reliability; Annex D: Assessment of existing building structures	Regelwerk zur Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen; Konstruktions-/baustoffunabhängig; Aktualisierung der Materialeigenschaften wird empfohlen
Tschechische Republik	ČSN ISO 13822:2015 – Bases of Design – Assessment of existing structures ČSN 73 0038 – Assessment and verification of existing structures – Supplementary guidance	Regelwerk zur Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen; Konstruktions-/baustoffunabhängig; Aktualisierung der Materialeigenschaften wird empfohlen

In den vergangenen zehn Jahren wurden erste Versuche für die Erarbeitung von europaweit einheitlichen Regelwerken unternommen. Als Vorreiter sind hier die Veröffentlichungen der COST Action E55 („*Modelling of the Performance of Timber Structures*“, s. bspw. [Diet-sch/Köhler, 2010]) und der COST Action IE0601 („*Wood Science for Conservation of Cultural Heritage – WoodCultHer*“, s. bspw. [Cruz/et al., 2013]) zu nennen. Die von diesen beiden Komitees veröffentlichten Berichte orientieren sich sehr stark an dem internationalen Stand der Technik und der Normung. Die jeweils vorgeschlagenen Vorgehensweisen für die Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen entsprechen im Wesentlichen den Festlegungen der ISO 13822:2010 sowie den bereits ausführlich erläuterten nationalen Regelwerken Italiens, der Schweiz und Österreichs (s. [UNI 11119:2004], [UNI 11138:2004], [SIA 269/5:2011] & [ONR 24009:2013]). Jedoch stellen auch sie noch kein europaweit einheitliches normatives Regelwerk dar.

Um diesen Umstand zukünftig zu beseitigen, befasst sich die Working Group WG2 des CEN/TC250 seit 2009 mit der Aufarbeitung, Weiterentwicklung und Vereinheitlichung der vorhandenen Regelwerke. In dem Bericht des Joint Research Centre „*New European Technical Rules for the Assessment and Retrofitting of Existing structures*“ [JRC, 2015] wird der aktuelle Stand der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union hinsichtlich der Regelwerke zur Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen sowie deren Instandsetzung zusammengefasst. Auf Grundlage des europäischen Entwicklungsstandes werden in [JRC,

2015] Vorschläge für eine europaweit einheitliche Richtlinie zum Umgang mit bestehenden Konstruktionen vorgestellt. Hintergrund ist die unterschiedliche Herangehensweise bei Neu- und Bestandsbauten. Ziel der vorgeschlagenen Richtlinie ist es, die abweichenden Erfordernisse und Methoden der Standsicherheitsbewertung bestehender Konstruktionen in Einklang mit den Prinzipien des Eurocode 0 zu bringen.

Grundlegend wird in [JRC, 2015] in die „vorläufige“ und „detaillierte“ Bauzustandsbewertung unterschieden (s. Abbildung 16). Die vorläufige Bauzustandsuntersuchung dient der Feststellung des Erfordernisses etwaiger sofortiger Sicherungsmaßnahmen sowie der Planung und Festlegung weiterführender Untersuchungen. Dies beinhaltet neben der Zusammenstellung aller verfügbaren Unterlagen auch eine erste, visuelle Begutachtung der Konstruktion.



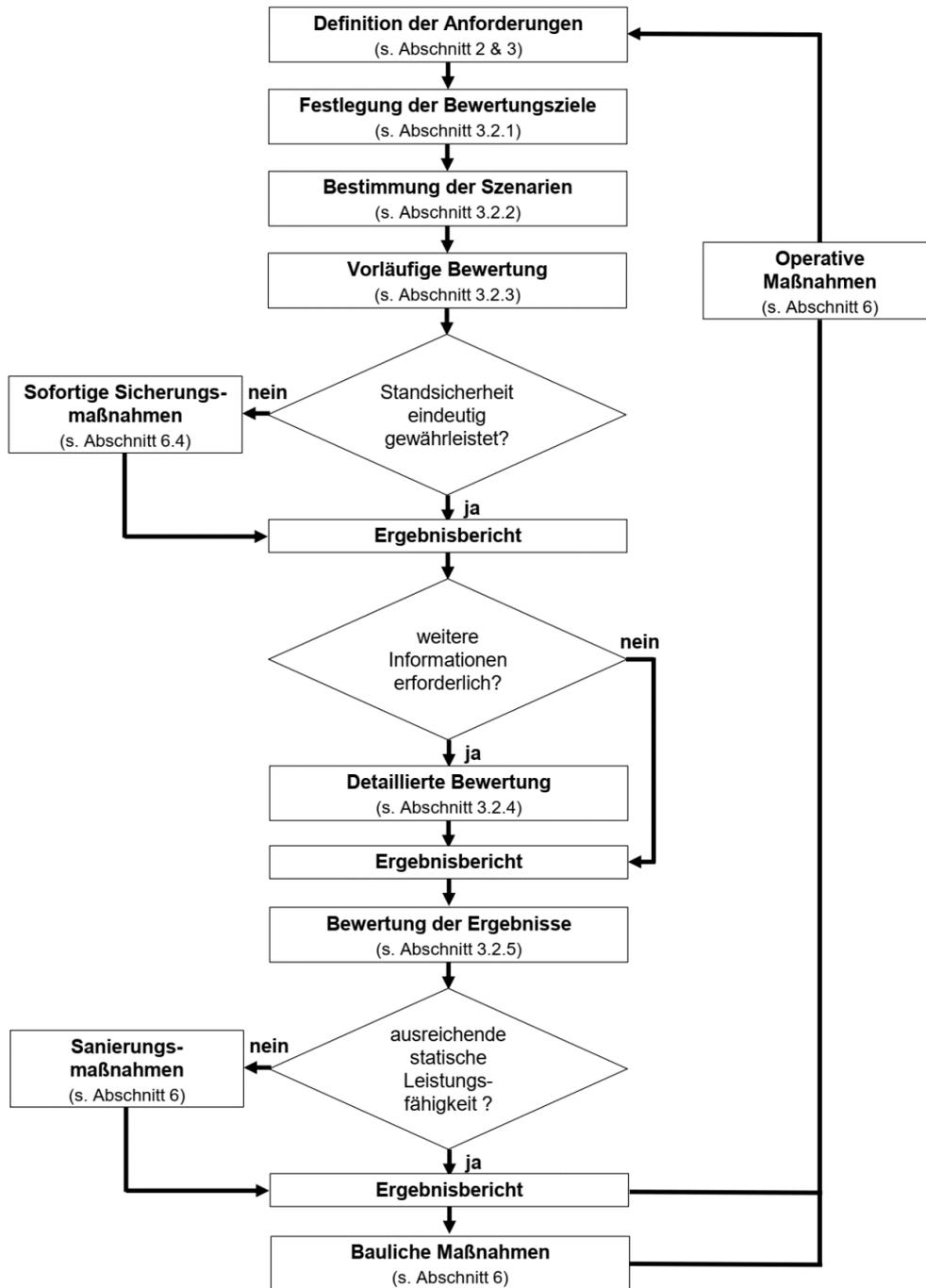
**Abbildung 16: Ablauf der Bauzustandsbewertung und Instandsetzung bestehender Konstruktionen nach [JRC, 2015] (die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [JRC, 2015])**

Auf Grundlage dieser ersten Maßnahmen soll dann die detaillierte Bauzustandsbewertung geplant und durchgeführt werden. Ziel ist dabei die exakte und zuverlässige Bewertung der Standsicherheit der Konstruktion sowie die Ableitung mittel- bis langfristiger Maßnahmen. Die detaillierte Bauzustandsbewertung umfasst sowohl eine detaillierte Untersuchung der bestehenden Konstruktion einschließlich der Auswertung verfügbarer Planungsunterlagen und der Aktualisierung der Eingangsgrößen, den Nachweis der Standsicherheit der Konstruktion einschließlich der Überprüfung und Bewertung der Ergebnisse als auch die Erarbeitung von weiterführenden Maßnahmen. Der allgemeine Ablauf der in [JRC, 2015] vorgeschlagenen Bauzustandsbewertung ist in Abbildung 17 dargestellt.

Die Bewertung des Bauzustandes soll nach [JRC, 2015] analog der ISO 13822:2010 auf Grundlage der aktualisierten Eingangsgrößen erfolgen. Dies umfasste neben den Einwirkungen, der Tragwerks- und Bauteilgeometrie auch die Materialkennwerte. Diese können mit Hilfe von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode ermittelt werden, welche im Vorfeld anhand von zerstörenden Materialuntersuchungen kalibriert worden sind. Die in situ-Untersuchung muss so erfolgen, dass die Ergebnisse einen direkten Bezug zur statischen Leistungsfähigkeit haben und die Umgebungsbedingungen berücksichtigen (vgl. [JRC, 2015], Kapitel III, Abschnitt 4.3.2).

Wenn die tatsächlichen charakteristischen Materialkennwerte ermittelt werden sollen, so wird die zerstörende Prüfung von stichprobenartig entnommenen Proben im Labor in genormten Prüfverfahren empfohlen. Erforderlichenfalls ist eine Umrechnung der Versuchsergebnisse auf

die erforderlichen Materialkennwerte möglich, wenn geeignete, auf der sicheren Seite liegende Umrechnungsfaktoren zum Einsatz kommen (vgl. [JRC, 2015], Kapitel III, Abschnitt 4.3.2).



**Abbildung 17: Ablauf der Bauzustandsbewertung bestehender Konstruktionen nach [JRC, 2015] (die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [JRC, 2015])**

Die von der CEN/TC 250/WG 2 vorgeschlagene Richtlinie fasst den europäischen und internationalen Stand hinsichtlich der Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen zusammen. Diese soll der Ausgangspunkt für die Entwicklung einer harmonisierten europäischen Normung sein. Laut [JRC, 2015] sollen die Vorschläge in einem zweiten Schritt in eine Vornorm (CEN Technical Specification) übergehen. In einem dritten Schritt ist geplant, die Regelungen nach hinreichender Prüfung und praktischer Erprobung als separate Normenteile in die jeweiligen bestehenden Eurocodes einzubinden (vgl. [JRC, 2015], S. 85).

Ein erster Entwurf für eine derartige europäische Vornorm wurde 2016/2017 vorgelegt (s. [CEN/TC 250, 2017]). Dieser entspricht der in [JRC, 2015] vorgeschlagenen Richtlinie.

Die Vornorm des CEN/TC 250 „*Assessment of Existing Structures*“ [CEN/TC 250, 2017] wurde 2020 im Wesentlichen unverändert in die Technische Spezifikation FprCEN/TS 17440:2020 überführt und in Deutschland als Vornorm DIN CEN/TS 17440:2020 veröffentlicht (s. [FprCEN/TS 17440:2020], [DIN CEN/TS 17440:2020]). Eine bauaufsichtliche Einführung als Technische Baubestimmung erfolgte bis dato noch nicht (vgl. [M-VVTB, 2021]).

Die Zielstellung dieser Technischen Spezifikation ist die Festlegung zusätzlicher Anforderungen und Vorgaben, um die im Eurocode 0 getroffenen Bemessungsregeln für die Bewertung bestehender Konstruktionen anwendbar zu machen. Es soll hierdurch ermöglicht werden, Tragwerke über die konservativen Berechnungsmodelle und Basisvariablen hinaus mit Hilfe aktualisierter Informationen hinsichtlich ihrer Trag- und Funktionsfähigkeit zu erfassen und zu bewerten.

Die Aktualisierung der Informationen ist auch hier die grundlegende Voraussetzung für eine genauere und zuverlässigere Bewertung bestehender Tragwerke. Dabei sollten alle verfügbaren Informationen berücksichtigt werden. Dies umfasst neben Feststellungen vergangener Inspektionen auch die Ergebnisse der Bauzustandserfassung und Tragwerksuntersuchung. Hierzu können auch einschlägige national gültige Dokumente beispielsweise zur Aktualisierung von Werkstoffeigenschaften verwendet werden (s. a. [DIN CEN/TS 17440:2020], Abschnitt 4.4).

Die Bewertung einer bestehenden Konstruktion ist als mehrstufiger Prozess mit zunehmendem Detaillierungs- und Genauigkeitsgrad vorgesehen. Im Allgemeinen besteht dieser Prozess aus der Veranlassung der Bewertung, der Festlegung der Bewertungsziele, der Erarbeitung eines Bewertungsansatzes, der Erfassung des Bau-/Tragwerkszustandes und dessen Bewertung sowie dem Verfassen der entsprechenden Berichte und Dokumentationen (s. Abbildung 18).

Hinsichtlich der Erfassung des Bau-/Tragwerkszustandes werden nur allgemeine Festlegungen getroffen. Analog [JRC, 2015] wird ein zweistufiges Vorgehen gefordert (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18). Im Wesentlichen sollen die grundlegende Tragwerksgeometrie, vorhandene Schädigungen und die vorliegenden Rand-/Umgebungsbedingungen erfasst werden. Weitere messtechnische Untersuchungen zur Ermittlung von Beanspruchungen und Materialeigenschaften können zusätzlich vorgenommen werden, soweit dies für die Aktualisierung der Basisvariablen erforderlich ist. Konkrete Festlegungen zur Durchführung derartiger Untersuchungen werden in der DIN CEN/TS 17440:2020 nicht getroffen.

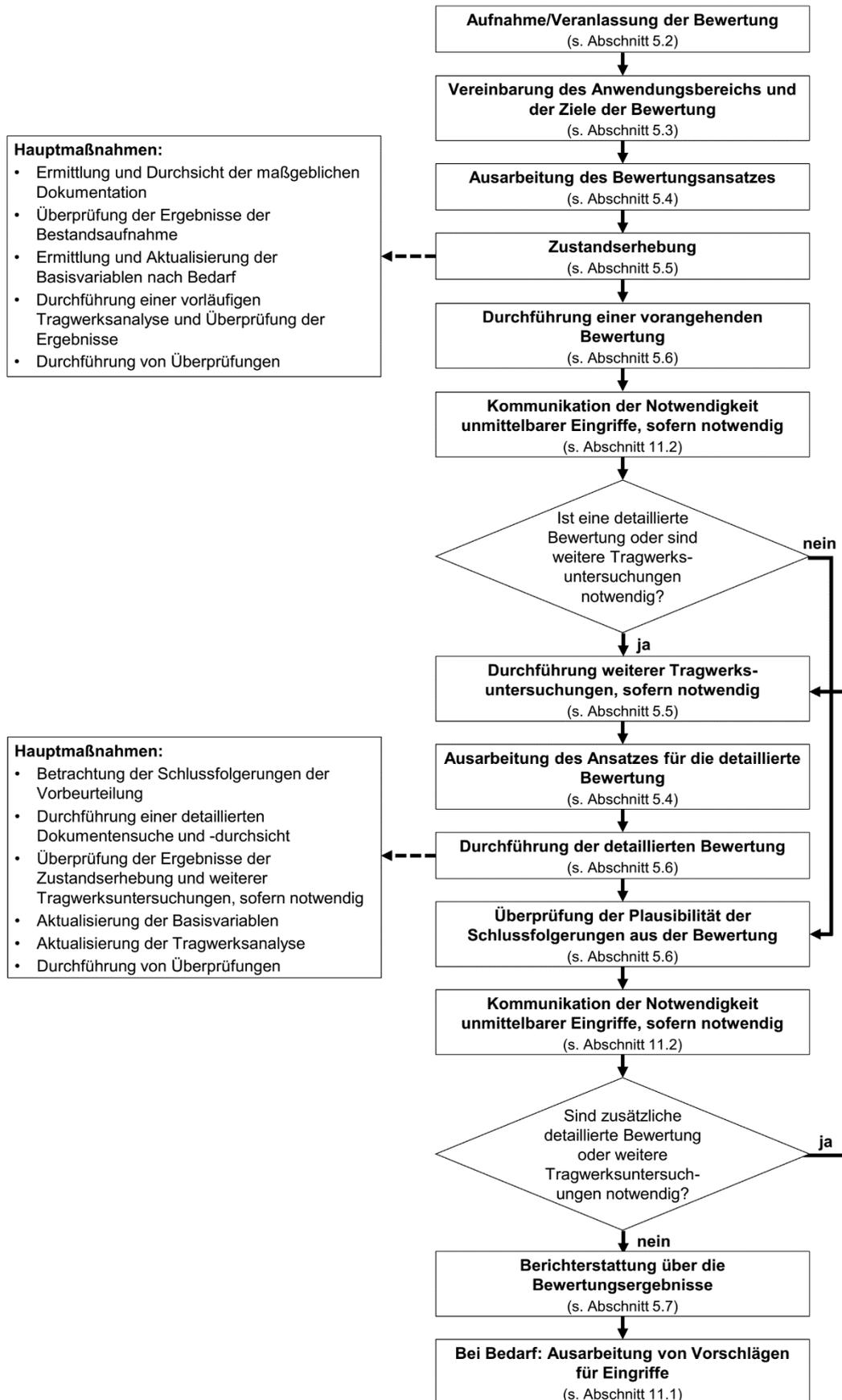
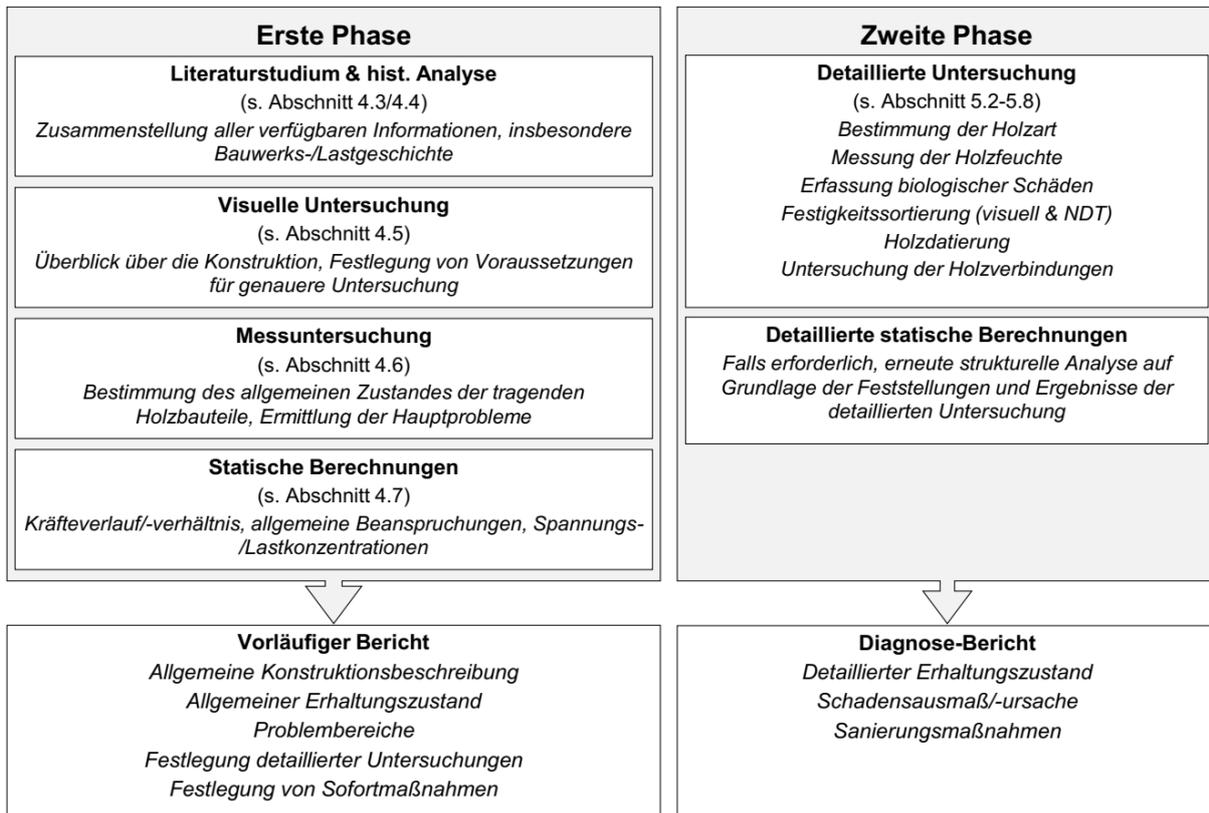


Abbildung 18: Ablauf der Bauzustandsbewertung nach [DIN EN 15308:2020] (die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [DIN EN 15308:2020])

Parallel zu der Arbeit des CEN/TC 250 hat sich in den vergangenen Jahren auch die WG 10 des CEN/TC 346 „*Erhaltung des kulturellen Erbes*“ unter Federführung der UNI mit der Erarbeitung einer europäischen Norm zur Bauzustandserfassung und -bewertung von bestehenden Holzkonstruktionen befasst. Ein erster Entwurf wurde 2017 in Form der prEN 17121 CEN/TC 346/WG 10 vorgelegt und als 2019 als DIN EN 17121 veröffentlicht. Eine bauaufsichtliche Einführung der Norm als Technische Baubestimmung erfolgte bis dato noch nicht (vgl. [M-VVTB, 2021]).

Diese Norm ist als Leitfaden für die Bewertung von historischen, denkmalgeschützten Holzkonstruktionen vorgesehen und ist damit das erste europäische Regelwerk, welches sich mit der Erfassung und Bewertung des Bauzustandes von bestehenden Holzkonstruktionen befasst. Eine sinngemäße Anwendung auf Holzbauteile, die nicht Teil eines denkmalgeschützten Bauwerkes sind, ist jedoch möglich. Ausgenommen sind davon Brettschichtholz und Holzwerkstoffe (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 1).

Im Wesentlichen unterteilt die DIN EN 17121:2019 die Bauzustandserfassung und -bewertung in zwei Phasen. Die erste Phase dient der vorläufigen Bewertung, wohingegen die zweite Phase die detaillierte Untersuchung der Konstruktion darstellt (s. Abbildung 19).



**Abbildung 19: Bauzustandserfassung und -bewertung nach DIN EN 17121:2019 (eigene Darstellung, die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [DIN EN 17121])**

Vergleicht man die Festlegungen der DIN EN 17121:2019 mit dem Vorschlag der CEN/TC 250/WG 2 für eine harmonisierte europäische Richtlinie zur Bauzustandserfassung und Stand-sicherheitsbewertung, so wird eine vollständige Übereinstimmung mit dem in [JRC, 2015] vorgeschlagenen Ablauf ersichtlich (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 19).

Auch die DIN EN 17121:2019 fordert eine Festigkeitssortierung des in den bestehenden Konstruktionen verbauten Holzes, sofern es sich um „[...] für die Festigkeit, Gebrauchstauglichkeit

und Stabilität der Konstruktion [...]“ relevante Bauteile handelt (s. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.1)

Die in situ-Festigkeitssortierung soll die erforderliche Grundlage für eine zuverlässige Bewertung der Konstruktion entsprechend den geltenden Bemessungsnormen liefern (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.3). Hierbei wird explizit eine visuelle Festigkeitssortierung nach DIN EN 14081-1:2016 gefordert. Abweichend von den Regelungen für die Sortierung von neuem Bauholz soll sich die in situ-Festigkeitssortierung auf den vorher festgelegten kritischen Bereich eines Holzbauteiles begrenzen. Die getroffene Festigkeitszuordnung wird dann für das gesamte Bauteil angenommen (s. [DIN EN 17121:2017], Abschnitt 5.5.2). Als kritischer Bereich wird ein Bauteilabschnitt definiert, welcher aufgrund der festigkeitsverringenden Merkmale, seiner Lage oder seines Erhaltungs-/Spannungszustandes für die Tragfähigkeit und Standsicherheit besonders relevant ist (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 3.5).

Hinsichtlich der zu berücksichtigenden festigkeitsverringenden Merkmale weist die DIN EN 17121:2019 unter Abschnitt 5.6.3 darauf hin, dass nur ein Teil der in DIN EN 14081-1 aufgeführten Merkmale zerstörungsfrei<sup>8</sup> gemessen werden kann. Konkret handelt es sich hierbei um Äste, Faserabweichungen und Schwindrisse. Die Jahrringbreite kann zusätzlich zerstörungsfrei durch radiale Kernbohrungen mit mindestens 10 cm Tiefe ermittelt werden.

Die festgestellten festigkeitsverringenden Merkmale müssen sorgfältig hinsichtlich ihres Einflusses beurteilt werden. Hierbei ist unter anderem die Art der Hauptbeanspruchung des Bauteils zu berücksichtigen (s. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.2). Es kann von den auf nationaler Ebene festgelegten Sortierverfahren abgewichen werden, falls dies die Situation vor Ort erfordert. Generell sollte die Festigkeitssortierung durch Fachpersonal erfolgen (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.3).

Weiterhin trifft die DIN EN 17121:2019 grundlegende Festlegungen zur Durchführung der visuellen Festigkeitssortierung – wie etwa zum Umgang mit eingeschränkt zugänglichen Bauteilen und dem Vorhandensein von mechanischen oder biotischen Schädigungen (s. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.3 a)-d)).

Sollte eine rein visuelle Festigkeitssortierung für die umfassende Erfassung und Bewertung des Bauzustandes nicht ausreichend sein, können zusätzlich zerstörungsfreie Prüfungen zum Einsatz kommen. Hierüber können physikalisch-mechanische Eigenschaften ermittelt werden, welche in enger Beziehung zu der Festigkeit in den festgelegten kritischen Bereichen stehen. Die verwendeten Prüfmethode dürfen dabei keinen negativen Einfluss auf die Festigkeit oder den historischen Wert haben (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.4). Die zerstörungsfreie Untersuchung der Holzbauteile wird darüber hinaus auch im Zusammenhang mit der Bewertung von Verbindungen und Anschlüssen empfohlen (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.8.4).

Im Anhang A (informativ) der DIN EN 17121:2019 werden ausgewählte zerstörungsfreie-/arme Prüfmethode für die Untersuchung von Holzkonstruktionen aufgeführt. Neben einfachen Hilfsmitteln und Messgeräten (bspw. Holzfeuchte-/Klimamessgeräte) sowie der Entnahme von Bohrkernproben werden auch dynamische Methoden (Frequenz-/Schwingungsmessung, Schalllaufzeitmessung) empfohlen, welche bereits bei der maschinellen Festigkeitssortierung

---

<sup>8</sup> Der Begriff „zerstörungsfrei“ meint in diesem Zusammenhang, dass keine Rückbau- oder Freileigungsmaßnahmen erforderlich sind.

von neuem Holz Anwendung finden. Konkrete Festlegungen zur Durchführung der zerstörungsfreien/-armen Prüfung werden jedoch nicht getroffen.

Weiterführende Festlegungen und Anforderungen an die Bauzustandserfassung und die Erstellung von Bauzustandsberichten sind in der DIN EN 16096:2012 zu finden. Allgemeine Begrifflichkeiten in diesem Zusammenhang werden in der DIN EN 15898:2020 erläutert. Festlegungen zur Vorgehensweise und Dokumentation der Probenentnahme sowie zum Umfang und zur Behandlung der Proben trifft die DIN EN 16085:2012.

## **3.2. Festigkeitsuntersuchung und Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen**

### **3.2.1. Regelwerke für die Ermittlung der Materialeigenschaften**

Der internationale und europäische Trend der Normung zeigt, dass eine zuverlässige Stand sicherheitsbewertung und damit eine wirtschaftliche und substanzschonende Instandsetzung bestehender Konstruktionen nur auf Grundlage einer detaillierten, fachkundigen Bauzustandserfassung möglich ist (vgl. a. [Piazza/Riggio, 2008], [Lißner/Rug, 2018]). Diese Forderung besteht bereits seit den 1980er Jahren (s. u. a. [Ehlbeck/Görlacher, 1987], [Seemann, 1989], [Rug/Seemann, 1991-1], [Görlacher, 1992], [Erler, 1993], [DGFH, 1997], [Görlacher, o.D.]).

Erste Entwürfe für eine vereinheitlichte europäische Normung enthalten bereits Vorschläge für detaillierte Festlegungen hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Erfassung des Bauzustandes und der Bestimmung der vorhandenen Materialeigenschaften (vgl. [JRC, 2015], [DIN CEN/TS 17440:2020], [DIN EN 17121:2019]). Im Wesentlichen ist dafür die Durchführung einer Festigkeitssortierung entsprechend der für neues Bauholz geltenden Normen vorgesehen.

Historisch betrachtet wurde die Festigkeitssortierung zwar auch auf Grundlage von Erfahrungswerten und Erkenntnissen aus bestehenden Konstruktionen entwickelt (vgl. Abschnitt 2.2.1), jedoch dienen die heutzutage normativ geregelten Sortierverfahren ausschließlich der Sortierung von neuem Bauholz im Sägewerk oder in den weiterverarbeitenden Betrieben (bspw. bei der Herstellung von Konstruktionsvollholz, Brettschicht- und Brettsperrholz).

Die strenge, uneingeschränkte Anwendung dieser Sortierverfahren und -methoden bei der Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist jedoch meist nicht möglich. Maßgeblich sind dafür die nachfolgend aufgeführten Schwerpunkte (s. a. [Ehlbeck/Görlacher, 1987], [Ehlbeck/Görlacher, 1990], [Görlacher, 1992], [Ehlbeck/Görlacher, 1993], [Bonamini, 1995], [Bonamini/et al., 2001], [Piazza/Riggio, 2008], [Machado/et al., 2011], [Lißner/Rug, 2015]).

#### **Einfluss der Herstellungsmethoden:**

*Die Sortiervorschriften der DIN EN 14081-1 in Verbindung mit der DIN 4074-1/-5 gelten für Schnittholz. Die Sortierkriterien und deren Grenzwerte beziehen sich ausschließlich auf Ergebnisse von Untersuchungen an Schnittholz. In historischen Holzkonstruktionen wurde bis etwa 1850 überwiegend handbehauenes Bauholz verwendet. Bei dessen Herstellung wurde der natürliche Wuchs weniger stark zerstört als bei der Herstellung von Schnittholz. Hierdurch weist handbehauenes Bauholz meist einen großen Anteil an Baumkante auf, der bei strenger Anwendung der Sortiervorschriften zu einer Einstufung in niedrigere Sortierklassen führt. Ob*

aus der unterschiedlichen Herstellung Unterschiede in dem Tragverhalten bestehen, wurde bis dato noch nicht hinreichend untersucht.

**Einschränkungen hinsichtlich Erreichbarkeit und Einsehbarkeit:**

Da die Holzbauteile nicht aus ihrer Lage ausgebaut werden können, um die Festigkeitseigenschaften mit Hilfe von Sortieranlagen zu bestimmen, bleibt nur die Möglichkeit der visuellen Sortierung. Aufgrund der eingeschränkten Einsehbarkeit durch die teilweise verdeckte Einbausituation können die Holzbauteile nicht vollständig untersucht und visuell sortiert werden. Einige Sortierkriterien – beispielsweise die Kriterien „Jahrringbreite“ und „Markröhre“ – können dadurch nicht erfasst und beurteilt werden.

**Berücksichtigung der Bauteilbeanspruchung:**

Bei der Sortierung von neuem Bauholz sind die spätere Einbausituation und somit die endgültige Beanspruchung nicht bekannt. Es muss daher sichergestellt werden, dass ein Stück Bauholz jegliche Beanspruchung mit ausreichender Sicherheit aufnehmen kann. Bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist die Einbausituation und aufzunehmende Beanspruchung jedoch festgelegt. Des Weiteren wirken sich die Sortierkriterien der DIN 4074-1/-5 bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten unterschiedlich aus. So wirkt sich die Ästigkeit stärker auf die Zug- und Biegetragfähigkeit aus als auf die Druck- oder Schubtragfähigkeit. In bestehenden Konstruktionen sind die Beanspruchung, der Kraftfluss und die Spannungsverteilung jedoch festgelegt und können genau erfasst werden. Somit können die vorhandenen Wuchsmerkmale entsprechend ihrer konkreten Auswirkung auf die Tragfähigkeit bewertet und gewichtet werden. Die strenge Anwendung der Sortierkriterien auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen führt dann dazu, dass einem Teil der Bauteile fälschlicherweise eine geringere Tragfähigkeit zugesprochen wird, als es unter der gegebenen Einbau- und Beanspruchungssituation der Fall ist.

**Anwendung der Sortierkriterien:**

Die Tragfähigkeit und das Bruchverhalten werden maßgeblich durch die Festigkeit und Steifigkeit des fehlerfreien Holzes sowie von den vorhandenen Wuchsmerkmalen beeinflusst. So verursachen Äste und starke Faserneigungen Schwachstellen im Holzbauteil. Die bei der Sortierung von neuem Bauholz als Sortierkriterium zu berücksichtigenden geometrischen Eigenschaften (bspw. Baumkante, Verformungen, Verdrehungen) besitzen hingegen keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Tragfähigkeit und das Bruchverhalten. Deren Begrenzung dient hauptsächlich der Sicherstellung der einwandfreien Herstellung von Bauteilanschlüssen und Verbindungen. Dies ist bei neuem Bauholz erforderlich, da die spätere Einbausituation bei der Schnittholzerstellung nicht bekannt ist. Bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist dies jedoch nicht der Fall. Die strenge Anwendung der Grenzwerte der geometrischen Bauteileigenschaften kann daher zu einer unbegründeten Abwertung der Materialqualität und damit Unterschätzung der Tragfähigkeit führen.

**Qualifikation und Eignungsnachweise:**

Entsprechend der Festlegungen der DIN EN 14081-1 in Verbindung mit der DIN 4074 darf eine Festigkeitssortierung nur durch Betriebe ausgeführt werden, welche über einen entsprechenden Eignungsnachweis für die eingesetzten Sortieranlagen und Geräte sowie über entsprechend geschultes Fachpersonal verfügen. Dies betrifft sowohl die visuelle und apparativ unterstützte visuelle Sortierung (s. [DIN 4074-1:2012] und [DIN 4074-5:2008], Abschnitt 6) als

auch die maschinelle Sortierung (s. [DIN EN 14081-2:2018]). Da die Regelungen der Festigkeitssortierung von neuem Schnittholz nicht ohne weiteres auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen übertragen werden können, ist ein gesonderter Eignungsnachweis erforderlich (vgl. [DIN EN 17121:2019], Abschnitt 5.6.3). Derartige Nachweise sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht bauaufsichtlich geregelt.

**Ableitung der charakteristischen Materialkennwerte:**

Den normativen Zuordnungen der visuell festgestellten Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 über die Regelungen der DIN EN 1912 liegen zerstörende Laboruntersuchungen zugrunde. Die Zuordnung erfolgt dabei jeweils anhand der Holzart, der Herkunft und der verwendeten Sortiervorschrift. Sie kann jedoch nur für die in DIN EN 1912 aufgeführten Kombinationen vorgenommen werden. Bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen kann die Herkunft des Holzes meist nicht mehr geklärt werden. Selbst wenn dies möglich ist, kann nicht zweifelsfrei belegt werden, dass sich die in den Wuchsgebieten vorherrschenden Wuchsbedingungen im Laufe der Zeit nicht geändert haben. Dementsprechend wäre für Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen, welche visuell sortiert werden, eine erneute Einstufung über zerstörende Laboruntersuchungen erforderlich. Ein Ausbau und die labortechnische Untersuchung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen führt jedoch zu einem Verlust der teilweise historischen Bausubstanz. Daher sind derartige Untersuchungen in bestehenden, historischen Holzkonstruktionen nicht durchführbar. Um dennoch quantitative Aussagen über die Materialeigenschaften treffen zu können, ist eine zerstörungsfreie/-arme Ermittlung der Materialkennwerte erforderlich. Die verfügbare Gerätetechnik zur Durchführung von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode ist nicht standardisiert. Die verwendeten Mess- und Auswertungsverfahren werden durch die Entwickler/Hersteller der Prüfgeräte festgelegt.

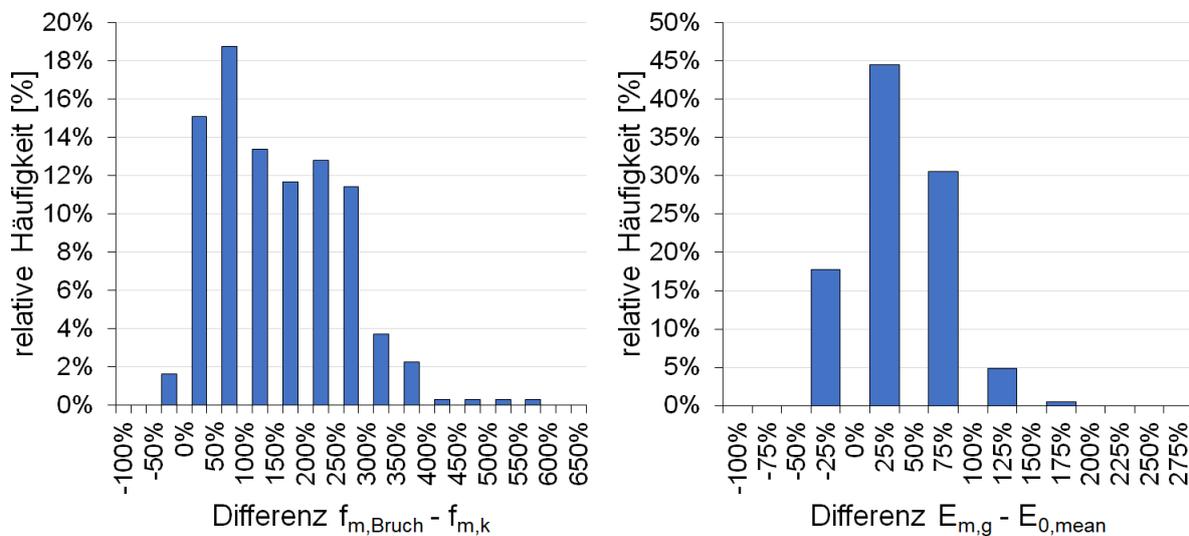
**3.2.2. Festigkeitsuntersuchungen mit zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode**

Die bei der Anwendung der normativen Regelungen der Schnittholzsortierung auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen zu erwartenden Komplikationen und Einschränkungen führen in der Praxis dazu, dass eine Festigkeitssortierung nur in den seltensten Fällen vorgenommen wird (vgl. [Ehlbeck/Görlacher, 1990], [Lißner/Rug, 2018]). Selbst dann erfolgt diese meist nur als visuelle Sortierung in begrenztem Umfang. Die visuelle Sortierung ist jedoch nur bedingt geeignet, um die tatsächlich vorhandenen Materialeigenschaften von Holzbauteilen zu ermitteln. Ursache hierfür ist der nur schwach ausgeprägte statistische Zusammenhang der visuell feststellbaren und messbaren Wuchseigenschaften und den Festigkeitseigenschaften (vgl. Abschnitt 2.2.3 & [Sandomeer/Steiger, 2009], [Denzler/Glos, 2009]).

Der unterstützende Einsatz von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode führt zu einer wesentlichen Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Die grundlegende Eignung ausgewählter Prüfmethode für die maschinelle Festigkeitssortierung ist bereits mehrfach untersucht worden (vgl. Abschnitt 2.3). Die Verbesserung des Sortiererergebnisses durch eine apparativ unterstützte visuelle Sortierung wurde bereits bei der Sortierung von neuem Schnittholz untersucht und bestätigt (vgl. Abschnitt 2.2.2 & [Blaß/Frese, 2002]).

Dies gilt in gleichem Maße für Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen, denn gerade hier führen die in Abschnitt 3.2.1 erläuterten Einschränkungen in der Anwendung der visuellen Sortierung dazu, dass die Tragfähigkeit der Holzbauteile meist deutlich unterschätzt wird (s.

Abbildung 20 und vgl. [Zimmer/Kothe, 1990], [Machado, 2013], [Feio/Machado, 2015], [Machado, 2015]). Somit ist insbesondere für diesen Anwendungsfall eine Optimierung der Festigkeitssortierung sowie die Festlegung detaillierter Sortiermethoden und -kriterien erforderlich (vgl. [Feio, 2005], [Piazza/Riggio, 2008]). Die vorhandenen Sortiervorschriften treffen jedoch nur vage Festlegungen hinsichtlich des kombinierten Einsatzes von visueller Sortierung und zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n) (vgl. [DIN 4074-1:2012], [DIN 4074-5:2008]). Auch die verfügbaren Regelwerke für die Erfassung des Bauzustandes legen hierzu keine konkreten Anforderungen fest (s. a. [Machado/et al., 2011] und vgl. [DIN CEN/TS 17440:2020], [DIN EN 17121:2019], [WTA 7-2:2019]). Die Zuverlässigkeit einer durch zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode(n) unterstützten visuellen Festigkeitssortierung hängt jedoch in hohem Maße von der Art und Weise des kombinierten Einsatzes ab (vgl. [Feio/Machado, 2015], [Machado, 2015]).



**Abbildung 20: Differenz zwischen versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten und charakteristischen Kennwerten nach EN 338 (für neues Bauholz (*Pinus pinaster* AIT.), Sortierklasse E nach NP 4305:2005/Festigkeitsklasse C18 nach EN 338:2009; nach [Machado/et al., 2011]; ohne Angaben zum Stichprobenumfang)**

Insbesondere die Interpretation der Messergebnisse spielt dabei eine zentrale Rolle. Zum einen ist eine gemeinsame Betrachtung und Bewertung der Messergebnisse zwingend erforderlich, da sowohl die visuelle Sortierung als auch die zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n) allein betrachtet keine realistischen Aussagen ermöglichen. Die Ursache hierfür liegt darin begründet, dass die Steifigkeit eines Holzbauteiles maßgeblich durch die Qualität des fehlerfreien Holzes beeinflusst wird, die Festigkeit und das Bruchverhalten hauptsächlich von den vorhandenen Wuchsmerkmalen und Fehlstellen abhängig ist (vgl. [Piazza/Riggio, 2008]). Letztere können durch eine umfassende visuelle Begutachtung und Sortierung vergleichsweise genau erfasst werden. Der überwiegende Teil der heutzutage für die Ermittlung der Materialqualität des fehlerfreien Holzes verfügbaren zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode(n) liefert jedoch nur Schätzwerte (vgl. [Grippa, 2009]). Des Weiteren werden zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode(n) meist auf Grundlage von vereinfachten Annahmen hinsichtlich des tatsächlichen Materialverhaltens abgeleitet. Hieraus und aus den natürlichen Streuungen der Materialeigenschaften innerhalb eines Bauteiles resultieren Unsicherheiten, welche bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse berücksichtigt werden müssen (vgl. [Bonamini, 1995]).

Die detaillierte und begründete Planung ist daher unbedingte Voraussetzung. Dies umfasst neben der Festlegung der anzuwendenden Prüfmethode auch eine Abgrenzung, in welchem Umfang und mit welchem Ziel diese Methoden zum Einsatz kommen. So sollten beispielsweise die visuelle Begutachtung und Sortierung hauptsächlich zur Feststellung von Schad-, Schwach- und Fehlstellen eingesetzt werden (s. a. [Piazza, 2009]). Insbesondere sollte hierbei auf die zugrunde gelegten Sortierkriterien geachtet werden (vgl. [Piazza/Riggio, 2008]). Deren Ergebnisse können dann beispielsweise auch zur Interpretation der zerstörungsfrei/-arm gewonnenen Messwerten genutzt werden.

Hinsichtlich der Anwendung der zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode am Bauteil muss der durch sie erfasste Bereich berücksichtigt werden (vgl. [Feio, 2005]). Aussagen über die Tragfähigkeit des kompletten Bauteiles können nur auf Grundlage global ermittelter Messwerte getroffen werden (bspw. durch dynamische Messmethoden). Die Bewertung von Schad- und Schwachstellen sowie lokal begrenzten Bauteilbereichen wie Auflager- und Verbindungsgebiete sollte hingegen mithilfe von lokal gewonnenen Messwerten erfolgen (bspw. Probenentnahme oder Eindring-/Ausziehwidstandsmessung).

Derartige Überlegungen waren bereits in den 1980er Jahren Gegenstand mehrerer Untersuchungen. Seit 1985 befasste sich der Sonderforschungsbereich 315 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter anderem eingehend mit der Erforschung und Untersuchung von Methoden zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Ein Vorschlag für eine in situ-Sortiermethode ist beispielsweise in [Ehlbeck/Görlacher, 1990], [Görlacher, 1992], [Ehlbeck/Görlacher, 1993] zu finden.

Die von EHLBECK und GÖRLACHER vorgeschlagene Methode umfasst neben der visuellen Sortierung und Holzfeuchtemessung auch die Ermittlung der Rohdichte und des Elastizitätsmoduls durch zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode. Die visuelle Sortierung und Holzfeuchtemessung sollten in jedem Fall vorgenommen werden, da sie ohne größeren Aufwand im Zuge der ohnehin erforderlichen Zustands-/Schadenserfassung erfolgen können. Zerstörungsfreie Prüfmethode können dabei unterstützend zur Lokalisierung und Eingrenzung von verdeckten Schäden zum Einsatz kommen.

Die Ermittlung der Rohdichte ist erforderlich, wenn eine hohe Tragfähigkeit nachgewiesen werden muss. Dabei können sowohl zerstörungsfreie Prüfmethode (bspw. Eindring-, Auszieh- und Bohrwidstandsmessung) als auch die zerstörungsarme Entnahme von Bohrkernproben zum Einsatz kommen. Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls durch dynamische, zerstörungsfreie Prüfmethode wird in [Ehlbeck/Görlacher, 1990] als ein „letztes Mittel“ zum Nachweis einer hohen Tragfähigkeit vorgeschlagen, da dies mit einem vergleichsweise hohen Aufwand verbunden ist.

Ein vergleichbares Verfahren wurde 1990 von ZIMMER und KOTHE erarbeitet. Dieses Verfahren schlägt ebenfalls eine mehrstufige Herangehensweise vor. Handelt es sich bei den betreffenden Holzbauteilen um untergeordnete oder gering beanspruchte Bauteile, ist eine reine visuelle Begutachtung und Sortierung ausreichend (Stufe I). Für normal- und hochbelastete Bauteile sollte zusätzlich die Rohdichte sowie eine Festigkeitseigenschaft oder der Elastizitätsmodul ermittelt werden (Stufe II – Probenentnahme und dynamische Messmethoden). Bei Sonderkonstruktionen (bspw. Holzkonstruktionen mit Denkmalwert) wird darüber hinaus eine Untersuchung hinsichtlich verdeckter Schäden mit Hilfe von zerstörungsfreien, bildgebenden

Prüfmethode empfohlen (Stufe III – Röntgen, Computertomografie). Konkrete Anwendungsrichtlinien werden in [Zimmer/Kothe, 1990] jedoch nicht getroffen.

Obwohl der kombinierte Einsatz der visuellen Begutachtung und Sortierung in Verbindung mit zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode zur Feststellung der vorhandenen Materialqualität von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen seit etwa vier Jahrzehnten in der Fachliteratur empfohlen oder gefordert wird, erhielten diesbezügliche gesonderte Regelungen bis dato keinen Einzug in die einschlägigen Regelwerke. Dies führt dazu, dass eine umfassende Erfassung und Bewertung der vorhandenen Materialqualität von Holzbauteilen in situ nur selten erfolgt. Die Art der verwendeten Prüfmethode sowie der Umfang der Untersuchungen hängt dabei erfahrungsgemäß in hohem Maße von den Projektbeteiligten ab.

### 3.2.3. Einfluss der Alterung auf die Materialkennwerte von Holzbauteilen

Eine zentrale Problemstellung bei der Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen im eingebauten Zustand ist, inwieweit die Materialeigenschaften von altem Holz überhaupt mit den Eigenschaften von neuen Holzbauteilen vergleichbar sind. Diese Frage ist seit den 1950er Jahren Gegenstand mehrerer Untersuchungen gewesen. Eine ausführliche Zusammenstellung der wesentlichen Untersuchungen und grundlegenden Erkenntnisse hierzu ist in [Cavalli/et al., 2016] und [Kranitz/et al., 2016] zu finden. Obwohl die holzanatomischen und -chemischen Eigenschaften scheinbar altersbedingte Veränderungen aufweisen, ist grundlegend davon auszugehen, dass die physikalisch-mechanischen Eigenschaften nicht der Alterung unterliegen. Eine Reduzierung der Materialeigenschaften findet meist durch äußere Einflüsse (Temperatur-/Feuchte-/Strahlungsbeanspruchung, Bewitterung, biotische Schadorganismen) sowie in anaerober Umgebung (im Boden/Wasser bzw. bei Boden-/Wasserkontakt) statt (vgl. [Kranitz/et al., 2016], s. a. Abbildung 21). Eine Übersicht über die Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen an europäischen und nordamerikanischen Nadel- und Laubbäumen ist in der Tabelle 14 aufgeführt.

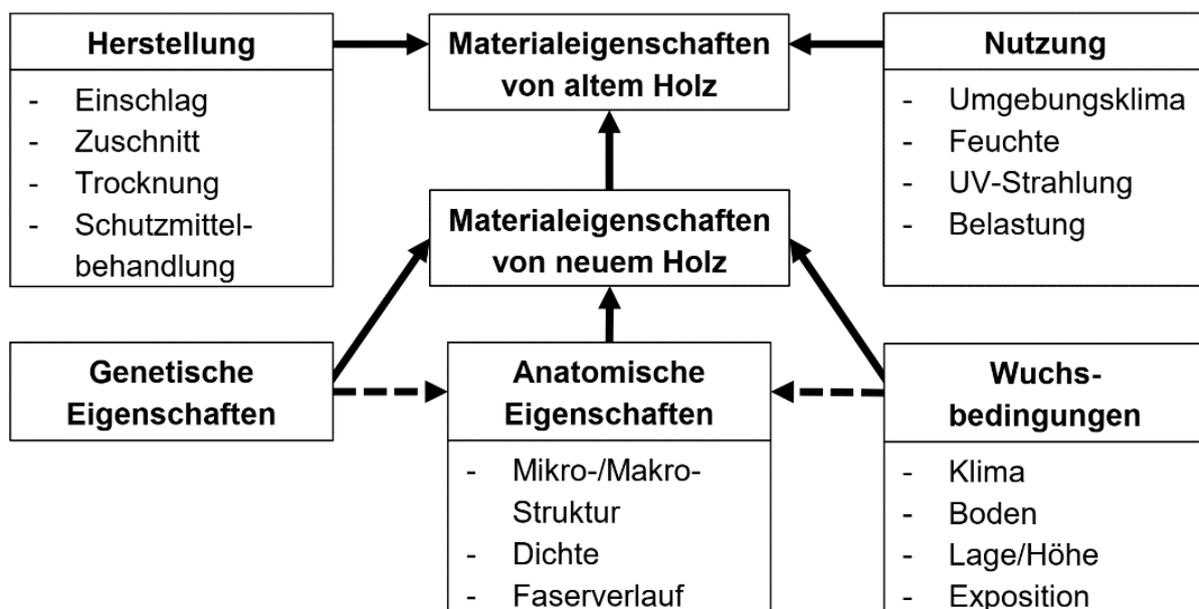


Abbildung 21: Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften von altem Holz (nach [Kranitz, 2014], überarbeitet durch den Verfasser)

**Tabelle 14: Ausgewählte Untersuchungen zum Alterungseinfluss an europäischen und nord-amerikanischen Nadel-/Laubhölzern**

	Quelle	kf/B	Alter [a]	$\rho$	$E_{dyn}$	$E_{stat}$	G	$f_m$	$f_v$	$f_{c,0}$	$f_{t,0}$
Fichte/Tanne	[Brol/et al., 2012]	kf/B	130					-			
	[Cavalli/et al., 2017]	B	70				-				
	[Ehlbeck/Görlacher, 1987]	kf	110-280	-		-		-	-	-	
	[Erler/ Knospe, 1989]	kf	60-90	-		-				-	
	[Kranitz/et al., 2014] [Kranitz, 2014]	kf/B	115-290	-	(↑)	(↑)		-			
	[Kuipers, 1986]	kf	52-120	(↓)					-	-	
	[Lang, 2004]	kf	k. A.			(↓)				(↓)	
	[Niemz/et al., 1997]	kf	160	-							-
	[Nier, 1994]	kf/B	50-300					↓			-
	[Rug/Seemann, 1991-2]	kf	140	-							↓
	[Schulz/et al., 1984]	kf	300	↑				↑		↑	↑
	[Schickhofer/Brandner, 2011]	B	70		(↓)	(↓)		(↓)			
[Weimar, 2000]	kf	k. A.	(↓)		↓		↓				
Kiefer	[Burmester, 1967]	kf	60	-				-/(↓)		-	
	[Cooper/et al., 1996]	kf	20-65			(↓)		(↑)			
	[Deppe/Rühl, 1993]	kf	600	-						-	
	[Ehlbeck/Görlacher, 1987]	kf	290	-		-		-	-	-	
	[Erhardt/et al., 1996]	k.A.	300			-					
	[Erler/Knospe, 1989]	kf	60-90	-		-				-	
	[Falk/et al., 1999]	B	55			-		↓			
	[Lang, 2004]	kf	k. A.			↓				(↓)	
	[Nier, 1994]	kf/B	50-300					↓			-
	[Rug/Seemann,1991-2]	kf	60-120	-							(↑)
	[Weimar, 2000]	kf	k. A.	-		↓					
	[Witomski/et al., 2014]	kf	240-470	(↑)		(↑)					(↑)
Douglasie	[Arbelaez, 2019]	kf	100	-	-						
	[Falk/et al., 1999]	B	55			-		↓			
	[Falk/et al., 2000]	B	60			↑				↑	
	[Falk/et al., 2008]	kf/B	55	-		(↑)/↑		-/↓			
	[Green/et al., 2001]	kf/B	55			-/(↑)		(↓)/-			
	[Rammer, 1999]	B	k. A.			-		↓	-		
Eiche	[Ehlbeck/Görlacher, 1987]	kf	500	-		-		-	-	-	
	[Erler/Knospe, 1989]	kf	60-90	-		-				-	
	[Kranitz, 2014]	kf	115-290	-	(↑)	(↑)		-			
	[Niemz/et al., 1997]	kf	160	-						-	
	[Rug/Seemann, 1991-2]	kf	140	↓						-	

kf ... klein-fehlerfreie Proben; B ... Proben in Bauteildimension; k. A. ... keine Angaben; - ... keine bis sehr geringe Differenz,  $\Delta < 5\%$ ; (↑/↓) ... geringe Differenz,  $\Delta = 5-10\%$ ; ↑/↓ ... deutliche Differenz,  $\Delta > 10\%$

Aus den bisherigen Untersuchungen lässt sich kein einheitlicher Trend hinsichtlich einer Reduzierung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Alter der Holzbauteile ableiten. Vor allem bei den an kleinen, fehlerfreien Proben durchgeführten Untersuchungen wurde keine Reduzierung festgestellt. Bei Untersuchungen an Proben in Bauteildimensionen hingegen zeigte sich überwiegend eine Reduzierung der Festigkeit. Diese lässt sich darauf zurückführen, dass alte Holzbauteile in der Regel Querschnittsschwächungen und biotische Schädigungen – d.h. Fäule und Insektenfraßschäden – aufweisen. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass die an neuem Bauholz festgestellten festigkeitsrelevanten Beziehungen zwischen Materialeigenschaften/-merkmalen auch bei altem Bauholz ansetzbar sind (s. bspw. [Ehlbeck/Görlacher, 1993], [Erhardt/et al., 1996]). Die vereinzelt festgestellten Veränderungen des strukturellen Aufbaus können jedoch zu einer Versprödung der Holzsubstanz führen (s. bspw. [Kranitz/et al., 2016]).

Generell ist die Interpretation der bisherigen Untersuchungen – insbesondere der Vergleich der Materialeigenschaften von altem und neuem Holz – schwierig. Im Wesentlichen liegt dies in folgenden Umständen begründet (s. a. [Bonamini/et al. 2001], [Cavalli/et al., 2016], [Kranitz/et al., 2016]):

- 1) Die Herkunft und Wuchsbedingungen von altem Holz sind meist nicht bekannt.
- 2) Die ursprünglichen Materialeigenschaften sind nicht bekannt.
- 3) Die natürlichen Schwankungen der Materialeigenschaften können einen Alterungseffekt überlagern.
- 4) Die Herstellungs-/Nutzungsbedingungen sind meist nicht bekannt. Beispielsweise können chemische Holzschutzmittel die Festigkeit reduzieren.
- 5) Die Materialeigenschaften können durch holzerstörende Pilze reduziert werden. Anfängliche biotische Schädigungen sind meist nur mikroskopisch zu erkennen, obwohl bereits eine Festigkeitsreduzierung stattgefunden hat.
- 6) Eine Vorschädigung durch langanhaltende Feuchtebeanspruchung und/oder Belastung können den eigentlichen Alterungsprozess überlagern. Deren Einfluss ist hinlänglich untersucht und bekannt, jedoch handelt es sich hierbei nicht um einen Alterungseffekt im eigentlichen Sinne.
- 7) Die bisherigen Untersuchungen wurden nicht mit einheitlichen Prüfverfahren ermittelt.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass hinsichtlich der physikalisch-mechanischen Kennwerte kein signifikanter Unterschied zwischen altem und neuem Holz besteht, der nicht durch weitere Faktoren oder Umwelteinflüsse hervorgerufen wird.

### **3.3. Zusammenfassung**

Die Notwendigkeit einer Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen leitet sich aus verschiedenen Gründen her. Neben der Änderung der Nutzung oder der aufzunehmenden Lasten sind hierfür Schädigungen der Konstruktion durch holzerstörende Organismen, Überlastung oder Brandeinwirkung aber auch die Feststellung von Tragfähigkeitsdefiziten im Zuge regelmäßiger Bauzustandsprüfungen ursächlich (s. [JRC, 2015], [Rug, 2018], [ISO 13822:2010]). Die Bauzustandsbewertung muss dabei anhand der für neue Holzkonstruktionen geltenden Bemessungsregeln erfolgen (s. [DIN EN 1990:2021], [DIN EN 1995-

1-1/NA:2013]). Dieses Vorgehen kann jedoch zu einer zu konservativen Einschätzung der Trag- und Funktionsfähigkeit und damit zu wenig substanzschonenden und unwirtschaftlichen Eingriffen in das bestehende Tragwerk führen (s. u. a. [Görlacher, 1992], [Anthony/et al, 2009], [Machado, 2013], [Lißner/Rug, 2018]). Eine zuverlässige Erfassung und realistische Bewertung des Bauzustandes ist daher erforderlich. Die Feststellung der vorhandenen Materialqualität ist dabei von zentraler Bedeutung.

Zum aktuellen Zeitpunkt liegen in Deutschland keine bauaufsichtlich eingeführten Normen für eine umfassende Bauzustandserfassung und -bewertung vor. Lediglich vergleichsweise allgemeingehaltene Regelwerke zur Überprüfung der Trag- und Funktionsfähigkeit baulicher Anlagen wurden von der ARGEBAU und dem VDI veröffentlicht (s. [ARGEBAU, 2008], [VDI 6200:2010]). Die nachträgliche Bewertung der Standsicherheit einschließlich der Feststellung der vorhandenen Materialqualität wird darin zwar im Zuge eingehender Überprüfungen empfohlen, jedoch werden keine konkreten Festlegungen zu deren Durchführung getroffen.

Auf europäischer Ebene wurden im Zeitraum 2004-2013 mehrere nationale Normen in Italien, der Schweiz und Österreich erarbeitet und veröffentlicht, welche sich mit der Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Tragwerke – insbesondere Holzkonstruktionen – befassen (s. [UNI 11119:2004], [SIA 269-5:2011], [ONR 24009:2013]). Diese Regelwerke sehen eine Bauzustandsbewertung auf Grundlage in situ ermittelter Materialkennwerte vor und treffen hierzu teilweise Festlegungen bezüglich deren Bestimmung. Der unterstützende Einsatz zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode ist dabei vorgesehen. Jedoch fehlen konkrete Anforderungen an die Interpretation der Messergebnisse.

Im selben Zeitraum wurden erste Entwürfe für vereinheitlichte Richtlinien zur Bauzustandserfassung und -bewertung durch die COST Actions E55 und IE0601 erarbeitet und veröffentlicht (s. [Dietsch/Köhler, 2010], [Cruz/et al., 2013]). Diese Richtlinien spiegeln die bis dato verfügbaren methodischen Ansätze zwar wider, jedoch stellen sie noch keine europaweit einheitlichen Regelwerke dar. Im Jahr 2015 folgte ein erster Entwurf für eine vereinheitlichte europäische Norm (s. [JRC, 2015]). Ziel dieses Entwurfes ist die abweichenden Erfordernisse an die Bewertung bestehender Konstruktionen mit den Prinzipien des Eurocode 0 in Einklang zu bringen. Das Grundprinzip sieht eine vorläufige Bauzustandsuntersuchung sowie eine darauf aufbauende detaillierte Bauzustandsbewertung vor. Eine zentrale Rolle nimmt dabei auch die Bestimmung der vorhandenen Materialkennwerte ein. Die in [JRC, 2015] vorgeschlagene Richtlinie wurde 2020 im Wesentlichen unverändert als Technische Spezifikation DIN CEN/TS 17440:2020 veröffentlicht. Ein weiterer Normenentwurf wurde von dem CEN/TC 346 erarbeitet und 2019 als DIN EN 17121 veröffentlicht. Der Schwerpunkt dieser Norm liegt auf historischen, denkmalgeschützten Holzkonstruktionen, wobei die grundlegende Vorgehensweise einer vorläufigen Untersuchung und detaillierten Bewertung auch hier zur Anwendung kommt.

Die heutzutage verfügbaren europäischen Normen stellen einen ersten Schritt zur Vereinheitlichung des methodischen Vorgehens zur Bauzustandsbewertung dar. Die Erfassung der Materialqualität ist dabei wesentliche Voraussetzung. Dennoch enthalten die Regelwerke keine konkreten Festlegungen zur Durchführung der in situ-Festigkeitssortierung. Grundlegend soll entsprechend der für neues Bauholz geltenden Normen vorgegangen werden (s. bspw. [DIN EN 17121:2019]). Die strenge Anwendung dieser Sortiervorschriften ist jedoch nicht zielführend, da bei bestehenden Konstruktionen abweichende Bedingungen vorliegen. Im Wesentlichen betrifft dies die eingeschränkte Zugänglichkeit, der Umstand, dass bei der Sortierung von

neuem Bauholz die Einbausituation und Bauteilbeanspruchung unberücksichtigt bleiben sowie fehlende in situ handhabbare, kalibrierte Prüfgeräte (s. a. [Ehlbeck/Görlacher, 1990], [Piazza/Riggio, 2008], [Machado/et al., 2011], [Lißner/Rug, 2015]). Daher wird in der Praxis selten eine Festigkeitssortierung durchgeführt und auch dann meist nur visuell.

Die visuelle Sortierung ist für einen zuverlässige Aussage zur Materialqualität jedoch nicht ausreichend (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Ermittlung der Materialqualität mit Hilfe zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode ist hingegen wesentlich zuverlässiger, wie grundlegende Untersuchungen zur maschinellen Festigkeitssortierung belegen (vgl. Abschnitt 2.3). Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Aussage hängt dabei in hohem Maße von der Interpretation der Ergebnisse ab (s. [Piazza/Riggio, 2008], [Grippa, 2009]). Des Weiteren ist die Zuverlässigkeit der Aussage nur gegeben, sofern visuelle erfass- und messbare Kriterien in die Sortierentscheidung einbezogen werden. In der Fachliteratur wird daher seit den 1990er Jahren ein mehrstufiges Vorgehen bei der Sortierung vorgeschlagen (s. [Ehlbeck/Görlacher, 1990], [Zimmer/Kothe, 1990]).

Maßgeblich für den Einsatz zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode für die Ermittlung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist die Kenntnis über etwaige Unterschiede zwischen den Materialeigenschaften von neuem und altem Holz. Ausgehend von den in der Fachliteratur und aus Fallstudien verfügbaren Untersuchungsergebnissen kann zwar von einer Veränderung einzelner holzanatomischen und -chemischen Eigenschaften infolge der Alterung ausgegangen werden. Hinsichtlich der Veränderung der Rohdichte sowie der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften ist kein einheitlicher Trend zu erkennen. Die vereinzelt festgestellten Abweichungen zwischen den Kennwerten von neuem und altem Holz sind auf andere Einflussfaktoren zurückzuführen. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die aus Untersuchungen an neuem Holz abgeleiteten Zusammenhänge weitestgehend uneingeschränkt auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen übertragen werden können.

## 4. Zerstörungsfreie und -arme Untersuchung von Holzbauteilen

Die Kombination der visuellen Begutachtung und Sortierung mit zerstörungsfreien/-armen Mess- und Prüfmethode ermöglicht ausgehend von den in den Kapiteln 2 und 3 zusammengestellten Literaturangaben eine deutlich zuverlässigere und genauere Feststellung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen. Voraussetzung für eine zuverlässige Aussage ist ein enger statistischer Zusammenhang zwischen den in situ gemessenen Kennwerten (Messgrößen) und den tatsächlichen Materialeigenschaften (Zielgrößen).

Im Zusammenhang mit der maschinellen Festigkeitssortierung wurden ausgewählte zerstörungsfreie Prüfmethode bereits umfassend untersucht (s. a. Tabelle 6 in Abschnitt 2.3). Bei den heutzutage verwendeten Sortieranlagen kommen vorrangig die Durchbiegungsmessung, die Eigenfrequenzmessung, die Durchstrahlung mit Mikrowellen und Röntgenstrahlung sowie optische Messverfahren zum Einsatz (s. a. Tabelle 7 in Abschnitt 2.3).

Auch für die zerstörungsfreie/-arme Prüfung von Holz und Holzbauteilen im Labor und in situ sind in der Vergangenheit zahlreiche Prüfmethode entwickelt, untersucht und erprobt worden, wie die verfügbaren State-of-the-Art-Reports zeigen (s. u. a. [Wenzel/Kleinmanns, 1999], [Kasal/Tannert, 2010], [Tannert/et al., 2014], [Machado/et al., 2015]). Abhängig von der verwendeten Prüfmethode können qualitative oder quantitative Aussagen zur Materialqualität von Holz und Holzbauteilen getroffen werden (s. Tabelle 15).

**Tabelle 15: Ausgewählte zerstörungsfreie/-arme Methoden zur Untersuchung von Holz**

Prüfmethode	Einsatz	Erfassbare Kenngrößen	Ausgewählte weiterführende Literatur
Durchstrahlung (Röntgen-/Teilchenstrahlung)	zf (i) qual./ quan.	- Rohdichte(-verteilung) - Holzfeuchte(-verteilung) - Holzstruktur(-störungen) - verdeckte Schädigungen	[Mannes, 2009] [Löwenmark, 2009] [Kruglowa, 2012] [Lechner/Kliger, 2015]
Eigenfrequenzmessung	zf (i) quan.	- dynamische Kennwerte - dynamischer Elastizitätsmodul	[Görlacher, 1984] [Spycher/et al., 2008]
Durchschallung (Laufzeitmessung/ Ultraschall)	zf (i) quan.	- dynamische Kennwerte - dynamischer Elastizitätsmodul - Steifigkeit/Festigkeit	[Burmester, 1965] [Sandoz, 1983] [Steiger, 1991] [Görlacher, 1992-2]
Durchschallung, bildgebend (Ultraschall-Echo)	zf (i) qual.	- Holzstruktur(-störungen)	[Baron, 2009] [Hasenstab, 2006] [Dill-Langer/et al., 2006] [Neuenschwander/et al., 1997]
Bohrwiderstandsmessung	zf (i) qual./ quan.	- Rohdichte(-verteilung) - Holzstruktur(-störungen) - verdeckte Schädigungen	[Görlacher/Hättich, 1990] [Thümmler, 1991] [Rinn, 1992] [Eckstein/Saß, 1994]
Ausziehwidstandsmessung	za (i) qual./ quan.	- Rohdichte(-verteilung) - Holzstruktur(-störungen)	[Meierhofer, 1988] [Görlacher, 1990] [Yamaguchi, 2015]

**Tabelle 15 (fortgesetzt)**

Prüfmethode	Einsatz	Erfassbare Kenngrößen	Ausgewählte weiterführende Literatur
Eindringtiefen-/widerstandsmessung	za (i) qual./ quan.	- Rohdichte(-verteilung) - Holzstruktur(-störungen)	[Görlacher, 1987] [Kloiber/Drdacky, 2015]
Belastungsversuch	za (i) qual./ quan.	- Verformungen - Steifigkeit/Festigkeit	[Görlacher/Kromer, 1992]
Probenentnahme (Bohrkerne, kleine fehlerfreie Proben, Ausbau von Bauteilen)	za/z (L) qual./ quan.	- Rohdichte - Steifigkeit/Festigkeit - Holzstruktur(-störungen) - verdeckte Schädigungen	[Rug/Seemann, 1988] [Kasal, 2003] [Iniguez-Gonzales/et al., 2015-1] [Kloiber/Drdacky, 2015]
zf ... zerstörungsfrei; za ... zerstörungsarm; z ... zerstörend; i ... Einsatz in-situ; L ... Laborprüfung; qual. ... qualitative Aussage; quan. ... quantitative Aussage			

Die Untersuchung von Proben ermöglicht die genaue Bestimmung der Materialeigenschaften. Die Entnahme von Probenmaterial (Bohrkerne, kleine fehlerfreie Proben, ausgebaute Bauteile) ist jedoch bei historischen Holzkonstruktionen in einem statistisch relevanten Umfang selten durchführbar, da umfassende Eingriffe meist nicht möglich sind, ohne die Konstruktion zu beeinträchtigen und daher aus denkmalpflegerischen Gründen nicht gestattet werden. Neben der sehr zerstörungsarmen Eindring-/Ausziehwerstandsmessung ist eine quantitative Bestimmung der Materialeigenschaften in situ nur mit dynamischen Messmethoden möglich.

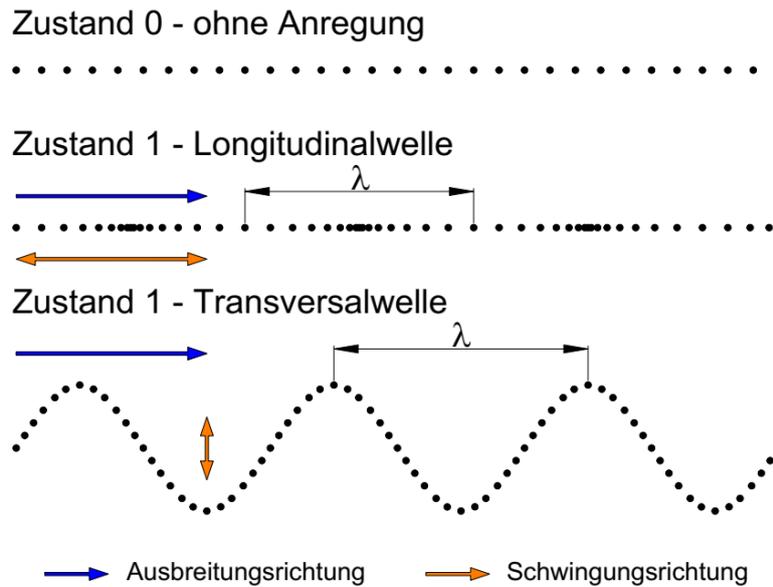
Zu den dynamischen Messmethoden gehören die Eigenfrequenzmessung und die Schalllaufzeitmessung. Bei der Eigenfrequenzmessung wird das Holzbauteil durch einen Impuls (Schlag oder Stoß) in Schwingung versetzt. Nach kurzer Zeit stellen sich Biegeschwingungen 1. Ordnung ein. Aus Schwingungsdauer, Bauteilgeometrie und Rohdichte kann der dynamische Elastizitätsmodul errechnet werden (s. [Görlacher, 1984]). Bei der Schalllaufzeitmessung werden Schallimpulse durch Anschlagen oder piezo-elektrisch (bspw. Ultraschall-Impulslaufzeitmessung) in das Holzbauteil eingeleitet. Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit dieses Impulses können die mechanischen Eigenschaften des Bauteils ermittelt werden (s. bspw. [Steiger, 1991], [Görlacher, 1992], [Augustin, 2004]).

In den nachfolgenden Abschnitten werden ausgewählte zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode (Ultraschall-Impulslaufzeitmessung, Untersuchung von Bohrkernproben und Eindringtiefenmessung) ausführlicher hinsichtlich des Standes der Technik betrachtet. Diese Prüfmethode haben sich in der praktischen Anwendung als einfach handhabbar und praktikabel für die Ermittlung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen im eingebauten Zustand erwiesen.

## 4.1. Ultraschall-Impulslaufzeitmessung

### 4.1.1. Theoretische Grundlagen

Der Begriff Ultraschall bezeichnet mechanische Wellen mit Frequenzen oberhalb der menschlichen Hörgrenze ( $f > 20 \text{ kHz} \dots 1 \text{ GHz}$ ). Diese werden in Longitudinalwellen (Schwingung parallel zur Ausbreitungsrichtung) und Transversalwellen (Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) unterteilt (s. Abbildung 22).



**Abbildung 22: Longitudinal- und Transversalwellen (nach [Baron, 2009], überarbeitet durch den Verfasser)**

Die Erzeugung der Wellen erfolgt mit Hilfe des piezo-elektrischen Effektes. Hierbei werden Quarzkristalle mittels hochfrequenter elektrischer Spannung zum Schwingen angeregt. Die Schwingungen werden als mechanische Schwingungen abgegeben, auf den Prüfkörper übertragen und im Empfänger wieder in elektrische Spannungen umgewandelt. Erste Untersuchungen zur Anwendung der Ultraschalltechnologie für die Prüfung von Holz sind u.a. in [Kollmann/Krech, 1960], [Burmester, 1965] und [Bucur/Archer, 1984] zu finden.

Das Ultraschallverfahren beruht auf der engen Beziehung zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallimpulses und der Steifigkeit sowie der Rohdichte. In Medien mit zweiseitiger Behinderung der Querkontraktion (bspw. Wasser, Luft) breitet sich Schall als Longitudinalwelle aus. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich dann nach Gl. 1 (vgl. [Niemz/Sonderegger, 2017]):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^2}} \quad \text{Gl. 1}$$

mit:  $v$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit;  $E$  ... Elastizitätsmodul des Materials;  $\rho$  ... Dichte des Materials;  $\mu$  ... Poissonzahl

Die in Gl. 1 dargestellte Beziehung ist jedoch nur anwendbar, wenn die Wellenlänge geringer ist als die Querschnittsbreite beziehungsweise -dicke des Prüfkörpers (vgl. [Niemz/Sonderegger, 2017]). Bei der Prüfung von Holzbauteilen ist dies in den meisten Fällen nicht gegeben. Bereits bei einer Frequenz von  $f = 20$  kHz und einer durchschnittlichen Schallgeschwindigkeit von  $v \approx 5.000$  m/s ergibt sich eine Wellenlänge von 250 mm. Die Verwendung von niederfrequenten Ultraschallwellen (d.h.  $f = (20 \dots 500)$  kHz) ist jedoch erforderlich, da der inhomogene und anisotrope Werkstoff Holz eine hohe Signaldämpfung aufweist (s. a. [Niemz, 2003], [Steiger 1991]). Die heutzutage verfügbaren Messgeräte arbeiten mit Frequenzen von  $f = 20 \dots 50$  kHz. Daher gilt laut [Niemz/Sonderegger, 2017] die in Gl. 2 dargestellte Vereinfachung. Der dynamische Elastizitätsmodul ergibt sich dann durch Umstellung (s. Gl. 3).

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Gl. 2

$$E = v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6}$$

Gl. 3

mit:  $v$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit;  $E$  ... Elastizitätsmodul des Materials;  
 $\rho$  ... Dichte des Materials

Die Abweichung zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Gl. 3 und dem im Bruchversuch ermittelten statischen Elastizitätsmodul ist vergleichsweise gering. Nach Literaturangaben beträgt die Differenz  $\Delta = (5 \dots 10) \%$ , d. h.  $E_{\text{dyn}} = (1,05 \dots 1,10) \cdot E_{\text{stat}}$  (s. a. [Steiger, 1991], [Feio, 2005], [Niemz/Sonderegger, 2017]).

#### 4.1.2. Messmethoden

Grundlegend wird bei der Ultraschall-Prüfung zwischen dem Impuls-Echo-Verfahren und der Impulslaufzeitmessung unterschieden. Bei dem Impuls-Echo-Verfahren wird der Impuls senkrecht zur Faserrichtung eingeleitet. Der Impuls wird an Grenzflächen (Bauteiloberflächen oder Fehlstellen) reflektiert und von der Sender-/Empfängersonde aufgezeichnet. Sie dient vor allem der Fehlstellen-Erkennung (s. [Steiger, 1991], [Frühwald/Hasenstab, 2010]).

Bei der Impulslaufzeitmessung werden zwei separate Sonden (Sender und Empfänger) am Holzbauteil angebracht. Die Zeit, in welcher der Impuls die Strecke zwischen dem Sender und dem Empfänger zurücklegt, wird durch ein Messgerät aufgenommen. Diese Methode eignet sich für die Bestimmung der Materialeigenschaften anhand von Regressionsbeziehungen zwischen statischen und dynamischen Kennwerten wie bspw. zwischen dem statischen und dynamischen Elastizitätsmodul (s. [Steiger, 1996]). Weitere Unterscheidungen entsprechend der Messmethodik sind in Abbildung 23 dargestellt.

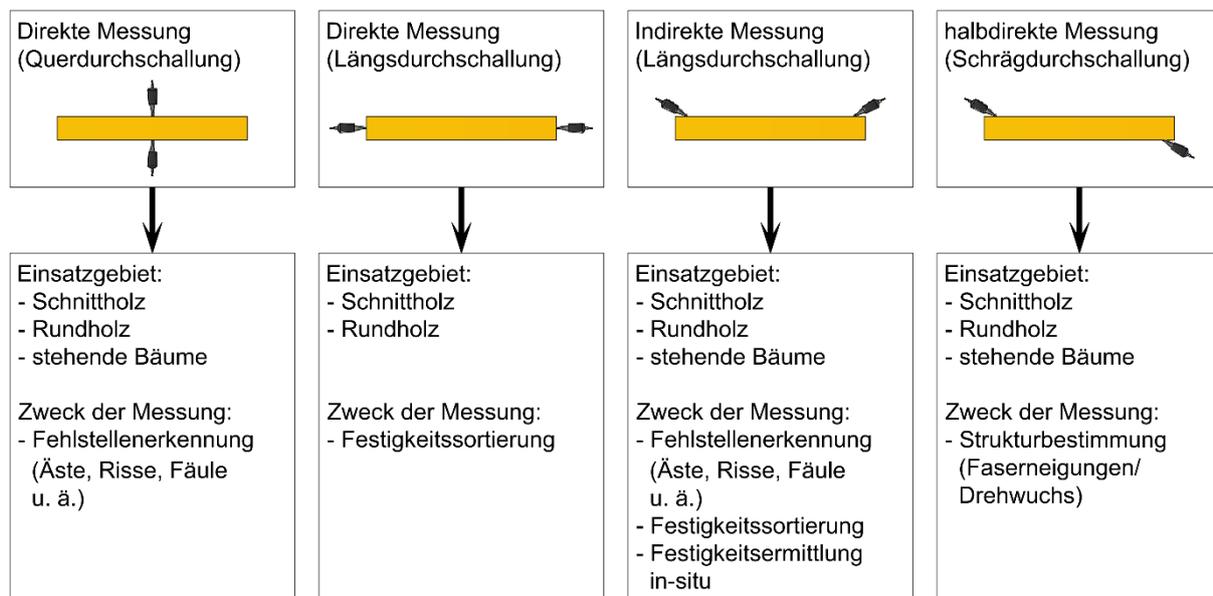


Abbildung 23: Messmethoden der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (eigene Darstellung nach [Kessel, 1990])

### 4.1.3. Bisherige Untersuchungen

Tabelle 16 enthält eine Übersicht über den bisherigen Stand der Forschung bezüglich der Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz.

**Tabelle 16: Ausgewählte Untersuchungen zur Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitsuntersuchung und -sortierung von Bauholz (chronologisch geordnet)**

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ verwendetes Messgerät	Wesentliche Ergebnisse
[Burmester, 1965]	◇/◆	Kiefer, Fichte, Buche, Oboto, Limba (k. A. zur Stückzahl, NH, kf) <i>k. A. zu Messgeräten</i>	Bewertung grundlegender Einflussfaktoren Regressionsbeziehungen zw. dynamischen und statischen Kennwerten
[Burmester, 1967]	◆	Kiefer (k. A. zur Stückzahl, NH, kf) <i>Krautkrämer UsIP 10</i>	Bewertung des Einflusses von Ästen auf die dynamischen Kennwerte
[Waubke/Märkl, 1982]	◆	Fichte (131 Stk., NH, B) <i>k. A. zu Messgeräten</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Waubke, 1988]	◆	Fichte (134 Stk., NH, B) <i>k. A. zu Messgeräten</i>	Korrelationsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Kessel/Sandoz, 1989]	◇	Fichte (341 Stk., NH, B) <i>k. A. zu Messgeräten</i>	Bewertung des Optimierungspotentials der Sortierung mittels Ultraschall
[Sandoz, 1989]	◆	Fichte (341 Stk., NH, B) <i>Steinkamp BP 5</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ , $f_m$ sowie $\rho$
[Schöne, 1989]	◆	Fichte (20 Stk. NH, B) <i>k. A. zu Messgeräten</i>	Regressionsbeziehungen zw. $E_{dyn}$ sowie $f_m$
[Kessel, 1990]	◆	Eiche (10 Stk., NH, B) <i>Steinkamp BP 5</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Steiger, 1991]	◆	Fichte (575 Stk., NH, B) <i>Steinkamp BP 5</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Sandoz, 1993]	◆	Fichte (73 Stk., NH, B) <i>Sylvatest 1. Gen.</i>	Quantifizierung Feuchte-/Temperatureinfluss
[Tichelmann/Grimminger, 1993]	◇	Fichte (32 Stk., AH, B) <i>Sylvatest 1. Gen.</i>	Ultraschallsortierung ist für altes Holz anwendbar
[Boström, 1994]	◆	Fichte (415 Stk., NH, B) <i>Sylvatest 1. Gen.</i>	Bewertung der Eignung des Ultraschallverfahrens für die Festigkeitssortierung Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ sowie $E_{dyn}$ und $f_m$
[Steiger, 1995-2] [Steiger, 1996]	◆	Fichte (575 Stk., NH, B) <i>Sylvatest 1. Gen.</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Ceccotti/Togni, 1996]	◆	Tanne (12 Stk., AH, B) <i>Sylvatest 1. Gen.</i>	Regressionsbeziehungen zw. dynamischen und statischen Kennwerten
[Sandoz, 1996]	◆	Fichte (12 Stk., NH, B) <i>Sylvatest 1. Gen.</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

Tabelle 16 (fortgesetzt)

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ verwendetes Messgerät	Wesentliche Ergebnisse
[Kessel/et al., 1997 ] [Kessel/et al., 1998]	◆	Fichte (434 Stk., NH, B) <i>Steinkamp BP 6</i>	Bewertung der Eignung des Ultraschallverfahrens für die Festigkeitssortierung und Ableitung von Grenzwerten Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Niemz/Kucera, 1997]	◇/◆	Roble (30 Stk., NH, kf) Rauli (30 Stk., NH, kf) Sylvatest 1. Gen.	Bewertung des Einflusses von Fehl-/Schadstellen
[Schob/et al., 1997]	◇/◆	Kiefer/ Radiata Pine (160 Stk., NH, kf) <i>Panametrics 5800</i>	Bewertung des Einflusses von Fehl-/Schadstellen
[Steiger, 1997-1] [Steiger, 1997-2]	◇/◆	Fichte (214 Stk., NH, B) Sylvatest 1. Gen.	Klassengrenzen für die Festigkeitssortierung
[Augustin, 1998 ]	◇/◆	Fichte (127 Stk., NH, B) Sylvatest 1. Gen.	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$ Klassengrenzen für die Festigkeitssortierung
[Tobisch/Mittag, 1998]	◇	Fichte/Eiche (k. A. zur Stückzahl, NH, B) <i>Sirio RP 400 CSM, Sylvatest 1. Gen.</i>	Bewertung des Einflusses von Ästen und Faulstellen
[Niemz/et al., 1999-1]	◇	Fichte (140 Stk., NH, kf) <i>PCUS 10 NF</i> <i>Steinkamp BP 5</i>	Bewertung des Einflusses von Probengeometrie, Messfrequenz und Fehl-/Schadstellen
[Niemz/et al., 1999-2]	◇	Fichte (120 Stk., NH, kf) Buche (120 Stk., NH, kf) <i>Steinkamp BP 5</i>	Bewertung des Einflusses des Faserverlaufes
[Sandoz/et al., 2000]	◆	Fichte (32 Stk., NH, B) Sylvatest 1. Gen.	Bewertung dyn. Kennwerte zur Anpassung der Methode
[Niemz/et al., 2002]	◇	Fichte (1 Stk., NH, kf) <i>PCUS 10 NF</i>	Bewertung der Schallschwächung
[Fernandez-Golfin/et al., 2003]	◆	Kiefer (6630 Stk., NH, B) Sylvatest 1. Gen.	Regressionsbeziehungen zw. dynamischen und statischen Kennwerten
[Augustin, 2004]	◇/◆	Fichte (120 Stk., NH, B) Sylvatest 1. Gen.	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Arriaga/et al., 2005]	◆	Kiefer (85 Stk., AH, B) <i>Sylvatest Duo</i>	Festlegung einer Sortiermethodik und Ableitung von Grenzwerten und Kennwerten
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

Tabelle 16 (fortgesetzt)

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ verwendetes Messgerät	Wesentliche Ergebnisse
[Hanhijärvi/et al., 2005]	◆	Fichte (111 Stk., NH, B) Kiefer (108 Stk., NH, B) <i>Sylvatest Duo</i>	Bewertung der Eignung des Ultraschallverfahrens für die Festigkeitssortierung Korrelationsbeziehungen zw. Kenngrößen Ultraschall und $E_m$ sowie $f_m$
[Hanhijärvi/Ranta-Maunus, 2008]	◆	Fichte (921 Stk., NH, B) Kiefer (934 Stk., NH, B) <i>Sylvatest Duo</i>	Bewertung der Eignung des Ultraschallverfahrens für die Festigkeitssortierung Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Steiger/Arnold, 2009]	◆	Fichte (696 Stk., NH, B) <i>k. A. zu Messgeräten</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Kranitz/et al., 2010] [Kranitz/Niemz, 2010] [Kranitz, 2014]	◆	Fichte (28 Stk., AH, B) Eiche (9 Stk., AH, B) Kiefer (9 Stk., AH, B) <i>Steinkamp BP 5, Sylvatest Duo, Epoch XT</i>	Korrelationsbeziehungen zw. $E_{dyn}$ und $\rho$
[Unterweiser/ Schickhofer, 2010] [Unterweiser/ Schickhofer, 2012]	◆	Fichte (310 Stk., NH, B) <i>Sylvatest Duo</i>	Quantifizierung Feuchte-/Temperatureinfluss
[Nakielski, 2012]	◆	Kiefer (49 Stk., NH, B) Kiefer (5 Stk. AH, B) Fichte (51 Stk., NH, B) <i>Sylvatest Trio</i>	Korrelations-/Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ & $f_m$
[Llana/et al., 2013]	◆	Kiefer (216 Stk., NH, kf) <i>Steinkamp BP 5, Sylvatest Duo</i>	Quantifizierung Feuchte-/Temperatureinfluss
[Sousa, 2013]	◇/◆	Edelkastanie (20 Stk., AH, B) <i>Sylvatest Duo</i>	Regressionsbeziehungen zw. $v_{Schall}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Heinke, 2015]	◆	Kiefer (22 Stk., NH, B) <i>Sylvatest Trio</i>	Bewertung des Einflusses von Fehlstellen und Verbindungsmitteln
[Montero/et al., 2015]	◆	Kiefer (26 Stk., NH, B) <i>Sylvatest Trio</i>	Quantifizierung des Feuchteinflusses
[Pošta/Dolejš, 2015]	◆	k. A. zur Holzart und Stückzahl (AH, kf) <i>Sylvatest 1. Gen</i>	Regressionsbeziehungen zw. $E_{dyn}$ und $E_m$ sowie $f_m$
[Llana/et al., 2016]	◆	Kiefer (120 Stk. NH, B) <i>Sylvatest Duo, USLab, Fakopp MicroSecond Timer</i>	Bewertung des Einflusses der Messlänge
[Osuna-Sequera/et al., 2020]	◆	Kiefer (21 Stk., AH, B) <i>Sylvatest Duo, USLab, Fakopp MicroSecond Timer</i>	Regressionsbeziehungen zw. $E_{dyn}$ und $E_m$
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

**Tabelle 16 (fortgesetzt)**

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ verwendetes Messgerät	Wesentliche Ergebnisse
[Reiss, 2016]	◆	Kiefer (28 Stk, NH, B) <i>Sylvatest Trio</i>	Bewertung des Einflusses des Faserverlaufes
[Ebner, 2018]	◆	Kiefer (21 Stk., AH, B) <i>Rinntech ARBOTOM</i>	Regressionsbeziehungen zw. dynamischen und stati- schen Kennwerten
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

Aus Tabelle 16 wird ersichtlich, dass sich der überwiegende Teil der bisherigen Untersuchungen mit Probenmaterial aus neuem Bauholz befasste. Die Untersuchungen von KRANITZ/ET AL. und TICHELMANN/GRIMMINGER zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede bei der Anwendung an neuem und altem Bauholz bestehen. Das an neuem Holz entwickelte Ultraschallverfahren kann somit für altes Bauholz angewendet werden (s. a. [Kranitz/et al., 2010], [Kranitz/Niemz, 2010], [Tichelmann/ Grimminger, 1993]). Aus diesem Grund kommt das Ultraschall-Verfahren mittlerweile auch vermehrt bei der Untersuchung und Festigkeitssortierung von altem Bauholz zum Einsatz. Erkennbar ist, dass sich das Ultraschall-Verfahren in zahlreichen Untersuchungen bewährt hat. Dabei handelt es sich aber zumeist um objektspezifische Einzeluntersuchungen mit geringem statistischem Umfang. Umfängliche, systematische Untersuchungen zur Anwendung des Ultraschall-Verfahrens bei der apparativ unterstützten visuellen Festigkeitssortierung fehlen bis dato.

### **Untersuchungen zu wesentlichen Einflussfaktoren**

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschall-Impulses wird von mehreren Faktoren beeinflusst (s. a. [Kessel, 1990], [Steiger, 1996]). Neben materialspezifischen Einflussfaktoren wie bspw. die Materialqualität (v.a. Dichte und Steifigkeit) und der strukturelle Aufbau, systemischen Parametern wie bspw. die Art der Sonden-Ankopplung, die Ausbreitungsrichtung relativ zur Faserrichtung und Prüfkörper-Geometrie sind auch die klimatischen Umgebungsbedingungen in Form der Temperatur und der Holzfeuchtigkeit von Relevanz. Die wesentlichen Einflussfaktoren werden nachfolgend näher betrachtet.

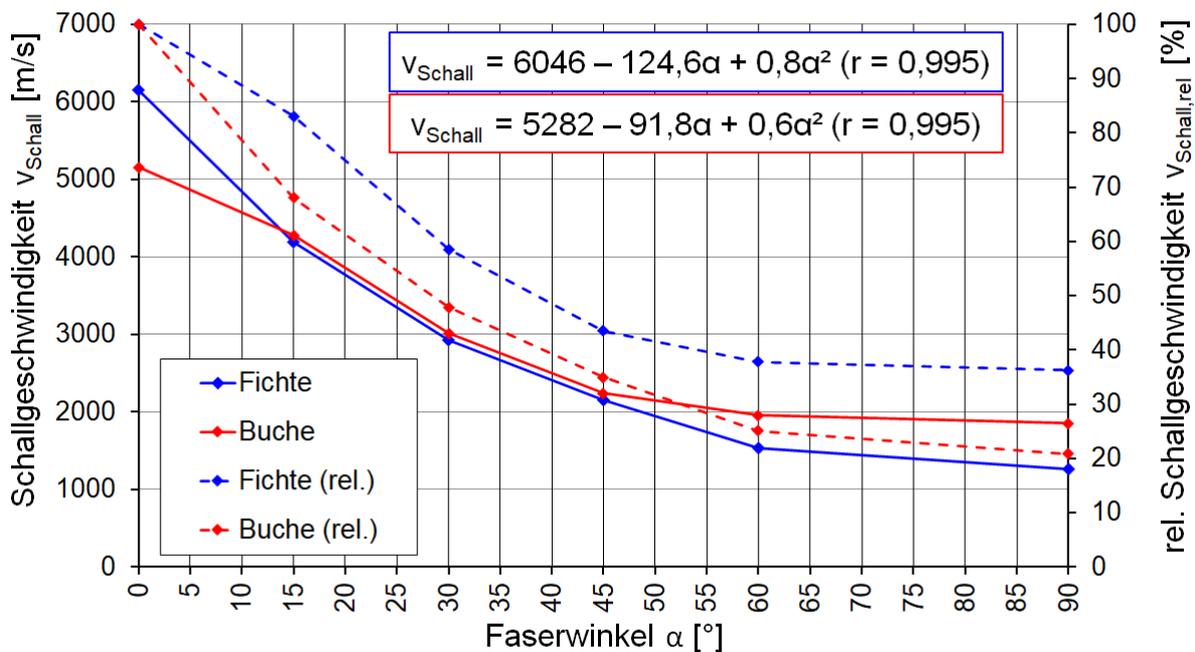
#### ***Einfluss der Ankopplung***

Die Art der Ankopplung bzw. die Notwendigkeit eines Kopplungsmittels spielt bei den heutzutage hauptsächlich verwendeten, konusförmigen Ultraschall-Sonden keine Rolle (s. [Kessel/et al., 1997], [Augustin, 2004]). Die Notwendigkeit eines Kopplungsmittels ist vorrangig bei der Verwendung von tellerförmigen Sonden gegeben, da diese an den Querschnittsenden der Probekörper angesetzt werden. Aufgrund des strukturellen Aufbaus von Holz müssen hierbei Luftpfeifen überbrückt werden. Als Kopplungsmittel werden dabei häufig Wasser oder wasserbasierendes Gel verwendet. Bei konusförmigen Sonden ist dies nicht der Fall. Durch das händische Einpressen der Sondenspitzen in passgenaue Bohrungen wird ein ausreichender flächiger Kontakt zwischen Sonde und Holzoberfläche hergestellt. Die Verwendung eines Kopplungsmittels ist daher nicht zwingend erforderlich (s. [Steiger, 1996]).

### Einfluss der Ausbreitungsrichtung

Die Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwellen bzw. der Einfluss des Faserwinkels auf die Schallausbreitung wurde in [Niemz/et al. 1999-2] an Proben aus fehlerfreiem Fichten- und Buchenholz untersucht. Die Untersuchung zeigte, dass ein enger Zusammenhang zwischen dem Winkel zwischen Faser- und Ausbreitungsrichtung und der Ausbreitungsgeschwindigkeit besteht ( $r = 0,995$ ). Bereits bei einem Winkel von  $15^\circ$  ergeben sich um (15 ... 30) % reduzierte Schallgeschwindigkeiten (s. Abbildung 24). In der Praxis werden die Sonden bei der indirekten Messmethode (vgl. Abbildung 23) in einem Winkel von  $30^\circ$  angesetzt. Die wesentliche Voraussetzung für zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse ist dabei die Einhaltung dieses Winkels bei Mehrfachmessungen am selben Bauteil.

Für die Festigkeitssortierung von Bauholz wird der Winkel zwischen dem Faserverlauf und der Bauteillängsachse als Faserneigung berücksichtigt. Bei der visuellen Sortierung von Schnittholz nach DIN 4074-1/-5 ist die Faserneigung auf maximal  $FN = 12\%$  (Kanthölzer und vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sowie Latten aus Nadelholz) bzw.  $FN = 16\%$  (Bretter und Bohlen aus Nadelholz sowie Kanthölzer, Bretter und Bohlen aus Laubholz) begrenzt. Dies entspricht einem Winkel von  $\alpha = (6,8 \dots 9,1)^\circ$ . In den Untersuchungen in [Niemz/et al., 1999-2] ist im Bereich von  $\alpha = (0 \dots 15)^\circ$  der Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit am stärksten messbar gewesen.



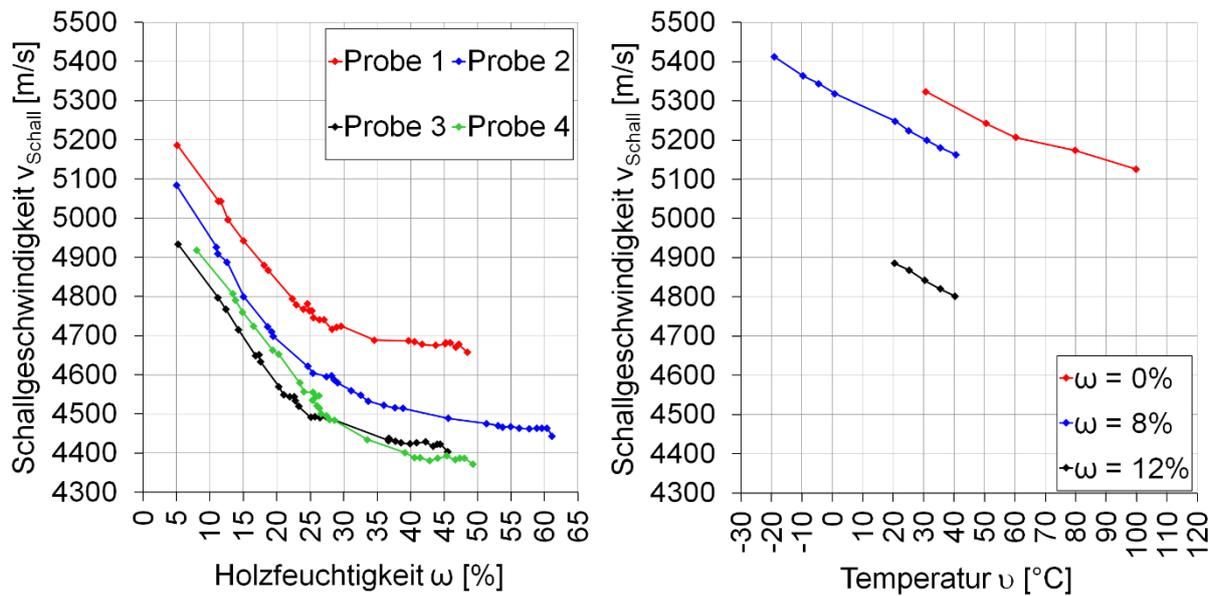
**Abbildung 24: Einfluss des Winkels zwischen Faser- und Ausbreitungsrichtung auf die Schallgeschwindigkeit von Fichten- und Buchenholz (nach [Niemz/et al., 1999-2])**

Zur Klärung der Fragestellung, ob die an fehlerfreien Prüfkörpern festgestellten Gesetzmäßigkeiten auch für Bauholz gelten, führte REISS 2016 orientierende Untersuchungen an fehlerbehafteten Prüfkörpern aus Kiefernholz durch (s. [Reiss, 2016]). Die nach DIN 4074-1 gemessene Faserneigung lag im Bereich von  $FN = (4,4 \dots 25,8)\%$  bzw.  $\alpha = (2,5 \dots 14,5)^\circ$ . Der Einfluss der Faserneigung auf die gemessene Schallgeschwindigkeit war weder bei der direkten noch bei der indirekten Messung nachweisbar. Die Regressionsbeziehungen waren mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,098 \dots 0,114)$  sehr schwach ausgeprägt. Dieses Ergebnis wird in [Reiss, 2016] mit der Überlagerung des Einflusses der Faserneigung durch den Einfluss

der Ästigkeit und Dichteverteilung begründet. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen von WAUBKE und MÄRKL. In [Waubke/Märkl, 1982] ist bei Faserneigungen im Bereich von FN = (0 ... 17,3) % ebenfalls nur ein geringer Einfluss auf die an Bauholz messbare Schallgeschwindigkeit festgestellt worden.

**Einfluss von Holzfeuchtigkeit und Temperatur**

Holzfeuchtigkeit und Temperatur besitzen einen maßgeblichen Einfluss auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Holz und damit auch auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Schallimpulses. Grundlegende Untersuchungen hierzu sind in [Sandoz, 1993] veröffentlicht. Sowohl hinsichtlich der Holzfeuchtigkeit als auch der Temperatur wurde ein negativer Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit festgestellt (s. Abbildung 25).



**Abbildung 25: Einfluss der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit (für Fichtenholz nach [Sandoz, 1993])**

Aus den in Abbildung 25 dargestellten Untersuchungsergebnissen wurden die nachfolgend aufgeführten Korrekturgleichungen abgeleitet (s. Gl. 4 bis Gl. 6, vgl. [Sandoz, 1993]):

Korrekturformeln zur Berücksichtigung der Holzfeuchtigkeit:

$$v_{12} = v_{\omega} + 29 \cdot (\omega - 12) \quad (\text{für } \omega \leq 32\%) \quad \text{Gl. 4}$$

$$v_{12} = 580 + v_{\omega} + 4 \cdot (\omega - 32) \quad (\text{für } \omega > 32\%) \quad \text{Gl. 5}$$

mit:  $v_{12}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega = 12\%$ ;  $v_{\omega}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega \neq 12\%$ ;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Korrekturformel zur Berücksichtigung der Temperatur:

$$v_{20} = v_{\vartheta} / \left[ 1 - 0,0008 \cdot (\vartheta - 20) \right] \quad (\text{für } \omega = 12\%) \quad \text{Gl. 6}$$

mit:  $v_{20}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\vartheta = 20\text{ °C}$ ;  $v_{\vartheta}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\vartheta \neq 20\text{ °C}$ ;  $\vartheta$  ... Temperatur;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Die Korrekturgleichungen nach [Sandoz, 1993] leiten sich jedoch nur aus Versuchen an Fichtenholz ab. Fraglich ist, ob diese auch näherungsweise für andere Holzarten verwendet werden können. Dies wäre in weiteren Untersuchungen zu klären.

In [Llana/et al., 2013] werden ebenfalls Korrekturgleichungen für den Holzfeuchte- und Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit angegeben. Diese Untersuchung befasste sich mit Kiefernholz. Aus Messungen mit den Messgeräten Sylvatest Duo und Steinkamp BP 5 wurden folgende Korrekturformeln abgeleitet (s. Gl. 7 und Gl. 8, vgl. [Llana/et al., 2013]):

Korrekturformel zur Berücksichtigung der Holzfeuchtigkeit:

$$v_{12} = v_{\omega} / \left[ 1 - k_{\omega} \cdot (\omega - 12) \right] \quad (\text{für } \omega \leq 28 \%)$$

**Gl. 7**

mit:  $k_{\omega} = 0,0073$  für Messungen mit Sylvatest Duo

$k_{\omega} = 0,0059$  für Messungen mit Steinkamp BP 5

*mit:  $v_{12}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega = 12$  %;  $v_{\omega}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega \neq 12$  %;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit;  $k_{\omega}$  ... gerätespezifischer Beiwert*

Korrekturformel zur Berücksichtigung der Temperatur:

$$v_0 = v_{\vartheta} / \left[ 1 - k_{\vartheta} \cdot (\vartheta - 0) \right] \quad (\text{für } \omega = 12 \%)$$

**Gl. 8**

mit:  $k_{\vartheta} = 0,0010$  für Messungen mit Sylvatest Duo

$k_{\vartheta} = 0,0011$  für Messungen mit Steinkamp BP 5

*mit:  $v_0$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\vartheta = 0$  °C;  $v_{\vartheta}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\vartheta \neq 0$  °C;  $\vartheta$  ... Temperatur;  $k_{\vartheta}$  ... gerätespezifischer Beiwert*

Weitere Anpassungsfaktoren sind in [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-2] aufgeführt. Diese entsprechen im Wesentlichen denen in [Llana/et al., 2013] –  $k_{\omega} = 0,01$  und  $k_{\vartheta} = 0,00075$ .

In [Montero/et al., 2015] wird für die Umrechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallimpulses im Holzfeuchtebereich von  $\omega \approx (12...21)$  % ein Korrekturfaktor von  $k = 0,0048$  je Prozentpunkt Holzfeuchtedifferenz angegeben.

Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur auf die dynamischen Eigenschaften von Holz sind in [Unterweiser/Schickhofer, 2010] und [Unterweiser/Schickhofer, 2012] veröffentlicht. Auf Grundlage von Untersuchungen an Fichtenbrettern, welche unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen konditioniert wurden, ist auch dort ein deutlicher Einfluss der Temperatur und Holzfeuchtigkeit auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Schallimpulses sowie den dynamischen Elastizitätsmodul festgestellt worden. Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallimpulses sowie auf den dynamischen Elastizitätsmodul wird in Form von Umrechnungsgleichungen wie folgt angegeben (vgl. [Unterweiser/Schickhofer, 2010], s. Gl. 9 bis Gl. 12):

Korrekturformeln zur Anpassung der Schallgeschwindigkeit:

$$v_{12} = v_{\omega} / \left[ 1 - 0,0060 \cdot (\omega - 12) \right] \quad (\text{für } \omega \leq 28 \%)$$

**Gl. 9**

$$v_{12} = v_{\omega} \sqrt{[0,902 - 0,0017 \cdot (\omega - 28)]} \quad (\text{für } \omega > 28 \%) \quad \text{Gl. 10}$$

mit:  $v_{12}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega = 12 \%$ ;  $v_{\omega}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega \neq 12 \%$ ;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Korrekturformeln zur Anpassung des dynamischen Elastizitätsmoduls:

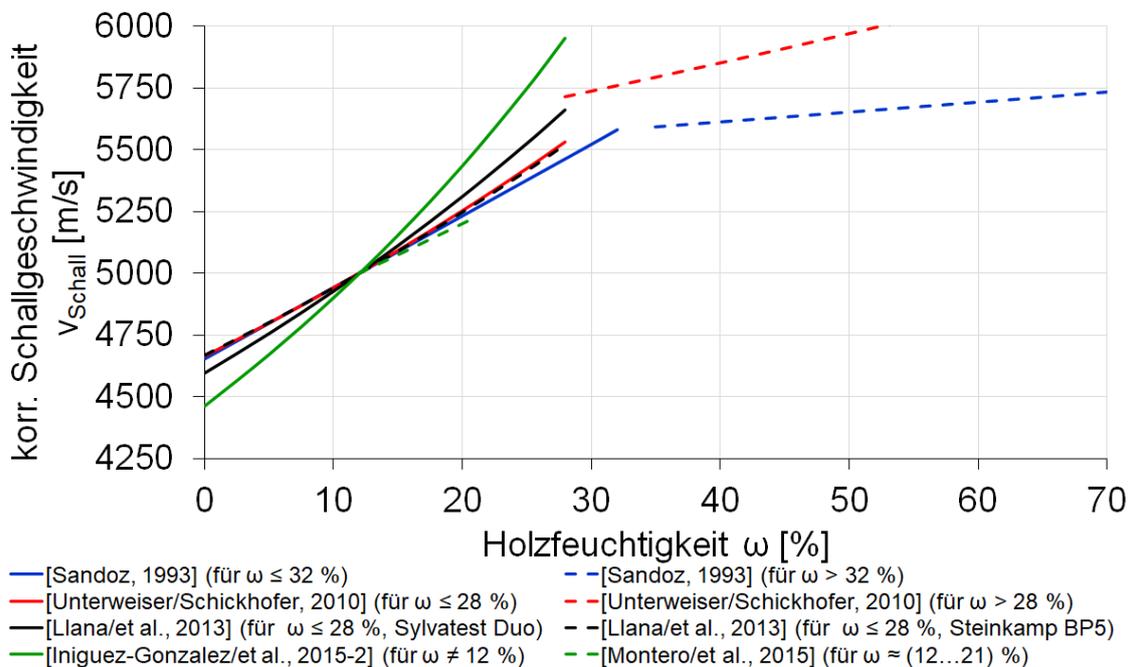
$$E_{\text{dyn},12} = E_{\text{dyn},\omega} \sqrt{[1 - 0,0078 \cdot (\omega - 12)]} \quad (\text{für } \omega \leq 28 \%) \quad \text{Gl. 11}$$

$$E_{\text{dyn},12} = E_{\text{dyn},\omega} \sqrt{[0,868 - 0,0017 \cdot (\omega - 28)]} \quad (\text{für } \omega > 28 \%) \quad \text{Gl. 12}$$

mit:  $E_{\text{dyn},12}$  ... dynamischer Elastizitätsmodul bei  $\omega = 12 \%$ ;  $E_{\text{dyn},\omega}$  ... dynamischer Elastizitätsmodul bei  $\omega \neq 12 \%$ ;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Die in [Unterweiser/Schickhofer, 2012] angegebenen Korrekturgleichungen zur Berücksichtigung des Temperatur- und Holzfeuchteinflusses beziehen sich hingegen auf die Eigenfrequenzmessung. Eine uneingeschränkte Übertragbarkeit der Korrekturgleichungen auf mittels Ultraschall-Impulslaufzeitmessung ermittelte dynamische Kennwerte ist daher nicht möglich. Jedoch bestätigen sie tendenziell die bisherigen Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Holzfeuchtigkeit.

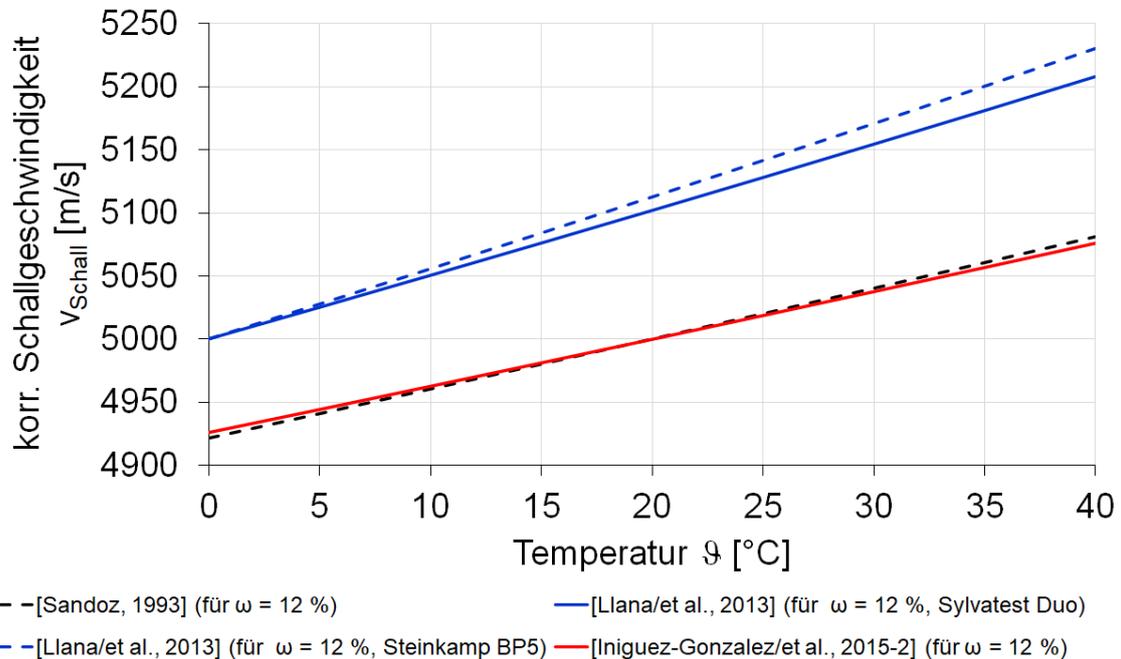
Eine zusammenfassende Darstellung der in der Literatur angegebenen Anpassungs-gleichungen für die Berücksichtigung des Holzfeuchteinflusses und Temperatureinflusses auf die Schallgeschwindigkeit ist in Abbildung 26 und Abbildung 27 zu finden.



**Abbildung 26: Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Schallgeschwindigkeit nach Literaturangaben (berechnet nach Gl. 4, Gl. 5, Gl. 7, Gl. 9 und Gl. 10 mit  $v_{\omega} = 5000$  m/s)**

Aus Abbildung 26 wird ersichtlich, dass sich die in der Literatur angegebenen Anpassungs-gleichungen teilweise deutlich in ihrem Verlauf unterscheiden. Während die Gleichungen nach [Sandoz, 1993], [Unterweiser/Schickhofer, 2010] und [Llana/et al., 2013] unterhalb des Fasersättigungsbereiches ( $\omega \leq (28 \dots 32) \%$ ) annähernd deckungsgleich verlaufen, weicht die

Anpassungsgleichung nach [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-2] deutlich von den anderen ab. In dem nach DIN EN 1995-1-1/NA.2013, Tabelle NA.6 angegebenen Bereich der Gleichgewichtsfeuchte für Holzbaustoffe in den Nutzungsklassen 1-3 von  $\omega_{GL} = (5 \dots 24) \%$  beträgt die Differenz zwischen den verschiedenen Anpassungsgleichung  $\Delta v = (0,8 \dots 5,9) \%$ .



**Abbildung 27: Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit nach Literaturangaben (berechnet nach Gl. 6 und Gl. 8 mit  $v_\omega = 5000$  m/s)**

Hinsichtlich der in Abbildung 27 dargestellten Anpassungsgleichungen zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Schallgeschwindigkeit zeigt sich, dass die in der Literatur angegebenen Gleichungen annähernd parallel und zum Teil deckungsgleich verlaufen. Im Bereich von  $\Theta = (0 \dots 40) \text{ } ^\circ\text{C}$  beträgt die Differenz  $\Delta v = (3,1 \dots 4,4) \%$ .

### Einfluss der Messlänge

Der Einfluss der Messlänge auf die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschall-Impulses wurde in [Llana/et al., 2016] an Holzbauteilen aus spanischem Kiefernholzern (*Pinus radiata/ sylvestris/ nigra/ pinaster*) untersucht. Die vergleichenden Messungen mit drei unterschiedlichen Geräten ergaben eine Proportionalität zwischen der Messlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Abhängig von der Holzart betrug die Differenz  $\Delta \approx (2 \dots 6) \%$  bei Messlängen zwischen  $l = (1 \dots 4) \text{ m}$ . Ein signifikanter Einfluss der Messlänge auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit war somit nicht festzustellen.

Im Rahmen der in [Kessel/et al., 1997] beschriebenen Untersuchungen wurde ebenfalls der Einfluss der Messlänge auf die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschall-Impulses betrachtet. Hierzu erfolgten wiederholte Messungen an zehn Prüfkörpern aus Fichtenholz, deren Länge in Schritten von  $\Delta l = (100 \dots 200) \text{ mm}$  von  $l_1 = 5,0 \text{ m}$  auf  $l_2 = 2,3 \text{ m}$  reduziert wurde. Die Ergebnisse der Messungen waren nicht eindeutig. Bei etwa der Hälfte der Proben war eine Reduzierung der messbaren Schallgeschwindigkeit mit abnehmender Länge um  $\Delta \approx (9 \dots 13) \%$  festzustellen. Die übrigen Prüfkörper zeigten keine signifikante Veränderung. Ein Einfluss der Holzstruktur und der Rohdichte auf die messbare Ausbreitungsgeschwindigkeit konnte nicht nachgewiesen werden. Vielmehr wird der festgestellte

Zusammenhang in [Kessel/et al., 1997] auf die mit zunehmender Länge exponentiell ansteigende Signaldämpfung zurückgeführt. Ebenso können lokal begrenzte Strukturstörungen und die Streuung der Rohdichte zu einer Variation der über die Gesamtlänge der Bauteile gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit führen. Eine abschließende Betrachtung erfolgte in [Kessel/et al., 1997], jedoch wird darauf verwiesen, dass weitere Untersuchungen zur Aufklärung der Längenabhängigkeit notwendig sind.

### Untersuchungen zur Fehlstellenerkennung

Die Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zur Erkennung von Fehlstellen (d.h. Äste, Innenfäule und Querschnittsschwächungen) wurde in mehreren Studien untersucht (s. u. a. [Schob/et al., 1997], [Niemz/Kucera, 1997], [Tobisch/Mittag, 1998], [Niemz/et al., 1999-1], [Heinke, 2015]). Tendenziell ist eine messbare Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Größe der Fehlstelle zu verzeichnen. Jedoch werden Fehlstellen mit geringer Ausprägung nicht zuverlässig erkannt. Des Weiteren wurde in [Niemz/Kucera, 1997] und [Schob/et al., 1997] festgestellt, dass eine zuverlässige Fehlstellenerkennung mittels Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nur gewährleistet ist, wenn die Messstrecke durch das Zentrum der Fehlstelle verläuft. Anhand numerischer Simulationen konnte zwar ein eindeutiger Einfluss von Fehlstellen auf die Schallimpulsausbreitung belegt, jedoch nicht im Sinne einer wirksamen Fehlstellenerkennung quantifiziert werden (s. [Scheffler/et al., 2002]).

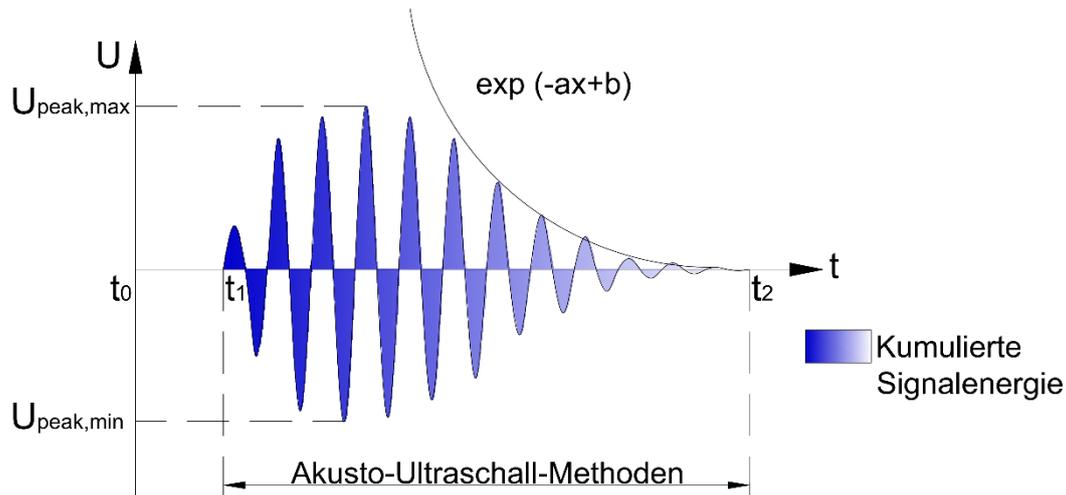
Diese Ergebnisse belegen, dass die Längsdurchschallung für die Erkennung von Fehlstellen nur bedingt geeignet ist. Ursache hierfür ist die Wechselwirkung zwischen der Wellenlänge und der Größe der Fehlstellen. Ist die Fehlstellengröße deutlich geringer als die Wellenlänge des Schallimpulses, ist eine zuverlässige Fehlstellenerkennung nicht gewährleistet. Dies hat jedoch zur Folge, dass die alleinige Betrachtung der Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit nur eine Aussage zur durchschnittlichen Steifigkeit zulässt. Die Festigkeit und Tragfähigkeit wird hingegen stärker durch lokale Fehlstellen und Wuchsmerkmale bestimmt, welche eben nicht hinreichend genau erfasst werden. Wird zusätzlich eine sorgfältige handnahe Inaugenscheinahme hinsichtlich äußerlich erkennbarer Fehlstellen durchgeführt, kann dieses Defizit zum Teil ausgeglichen werden. Bei Verdacht auf von außen nicht erkennbaren Fehlstellen (bspw. Innenfäule) sollten weitere apparative Methoden – bspw. das Ultraschall-Echo-Verfahren, die Bohrwiderstandsmessungen oder die Entnahme von Bohrkernproben – zum Einsatz kommen.

Eine alternative Herangehensweise an die Problematik zur Einbeziehung der Fehlstellenerkennung wird in [Sandoz/et al. 2000] beschrieben. Die Untersuchungen haben ergeben, dass durch die Erfassung weiterer Kenngrößen eine wesentlich engere Beziehung zur Biegebruchfestigkeit aufgestellt werden kann (s. Tabelle 17).

**Tabelle 17: Beziehungen zwischen mechanischen Eigenschaften und dynamisch gemessenen Kennwerten (für Fichtenholz, nach [Sandoz/et al., 2000])**

	Ausbreitungsgeschwindigkeit $v$	Maximale übertragene elektrische Spannung $U_{Peak}$	übertragene Energie $E$	Schalldämpfung $a$
Biege-Elastizitätsmodul	$r^2 = 0,583$ $r = 0,764$	$r^2 = 0,321$ $r = 0,567$	$r^2 = 0,230$ $r = 0,480$	$r^2 = 0,461$ $r = 0,679$
Biegebruchfestigkeit	$r^2 = 0,250$ $r = 0,500$	$r^2 = 0,416$ $r = 0,645$	$r^2 = 0,293$ $r = 0,541$	$r^2 = 0,561$ $r = 0,749$

Die engste Beziehung weist hierbei die Schalldämpfung auf. Diese ist jedoch praktisch schwer messbar, da die Signalstabilität nach Erreichen des Spannungspeaks deutlich abnimmt (s. Abbildung 28). Daher wird die Verwendung der maximalen übertragenen elektrischen Spannung als zusätzlicher Kennwert empfohlen. Dieser wird beispielsweise durch Messgeräte der 2. Generation gemessen und ausgegeben (bspw. Sylvatest Duo der Fa. CBT CBS, vgl. [Sandoz/Benoit, 2002]).



**Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf eines Ultraschall-Impulses (nach [Sandoz/et al., 2000])**

Ein ähnliches Vorgehen zur Feststellung von Ästen in Holzbauteilen wurde bereits in [Burmeister, 1967] vorgeschlagen. Die Messung der Signalschwächung erwies sich zur Feststellung von Ästen als besser geeignet als die Schallausbreitungsgeschwindigkeit.

### Untersuchungen zur Festigkeitssortierung

Erste grundlegende Untersuchungen zur Beziehung zwischen der Schallgeschwindigkeit und den für die Festigkeitssortierung relevanten Materialkennwerten Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul an Prüfkörpern in Bauteildimension wurden zu Beginn der 1980er Jahre geführt (s. [Waubke/Märkl, 1982], [Waubke, 1988]). Weitere wesentliche Untersuchungen zur Festigkeitssortierung mittels Ultraschalles folgten in den 1990er und 2000er Jahre (vgl. Tabelle 16). Gegenstand der Untersuchungen waren hauptsächlich Prüfkörper aus neuem Fichten- und Kiefernholz. Die aus den Ergebnissen der wesentlichsten Untersuchungen resultierenden Korrelations- und Regressionsbeziehungen sind in der Tabelle A. 1 in Anlage 1 aufgeführt. Eine grafische Darstellung der Regressionsbeziehungen ist in Abbildung 29 bis Abbildung 31 dargestellt.

Aus den Ergebnissen der wesentlichen Untersuchungen geht hervor, dass die Ultraschallgeschwindigkeit und die Rohdichte mit  $r = (0,36 \dots 0,59)$  gut miteinander korrelieren. Vereinzelt wurden aber auch deutlich geringere Korrelationskoeffizienten festgestellt ( $r = 0,093$ , s. [Kessel/et al., 1997], [Kessel/et al., 1998]). Die Beziehungen zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit bzw. dem Biege-Elastizitätsmodul sind mit  $r = (0,25 \dots 0,76)$  bzw.  $r = (0,61 \dots 0,95)$  stärker ausgeprägt. Durch die Verwendung des dynamischen Elastizitätsmoduls verändern sich die Beziehungen zur Biegefestigkeit und zum Biege-Elastizitätsmodul nur unwesentlich – d.h.  $r = (0,40 \dots 0,87)$  bzw.  $r = (0,42 \dots 0,93)$ .

Die in Abbildung 29 bis Abbildung 31 dargestellten Regressionsbeziehungen zeigen eine klare Proportionalität zwischen den dynamischen Messgrößen Schallgeschwindigkeit und dynamischer Elastizitätsmodul sowie der Biegefestigkeit bzw. dem statischen Biege-Elastizitätsmodul. Die Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz ist damit möglich. Hierfür sind Anwendungsfestlegungen und Grenzwerte für die Messgrößen erforderlich. Derartige Grenzwerte sind unter anderem in [Sandoz, 1989], [Steiger 1997-1/-2] und [Augustin, 1998/2004] zu finden (s. a. Tabelle 18).

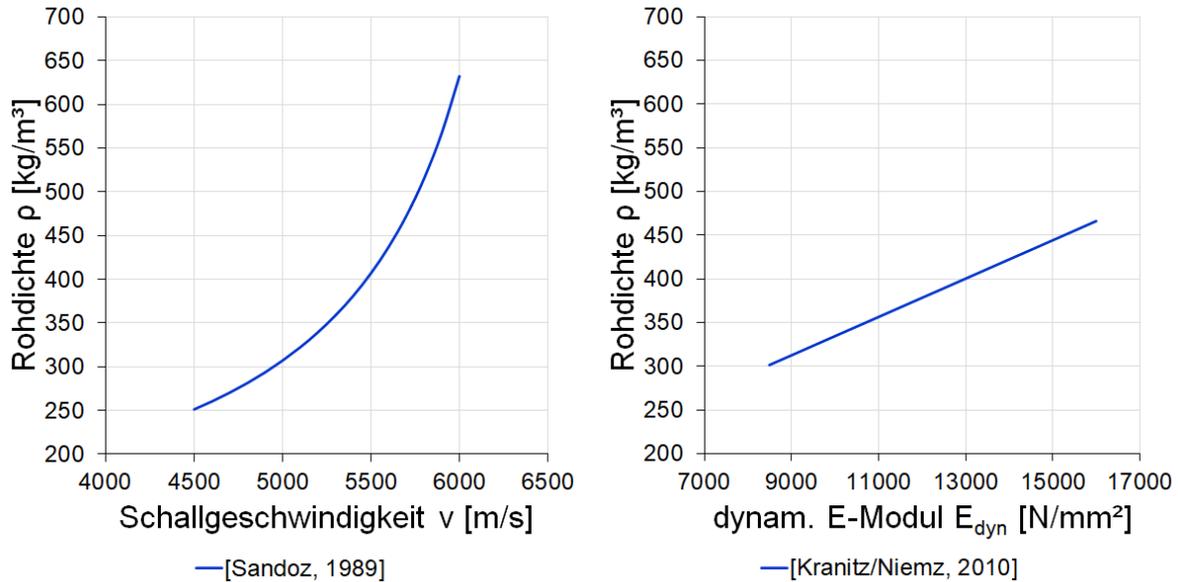


Abbildung 29: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte und der Schallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Literaturangaben (vgl. Tabelle A. 1)

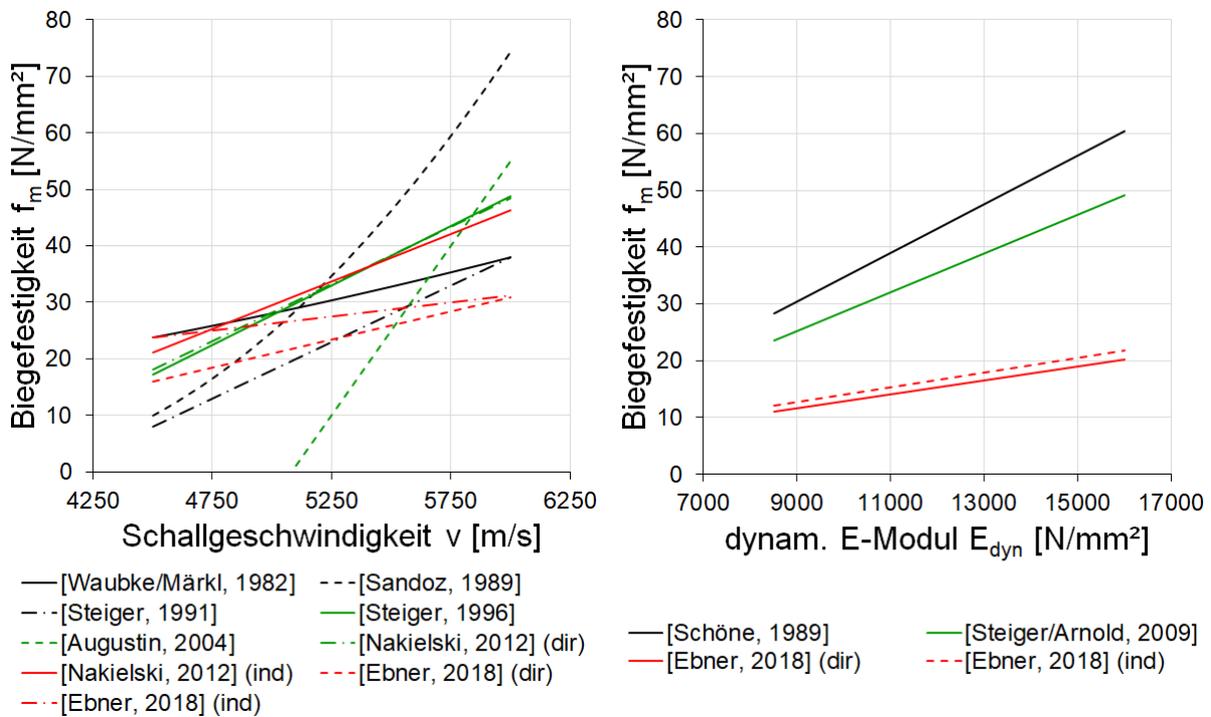
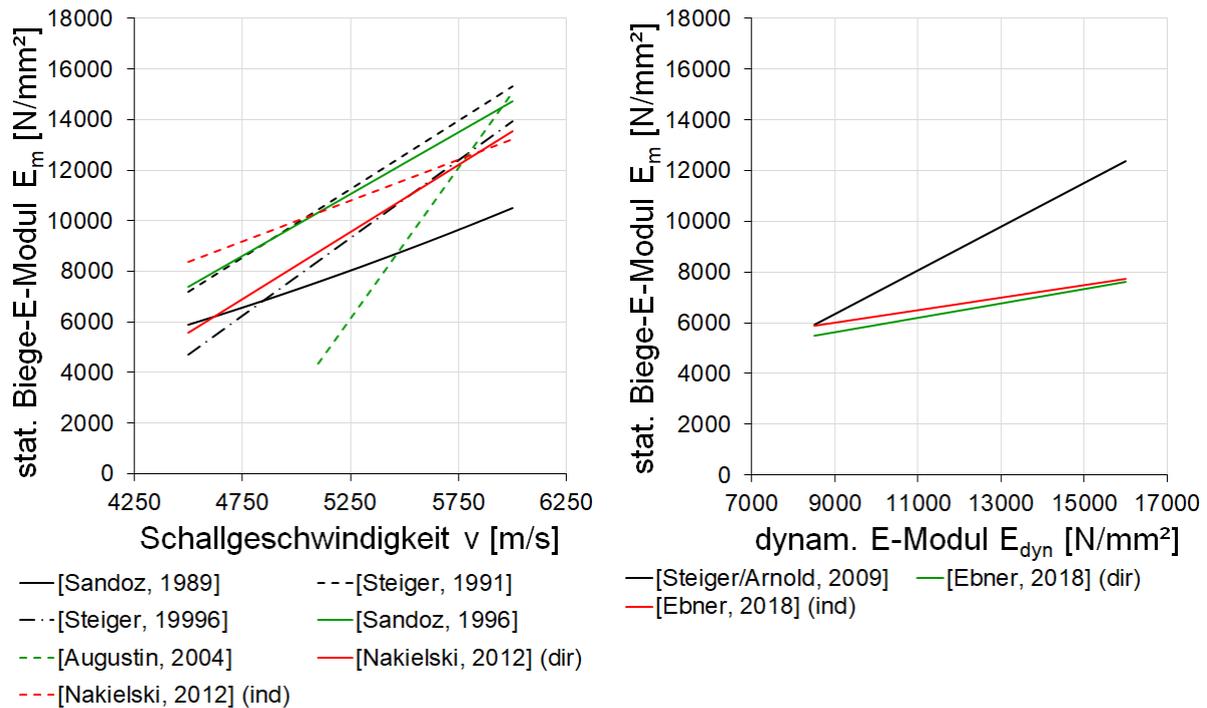


Abbildung 30: Regressionsbeziehungen zwischen der Biegefestigkeit und der Schallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Literaturangaben (vgl. Tabelle A. 1)



**Abbildung 31: Regressionsbeziehungen zwischen dem statischen Biege-Elastizitätsmodul und der Schallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Literaturangaben (vgl. Tabelle A. 1)**

**Tabelle 18: Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit für die Zuordnung von Nadel-Schnittholz (Fichtenholz) zu den Festigkeitsklassen nach EN 338**

[Sandoz, 1989]		[Steiger, 1997-1/-2]		[Augustin, 1998/2004]	
Festigkeitsklasse	Grenzwerte für $v_{12}$ [m/s]	Festigkeitsklasse	Grenzwerte für $v_{12}$ [m/s]	Festigkeitsklasse	Grenzwerte für $v_{12}$ [m/s]
CI I (S13/C30)	$5600 \leq v$	C40	$5900 \leq v$	US13 (S13/C30)	$5750 \leq v$
		C35	$5750 \leq v < 5900$		
CI II (S10/C24)	$5250 \leq v < 5600$	C27	$5500 \leq v < 5750$	US10 (S10/C24)	$5600 \leq v < 5750$
		C22	$5250 \leq v < 5500$		
CI II (S7/C18)	$v < 5250$	C18	$5100 \leq v < 5250$	US7 (S7/C18)	$5400 \leq v < 5600$
		< C18	$v < 5100$		

Erste Untersuchungen hinsichtlich des Einsatzes der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die maschinelle Festigkeitssortierung wurden in [Kessel/et al., 1997] und [Kessel/et al., 1998] geführt. Der Ausgangspunkt war der Umstand, dass Holzbauteile mit größeren Querschnitten (d.h.  $b/h > 80/80$  mm) nicht mit den seinerzeit in Deutschland zugelassenen Sortieranlagen nach der Tragfähigkeit sortiert werden konnten (vgl. a. Abschnitt 2.3.2). Die Zielstellung umfasste daher die Festlegung eines maschinellen Sortierverfahrens für Holzbauteile, welches sowohl die visuell feststellbare als auch apparativ messbare Kennwerte berücksichtigt. Hierzu wurden insgesamt 434 Kanthölzer aus Fichtenholz mit Dimensionen von  $b/h/l = (100 \dots 120/120 \dots 240/2280 \dots 4560)$  mm zerstörungsfrei untersucht und anschließend zerstörenden Biegeversuchen nach DIN EN 408 unterzogen. Neben der Ästigkeit und der Rohdichte berücksichtigt das in [Kessel/et al., 1997] vorgeschlagene Verfahren auch die mit Hilfe der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung ermittelte und die aus der Eigenfrequenz berechnete

Schallgeschwindigkeit. Die eigentliche Sortierung der Holzbauteile soll anhand von Sortierparametern erfolgen. Dabei handelt es sich um Kennwerte, die anhand von multiplen Regressionsbeziehungen aus den aufgenommenen Kennwerten berechnet werden. Die Festlegung der Klassengrenzwerte der Sortierparameter erfolgte anhand der sich für die Sortierausbeute ergebenden charakteristischen Kennwerte der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass  $p = (92 \dots 100) \%$  des Probenmaterials nicht überschätzt wurden. Die Effizienz der Sortierung, d.h. der Anteil des Probenmaterials, welcher der korrekten Klasse zugeordnet wurde, lag hingegen nur bei  $p = (0 \dots 75) \%$ . Insbesondere in den Sortierklassen MS10 und MS13 betrug der Anteil nur  $p = (0 \dots 41) \%$  bzw.  $p = (2 \dots 32) \%$ . Das Tragfähigkeitspotential wird durch das in [Kessel/et al., 1997] vorgeschlagene Sortierverfahren demnach insbesondere in den höheren Sortierklassen nicht ausgeschöpft.

Unabhängig davon werden in [Kessel/et al., 1997] konkrete Festlegungen für den praktischen Einsatz des Sortierverfahrens getroffen. Neben Festlegungen zur Durchführung und Auswertung der Messungen umfassen diese auch Anforderungen an die verwendeten Messeinrichtungen. Das Verfahren weist jedoch noch einige Defizite auf. Zum einen ist das Sortierverfahren nur für neues Fichtenholz anwendbar. Eine Anwendung auf andere Holzarten wurde nicht untersucht. Zum anderen wird die Schalldämpfung bei der Berechnung des Sortierparameters nicht berücksichtigt, obwohl die Messung aufgrund eines scheinbaren Längeneinflusses empfohlen wird (vgl. Abschnitt 0, S. 75f). Darüber hinaus basiert das Verfahren auf der gemeinsamen Berücksichtigung der anhand von zwei Messmethoden ermittelten Schallgeschwindigkeit. Dies erhöht den Messaufwand signifikant, obwohl aus den Untersuchungsergebnissen nur eine vergleichsweise geringe Verbesserung der Korrelationen durch Hinzunahme der aus der Eigenfrequenz berechneten Schallgeschwindigkeit resultiert. Des Weiteren wird seitens der visuellen Sortierung nur die Ästigkeit berücksichtigt. Weitere wesentliche festigkeits- und tragfähigkeitsmindernde Kriterien – wie bspw. die Faserneigung und Risse – finden bei der Berechnung der Sortierparameter keine Anwendung.

Das in [Kessel/et al., 1997] vorgeschlagene Sortierverfahren stellt einen wichtigen Entwicklungsschritt hinsichtlich der Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen im Allgemeinen dar. Ausgehend von der vorgeschlagenen Verfahrens- und Gerätrichtlinie ist das Sortierverfahren jedoch hauptsächlich für neues Bauholz im Herstellungs- und Verarbeitungsprozess anwendbar. Diese Einschränkung resultiert daraus, dass ausschließlich direkte Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen angewendet werden. Hierzu müssen beide Hirnholzenden des Holzbauteiles zugänglich sein, was bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen in den seltensten Fällen gegeben ist.

Ein weiterer methodischer Ansatz für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen wurde in [Arriaga/et al., 2005] veröffentlicht. Dort wird ein zweistufiges Vorgehen vorgeschlagen. In einer ersten Stufe werden die Holzbauteile ausschließlich visuell sortiert, wobei hier nur in „als Bauholz verwendbar“ und „als Bauholz nicht verwendbar“ unterschieden wird<sup>9</sup>. Auf Grundlage von Materialversuchen können dann Materialkennwerte festgelegt werden – bspw. für nach DIN 4074-1 als „verwendbar“ sortiertes Bauholz: F13/E9/D380,

---

<sup>9</sup> In den Untersuchungen in [Arriaga/et al., 2005] ist sowohl nach der spanischen Sortiernorm UNE 56544 als auch nach DIN 4074-1 visuell sortiert worden. Die entsprechenden Sortierklassen wurden als „verwendbar“ zusammengefasst.

d.h. charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,k} = 13 \text{ N/mm}^2$ , Mittelwert des Elastizitätsmoduls  $E_{0,\text{mean}} = 9000 \text{ N/mm}^2$  und charakteristische Rohdichte  $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ . Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung erfolgt dann in einer zweiten Stufe an den als „verwendbar“ eingestuften Holzbauteilen. Wird eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v \geq 4900 \text{ m/s}$  gemessen, ist eine Zuordnung zur nächsthöheren Klasse möglich – bspw. für nach DIN 4074-1 als „verwendbar“ sortiertes Bauholz und Ultraschall-Impulslaufzeitmessung: F17/E10/D380, d.h. charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,k} = 17 \text{ N/mm}^2$ , Mittelwert des Elastizitätsmoduls  $E_{0,\text{mean}} = 10000 \text{ N/mm}^2$  und charakteristische Rohdichte  $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ . Diese Methodik ist jedoch in der Anwendbarkeit auf nur eine Holzart (Kiefernholz, *Pinus sylvestris/pinaster*) sowie zwei Festigkeitsklassen beschränkt. Eine Aufdeckung von Tragfähigkeitsreserven ist auf diesem Wege nicht möglich.

#### 4.1.4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen führten dazu, dass das Ultraschall-Verfahren in mehreren europäischen Ländern (u. a. Schweiz, Österreich) bereits zum allgemein anerkannten Stand der Technik bei der Festigkeitssortierung von Neuholz gehört. Dabei kann sowohl auf einfache, tragbare Messgeräte als auch auf industriell einsetzbare Sortieranlagen zurückgegriffen werden (vgl. [Sandoz, 1996], [Sandoz/Benoit, 2007]).

In Deutschland ist dies aktuell nicht der Fall. Hier kommt das Ultraschall-Verfahren hauptsächlich für die Strukturbestimmung und Fehlstellenerkennung zum Einsatz (s. u. a. [Hasenstab, 2006]). Die Ursache hierfür liegt in einer Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) von 1993 begründet (s. [DGfH, 1993]). Demnach seien die seinerzeit vorliegenden Untersuchungsergebnisse nur auf die zum Zeitpunkt der Untersuchung vorhandenen Rahmenbedingungen anwendbar. Eine Extrapolation sei nicht möglich. Die Verwendung des „*Ultraschall-Verfahrens zur Festigkeitssortierung von Schnitt- und Rundholz ist somit in Deutschland derzeit ohne Zustimmung der Bauaufsicht im Einzelfall nicht möglich*“ [DGfH, 1993]. Unter definierten Rahmenbedingungen und separater Erfassung von Fehlstellen wird sie aber durchaus „*als Ergänzung zur visuellen Sortierung für sinnvoll erachtet*“ [DGfH, 1993], wozu jedoch umfangreiche Untersuchungen zur Absteckung der Rahmenbedingungen erforderlich sind.

Mehrere Untersuchungen bestätigen hingegen die Praxisrelevanz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz aus Nadelholz (s. Tabelle 16). Weiterhin konnten wesentliche Rahmenbedingungen (bspw. Temperatur-/Holzfeuchteinfluss, Grenzen der Fehlstellenerkennung, vgl. Abschnitt 0) aufgezeigt und versuchstechnisch abgesichert werden. Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung kann, wie der analysierte Entwicklungsstand zeigt, als apparative Unterstützung zur visuellen Festigkeitssortierung von neuem Nadelholz verwendet werden.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bei der Festigkeitssortierung von verbautem Holz liegen jedoch nur wenige systematische Untersuchungen vor (vgl. Tabelle 16). Es bleibt daher zu klären, ob wesentliche Unterschiede bei der Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeit an verbautem Holz im Gegensatz zu neuem Bauholz bestehen. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit dieser zerstörungsfreien Prüfmethode ausreichen, um die hierrüber ermittelten Materialkennwerte einer zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung zur aktuellen Tragfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen zugrunde zu legen. Dazu sind umfängliche und systematische Untersuchungen an neuem und altem Bauholz erforderlich.

## 4.2. Untersuchung von Bohrkernproben

### 4.2.1. Grundlagen

Grundlegende Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzbauteilen haben gezeigt, dass die Rohdichte einen starken Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften besitzt (vgl. bspw. Abbildung 10, Abbildung 11 und Tabelle 5). Dieser enge Zusammenhang führte dazu, dass die Rohdichte als Sortierkriterium für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz Anwendung findet.

Bei der maschinellen Festigkeitssortierung wird sie hauptsächlich entweder gravimetrisch (Aufnahme der Bauteilabmessungen mittels Laserabtastung und Wägung im Durchlauf) oder mit Hilfe von Durchstrahlung (bspw. Röntgen, Computertomographie) erfasst (vgl. Tabelle 7). Bei der visuellen Sortierung wird die mittlere Jahrringbreite als Indikator für die Rohdichte herangezogen. In beiden Fällen wird jedoch nicht die tatsächliche Rohdichte, sondern nur ein Schätzwert ermittelt. Je nachdem, wie genau diese Schätzwerte die tatsächliche Rohdichte widerspiegeln, kann dies im Zuge der Erfassung und Bewertung des Bauzustandes bestehender Konstruktionen im Einzelfall nicht ausreichend sein – bspw. für die Festlegung von Lastannahmen sowie für die Berechnung von Anschlüssen und Verbindungen. Des Weiteren kann die Rohdichte auch zur Auswertung anderer zerstörungsfreier/-armer Prüfmethode erforderlich sein – bspw. zur Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Ermittlung der tatsächlichen Rohdichte eines Holzbauteiles ist dann nur über die Entnahme von Proben möglich.

Eine einfache und gleichzeitig zerstörungsarme Methode der Probenentnahme stellt die Untersuchung von Bohrkernproben dar. Mit Hilfe von sogenannten Zuwachsbohrern oder Zapfenschneidern können zylindrische Proben quer zur Faserrichtung entnommen werden. Die zurückbleibenden Bohrlöcher lassen sich anschließend durch eingeklebte Holzpfropfen wieder kraft- und formschlüssig verschließen, sodass keine oder nur eine geringe Schwächung der Holzbauteile zurückbleibt.

Neben der Ermittlung der Rohdichte können Bohrkernproben auch für weitere Untersuchungen verwendet werden, wie bspw. zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1, Ermittlung der Druckfestigkeit oder chemische Laboruntersuchungen (s. a. [Rug/Seemann, 1988], [Cruz/et al., 2013], [Machado, 2013]). Ebenso sind Holzartbestimmungen, Dendrochronologie, holzschutztechnische Untersuchungen zur Schädigung durch holzzerstörende Organismen möglich. Werden Bohrkernproben größeren Durchmessers entnommen – d.h.  $\varnothing \geq 30$  mm – können die Bohrkernproben zu Prüfkörpern zur Ermittlung der Scherfestigkeit (Holz und Klebefugen bei Brettschichtholz) oder zur Erstellung von Festigkeitsprofilen mittels Dynstat-Verfahren nach [TGL 1-204-BI. 8:1965] und [DIN 53435:1983] weiterverarbeitet werden (vgl. [Rug/et al., 2011]).

### 4.2.2. Bisherige Untersuchungen

Tabelle 19 enthält eine Übersicht über bisherige Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Bohrkernproben für die Festigkeitsuntersuchung von Bauholz. Eine Übersicht über die aus der Literatur hervorgehenden Korrelations- und Regressionsbeziehungen für Versuche parallel zur Faserrichtung ist in Tabelle A. 2 in Anlage 2 zu finden. Die wesentlichen, dort aufgeführten Regressionsbeziehungen sind in Abbildung 33 und Abbildung 33 grafisch dargestellt.

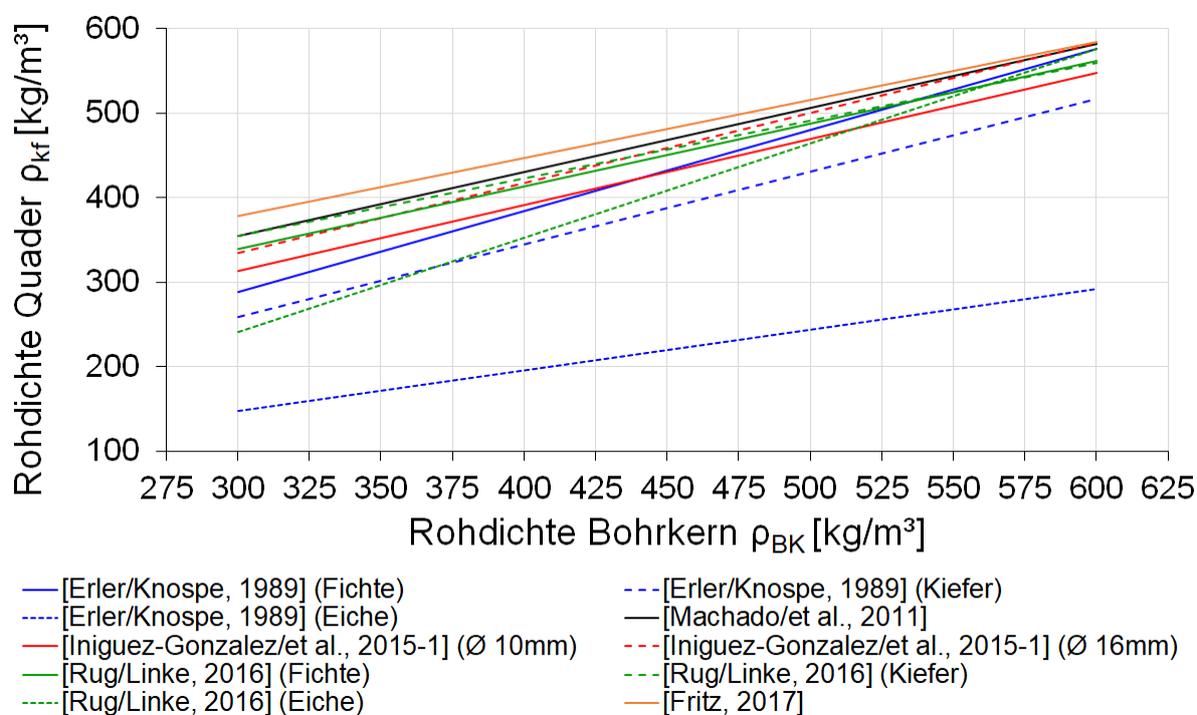
**Tabelle 19: Ausgewählte Untersuchungen zur Anwendung von Bohrkernproben für die Festigkeitsuntersuchung von Bauholz (chronologisch geordnet)**

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ Methodik	Wesentliche Ergebnisse
[Rug/Seemann, 1988]	◇/◆	Fichte/Buche/Eiche (NH), Kiefer (AH), ca. 600 Stk. (BK Ø 15 mm & kf Quader) <i>Druckversuche parallel zur Faserrichtung</i>	Bruchverhalten Bohrkern & Quader vergleichbar; Regressionen & Umrech- nungsfaktoren zw. $f_{c,0,BK}$ und $f_{c,0,kf}$
[Erler/et al., 1988]	◇/◆	Kiefer (NH/AH, BK Ø 15 mm & kf Quader) <i>Druckversuche an BK quer zur Faserrichtung &amp; an Quadern parallel zur Faserrichtung</i>	Bohrkerne für in-situ Fest- igkeitsuntersuchungen gut geeignet; Regressionen zw. $f_{c,90,BK}$ und $f_{c,0,kf}$
[Rug/Seemann, 1989-1] [Rug/Seemann, 1989-2]	◇/◆	Kiefer/Fichte/Eiche (AH), je. 480 Stk. (BK Ø 10-15 mm & kf Quader), Kiefer (NH/AH, (BK Ø 10-15 mm & kf Quader) <i>Druckversuche parallel zur Faserrichtung, Ermittlung der Rohdichte</i>	Bohrkerne für in-situ Fest- igkeitsuntersuchungen gut geeignet; Regressionen & Umrech- nungsfaktoren zw. $f_{c,0,BK}$ / $f_{c,0,kf}$ und $\rho_{BK}$ / $\rho_{kf}$
[Erler/Knospe, 1989]	◇/◆	Kiefer (AH), Fichte/Kiefer/ Eiche (NH, BK Ø 15 mm & kf Quader) <i>Druckversuche an BK quer zur Faserrichtung &amp; an Quadern parallel zur Faser- richtung, Ermittlung der Rohdichte</i>	Bohrkerne für in-situ Fest- igkeitsuntersuchungen gut geeignet; Regressionen zw. $f_{c,0,BK}$ / $f_{c,0,kf}$ , $f_{c,90,BK}$ / $f_{c,90,kf}$ und $\rho_{BK}$ / $\rho_{kf}$
[Rug/Firzlaff, 1996]	◆	Kiefer/Fichte/Eiche (NH/AH, BK Ø 15 mm) <i>Druckversuche parallel zur Faserrichtung, Ermittlung der Rohdichte</i>	Regressionen zw. $f_{c,0,BK}$ und $\rho_{BK}$
[Kasal, 2003] [Kasal/Anthony, 2004]	◇/◆	Esche/Ahorn/Zeder/Kiefer/ Eiche (NH, BK Ø 4,8 mm & kf Quader)	Bohrkerne für in-situ Fest- igkeitsuntersuchungen gut geeignet; Korrelationskoeffizient zw. $f_{c,0,BK}$ und $f_{c,0,kf}$
[Machado/et al., 2011]	◇/◆	Kiefer/Edelkastanie (NH, je 30 Stk. BK & kf Quader) <i>Ermittlung der Rohdichte</i>	Bohrkerne für in-situ Fest- igkeitsuntersuchungen gut geeignet; Regressionen zw. $\rho_{BK}$ und $\rho_{kf}$
[Iniguez-Gonzalez/ et al., 2015-1]	◇/◆	Kiefer (NH, BK Ø 10-16 mm & kf Quader) <i>Ermittlung der Rohdichte</i>	Bohrkerne für in-situ Fest- igkeitsuntersuchungen gut geeignet; Regressionen zw. $\rho_{BK}$ und $\rho_{kf}$
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; BK ... Bohrkernproben; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

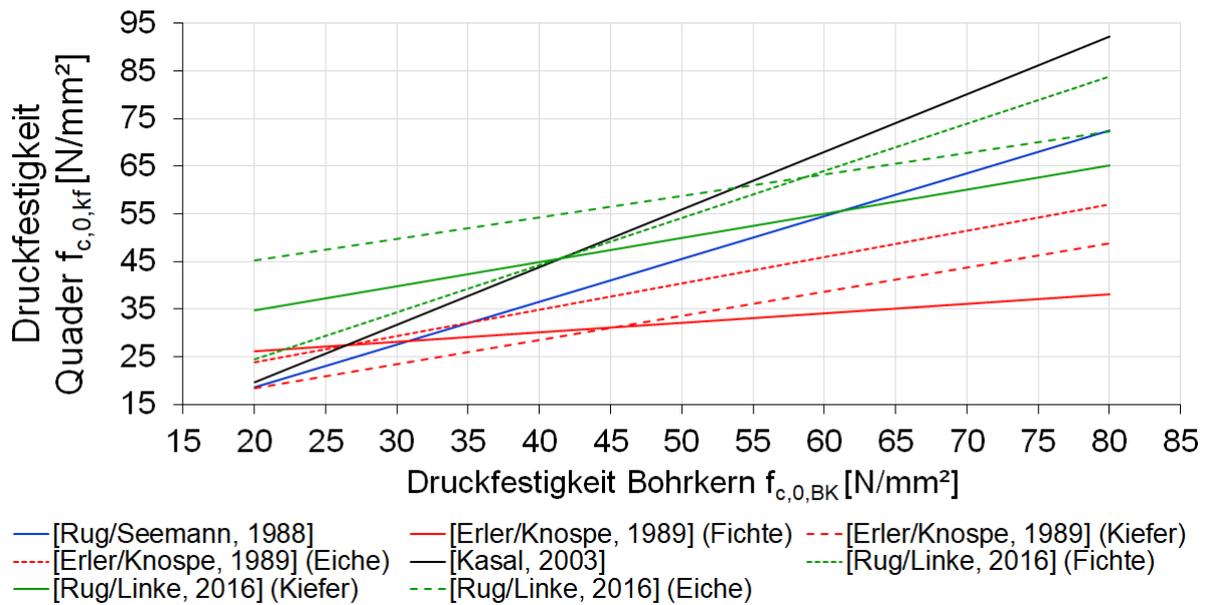
Tabelle 19 (fortgesetzt)

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ Methodik	Wesentliche Ergebnisse
[Rug/Linke, 2016]	◆	Fichte/Kiefer/Eiche (NH, BK Ø 15 mm & kf Quader) <i>Druckversuche parallel zur Faserrichtung, Ermittlung der Rohdichte</i>	Regressionen zw. $f_{c,0,BK} / f_{c,0,kf}$ und $\rho_{BK} / \rho_{kf}$
[Fritz, 2017]	◇/◆	Edelkastanie (NH, BK Ø 15 mm & kf Quader) <i>Druckversuche parallel zur Faserrichtung, Ermittlung der Rohdichte</i>	Regressionen zw. $\rho_{BK}$ und $\rho_{kf}$

◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; BK ... Bohrkernproben; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben

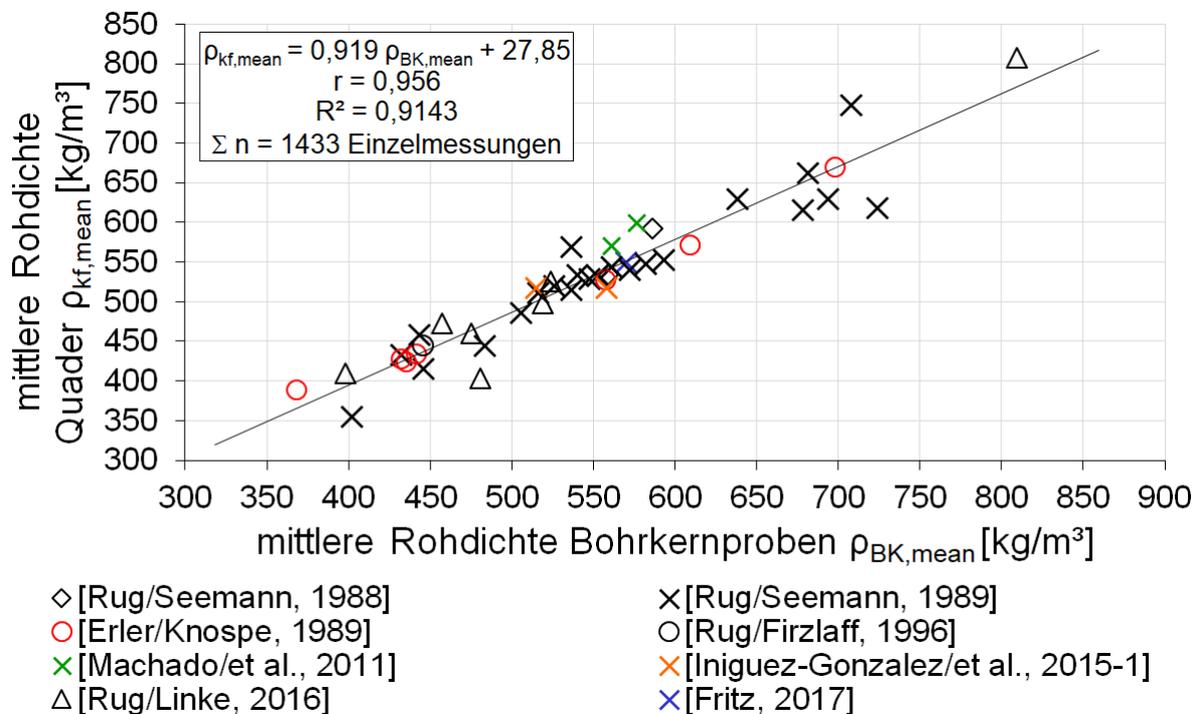


**Abbildung 32: Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Rohdichte (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2)**

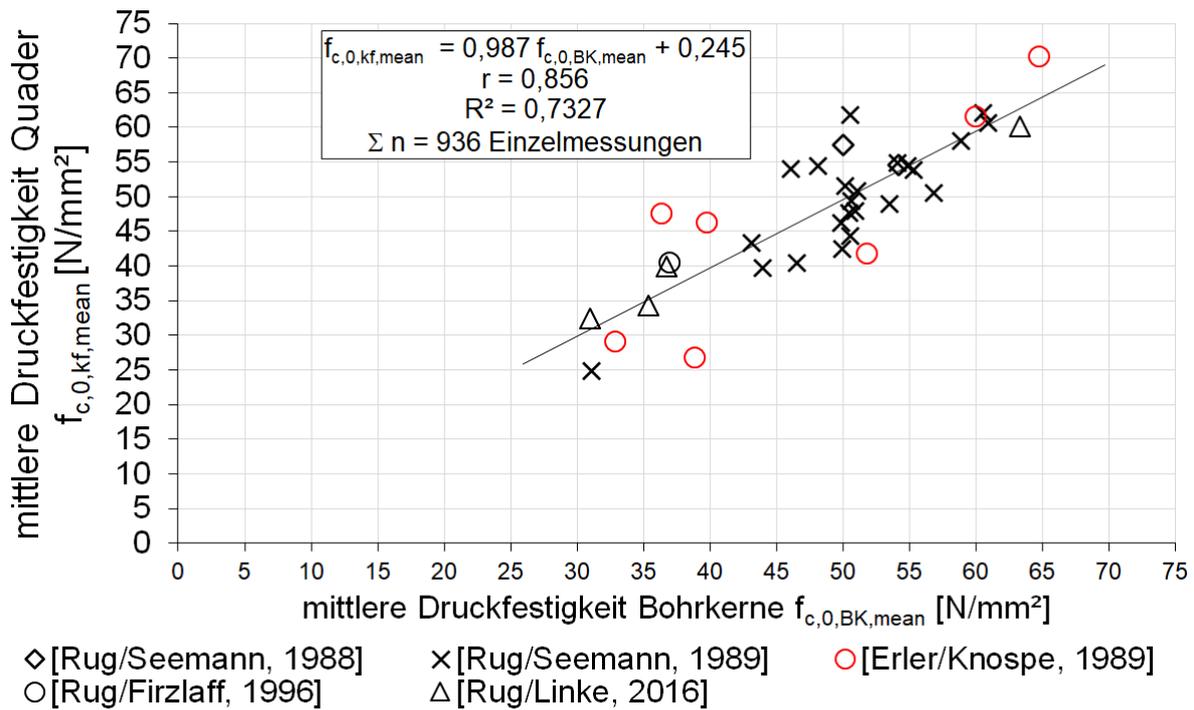


**Abbildung 33: Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2)**

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass Bohrkernproben sehr gut geeignet sind, um die Rohdichte und Druckfestigkeit von verbauten Hölzern zu ermitteln. Die Beziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern besitzen mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,530 \dots 0,894)$  bezüglich der Rohdichte und  $r = (0,330 \dots 0,943)$  eine mittlere bis starke Ausprägung (vgl. Tabelle A. 2). Betrachtet man die Literaturangaben unabhängig von der Holzart, ergeben sich durchgehend stark ausgeprägte Beziehungen (s. Abbildung 35 und Abbildung 35).

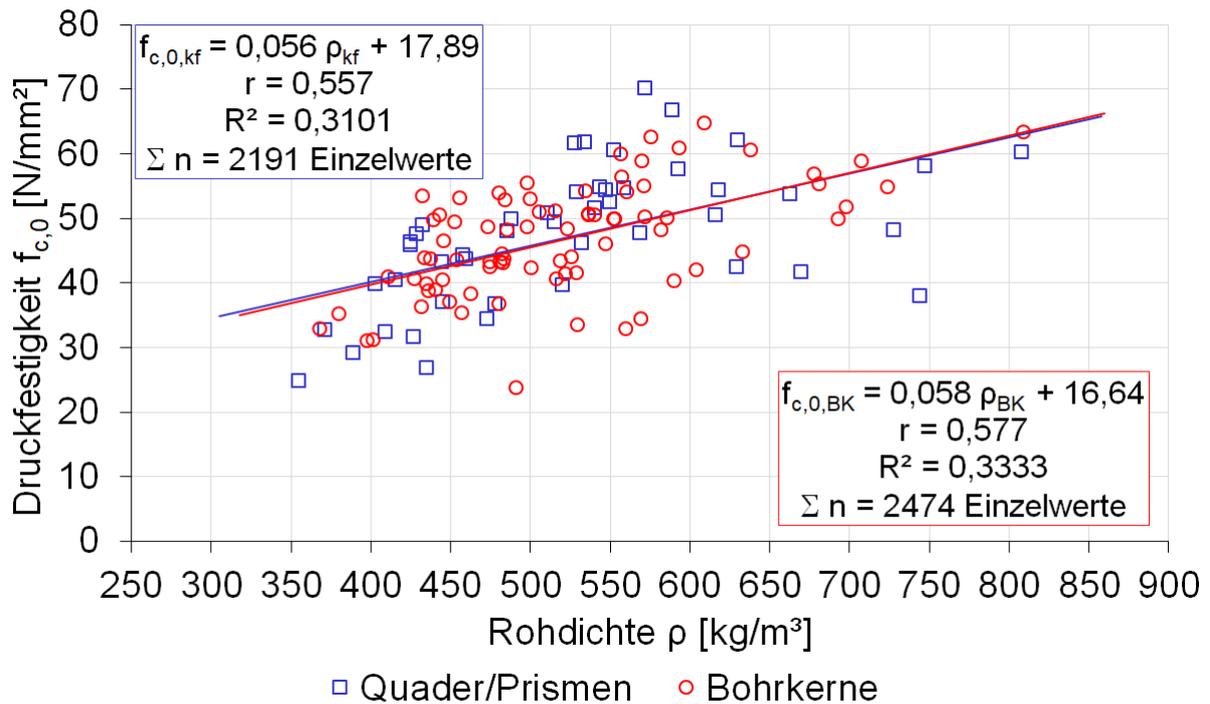


**Abbildung 34: Regression zwischen den mittleren Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Rohdichte (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2)**



**Abbildung 35: Regression zwischen den mittleren Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2)**

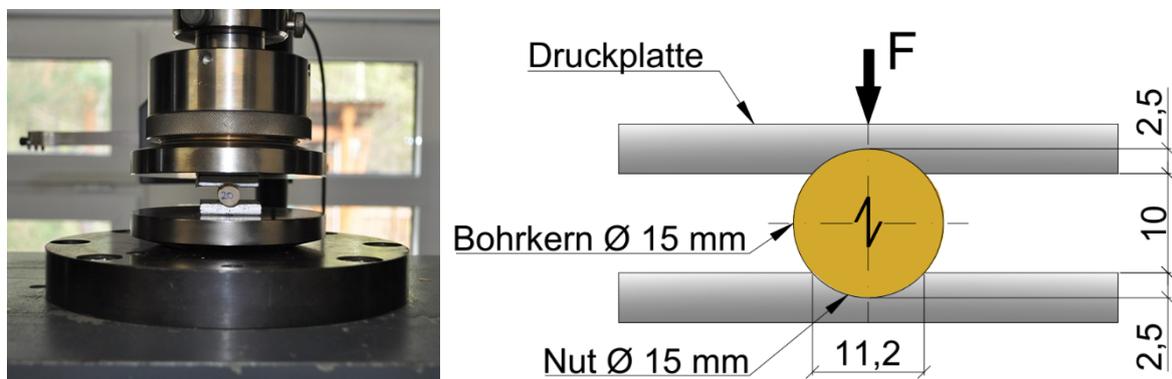
Unabhängig von den stark ausgeprägten Regressionsbeziehungen muss berücksichtigt werden, dass Bohrkernproben nicht uneingeschränkt zur Ermittlung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holzbauteilen verwendet werden können. Der Einfluss der Wuchsmerkmale auf die Tragfähigkeit von Holzbauteilen lässt sich durch die Untersuchung kleiner, fehlerfreier Proben – welche noch dazu in geringem Umfang entnommen werden, um eine Schwächung der Bauteile zu minimieren – nicht erfassen (s. a. [Cruz/et al., 2013]). Bohrkernproben sind jedoch geeignet, um die Materialkennwerte des fehlerfreien Holzes zu überprüfen (vgl. [Lear, 2005], [Cruz/et al., 2013]). Hierdurch können bereits erste Aussagen darüber getroffen werden, ob die Materialeigenschaften der untersuchten Holzbauteile deutliche Abweichungen zur Grundgesamtheit aufweisen und damit bspw. eine Schädigung durch äußere Einflüsse vorliegt. Voraussetzung für derartige Bewertungen ist jedoch eine Vergleichbarkeit der Beziehung zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit bei Bohrkernproben sowie kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern (Quader/Prismen). Ausgehend von den Angaben der in Tabelle 19 aufgeführten Literatur ist dies der Fall. Wie aus Abbildung 36 ersichtlich wird, ist die Beziehung zwischen der Rohdichte und der Druckfestigkeit für Bohrkernproben und kleine, fehlerfreie Prüfkörper (Quader/Prismen) annähernd deckungsgleich.



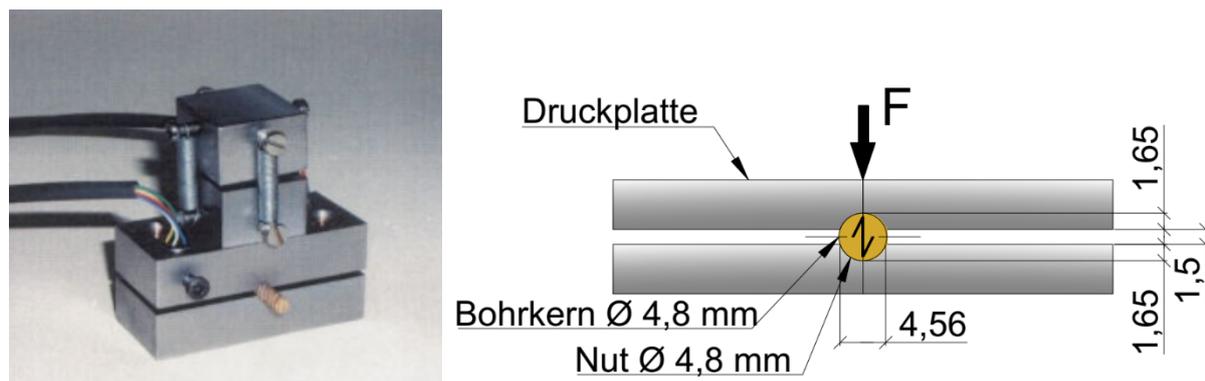
**Abbildung 36: Regressionen zwischen der Rohdichte und der Druckfestigkeit von Bohrkernproben und kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern (Quader/Prismen) nach Literaturangaben**

### Prüfmethodik & Einflussfaktoren

Die Ermittlung der Rohdichte und der Druckfestigkeit kann analog den Prüfnormen für kleine, fehlerfreie Prüfkörper erfolgen ([DIN 52182:1976], [DIN 52185:1976], [DIN 52192:1979]). Hinsichtlich der Ermittlung der Druckfestigkeit sind in der Literatur verschiedene Vorgehensweisen zu finden. Während ERLER/ET AL. die Querdruckfestigkeit an aufrechtstehenden Bohrkernproben ermitteln (s. [Erlér/et al. 1988], [Erlér/Knospe, 1989]), wurde in anderen Untersuchungen üblicherweise die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung an liegenden Bohrkernproben bestimmt (s. bspw. [Rug/Seemann, 1988/1989], [Kasal, 2003], [Rug/Linke, 2016]). Für die zweite Prüfmethode wird die Prüflast mittels spezieller Druckplatten auf die Mantelfläche der Bohrkernproben verteilt (s. Abbildung 38 und Abbildung 38).



**Abbildung 37: Prüfvorrichtungen zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Bohrkernproben – links: Bohrkernproben Ø 15 mm, Prüfung in einer Universalprüfmaschine (eigene Darstellung); rechts: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus (eigene Darstellung)**



**Abbildung 38: Prüfvorrichtungen zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Bohrkernproben – links: Bohrkernproben Ø 4,8 mm, Prüfung mit spezieller Vorrichtung (aus [Kasal/Anthony, 2004]); rechts: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus (eigene Darstellung)**

Abbildung 38 und Abbildung 38 zeigen, dass bei der Ermittlung der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung unterschiedliche Probendurchmesser zum Einsatz kommen. Während in den USA üblicherweise Bohrkernproben mit einem Durchmesser von Ø 4,8 mm verwendet werden (s. [Kasal, 2003], [Kasal/Anthony, 2004]), kommen in Europa überwiegend Bohrkernproben mit einem Durchmesser von Ø (10 ... 15) mm zum Einsatz (vgl. Tabelle A. 2 in Anlage 2). Der Probendurchmesser scheint oberhalb von Ø 10 mm jedoch keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse zu haben. Laut [Rug/Seemann, 1989-1] beträgt die Differenz zwischen der Druckfestigkeit von Bohrkernen mit einem Durchmesser von Ø (10 ... 15) mm im Mittelwert nur rund 6,4 %. Bezüglich der Rohdichte ergibt sich aus den Untersuchungen in [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-1] eine Differenz von rund 7,3 % bezogen auf Bohrkernproben mit einem Durchmesser von Ø (10 ... 16) mm. In [Erlor/Knospe, 1989] konnte nach Auswertung von Literaturangaben zu Versuchen an Bohrkernen mit einem Durchmesser von Ø (10 ... 20) mm ebenfalls kein Einfluss des Bohrkerndurchmessers auf die messbare Druckfestigkeit und Rohdichte festgestellt werden. Dies entspricht den Angaben in [Kollmann, 1982], wonach bei fehlerfreien Prüfkörpern kein wesentlicher Größeneinfluss auf die Druckfestigkeit vorliegt.

Lediglich hinsichtlich der Längenschlankheit ( $h/a$ ) der Prüfkörper ist laut [Kollmann, 1982] ein Größeneinfluss zu verzeichnen, wobei mit zunehmender Längenschlankheit mit einer Abnahme der Druckfestigkeit zu verzeichnen ist. Bei kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern (Quader/Prismen) muss das Verhältnis aus Prüfkörperhöhe und Kantenlänge nach DIN 52185:1976  $h/a = (1,5 \dots 3,0)$  betragen. Analog dazu ergibt sich für gängige Bohrkern Durchmesser ein Verhältnis aus Durchmesser und Breite der druckbeanspruchten Fläche von  $d/a \approx (1,1 \dots 1,34)$ . Dementsprechend sind bei Bohrkernproben geringfügig höhere Druckfestigkeiten zu erwarten als bei kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern. Diese Annahme wird durch die bisherigen Untersuchungen bestätigt. Wie in Tabelle A. 2 aufgeführt, ergibt sich die Umrechnung der Druckfestigkeit über die Beziehung  $f_{c,0,kf} = k \cdot f_{c,0,BK}$ , wobei der Umrechnungsfaktor abhängig von der Holzart im Bereich von  $k = (0,80 \dots 0,93)$  liegt.

Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit von Bohrkernen kann analog zu kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern (Quader/Prismen) angenommen werden. In der derzeit gültigen Prüfnorm DIN 52185:1976 ist keine Umrechnung entsprechend der Holzfeuchtigkeit vorgesehen, da zur Zeit der Veröffentlichung der Norm keine gesicherten Korrekturfaktoren verfügbar waren. In der Fachliteratur werden hingegen verschiedene Anpassungsgleichungen und Korrekturfaktoren angegeben (s. [Kollmann, 1982], [Niemz/Sonderegger, 2017]). Demnach ist

unterhalb des Fasersättigungsbereiches von einer Abminderung der Druckfestigkeit um (4 ... 6) % bei Zunahme der Holzfeuchtigkeit von 1 %-Punkt auszugehen. Dabei besteht in der Fachliteratur jedoch Uneinigkeit darüber, welche Anpassungsgleichung die beste Übereinstimmung bringt (vgl. [Kollmann, 1982]). Um dennoch vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt sich daher die Klimatisierung der Bohrkernproben bei  $\vartheta = 20 \text{ °C}$  und  $\varphi = 65 \text{ \% rel. Luftfeuchtigkeit}$  auf eine Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12 \text{ \%}$ .

Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse von Versuchen an Bohrkernproben besitzt auch die Probenentnahme. So können durch unsachgemäße Entnahme – beispielsweise zu hohe Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit, stumpfe Bohrer – Vorschädigungen durch Reibung und Hitzeentwicklung, Mikrobrüche oder Scher- und Torsionsspannungen entstehen (vgl. [Kasal/Anthony, 2004], [Lear, 2005]).

### **4.2.3. Zusammenfassung**

Die Untersuchung von Bohrkernproben ist für die zerstörungsarme Ermittlung von Materialeigenschaften sehr gut geeignet. Neben der Bestimmung von Materialkennwerten (bspw. Holzfeuchtigkeit, Rohdichte, Druckfestigkeit) eignen sich Bohrkernproben auch für weitere labor-technische Untersuchungen (bspw. Bestimmung der Holzart, chemische Analysen, Dendrochronologie, holzschutztechnische Untersuchungen zu Schädigungen durch holzzerstörende Organismen).

Die starke Ausprägung der Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und denen von kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern (Quader/Prismen) erlaubt eine zuverlässige Bewertung der Materialeigenschaften Rohdichte und Druckfestigkeit. Hinsichtlich der Druckfestigkeit sollte jedoch beachtet werden, dass eine quantitative Aussage zur Tragfähigkeit von Holzbauteilen nur bedingt möglich ist, da die Festigkeit des fehlerfreien Holzes durch den Einfluss vorhandener Wuchsmerkmale überlagert wird. Daher sollten Bohrkernuntersuchungen nie alleinstehend eingesetzt werden, sondern nur in Kombination mit weiteren zerstörungsfreien/-armen Prüfmethoden.

Ein Einfluss des Probendurchmessers kann ausgehend von den bisherigen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Bohrkernproben mit einem Durchmesser von  $\varnothing$  (10 ... 15) mm haben sich in der Praxis bewährt.

## **4.3. Eindringtiefmessung**

### **4.3.1. Grundlagen**

Die Ermittlung der Rohdichte ist für die zuverlässige Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen unerlässlich, da sie – wie bereits erläutert – eine enge Beziehung zu den Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften aufweist. Die Untersuchung von Bohrkernproben hat sich in zahlreichen Untersuchungen als geeignete zerstörungsarme Prüfmethode erwiesen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Entnahme von Bohrkernproben ist jedoch nicht in jedem Fall möglich.

Insbesondere bei denkmalgeschützten Objekten ist die Probenentnahme in einem ausreichenden statistischen Umfang meist nicht möglich. Insbesondere in Anschluss- und Verbindungsbereichen ist eine Probenentnahme nicht zu empfehlen, da diese dadurch wesentlich geschwächt werden (bspw. Lochleibungen von stiftförmigen Verbindungsmitteln). In solchen

Fällen sind zerstörungsfreie Prüfmethode notwendig, mit deren Hilfe die Rohdichte zuverlässig ermittelt werden kann.

Eine derartige zerstörungsfreie Prüfmethode ist die Eindringtiefmessung. Hierbei wird ein Stahlstift mit einer definierten Einschlagenergie in die Holzoberfläche eingetrieben. Anhand der Eindringtiefe des Stahlstiftes können dann anhand von Regressionsbeziehungen die Materialkennwerte des Holzbauteiles berechnet werden.

In den vergangenen 60 Jahren sind verschiedene Prüfgeräte entwickelt und erprobt worden. Zwar unterscheiden sich die Geräte durch ihren Aufbau – d. h. die Art der Aufbringung des Schlagimpulses durch Fallhämmer oder Federkraft, die grundlegende Methodik ist jedoch bei allen Geräten gleich.

Ursprünglich wurde die Eindringtiefmessung für die zerstörungsarme Untersuchung von stehenden Bäumen und die Bewertung der Resttragfähigkeit von hölzernen Leitungsmasten entwickelt (s. a. [Cown, 1978], [Proceq, 1999]). Die Anwendbarkeit der Prüfmethode für die Untersuchung von Holzbauteilen wurde durch mehrere Untersuchungen bestätigt (s. u. a. [Görlacher, 1987], [Erlor/Pohlmann, 1985]).

Neben der quantitativen Ermittlung von Materialkennwerten (Härte, Rohdichte, Festigkeit) kann die Eindringtiefmessung auch genutzt werden, um qualitative Aussagen zur allgemeinen Materialqualität zu treffen. So können bspw. verdeckte Schädigungen oder Strukturstörungen erfasst und eingegrenzt werden. Unabhängig davon, ob die Eindringtiefmessung für quantitative oder qualitative Untersuchungen zum Einsatz kommt, beziehen sich die Ergebnisse in jedem Fall auf die gerätespezifische maximale Eindringtiefe (üblicherweise  $t_{p,max} \approx 40$  mm). Aussagen über das Querschnittsinnere von Holzbauteilen mit größeren Querschnitten sind daher nicht möglich.

#### 4.3.2. Bisherige Untersuchungen

Tabelle 20 enthält eine Übersicht über bisherige Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Eindringtiefmessung für die Untersuchung von Holzbauteilen. Eine Übersicht über die aus der Literatur hervorgehenden Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe eines Stahlstiftes und der Rohdichte sowie den Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften ist in Tabelle A. 3 in Anlage 3 zu finden. Die wesentlichen dort aufgeführten Regressionsgleichungen sind in Abbildung 39 grafisch dargestellt.

**Tabelle 20: Übersicht über ausgewählte Untersuchungen zur Anwendung der Eindringtiefmessung für die Untersuchung von Holzbauteilen (chronologisch geordnet)**

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ Messgerät (Schlagenergie), Untersuchungen	Wesentliche Ergebnisse
[Görlacher, 1987]	◇/◆	Fichte (NH, B), 208 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung</i>	Methode für Bauholz geeignet; Messrichtung hat keinen Einfluss auf Ergebnis; Quantifizierung des Feuchteinflusses; Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

Tabelle 20 (fortgesetzt)

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ Messgerät (Schlagenergie), Untersuchungen	Wesentliche Ergebnisse
[Erler/et al., 1988]	◇/◆	Kiefer (NH/AH, B/kf), 41 Stk. <i>Xylodyn (6 Joule), Eindringtieftmessung, Rohdichteermittlung, Biegeversuche (B), Druckversuche parallel zur Faserrichtung (kf)</i>	Methode für Bauholz geeignet; Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ , $f_{c,0}$ & $t_p$
[Erler/Knospe, 1989]	◇/◆	Kiefer/Fichte (NH/AH, B/kf), k. A. zur Stückzahl <i>Xylodyn (6 Joule), Eindringtieftmessung und Rohdichteermittlung</i>	Messrichtung hat einen Einfluss auf Ergebnis; Korrelationskoeffizienten zw. $\rho$ & $t_p$
[Descamps/et al., 2005]	◇/◆	Kiefer/Eiche (NH, kf), k. A. zur Stückzahl <i>elektr. Nagler (1,7 Joule), Eindringtieftmessung und Rohdichteermittlung</i>	Messrichtung hat keinen Einfluss auf Ergebnis; Methode für Rohdichteermittlung gut geeignet; Korrelationskoeffizienten und Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Feio, 2005]	◇/◆	Edelkastanie (NH/AH, B), 131 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtieftmessung, Rohdichteermittlung und Druckversuche parallel und quer zur Faserrichtung</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Grippa, 2009]	◇/◆	Edelkastanie (AH, B/kf), 60 Stk. <i>Woodpecker Wood Test Hammer (11 Joule), Eindringtieftmessung und Rohdichteermittlung</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Iniguez/et al., 2010]	◆	Kiefer (NH, kf), 266 Stk. Kiefer (AH, B), 25 Stk. <i>Pilodyn 6J Forester (6 Joule), Eindringtieftmessung und Rohdichteermittlung</i>	Methode zur Rohdichteermittlung sehr gut geeignet; Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Henriques/et al., 2011]	◆	Kiefer (Ah, kf), 174 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtieftmessung, Rohdichteermittlung und Druckversuche parallel zur Faserrichtung</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ , $f_{c,0}$ & $t_p$
[Teder/et al., 2011]	◇/◆	k. A. zu Holzart (AH, B), 124 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtieftmessung, Rohdichteermittlung und Biegeversuche</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ , $f_m$ & $t_p$
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

Tabelle 20 (fortgesetzt)

Quelle	Inhalt	Untersuchungsgegenstand/ Messgerät (Schlagenergie), Untersuchungen	Wesentliche Ergebnisse
[Bartunkova, 2012]	◇/◆	Edelkastanie (AH, B), 20 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung</i>	Korrelationskoeffizienten zw. $\rho$ , $f_m$ & $t_p$
[Thaler/et al., 2012]	◆	<i>Fichte (NH, B), 150 Stk., infiziert mit Braunfäulepilzen Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtiefmessung und Ermittlung d. Massenverlust</i>	Methode für Feststellung von Fäule geeignet, sofern Referenzmessungen im ungeschädigten Bereich erfolgen; Korrelationskoeffizienten zw. $t_p$ & $\Delta m$
[Cavalli/Togni, 2013]	◇/◆	Tanne (AH, B), 13 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Faggiano/et al., 2013]	◇/◆	Edelkastanie (AH, B/kf), 60 Stk. <i>Woodpecker Wood Test Hammer (11 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung</i>	Korrelationskoeffizienten zw. $\rho$ , $f_m$ , $E_m$ & $t_p$
[Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-1]	◆	Kiefer (NH, B/kf/BK), 150 Stk. <i>Pilodyn 6J (6 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung (kf/BK)</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-2]	◆	k. A.	Quantifizierung des Einflusses der Holzfeuchte
[Llana/et al., 2015]	◇/◆	Kiefer (NH, B), 15 Stk. <i>Pilodyn 6J Forester (6 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung</i>	Quantifizierung des Einflusses der Holzfeuchte
[Fritz, 2017]	◇/◆	Edelkastanie (AH, B), 240 Stk. <i>Woodpecker Wood Test Hammer (11 Joule), Eindringtiefmessung, Rohdichteermittlung und Druckversuche parallel zur Faserrichtung (kf/BK)</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ , $f_{c,0}$ & $t_p$
[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	◆	Eiche/Robinie/Fichte/Kiefer/Edelkastanie (NH, kf), 1271 Stk. <i>Woodpecker Wood Test Hammer (11 Joule), Eindringtiefmessung und Rohdichteermittlung</i>	Regressionsbeziehungen zw. $\rho$ & $t_p$
[Llana/et al., 2020]	◇/◆	k. A. (Literaturstudie)	Methode sehr gut für Holzbauteile in situ geeignet; Quantifizierung des Einflusses der Holzfeuchte
◇ ... grundlegende Informationen; ◆ ... detaillierte Informationen; NH ... Neuholz; AH ... Altholz; B ... Prüfkörper in Bauteildimension; kf ... klein-fehlerfreie Prüfkörper; k. A. ... keine Angaben			

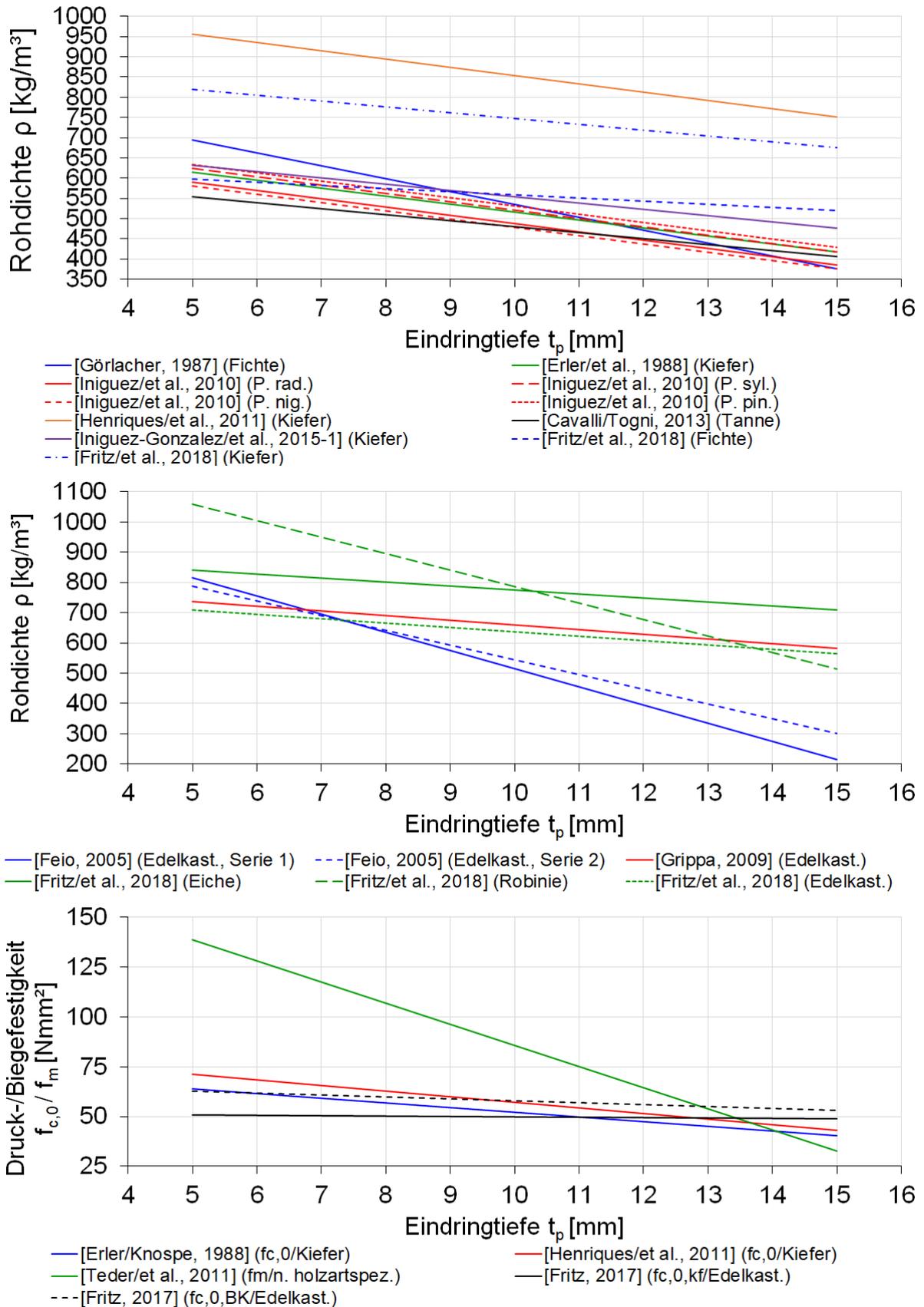


Abbildung 39: Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe eines Stahlstifts und den Materialkennwerten von Holzbauteilen – oben: Rohdichte (Nadelholz); Mitte: Rohdichte (Laubholz); unten: Druck-/Biegefestigkeit (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 3)

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die Eindringtiefmessung sehr gut geeignet ist, um die Rohdichte von Holzbauteilen zu ermitteln. Die Beziehung zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte weist mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (-0,465 \dots -0,910)$  eine überwiegend mittlere bis starke Ausprägung auf (vgl. Tabelle A. 3). Vereinzelt Angaben von Korrelationskoeffizienten mit schwacher Ausprägung (d. h.  $r = (-0,25 \dots -0,32)$ , s. [Erlor/Knospe, 1989]) stellen die Ausnahme dar und können anhand der verfügbaren Literaturangaben nicht nachvollzogen werden.

Die Beziehung zwischen der Eindringtiefe und den Festigkeitseigenschaften weist mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (-0,346 \dots -0,782)$  zur Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung und  $r = (-0,588 \dots -0,697)$  zur Biegefestigkeit ebenfalls eine mittlere bis starke Ausprägung auf (vgl. Tabelle A. 3). Hierzu liegen jedoch nur vereinzelt Untersuchungen vergleichsweise geringen Umfangs vor.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die enge Beziehung zwischen der Eindringtiefe und der Festigkeit von Holzbauteilen nicht aus einem direkten Zusammenhang, sondern eher aus der engen Beziehung zwischen der Rohdichte und der Festigkeit resultiert. Eine uneingeschränkte Eignung der Eindringtiefmessung zur Ermittlung von Festigkeitseigenschaften lässt sich daraus nicht ableiten.

### Prüfmethodik & Einflussfaktoren

Die Eindringtiefmessung beruht auf dem Zusammenhang zwischen der Tiefe eines mit einer definierten Schlagenergie eingetriebenen Stahlstiftes und den Materialkennwerten des Holzes. Zwar verwenden die am Markt verfügbaren Prüfgeräte grundlegend dieselbe Methodik, sie unterscheiden sich doch in der Aufbringung der Schlagenergie. Die wesentlichen Unterschiede liegen sowohl im Betrag des Schlagimpulses als auch in der Anzahl der Schläge je Messung.

Der überwiegende Teil der bisherigen Untersuchungen wurde mit Messgeräten der Firma Proceq SA (Zürich/Schweiz) durchgeführt (s. Abbildung 40). Das Prüfgerät „Pilodyn 6J / 6J Forester“ besitzt eine Schlagenergie von  $E_{\text{kin}} = 6$  Joule, welche durch Federspannung aufgebracht und mit einem Schlag auf den Stahlstift übertragen wird. Die Spannfeder wird mit Hilfe eines speziellen Stabes vor jeder Messung per Hand gespannt. Der Stahlstift ist stumpf, besitzt einen Durchmesser von  $\varnothing 2,5$  mm und ist dabei fest im Prüfgerät montiert. Die maximale Eindringtiefe des Stahlstiftes beträgt  $t_{p,\text{max}} = 40$  mm und wird direkt am Prüfgerät mit Hilfe einer analogen Skala abgelesen.

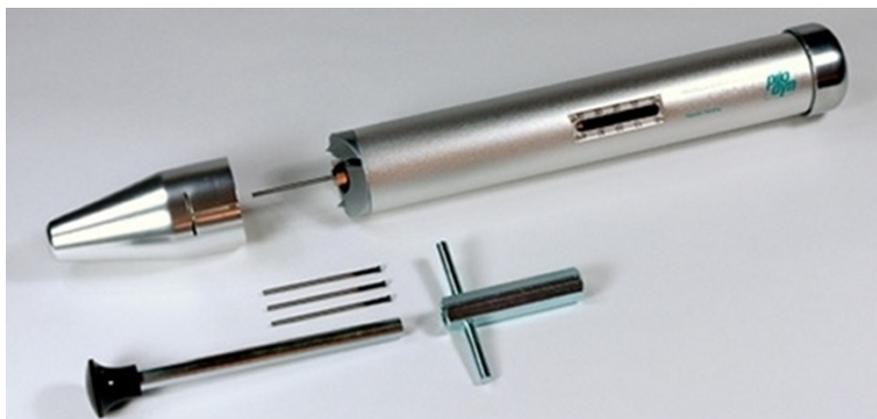


Abbildung 40: Prüfgerät zur Eindringtiefmessung – Pilodyn 6J (Bildquelle: [www.istemi.it](http://www.istemi.it))

Ein weiteres Prüfgerät für die Eindringtiefmessung ist der sogenannte „*Woodpecker Wood Test Hammer*“ der Firma DCR Italia (Ancona/Italien, s. Abbildung 41). Bei diesem Prüfgerät handelt es sich um eine Weiterentwicklung eines Rückprallhammers, wie er für die zerstörungsfreie Prüfung von Beton verwendet wird. Die Weiterentwicklung besteht darin, dass der Schlagbolzen zur Aufnahme eines Stahlstiftes ( $\varnothing 2,5 \text{ mm}$ ,  $l = 50 \text{ mm}$ ,  $t_{p,\max} = 40 \text{ mm}$ ) überarbeitet wurde. Im Gegensatz zum Prüfgerät „*Pilodyn 6 J / 6 J Forester*“ wird der Stahlstift nach Herstellerangaben mit insgesamt fünf Schlägen in die Holzoberfläche eingetrieben. Die Schlagenergie beträgt  $E_{\text{kin}} = 2,207 \text{ Joule}$  je Schlag und insgesamt  $E_{\text{kin}} = 11,035 \approx 11 \text{ Joule}$ . Weitere Unterschiede zum Prüfgerät „*Pilodyn 6 J / 6 J Forester*“ sind die Verwendung spitzer Stahlstifte ( $\alpha = 35^\circ$ ), das Aufbringen der Federspannung (der Spannvorgang ist in den Messvorgang integriert) sowie die Messung der Eindringtiefe. Letztere wird nicht an einer eingebauten Messskala, sondern mit Hilfe einer Messuhr oder eines Messschiebers gemessen. Da die Stahlstifte nicht fest mit dem Prüfgerät verbaut sind, müssen diese nach der Messung aus der Holzoberfläche gezogen werden.



**Abbildung 41: Prüfgerät zur Eindringtiefmessung – Woodpecker Wood Test Hammer (Fa. DRC Italia, Ancona/Italien, Bildquelle: [Rug/Linke, 2017])**

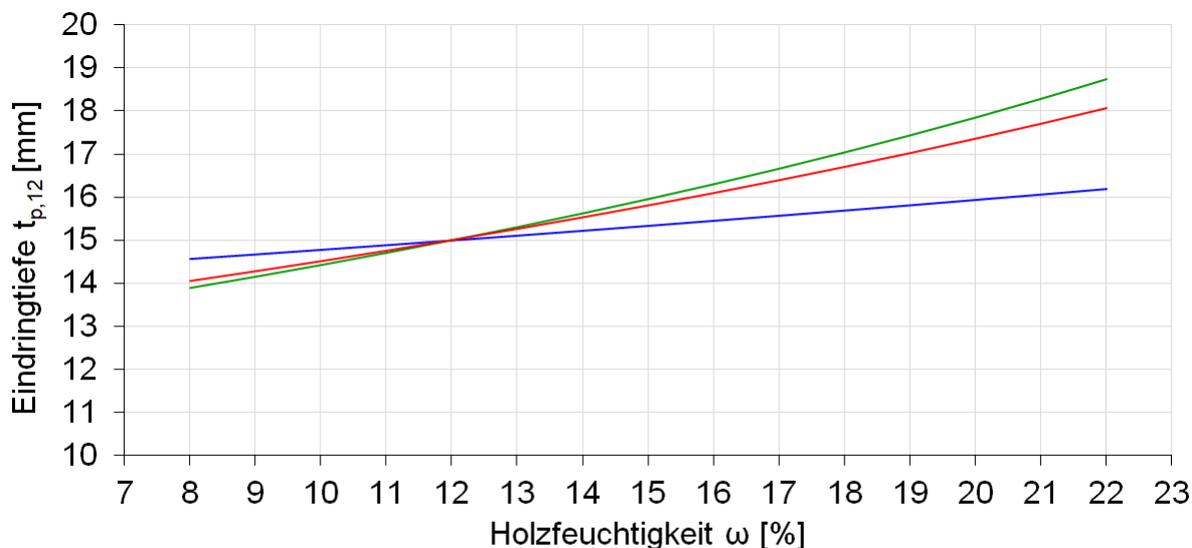
Neben den oben beschriebenen Prüfgeräten sind vereinzelt alternative Geräte für die Eindringtiefmessung praktisch und theoretisch untersucht worden (s. bspw. [Descamps/et al., 2005], [Fritz, 2019-1]). Dabei wurden handelsübliche Geräte zum Eintreiben von Stahlstiften (Nagler, Bolzensetzgeräte) sowie verschiedene Wirkprinzipien (elektrischer/pneumatischer Antrieb, Gasdruckladungen) berücksichtigt. Die Aufbringung der Schlagenergie durch Federspannung erwies sich jedoch als bester Methode, da diese die Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Funktionalität und Wirtschaftlichkeit erfüllt (vgl. [Fritz, 2019-1]).

Unabhängig von der Arbeitsweise des verwendeten Prüfgerätes werden die Ergebnisse der Eindringtiefmessung maßgeblich durch die aufgebrachte Schlagenergie beeinflusst. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen sind daher nur bedingt miteinander vergleichbar.

Die Rohdichte des Holzes und damit die messbare Eindringtiefe der Stahlstifte wird durch die Holzfeuchtigkeit beeinflusst. Grundlegende Untersuchungen hierzu sind in [Görlacher, 1987], [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-2] und [Llana/et al., 2015] zu finden (s. Abbildung 42).

Die Abbildung 42 zeigt, dass die Eindringtiefe proportional zur Holzfeuchtigkeit ansteigt. Dies widerspricht augenscheinlich dem Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Eindringtiefe. Der Theorie folgend, dass die messbare Rohdichte mit steigender Holzfeuchtigkeit zunimmt, müsste die Eindringtiefe mit zunehmender Holzfeuchtigkeit abnehmen, da ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte besteht. Gleichzeitig nimmt die Härte und Spaltfestigkeit von Holz mit zunehmender Holzfeuchtigkeit ab (s.

[Niemz/Sonderegger, 2017]), was zu einer Erhöhung der Eindringtiefe bei zunehmender Holzfeuchtigkeit führen kann. Die aus der Literatur hervorgehenden Korrekturformeln sind in den Gleichungen Gl. 13 bis Gl. 15 dargestellt.



— [Görlacher, 1987] (Fichte) — [Iniguez-Gonzales/et al., 2015-2] (Kiefer) — [Llana/et al., 2015] (Kiefer)

**Abbildung 42: Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Eindringtiefe bei Nadelholz (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle 20)**

Nach [Görlacher, 1987] für Fichtenholz:

$$t_{p,12} = t_{p,\omega} \cdot \left[ 1 - (0,0073 \cdot (\omega - 12)) \right] \quad \text{Gl. 13}$$

Nach [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-2] für Kiefernholz:

$$t_{p,12} = t_{p,\omega} / \left[ 1 - (0,02 \cdot (\omega - 12)) \right] \quad \text{Gl. 14}$$

Nach [Llana/et al., 2015] für Kiefernholz:

$$t_{p,12} = t_{p,\omega} / \left[ 1 - (0,017 \cdot (\omega - 12)) \right] \quad \text{Gl. 15}$$

mit:  $t_{p,12}$  ... Eindringtiefe bei  $\omega = 12$  %;  $t_{p,\omega}$  ... Eindringtiefe bei  $\omega \neq 12$  %;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Weitere Einflussfaktoren sind beispielsweise der Winkel zwischen der Einschlagrichtung und dem Jahrringverlauf sowie die Anzahl der Messungen je Messbereich.

Hinsichtlich des Einflusses des Winkels zwischen Einschlagrichtung und dem Jahrringverlauf ist kein signifikanter Einfluss festgestellt worden (s. [Görlacher, 1987], [Descamps/et al., 2005], [Thaler/et al., 2012]). Die Messungen sollten aber möglichst in radialer Richtung erfolgen, um die Jahrringstruktur erfassen zu können (vgl. [Görlacher, 1987]).

Bezüglich der Anzahl der Messungen je Messbereich ist in [Görlacher, 1987] eine Abnahme des Korrelationskoeffizienten bei Verringerung der Messungen festgestellt worden. Gleichzeitig zeigt sich eine deutliche Differenz zur den rechnerischen Rohdichten (s. Abbildung 43).

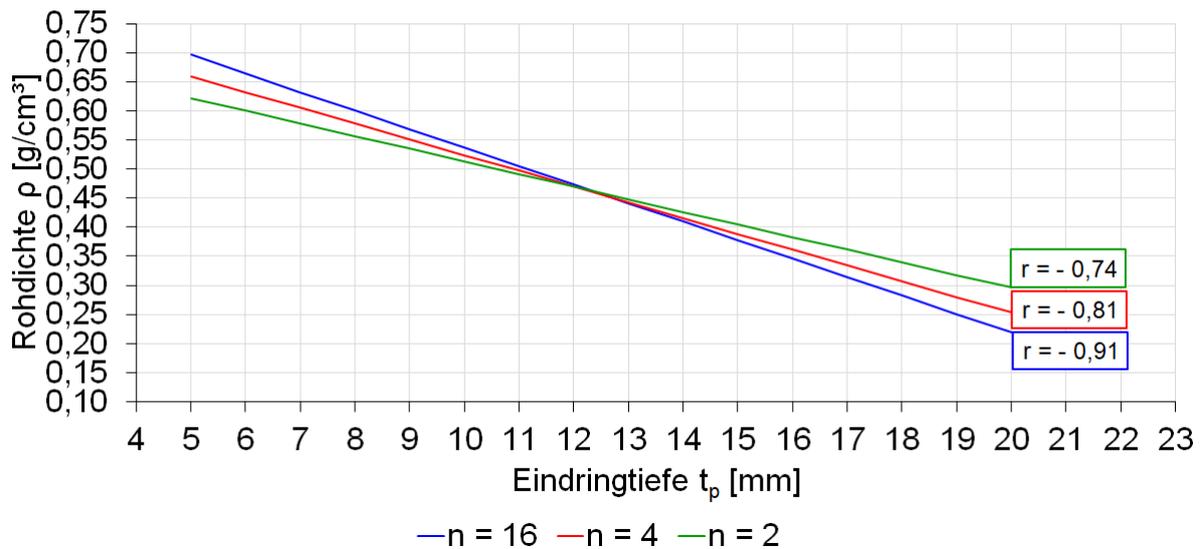


Abbildung 43: Einfluss der Anzahl der Messungen je Messbereich (nach [Görlacher, 1987])

### 4.3.3. Zusammenfassung

Die Eindringtiefmessung ist für die zerstörungsfreie Ermittlung der Rohdichte sehr gut geeignet. Die starke Ausprägung der Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte ermöglicht eine zuverlässige Bewertung sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht. Trotz der lokal begrenzten Aussagefähigkeit der Prüfmethode – insbesondere bezogen auf die Querschnittstiefe – ist sie für eine erste Abschätzung der Rohdichte von Holzbauteilen sowie die Eingrenzung von Strukturstörungen und Schwach-/Schadstellen geeignet. Dennoch sollte die Eindringtiefmessung nur in Kombination mit weiteren zerstörungsfreien/ -armen Prüfmethoden eingesetzt werden.

Auf eine Ermittlung von Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten mit Hilfe der Eindringtiefmessung sollte jedoch verzichtet werden, da die in der Literatur verfügbaren Korrelations- und Regressionsbeziehungen auf geringen Probenumfängen beruhen. Des Weiteren sind die Aussagen der Eindringtiefmessung lokal begrenzt.

Generell ist bei der Anwendung der Eindringtiefmessung auf mehrere Rahmenbedingungen zu achten. Um verwendbare Messergebnisse zu erhalten, ist auf ein möglichst einheitliches Eintreiben der Stahlstifte zu achten. Da sich die am Markt verfügbaren Prüfgeräte sowohl in der aufbrachten Schlagenergie als auch in der Geometrie des Stahlstiftes unterscheiden, sind die in der Literatur angegebenen Regressionsbeziehungen nicht uneingeschränkt übertragbar. Daher ist eine geräte- und holzartspezifische Kalibrierung über entsprechende Regressionsbeziehungen erforderlich.

Hinsichtlich des Einflusses der Holzfeuchtigkeit auf die Eindringtiefe herrscht in der verfügbaren Literatur Uneinigkeit. Hierzu sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich. Generell ist von einem geringen Einfluss der Holzfeuchtigkeit auszugehen. Die sich aus der Literatur ergebenden Korrekturfaktoren liegen im Bereich von (0,7...2,2) % je %-Punkt Holzfeuchteänderung. Die hieraus resultierenden Differenzen liegen bei in bestehenden Konstruktionen üblichen Holzfeuchteänderungen im Bereich von (0,5...1,5) mm. Die daraus resultierenden Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Rohdichte lägen dann im Bereich der zu erwartenden natürlichen Streuungen sowie der zu erwartenden Unebenheiten der Bauteiloberfläche.

## **5. Untersuchungen zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode für die in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen**

### **5.1. Präzisierung der Aufgabenstellung**

Die Ermittlung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen über eine rein visuelle Sortierung und Begutachtung ist nicht hinreichend genau, um zuverlässige quantitative Aussagen zu treffen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die visuell erfass- und messbaren Sortiermerkmale weisen hierfür eine zu geringe Korrelation zu den tatsächlichen Materialeigenschaften auf (vgl. Abschnitt 2.2, Tabelle 4). Eine verlässliche quantitative Aussage ist nur durch Einsatz zerstörungsfreier und -armer Mess- und Prüfmethode möglich (vgl. Tabelle 5). Die alleinige Anwendung derartiger Methode ist wiederum auch nicht ausreichend für eine genaue und zuverlässige Erfassung und Bewertung der Materialqualität (vgl. Abschnitt 2.2.3, s. a. [Blaß/Frese, 2002] & [Blaß/Frese, 2004]). Der Grund hierfür ist, dass nicht sämtliche festigkeits- und tragfähigkeitsmindernde Wuchsmerkmale durch zerstörungsfreie und -arme Mess- und Prüfmethode erfasst werden können (bspw. Erfassung von Fehlstellen und Ästen durch die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung, vgl. Abschnitt 4.1).

Die Defizite beider Ansätze können durch den kombinierten Einsatz der visuellen Sortierung/Begutachtung und zerstörungsfreier/-armer Mess- und Prüfmethode beseitigt werden. Bisherige Untersuchungen zeigten, dass hierdurch eine wesentliche Verbesserung der Zuverlässigkeit der Aussage erreicht werden kann (vgl. Abschnitte 2.2.3 und 2.3).

Für den kombinierten Einsatz mehrerer Mess- und Prüfmethode für die in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist eine Methodik zur zusammenfassenden Bewertung der Ergebnisse der Einzelmethode erforderlich. Für die maschinelle Festigkeitssortierung von neuem Bauholz sind derartige kombinierte Methode bereits Stand der Technik (vgl. Abschnitt 2.3). Für die visuelle Sortierung von neuem Bauholz sind erste Ansätze in Form der apparativ unterstützten visuellen Sortierung normativ geregelt (s. [DIN 4074-1:2012], [DIN 4074-5:2008]). Hinsichtlich der Erfassung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen existieren hierzu noch keine allgemeingültigen oder normativen Regelungen. Eine uneingeschränkte Anwendung bzw. Übertragung der für neues Bauholz entwickelten Methode ist dabei nicht möglich (vgl. Abschnitt 3.2).

Zur Entwicklung einer Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen sind systematische Untersuchungen erforderlich. Insbesondere die genaue Bewertung der Leistungsfähigkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der zum Einsatz kommenden Mess- und Prüfmethode ist notwendig. Des Weiteren müssen die statistischen Zusammenhänge zwischen den zerstörungsfrei/-arm ermittelten Messgrößen und den tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten quantifiziert werden.

Um eine größtmögliche Konformität mit den bauaufsichtlich eingeführten Normen für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz zu erreichen, müssen weitere Anforderungen erfüllt werden. Bezogen auf eine apparativ unterstützte visuelle in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen gelten analog die in [DIN 4074-3:2008], Abschnitt 3 aufgeführten Anforderungen an die apparativ unterstützte Festigkeitssortierung von neuem Bauholz. Im Wesentlichen handelt es sich um folgende Festlegungen:

- 1) Die Holzbauteile dürfen durch die Mess- und Prüfmethode nicht beschädigt werden.
- 2) Der Einfluss der wesentlichen Faktoren (Holzart, Querschnittsabmessungen, Oberflächenbeschaffenheit, Holzfeuchtigkeit/-temperatur, usw.) auf die Messwerte muss nachgewiesen werden.
- 3) Die Methodik muss festgelegte Grenzwerte für die Sortiergrößen verwenden.
- 4) Die Wiederholgenauigkeit der Mess- und Prüfmethode darf bei fünfmaliger Wiederholung nicht mehr als 5 % betragen.
- 5) Die Kalibrierung der verwendeten Apparaturen muss festgelegt werden (Verfahren, Umfang und Häufigkeit)

Aus den aufgeführten Anforderungen leiten sich folgende Untersuchungsschwerpunkte ab:

- 1) Quantifizierung der methodenspezifischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie Offenlegung von potenziellen Fehlerquellen
- 2) Entwicklung statistisch abgesicherter Modelle zur Auswertung von Ergebnissen aus zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode
- 3) Festlegung von Rahmenbedingungen für die zuverlässige Anwendung von zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode

Diese Schwerpunkte wurden in eigenen, systematischen Materialuntersuchungen an der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik, Eberswalde analysiert. Gegenstand waren dabei Proben in Bauteildimension aus Fichten-, Kiefern- und Eichenholz (Herkunft: MNO-Europa). Als zerstörungsfreie und -arme Mess- und Prüfmethode kamen die visuelle Sortierung nach DIN EN 14081-1 und DIN 4074-1/-5, die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung sowie die Rohdichtebestimmung an Bohrkernen und mit Hilfe der Eindringwiderstandsmessung zum Einsatz. Diese Prüfmethode haben sich in der praktischen Anwendung als einfach handhabbar und praktisch geeignet für die Ermittlung der Materialeigenschaften von Holzbauteilen im eingebauten Zustand erwiesen. Abschließend wurden zerstörende Biegeversuche nach DIN EN 408 durchgeführt.

Um die Anwendbarkeit der untersuchten zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode bewerten zu können, wurden die Materialuntersuchungen in mehrere Teiluntersuchungen untergliedert. Bezüglich der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung lagen die Schwerpunkte auf den Beziehungen zwischen den zerstörungsfrei messbaren Kennwerten und den Ergebnissen der Biegeversuche nach DIN EN 408 sowie der Wiederholgenauigkeit der Messmethode. Für die Anwendbarkeit von Bohrkernproben und der Eindringtiefmessung für die zerstörungsfreie Ermittlung der Rohdichte waren die Beziehungen zur Rohdichte von Normproben nach DIN EN 408 sowie die Festlegung der erforderlichen Probenanzahl bzw. Anzahl der Messungen je Bauteil von Interesse.

Die Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Messergebnisse der zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode war nicht Gegenstand der eigenen Materialuntersuchungen. Die wesentlichen Faktoren sind bereits in vorangegangenen Untersuchungen ausführlich betrachtet worden (vgl. Kapitel 4). Aus Kapazitätsgründen wurde daher auf diesbezügliche Materialversuche verzichtet und auf Angaben der einschlägigen Literatur zurückgegriffen. Etwaige weiterhin erforderliche Untersuchungen zu einzelnen Einflussfaktoren werden in Kapitel 8 aufgeführt und näher erläutert.

Auf Grundlage der in den vergleichenden Materialuntersuchungen gewonnenen Ergebnisse soll eine Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen entwickelt werden (s. dazu Kapitel 6). Die Überprüfung der Untersuchungsergebnisse und Erprobung der Methodik erfolgt im Weiteren durch Fallstudien an Probenmaterial aus bestehenden Konstruktionen im Labor sowie im Rahmen von Bauzustandsuntersuchungen in situ (s. Kapitel 7). Der Ablauf der systematischen Untersuchungen ist in Abbildung 44 schematisch dargestellt.

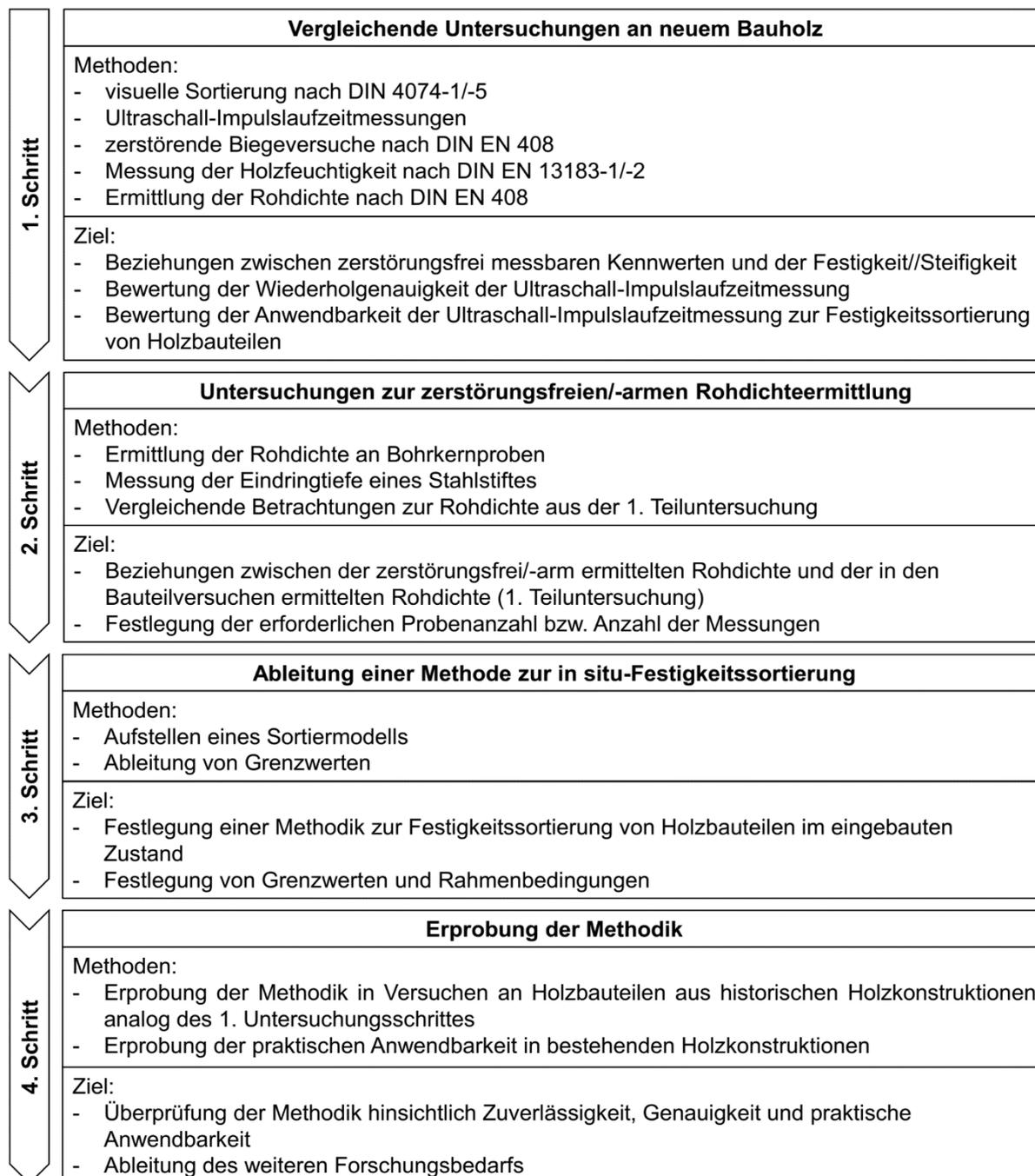


Abbildung 44: Schematischer Ablauf der systematischen Untersuchungen

## **5.2. Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall-Impuls- laufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz**

### **5.2.1. Gegenstand und Ziel der Untersuchungen**

Die grundlegenden Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen wurden an Prüfkörpern in Bauteildimension aus neuem Bauholz durchgeführt. Gegenstand der Untersuchungen waren dabei die Holzarten Fichte (*Picea abies*, Herkunft: MNO-Europa, 303 Stück), Kiefer (*Pinus sylvestris*, Herkunft: NO-Deutschland, 300 Stück) und Eiche (*Quercus robur/petraea*, Herkunft: NO-Deutschland, 301 Stück).

Die Prüfkörper wiesen Abmessungen von  $b/h/l = (50/80/1520)$  mm auf. Der für Kantholz vergleichsweise geringe Querschnitt wurde gewählt, da so davon ausgegangen werden kann, dass bei kleineren Querschnitten der Einfluss der vorhandenen Wuchsmerkmale auf die Tragfähigkeit stärker zum Tragen kommt als bei größeren Querschnitten. Hierdurch kann die Eignung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zur zerstörungsfreien Ermittlung der Tragfähigkeit – insbesondere die Erfassung von tragfähigkeitsmindernden Einflüssen – besser bewertet werden. Das Ziel der Untersuchungen ist die qualitative und quantitative Bewertung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen im eingebauten Zustand.

### **5.2.2. Versuchsaufbau und -durchführung**

Die vergleichenden Materialuntersuchungen gliederten sich in folgende Teiluntersuchungen:

- Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
- Ermittlung der Rohdichte, der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in 4-Punkt-Biegeversuchen nach DIN EN 408:2012, Abschnitte 7, 10 und 19

Die Durchführung der nachfolgend dargestellten Materialversuche erfolgte an der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (UG), Eberswalde (s. [Linke/Mühlisch, 2018], [Linke/Mühlisch, 2019-1] und [Linke/Mühlisch, 2019-2]) im Rahmen einer studentischen Forschungsarbeit an der HNEE Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde (s. [Mühlisch, 2019]).

#### **Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 und DIN 4074-5**

Die visuelle Sortierung des untersuchten Probenmaterials erfolgte auf Grundlage der Festlegungen der DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008. Entsprechend der dort angegebenen geometrischen Grenzwerte für die Einteilung von Schnittholz handelt es sich bei dem gewählten Prüfkörperquerschnitt um Kantholz (vgl. Tabelle 21).

**Tabelle 21: Prüfkörper-Querschnitt im Vergleich zur Schnittholzeinteilung nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 (dort jeweils Tabelle 1)**

Schnittholzart nach DIN 4074-1/-5	Dicke d bzw. Höhe h	Breite b
Latten aus Nadelholz	$d \leq 40 \text{ mm}$	$b < 80 \text{ mm}$
Bretter aus Nadel-/Laubholz <sup>1)</sup>	$d \leq 40 \text{ mm}$ <sup>2)</sup>	$b \geq 80 \text{ mm}$
Bohlen aus Nadel-/Laubholz <sup>1)</sup>	$d > 40 \text{ mm}$	$b > 3 d$
Kantholz aus Nadel-/Laubholz	$b \leq h \leq 3 b$	$b > 40 \text{ mm}$
Prüfkörper	$b = 50 \text{ mm} < h = 80 \text{ mm}$ $h = 80 \text{ mm} < 3 b = 150 \text{ mm}$	$b = 50 \text{ mm} > 40 \text{ mm}$
<sup>1)</sup> Vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sind wie Kantholz zu sortieren und entsprechend zu kennzeichnen (s. DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008, jeweils Abschnitt 4)		
<sup>2)</sup> Dieser Grenzwert gilt nicht für Bretter für Brettschichtholz		

Nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5 müssen bei der Sortierung von Kantholz nachfolgend aufgelistete Sortierkriterien erfasst werden:

- 1) Äste (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.1)
- 2) Faserneigung (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.2)
- 3) Markröhre (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.3)
- 4) Jahrringbreite (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.4)
- 5) Risse (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.5)
- 6) Baumkante (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.6)
- 7) Krümmung (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.7)
- 8) Verfärbungen, Fäule (DIN 4074-1:2012/DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.8)
- 9) Druckholz (DIN 4074-1:2012, Abschnitt 5.9)
- 10) Insektenfraß durch Frischholzinsekten (DIN 4074-1:2012, Abschnitt 5.10 & DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.9)
- 11) Sonstige Merkmale (DIN 4074-1:2012, Abschnitt 5.11 & DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.10)
- 12) Holzfeuchte (DIN 4074-1:2012, Abschnitt 5.12 & DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.11)

Weitere Eigenschaften der Prüfkörper, welche jedoch nicht unter die oben aufgeführten Sortiermerkmale fallen (bspw. kleinere Fehlflächen, Beschädigungen) wurden ebenfalls protokolliert, jedoch bei der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 nicht weiter berücksichtigt. Zusätzlich erfolgte die Messung der Holzfeuchtigkeit nach DIN EN 13183-2:2002 (Schätzung der Holzfeuchtigkeit mittels elektrischer Widerstandsmessung) und des Umgebungsklimas. Hierfür wurden die Messgeräte „Hydromette ® 85T“ der Fa. GANN (Holzfeuchtemessung, mit isolierten Elektrodenstippen, Messtiefe  $t \approx 15 \text{ mm}$ ) und „Hydromette BlueLine Compact TF 2“ der Fa. GANN (Klimamessung) verwendet.

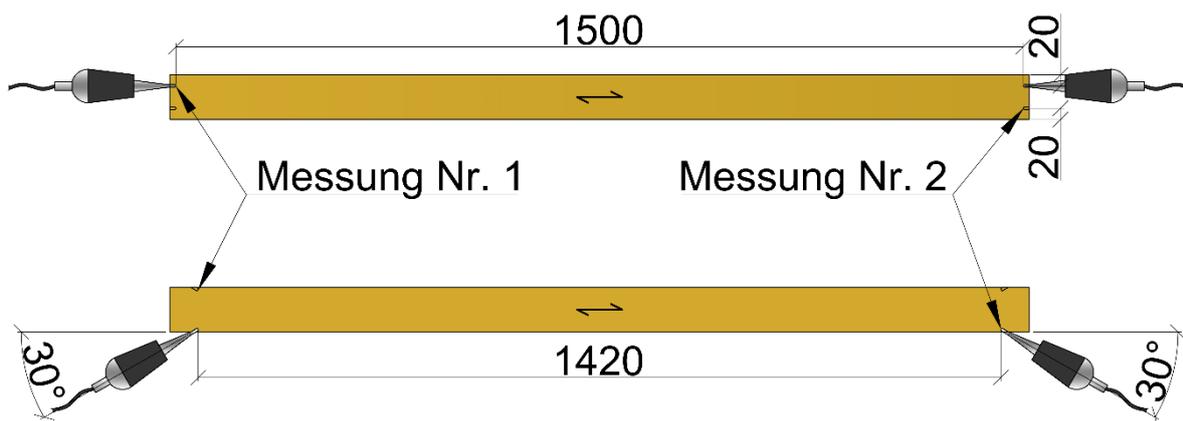
## Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen

Im Anschluss an die visuelle Sortierung wurden Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen an den einzelnen Prüfkörpern vorgenommen. Zur Durchführung der Messungen wurde das Messgerät „Sylvatest Trio“ der Fa. CBT CBS (Lausanne, CH) mit konischen Sende-/Empfängersonden verwendet. Die Messungen erfolgten als direkte (Ankopplung an den Hirnholzenden parallel zur Längsachse, s. Abbildung 45 oben) und indirekte Längsdurchschallung (Ankopplung an der Ober-/Unterseite im Winkel von  $\alpha \approx 30^\circ$  zur Längsachse, s. Abbildung 45 unten).



**Abbildung 45: Durchführung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen – oben: direkte Längsdurchschallung; unten: indirekte Längsdurchschallung (Bildquelle: Linke, 2019)**

Je Prüfkörper wurden insgesamt vier Messungen vorgenommen – jeweils zwei direkte und zwei indirekte Messungen (s. Abbildung 46). Die direkten Messungen erfolgten an den oberen und unteren Viertels-Punkten der Querschnittshöhe. Die indirekten Messungen wurden jeweils an der Ober- und Unterseite mit einem Abstand von  $a = 30$  mm zum Hirnholzende durchgeführt. Bezogen auf die Querschnittsbreite befanden sich die Messstellen jeweils in Querschnittsmitte.



**Abbildung 46: Messprinzip der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (eigene Darstellung) – oben: direkte Längsdurchschallung; unten: indirekte Längsdurchschallung**

Die Festlegung des Messprinzips – d.h. der Lage der Messstellen – erfolgte in Anlehnung an die Untersuchungen von STEIGER zur Sortierung von Schweizer Fichtenholz mittels Ultraschalls. Zur Untersuchung von auf Biegung beanspruchten Bauteilen mit gedrunenem Rechteck-Querschnitten sind zwei Messstellen – jeweils eine in den hochbeanspruchten Randbereichen – ausreichend (s. [Steiger, 1997-1]). Dabei sollen Beziehungen zur Festigkeit mit der

geringeren gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit aufgestellt werden. Für Beziehungen zum Elastizitätsmodul sollte der Mittelwert der beiden Messungen verwendet werden.

Das verwendete Messgerät „Sylvatest Trio“ arbeitet mit einer Messfrequenz von  $f = 22 \text{ kHz}$  und führt eigenständig an jeder Messstelle mehrfache Messungen aus. Es werden vier einzelne Schallimpulse zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Prüfkörper ausgesandt. Die sich dabei ergebenden Messwerte werden sowohl in Form der mittleren Schalllaufzeit  $t_{\text{Schall}}$  als auch als Mittelwert der Schallgeschwindigkeit  $v_{\text{Schall}}$  angegeben. Zusätzlich dazu werden vier weitere Schallimpulse zur Messung der übertragenen elektrischen Spannung  $U_{\text{peak}}$  ausgesandt, welche als Referenzwert für die Signaldämpfung herangezogen wird. Bei dem vom Messgerät angezeigten Messwert handelt es sich ebenfalls um den Mittelwert der vier Einzelmessungen.

Versuchsbegleitend erfolgte die Messung der Holzfeuchtigkeit und des Umgebungsklimas analog der visuellen Sortierung. Anhand der Ergebnisse dieser begleitenden Messungen wurde die gemessene Schallausbreitungsgeschwindigkeit auf eine Holzfeuchtigkeit von  $\omega_{\text{ref}} = 12 \%$  und eine Temperatur von  $\vartheta_{\text{ref}} = 20 \text{ °C}$  mit Hilfe der in der Fachliteratur angegebenen Gleichungen angepasst (s. Gl. 4 und Gl. 6 in Abschnitt 4.1.3, vgl. [Sandoz, 1993]).

### **Zerstörende Materialuntersuchungen nach DIN EN 408**

Zur Ableitung von Beziehungen zwischen den zerstörungsfrei über die visuelle Sortierung und die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung messbaren Kennwerten und den tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten wurden an den Prüfkörpern zerstörende Materialversuche durchgeführt. Diese erfolgten nach DIN EN 408:2012, Abschnitt 10 (Ermittlung des globalen Biege-Elastizitätsmoduls) und Abschnitt 19 (Ermittlung der Biegefestigkeit).

Bei dem dort beschriebenen Versuch handelt es sich um einen Vier-Punkt-Biegeversuch an Prüfkörpern in Bauteildimensionen. Die Prüfkörper werden auf zwei Punkten an der Unterseite aufgelagert. Die Beanspruchung erfolgt an zwei Punkten auf deren Oberseite. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass der mittlere Bereich ( $a_1$ ) ausschließlich einer Biegemomenten-Beanspruchung unterliegt und Querkräfte nur im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten ( $a_2$ ) und den Auflagern auftreten (s. Abbildung 47).

Der Abstand zwischen den Auflagern ( $l$ ) ist nach DIN EN 408:2012, Abschnitt 10.2 und 19.2 als das (15 ... 21)-fache der Querschnittshöhe definiert. Der Abstand zwischen den Lasteinleitungsstellen ( $a_1$ ) muss dem 6-fachen der Querschnittshöhe entsprechen. Die Durchbiegung muss in der Feldmitte gemessen werden – entweder in der äußeren Druck-/Zugfaser oder in der neutralen Faser auf beiden Seiten des Prüfkörpers. Die Aufbringung der Prüflast muss mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit erfolgen, sodass ein Bruch innerhalb von  $t = (300 \pm 120) \text{ s}$  eintritt. Um die normkonforme Ermittlung des globalen Biege-Elastizitätsmoduls zu gewährleisten, darf die Vorschubgeschwindigkeit jedoch nicht größer sein als  $v = 0,003 \text{ h [m/s]}$ . Entsprechend der Festlegungen der DIN EN 408:2012 wurden die Prüfkörper als Biegeträger auf zwei, gelenkig Auflagerböcken aufgelagert. Der Auflagerabstand ergab sich zu  $l_a = 18h = 1440 \text{ mm}$  (s. Abbildung 48).

Um einem seitlichen Ausweichen der Prüfkörper sowie dem Biegedrillknicken entgegenzuwirken, sind die Auflagerböcke mit Gabellagern versehen worden (s. Abbildung 49). Zur Verteilung der Prüflast auf die zwei Lasteinleitungspunkt kam eine Stahltraverse und stählerne Halbrund-Profile zum Einsatz.

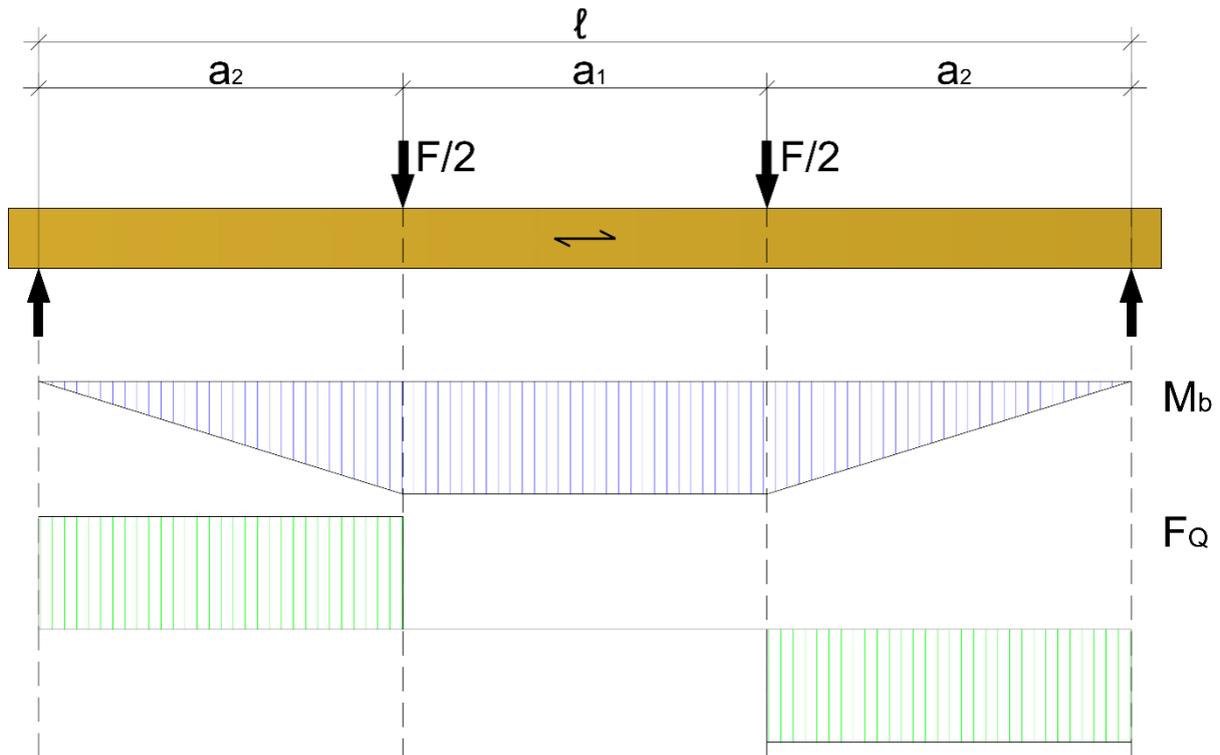


Abbildung 47: Vier-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN 408:2012 mit entsprechendem Biegemoment-/Querkraftverlauf (eigene Darstellung)

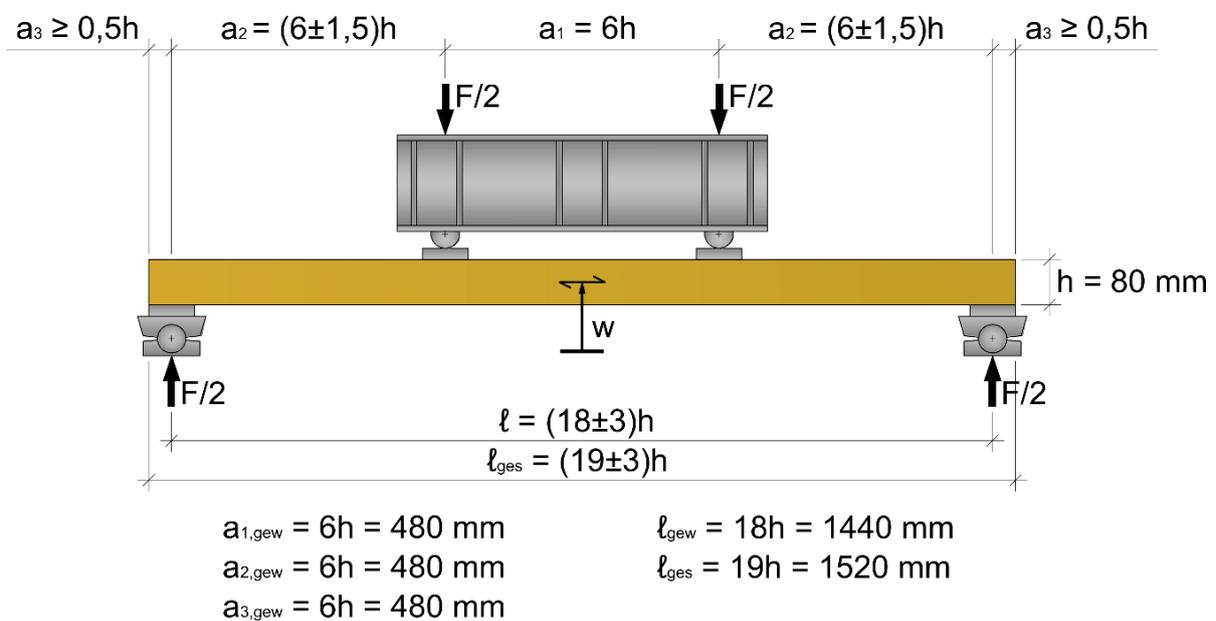
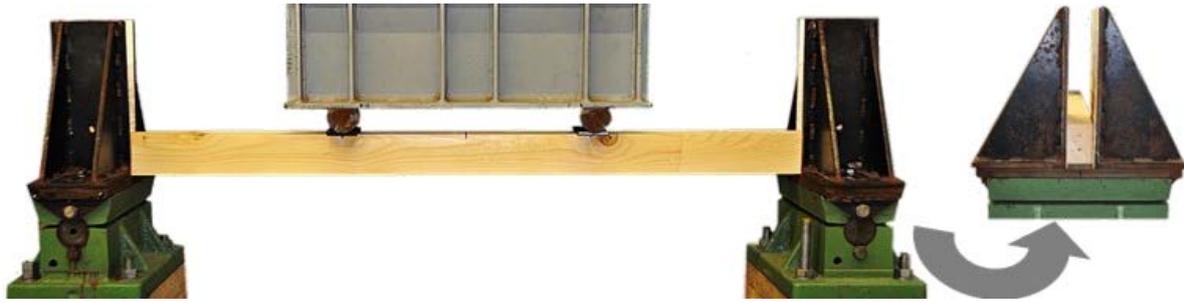


Abbildung 48: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche (eigene Darstellung)



**Abbildung 49: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche – Auflagerung und Kippsicherung durch Gabellager (Bildquelle: [Linke/Mühlisch, 2018])**

Die Prüflast wurde mittels eines hydraulischen Druckzylinders aufgebracht (maximale Prüflast  $F_{\max} = 500 \text{ kN}$ ). Die Prüfgeschwindigkeit betrug  $v_{\text{Prüf}} = (0,10 \dots 0,25) \text{ mm/s}$ , was einem Verhältnis von  $(0,001 \dots 0,003) \text{ h}$  entsprach. Sie wurde während der Versuchsdurchführung so eingestellt bzw. angepasst, dass ein Bruch innerhalb von  $t = (300 \pm 120) \text{ s}$  eintrat. Der Bruch definierte sich als Abfall der maximal erreichten Prüflast um mindestens 50 %.

Die Durchbiegung der Prüfkörper wurde mittels eines externen Seilzugwegaufnehmers (Typ ASM Positionssensor WS11-2000) gemessen. Die Messungen erfolgten dabei anhand des Fahrweges des Prüfzylinders. Der gemessene Weg ist mit Hilfe von in Vorversuchen ermittelten Regressionsgleichungen angepasst worden, um etwaige Verformungen des Prüfaufbaus ausschließen zu können (s. Gl. 16 und Gl. 17). Dabei entspricht die korrigierte Durchbiegung dem Mittelwert der auf beiden Seiten des Prüfkörpers in der neutralen Faser gemessenen Durchbiegung.

$$\text{Bei } 0,1 F_{\max}: \quad w_{\text{kor}} = 0,6606 \cdot w^{0,9399} \quad \text{Gl. 16}$$

$$\text{bei } 0,4 F_{\max}: \quad w_{\text{kor}} = 0,7772 \cdot w^{1,0764} \quad \text{Gl. 17}$$

*mit: 0,1 bzw. 0,4  $F_{\max}$  ... Laststufen im elastischen Bereich bei 10 % bzw. 40 % der maximalen Prüflast;  $w_{\text{kor}}$  ... korrigierte Durchbiegung;  $w$  = gemessene Durchbiegung (hier: Fahrweg des Prüfzylinders)*

Die Biegebruchfestigkeit und der globale Elastizitätsmodul wurden entsprechend der in DIN EN 408:2012, Gleichungen (2) und (17) berechnet (s. Gl. 18 und Gl. 19). Da es sich bei den durchgeführten Biegeversuchen um Untersuchungen im Rahmen der Festigkeitssortierung handelte, ist für die Berechnungen des globalen Biege-Elastizitätsmoduls der Schubmodul  $G$  als unendlich angenommen worden (vgl. Gl. 18 und DIN EN 408:2012, Abschnitt 10.3). Dies ist möglich, da bei der Umrechnung der im Vier-Punkt-Biegeversuchen ermittelten Werte des globalen Biege-Elastizitätsmoduls zum lokalen Biege-Elastizitätsmoduls nach DIN EN 384 die anteilige Schubverformung implizit berücksichtigt (vgl. DIN EN 408:2012, Abschnitt 10.3, Anmerkung).

$$E_{m,g} = \frac{3a\ell^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad \text{Gl. 18}$$

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad \text{Gl. 19}$$

mit:  $E_{m,g}$  ... globaler Biege-Elastizitätsmodul;  $a$  ... Abstand zwischen einer Lasteinleitungsstelle und dem nächsten Auflager beim Biegeversuch;  $l$  ... Spannweite des Prüfkörpers;  $b$  ... Breite des Prüfkörpers;  $h$  ... Höhe des Prüfkörpers;  $w$  ... Durchbiegung;  $F$  ... Prüflast;  $w_2 - w_1$  ... Durchbiegungszunahme zwischen zwei Laststufen (hier: zwischen 10 % und 40 % der maximalen Prüflast im elastischen Bereich) ;  $F_2 - F_1$  ... Laststeigerung zwischen zwei Laststufen (hier: zwischen 10 % und 40 % der maximalen Prüflast im elastischen Bereich);  $G$  ... Schubmodul (hier:  $G = \infty$ )

Nach Abschluss der Biegeversuche wurde die Rohdichte der Prüfkörper entsprechend den Festlegungen der DIN EN 408:2012, Abschnitt 7 und DIN 52182:1976 ermittelt. Hierzu wurden aus den Biegeprüfkörpern jeweils acht Proben mit einem Nennmaß von  $b/h/d = (50/80/20)$  mm entnommen. Die Entnahme der Proben erfolgte dabei in unmittelbarer Nähe der Bruchstelle. Es wurde darauf geachtet, dass die Proben fehlerfrei waren und keine Äste, Harzgallen oder andere Strukturstörungen bzw. Fehlfächen enthielten. Durch Aufnahme von Masse und Volumen konnte dann die Rohdichte berechnet werden.

Zusätzlich wurde die Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bestimmt. Dies erfolgte zum einen durch Schätzung mittels elektrischer Widerstandsmessung nach DIN EN 13183-2:2002 analog der zum Zeitpunkt der visuellen Sortierung und der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung durchgeführten Messungen. Zum anderen wurde die Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1:2002 durch Trocknung der zur Rohdichtebestimmung entnommenen Proben bis zur Einstellung der Massenkonstanz in einem Trocknenofen bei  $\vartheta = (100 \pm 3)$  °C ermittelt. Aus der Massendifferenz vor und nach der Trocknung konnte dann die Holzfeuchte berechnet werden.

### 5.2.3. Ergebnisse und Auswertung

#### Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 und DIN 4074-5

Die visuelle Sortierung des Probenmaterials ergab bezogen auf die Verteilung der untersuchten Holzarten auf die Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 kein einheitliches Bild (s. a. Tabelle 22).

**Tabelle 22: Verteilung des Probenmaterials auf die Sortierklassen für Nadel- und Laubholz nach DIN 4074-1:2012 & DIN 4074-5:2008**

Sortierklasse	Fichte	Kiefer	Eiche
S 13 / LS 13 überdurchschnittliche Tragfähigkeit	32 Stk. (11 %)	34 Stk. (11 %)	56 Stk. (19 %)
S 10 / LS 10 übliche Tragfähigkeit	169 Stk. (56 %)	107 Stk. (36 %)	115 Stk. (38 %)
S 7 / LS 7 geringe Tragfähigkeit	62 Stk. (20 %)	90 Stk. (30 %)	66 Stk. (22 %)
Ausschuss keine Zuordnung möglich	40 Stk. (13 %)	69 Stk. (23 %)	64 Stk. (21 %)

Der Anteil an Prüfkörpern mit einer überdurchschnittlichen Tragfähigkeit (Sortierklassen S 13 und LS 13 nach DIN 4074-1/-5) beträgt bei dem untersuchten Fichten- & Kiefernholz jeweils  $p = 11$  %. Für das untersuchte Eichenholz ist der Anteil mit  $p = 19$  % etwa doppelt so hoch.

Bei allen drei Holzarten wurde der überwiegende Teil des Probenmaterials als Holz mit üblicher Tragfähigkeit (Sortierklassen S10 & LS 10 nach DIN 4074-1/-5) eingestuft. Aber auch hier sind deutliche Unterschiede zwischen den Holzarten festzustellen. Während der Anteil bei Fichtenholz  $p = 56\%$  beträgt, liegt er bei Kiefern- und Eichenholz bei etwa einem Drittel (Kiefer:  $p = 36\%$ ; Eiche:  $p = 38\%$ ). Der Anteil an Prüfkörpern mit geringer Tragfähigkeit (Sortierklassen S 7 & LS 7 nach DIN 4074-1/-5) entspricht bei Fichten- und Eichenholz etwa einem Fünftel (Fichte:  $p = 20\%$ ; Eiche:  $p = 22\%$ ), bei Kiefernholz etwa einem Drittel ( $p = 30\%$ ). Die übrigen Prüfkörper konnten keiner Sortierklasse nach DIN 4074-1/-5 zugeordnet werden (Ausschuss). Der genaue Anteil ist abhängig von der Holzart. Bei Fichtenholz beträgt er nur  $p = 13\%$ . Bei Kiefern- und Eichenholz entspricht der Ausschuss etwa einem Viertel des Probenumfangs (Kiefer:  $p = 23\%$ ; Eiche:  $p = 21\%$ ).

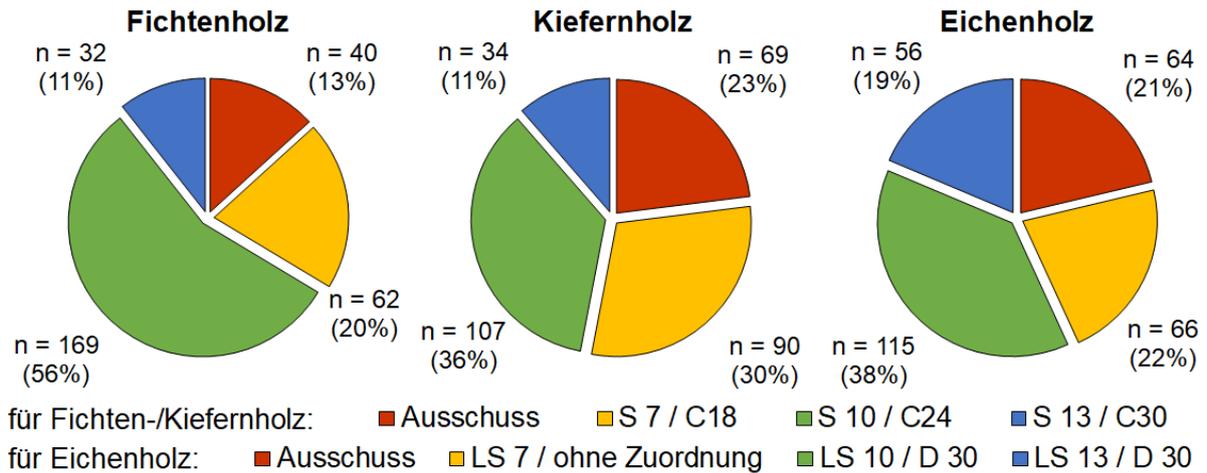
Hinsichtlich der für die Klassenzuordnung maßgebenden Sortierkriterien und Wuchsmerkmale ist ebenfalls festzustellen, dass bei Nadel- und Laubholz deutliche Unterschiede bestehen. Während bei dem untersuchten Nadelholz hauptsächlich Äste maßgeblich für die Klassenzuordnung gewesen sind, war bei den untersuchten Eichenholzproben überwiegend die Faserneigung ausschlaggebend. Eine untergeordnete Rolle spielten bei Fichtenholz die Faserneigung (vor allem Sortierklasse S7) und Risse (vor allem „Ausschuss“). Bei dem untersuchten Eichenholz waren es hingegen wuchsbedingte Fehlflächen (sog. Einwüchse<sup>10</sup>; vor allem Sortierklasse LS 7) sowie Äste und Risse (vor allem „Ausschuss“).

Ausgehend von der Verteilung des Probenmaterials auf die Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 erfolgte eine Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338. Dies soll eine bessere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der weiteren Untersuchungen ermöglichen. Grundlage hierfür bilden die in DIN EN 1912 geregelten Zuordnungen von visuell festgestellten Sortierklassen zu Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 (s. a. Tabelle 23). Die sich daraus ergebende Zuordnung ist in Abbildung 50 grafisch dargestellt.

**Tabelle 23: Zuordnung von visuell nach DIN 4074-1/-5 sortiertem Bauholz zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 (nach [DIN 1912:2013], Tabellen 1 & 2)**

Holzart	Herkunft <sup>1)</sup>	Land, das die Sortiervorschrift veröffentlicht <sup>1)</sup>	Sortierklasse	Festigkeitsklasse nach DIN EN 338
Fichte/Kiefer	MNO-Europa	DE/AT	S 13	C30
			S 10	C24
			S 7	C18
Eiche	DE	DE	LS 13	D30
			LS 10	D30
			LS 7	keine Zuordnung möglich

<sup>10</sup> Die bei Eichenholz vorhandenen Einwüchse werden nach DIN 4074-5:2008, Abschnitt 5.10 sinngemäß als Äste bewertet, da sie ebenfalls sowohl Fehlflächen darstellen als auch ein lokale Abweichung des Faserverlaufes darstellen.



**Abbildung 50: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 auf Grundlage der visuellen Sortierung**

Aus den in Abbildung 50 dargestellten Verteilungen geht hervor, dass durch die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5 lediglich etwa die Hälfte bis zwei Drittel des Probenmaterials eine übliche bis überdurchschnittliche Tragfähigkeit bescheinigt werden kann (Fichte:  $p = 67\%$ ; Kiefer:  $p = 47\%$ ; Eiche:  $p = 57\%$ ). Im Umkehrschluss wäre ein ebenso großer Anteil bautechnisch nicht (Ausschuss und Sortierklasse LS 7 nach DIN 4074-5) oder nur für geringbeanspruchte Bauteile (Sortierklasse S 7 nach DIN 4074-1 bzw. Festigkeitsklasse C 18 nach DIN EN 338) verwendbar. Dieses Ergebnis veranschaulicht die geringe Trennschärfe der visuellen Sortierung (vgl. Abschnitt 2.2.3).

### Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen sind vor der weiteren Auswertung einem Test auf Ausreißer nach GRUBBS unterzogen worden. Der Test ergab, dass insgesamt 2 Prüfkörper statistische Ausreißer darstellen (Fichte: 1 Ausreißer; Kiefer: 1 Ausreißer; Eiche: keine Ausreißer). Diese Prüfkörper wurden aus allen weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Nachdem die Messergebnisse von Ausreißern bereinigt worden sind, wurde die gemessene Schallausbreitungsgeschwindigkeit auf Referenzbedingungen von  $\omega_{ref} = 12\%$  und  $\vartheta_{ref} = 20\text{ °C}$  umgerechnet (vgl. Abschnitt 5.2.2). Eine zusammenfassende Übersicht über die Ergebnisse ist in Tabelle 24 sowie in Abbildung 53 bis Abbildung 55 dargestellt.

**Tabelle 24: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit**

	Direkte Messung		Indirekt Messung	
	VSchall,d,min	VSchall,d,mean	VSchall,i,min	VSchall,i,mean
Fichtenholz (n = 302)				
Minimum $x_{min}$ [m/s]	4628,8	4724,3	4402,8	4511,8
Mittelwert $x_{mean}$ [m/s]	5744,0	5807,2	5540,7	5660,0
Maximum $x_{max}$ [m/s]	6384,6	6438,3	6306,2	6384,3
Standardabweichung $s_x$ [m/s]	322,7	314,9	359,3	342,6
Variationskoeffizient $v_x$ [%]	5,6	5,4	6,5	6,1

Tabelle 24 (fortgesetzt)

	Direkte Messung		Indirekt Messung	
	V <sub>Schall,d,min</sub>	V <sub>Schall,d,mean</sub>	V <sub>Schall,i,min</sub>	V <sub>Schall,i,mean</sub>
Kiefernholz (n = 299)				
Minimum x <sub>min</sub> [m/s]	4640,2	4651,7	4360,2	4376,7
Mittelwert x <sub>mean</sub> [m/s]	5449,1	5500,8	5286,6	5382,7
Maximum x <sub>max</sub> [m/s]	6127,6	6138,1	6023,2	6065,2
Standardabweichung s <sub>x</sub> [m/s]	310,4	305,4	338,4	326,8
Variationskoeffizient v <sub>x</sub> [%]	5,7	5,6	6,4	6,1
Eichenholz (n = 300)				
Minimum x <sub>min</sub> [m/s]	3580,1	3590,6	3528,0	3583,0
Mittelwert x <sub>mean</sub> [m/s]	4593,1	4623,1	4469,3	4528,4
Maximum x <sub>max</sub> [m/s]	5481,5	5505,5	5425,9	5451,2
Standardabweichung s <sub>x</sub> [m/s]	443,5	445,8	437,9	438,4
Variationskoeffizient v <sub>x</sub> [%]	9,7	9,6	9,8	9,7

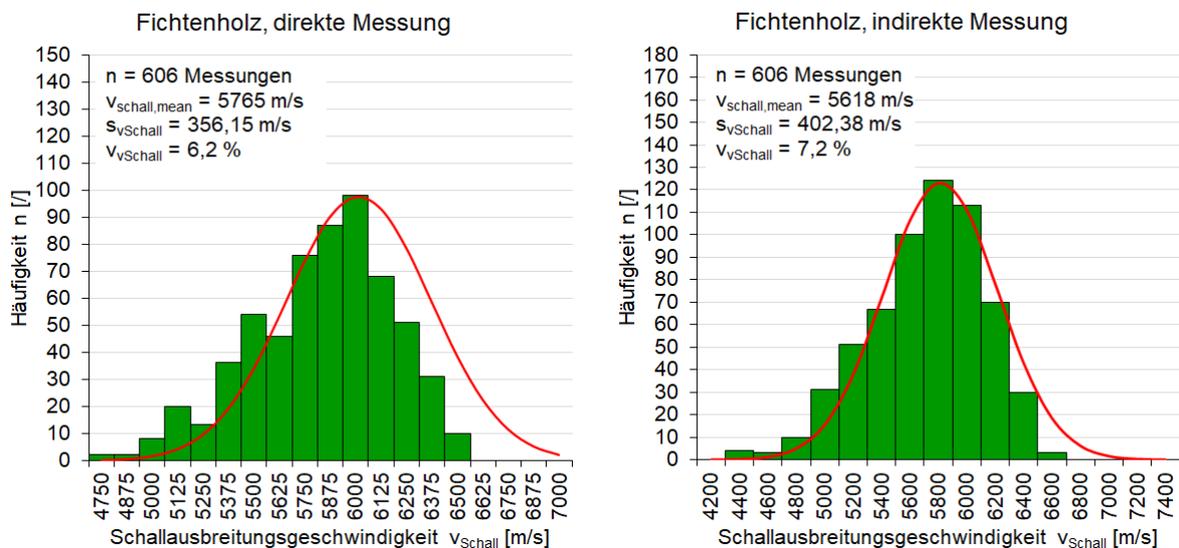


Abbildung 51: Verteilung der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit – Prüfreihe „Fichte“

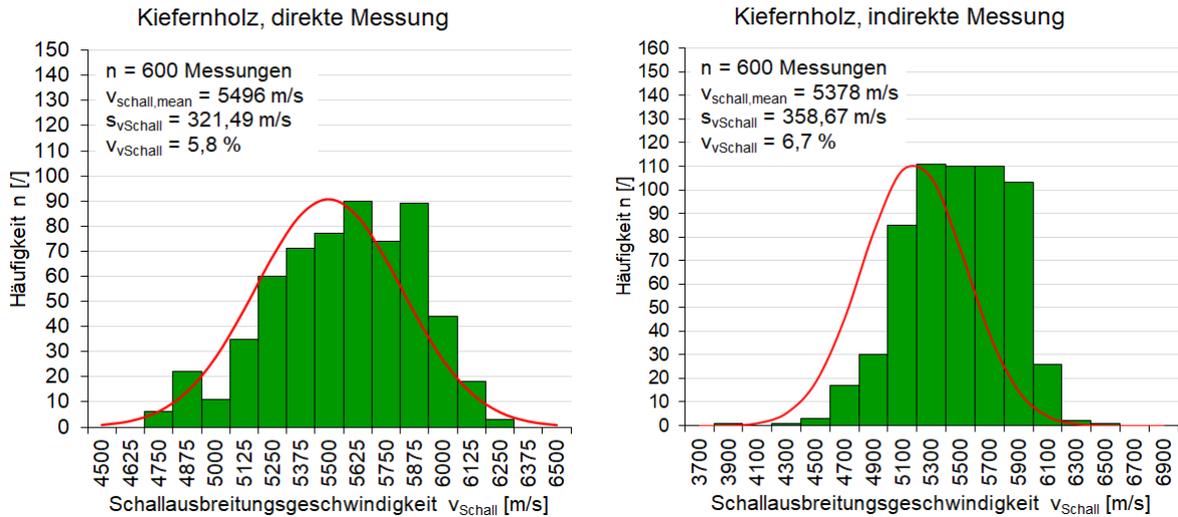


Abbildung 52: Verteilung der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit – Prüfreihe „Kiefer“

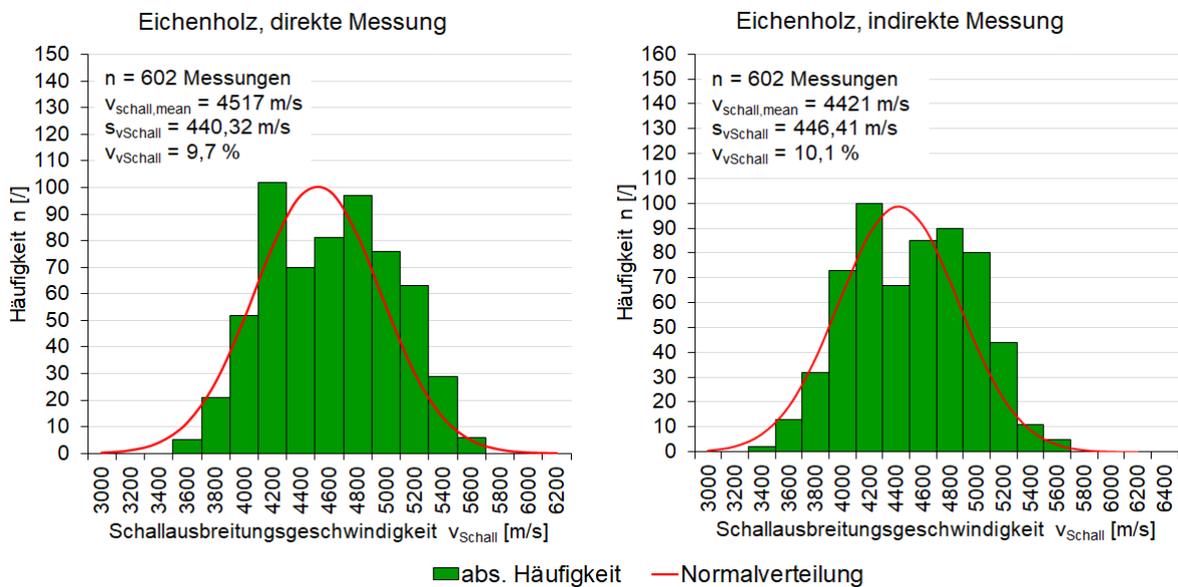


Abbildung 53: Verteilung der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit – Prüfreihe „Eiche“

### Vergleich der visuellen Sortierung und der Ultraschall-Impulszeitmessung

Die Betrachtung der Messergebnisse differenziert nach den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 zeigt, dass bei allen drei untersuchten Holzarten eine unterschiedlich stark ausgeprägte Steigerung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den höheren Sortierklassen festzustellen ist (s. Abbildung 54 bis Abbildung 56). Die deutlichste Steigerung ist in der Prüfreihe „Eiche“ zu verzeichnen. Die mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit steigt zwischen der Klasse „Ausschuss“ und der Sortierklasse LS 13 um  $\Delta v \approx (420 \text{ bzw. } 480) \text{ m/s}$ . Bei den untersuchten Nadelhölzern ist die Steigerung der mittleren Schallausbreitung geringer ausgeprägt. In der Prüfreihe „Fichte“ beträgt die Steigerung zwischen „Ausschuss“ und der Sortierklasse S 13  $\Delta v \approx (380 \text{ bzw. } 420) \text{ m/s}$ . Für die Prüfreihe „Kiefer“ ergibt sich eine Steigerung von  $\Delta v \approx (180 \text{ bzw. } 250) \text{ m/s}$ . Ebenso fällt auf, dass bei den Prüfreihe „Fichte“ und „Kiefer“ die mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit nicht kontinuierlich ansteigt. Bei der

Prüfreihe „Fichte“ ist zwischen den Sortierklassen S 7 und S 10 ein Abfall von  $\Delta v \approx (15 \text{ bzw. } 40) \text{ m/s}$  zu verzeichnen. In der Prüfreihe „Kiefer“ fällt die mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit zwischen der Sortierklasse S 10 und S 13 um  $\Delta v \approx (100 \text{ bzw. } 130) \text{ m/s}$  ab.

Des Weiteren sind die Wertebereiche der Schallausbreitungsgeschwindigkeit wenig differenziert. So ist beispielsweise der Wertebereich der Sortierklasse S10 in der Prüfreihe „Fichte“ deckungsgleich mit dem Wertebereich der unsortierten Proben. Ein ähnliches Bild ergibt sich in der Prüfreihe „Eiche“. In der Prüfreihe „Kiefer“ besteht eine große Übereinstimmung der Wertebereich in den Sortierklassen S 7 bis S 13.

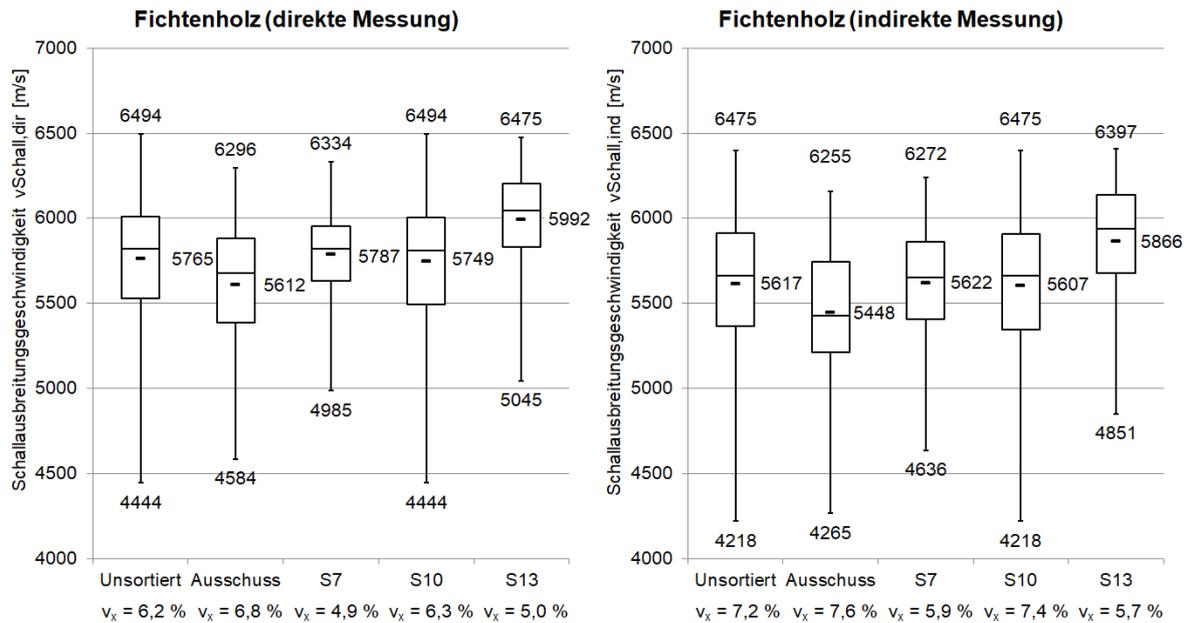


Abbildung 54: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 – Prüfreihe „Fichte“

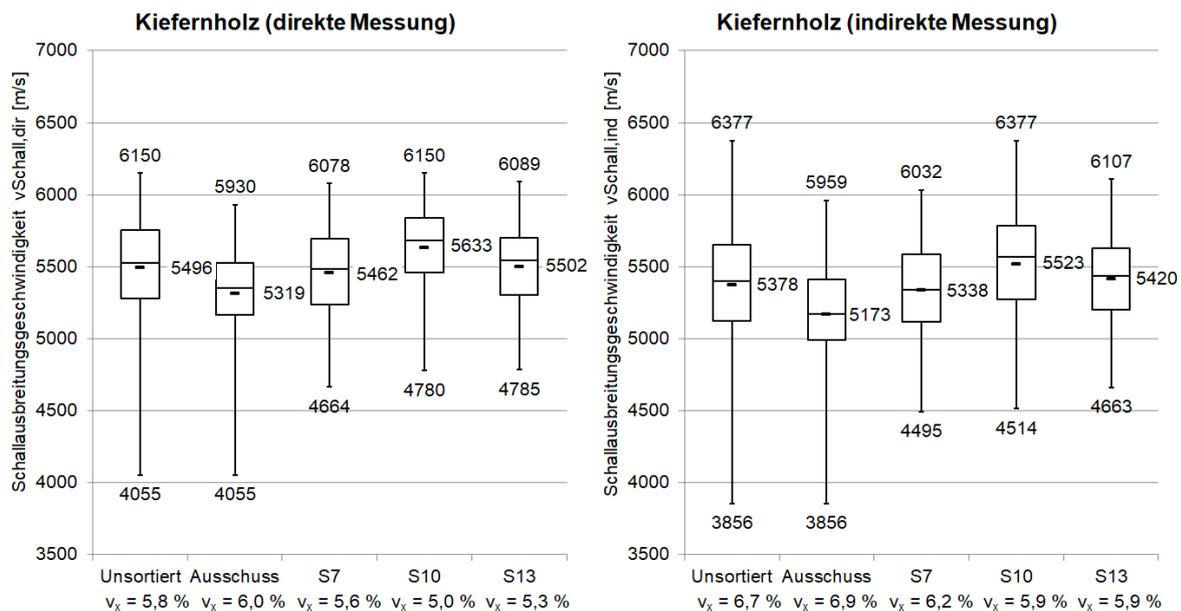
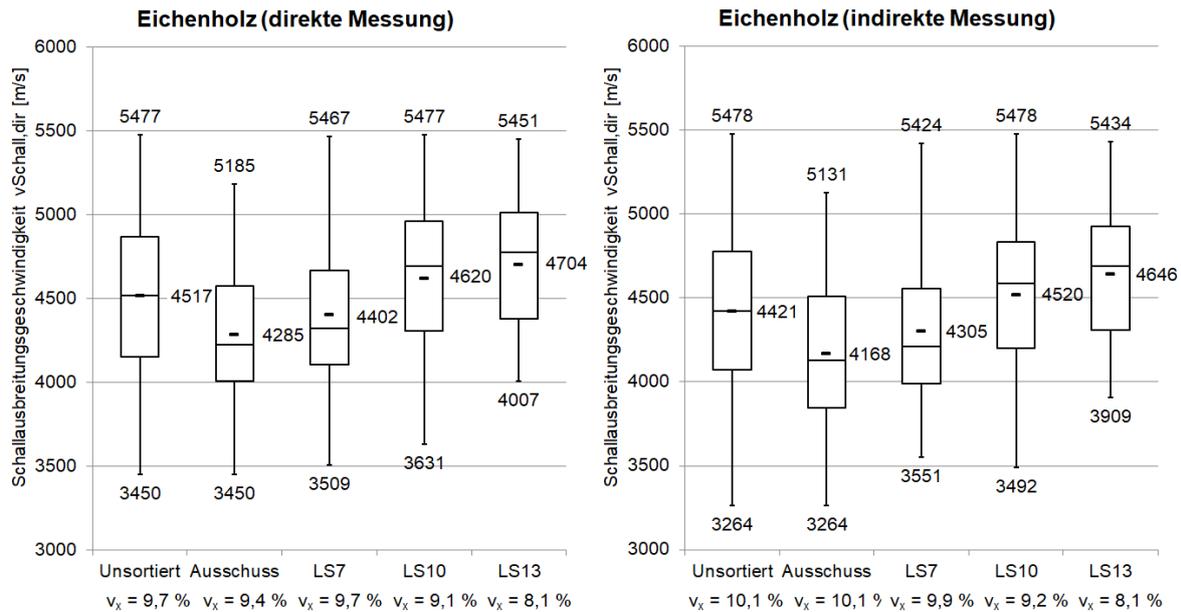


Abbildung 55: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 – Prüfreihe „Kiefer“



**Abbildung 56: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Eiche“**

Die festgestellten Überschneidungen der Wertebereiche der einzelnen Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 sind auf eine schwache Beziehung zwischen den visuell messbaren Sortierkriterien und der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit zurückzuführen. Wie bereits oben angeführt, war die Ästigkeit sowohl bei Nadel- und Laubholz das für die Klassenzuordnung maßgebende Sortierkriterium. An zweiter Stelle standen Risse und Faserneigungen. Eine Übersicht über die Beziehungen zwischen den maßgeblichen Sortierkriterien und der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit ist in Tabelle 25 zu finden.

**Tabelle 25: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen ausgewählten Sortierkriterien und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit**

Holzart	Sortierkriterium	Schallausbreitungsgeschwindigkeit			
		Direkte Messung		Indirekte Messung	
		Minimalwert $V_{schall,d,min}$	Mittelwert $V_{schall,d,mean}$	Minimalwert $V_{schall,i,min}$	Mittelwert $V_{schall,i,mean}$
Fichte	Ästigkeit	-0,174	-0,178	-0,200	-0,201
	Faserneigung	-0,201	-0,194	-0,231	-0,219
	Risse	-0,019	-0,021	-0,001	-0,004
Kiefer	Ästigkeit	-0,321	-0,332	-0,349	-0,374
	Faserneigung	-0,048	-0,043	-0,029	-0,019
	Risse	-0,020	-0,013	-0,009	-0,009
Eiche	Ästigkeit	-0,019	-0,022	-0,037	-0,029
	Faserneigung	-0,331	-0,330	-0,365	-0,364
	Risse	-0,039	-0,036	-0,052	-0,034

Tabelle 25 zeigt, dass die Beziehungen zwischen den maßgeblichen Sortierkriterien und der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei allen drei untersuchten Holzarten mit Korrelationskoeffizienten von  $r \approx -(0,001 \dots 0,370)$  nur schwach ausgeprägt sind. Die Ausprägung der einzelnen Beziehungen ist abhängig von der Holzart. Während bei den untersuchten Nadelhölzern die Ästigkeit mit  $r \approx -(0,17 \dots 0,37)$  – bei Fichtenholz zusätzlich die Faserneigung

mit  $r \approx -(0,19 \dots 0,23)$  – die am stärksten ausgeprägte Beziehung aufweist, spielt sie bei Eichenholz mit  $r \approx -(0,02 \dots 0,04)$  nur eine untergeordnete Rolle. Hier stellt die Faserneigung mit  $r \approx -(0,33 \dots 0,37)$  den maßgeblichen Einflussfaktor dar. Die vorhandenen Risse haben mit  $r \approx -(0,001 \dots 0,052)$  keinen signifikanten Einfluss auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit.

Die festgestellte Ausprägung der Beziehungen stimmt tendenziell mit den Angaben der Literatur überein. In Untersuchungen von DENZLER und GLOS zur Festigkeitssortierung sind zwischen den visuell messbaren Sortierkriterien Ästigkeit und Faserneigung und den gemessenen Materialeigenschaften – in diesem Fall Festigkeitseigenschaften – ebenfalls nur schwach ausgeprägte Korrelationskoeffizienten festgestellt worden (vgl. [Glos, 1995] & [Denzler/Glos, 2009]). Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen belegen somit ebenfalls die geringe Trennschärfe und Aussagegenauigkeit der visuellen Sortierung.

## Zerstörende Materialuntersuchungen nach DIN EN 408

### Korrektur und Überprüfung der Versuchsergebnisse

Die im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1:2002 ermittelte Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper lag im Bereich von  $\omega \approx (8 \dots 15) \%$  und weicht somit von der in DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.3.1 angeführten Bezugsholzfeuchte von  $\omega_{\text{ref}} = 12 \%$  ab. Daher ist eine Korrektur der Versuchsergebnisse anhand der Holzfeuchtigkeit erforderlich. Diese erfolgte entsprechend den Festlegungen der DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.4.2. Der Biege-Elastizitätsmodul und die Rohdichte wurden nach den folgenden Gleichungen Gl. 20 und Gl. 21 auf eine Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12 \%$  umgerechnet (vgl. [DIN EN 384], Gl. (2) und (3)). Für die Biegefestigkeit ist keine Umrechnung erforderlich.

$$E_{m,g,12} = E_{m,g,\omega} (1 + 0,01(\omega - \omega_{\text{ref}})) \quad \text{Gl. 20}$$

$$\rho_{12} = \rho_{\omega} (1 - 0,005(\omega - \omega_{\text{ref}})) \quad \text{Gl. 21}$$

mit:  $E_{m,g,12}$  ... globaler Biege-Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12 \%$ ;  $E_{m,g,\omega}$  ... globaler Biege-Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchtigkeit von  $\omega \neq 12 \%$ ;  $\rho_{12}$  ... Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12 \%$ ;  $\rho_{\omega}$  ... Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit von  $\omega \neq 12 \%$ ;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit bei Versuchsdurchführung ( $\omega \neq 12 \%$ );  $\omega_{\text{ref}}$  ... Bezugsholzfeuchte (hier:  $\omega_{\text{ref}} = 12 \%$ )

Die versuchstechnisch ermittelte Biegefestigkeit wurde zur Berücksichtigung des Größeneinflusses korrigiert. Die Korrektur erfolgte entsprechend der Festlegungen der DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.4.3 auf eine Referenzhöhe von  $h_{\text{ref}} = 150 \text{ mm}$  mit folgenden Gleichungen:

$$f_{m,\text{kor}} = f_m / k_h \quad \text{Gl. 22}$$

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1,3 \right\} \quad \text{Gl. 23}$$

mit:  $f_{m,\text{kor}}$  ... Biegefestigkeit bezogen auf eine Höhe von  $h = 150 \text{ mm}$ ;  $f_m$  ... Biegefestigkeit bei einer Höhe von  $h \neq 150 \text{ mm}$ ;  $h$  ... Höhe der Biegeprüfkörper (hier:  $h = 80 \text{ mm}$ )

Da der Biege-Elastizitätsmodul anhand der globalen – d.h. über die gesamte Spannweite gemessenen – Durchbiegung berechnet wurde, muss dieser nach DIN EN 384:2019, Abschnitt

5.4.4 auf den Elastizitätsmodul in Faserrichtung – d.h. den lokalen Biege-Elastizitätsmodul – nach Gl. 24 umgerechnet werden.

$$E_0 = E_{m,l,12} = E_{m,g,12} \cdot 1,3 - 2690 \quad \text{Gl. 24}$$

mit:  $E_0$  ... Elastizitätsmodul in Faserrichtung;  $E_{m,l,12}$  ... lokaler Biege-Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12\%$ ;  $E_{m,g,12}$  ... globaler Biege-Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12\%$

Nach Umrechnung der Versuchsergebnisse wurden die gemessenen Werte der Rohdichte, der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls auf Ausreißer untersucht (Ausreißertest nach GRUBBS). Insgesamt waren 7 Prüfkörper als Ausreißer nachweisbar (Fichte: je 1 Ausreißer bei Rohdichte und Biege-Elastizitätsmodul; Kiefer: 1 Ausreißer bei Biege-Elastizitätsmodul; Eiche: je 1 Ausreißer bei Rohdichte und Biegefestigkeit, 3 Ausreißer bei Biege-Elastizitätsmodul). Diese Prüfkörper wurden aus allen weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Zwei weitere Prüfkörper in der Prüfreihe „Eiche“ waren auf Grund von Brüchen durch zu große Äste und Verformungen (Verdrehungen, Längs- und Querkrümmungen) nicht prüfbar.

### Rohdichte

Die Lage- und Streuparameter der nach DIN EN 408:2012 ermittelten Rohdichte sind in Tabelle 26 dargestellt. Abbildung 59 bis Abbildung 59 zeigen die Verteilungen der Versuchsergebnisse.

Tabelle 26: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der Rohdichte

	Prüfreihe		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Anzahl n [/]	302	300	298
Minimum $\rho_{12,\min}$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	315,2	398,7	496,7
Mittelwert $\rho_{12,\text{mean}}$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	438,6	528,6	675,6
Maximum $\rho_{12,\max}$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	589,66	705,2	833,0
Standardabweichung $s_{\rho_{12,\min}}$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	52,1	58,2	57,7
Variationskoeffizient $v_{\rho_{12,\min}}$ [%]	11,9	11,0	8,5
5%-Quantil-Wert $\rho_{12,05}$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	360,8	437,6	591,4

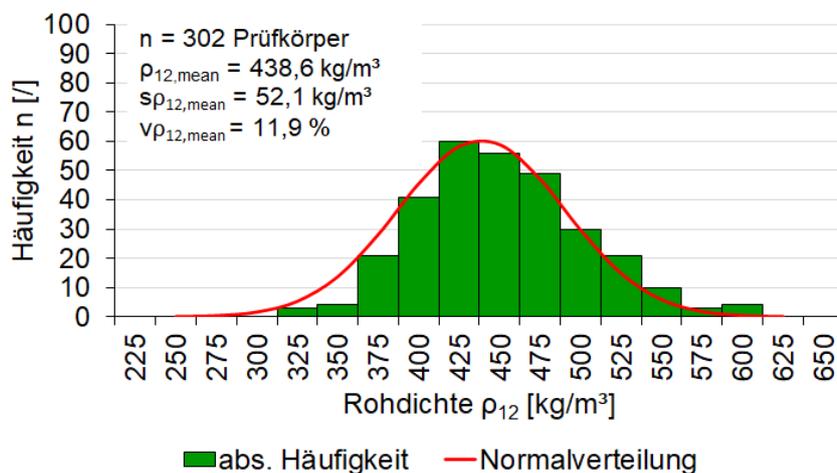


Abbildung 57: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Fichte“

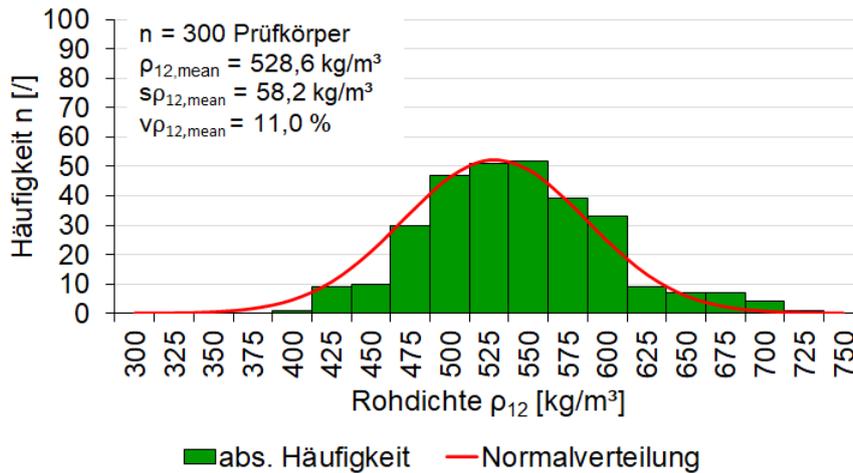


Abbildung 58: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Kiefer“

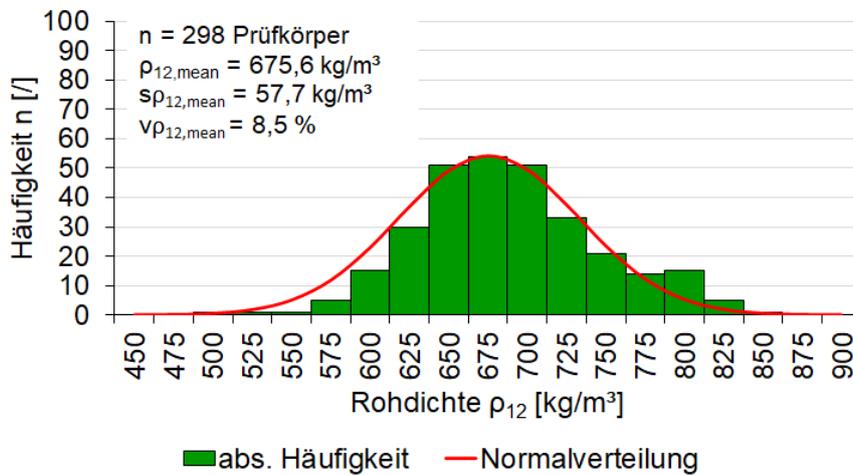
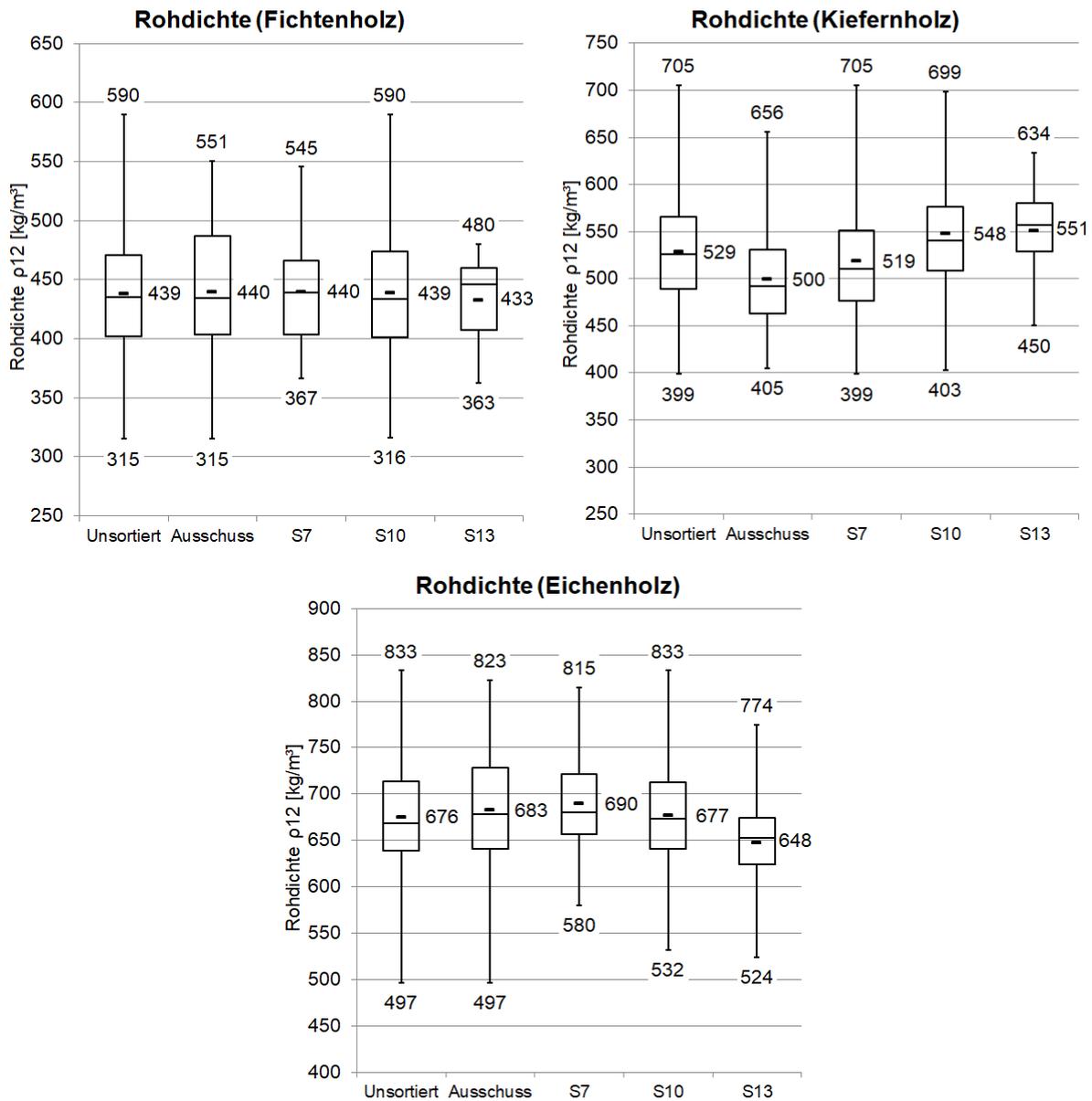


Abbildung 59: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Eiche“

Die Betrachtung der Rohdichte in den einzelnen visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 zeigt kein einheitliches Bild (s. Abbildung 60). Während bei der Prüfreihe „Fichte“ keine signifikanten Unterschiede der Rohdichte in den einzelnen Sortierklassen zu beobachten ist, steigt die Rohdichte in der Prüfreihe „Kiefer“ zwischen der Klasse „Ausschuss“ und der Sortierklasse S 13 um  $\Delta\rho_{12} \approx 50 \text{ kg/m}^3$ . In der Prüfreihe „Eiche“ ist hingegen ein Abfall der Rohdichte um  $\Delta\rho_{12} \approx 40 \text{ kg/m}^3$  zwischen den Sortierklassen LS 7 und LS 13 zu beobachten.

Die Wertebereiche der Rohdichte sind – ebenso wie die der Schallausbreitungsgeschwindigkeit – wenig differenziert. In der Prüfreihe Fichte sind die Wertebereiche der unsortierten Proben und der Sortierklasse S 10 deckungsgleich. In den Prüfreihe „Kiefer“ und „Eiche“ besteht annähernde Deckungsgleichheit in den Wertebereichen der unsortierten Proben und den Sortierklassen S 7/S 10 beziehungsweise LS 7/LS 10.



**Abbildung 60: Wertebereiche der Rohdichte in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 – oben links: Prüfreihe „Fichte“; oben rechts: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“**

Die geringe Differenzierung zwischen den Wertebereichen der einzelnen Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 wird dadurch verursacht, dass die für die Zuordnung des Probenmaterials maßgeblichen Sortierkriterien – d.h. Ästigkeit, Faserneigung, Risse – in keinem direkten Zusammenhang mit der Rohdichte stehen (s. a. Tabelle 27). Die Rohdichte wird maßgeblich durch die Standort- und Wuchsbedingungen sowie die daraus resultierende Jahrringstruktur – d.h. Jahrringbreite, Früh-/Spätholzanteil – beeinflusst (s. [Niemz/Sonderegger, 2017]). Strukturstörungen, welche beispielsweise durch Äste, Faserneigungen und Risse hervorgerufen werden, haben hingegen keinen Einfluss auf die nach DIN EN 408 ermittelte Rohdichte.

**Tabelle 27: Korrelationen zwischen ausgewählten Sortierkriterien und der Rohdichte**

Sortierkriterium	Rohdichte		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Ästigkeit	-0,038	-0,418	0,283
Faserneigung	0,068	0,113	0,135
Risse	-0,002	0,094	0,051

Tabelle 27 verdeutlicht, dass eine Abschätzung der Rohdichte durch die für die Sortierentscheidung maßgebenden Kriterien nicht möglich ist. Dieses Ergebnis bestätigt die bereits im Zusammenhang mit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung festgestellten Unzulänglichkeiten einer reinen visuellen Sortierung.

### **Bruchverhalten**

Bedingt durch den gewählten Prüfaufbau des 4-Punkt-Biegeversuches sind ausschließlich Biegebrüche – d.h. Versagen der Randfasern durch Zug- oder Druckspannungen – zu erwarten. Schubspannungen treten hingegen nur im auflagnahen Bereich auf (vgl. Abschnitt 5.2.2, Abbildung 47). Ein Versagen durch Schubbruch tritt nur dann auf, wenn die Prüfkörper eine geringe Schubfestigkeit aufweisen oder die Schubtragfähigkeit wuchsbedingt reduziert ist. Eine derartige Reduzierung liegt beispielsweise vor, wenn in der schubbeanspruchten, neutralen Faser Risse, Ringschäle, Markröhre und juveniles Holz aber auch Harzgallen oder verdeckte Einwüchse vorhanden sind.

Neben reinen Biege- und Schubbrüchen können aber auch sogenannte „kombinierte“ Brüche auftreten. Diese definieren sich durch ein Versagen, bei dem es sowohl zu einem Zug- oder Druckbruch in den randnahen Bereichen in der Prüfkörpermitte als auch zu einem Schubbruch im Bereich der Auflager kommt. Da nicht in jedem Fall klar definiert werden kann, ob das Zug-/Druckversagen durch eine vorherige Querschnittsreduzierung infolge eines Schubbruches verursacht wurde oder ob das Schubversagen eine Folge des Fortsetzens von Rissen und Brüchen ist, werden in der weiteren Auswertung Prüfkörper, an denen sowohl Zug-/Druck- als auch Schubbrüche auftraten, als kombinierte Brüche betrachtet.

In den untersuchten Prüfreihe lag kein einheitliches Bruchverhalten vor. In der Prüfreihe „Fichte“ traten überwiegend Zugbrüche auf. Diese zeichneten sich durch eine Zugversagen ausgehend von Ästen an der Unterseite der Prüfkörper aus, welche sich in deutlichen Rissen bis etwa zur neutralen Faser in der Mitte der Querschnittshöhe fortsetzten (s. Abbildung 61). In Ausnahmefällen setzte sich der Bruch über die gesamte Querschnittshöhe fort (s. bspw. Abbildung 62) oder die Fortsetzung der Risse führte zu einem Schubbruch entlang der neutralen Faser, d.h. kombiniertem Bruch (s. Abbildung 63). Diejenigen Prüfkörper, welche größere Äste in der Druckzone aufwiesen, trat sowohl ein Druckbruch – d.h. Stauchung der Druckzone um den Ast herum – als auch eine dadurch bedingter Zugbruch ohne signifikante Rissfortsetzung auf (s. Abbildung 64). Vereinzelt war auch ein reines Schubversagen zu verzeichnen (s. Abbildung 65). Die betroffenen Prüfkörper wiesen breite Jahrringe mit hohem Frühholzanteil, juveniles Holz, Querschnittsreduzierungen durch Risse oder eine Kombination aus den vorgenannten Merkmalen auf.

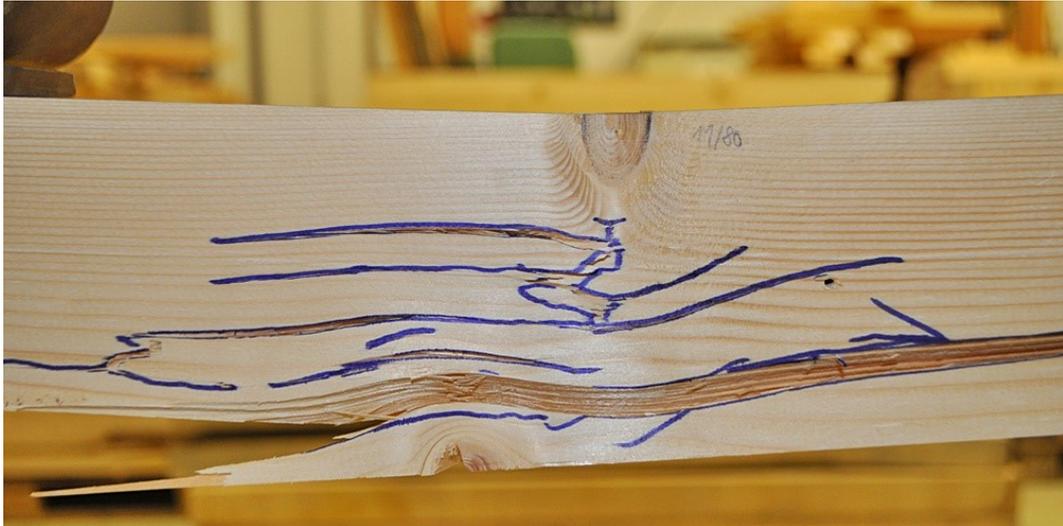


Abbildung 61: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Zugbruch mit Rissfortsetzung



Abbildung 62: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Zugbruch über gesamte Querschnittshöhe

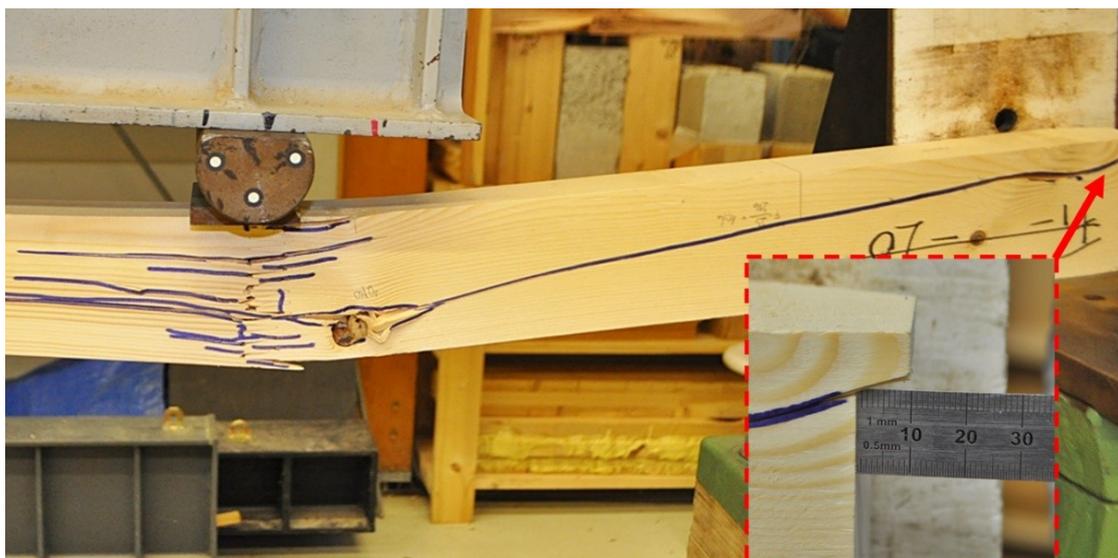


Abbildung 63: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – kombinierter Zug-/Schubbruch



**Abbildung 64: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Versagen durch Zug- & Druckbruch**



**Abbildung 65: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Schubversagen**

Die untersuchten Kiefernholzproben wiesen ein ähnliches Bruchverhalten wie die Proben der Prüfreihe „Fichte“ auf. Auch hier kam es überwiegend zu einem Versagen durch Zugbrüche (s. Abbildung 66), welches insbesondere bei Prüfkörpern mit größeren Ästen über die gesamte Querschnittshöhe verliefen (s. Abbildung 67). Des Weiteren traten gleichzeitige Zug- und Druckbrüche auf (s. Abbildung 68). Im Gegensatz zur Prüfreihe „Fichte“ wurden keine reinen Schubbrüche festgestellt. Ein bereichsweises Schubversagen war nur in Verbindung mit einem Zug-/Druckversagen als kombinierter Bruch zu verzeichnen (s. Abbildung 69). Derartige Brüche resultierten aus einer Rissfortsetzung und waren bei Prüfkörpern mit vergleichsweise breiten Jahrringen mit hohem Frühholzanteil festzustellen.



Abbildung 66: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – Zugbruch mit Rissfortsetzung

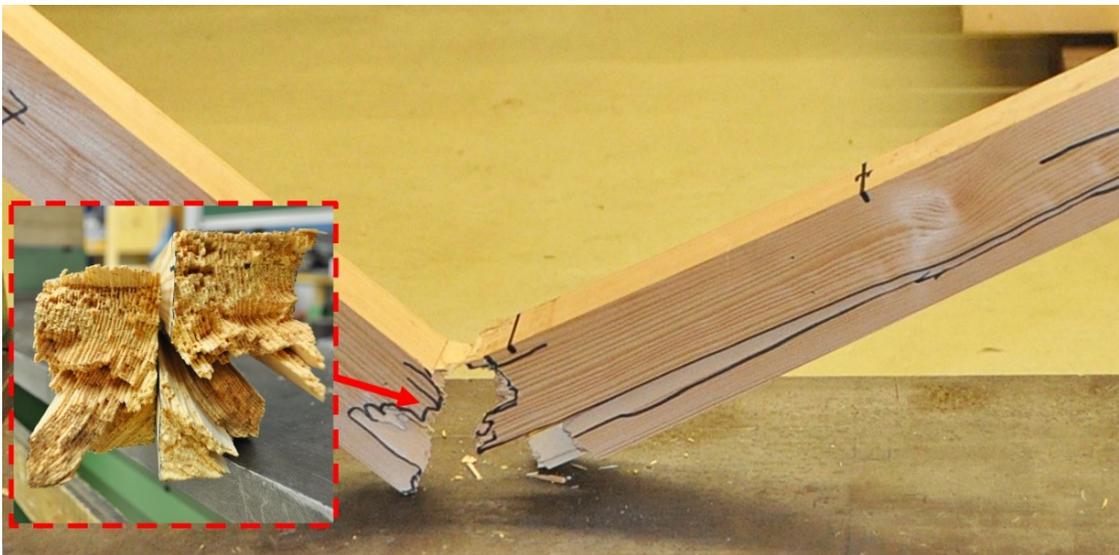


Abbildung 67: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – Zugbruch über gesamte Querschnittshöhe

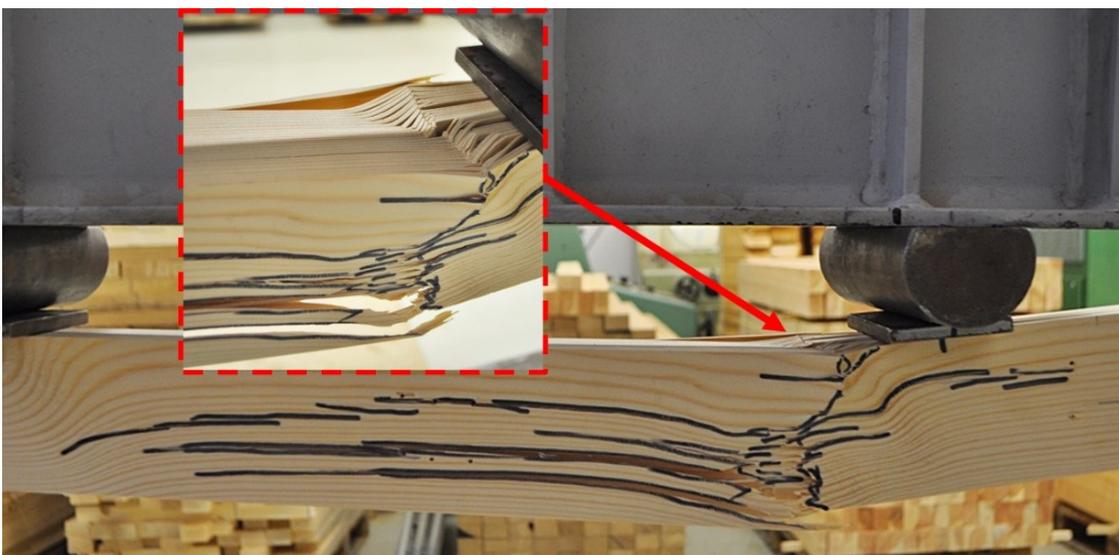
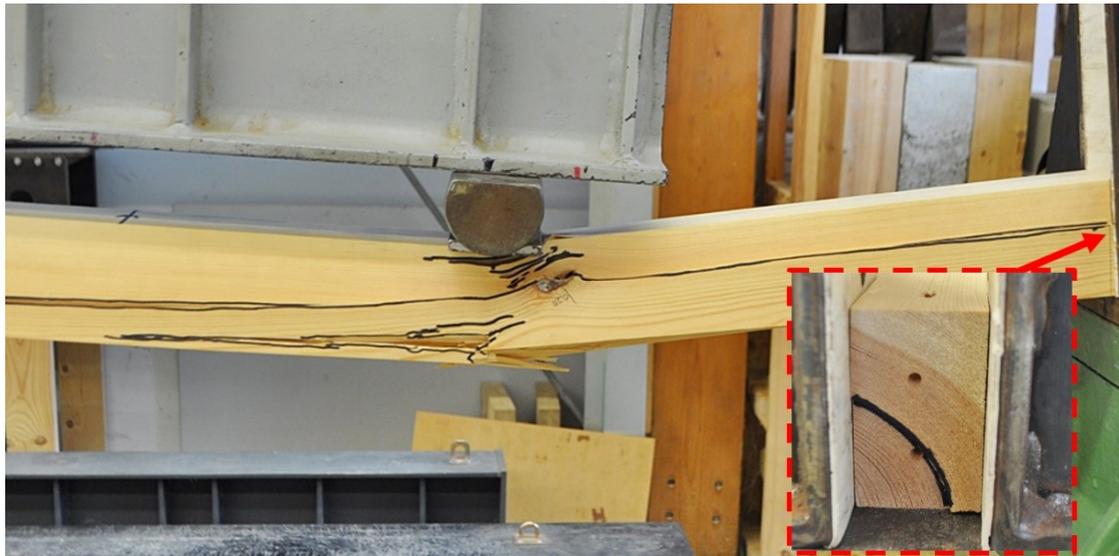


Abbildung 68: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – Versagen durch Zug- & Druckbruch



**Abbildung 69: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – kombinierter Zug-/Schubbruch**

Die Prüfkörper der Prüfreihe „Eiche“ versagten mehrheitlich durch Zugversagen ausgehend von Ästen mit Riss-/Bruchfortsetzung entlang des Faserverlaufes (s. Abbildung 70). Teils auch in Kombination mit einem Druckversagen (s. Abbildung 71). Ein Schubversagen – auch in Kombination mit Zug-/Druckbrüchen – trat in dieser Prüfreihe nicht auf.



**Abbildung 70: Bruchverhalten – Prüfreihe „Eiche“ – Zugbruch mit Rissfortsetzung**



**Abbildung 71: Bruchverhalten – Prüfreihe „Eiche“ – Versagen durch Zug- & Druckbruch**

### ***Biegebruchfestigkeit & statischer Biege-Elastizitätsmodul***

Die Lage- und Streuparameter der Ergebnisse der durchgeführten Biegeversuche nach DIN EN 408:2012 sind in Tabelle 28 dargestellt. Abbildung 72 bis Abbildung 74 zeigen die Verteilung der Versuchsergebnisse.

**Tabelle 28: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der Biegebruchfestigkeit**

Biegebruchfestigkeit $f_m$	Prüfreihe		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Anzahl $n$ [/]	303	300	297
Minimum $f_{m,12,min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	7,6	12,8	9,9
Mittelwert $f_{m,12,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	45,7	53,7	57,6
Maximum $f_{m,12,max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	83,8	104,2	107,5
Standardabweichung $s_{f_m,12,min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16,2	19,4	19,0
Variationskoeffizient $v_{f_m,12,min}$ [%]	35,6	36,1	33,0
5%-Quantil-Wert $f_{m,12,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	19,6	23,0	27,7
statischer Biege-Elastizitätsmodul $E_m$	Prüfreihe		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Anzahl $n$ [/]	302	299	296
Minimum $E_{m,g,12,min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4844,6	4317,5	3891,0
Mittelwert $E_{12,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	13729,2	15178,6	13771,4
Maximum $\rho_{12,max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	23376,2	26380,4	22356,7
Standardabweichung $s_{\rho_{12,min}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3342,4	3868,6	3853,8
Variationskoeffizient $v_{\rho_{12,min}}$ [%]	24,3	25,5	28,0

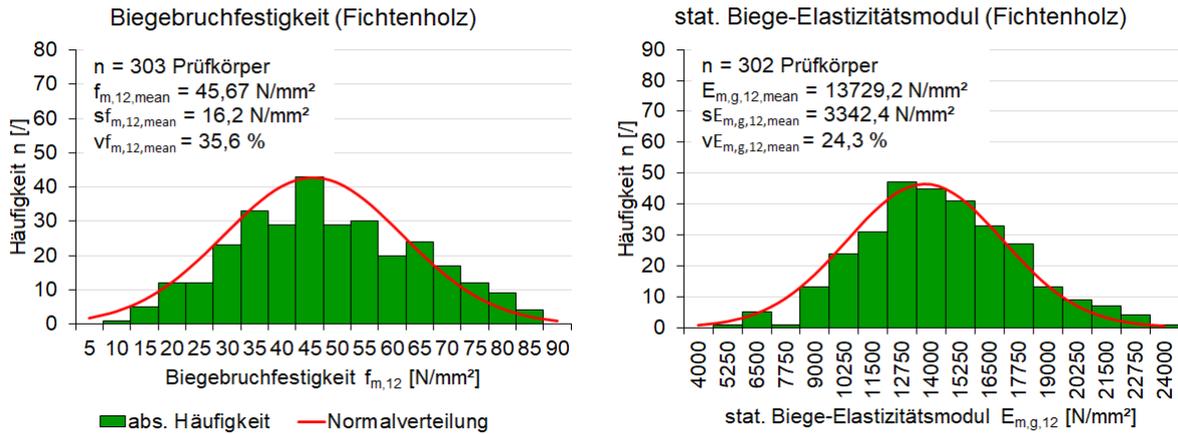


Abbildung 72: Verteilungen – Prüfreihe „Fichte“ – links: Biegebruchfestigkeit; rechts: statischer Biege-Elastizitätsmodul

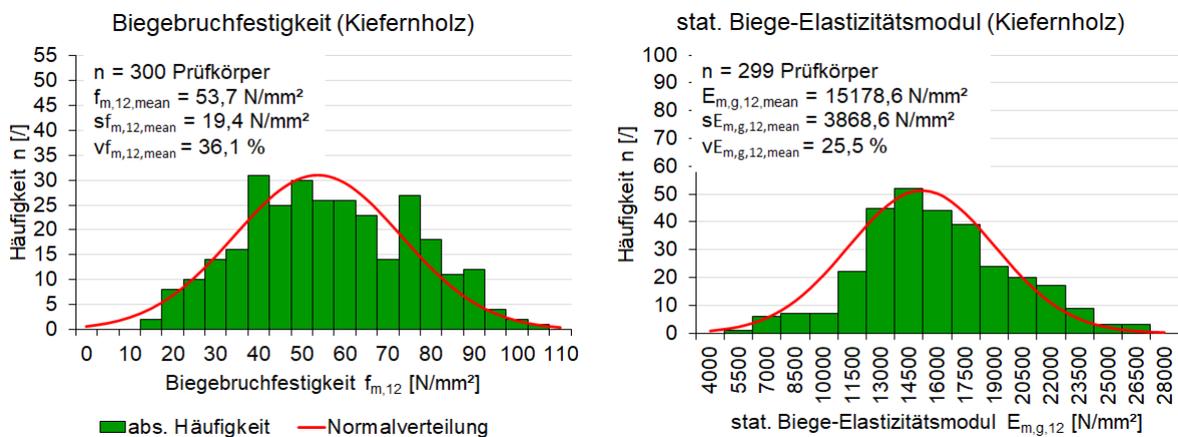


Abbildung 73: Verteilungen – Prüfreihe „Kiefer“ – links: Biegebruchfestigkeit; rechts: statischer Biege-Elastizitätsmodul

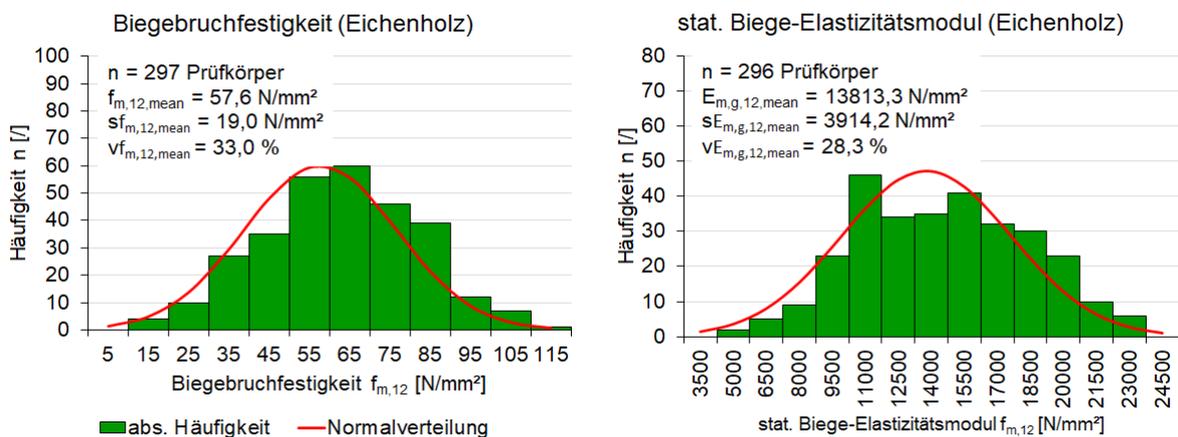


Abbildung 74: Verteilungen – Prüfreihe „Eiche“ – links: Biegebruchfestigkeit; rechts: statischer Biege-Elastizitätsmodul

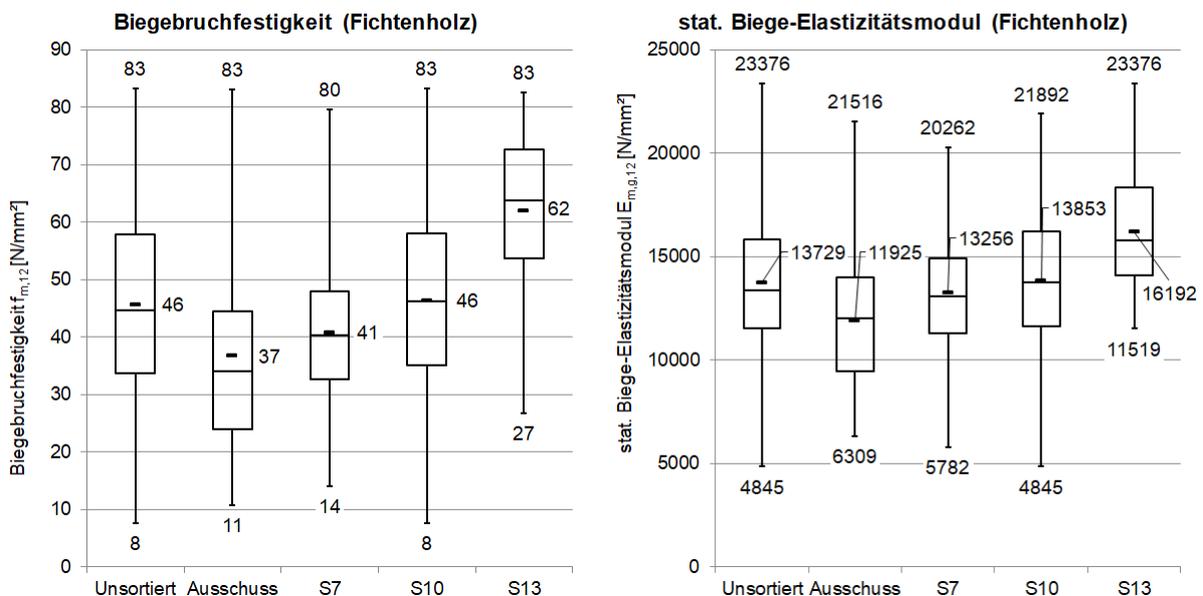
Die Betrachtung der Biegebruchfestigkeit in den einzelnen visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 zeigt eine kontinuierliche Steigerung der Mittelwerte (s. Abbildung 75 bis Abbildung 77). Der Mittelwert der höchsten Sortierklasse (S 13 nach DIN 4074-1 und LS 13 nach DIN 4074-5) liegt deutlich über denen der unsortierten Proben. In den Sortierklassen S 7/LS 7 nach DIN 4074-1/-5 und der Klasse „Ausschuss“ ist die mittlere Biegebruchfestigkeit

hingegen geringer als die der unsortierten Proben. Der Mittelwert in der Sortierklassen S 10/LS 10 nach DIN 4074-1/-5 entspricht mit geringen Abweichungen von  $\Delta f_{m,12} \approx +(0 \dots 8) \text{ N/mm}^2$  bzw.  $\Delta f_{m,12} \approx +(0 \dots 15) \%$  dem Mittelwert der unsortierten Proben.

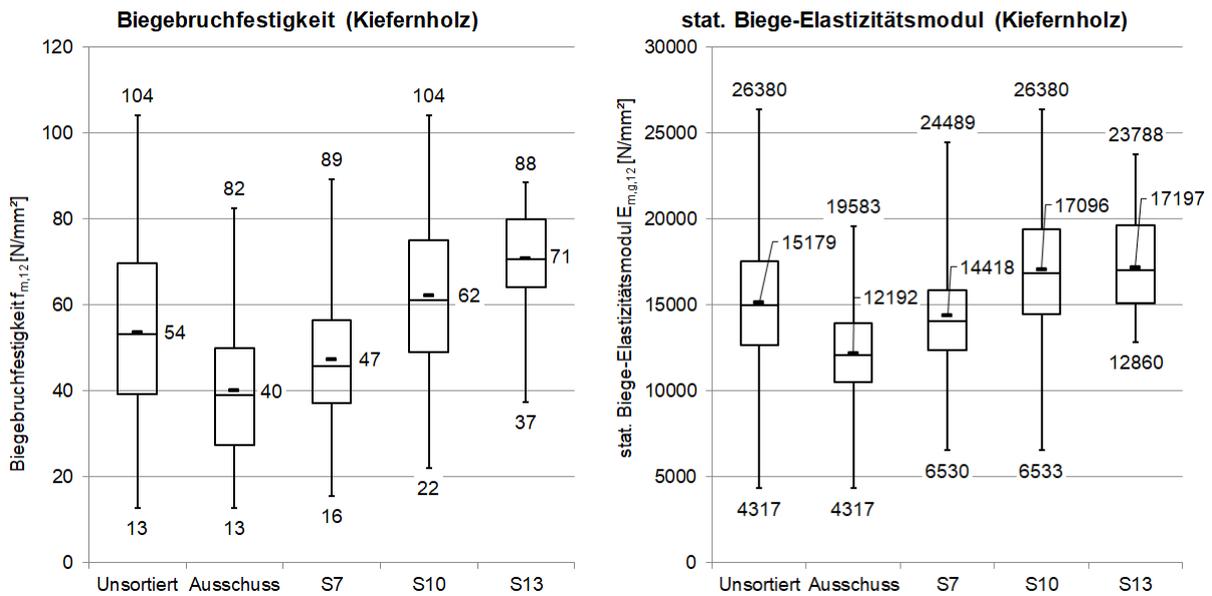
Gleichzeitig ist jedoch zu erkennen, dass der gesamten Wertebereich der Biegebruchfestigkeit je nach Holzart wenig differenziert ist. Insbesondere in der Prüfreihe „Fichte“ liegt zwischen den unsortierten Proben, der Klasse „Ausschuss“ sowie den Sortierklassen S 7 und S 10 eine große Deckungsgleichheit vor. Bei dem untersuchten Kiefern- und Eichenholz sind die Wertebereiche zwar etwas differenzierter, jedoch ist keine hohe Trennschärfe zu erkennen.

Hinsichtlich des statischen Biege-Elastizitätsmoduls zeigt sich ein ähnliches Bild (s. Abbildung 75 bis Abbildung 77). Auch hier ist eine deutliche Steigerung der Mittelwerte zwischen den einzelnen Sortierklassen zu erkennen. Die Mittelwerte der Sortierklassen S 13/LS 13 nach DIN 4074-1/-5 liegen ebenfalls deutlich über den Mittelwerten der unsortierten Proben. In der Klasse „Ausschuss“ und den Sortierklassen S 7/LS 7 nach DIN 4074-1/-5 ergeben sich hingegen geringere Mittelwerte. Der mittlere statische Biege-Elastizitätsmodul der Sortierklasse S 10 in der Prüfreihe „Fichte“ entspricht mit geringfügigen Abweichungen – d.h.  $\Delta E_{m,g,12} \approx +124 \text{ N/mm}^2 = +1 \%$  – dem Mittelwert der unsortierten Proben. In den Prüfreihe „Kiefer“ und „Eiche“ liegen die Mittelwerte deutlich über den unsortierten Proben und entsprechen mit geringen Abweichungen den Mittelwerten der Sortierklassen S 13/LS 13 nach DIN 4074-1/-5.

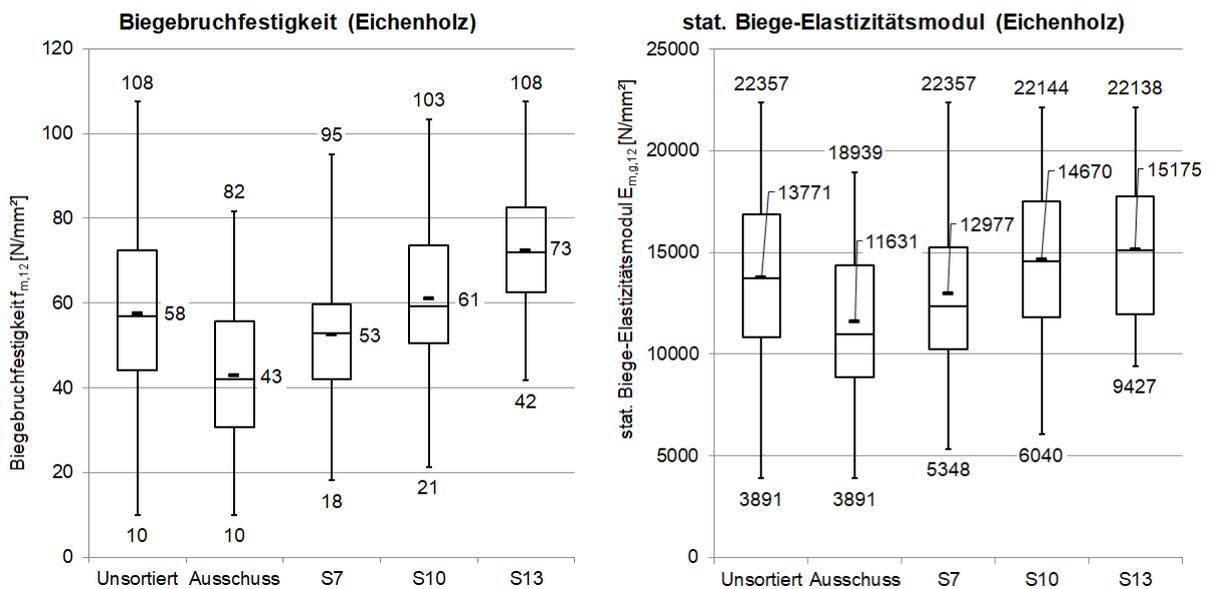
Die Trennschärfe der Wertebereiche des statischen Biege-Elastizitätsmoduls ist ebenfalls gering. Es besteht Deckungsgleichheit zwischen den Wertebereichen der unsortierten Proben, der Klasse „Ausschuss“ und den Sortierklassen S 7-10/ LS 7-10 nach DIN 4074-1/-5. Die Wertebereiche der höchsten visuellen Sortierklassen – d.h. S 13/ LS 13 nach DIN 4074-1/-5 – sind zwar deutlich begrenzter, stimmen ebenfalls überwiegend mit den Wertebereichen der niedrigeren Klassen überein.



**Abbildung 75: Wertebereiche der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Fichte“**



**Abbildung 76: Wertebereiche der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Kiefer“**



**Abbildung 77: Wertebereiche der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Eiche“**

Die geringe Differenzierbarkeit der Wertebereiche der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den einzelnen Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 lässt sich – ebenso wie in Bezug auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit und die Rohdichte – auf die schwach ausgeprägten Beziehungen zwischen den für die Zuordnung des Probenmaterials maßgeblichen visuellen Sortierkriterien und den Festigkeits- bzw. Steifigkeitseigenschaften zurückführen (s. a. Tabelle 29).

**Tabelle 29: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen ausgewählten Sortierkriterien und der Rohdichte**

Sortierkriterium	Biegebruchfestigkeit		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Ästigkeit	-0,365	-0,597	-0,272
Faserneigung	-0,193	-0,039	-0,363
Risse	0,094	-0,009	-0,006
Sortierkriterium	Statischer Biege-Elastizitätsmodul		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Ästigkeit	-0,267	-0,533	-0,083
Faserneigung	-0,132	-0,010	-0,300
Risse	-0,267	-0,533	-0,083

### **Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338**

Die vorangegangenen Ausführungen zu den Wertebereichen der Versuchsergebnisse in den Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 stehen in tendenzieller Übereinstimmung mit den Angaben der Literatur (vgl. [Glos, 1995] & [Denzler/Glos, 2009]) und deuten auf eine geringe Trennschärfe und Aussagegenauigkeit der visuellen Sortierung hin. Zur Überprüfung dieser Feststellung wird das untersuchte Probenmaterial anhand der ermittelten Werte der Rohdichte, der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 zugeordnet.

Die Einordnung von Holzarten oder -sortimenten in das System der Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 erfolgt anhand der nach DIN EN 384 ermittelten charakteristischen Materialkennwerte. Nach DIN EN 338:2016, Abschnitt 6.2.2 kann Bauholz immer dann einer bestimmten Festigkeitsklasse zugeordnet werden, wenn die charakteristischen Werte der Rohdichte und der Festigkeit sowie der Mittelwert des Elastizitätsmoduls mindestens den in DIN EN 338:2016, Tabelle 1-3 tabellierten Kennwerten entsprechen. Im Falle von vorwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteilen wird die charakteristische Biegefestigkeit sowie der Mittelwert des statischen Biege-Elastizitätsmoduls für die Klassenzuordnung verwendet.

Die sich in den visuell festgestellten bzw. zugeordneten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 ergebenden charakteristischen Kennwerte des untersuchten Probenmaterials sind in Tabelle 30 im Vergleich zu den charakteristischen Kennwerten derjenigen Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 dargestellt, welche sich anhand der Festlegungen der DIN EN 1912:2013 für die visuellen Sortierklassen ergibt (vgl. Tabelle 23).

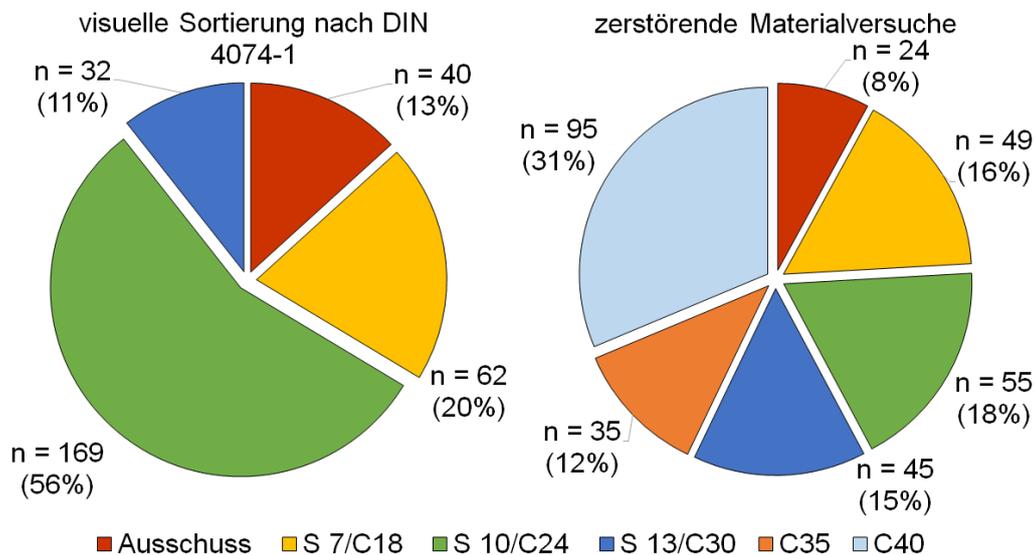
**Tabelle 30: Gegenüberstellung der charakteristischen Kennwerte des untersuchten Probenmaterials nach visueller Sortierung mit den charakteristischen Kennwerten nach DIN EN 338:2016 (rot markiert: Kennwerte nach DIN EN 338 nicht erreicht)**

Holzart	Sortierklasse	charakteristische Rohdichte $\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]		charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Mittelwert des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
		aus Versuchsergebnissen	über Zuordnung der visuellen Sortierklassen zu Festigkeitsklassen	aus Versuchsergebnissen	über Zuordnung der visuellen Sortierklassen zu Festigkeitsklassen	aus Versuchsergebnissen	über Zuordnung der visuellen Sortierklassen zu Festigkeitsklassen
Fichte	Unsortiert <sup>a</sup>	317,5	/	17,2	/	12717,6	/
	Ausschuss <sup>a</sup>	309,6	/	14,0	/	11046,3	/
	S 7 <sup>b</sup>	329,3	320	19,5	18	12279,4	9000
	S 10 <sup>c</sup>	315,2	350	18,3	24	12832,1	11000
	S 13 <sup>d</sup>	333,1	380	33,5	30	14998,7	12000
Kiefer	Unsortiert <sup>a</sup>	385,1	/	20,2	/	14060,2	/
	Ausschuss <sup>a</sup>	367,1	/	14,5	/	11293,4	/
	S 7 <sup>b</sup>	379,5	320	23,6	18	13355,9	9000
	S 10 <sup>c</sup>	429,8	350	28,0	24	15836,1	11000
	S 13 <sup>d</sup>	417,2	380	46,3	30	15930,1	12000
Eiche	Unsortiert <sup>a</sup>	520,5	/	24,4	/	12756,7	/
	Ausschuss <sup>a</sup>	528,0	/	13,2	/	10774,3	/
	LS 7 <sup>a</sup>	533,9	/	27,1	/	12020,6	/
	LS 10 <sup>e</sup>	519,8	530	29,7	30	13588,8	11000
	LS 13 <sup>e</sup>	499,3	530	44,3	30	14057,0	11000
<sup>a</sup> nach DIN EN 1912:2013 keine Zuordnung zu Festigkeitsklassen möglich nach DIN EN 338 möglich <sup>b</sup> nach DIN EN 1912:2013 Zuordnung zur Festigkeitsklasse C18 <sup>c</sup> nach DIN EN 1912:2013 Zuordnung zur Festigkeitsklasse C24 <sup>d</sup> nach DIN EN 1912:2013 Zuordnung zur Festigkeitsklasse C30 <sup>e</sup> nach DIN EN 1912:2013 Zuordnung zur Festigkeitsklasse D30							

Aus Tabelle 30 wird deutlich, dass nur bei der Hälfte der durch visuelle Sortierung definierten Probensortimente eine Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 möglich ist. Nur bei der Sortierklasse S 7 der Prüfreihe „Fichte“ und den Sortierklassen S 7-13 der Prüfreihe „Kiefer“ entsprechen sämtliche charakteristischen Werte mindestens den normativ geregelten Kennwerten nach DIN EN 338:2016. Bei den übrigen Sortierklassen (Sortierklassen S10/13 der Prüfreihe „Fichte“ und Sortierklassen LS 10/13 der Prüfreihe „Eiche“) wird mindestens ein Grenzwert nach DIN EN 338 nicht erreicht. Hier sind insbesondere die charakteristischen Werte der Rohdichte maßgeblich. Bei der Sortierklasse S 10 in der Prüfreihe „Fichte“ unterschreitet zusätzlich der charakteristische Wert der Biegefestigkeit den Kennwert nach DIN EN 338:2016.

Dieses Ergebnis zeigt erneut, dass eine ausschließliche visuelle Sortierung nicht ausreichend ist, um das untersuchte Probenmaterial nach seiner tatsächlichen Tragfähigkeit zu sortieren. Bezogen auf die jeweiligen Holzsortimente werden nur bei der Hälfte die erforderlichen Kennwerte erreicht. Die Aussagefähigkeit und -genauigkeit der visuellen Sortierung ist damit unzureichend für eine materialgerechte Verwendung. Des Weiteren zeigt sich, dass die charakteristischen Kennwerte des untersuchten Probenmaterials teilweise deutlich über den normativ geregelten Kennwerten der „Ziel“-Festigkeitsklassen<sup>11</sup> liegen. Dies betrifft vor allem die Mittelwerte des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung, zum Teil aber auch die charakteristischen Werte der Biegefestigkeit (vgl. Tabelle 30).

Die geringe Aussagefähigkeit und -genauigkeit der visuellen Sortierung zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung der Zuordnung der einzelnen Prüfkörper zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 (s. Abbildung 80 bis Abbildung 82). Zum einen zeigt sich, dass sich die Sortierausbeute prinzipiell verändert. Das heißt, der Anteil an Prüfkörpern in der Klasse „Ausschuss“ sowie der Sortierklassen mit geringer Tragfähigkeit (Sortierklassen S 7/LS 7 nach DIN 4074-1/-5) ist unter Berücksichtigung der tatsächlichen Festigkeitseigenschaften deutlich geringer als allein auf Grundlage der visuellen Sortierung feststellbar. Dementsprechend erhöht sich der Anteil an Holz mit „üblicher“ und „überdurchschnittlicher Tragfähigkeit“ (Sortierklassen > S 10/LS 10 nach DIN 4074-1/-5 und Festigkeitsklassen > C24/D30 nach DIN EN 338). Zum anderen wird aus Abbildung 80 noch ein weiterer Nachteil der visuellen Sortierung ersichtlich. Die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5 ist auf lediglich drei Sortierklassen beschränkt und damit wenig trennscharf. Holzbauteile mit „sehr hoher“ Tragfähigkeit (Festigkeitsklassen >C30/D30 nach DIN EN 338) können visuell nicht sortiert werden. Der Anteil dieser Kategorie liegt jedoch holzartenabhängig bei  $p = (43 \dots 70) \%$ .



**Abbildung 78: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen – Prüfreihe „Fichte“**

<sup>11</sup> Gemeint sind damit die sich aus den Festlegungen der DIN EN 1912 ergebenden Zuordnungen der visuellen Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338.

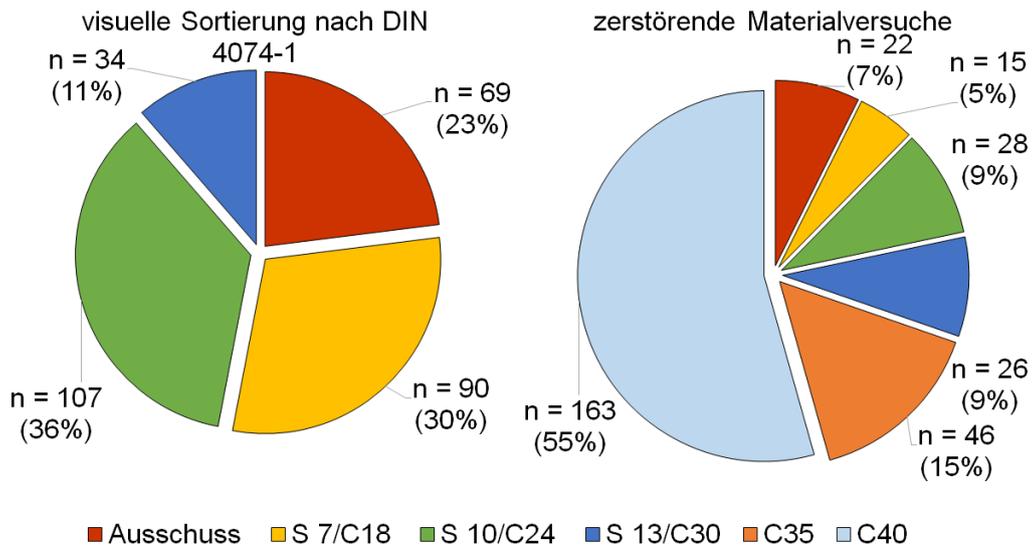


Abbildung 79: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen – Prüfreihe „Kiefer“

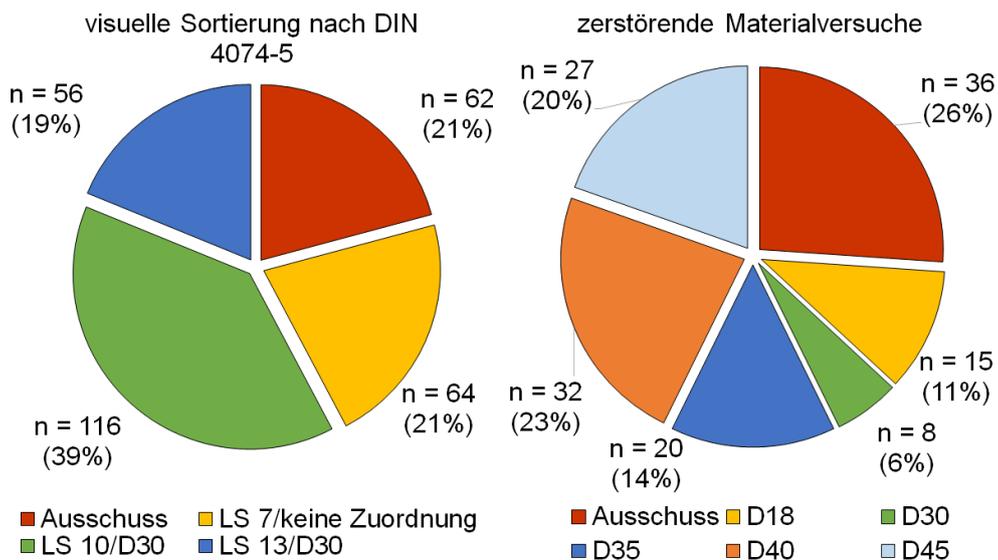
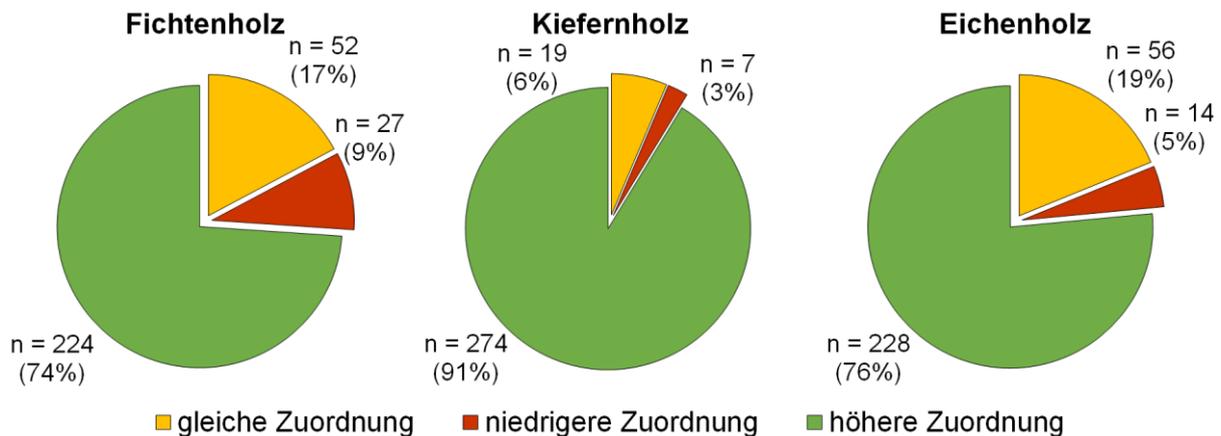


Abbildung 80: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen – Prüfreihe „Eiche“

Die festgestellte geringe Aussagegenauigkeit und Trennschärfe der visuellen Sortierung bei der Abschätzung der Materialeigenschaften der untersuchten Proben können zu einer Unter- oder Überschätzung der Leistungsfähigkeit von Holzbauteilen führen (s. Abbildung 81).



**Abbildung 81: Übereinstimmung der Klassenzuordnung zwischen der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1/-5 und der Sortierung auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche**

Abbildung 81 zeigt deutlich, dass das untersuchte Probenmaterial durch eine reine visuelle Sortierung überwiegend unterschätzt wurde. Je nach Holzart liegt der Anteil der Prüfkörper für die sich auf Grundlage ihrer versuchstechnisch festgestellten Materialkennwerte eine Zuordnung zu einer höheren Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 als durch die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5 bei  $p = (74 \dots 91) \%$ . Bei weiteren  $p = (6 \dots 19) \%$  ist die Materialqualität des Probenmaterials durch die visuelle Sortierung korrekt eingeschätzt worden. Bei lediglich  $p = (3 \dots 9) \%$  des Probenmaterials wurde die Materialqualität überschätzt.

Dieses Ergebnis zeigt zwar, dass die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5 auf der sicheren Seite liegt. Die überwiegende Unterschätzung der Leistungsfähigkeit des Probenmaterials führt in der Praxis jedoch dazu, dass die vorhandene Tragfähigkeit der Holzbauteile nicht optimal ausgenutzt wird. Im Fall von Standsicherheitsbewertungen bestehender Konstruktionen können vorhandene Tragfähigkeitsreserven nicht berücksichtigt werden. Hierzu ist eine Erfassung und Bewertung der Materialqualität durch zerstörungsfreie und -arme Mess- und Prüfmethode erforderlich.

### **Vergleich der Biegeversuche und der Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen**

Die im Rahmen der durchgeführten Materialuntersuchungen eingesetzte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung ist ausgehend von den bisherigen Ergebnissen prinzipiell für die Sortierung von Holzbauteilen geeignet (vgl. dazu Abschnitt 5.2.3, S. 111ff).

Ebenso wie bereits nach Aufteilung der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit nach den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 (s. Abbildung 54 bis Abbildung 56) festgestellt, zeigt sich auch in den unterschiedlichen Festigkeitsklassen DIN EN 338 eine klare Tendenz. Bei allen drei untersuchten Holzarten liegt eine kontinuierliche Steigerung der Mittelwerte der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit vor (s. Abbildung 82 bis Abbildung 84).

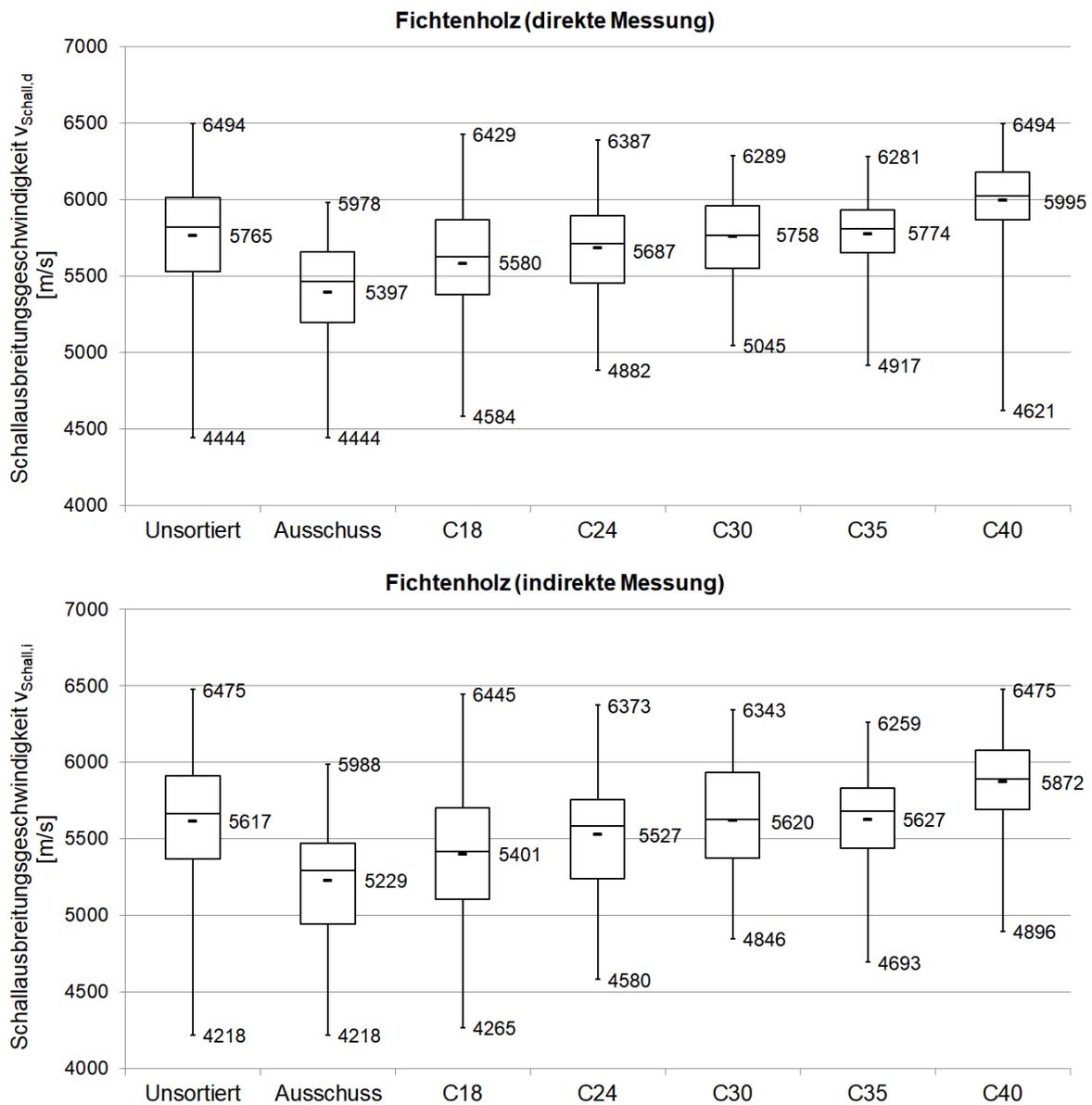
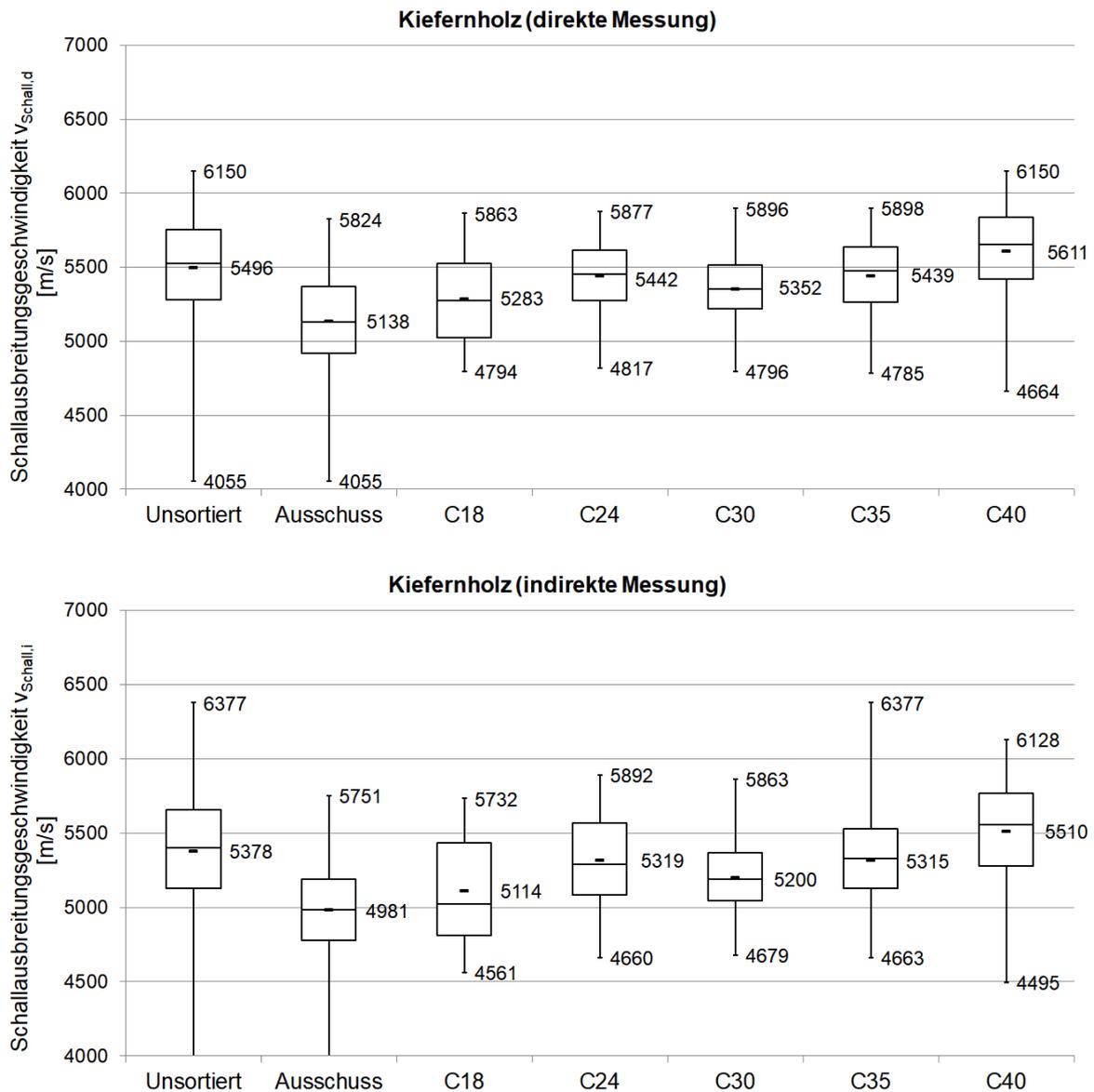
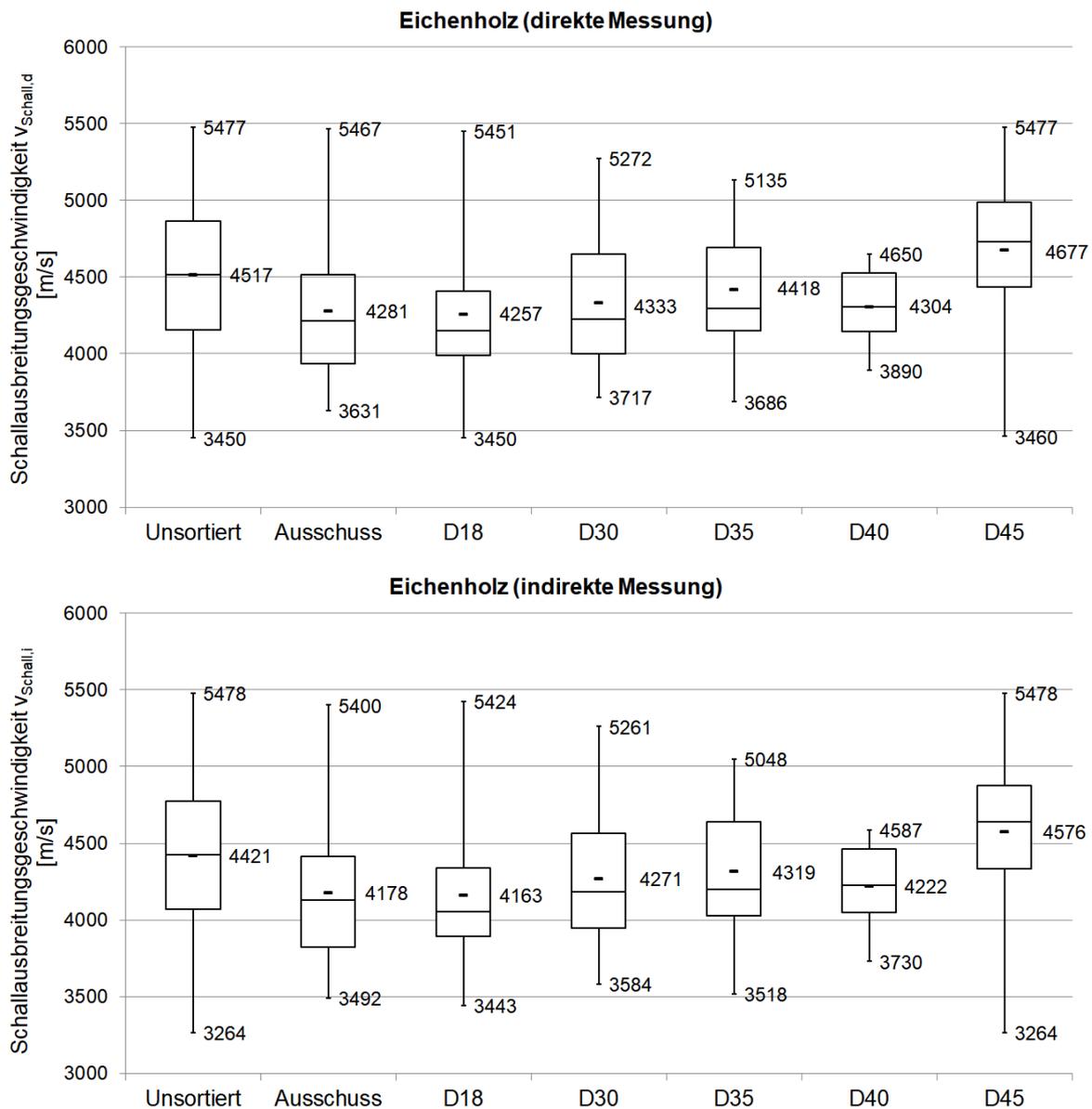


Abbildung 82: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche festgestellten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – Prüfreihe „Fichte“ (oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung)



**Abbildung 83: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche festgestellten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – Prüfreihe „Kiefer“ (oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung)**



**Abbildung 84: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche festgestellten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – Prüfreihe „Eiche“ (oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung)**

Die Wertebereiche der Schallausbreitungsgeschwindigkeit zeigen jedoch auch, dass bei der Differenzierung nach den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 noch eine relativ hohe Deckungsgleichheit zwischen den einzelnen Klassen vorliegt (s. Abbildung 82 bis Abbildung 84).

Die geringe Differenzierung zwischen den Wertebereichen der einzelnen Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 ist auf die Ausprägung der Beziehungen zwischen der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und den Materialkennwerten Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul zurückzuführen. Wie aus Tabelle 31 hervorgeht, sind die Beziehungen unterschiedlich stark ausgeprägt. Während bezüglich des Biege-Elastizitätsmoduls stark ausgeprägte Beziehungen vorliegen, sind die Beziehungen zur Biegefestigkeit und insbesondere zur Rohdichte schwach ausgeprägt. Die charakteristischen Werte der Biegefestigkeit und der Rohdichte waren jedoch bei dem überwiegenden Teil der untersuchten Prüfkörper maßgeblich für die Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016.

**Tabelle 31: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten**

	Beziehung	Fichte	Kiefer	Eiche
Direkte Messung	$\rho_{12} - v_{\text{Schall,d,min}}$	0,007	0,319	0,158
	$\rho_{12} - v_{\text{Schall,d,mean}}$	0,016	0,316	0,159
	$f_{m,12} - v_{\text{Schall,d,min}}$	0,378	0,523	0,697
	$f_{m,12} - v_{\text{Schall,d,mean}}$	0,390	0,517	0,694
	$E_{m,12} - v_{\text{Schall,d,min}}$	0,760	0,761	0,863
	$E_{m,12} - v_{\text{Schall,d,mean}}$	0,776	0,759	0,861
Indirekte Messung	$\rho_{12} - v_{\text{Schall,i,min}}$	0,024	0,441	0,095
	$\rho_{12} - v_{\text{Schall,i,mean}}$	0,007	0,432	0,107
	$f_{m,12} - v_{\text{Schall,i,min}}$	0,375	0,557	0,730
	$f_{m,12} - v_{\text{Schall,i,mean}}$	0,395	0,548	0,726
	$E_{m,12} - v_{\text{Schall,i,min}}$	0,769	0,765	0,870
	$E_{m,12} - v_{\text{Schall,i,mean}}$	0,786	0,765	0,874

### Regressionsanalyse

Wie die in Tabelle 31 dargestellten Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen den gemessenen Werten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten zeigen, liegt abhängig von den betrachteten Holzarten und Materialkennwerten eine unterschiedliche Ausprägung vor.

Während bei Fichtenholz mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,007 \dots 0,024)$  keinerlei signifikante Beziehung zwischen der Rohdichte und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit vorliegt, sind die Beziehungen bei Eichen- und Kiefernholz mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,095 \dots 0,159)$  bzw.  $r = (0,316 \dots 0,441)$  sehr schwach bis schwach ausgeprägt. Hinsichtlich der Biegefestigkeit sind die Beziehungen bei dem untersuchten Fichtenholz mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,375 \dots 0,395)$  vergleichsweise schwach ausgeprägt. In den Prüfreihe „Kiefer“ und „Eiche“ liegen hingegen mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,517 \dots 0,557)$  und  $r = (0,694 \dots 0,730)$  Beziehungen mit mittlere bis starker Ausprägung vor. Die Beziehungen zwischen der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und dem statischen Biege-Elastizitätsmodul sind bei allen drei Holzarten mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,759 \dots 0,874)$  sehr stark ausgeprägt.

Neben der Ausprägung der Beziehung zwischen den Mess- und Zielgrößen ist die Genauigkeit der Aussage über die Zielgrößen maßgeblich für die Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die zerstörungsfreie Ermittlung von Materialeigenschaften und damit für die Festigkeitssortierung.

Anhand der für die in Tabelle 31 aufgeführten Beziehungen ermittelten Regressionsgleichungen ist es möglich, aus den gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeiten die Zielgrößen Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul rechnerisch zu ermitteln. Ergeben sich für die Beziehungen zwischen Mess- und Zielgrößen starke Ausprägungen – d.h. hohe Korrelationskoeffizienten – so ist von einer hohen Genauigkeit der Messmethode auszugehen.

Da es sich bei den untersuchten Beziehungen um direkte Abhängigkeiten zweier Variablen handelt, sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den rechnerischen und versuchstech-

nisch ermittelten Materialkennwerten im gleichen Maße ausgeprägt (vgl. Tabelle 31 mit Tabelle 32).

**Tabelle 32: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen den aus der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit berechneten und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten**

	Beziehung	Fichte	Kiefer	Eiche
Direkte Messung	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,d,min})$	0,007	0,319	0,158
	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,d,mean})$	0,016	0,316	0,159
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,d,min})$	0,378	0,523	0,697
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,d,mean})$	0,390	0,517	0,694
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,d,min})$	0,760	0,761	0,863
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,d,mean})$	0,776	0,759	0,861
Indirekte Messung	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,i,min})$	0,024	0,441	0,095
	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,i,mean})$	0,007	0,432	0,107
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,i,min})$	0,375	0,557	0,730
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,i,mean})$	0,395	0,548	0,726
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,i,min})$	0,769	0,765	0,870
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,i,mean})$	0,786	0,765	0,874

Zusätzlich zur Ausprägung der Beziehungen zwischen den rechnerischen und versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten ist die Abweichung zwischen diesen Werten maßgebend für die Beurteilung der Genauigkeit. Weichen die rechnerischen Kennwerte stark von den tatsächlichen Materialeigenschaften ab, werden diese entweder über- oder unterschätzt. Die sich für die in Tabelle 32 aufgeführten Beziehungen ergebenden Abweichungen sind in der nachfolgenden Tabelle 33 zusammengefasst.

**Tabelle 33: Abweichungen zwischen den aus der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit berechneten und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten**

	Beziehung	rechnerische Abweichung [%] (Minimum ... Mittelwert ... Maximum)		
		Fichte	Kiefer	Eiche
Direkte Messung	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,d,min})$	-40...-1,6...45	-26...-1,1...29	-34...-0,7...19
	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,d,mean})$	-40...-1,6...45	-26...-1,1...29	-34...-0,7...19
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,d,min})$	-469...-15,5...51	-167...-12,4...56	-261...-8,8...49
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,d,mean})$	-460...-15,3...53	-159...-12,5...57	-261...-8,9...49
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,d,min})$	-100...-2,6...54	-126...-3,3...63	-112...-2,2...64
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,d,mean})$	-94...-2,4...48	-122...-3,2...62	-119...-2,3...64
Indirekte Messung	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,i,min})$	-41...-1,6...45	-24...-1,0...30	-35...-0,7...19
	$\rho_{12} - \rho(v_{Schall,i,mean})$	-40...-1,6...45	-25...-1,0...29	-35...-0,7...19
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,i,min})$	-473...-15,5...50	-163...-11,8...52	-235...-8,0...49
	$f_{m,12} - f_m(v_{Schall,i,mean})$	-473...-15,2...53	-156...-11,9...53	-231...-8,2...48
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,i,min})$	-100...-2,5...47	-131...-3,2...53	-101...-2,0...63
	$E_{m,12} - E_m(v_{Schall,i,mean})$	-90...-2,3...47	-121...-3,1...51	-101...-2,0...63

Wie Tabelle 33 zeigt, sind die Abweichungen bezogen auf die Rohdichte am geringsten. Die mittlere Abweichung liegt im Bereich von  $\Delta_{mean} = -(0,7 \dots 1,6) \%$ . Jedoch streuen die

Abweichungen bezogen auf die Einzelwerte zwischen  $\Delta_{\min/\max} = (-41 \dots 45) \%$ . Bezogen auf die Biegefestigkeit und den Biege-Elastizitätsmodul ergeben sich sowohl höhere mittlere Abweichungen als auch deutlich höhere Abweichungen bezogen auf die Einzelwerte.

Ausgehend von den ermittelten Korrelationskoeffizienten und den sich aus den Regressionsbeziehungen ergebenden rechnerischen Abweichungen ist die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zu ungenau, um die Materialeigenschaften von Holzbauteilen allein anhand der Schallausbreitungsgeschwindigkeit zuverlässig zu ermitteln. Dieses Ergebnis lässt sich jedoch anhand des Bruchverhaltens erklären. Der überwiegende Teil der untersuchten Prüfkörper versagte ausgehend von Ästen und Fehlstellen oder durch Abweichungen im Faserverlauf. Derartige lokale Wuchs- und Bauteilmerkmale werden durch die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nicht zuverlässig erfasst (s. a. Abschnitt 0, dort Tabelle 16). Dies wird durch mehrere der bisherigen Untersuchungen und numerische Simulationen bestätigt (s. bspw. [Tobisch/Mittag, 1998], [Niemz/et al., 1999-1/-2], [Scheffler/er al., 2002], [Heinke, 2015], [Reiss, 2016]). Um dieses Defizit der Messmethode zu kompensieren, ist die Kombination der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung mit weiteren Methoden erforderlich. BURMESTER schlug dazu beispielsweise die Messung der Signaldämpfung vor (s. [Burmester, 1967]). Dies erfolgt bei den heutzutage verfügbaren Messgeräten über die Messung der übertragenen elektrischen Spannung (s. bspw. [Sandoz/et al. 2000]).

### ***Ableitung von Klassengrenzwerten für die Schallausbreitungsgeschwindigkeit***

Neben der Berechnung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holzbauteilen aus der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit hat sich in den vergangenen Jahrzehnten eine weitere Herangehensweise etabliert. Dabei wird die gemessene Schallausbreitungsgeschwindigkeit als zusätzliches Sortiermerkmal verwendet (s. [Sandoz, 1989], [Steiger, 1997-1/-2], [Augustin, 1998/2004]). Die Sortierung der Holzbauteile in die Festigkeitsklassen erfolgt dann anhand von Klassengrenzwerten (s. a. Tabelle 18). Diese Grenzwerte sind in den bisherigen Untersuchungen üblicherweise anhand von experimentell abgeleiteten Regressionsbeziehungen und den normativ geregelten Werten des Elastizitätsmoduls ermittelt worden.

Die bisherigen Untersuchungen zur Verwendung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit als Sortierkriterium befassten sich zum überwiegenden Teil nur mit Fichtenholz aus dem Alpenraum (Schweiz: s. [Sandoz, 1989] & [Steiger, 1997-1/-2], Österreich: s. [Augustin, 1998/2004]). Des Weiteren liegen Untersuchungen mit begrenztem Proben- und Klassenumfang an südeuropäischem Kiefernholz vor (s. [Arriaga/et al., 2005]). Systematische Untersuchungen an Eichenholz fehlen bis dato.

Entsprechend der Vorgehensweise der bisherigen Untersuchungen wurden aus den Regressionsbeziehungen zwischen der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit und den in zerstörenden Biegeversuchen ermittelten Werten der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls Grenzwerte abgeleitet. Ziel dieser Betrachtungen ist die Überprüfung und gegebenenfalls Verifizierung der bisherigen Erkenntnisse zur Sortierung anhand der Ultraschallgeschwindigkeit. Die hierfür verwendeten Regressionsgleichungen sind in Tabelle 34 aufgeführt.

**Tabelle 34: Regressionsbeziehungen zwischen der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit sowie dem Biege-Elastizitätsmodul (Korrelationskoeffizienten s. Tabelle 31)**

Beziehung	Fichte	Kiefer	Eiche
$f_{m,12} - v_{Schall,d,min}$	$f_m = 0,02v - 62$	$f_m = 0,03v - 119$	$f_m = 0,03v - 82$
$f_{m,12} - v_{Schall,d,mean}$	$f_m = 0,02v - 69$	$f_m = 0,03v - 121$	$f_m = 0,03v - 81$
$E_{m,12} - v_{Schall,d,min}$	$E_m = 7,94v - 31810$	$E_m = 9,31v - 35464$	$E_m = 7,74v - 21780$
$E_{m,12} - v_{Schall,d,mean}$	$E_m = 8,29v - 34314$	$E_m = 9,44v - 36670$	$E_m = 7,69v - 21764$
$f_{m,12} - v_{Schall,i,min}$	$f_m = 0,02v - 47$	$f_m = 0,03v - 110$	$f_m = 0,03v - 86$
$f_{m,12} - v_{Schall,i,mean}$	$f_m = 0,02v - 58$	$f_m = 0,03v - 116$	$f_m = 0,03v - 87$
$E_{m,12} - v_{Schall,i,min}$	$E_m = 7,24v - 26295$	$E_m = 8,61v - 30304$	$E_m = 7,90v - 21546$
$E_{m,12} - v_{Schall,i,mean}$	$E_m = 7,73v - 29947$	$E_m = 8,92v - 32769$	$E_m = 7,93v - 22125$

Aus Tabelle 34 wird ersichtlich, dass zwischen der direkten und indirekten Messung keine signifikanten Unterschiede bestehen. Mit Hilfe dieser Regressionsbeziehungen und der charakteristischen Werte der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 338:2016 wurden Grenzwerte für die Ultraschallgeschwindigkeit ermittelt. Die Verwendbarkeit und Genauigkeit der abgeleiteten Grenzwerte ist über einen Vergleich mit der Zuordnung über die zerstörend ermittelten Materialkennwerte überprüft worden. Um eine möglichst hohe Übereinstimmung zu erreichen, erfolgte eine empirische Anpassung der abgeleiteten Grenzwerte. Dies führte jedoch nur zu geringfügigen Änderungen. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Tabelle 35 aufgeführt. Als übereinstimmend werden dabei diejenigen Prüfkörper betrachtet, deren Materialqualität durch die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nicht überschätzt wurde. Dabei wurden Grenzwertüberschreitungen von maximal 5 % als vernachlässigbar angesehen.

**Tabelle 35: Übereinstimmung zwischen der Sortierung über die Schallausbreitungsgeschwindigkeit und über die tatsächlichen Materialkennwerte**

Beziehung	Fichte	Kiefer	Eiche
$f_{m,12} - v_{Schall,d,min}$	31,7 %	63,7 %	52,7 %
$f_{m,12} - v_{Schall,d,mean}$	32,3 %	64,3 %	51,3 %
$E_{m,12} - v_{Schall,d,min}$	52,8 %	60,0 %	57,7 %
$E_{m,12} - v_{Schall,d,mean}$	52,8 %	64,0 %	54,4 %
$f_{m,12} - v_{Schall,i,min}$	31,4 %	67,7 %	49,0 %
$f_{m,12} - v_{Schall,i,mean}$	31,7 %	68,0 %	47,7 %
$E_{m,12} - v_{Schall,i,min}$	53,8 %	68,0 %	50,7 %
$E_{m,12} - v_{Schall,i,mean}$	54,8 %	68,0 %	49,3 %

Holzartübergreifend ist festzustellen, dass durch Sortierung anhand der über den Biege-Elastizitätsmodul ermittelten Grenzwerte eine höhere Übereinstimmung erreicht wird als anhand der Biegefestigkeit. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Übereinstimmung zwischen der Sortierung über die Ultraschallgeschwindigkeit und der Zuordnung über die zerstörend ermittelten Materialkennwerte zum Teil vergleichsweise gering ist.

Die zusätzliche Betrachtung der sich über diese Sortierung ergebende Ausbeute im Vergleich zur visuellen Sortierung zeigt einerseits einen deutlich höheren Anteil an Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (> C30/D30 nach DIN EN 338, s. Tabelle 36). Gleichzeitig liegt insbesondere in den Prüfreihen „Fichte“ und „Eiche“ eine geringe Übereinstimmung der

Sortierausbeute vor. Eine zuverlässige Festigkeitsortierung ausschließlich anhand der Schallausbreitungsgeschwindigkeit ist somit nicht zu empfehlen.

**Tabelle 36: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf den zerstörenden Biegeversuchen und der Sortierung anhand der Schallausbreitungsgeschwindigkeit**

Fichtenholz	Festigkeitsklassen nach DIN EN 338					
Zuordnung über...	< C18	C18	C24	C30	C35	C40
Biegeversuch	8 %	16 %	18 %	15 %	12 %	31 %
$f_{m,12} - V_{Schall,d,min}$	0 %	0 %	0 %	1 %	3 %	96 %
$f_{m,12} - V_{Schall,d,mean}$	0 %	0 %	2 %	3 %	7 %	87 %
$E_{m,12} - V_{Schall,d,min}$	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
$E_{m,12} - V_{Schall,d,mean}$	0 %	0 %	0 %	1 %	1 %	98 %
$f_{m,12} - V_{Schall,i,min}$	0 %	8 %	13 %	9 %	19 %	46 %
$f_{m,12} - V_{Schall,i,mean}$	0 %	11 %	9 %	8 %	19 %	48 %
$E_{m,12} - V_{Schall,i,min}$	0 %	12 %	6 %	17 %	15 %	46 %
$E_{m,12} - V_{Schall,i,mean}$	0 %	11 %	10 %	13 %	11 %	50 %
Kiefernholz	Festigkeitsklassen nach DIN EN 338					
Zuordnung über...	< C18	C18	C24	C30	C35	C40
Biegeversuch	7 %	5 %	9 %	9 %	15 %	55 %
$f_{m,12} - V_{Schall,d,min}$	0 %	2 %	5 %	10 %	15 %	68 %
$f_{m,12} - V_{Schall,d,mean}$	0 %	3 %	5 %	10 %	20 %	63 %
$E_{m,12} - V_{Schall,d,min}$	0 %	1 %	5 %	4 %	11 %	80 %
$E_{m,12} - V_{Schall,d,mean}$	0 %	3 %	5 %	8 %	12 %	72 %
$f_{m,12} - V_{Schall,i,min}$	0 %	5 %	6 %	8 %	17 %	61 %
$f_{m,12} - V_{Schall,i,mean}$	0 %	5 %	10 %	7 %	13 %	63 %
$E_{m,12} - V_{Schall,i,min}$	0 %	5 %	4 %	14 %	12 %	63 %
$E_{m,12} - V_{Schall,i,mean}$	0 %	5 %	8 %	7 %	13 %	64 %
Eichenholz	Festigkeitsklassen nach DIN EN 338					
Zuordnung über...	< D18	D18	D30	D35	D40	D45
Biegeversuch	26 %	11 %	6 %	14 %	23 %	20 %
$f_{m,12} - V_{Schall,d,min}$	0 %	2 %	13 %	11 %	0 %	73 %
$f_{m,12} - V_{Schall,d,mean}$	0 %	1 %	12 %	11 %	0 %	76 %
$E_{m,12} - V_{Schall,d,min}$	0 %	9 %	14 %	12 %	11 %	54 %
$E_{m,12} - V_{Schall,d,mean}$	0 %	6 %	12 %	12 %	12 %	58 %
$f_{m,12} - V_{Schall,i,min}$	0 %	14 %	10 %	8 %	7 %	49 %
$f_{m,12} - V_{Schall,i,mean}$	0 %	15 %	6 %	12 %	2 %	51 %
$E_{m,12} - V_{Schall,i,min}$	0 %	15 %	8 %	11 %	3 %	51 %
$E_{m,12} - V_{Schall,i,mean}$	0 %	14 %	8 %	11 %	4 %	51 %

## Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend lässt sich aus den oben beschriebenen Untersuchungen ableiten, dass die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zwar prinzipiell geeignet ist, um Materialeigenschaften von Holzbauteilen zerstörungsfrei zu ermitteln. Dabei handelt es sich jedoch um mittlere Eigenschaften bezogen auf die Gesamtlänge der Bauteile. Lokale Wuchs- und Bauteilmerkmale, die

einen nachweisbaren Einfluss auf das Trag- und Bruchverhalten besitzen, werden dabei nicht erfasst. Daher ist die Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Ermittlung von Materialkennwerten und damit für die Festigkeitssortierung alleinstehend nicht sinnvoll. Der Einsatz in Kombination mit einer Erfassung der visuell messbaren Wuchs- und Bauteilmerkmale und gegebenenfalls anderen zerstörungsfreien/-armen Mess- und Prüfmethode ist – ausgehend von den vorliegenden Untersuchungsergebnissen – denkbar. Hierzu werden in Kapitel 6 weiterführende Untersuchungen beschrieben.

#### 5.2.4. Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit

Die Ergebnisse der grundlegenden Untersuchungen zeigten, dass die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung prinzipiell zur zerstörungsfreien/-armen Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen geeignet ist. Um diese Prüfmethode jedoch im Rahmen einer normenkonformen Methodik zur apparativ unterstützten Festigkeitssortierung nach DIN EN 14081 und DIN 4074 einsetzen zu können, müssen die Messergebnisse wiederholgenau sein. In der DIN 4074-3:2008, Abschnitt 3 wird dazu eine Wiederholgenauigkeit von 95 % gefordert. Dementsprechend darf die Ungenauigkeit der Messmethode nur 5 % bei fünfmaliger Wiederholung der Messung betragen.

Die Wiederholgenauigkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung wurde ergänzend zu den grundlegenden Untersuchungen an separaten Prüfkörpern überprüft (s. Tabelle 37).

**Tabelle 37: Prüfkörper zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit**

Prüfreihe/Holzart	Dimensionen b/h/l [mm]	Anzahl n	Anzahl der Messstellen	
			direkte Messung	indirekte Messung
Fichte	(50/50/750)	25 Stk.	1	2
Kiefer	(50/80/750)	27 Stk.	2	2
Eiche	(50/80/750)	33 Stk.	2	2

Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen wurden wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben durchgeführt. Dabei wurden an jedem Prüfkörper sowohl direkte als auch indirekte Messungen vorgenommen. Insgesamt umfasste die Stichprobe 145 direkte und 170 indirekte Messstellen mit jeweils fünf Messungen in Folge.

Die Wiederholgenauigkeit wurde sowohl für die Schallausbreitungsgeschwindigkeit als auch für die übertragene elektrische Spannung ermittelt, da für die spätere Anwendung in bestehenden Konstruktionen beide Messwerte in Kombination betrachtet werden sollen (s. a. Kapitel 6).

Die Ungenauigkeit bei der Erfassung der oben aufgeführten Kennwerte berechnete sich als prozentuale Abweichung der Messergebnisse der fünf aufeinanderfolgenden Messungen. Dazu wurde jeweils der erste Messwert als Referenzwert angenommen. Die sich ergebenden Messwertabweichungen sind in der Tabelle 38 dargestellt.

**Tabelle 38: Ermittelte Messwertabweichungen**

Prüfreihe	direkte Messung		indirekte Messung	
	Abweichung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit $\Delta v_{\text{schall}} [\%]$	Abweichung der übertragenen elektrischen Spannung $\Delta U_{\text{peak}} [\%]$	Abweichung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit $\Delta v_{\text{schall}} [\%]$	Abweichung der übertragenen elektrischen Spannung $\Delta U_{\text{peak}} [\%]$
Fichte	(0...0,05...1,95)	(0...0,50...5,00)	(0...0,11...2,53)	(0...0,45...5,08) <sup>1)</sup>
Kiefer	(0...0,04...1,68)	(0...0,39...4,96)	(0...0,07...2,07)	(0...0,32...4,86)
Eiche	(0...0,03...1,07)	(0...0,45...4,95)	(0...0,06...2,38)	(0...0,40...4,65)

<sup>1)</sup> Der Grenzwert von 5 % nach DIN 4074-3:2008, Abschnitt 3 wird nur an einer Messstelle überschritten. Bleibt dieser Einzelwert unberücksichtigt, ergibt sich eine maximale Messwertabweichung von 5,0 %.

Aus Tabelle 38 geht hervor, dass die Messwertabweichung bezogen auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit Maximalwerten von  $\Delta_{\text{max}} = (1,07 \dots 2,53) \%$  deutlich unter dem Grenzwert nach DIN 4074-3:2008, Abschnitt 3 von  $\Delta_{\text{lim}} = 5 \%$  liegt. Hinsichtlich der übertragenen elektrischen Spannung ergeben sich höhere Messwertabweichungen. Die maximale Abweichung liegt im Bereich von  $\Delta_{\text{max}} = (4,65 \dots 5,08) \%$  und entspricht damit etwa der maximalen Messwertabweichung nach DIN 4074-3:2008, Abschnitt 3 bzw. überschreitet diese um 0,08 %-Punkte. Die festgestellte Überschreitung wurde jedoch nur bei einer Messstelle festgestellt. Bei den übrigen Messstellen war keine Überschreitung des Grenzwertes zu verzeichnen. Dieser Einzelfall kann daher als tolerierbar betrachtet werden.

Insgesamt ist damit festzustellen, dass die Anforderungen der DIN 4074-3:2008, Abschnitt 3 hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit von der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung erfüllt werden.

### 5.3. Untersuchungen zur Verwendbarkeit von Bohrkernproben für die Festigkeitssortierung von Bauholz

#### 5.3.1. Gegenstand und Ziel der Untersuchungen

Die Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zeigten, dass sich diese Prüfmethode prinzipiell eignet, um die Materialeigenschaften von Holzbauteilen zerstörungsfrei zu ermitteln. Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der globalen Steifigkeit (d.h. statischer Biege-Elastizitätsmodul), welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften aufweist. Die Ergebnisse zeigen jedoch ebenfalls, dass eine alleinstehende Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nicht die erforderliche Aussagegenauigkeit aufweist, um die Materialeigenschaften zuverlässig zu ermitteln. Wesentliche, die Tragfähigkeit von Holzbauteilen beeinflussende Wuchs- und Bauteilmerkmale werden durch die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nicht erfasst und müssen gesondert aufgenommen werden.

Neben maßgeblichen Wuchsmerkmalen, wie beispielsweise die Ästigkeit sowie Abweichungen vom Faserverlauf, besitzt auch die Rohdichte einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften (s. bspw. Abbildung 11 in Abschnitt 2.3). Bisherige Untersuchungen zeigten, dass beispielsweise die Rohdichte auf demselben Niveau mit der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit korreliert, wie etwa die Ästigkeit. Bei einer Kombination der

Merkmale Ästigkeit und Rohdichte verbessert sich die Korrelation deutlich (vgl. Tabelle 4 in Abschnitt 2.3). Daraus resultieren eine höhere Aussagegenauigkeit und -zuverlässigkeit bei der Abschätzung der Festigkeitseigenschaften. Durch Hinzunahme des dynamischen Elastizitätsmoduls, der aus der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der Rohdichte errechnet werden kann, wird eine noch stärkere Korrelation zu den Festigkeitseigenschaften erreicht.

Die Rohdichte wird bei der Untersuchung von Holzbauteilen im Labor üblicherweise gravimetrisch an Probestücken in unmittelbarer Nähe zum Bruch ermittelt (vgl. [DIN EN 408:2012]). Dieses Vorgehen ist bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen nicht möglich. Hier können nur Methoden zur zerstörungsfreien oder -armen Ermittlung der Rohdichte zum Einsatz kommen. Bisherige Untersuchungen zeigen einen engen Zusammenhang zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und Normprüfkörpern (s. bspw. Abbildung 35 in Abschnitt 4.2).

Zur Überprüfung der Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen wurden eigene vergleichende Materialversuche durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen war zum einen die qualitative und quantitative Bewertung der Anwendbarkeit von Bohrkernproben zur Ermittlung der Rohdichte von Holzbauteilen im eingebauten Zustand. Zum anderen sollten Betrachtungen zur erforderlichen Probenanzahl geführt werden. Hierzu wurden nach Beendigung der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Untersuchungen Bohrkernproben aus den Biegeprüfkörpern entnommen.

Die Entnahme der Bohrkernproben erfolgte so, dass die dazu verwendeten Probestücke frei von Ästen, Rissen oder Brüchen waren. Je Biegeprüfkörper wurde ein Probestück mit einer Länge von  $l \geq 300$  mm in unmittelbarer Nähe des Bruches entnommen und anschließend in jeweils zwei Lamellen mit einem Nenn-Querschnitt von  $b/h \approx (50/25)$  mm zur Herstellung der Bohrkernproben sowie in eine Lamelle mit einem Nenn-Querschnitt von  $b/h \approx (50/30)$  mm aufgeteilt. Letztere ist für die Untersuchung weiterer zerstörungsfreier Prüfmethode zur Rohdichtermittlung vorgesehen (Eindringtiefmessung, s. dazu Abschnitt 5.4). Um eine direkte Vergleichbarkeit der Untersuchungen an Bohrkernen und mit der Eindringtiefmessung zu ermöglichen, wurden die Probestücke vor Zuschneid der Lamellen in jeweils sechs Probenabschnitte mit einer Länge von  $l \approx (45 \dots 50)$  mm unterteilt. Aus jedem Abschnitt wurde anschließend ein Bohrkern mit einem Durchmesser von  $\varnothing 15$  mm und einer Länge von  $l_{BK} \approx 20$  mm mit Hilfe eines handelsüblichen Zapfenbohrers entnommen (s. a. Abbildung 85).

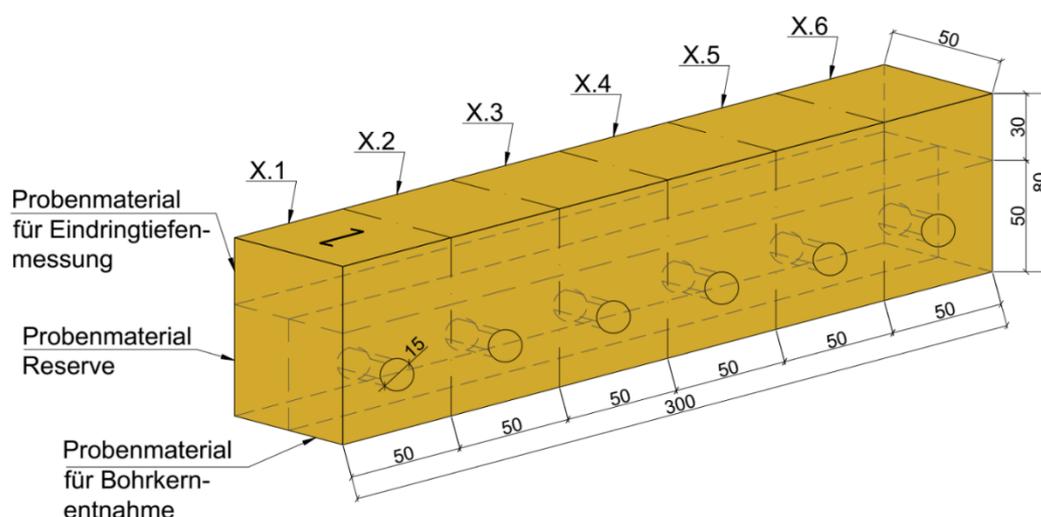


Abbildung 85: Aufteilung der Probenabschnitte und Entnahme der Bohrkernproben (eigene Darstellung)

Zum Teil war die Entnahme von Probestücken aus den Biegeprüfkörpern aufgrund ihres Versagensbildes nur mit einer Länge von  $l < 300$  mm möglich. Diese wurden in jeweils drei bis fünf Abschnitte aufgeteilt. Mehrere Prüfkörper wiesen derart umfängliche Brüche und Zerstörungen auf, dass keine Probestücke entnommen werden konnten. Die gesamte Probenanzahl ergab sich zu 707 Lamellen mit jeweils 3...6 Bohrkernproben und verteilt sich wie nachfolgend aufgelistet auf die jeweiligen Prüfreiheiten:

- Prüfreiheit „Fichte“: 262 Lamellen mit 3...6 Bohrkernproben
- Prüfreiheit „Kiefer“: 217 Lamellen mit 4...6 Bohrkernproben
- Prüfreiheit „Eiche“: 228 Lamellen mit 3...6 Bohrkernproben

### 5.3.2. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Durchführung der nachfolgend beschriebenen, eigenen vergleichenden Materialuntersuchungen zur Rohdichtebestimmung erfolgte an der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (UG), Eberswalde im Rahmen einer studentischen Forschungsarbeit an der HNEE Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde (s. [Fritz, 2019-2]).

Die Ermittlung der Rohdichte an den Bohrkernproben erfolgte gravimetrisch in Anlehnung an DIN EN 408:2012, Abschnitt 7 und DIN 52182:1796 durch Aufnahme von Volumen und Masse der Bohrkernproben.

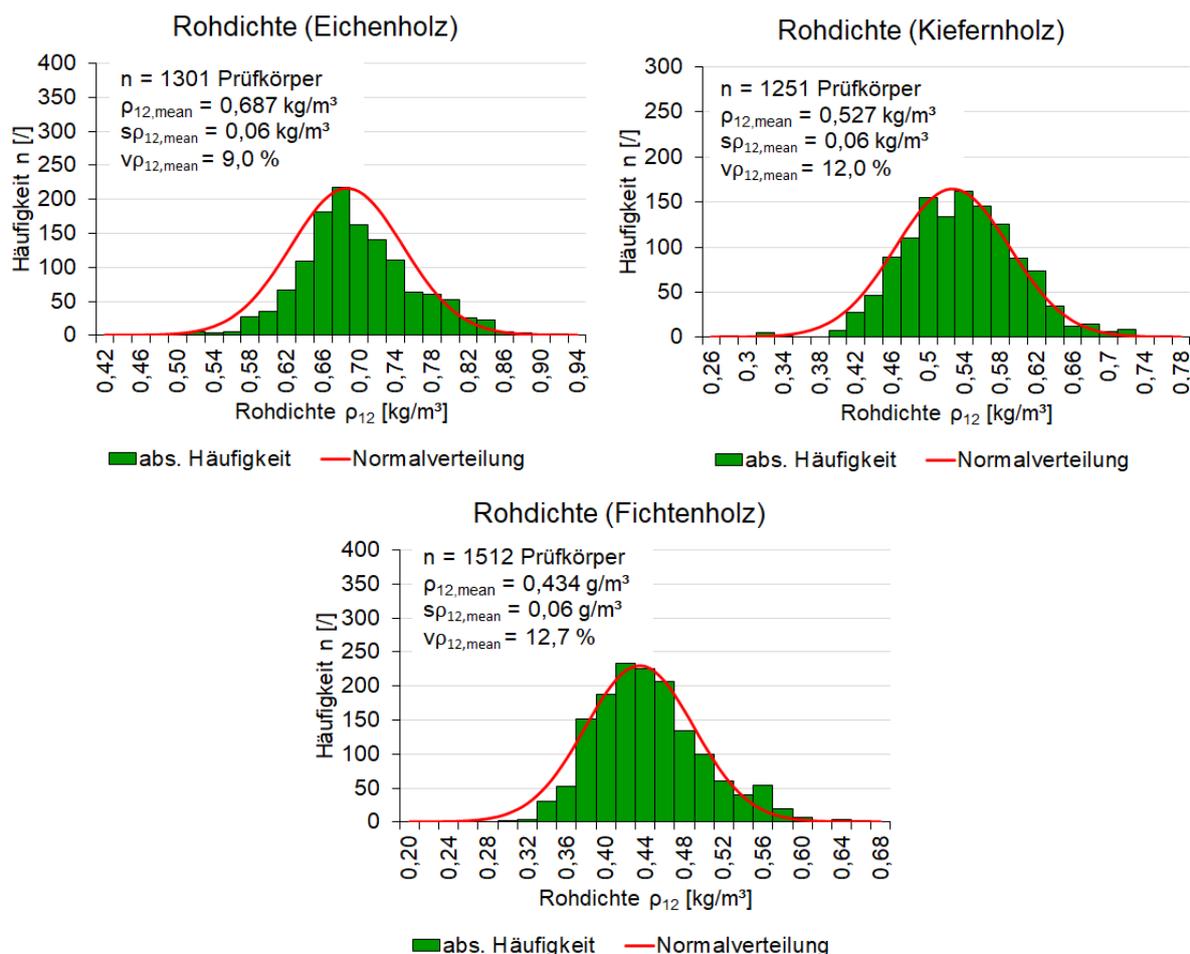
Versuchsbegleitend wurde die Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1:2002 ermittelt. Dies erfolgte im Zusammenhang mit den vergleichenden Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Eindringtieftmessung (s. dazu Abschnitt 5.4), da die Prüfkörper in unmittelbarer Nähe aus den Probestücken entnommen wurden.

### 5.3.3. Ergebnisse und Auswertung

Die im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1:2002 ermittelte Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper lag im Bereich von  $\omega \approx (6...14)$  % und weicht somit von der in DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.3.1 angeführten Bezugsholzfeuchte von  $\omega_{ref} = 12$  % ab. Dementsprechend wurden die ermittelten Werte der Rohdichte in Anlehnung an DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.4.2 auf eine Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12$  % umgerechnet. Die Umrechnung erfolgte wie in Gl. 21 dargestellt (s. Abschnitt 5.2.3, S. 114). Anschließend erfolgte die Überprüfung der Versuchsergebnisse hinsichtlich etwaiger Ausreißer (Ausreißertest nach GRUBBS). Dabei wurden keine Ausreißer festgestellt. Abbildung 86 zeigt die entsprechenden Verteilungen. Die Lage- und Streuparameter der Versuchsergebnisse sind in Tabelle 39 dargestellt.

**Tabelle 39: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der Bohrkern-Rohdichte**

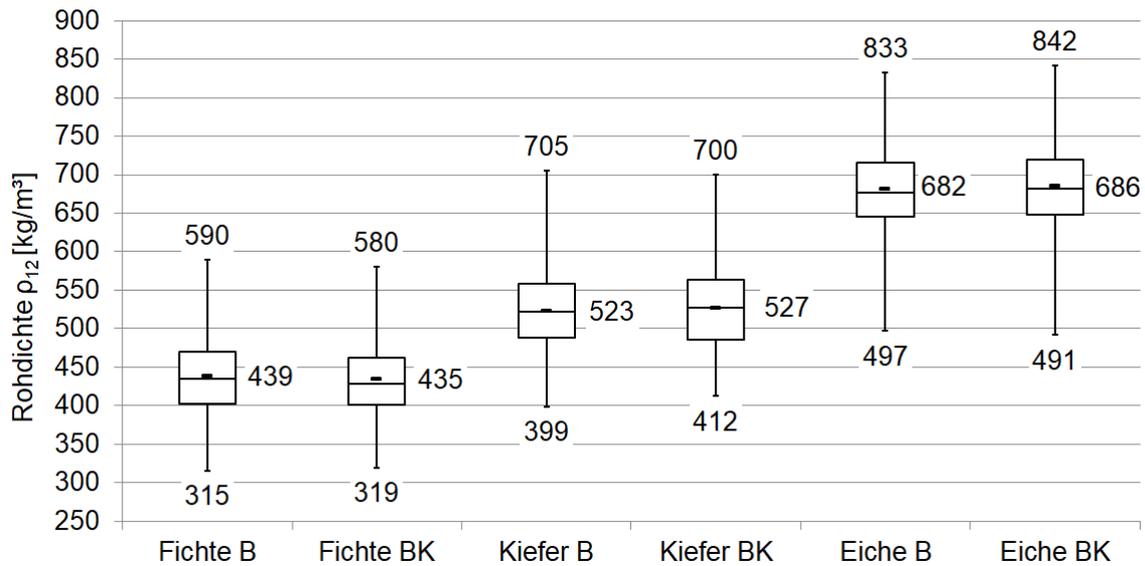
	Prüfreiheit		
	Fichte	Kiefer	Eiche
Anzahl n [l]	1512	1251	1301
Minimum $\rho_{12,min}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,296	0,275	0,476
Mittelwert $\rho_{12,mean}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,434	0,527	0,687
Maximum $\rho_{12,max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,646	0,747	0,917
Standardabweichung $s_{\rho_{12,min}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,055	0,063	0,062
Variationskoeffizient $v_{\rho_{12,min}}$ [%]	12,7	12,0	9,0
5%-Quantil-Wert $\rho_{12,05}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,358	0,428	0,592



**Abbildung 86: Verteilung der an Bohrkernproben ermittelten Rohdichte – oben links: Prüfreihe „Fichte“; oben rechts: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe Eiche**

Abbildung 87 zeigt einen Vergleich zwischen den Wertebereichen der an den Bohrkernproben sowie im Zuge der zerstörenden Biegeversuche ermittelten Mittelwerte der Rohdichten<sup>12</sup>. Daraus wird ersichtlich, dass die Rohdichte der Prüfkörper in Bauteildimension und die der Bohrkernproben eine deutliche Übereinstimmung zeigen. Die Mittelwerte der Rohdichte weichen abhängig von der untersuchten Holzart nur um  $\Delta\rho_{12,mean} = \pm 4 \text{ kg/m}^3$  voneinander ab. Dies entspricht einer Differenz von  $\Delta\rho_{12,mean} \approx (0,6 \dots 0,9) \%$ . Bezogen auf die Extremwerte betragen die Abweichungen  $\Delta\rho_{12,min/max} = (-10 \dots +13) \text{ kg/m}^3 \approx (0,7 \dots 3,3) \%$ .

<sup>12</sup> Im Folgenden als Referenzrohddichte bezeichnet



**Abbildung 87: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe)**

Die sich aus den ermittelten Rohdichten ergebenden Verhältniszerte sind in Tabelle 40 dargestellt. Diese ergeben sich jeweils als Quotient aus den Mittelwerten beziehungsweise den 5%-Quantilwerten der Rohdichte (s. Gl. 25 und Gl. 26).

$$k_{\rho, \text{mean}} = \rho_{\text{BT,mean}} / \rho_{\text{BK,mean}} \quad \text{Gl. 25}$$

$$k_{\rho, 05} = \rho_{\text{BT},05} / \rho_{\text{BK},05} \quad \text{Gl. 26}$$

mit:  $k_{\rho, \text{mean}}$  ... Verhältniszert der Mittelwerte der Rohdichte;  $\rho_{\text{BT,mean}}$  ... Mittelwert der Rohdichte aus Versuchen an Prüfkörpern in Bauteildimension;  $\rho_{\text{BK,mean}}$  ... Mittelwert der Rohdichte aus Versuchen an Bohrkernproben;  $k_{\rho, 05}$  ... Verhältniszert der 5%-Quantilwerte der Rohdichte;  $\rho_{\text{BT},05}$  ... 5%-Quantilwert der Rohdichte aus Versuchen an Prüfkörpern in Bauteildimension;  $\rho_{\text{BK},05}$  ... 5%-Quantilwert der Rohdichte aus Versuchen an Bohrkernproben

**Tabelle 40: Verhältniszerte der Rohdichte**

Verhältniszert	Fichte	Kiefer	Eiche
für Mittelwerte $k_{\rho, \text{mean}}$	1,01	0,99	0,99
für 5%-Quantilwerte $k_{\rho, 05}$	1,00	1,01	1,00

Der Vergleich zwischen den in Tabelle 40 aufgeführten Verhältniszerte mit den verfügbaren Literaturangaben zeigt, dass die sich aus den eigenen Untersuchungen ergebenden Verhältniszerte in dem anhand der Literatur zu erwartenden Bereich liegen (vgl. dazu Tabelle A. 2 in Anlage 2).

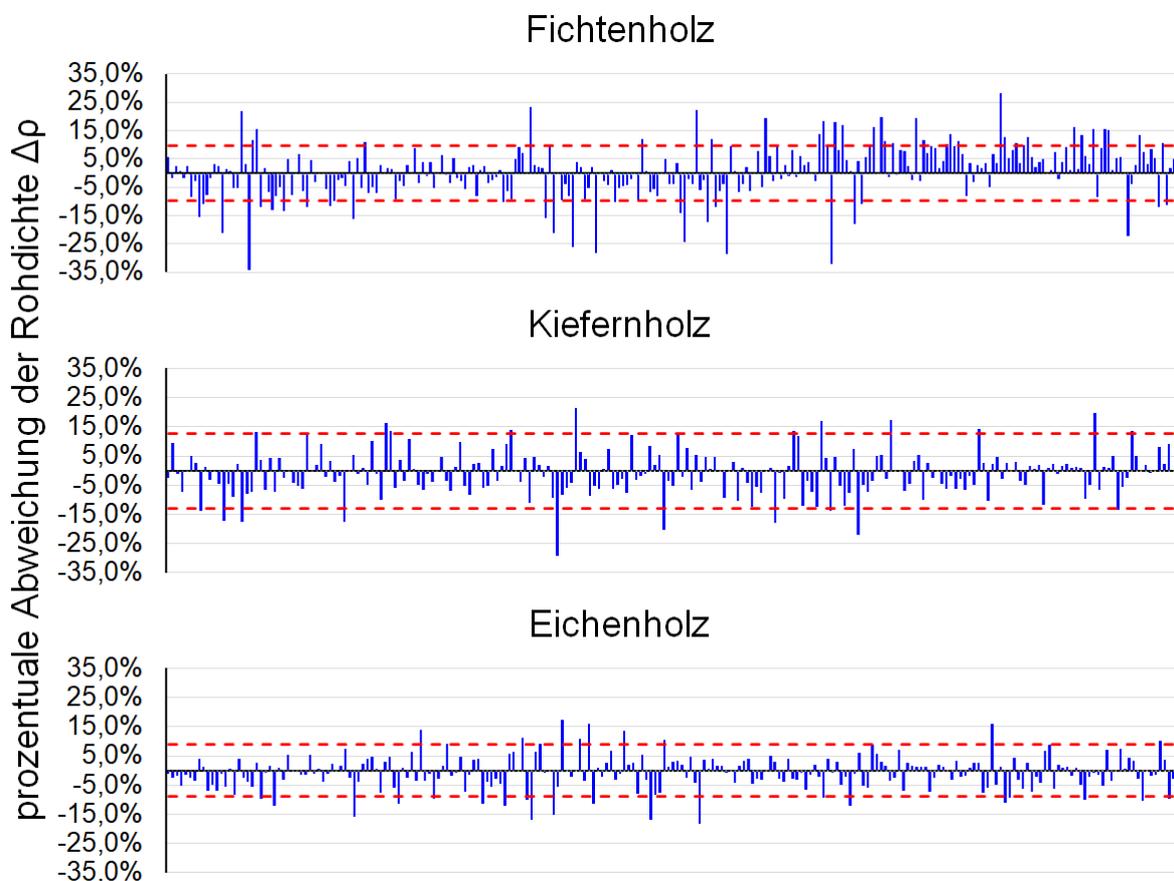
Die festgestellte hohe Übereinstimmung der an Bohrkernproben ermittelten Rohdichte und der Referenzrohddichte deutet auf eine hohe Aussagegenauigkeit der Bohrkernproben hin. Der Vergleich der Kennwerte der einzelnen Prüfkörper zeigt zum Teil deutlich höhere Abweichungen (s. a. Tabelle 41).

**Tabelle 41: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper**

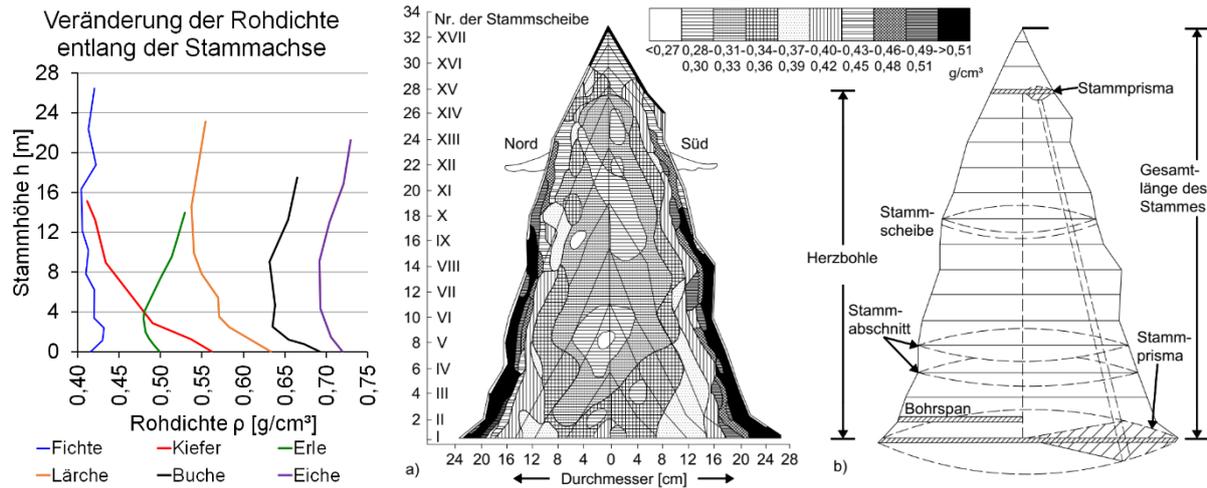
	Fichte	Kiefer	Eiche
Minimale Abweichung $\Delta_{\min}$ [%]	-34,3	-29,4	-18,3
Mittlere Abweichung $\Delta_{\text{mean}}$ [%]	+0,4	-1,0	-0,8
Maximale Abweichung $\Delta_{\max}$ [%]	+28,2	+21,3	+17,5

Aus Tabelle 41 wird ersichtlich, dass die Rohdichte der Bohrkernproben je nach Holzart um  $\Delta \approx (-34 \dots +28)$  % von der Referenzrohddichte abweicht. Dabei treten in der Prüfreihe „Fichte“ die größten betragsmäßigen Abweichungen auf. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Abweichungen keinem einheitlichen Trend folgen. Es treten etwa im gleichen Maße Abweichungen in den positiven und negativen Bereich auf (s. a. Abbildung 88).

Die Ursache für die festgestellten Abweichungen ist vor allem in den wuchsbedingten Streuungen der Rohdichte zu sehen. Dabei streut die Rohdichte nicht nur innerhalb einer Holzart, d.h. zwischen Stämmen gleicher Holzart eines oder verschiedener Standorte, sondern auch innerhalb eines Stammes. Neben Faktoren wie der Holzfeuchte sowie den Wuchs- und Standortbedingungen beeinflussen vor allem die Jahrringstruktur (d.h. die Jahrringbreite, Früh- und Spätholzanteil) die Rohdichte einer Holzprobe. Proben mit hohem Spätholzanteil besitzen eine höhere Dichte als Proben mit hohem Frühholzanteil (s. a. [Kollmann, 1982]). Darüber hinaus besitzt auch die Lage der Probe im Stamm beziehungsweise im Holzbauteil einen Einfluss auf die messbare Rohdichte. Dies betrifft sowohl die Lage relativ zur Markröhre als auch die Lage bezogen auf die Stammhöhe beziehungsweise Bauteillänge (s. bspw. Abbildung 89).



**Abbildung 88: Abweichungen der Rohdichte (in rot: Variationskoeffizient nach DIN 68364:2003)**



**Abbildung 89: Dichteunterschiede innerhalb eines Stammes – links: Veränderung entlang der Stammachse für verschiedene Holzarten (eigene Darstellung nach [Kollmann, 1982]); rechts: Dichteunterschiede in einem Kiefernstamm (nach [Niemz/Sonderegger, 2017])**

Die festgestellten Abweichungen sind dabei keineswegs unüblich. Bereits in eigenen Voruntersuchungen zur Bestimmung der Rohdichte von Holzbauteilen anhand von Bohrkernproben sind bei Prüfkörpern aus Fichten- und Kiefernholz ebenfalls Abweichungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohichte von  $\Delta \approx (-33 \dots +26) \%$  für Fichtenholz und  $\Delta \approx (-15 \dots +20) \%$  für Kiefernholz festgestellt worden (s. [Rug/Linke, 2016]). Der Versuchsaufbau stimmte im Wesentlichen mit den hier beschriebenen Untersuchungen überein – d.h. Entnahme von Bohrkernproben aus zerstörend geprüften Biegeprüfkörpern in Bauteildimension. Auch hier sind die Abweichungen auf die Schwankungen der Rohdichte innerhalb des Holzbauteiles zurückzuführen, da die Proben zur Bestimmung der Bohrkern- und Referenzrohichte nicht in unmittelbarer Nähe entnommen wurden. Ist dies der Fall, ergeben sich deutlich geringere Abweichungen, wie die Auswertung der Untersuchungsergebnisse vorangegangener Untersuchungen zeigen (s. Tabelle 42).

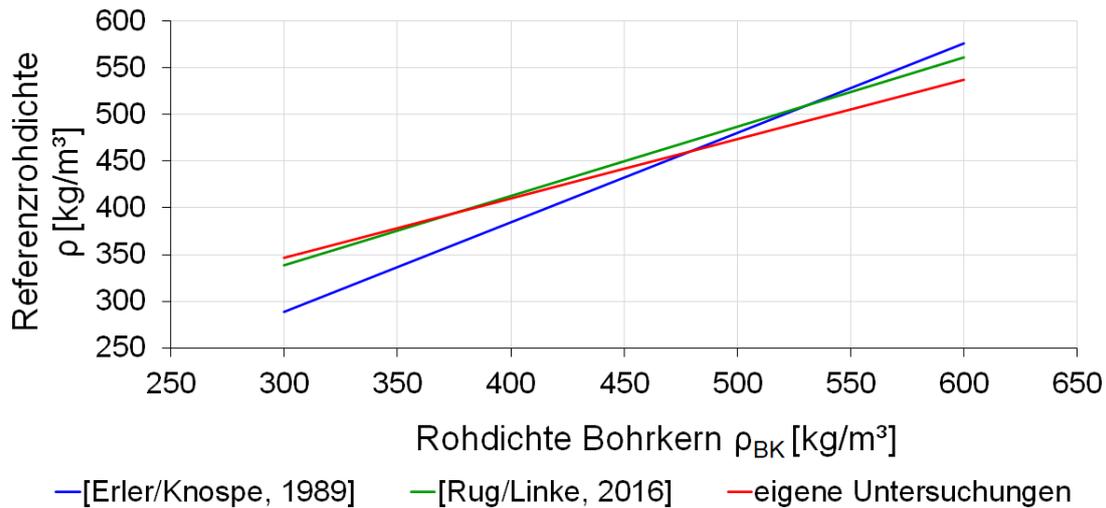
**Tabelle 42: Abweichungen der Rohdichte aus Voruntersuchungen an kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern und Bohrkernproben (nach [Rug/Linke, 2016])**

	Fichte	Kiefer	Eiche
Minimale Abweichung $\Delta_{\min}$ [%]	-9,3	-0,7	-2,2
Mittlere Abweichung $\Delta_{\text{mean}}$ [%]	+1,3	+3,3	-0,02
Maximale Abweichung $\Delta_{\max}$ [%]	+7,6	+9,1	+2,3

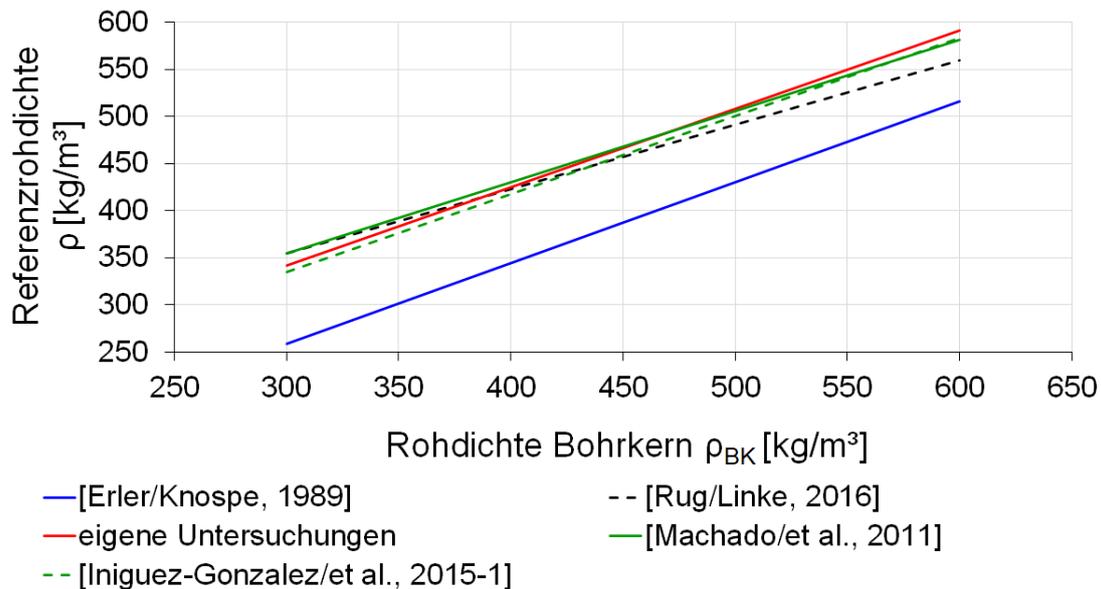
Die deutlichen Differenzen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohichte schränken die Aussagefähigkeit von Bohrkernproben deutlich ein. Dies zeigt sich auch in der Ausprägung der Beziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohichte. Mit Korrelationskoeffizienten von  $r = (0,666 \dots 0,772)$  entspricht diese tendenziell den verfügbaren Literaturangaben (s. Tabelle 43 und Abbildung 92 bis Abbildung 92). Eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den Rohdichten der unterschiedlichen Prüfkörperarten ist dadurch jedoch nicht gegeben.

**Tabelle 43: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit ausgewählten Literaturangaben**

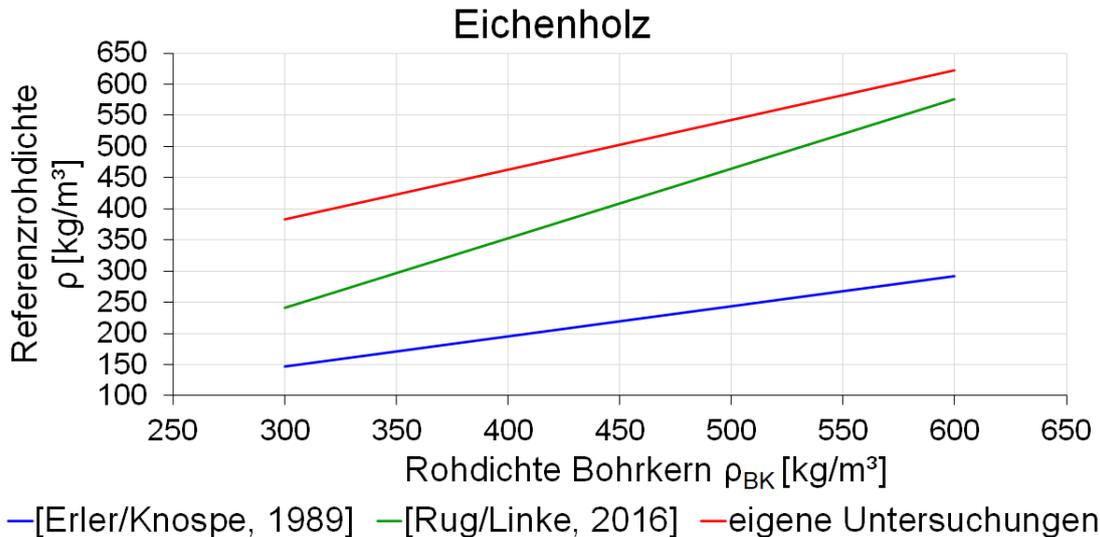
	Fichte	Kiefer	Eiche
aus eigenen Untersuchungen	0,666	0,772	0,760
[Erlor/Knospe, 1989]	0,53	0,87	0,70
[Rug/Seemann, 1989-2]	0,94 (holzartenunabhängig)		
[Machado/et al., 2011]	-	0,787	-
[Iniguez-Gonzalez/er al., 2015-1]	-	0,894	-
[Rug/Linke, 2016]	0,665	0,745	0,768



**Abbildung 90: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte im Vergleich zu Literaturangaben – für Fichtenholz**



**Abbildung 91: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte im Vergleich zu Literaturangaben – für Kiefernholz**



**Abbildung 92: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohndichte im Vergleich zu Literaturangaben – für Eichenholz**

Zur zuverlässigen Ermittlung der Rohdichte von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist eine zusätzliche Absicherung der Messergebnisse erforderlich. In den bisherigen Untersuchungen wurden dafür üblicherweise die Verhältniswerte der Mittel- und 5%-Quantilwerte der Rohdichten verwendet (vgl. Tabelle 19 in Abschnitt 4.2.2 und Tabelle A. 2 in Anlage 2). Alternativ ist die Berechnung der Rohdichte anhand von Regressionsgleichungen möglich. Dies führt jedoch nicht zu einer Reduzierung der Abweichungen, wie aus Tabelle 44 ersichtlich wird.

**Tabelle 44: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper nach Umrechnung anhand der Verhältniswerte in Tabelle 40**

	Fichte	Kiefer	Eiche
ohne Umrechnung	(-34,3...0,4...28,2) %	(-29,4...-1,0...21,3) %	(-18,3...-0,8...17,5) %
Umrechnungsfaktor $K_{\rho, \text{mean}}$	(-35,5...-0,5...27,5) %	(-30,6...-1,9...20,6) %	(-19,4...-1,8...16,7) %
Umrechnungsfaktor $K_{\rho, 05}$	(-33,8...0,8...28,4) %	(-29,0...-0,6...21,6) %	(-17,9...-0,5...17,8) %
Regressions- beziehung	(-31,4...0,7...26,0) %	(-28,0...-1,8...17,8) %	(-17,0...-1,5...15,2) %

Unabhängig von den teilweise hohen Abweichungen ist jedoch ersichtlich, dass der überwiegende Teil der untersuchten Prüfkörper prozentuale Abweichungen zur Referenzrohndichte aufweist, die innerhalb der in DIN 68364:2003 angegebenen Streuung liegen (s. a. Abbildung 88). Der Anteil der Prüfkörper, die diese Grenzwerte überschreiten liegt bei den untersuchten Holzarten bei  $p \approx 24$  % (Prüfreihe „Fichte“),  $p \approx 10$  % (Prüfreihe „Kiefer“) und  $p \approx 13$  % (Prüfreihe „Eiche“). Des Weiteren ist bei genauerer Betrachtung festzustellen, dass die aus den Versuchsergebnissen resultierenden Abweichungen nur einen geringen Einfluss auf die Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 besitzen. Aus Abbildung 93 wird ersichtlich, dass sich die Verteilungen des Probenmaterials auf die Festigkeitsklassen nur unwesentlich unterscheiden. Hinsichtlich einer globalen Bewertung der untersuchten Prüfkörper ist somit eine zuverlässige Aussage möglich.

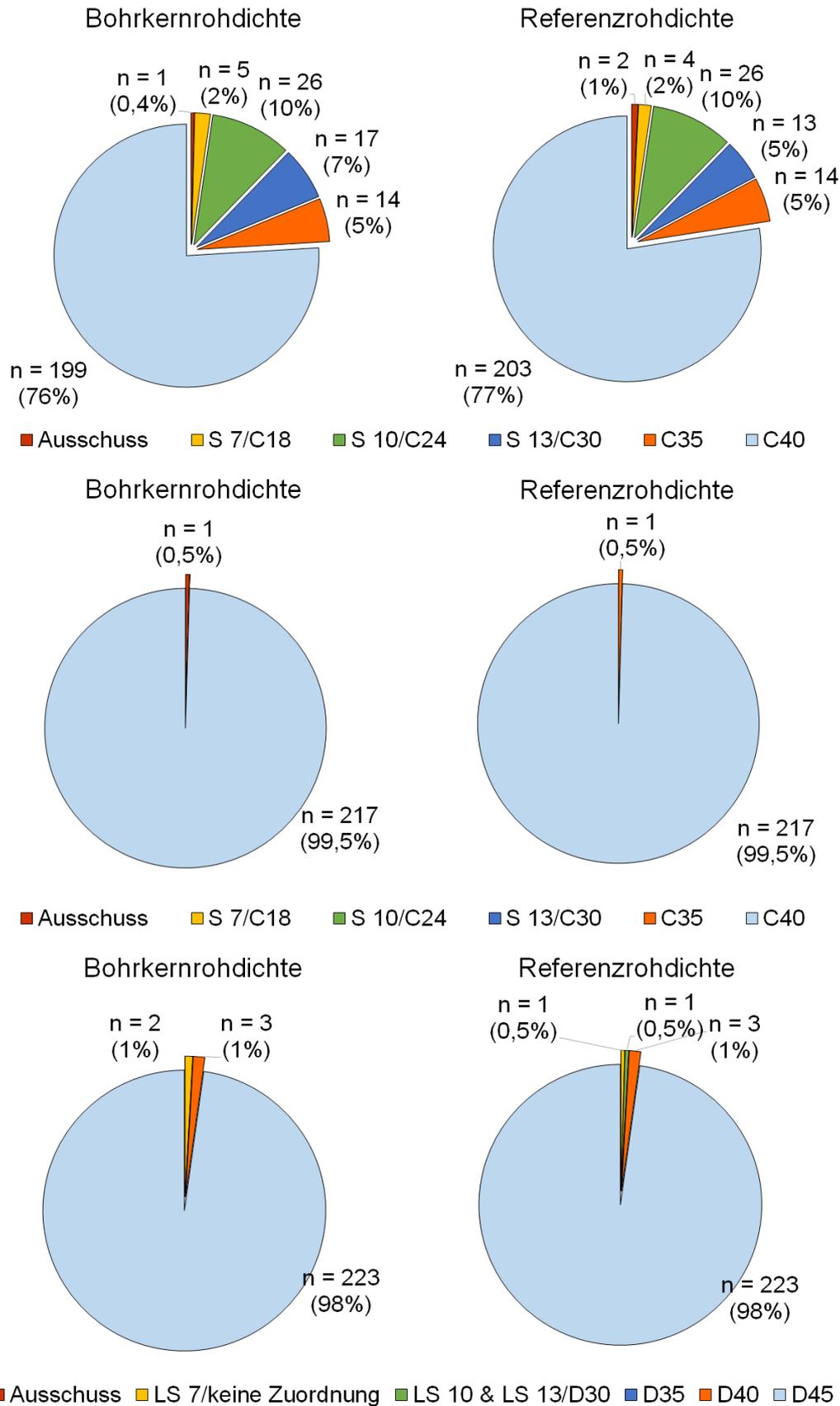
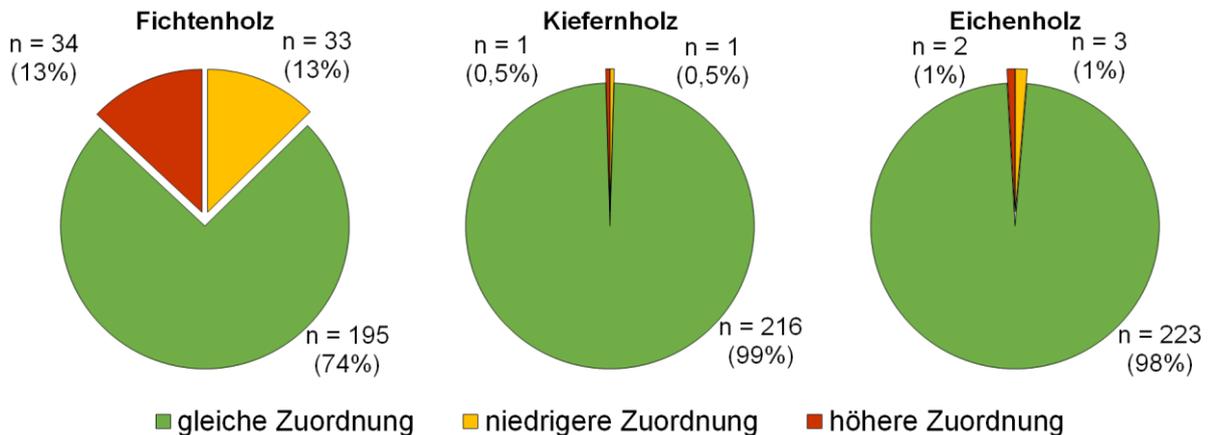


Abbildung 93: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohndichte – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“

Der Anteil der Prüfkörper, für die sich gleiche Zuordnung anhand der Bohrkern- und Referenzrohndichte ergab, variiert je nach untersuchter Holzart (s. Abbildung 94). Während in der Prüfreihe „Fichte“ für 195 Prüfkörper ( $p = 74\%$ ) die gleiche Zuordnung anhand der Bohrkern- und der Referenzrohndichte getroffen wurde, wurden 33 Prüfkörper ( $p = 13\%$ ) unterschätzt sowie weitere 34 Prüfkörper ( $p = 13\%$ ) überschätzt. Bei den Prüfreiheiten „Kiefer“ und „Eiche“ ergibt sich ein deutlicheres Bild. Für annähernd die gesamte Stichprobe ( $p = 99\%$  bzw.  $p = 98\%$ ) ergab sich eine Übereinstimmung der Zuordnung. Lediglich ein Anteil von  $p = (0,5 \dots 1,0)\%$  wurde jeweils unter- bzw. überschätzt.



**Abbildung 94: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und basierend auf der Referenzrohndichte**

Maßgeblich für die Bewertung der Fehleinschätzung ist die Differenz zu dem Grenzwert der („Ziel“-<sup>13</sup>)Festigkeitsklasse. In der Prüfreihe „Fichte“ ergaben sich prozentuale Abweichungen von bis zu  $\Delta_{\max} = 7,8\%$  bezüglich der Unterschätzung und  $\Delta_{\max} = 22,5\%$  bezüglich der Überschätzung. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich nur bei jeweils etwa einem Drittel der betreffenden Prüfkörper prozentuale Abweichungen von  $\Delta > 5\%$  ergaben. Bei dem untersuchten Kiefern- und Eichenholz betrug die prozentuale Abweichung  $\Delta_{\max} = 8,6\%$  und  $\Delta_{\max} = 8,4\%$  hinsichtlich der Unterschätzung sowie  $\Delta_{\max} = 10,5\%$  und  $\Delta_{\max} = 8,3\%$  bezüglich der Überschätzung.

Zusammenfassend lässt sich aus den Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Bohrkernproben für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ableiten, dass diese zerstörungsarme Prüfmethode grundlegend zur Erfassung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen geeignet ist. Aufgrund der durch die natürlichen Streuungen der Rohdichte bedingten Abweichungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der nach DIN EN 408 ermittelten Referenzrohndichte der Holzbauteile ist eine unmittelbare Anwendung zur quantitativen Erfassung der Rohdichte in Anlehnung an DIN EN 408 nicht zu empfehlen. Die Bohrkernproben können jedoch genutzt werden, um eine qualitative Aussage über die Rohdichte der Holzbauteile zu treffen. Um dennoch quantitative Aussagen über die Materialeigenschaften von Holzbauteilen treffen zu können, ist eine Kombination der Bohrkernproben mit weiteren zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode erforderlich. Hierzu werden in Kapitel 6 weiterführende Untersuchungen beschrieben.

<sup>13</sup> Gemeint ist damit der Grenzwert der Festigkeitsklasse nach DIN EN 338, zu welcher der betreffende Prüfkörper anhand der Referenzrohndichte zugeordnet werden kann.

### 5.3.4. Untersuchungen zur erforderlichen Probenanzahl

Die Entnahme von Bohrkernproben ist ein – wenn auch nur lokal begrenzter – Eingriff in die Holzsubstanz und ruft damit eine zusätzliche Strukturstörung hervor. Insbesondere bei denkmalgeschützten Konstruktionen ist daher meist eine umfangreiche Beprobung nicht möglich. Ebenso führen auch ökonomische Aspekte zu einer Begrenzung des Probenumfangs. Eine Begrenzung des Probenumfangs kann jedoch zu einer deutlichen Reduzierung der Zuverlässigkeit der Prüfmethode führen (s. Abbildung 95).

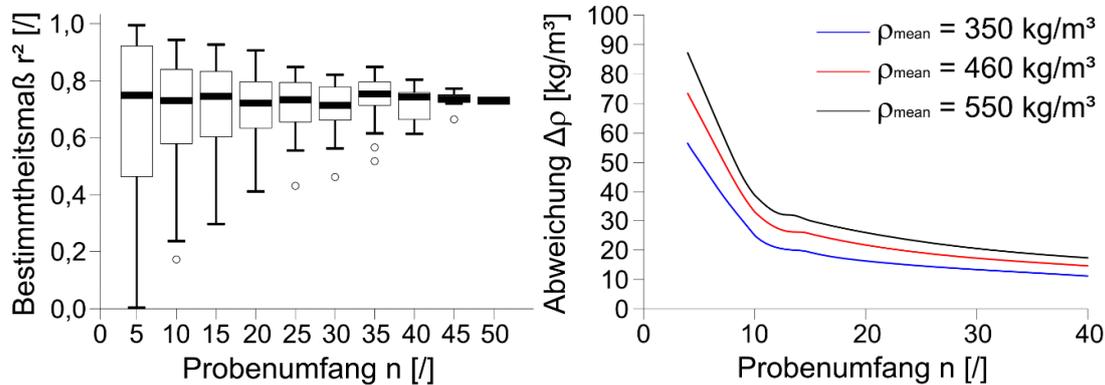


Abbildung 95: Einfluss des Probenumfangs auf die Zuverlässigkeit von Bohrkernproben (links: aus [Machado, 2013], dort Bild 4; rechts: aus [Machado, 2015], dort Bild 2)

Zur Bewertung des Einflusses des Probenumfangs auf die Aussagefähigkeit und Zuverlässigkeit der Rohdichtebestimmung anhand von Bohrkernproben wurden ergänzende Betrachtungen mit reduziertem Probenumfang geführt. Dies erfolgte als Gegenüberstellung der Mittelwerte der Rohdichte jeweils für  $n = (6 \dots 5 \dots 4 \dots 3)$  Bohrkernproben und der Referenzrohddichte.

Bei der Betrachtung der Wertebereiche der Rohdichte zeigt sich, dass trotz Reduzierung des Probenumfangs keine signifikante Veränderung zu verzeichnen ist (s. Abbildung 98 bis Abbildung 98). Die Mittelwerte der Rohdichte weichen nur um  $\Delta\rho_{12} = \pm(4 \dots 5) \text{ kg/m}^3 \approx (0,7 \dots 0,9) \%$  voneinander ab. Bezogen auf die Extremwerte betragen die Abweichungen  $\Delta\rho_{12} = \pm(6 \dots 16) \text{ kg/m}^3 \approx (1,0 \dots 4,4) \%$ . Die Verhältniswerte bezogen auf die Mittel- und 5%-Quantilwerte (s. Gl. 25 & Gl. 26) zeigen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit vom Probenumfang (s. Tabelle 45).

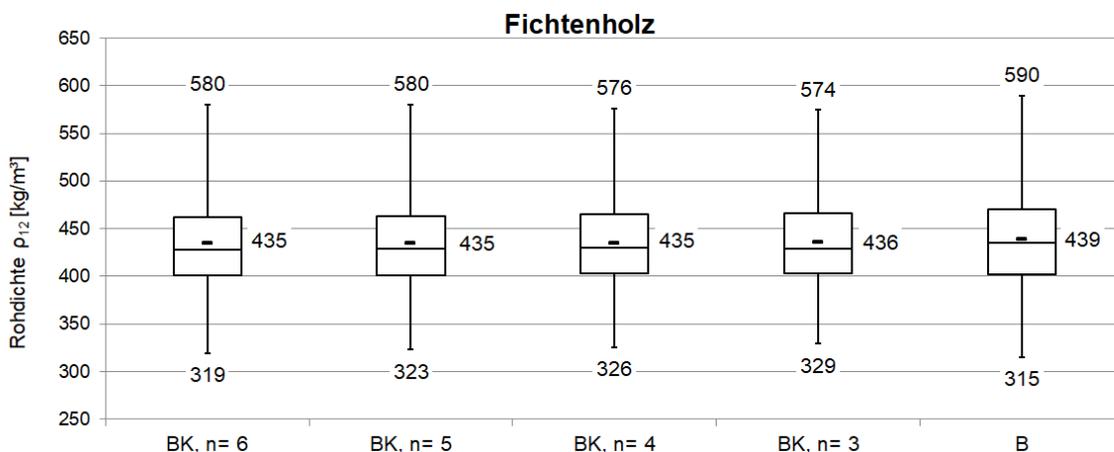


Abbildung 96: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe) – Prüfreihe „Fichte“

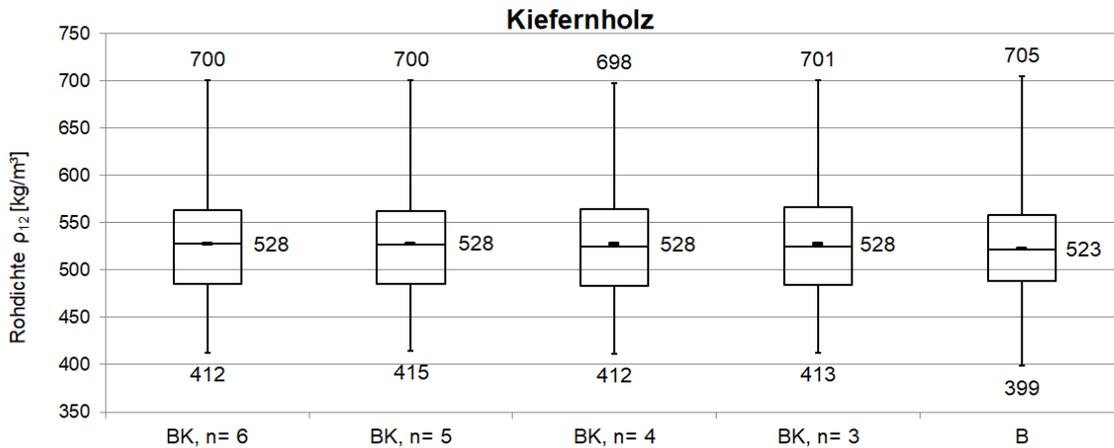


Abbildung 97: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe) – Prüfreihe „Kiefer“

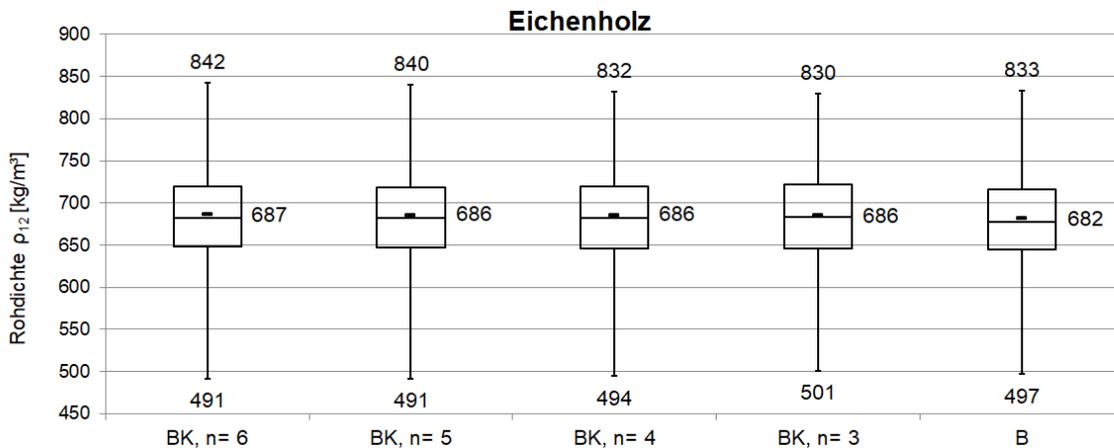


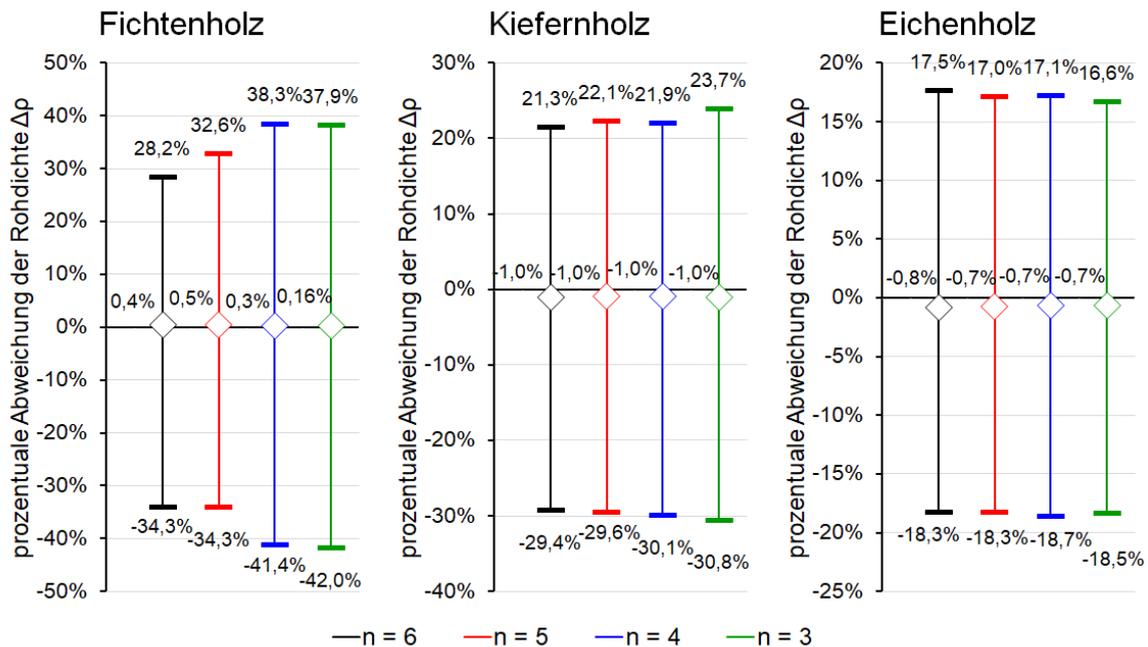
Abbildung 98: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe) – Prüfreihe „Eiche“

Tabelle 45: Verhältnswerte der Rohdichte in Abhängigkeit von der Probenanzahl n

Verhältnswert		n = 6	n = 5	n = 4	n = 3
für Mittelwerte $k_{p,mean}$	Fichte	1,01	1,01	1,01	1,01
	Kiefer	0,99	0,99	0,99	0,99
	Eiche	0,99	0,99	0,99	0,99
für 5%-Quantilwerte $k_{p,05}$	Fichte	1,00	1,00	1,00	1,01
	Kiefer	1,00	1,00	0,99	0,99
	Eiche	1,00	1,00	1,00	1,02

Hinsichtlich der Abweichungen bezogen auf die einzelnen Prüfkörper ist nur in der Prüfreihe „Fichte“ eine deutliche Veränderung in Abhängigkeit zur Probenanzahl zu erkennen (s. Abbildung 99). Durch die Reduzierung des Probenumfangs auf  $n = (3 \dots 4)$  ergeben sich maximale Abweichungen, welche um ca. (8 ... 10) %-Punkte größer sind als bei einem Probenumfang von  $n = (5 \dots 6)$ . Bei dem untersuchten Kiefernholz ergeben sich hingegen nur Änderungen von ca. (1 ... 3) %-Punkten. In der Prüfreihe „Eiche“ liegt die Veränderung bei weniger als 1 %-

Punkt. Eine klare Abhängigkeit der Messwertabweichungen vom Probenumfang ist somit nicht zu erkennen.

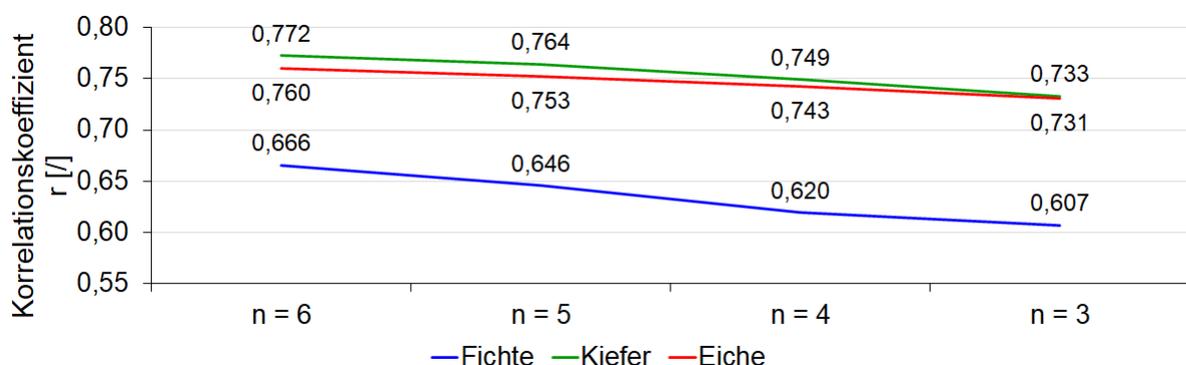


**Abbildung 99: Abweichungen der Rohdichte bezogen auf die Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Probenumfang n**

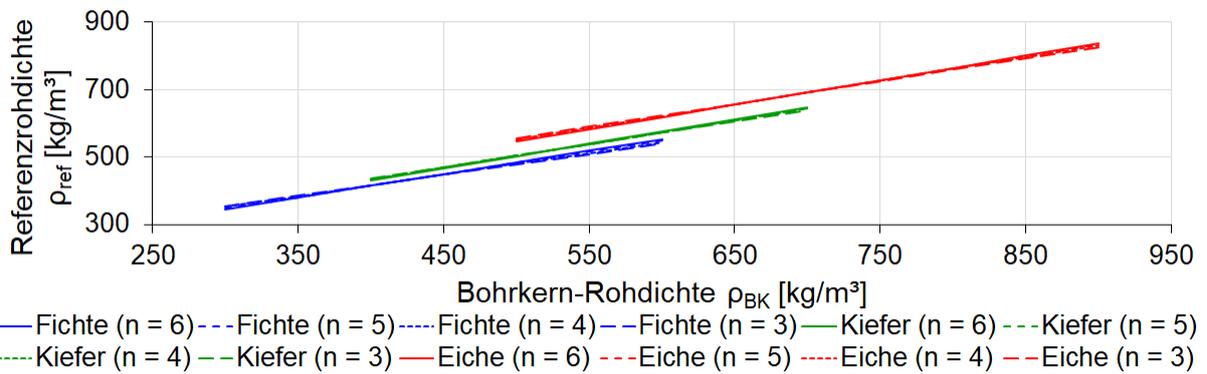
Die sich anhand der reduzierten Probenumfänge ergebenden Korrelationskoeffizienten und Regressionsgeraden sind in Tabelle 46 sowie Abbildung 101 und Abbildung 101 dargestellt. Hinsichtlich der Korrelationskoeffizienten ergibt sich je nach Holzart eine Reduzierung von ca. (4 ... 9) %. Die Regressionsgeraden ändern sich ebenfalls nur geringfügig in ihrer Steigung. Ein signifikanter Einfluss des Probenumfangs ist somit nicht feststellbar.

**Tabelle 46: Korrelationskoeffizienten zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Probenumfang n (PK ... Probekörper)**

	n = 6	n = 5	n = 4	n = 3
Fichte (262 PK)	0,666	0,646	0,620	0,607
Kiefer (217 PK)	0,772	0,764	0,749	0,733
Eiche (228 PK)	0,760	0,753	0,743	0,731

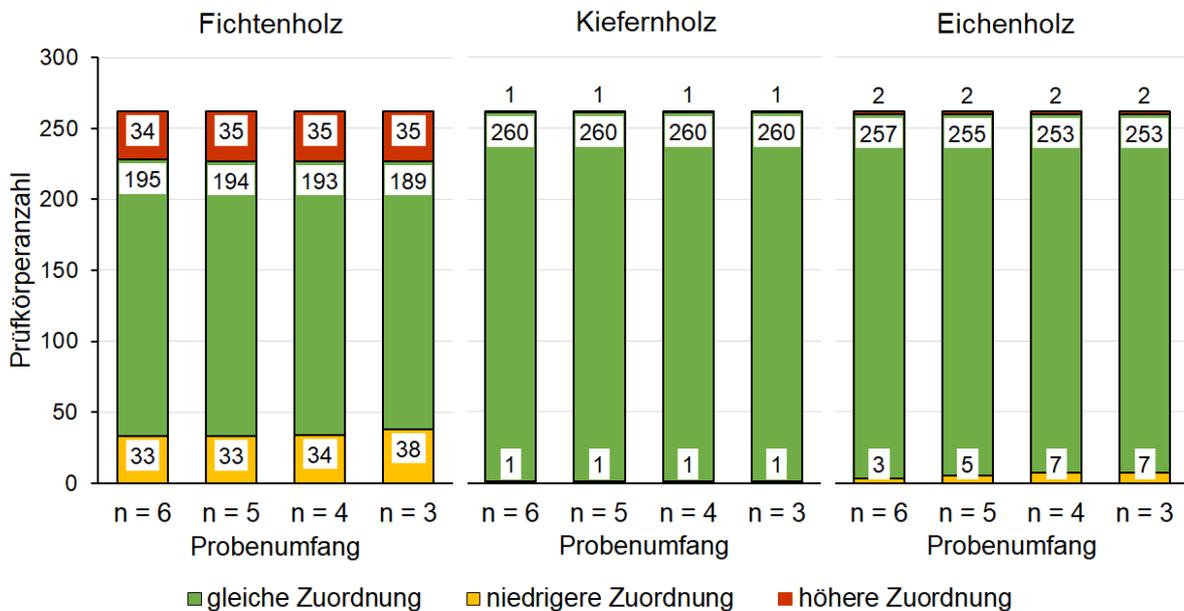


**Abbildung 100: Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Probenumfang n**



**Abbildung 101: Regressionsgeraden in Abhängigkeit vom Probenumfang n**

Die Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der Rohdichte zeigt ebenfalls keinen signifikanten Einfluss des Probenumfangs. Der Anteil der Prüfkörper, für die eine niedrigere oder eine höhere Zuordnung getroffen wird, verändert sich durch die Reduzierung des Probenumfangs nur geringfügig (s. Abbildung 102).



**Abbildung 102: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und basierend auf der Referenzrohndichte in Abhängigkeit vom Probenumfang**

Ausgehend von den oben aufgeführten Betrachtungen ist bei dem untersuchten Probenmaterial kein signifikanter Einfluss des Probenumfangs festzustellen. Weder die Abweichungen zwischen der an Bohrkernproben ermittelten Rohdichte von der Referenzrohndichte noch die daraus resultierenden Korrelations- und Regressionsbeziehungen zeigen eine signifikante Veränderung. Die Zuordnung des Probenmaterials wird ebenfalls nicht maßgeblich durch die Reduzierung des Probenumfangs beeinflusst.

Die erforderliche Probenanzahl je Bauteil sollte daher bei der zukünftigen praktischen Anwendung in bestehenden Konstruktionen anhand der konstruktiven Gegebenheiten – d.h. Zustand der Bauteile, Erreichbarkeit, Beeinträchtigung der Trag- und Funktionsfähigkeit durch die entstehenden Fehlflächen – festgelegt werden. Eine Probenanzahl von 4 Bohrkernen sollte dabei jedoch nicht unterschritten werden, um einen möglichst großen Bauteilabschnitt zu erfassen.

## 5.4. Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Eindringtiefenmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz

### 5.4.1. Gegenstand und Ziel der Untersuchungen

Die in Abschnitt 5.2 und 5.3 beschriebenen Materialuntersuchungen zeigten, dass die Bestimmung der Rohdichte von Holzbauteilen wesentliche Voraussetzung für eine zuverlässige Bewertung der Tragfähigkeit und Materialqualität ist. Die Entnahme von Bohrkernproben stellt hierfür eine hinreichend genaue und zuverlässige Methode dar. Dabei handelt es sich jedoch um eine zerstörungsarme Prüfmethode, deren Anwendung in Einzelfällen nicht möglich ist. Die Entnahme von Probenmaterial aus denkmalgeschützten Konstruktionen kann bspw. nur in begrenztem Umfang erfolgen. Des Weiteren ist eine Bohrkernentnahme aus stark geschädigten Bauteilen oder Anschluss- und Verbindungsbereichen zur Vermeidung zusätzlicher Beeinträchtigung der Holzbauteile nicht zu empfehlen. Insbesondere in solchen Fällen ist die Bestimmung der Rohdichte jedoch erforderlich, um das Schädigungsausmaß einzugrenzen oder um Ausgangswerte für die Planung von Instandsetzungsmaßnahmen zu schaffen.

Neben der labortechnischen Untersuchung von zerstörungsarm entnommenem Probenmaterial – wie beispielsweise Bohrkernproben – ist eine Ermittlung der Rohdichte auch durch zerstörungsfreie Methoden möglich (vgl. Tabelle 15). Neben Durchstrahlungsverfahren und der Bohrwiderstandsmessung, welche vorwiegend für qualitative Bewertungen geeignet sind, eignen sich vor allem sklerometrische Messmethoden (bspw. Eindring- und Ausziehwi- derstandsmessungen) für qualitative Aussagen. Eine dieser Methoden ist die Messung der Eindringtiefe eines Stahlstiftes, deren Eignung zur zerstörungsfreien Rohdichtebestimmung durch bisherige Untersuchungen belegt ist (vgl. Abschnitt 4.3).

Zur Überprüfung der Ergebnisse bisheriger Untersuchungen wurden eigene vergleichende Materialversuche durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen war die qualitative und quantitative Bewertung der Anwendbarkeit der Eindringtiefenmessung zur Ermittlung der Rohdichte von Holzbauteilen in situ. Ergänzend wurden Betrachtungen zur erforderlichen Anzahl an Messungen je Bauteil geführt.

Die vergleichenden Materialversuche wurden nach Beendigung der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Untersuchungen an den zerstörend geprüften Biegeprüfkörpern durchgeführt. Dazu wurde im Zuge der Bohrkernentnahme je Biegeprüfkörper eine Lamelle mit einem Nennquerschnitt von  $b/h \approx (50/30)$  mm und einer Länge von  $l \geq 300$  mm entnommen (vgl. Abbildung 85 in Abschnitt 5.3.1). Analog der Bohrkernentnahme erfolgte die Aufteilung der Lamellen in jeweils 6 Probenabschnitte mit einer Länge von  $l \approx (45 \dots 50)$  mm.

Bei Biegeprüfkörpern, deren Versagensbild die Entnahme von Lamellen mit einer Länge von  $l \geq 300$  nicht ermöglichte, sind die Lamellen in drei bis fünf Abschnitte aufgeteilt worden. Teilweise war eine Entnahme von Probenmaterial aus den Biegeprüfkörpern aufgrund umfangreicher Brüche nicht möglich. Der gesamte Probenumfang ergab sich zu 748 Lamellen mit jeweils 3...6 Abschnitten und verteilt sich wie nachfolgend aufgelistet auf die jeweiligen Prüfrei- hen:

- Prüfreihe „Fichte“: 293 Lamellen mit 3...6 Abschnitten
- Prüfreihe „Kiefer“: 224 Lamellen mit 3...6 Abschnitten
- Prüfreihe „Eiche“: 231 Lamellen mit 3...6 Abschnitten

### 5.4.2. Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Eindringtiefenmessungen wurde das Prüfgerät „WoodPecker Wood Test Hammer“ der Fa. DRC Italia verwendet (s. Abbildung 103). Dieser Impulshammer treibt Stahlstifte ( $\varnothing 2,5 \text{ mm}$ ,  $l = 50 \text{ mm}$ ) mit einer gesamten Schlagenergie von  $E_{\text{kin}} \approx 11 \text{ Joule}$  in die Holzoberfläche ein. Die maximale Einschlagtiefe beträgt  $t_{p,\text{max}} = 40 \text{ mm}$ . Eine ausführliche Beschreibung des verwendeten Messgerätes ist in Abschnitt 4.3.2 zu finden.

Je Probenabschnitt ist eine Eindringtiefenmessung vorgenommen worden. Die Messstelle wurde in der Mitte des Abschnittes angeordnet (s. Abbildung 104). Das Einschlagen der Stahlstifte erfolgte rechtwinklig zur Faserrichtung sowie rechtwinklig zur Holzoberfläche, da in bisherigen Untersuchungen kein Einfluss des Winkels zwischen Einschlagrichtung und Jahrringlage nachgewiesen werden konnte (vgl. Abschnitt 4.3.2). Erfahrungsgemäß ist eine exakte Feststellung der Jahrringlage bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ohnehin nur bedingt möglich. Das Einschlagen rechtwinklig zur Holz-/Bauteiloberfläche ermöglicht hingegen eine wesentlich einfachere und genauere Messung der Eindringtiefe. Die Messung der Eindringtiefe erfolgte mithilfe eines digitalen Messschiebers. Diese Methode hat sich in eigenen Voruntersuchungen als praktikabler und genauer erwiesen als die Verwendung der zum Prüfgerät mitgelieferte Messuhr (s. a. [Rug/Linke, 2017], [Fritz/et al., 2018]). Die Eindringtiefe ergibt sich dabei aus der Differenz der Gesamtlänge und der überstehenden Länge des eingeschlagenen Stahlstiftes (s. Abbildung 105 und Gl. 27).



Abbildung 103: Prüfgerät „WoodPecker Wood Test Hammer“ der Fa. DRC Italia – oben: Impulshammer; Mitte: analoge Messuhr; unten: digitaler Messschieber; rechts: Schlagstifte (Bildquelle: [Rug/Linke, 2017])

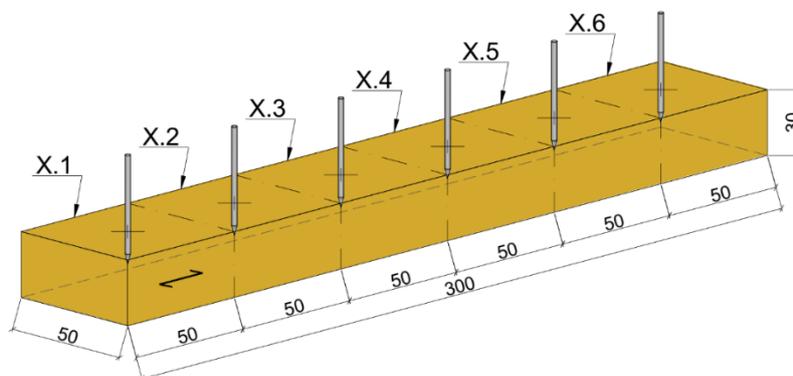


Abbildung 104: Durchführung der Eindringtiefenmessungen (eigene Darstellung)

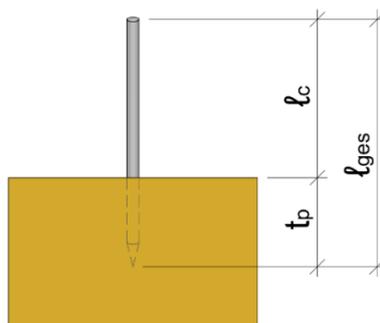


Abbildung 105: Messprinzip der Eindringtiefmessungen (eigene Darstellung)

$$t_p = l_{ges} - l_c$$

Gl. 27

mit:  $t_p$  ... Eindringtiefe;  $l_{ges}$  ... Gesamtlänge des Stahlstiftes;  $l_c$  ... überstehende Länge des Stahlstiftes

Nach der Durchführung der Eindringtiefmessungen erfolgte die Aufteilung der Lamellen in die einzelnen Probenabschnitte. An diesen quaderförmigen Prüfkörpern mit Nennmaßen von  $b/d/h = (50/50/30)$  mm wurde anschließend die Rohdichte nach DIN EN 408:2012, Abschnitt 7 und DIN 52182:1976 sowie die Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1:2002 ermittelt.

### 5.4.3. Ergebnisse und Auswertung

Die Eindringtiefmessung soll zukünftig für die Ermittlung und Bewertung der Rohdichte von einzelnen Bauteilabschnitten Verwendung finden. Für die weitere Auswertung der Versuchsergebnisse wird daher in erster Linie eine Bewertung des Zusammenhanges zwischen der gemessenen Eindringtiefe und der Rohdichte vorgenommen. Diese erfolgt in Form einer linearen Regressionsanalyse. Untersucht wurden dabei die Beziehungen zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte der entsprechenden Probenabschnitte. Eine Korrektur der Versuchsergebnisse anhand der tatsächlichen Holzfeuchtigkeit erfolgte in dieser Stufe der Auswertung nicht, da der Einfluss der Holzfeuchtigkeit vergleichsweise gering ist (vgl. Abschnitt 4.3.2, Abbildung 42) und der zeitliche Abstand zwischen den Eindringtiefmessungen und der Ermittlung der Rohdichte sehr gering war. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass beide Kennwerte bei der gleichen Holzfeuchtigkeit ermittelt wurden. Die sich hierfür ergebenden Korrelationskoeffizienten und Regressionsgeraden sind in Tabelle 47 und Abbildung 106 im Vergleich zu ausgewählten Literaturangaben dargestellt.

Tabelle 47: Korrelationskoeffizienten zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte

	Prüfreihe „Fichte“	Prüfreihe „Kiefer“	Prüfreihe „Eiche“
Eigene Untersuchungen	-0,663	-0,603	-0,751
[Görlacher, 1987]	-(0,74...0,91)	/	/
[Erlor/Knospe, 1989]	-0,77	-0,36	/
[Iniguez/et al., 2010]	/	-0,781	/
[Henriques/et al., 2011]	/	-0,895	/
[Cavalli/Togni, 2013]	-0,883	/	/
[Iniguez-Gonzales/et al., 2015]	/	-0,548	/
[Rug/Linke, 2017], [Fritz/et al., 2018]	-0,682	-0,675	-0,500

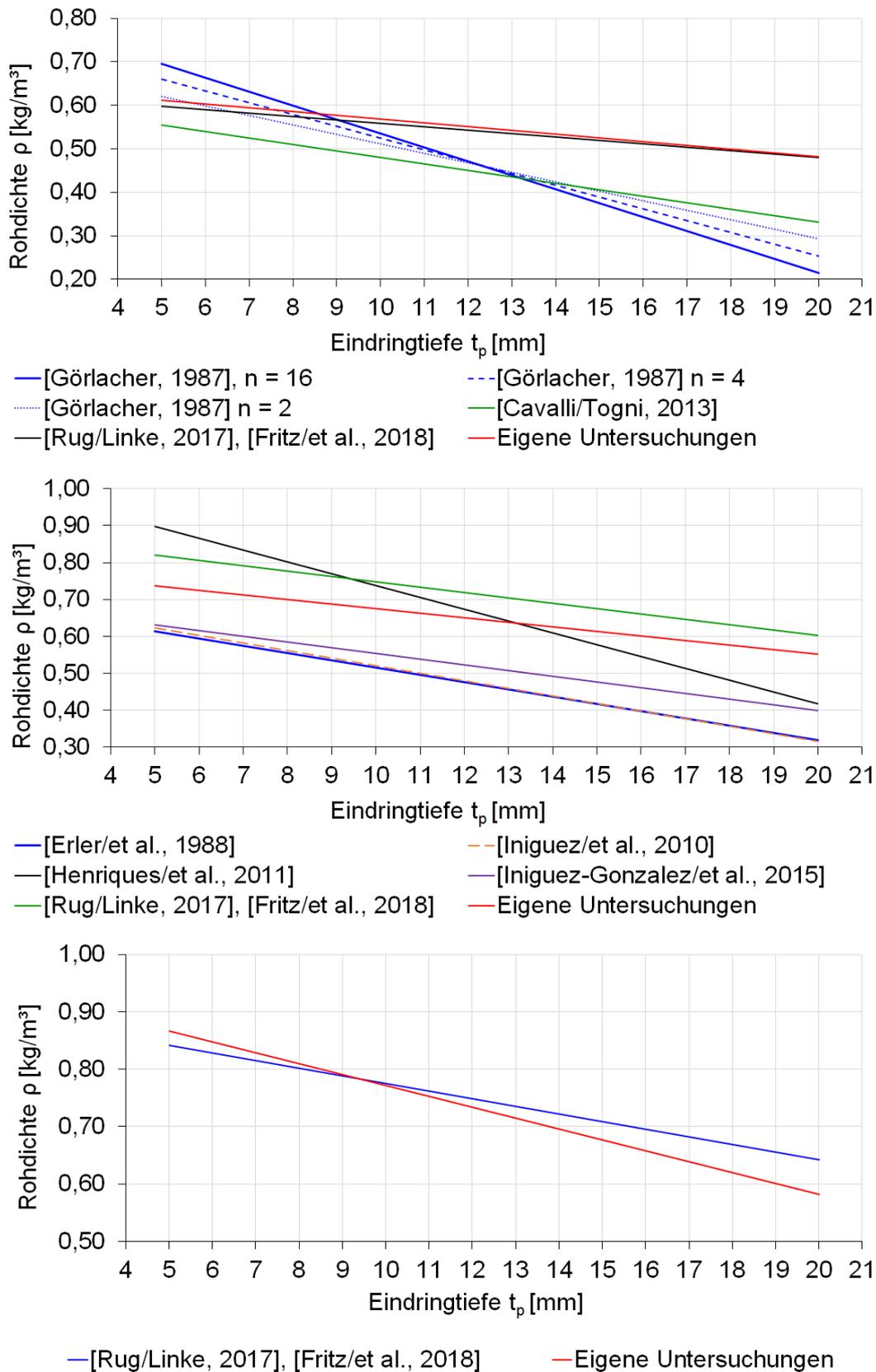


Abbildung 106: Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte im Vergleich zu Literaturangaben – oben: Prüfreihe „Fichte; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten Prüfreihe „Eiche“

Die Beziehungen zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte sind in allen Prüfreiheiten mit Korrelationskoeffizienten von  $r = -(0,603 \dots 0,751)$  relativ stark ausgeprägt. Der festgestellte negative Zusammenhang entspricht dem theoretischen Zusammenhang zwischen den beiden Kennwerten. Im Vergleich zu den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen ist jedoch festzustellen, dass bezüglich der Ausprägung der Beziehungen zwischen Eindringtiefe und Rohdichte kein einheitlicher Trend zu erkennen ist. Die in der verfügbaren Literatur angegebenen Korrelationskoeffizienten liegen abhängig von der Holzart im Bereich von  $r = -(0,36 \dots 0,91)$ . Dies entspricht einer schwachen bis sehr starken Ausprägung (vgl. Tabelle 47). Dieser uneinheitliche Trend zeigt sich auch in der Betrachtung der Regressionsgeraden. Während bei Fichtenholz eine annähernde Deckungsgleichheit zwischen den eigenen, oben beschriebenen Versuchen und den eigenen Voruntersuchungen (s. [Rug/Linke, 2017], [Fritz/et al., 2018]) herrscht, liegt zu den Angaben ausgewählter Literatur keine Vergleichbarkeit vor (s. Abbildung 106, oben). Für Kiefernholz ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei zumindest die sich aus den hier beschriebenen Untersuchungen, den eigenen Voruntersuchungen ([Rug/Linke, 2017], [Fritz/et al., 2018]) und ausgewählten Literaturangaben ([Iniguez-Gonzalez/et al., 2015]) ergebenden Regressionsgeraden annähernd parallel verlaufen (s. Abbildung 106, Mitte). Für Eichenholz hingegen liegt weder Deckungsgleichheit noch Parallelität zu vergleichbaren Untersuchungen vor (s. Abbildung 106, unten). Bei den oben aufgeführten Betrachtungen muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass nicht alle in Abbildung 106 aufgeführten Untersuchungen mit demselben Messgerät durchgeführt wurden. Des Weiteren ist ein Einfluss der Holzherkunft und des sich teilweise stark unterscheidenden Probenumfangs auf die Versuchsergebnisse nicht auszuschließen.

Um die Anwendbarkeit der Eindringtiefmessung zur Ermittlung der Rohdichte von Holzbauteilen im eingebauten Zustand bewerten zu können, muss eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der Eindringtiefmessung und der tatsächlichen Rohdichte der Holzbauteile hergestellt werden. Daher wird für die weitere Auswertung aus der gemessenen Eindringtiefe die rechnerische Rohdichte anhand der nachfolgend aufgeführten Gleichungen ermittelt (s. Gl. 28 bis Gl. 30). Dabei handelt es sich um Regressionsgleichungen, welche aus den Versuchsergebnissen der eigenen Versuche abgeleitet wurden.

$$\text{Für Fichtenholz: } \rho_{tp} = -0,0086 \cdot t_p + 0,6541 \quad \text{Gl. 28}$$

$$\text{für Kiefernholz: } \rho_{tp} = -0,0123 \cdot t_p + 0,7981 \quad \text{Gl. 29}$$

$$\text{für Eichenholz: } \rho_{tp} = -0,019 \cdot t_p + 0,962 \quad \text{Gl. 30}$$

mit:  $\rho_{tp}$  ... rechnerische Rohdichte [ $\text{g/cm}^3$ ];  $t_p$  ... gemessene Eindringtiefe [mm]

Die rechnerischen Werte der Rohdichte sowie die an den Probenabschnitten ermittelte Rohdichte ist zur Herstellung einer besseren Vergleichbarkeit zur Referenzrohichte<sup>14</sup> anhand der zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gemessenen Holzfeuchtigkeit korrigiert worden. Die im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1:2002 ermittelte Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper lag im Bereich von  $\omega \approx (6 \dots 14) \%$  und weicht somit von der in DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.3.1 angeführten Bezugsholzfeuchte von  $\omega_{\text{ref}} = 12 \%$  ab. Die Umrechnung auf eine Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12 \%$  erfolgte nach DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.4.2, wie in Gl. 21 dargestellt (s. Abschnitt 5.2.3, S. 114). Nach Umrechnung der Versuchsergebnisse wurden diese auf

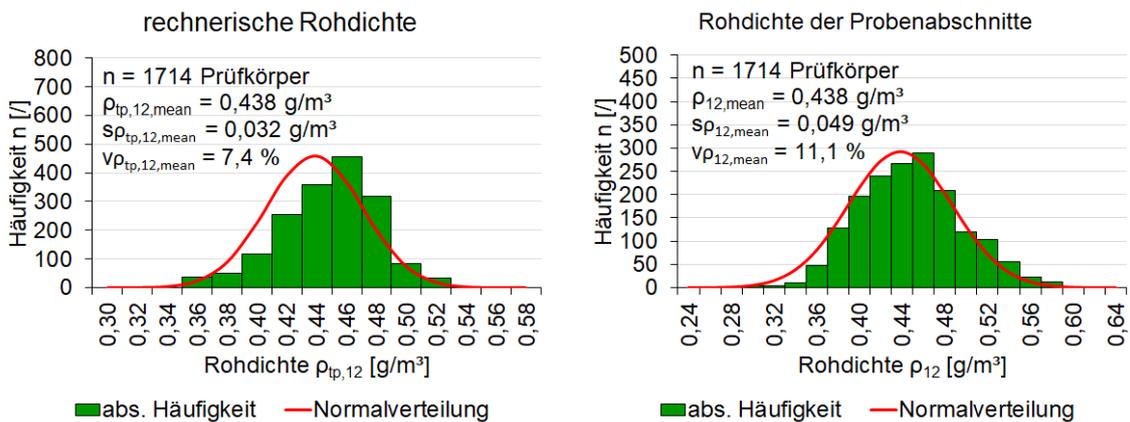
---

<sup>14</sup> Gemeint ist die im Zuge der zerstörenden Biegeversuchen ermittelte Rohdichte (s. Abschnitt 0).

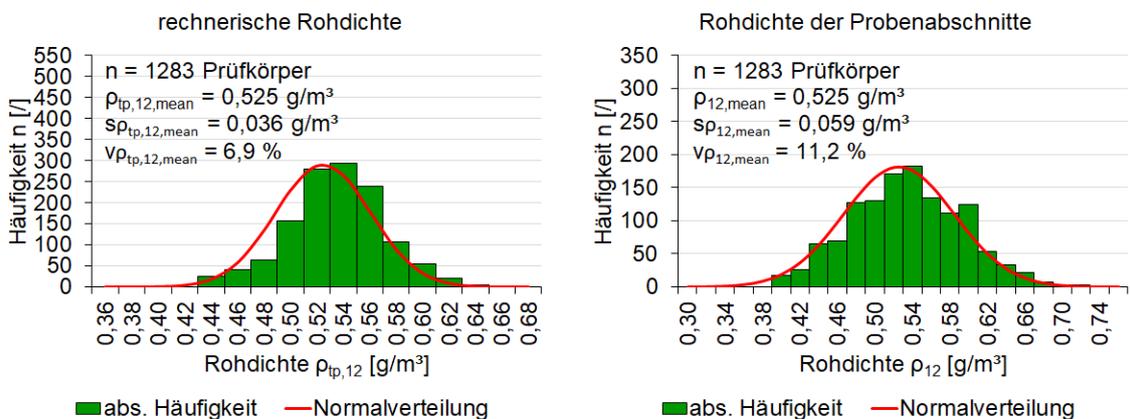
Ausreißer untersucht (Ausreißertest nach GRUBBS). Dabei erwies sich ein Probekörperabschnitt der in Prüfreihe „Eiche“ als Ausreißer. Die Lage- und Streuparameter der korrigierten und bereinigten Versuchsergebnisse sind in Tabelle 48 dargestellt. Abbildung 107 bis Abbildung 109 zeigen die entsprechenden Verteilungen.

**Tabelle 48: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der aus der Eindringtiefe errechneten Rohdichte  $\rho_{tp,12}$  und der Rohdichte der Probekörperabschnitte  $\rho_{PK,12}$**

	Prüfreihe					
	Fichte		Kiefer		Eiche	
	$\rho_{tp,12}$	$\rho_{PK,12}$	$\rho_{tp,12}$	$\rho_{PK,12}$	$\rho_{tp,12}$	$\rho_{PK,12}$
Anzahl n [/]	1714	1714	1283	1283	1318	1318
Minimum $\rho_{x,min}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,292	0,35	0,384	0,426	0,492	0,522
Mittelwert $\rho_{x,mean}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,438	0,44	0,525	0,525	0,681	0,681
Maximum $\rho_{x,max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,611	0,55	0,738	0,635	0,876	0,842
Standardabweichung $s_{\rho_{x,min}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,049	0,032	0,059	0,036	0,060	0,046
Variationskoeffizient $v_{\rho_{x,min}}$ [%]	11,1%	7,4%	11,2%	6,9%	8,8%	6,7%
5%-Quantil-Wert $\rho_{x,05}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,364	0,379	0,427	0,460	0,587	0,602



**Abbildung 107: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Fichte“**



**Abbildung 108: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Kiefer“**

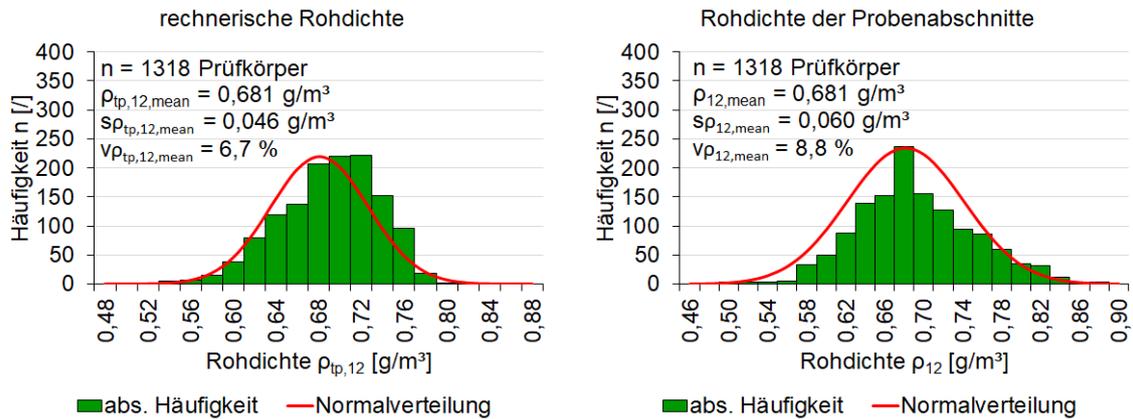


Abbildung 109: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Eiche“

Abbildung 110 zeigt einen Vergleich zwischen den Wertebereichen der Rohdichte der Probekörperabschnitte, der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte sowie der Referenzrohddichte. Daraus wird ersichtlich, dass zwischen den Wertebereichen der Rohdichte der Probekörperabschnitte und der Referenzrohddichte eine sehr große Deckungsgleichheit besteht. Die Abweichungen bezogen auf die Mittelwerte betragen abhängig von der Holzart nur  $\Delta\rho_{12,mean} = (-1 \dots +3) \text{ kg/m}^3 \approx (-0,2 \dots +0,6) \%$ . Bezogen auf die Extremwerte betragen die Abweichungen  $\Delta\rho_{12,min/max} = (-17 \dots +2) \text{ kg/m}^3 \approx (-5,4 \dots +1,0) \%$ . Diese können als vernachlässigbar betrachtet werden. Aus dem Vergleich der Referenzrohddichte und der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte ergeben sich bezogen auf die Mittelwerte ebenfalls geringe Abweichungen von  $\Delta\rho_{12,mean} = (-1 \dots +2) \text{ kg/m}^3 \approx (-0,1 \dots +0,4) \%$ , die ebenfalls vernachlässigbar sind. Bezogen auf die Extremwerte ergeben sich deutlich höhere Differenzen. Je nach Holzart betragen diese  $\Delta\rho_{12,min/max} = (-85 \dots +57) \text{ kg/m}^3 \approx (-12 \dots 11) \%$ . Diese Abweichungen entsprechen in ihrer Größenordnung etwa der für die Rohdichte von kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern nach DIN 68364:2003 anzunehmenden Streuung – Fichtenholz:  $v_\rho = 9,7 \%$ ; Kiefernholz:  $v_\rho = 12,8 \%$ ; Eichenholz:  $v_\rho = 9,0 \%$ .

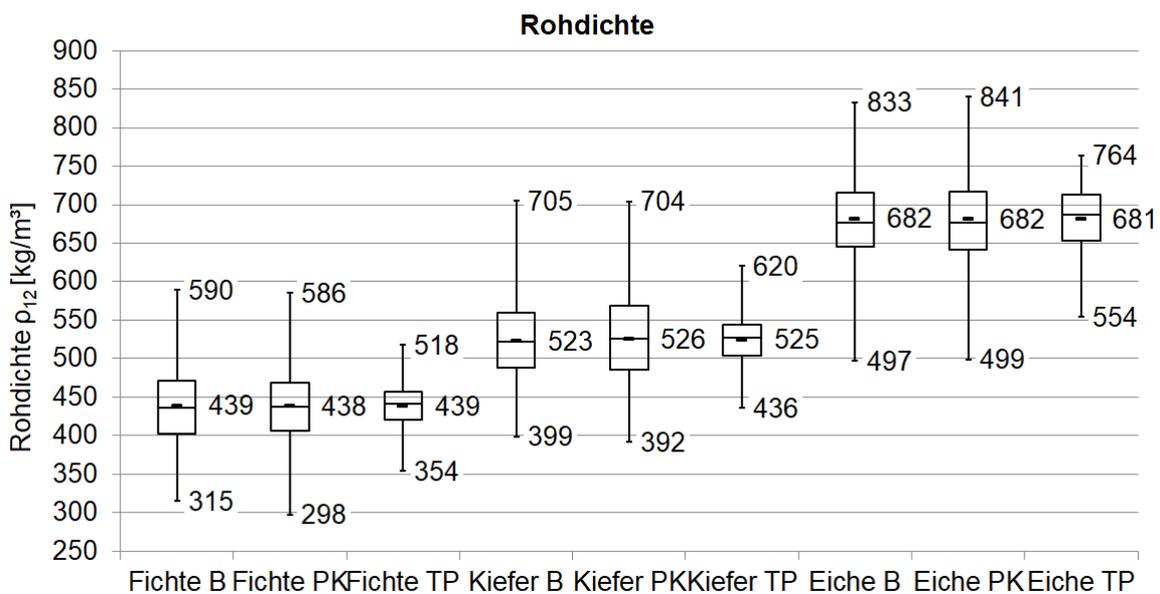


Abbildung 110: Wertebereiche der Rohdichte (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; PK ... Probekörperabschnitte; TP ... aus Eindringtiefe rechnerisch ermittelt)

Die sich für die ermittelten Rohdichten nach Gl. 25 und Gl. 26 ergebenden Verhältniswerte sind in Tabelle 49 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass für die Mittelwerte und 5%-Quantilwerte eine hohe Übereinstimmung besteht.

**Tabelle 49: Verhältniswerte der Rohdichte**

Verhältniswert		Fichte	Kiefer	Eiche
für $\rho_{PK,12}$	für Mittelwerte $k_{p,mean}$	1,00	0,99	1,00
	für 5%-Quantilwerte $k_{p,05}$	0,98	1,01	1,03
für $\rho_{TP,12}$	für Mittelwerte $k_{p,mean}$	1,00	0,99	1,00
	für 5%-Quantilwerte $k_{p,05}$	0,93	0,92	1,00

Die festgestellte hohe Übereinstimmung der betrachteten Rohdichtekennwerte deutet auf eine hohe Aussagegenauigkeit der Eindringtiefmessung hin. Der Vergleich der Kennwerte der einzelnen Prüfkörper ergibt hingegen deutlich höhere Abweichungen (s. Tabelle 50).

**Tabelle 50: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper**

		Fichte	Kiefer	Eiche
für $\rho_{PK,12}$	Minimale Abweichung $\Delta_{min}$ [%]	-47,1	-39,7	-19,1
	Mittlere Abweichung $\Delta_{mean}$ [%]	-0,7	-0,7	0,0
	Maximale Abweichung $\Delta_{max}$ [%]	+30,1	+20,5	+13,7
für $\rho_{TP,12}$	Minimale Abweichung $\Delta_{min}$ [%]	-41,1	-26,6	-19,5
	Mittlere Abweichung $\Delta_{mean}$ [%]	-1,2	-1,1	-0,2
	Maximale Abweichung $\Delta_{max}$ [%]	+26,0	+21,0	+16,3

Tabelle 50 zeigt, dass je nach Holzart die Rohdichte der Probekörperabschnitte um  $\Delta \approx (-47...+30)$  % von der Referenzrohddichte abweicht. Die aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelte Rohddichte weist Abweichungen im Bereich von  $\Delta \approx (-41...+26)$  % auf. Die größten betragsmäßigen Abweichungen sind – ebenso wie bei den untersuchten Bohrkernproben – in der Prüfreihe „Fichte“ auf (vgl. Abschnitt 5.3.3). Auch ist kein einheitlicher Trend der Abweichungen festzustellen. Es treten etwa im gleichen Maße Abweichungen in den positiven und den negativen Bereich auf (s. Abbildung 111 und Abbildung 112).

Die Ursache für diese Abweichungen ist in den wuchsbedingten Streuungen der Rohdichte sowie der Abhängigkeit der Rohdichte von der Lage der Probekörper im Stamm zu sehen (vgl. Abschnitt 5.3.3, Abbildung 89). Des Weiteren erfasst die Eindringtiefmessung nur die oberflächennahen Querschnittsbereiche der Holzbauteile. Hieraus resultieren zusätzliche Abweichungen.

Die festgestellten Differenzen zwischen den Rohdichtekennwerten schränken die Aussagefähigkeit der Eindringtiefmessung deutlich ein. Dies zeigt sich auch in der Ausprägung der Beziehungen zwischen der rechnerischen Rohddichte und der Referenzrohddichte (s. a. Tabelle 51). Die Beziehungen zwischen der Rohddichte der Probekörperabschnitte und der Referenzrohddichte ergeben sich mittlere bis starke Ausprägungen. Die Beziehungen zwischen der rechnerisch ermittelten Rohddichte und der Referenzrohddichte zeigen hingegen nur eine schwache bis mittlere Ausprägung.

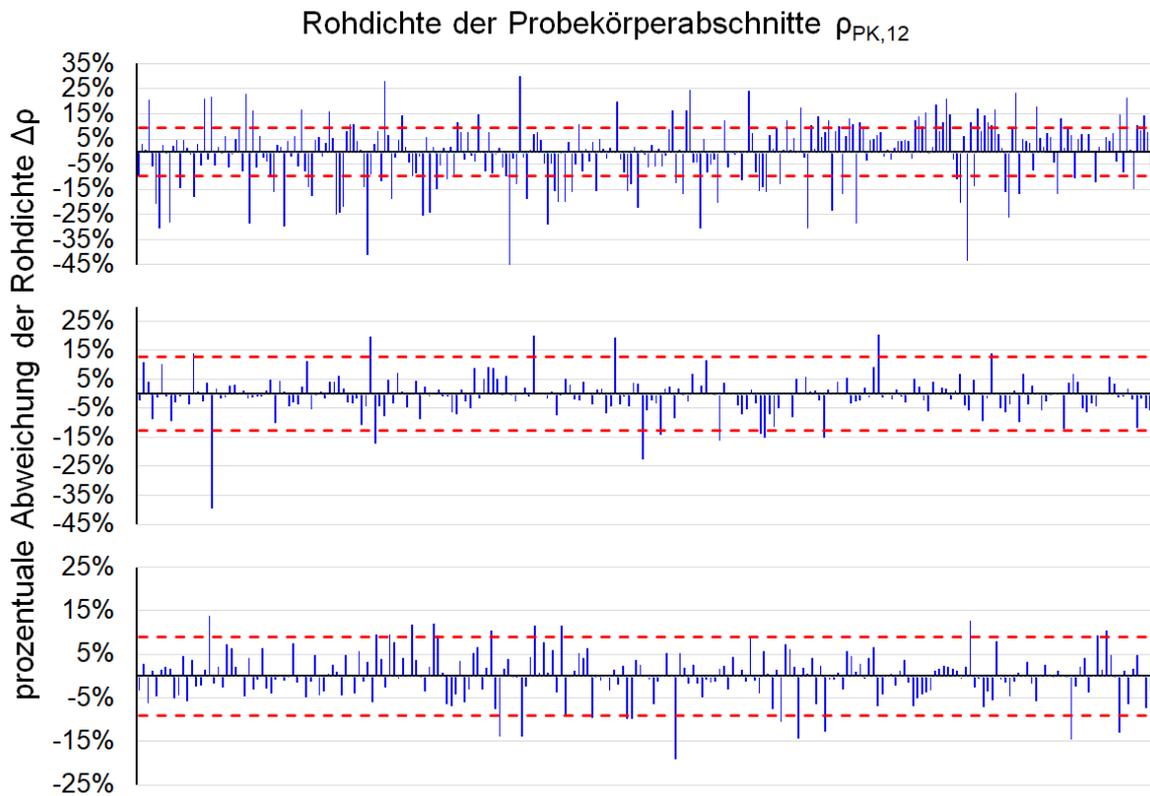


Abbildung 111: Abweichungen der Rohdichte der Probenabschnitte  $\rho_{PK,12}$  – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ (rot markiert: Variationskoeffizient nach DIN 68364:2003)

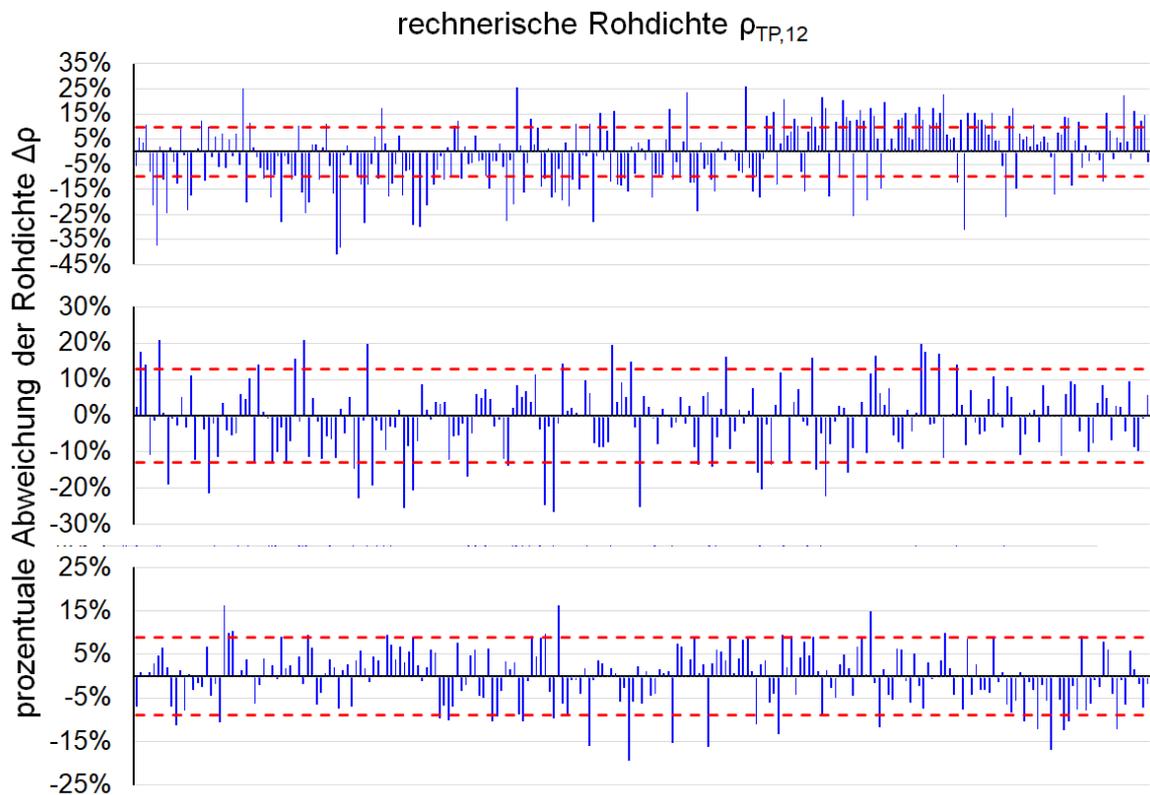


Abbildung 112: Abweichungen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte  $\rho_{TP,12}$  – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ (rot markiert: Variationskoeffizient nach DIN 68364:2003)

**Tabelle 51: Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen den Rohdichtekennwerten**

Beziehung	Fichte	Kiefer	Eiche
$\rho_{PK,12}$ zu $\rho_{ref}$	0,418	0,820	0,808
$\rho_{TP,12}$ zu $\rho_{ref}$	0,180	0,488	0,633

Für die zuverlässige Ermittlung der Rohdichte von Holzbauteilen im eingebauten Zustand mit Hilfe der Eindringtiefmessung ist eine zusätzliche Absicherung der Messergebnisse erforderlich. Analog der Vorgehensweise in Abschnitt 5.3.3 wurden hierfür die Verhältniswerte der Mittelwerte und 5%-Quantilwerte sowie die Regressionsgleichungen für die Beziehungen zwischen der rechnerisch aus der Eindringtiefe ermittelten Rohdichte und der Referenzroh-dichte verwendet. Dies führte jedoch nicht zu einer signifikanten Reduzierung der Abweichun-gen, wie aus Tabelle 52 ersichtlich wird.

**Tabelle 52: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper nach Umrechnung anhand der Verhältniswerte in Tabelle 40**

	Fichte	Kiefer	Eiche
ohne Umrechnung	(-41,1...-1,2...26,0) %	(-26,6...-1,1...21,0) %	(-19,5...-0,2...16,3) %
Umrechnungs-faktor $k_{p,mean}$	(-41,1...-1,2...26,0) %	(-25,3...-0,1...21,7) %	(-19,5...-0,2...16,3) %
Umrechnungs-faktor $k_{p,05}$	(-31,2...5,9...31,1) %	(-16,5...6,9...27,3) %	(-19,5...-0,2...16,3) %
Regressions-beziehung	(-37,3...-1,4...23,6) %	(-26,7...-0,9...21,9) %	(-20,3...-0,4...16,4) %

Unabhängig von den teilweise hohen Abweichungen zeigt sich, dass mit Ausnahme der Prüfreihe „Fichte“ die Prüfkörper überwiegend prozentuale Abweichungen zur Referenzroh-dichte aufweisen, die innerhalb der in DIN 68364:2003 angegebenen Streuung liegen (s. Abbildung 112). Der Anteil der Prüfkörper, die diese Grenzwerte überschreiten liegt bei den untersuchten Holzarten bei  $p = 50\%$  (Prüfreihe „Fichte“),  $p = 18\%$  (Prüfreihe „Kiefer“) bzw.  $p = 16\%$  (Prüfreihe „Eiche“). Des Weiteren ist bei genauerer Betrachtung festzustellen, dass die aus den Versuchsergebnissen resultierenden Abweichungen je nach Holzart nur einen geringen Ein-fluss auf die Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 besitzen. Aus Abbildung 113 wird ersichtlich, dass sich die Verteilungen des Probenmaterials auf die Festigkeitsklassen nur unwesentlich unterscheiden. Hinsichtlich einer globalen Bewer-tung der untersuchten Prüfkörper ist somit eine zuverlässige Aussage möglich.

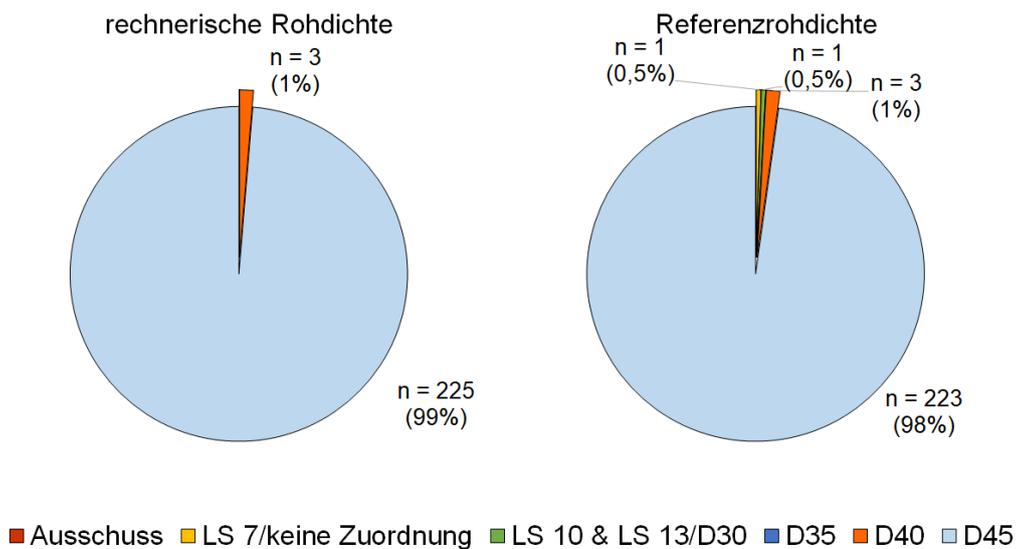
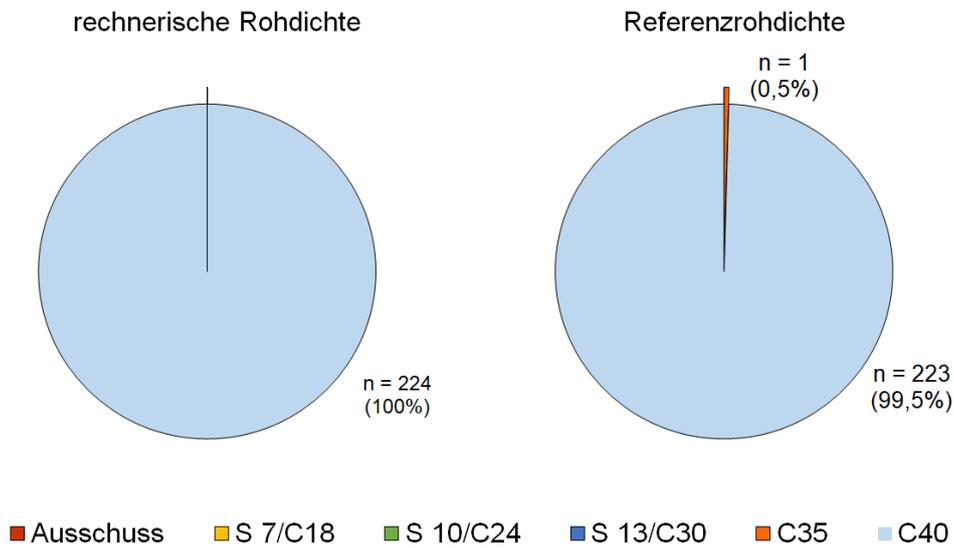
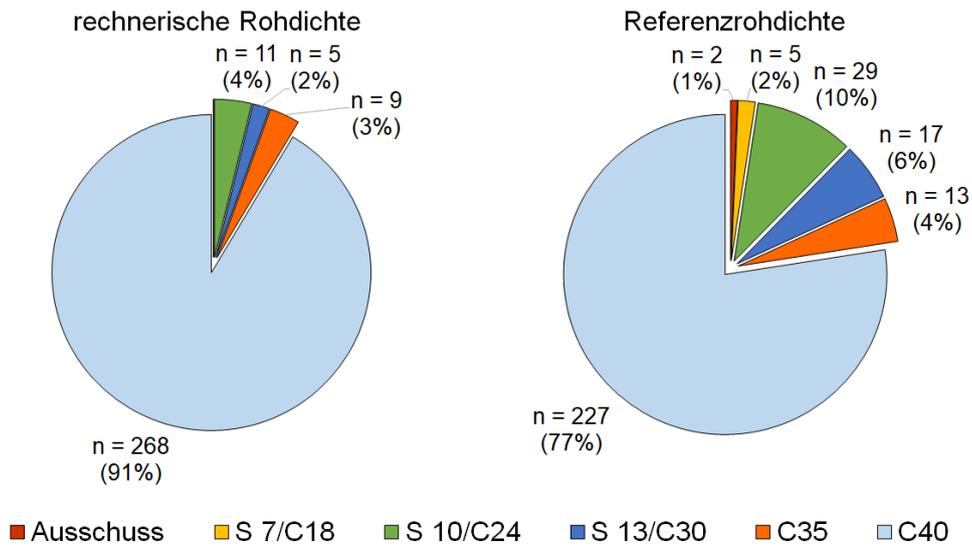
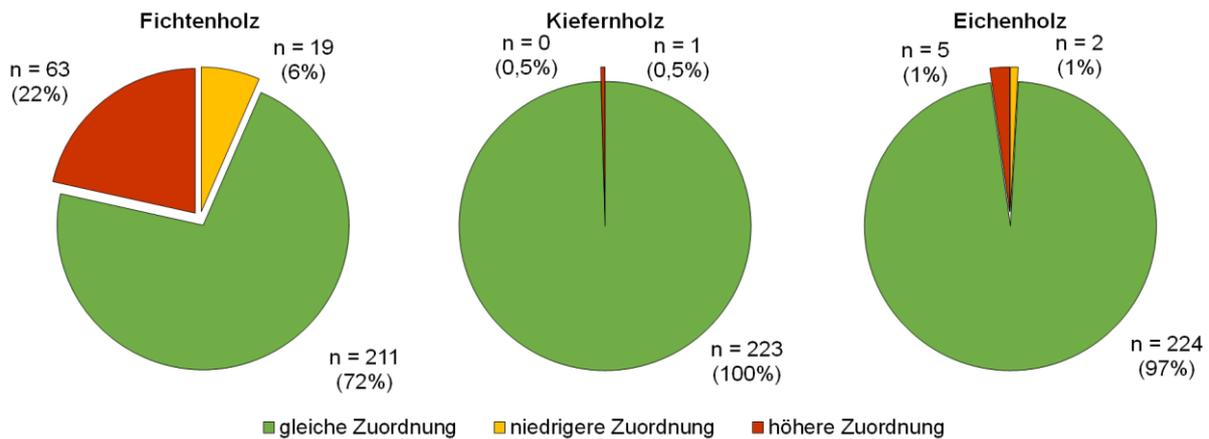


Abbildung 113: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und der Referenzrohddichte – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“

Der Anteil der Prüfkörpern, für welche die gleiche Zuordnung anhand der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und der Referenzrohddichte getroffen wurde, variiert je nach untersuchter Holzart (s. Abbildung 114). Während in der Prüfreihe „Fichte“ für 211 Prüfkörper ( $p = 72\%$ ) die gleiche Zuordnung getroffen wurde, sind 19 Prüfkörper ( $p = 6\%$ ) unterschätzt sowie weitere 63 Prüfkörper ( $p = 22\%$ ) überschätzt worden. Bei den Prüfreihe „Kiefer“ und „Eiche“ ergibt sich ein deutlicheres Bild. Für annähernd die gesamte Stichprobe ( $p = 100\%$  bzw.  $p = 97\%$ ) ergab sich eine Übereinstimmung der Zuordnung. Lediglich ein Anteil von  $p = (0,5 \dots 1,0)\%$  wurde jeweils unter- bzw. überschätzt.



**Abbildung 114: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und basierend auf der Referenzrohddichte**

Maßgeblich für die Bewertung der Fehleinschätzung ist die Differenz zu dem Grenzwert der „Ziel“-Festigkeitsklasse<sup>15</sup>. In der Prüfreihe „Fichte“ ergaben sich prozentuale Abweichungen von bis zu  $\Delta_{\max} = 7,9\%$  bezüglich der Unterschätzung und  $\Delta_{\max} = 19,1\%$  bezüglich der Überschätzung. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich nur bei jeweils etwa einem bzw. zwei Dritteln der betreffenden Prüfkörper prozentuale Abweichungen von  $\Delta > 5\%$  ergaben. Bei dem untersuchten Kiefern- und Eichenholz betrug die prozentuale Abweichung  $\Delta_{\max} = 0,0\%$  und  $\Delta_{\max} = 5,0\%$  hinsichtlich der Unterschätzung bzw.  $\Delta_{\max} = 18,0\%$  und  $\Delta_{\max} = 13,8\%$  bezüglich der Überschätzung. In der Prüfreihe „Eiche“ wies nur etwa die Hälfte der unter- und überschätzten Prüfkörper eine prozentuale Abweichung von mehr als  $5\%$  auf.

Zusammenfassend lässt sich aus den Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Eindringtiefenmessung für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ableiten, dass diese zerstörungsfreie Prüfmethode grundlegend zur Erfassung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen geeignet ist. Aufgrund der durch die natürlichen Streuungen der Rohdichte bedingten Abweichungen zwischen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und der nach DIN EN 408 ermittelten Referenzrohddichte der Holzbauteile ist eine unmittelbare Anwendung zur Ermittlung der Rohdichte nicht zu empfehlen. Des Weiteren trifft die mit Hilfe der Eindringtiefenmessung getroffene Aussage über die Materialqualität nur lokal zu. Dies gilt insbesondere bezogen auf die Querschnittsbreite/-höhe. Diese Prüfmethode kann jedoch genutzt werden, um eine qualitative Aussage über die Rohdichte der Holzbauteile in begrenzten Bauteilbereichen in Form einer Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 zu treffen. Um dennoch quantitative Aussagen über die

<sup>15</sup> Gemeint ist damit der Grenzwert der Festigkeitsklasse nach DIN EN 338, zu welcher der betreffende Prüfkörper anhand der Referenzrohddichte zugeordnet werden kann.

Materialeigenschaften von Holzbauteilen treffen zu können, ist eine Kombination der Eindringtieftiefenmessung mit weiteren zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode erforderlich. Hierzu werden in Kapitel 6 weiterführende Untersuchungen beschrieben.

#### 5.4.4. Untersuchungen zur erforderlichen Anzahl der Messungen

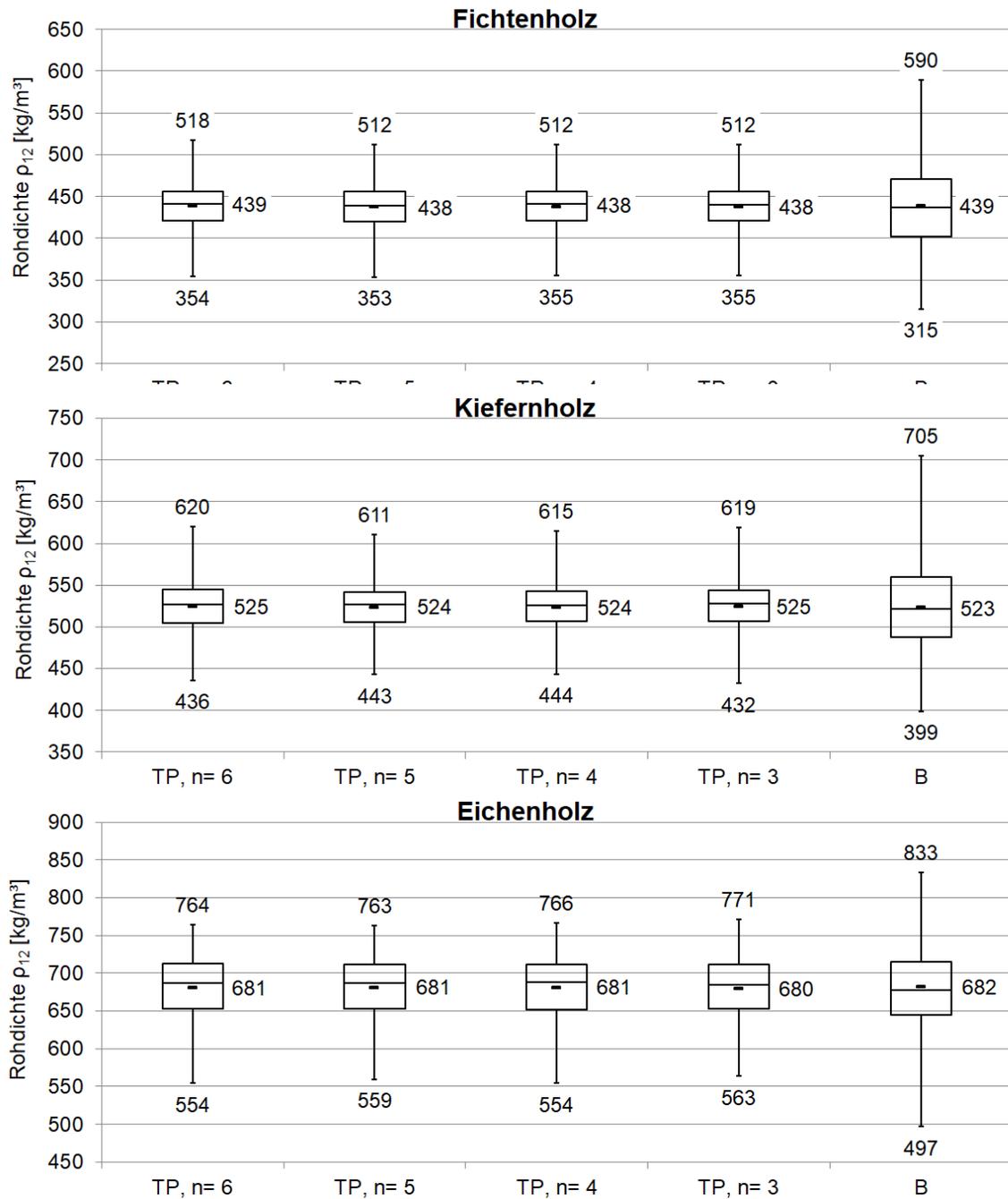
Die mit Hilfe der Eindringtieftiefenmessung getroffenen Aussagen über die Materialqualität beziehen sich auf einen lokal sehr begrenzten Bereich – vor allem bezogen auf den Querschnitt des Holzbauteiles. Dennoch bietet diese zerstörungsfreie Prüfmethode die Möglichkeit, lokale Schädigungen einzugrenzen oder die Rohdichte im Bereich von Verbindungen und Anschlüssen qualitativ und quantitativ zu bewerten. Maßgeblich für die Zuverlässigkeit der getroffenen Aussage ist jedoch der Umfang der in einem Bereich durchgeführten Messungen. Vorangegangene Untersuchungen von GÖRLACHER zeigten, dass die Reduzierung des Messumfangs einen signifikanten Einfluss auf den Zusammenhang zwischen der gemessenen Eindringtieftiefe und der Rohdichte besitzt (s. Abschnitt 4.3.2, dort Abbildung 43, vgl. [Görlacher, 1987]).

Zur Bewertung des Einflusses des Messumfangs auf die Aussagefähigkeit und Zuverlässigkeit der Rohdichtebestimmung mittels Eindringtieftiefenmessung wurden ergänzende Betrachtungen mit reduziertem Probenumfang geführt. Dies erfolgte als Gegenüberstellung der Mittelwerte der rechnerisch ermittelten Rohdichte jeweils für  $n = (6 \dots 5 \dots 4 \dots 3)$  Messstellen und der Referenzrohddichte.

Bei der Betrachtung der Wertebereiche der Rohdichte zeigt sich, dass trotz Reduzierung des Messumfangs keine signifikante Veränderung zu verzeichnen ist (s. Abbildung 115). Die Mittelwerte der aus der Eindringtieftiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte weichen bei allen drei Holzarten nur um  $\Delta\rho_{12} = \pm 1 \text{ kg/m}^3$  voneinander ab. Dies entspricht einer Differenz von  $\Delta\rho_{12} \approx (0,1 \dots 0,2) \%$ . Bezogen auf die Extremwerte betragen die Abweichungen  $\Delta\rho_{12} = \pm(1 \dots 9) \text{ kg/m}^3 \approx (0,3 \dots 1,8) \%$ . Im Vergleich zum Wertebereich der Referenzrohddichte sind ebenfalls keine signifikanten Veränderungen gegenüber den in Abschnitt 5.4.3 dargestellten Abweichung festzustellen. Die Verhältniszerte bezogen auf die Mittelwerte (nach Gl. 25) und auf die 5%-Quantilwerte (nach Gl. 26) zeigen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit vom Messumfang (s. Tabelle 53).

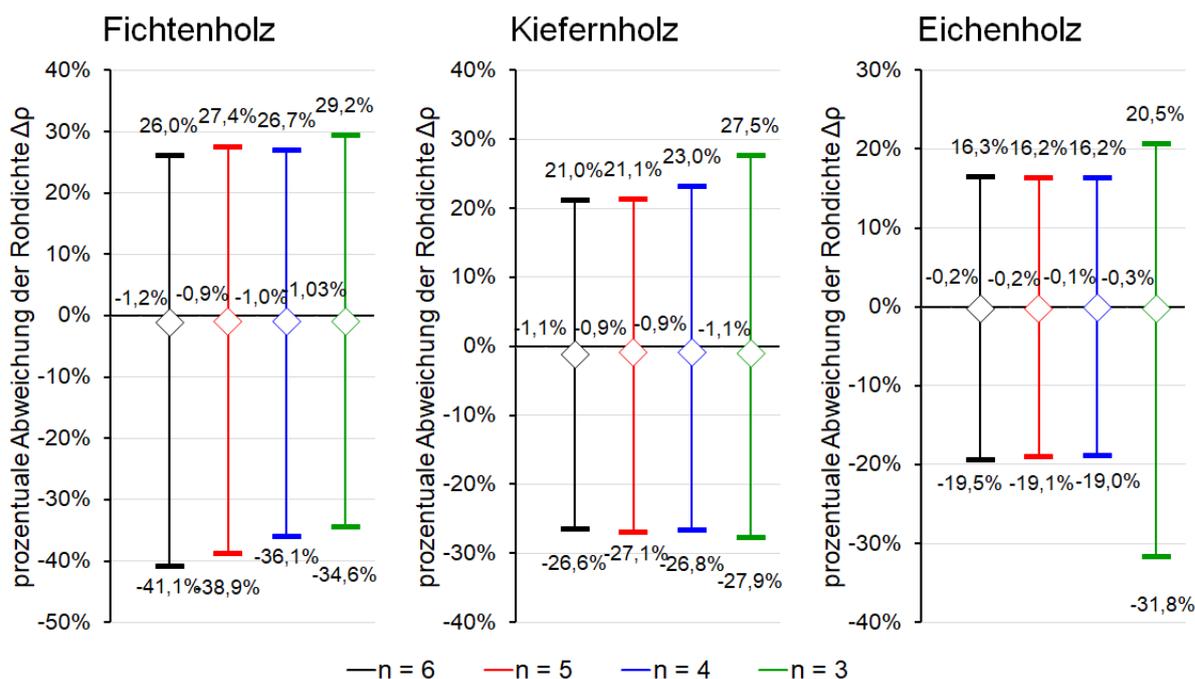
**Tabelle 53: Verhältniszerte der Rohdichte in Abhängigkeit von der Messungsanzahl  $n$**

Verhältniszerte		$n = 6$	$n = 5$	$n = 4$	$n = 3$
für Mittelwerte $k_{p,mean}$	Fichte	1,00	1,00	1,00	1,00
	Kiefer	0,99	1,00	1,00	1,00
	Eiche	1,00	1,00	1,00	1,00
für 5%-Quantilwerte $k_{p,05}$	Fichte	0,93	0,95	0,94	0,95
	Kiefer	0,92	0,92	0,92	0,92
	Eiche	1,00	1,01	1,01	1,00



**Abbildung 115: Wertebereiche der aus der Eindringtiefe berechneten Rohdichte und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; TP ... Rohdichte aus Eindringtiefenmessung) – v.o.n.u.: Prüfreihe „Fichte“, „Kiefer“, „Eiche“**

Hinsichtlich der Abweichungen bezogen auf die einzelnen Prüfkörper sind nur geringfügige Änderungen zu erkennen, die noch dazu keinem einheitlichen Trend folgen (s. Abbildung 116). Während sich die Abweichungen in der Prüfreihe „Fichte“ mit abnehmendem Messumfang geringfügig in den positiven Bereich verlagern, ist in den Prüfreihe „Kiefer“ und „Eiche“ eine Zunahme der maximalen Abweichungen unterhalb eines Messumfangs von  $n = 4$  zu verzeichnen. Eine klare Abhängigkeit der Messwertabweichungen vom Probenumfang ist somit nicht zu erkennen.

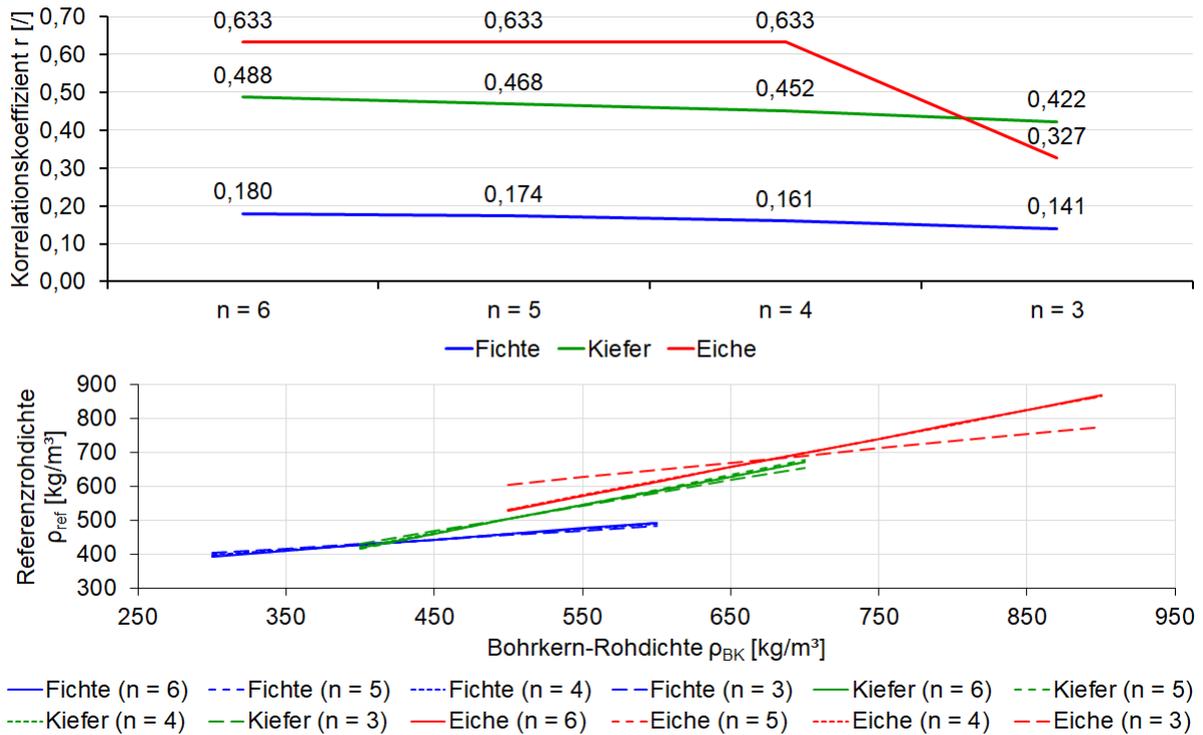


**Abbildung 116: Abweichungen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte bezogen auf die Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Messumfang n – links: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; rechts: Prüfreihe „Eiche“**

Die sich anhand der reduzierten Probenumfänge ergebenden Korrelationskoeffizienten und Regressionsgeraden sind in Tabelle 54 und Abbildung 117 dargestellt. Hinsichtlich der Korrelationskoeffizienten ergibt sich je nach Holzart eine Reduzierung von  $p = (14 \dots 48) \%$ . Hierbei weist die Probenreihe „Eiche“ eine deutliche Reduzierung ab einem Messumfang von weniger als  $n = 4$  auf. Die übrigen Prüfreiheiten weisen keine derartig abrupte Reduzierung auf. Dieses Ergebnis deckt sich tendenziell mit den Angaben in [Görlacher, 1987]. Bei Reduzierung des Messumfanges von  $n = 16$  auf  $n = 2$  wurde eine Reduzierung des Korrelationskoeffizienten von  $p = 19 \%$  festgestellt. Die Regressionsgeraden ändern sich analog. Während bei der Prüfreihe „Eiche“ für einen Messumfang von  $n = 3$  eine deutlich sichtbare Änderung der Steigung der Regressionsgeraden zu verzeichnen ist, sind bei den übrigen Prüfreiheiten nur geringe Änderungen der Steigung zu verzeichnen. Ausgehend von diesen Feststellungen liegt somit ein signifikanter Einfluss des Messumfanges nur bei Eichenholz ab  $n < 4$  vor.

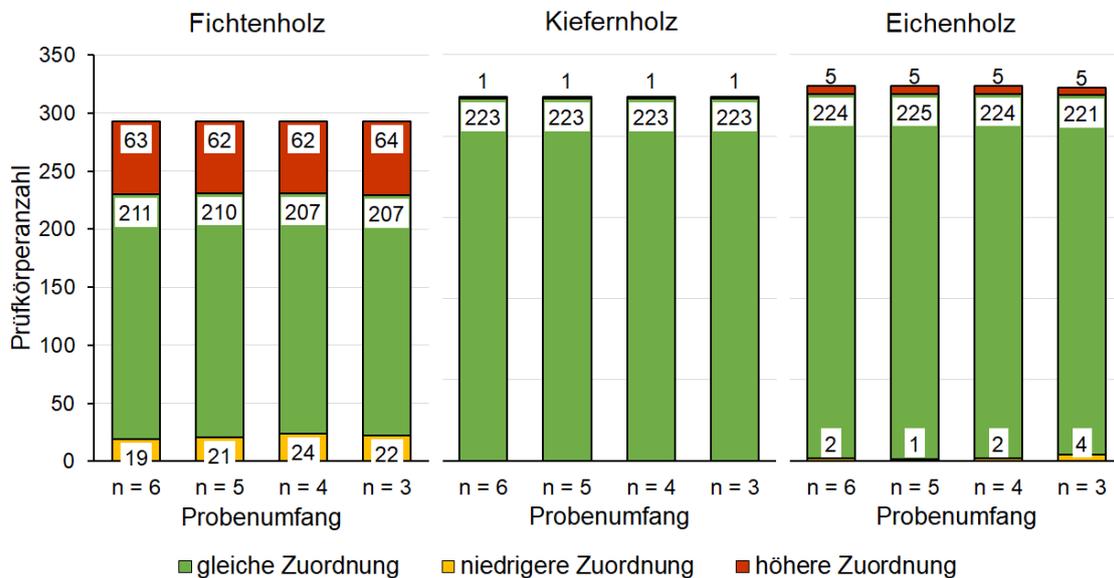
**Tabelle 54: Korrelationskoeffizienten zwischen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Messumfang n**

	n = 6	n = 5	n = 4	n = 3
Fichte	0,180	0,174	0,161	0,141
Kiefer	0,488	0,468	0,452	0,422
Eiche	0,633	0,633	0,633	0,327



**Abbildung 117: Korrelationskoeffizienten (oben) und Regressionsgeraden (unten) in Abhängigkeit vom Messumfang n**

Die Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der Rohddichte zeigt keinen signifikanten Einfluss des Messumfangs. Der Anteil an Prüfkörpern, für die eine niedrigere oder eine höhere Zuordnung getroffen wird, verändert sich durch die Reduzierung des Messumfangs nur geringfügig (s. Abbildung 118).



**Abbildung 118: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohddichte und basierend auf der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Messumfang**

Ausgehend von den oben aufgeführten Betrachtungen ist bei dem untersuchten Probenmaterial kein signifikanter Einfluss des Messumfangs auf die Wertebereiche der rechnerisch ermittelten Rohddichte und die Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen

festzustellen. Hinsichtlich der aus den Versuchsergebnissen resultierenden Korrelations- und Regressionsbeziehungen ist bei dem untersuchten Eichenholz ein signifikanter Einfluss ab einem Messumfang von  $n < 4$  erkennbar.

Bei der zukünftigen praktischen Anwendung sollte daher ein Messumfang von  $n = 4$  bei der Ermittlung der Rohdichte in lokal begrenzten Bereichen der Holzbauteile nicht unterschritten werden. Der gesamte Messumfang sollte entsprechend der Ausdehnung des zu untersuchenden Bereiches festgelegt werden. Hierbei müssen auch die konstruktiven Gegebenheiten – insbesondere die Erreichbarkeit der Bauteile – berücksichtigt werden.

## 5.5. Zusammenfassung

Die visuelle Sortierung in Kombination mit dem Einsatz zerstörungsfreier und -armer Mess- und Prüfmethode führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Aussagegenauigkeit und -zuverlässigkeit hinsichtlich der Materialqualität. Um diese Kombination für die in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen anwenden zu können, ist eine Methodik zur gemeinsamen Auswertung der Messergebnisse erforderlich. Dabei müssen die für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz geltenden normativen Anforderungen nach DIN 4074-3 berücksichtigt werden. Die sich daraus ergebenden Schwerpunkte wurden in eigenen, systematischen Materialversuchen untersucht. Gegenstand waren dabei Prüfkörper aus neuem Bauholz (Holzarten: Fichte, Kiefer, Eiche). Die Materialversuche umfassten neben der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1/-5, zerstörungsfreien Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen, der zerstörungsfreien und -armen Ermittlung der Rohdichte anhand von Bohrkernproben und mittels Eindringtiefenmessung auch zerstörende Bauteilversuche nach DIN EN 408.

Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass die visuelle Sortierung unzureichend ist, um die Materialqualität von Holzbauteilen zuverlässig einzuschätzen. So ist beispielsweise der vergleichsweise große Anteil an Prüfkörpern mit sehr hoher Tragfähigkeit (Festigkeitsklassen  $\geq C35/D35$  nach DIN EN 338) über die visuelle Sortierung nicht feststellbar. Der Vergleich der Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung und der tatsächlichen Materialkennwerte zeigt weiterhin, dass je nach Holzart (74 ... 91) % der untersuchten Prüfkörper durch die visuelle Sortierung hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit unterschätzt wurden.

Die Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bestätigten die grundlegende Eignung für die zerstörungsfreie Ermittlung der Materialqualität von Holzbauteilen. Allerdings zeigte sich auch, dass eine alleinige Anwendung dieser Prüfmethode unzureichend ist, um die Materialkennwerte möglichst genau zu ermitteln. Der Vergleich der Ergebnisse der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung mit den tatsächlichen Materialkennwerten zeigt, dass zwar einerseits eine Steigerung der mittleren Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den höheren Festigkeitsklassen zu verzeichnen ist. Andererseits besteht gleichzeitig eine große Deckungsgleichheit zwischen den Wertebereichen der einzelnen Festigkeitsklassen. Die Ursache hierfür liegt darin begründet, dass wesentliche festigkeits- und tragfähigkeitsmindernde Wuchsmerkmale durch die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nicht erfasst werden. Diese müssen visuell erfasst und in die Sortierentscheidung einbezogen werden.

Die Materialversuche zur zerstörungsfreien und -armen Ermittlung der Rohdichte mit Hilfe von Bohrkernproben und der Eindringtiefenmessung führen zu einem ähnlichen Ergebnis. Zwar

sind diese Methoden prinzipiell geeignet, um die Materialqualität qualitativ zu bewerten. Eine unmittelbare quantitative Ermittlung der Rohdichte von Holzbauteilen analog der DIN EN 408 ist hierüber jedoch nicht ohne weiteres möglich. Ursächlich hierfür sind die vergleichsweise hohen Streuungen der Rohdichte innerhalb eines Holzbauteiles sowie die lokal begrenzte Aussagefähigkeit. Dies gilt insbesondere für die Eindringtiefmessung. Des Weiteren ist die Rohdichte als alleinige Kenngröße zur Ermittlung der Materialqualität nicht ausreichend, da die festigkeits- und tragfähigkeitsbeeinflussenden Wuchsmerkmale (bspw. Äste, Faserneigung) hierüber nicht erfasst werden. Der Einsatz von Bohrkernproben und der Eindringtiefmessung ist daher nur in Kombination mit weiteren visuellen und zerstörungsfreien Prüfmethode sinnvoll.

Insgesamt bestätigen die eigenen Materialversuche die bisherigen Erkenntnisse der Fachliteratur hinsichtlich der eingeschränkten Aussagefähigkeit der visuellen Sortierung. Auch der alleinige Einsatz zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode ist für eine zuverlässige Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen nicht sinnvoll. Hierfür ist ein statistisch abgesichertes Modell erforderlich, welches die Messergebnisse der verschiedenen Methoden einbezieht. Diesbezügliche Betrachtungen werden im folgenden Kapitel 6 geführt.

## 6. Entwicklung einer Methode zur Festigkeitssortierung von Bauholz in bestehenden Konstruktionen

### 6.1. Methodischer Ansatz

Die Ergebnisse der eigenen vergleichenden Materialuntersuchungen zeigten, dass die ausgewählten zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode grundlegend für eine Abschätzung der Materialkennwerte von Holzbauteilen geeignet sind. Die Untersuchungen ergaben jedoch auch, dass eine alleinige Betrachtung der Ergebnisse einzelner Mess- und Prüfmethode den Einfluss wuchsbedingter Merkmale auf die Materialeigenschaften von Holz nicht berücksichtigt. Eine zuverlässige quantitative Erfassung und Bewertung der Materialeigenschaften sind auf diesem Wege nicht möglich.

Um zuverlässige Aussagen anhand zerstörungsfrei und -arm messbarer Bauteilmerkmale und Materialkennwerte zu ermöglichen, ist eine kombinierte Auswertung und Bewertung der Messergebnisse erforderlich. Diese Empfehlung wird in der Literatur auch für die Sortierung von neuem Bauholz gegeben (vgl. bspw. [Glos, 1995], [Blaß/Görlacher, 1996], [Blaß/Frese, 2002], [Sandomeer/Steiger, 2009]). Bis dato wurden in den bauaufsichtlich eingeführten Sortiervorschriften jedoch keine konkreten Festlegungen für die apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung getroffen. Nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 umfasst diese die visuelle Sortierung anhand der Sortierkriterien und Grenzwerte der Sortierklassen S10/LS10 sowie die Verwendung weiterer Sortierkriterien, die abhängig von den verwendeten Apparaturen sind. Letztere sind nach DIN 4074-3 festzulegen. In DIN 4074-3 heißt es dazu, dass die Grenzwerte so festzulegen sind, dass die den Sortierklassen S15/LS15 zugeordneten charakteristischen Materialkennwerte eingehalten werden. Konkrete, holzartspezifische Festlegungen der charakteristischen Materialkennwerte der Sortierklassen S15/LS15, wie sie bspw. in der DIN EN 1912 für die übrigen Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 festgelegt sind, wurden bis dato in den bauaufsichtlich eingeführten Sortiervorschriften nicht getroffen.

Weiterhin kann aus den Festlegungen der DIN 4074-1, -3 und -5 abgeleitet werden, dass die apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung als zweistufige Sortierung vorgesehen ist. In der ersten Stufe erfolgt eine visuelle Festigkeitssortierung in zwei Klassen. Diese Klassen wären Bauholz, welches die Sortierkriterien der Sortierklassen S10/LS10 erfüllt und Bauholz, welches diese Anforderungen nicht erfüllt. Die zweite Stufe umfasst dann die zerstörungsfreie Messung weiterer Sortierkriterien und die Sortierung in zwei weitere Klassen – „S15/LS15“ und „nicht S15/LS15“. Ein ähnliches Vorgehen wurde in [Arriaga/et al., 2005] für die Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Kiefernholz in bestehenden Konstruktionen untersucht.

Ein zweistufiges Vorgehen aus visueller „Vor“-Sortierung und apparativer „Nach“-Sortierung ist ausgehend von den Ergebnissen der eigenen vergleichenden Materialuntersuchungen nicht zu empfehlen. Die eigenen Untersuchungen zeigten, dass die visuelle Sortierung dafür nicht zuverlässig genug ist. Die Tragfähigkeit von Bauholz wird in der Regel überwiegend unterschätzt (vgl. Abbildung 81 in Abschnitt 5.2.3). Dementsprechend ist davon auszugehen, dass ein nicht unerheblicher Teil des Bauholzes mit normaler bis hoher Tragfähigkeit bereits in der visuellen „Vor“-Sortierung ausgeschlossen wird. Ein weiterer Nachteil des zweistufigen Vorgehens ist der Umstand, dass die apparativ gemessenen Sortiermerkmale allein stehend bewertet werden. Die in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchungen zeigten jedoch mehrfach,

dass dies wenig zuverlässig und daher nicht zu empfehlen ist. Wechselwirkungen und die gegenseitige Beeinflussung von Wuchsmerkmalen und zerstörungsfrei oder -arm messbaren Materialeigenschaften werden so nicht berücksichtigt.

Eine Möglichkeit, die vorgenannten Nachteile der apparativ unterstützten visuellen Sortierung auszugleichen, ist die Verwendung eines Sortierparameters. Diese Vorgehensweise ist in der maschinellen Festigkeitssortierung bereits gängige Praxis. Der Sortierparameter ist dabei ein Schätzwert für die betrachteten Zielgrößen – d.h. für die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Je nach Aufbau der Sortieranlagen können mehrere Messgrößen in Kombination betrachtet werden, ohne eine mehrstufige Sortierung vornehmen zu müssen. So können visuell, an der Bauteiloberfläche gemessene Wuchsmerkmale und zerstörungsfrei oder -arm gemessene Materialkennwerte in Form einer multiplen Regression zur Bestimmung des Sortierparameters verwendet werden. Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Messgrößen werden somit berücksichtigt. Ein ähnliches Vorgehen wurde bspw. in [Blaß/Frese, 2002] untersucht, wobei hier neben dem Holzquerschnitt nur die Rohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul zur Anwendung kommen. Die in [Kessel/et al., 1997] geführten Untersuchungen hatten ebenfalls das Ziel, eine Methode zur apparativ unterstützten Festigkeitssortierung zu entwickeln. Die Methodik basiert ebenfalls auf der Berechnung eines Sortierparameters anhand von Regressionsgleichungen. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der kombinierten Messung der Schallgeschwindigkeit mittels Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Eigenfrequenzmessung. Weiterhin werden die Rohdichte des gesamten Bauteils sowie die Ästigkeit berücksichtigt. Die in [Kessel/et al., 1997] vorgeschlagene Methodik ist jedoch für die Anwendung in bestehenden Konstruktionen ungeeignet. Zum einen erfordert die kombinierte Ultraschallimpulslaufzeit- und Eigenfrequenzmessung einen höheren Messaufwand. Darüber hinaus wird nur die direkt gemessene Ultraschallgeschwindigkeit einbezogen (vgl. Abbildung 23 in Abschnitt 4.1.2). Diese ist in bestehenden Konstruktionen meist nicht durchführbar. Zum anderen ist die Ermittlung der Rohdichte des gesamten Bauteils in situ nicht möglich. Hierzu müsste das gesamte Bauteil ausgebaut, vermessen und gewogen werden. Die zerstörungsfreie bzw. -arme Rohdichtebestimmung liefert jedoch nur lokal begrenzte Aussagen (vgl. dazu Abschnitt 5.3.3 und 5.4.3). Des Weiteren wird nur die Ästigkeit in die Berechnung der Sortierparameter einbezogen. Weitere, wesentliche festigkeits- und tragfähigkeitsbeeinträchtigende visuell messbare Merkmale – wie bspw. die Faserneigung oder Risse – bleiben unberücksichtigt. Eine uneingeschränkte Anwendung der in [Kessel/et al., 1997] vorgeschlagenen Methodik auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen ist daher nicht möglich.

Die im Weiteren beschriebene Methode zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen basiert auf dem normativ geregelten System der maschinellen Festigkeitssortierung. Die hierfür erforderlichen Sortierparameter werden anhand von Regressionsbeziehungen zwischen ausgewählten visuell messbaren Wuchsmerkmalen, den Messergebnissen der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung sowie der zerstörungsfrei/-arm ermittelten Rohdichte und den Zielgrößen Biegefestigkeit und statischer Biege-Elastizitätsmodul abgeleitet. Um den Besonderheiten bestehender Konstruktionen und dem möglichen Einsatz angepasster Nachweismethoden Rechnung zu tragen, wurden die weiteren Betrachtungen in Form eines mehrstufigen Sortiermodells geführt.

Die Grundlage für diese Herangehensweise sind die von [Loebjinski, 2021] vorgeschlagenen Kenntnisstufen für die Nachweisführung der Standsicherheit bestehender Holzkonstruktionen. Dabei wird in drei verschiedene Stufen unterschieden, welche von einem geringen

Kenntnisstand über die Konstruktion („Knowledge Level 1“) bis hin zu einem sehr hohen Kenntnisstand („Knowledge Level 3“) reichen. Abhängig von dem Grad der Untersuchungen und der daraus resultierenden Informationen über die untersuchte Konstruktion ist die Anwendung angepasster Nachweismethoden möglich. Voraussetzung hierfür ist unter anderem die Feststellung der vorhandenen Materialqualität mit zerstörungsfreien und -armen Mess- und Prüfmethoden. Der Umfang der durchzuführenden Festigkeitssortierung richtet sich nach dem angestrebten Kenntnisstand über die Konstruktion. Sollen Bau- oder Konstruktionsteile mit untergeordneter Bedeutung für die Standsicherheit bewertet werden, ist eine weniger umfassende Festigkeitssortierung erforderlich als es bspw. bei der Bauzustands- und Standsicherheitsbewertung des Haupttragwerkes historischer Konstruktionen von denkmalpflegerischem Wert notwendig ist. Eine Gegenüberstellung der Sortierstufen und der korrespondierenden Kenntnisstufen nach [Loebjinski, 2021] ist in Tabelle 55 zu finden.

**Tabelle 55: Gegenüberstellung der Sortierstufen (SGL ... *strength grading level*) und der Kenntnisstufen (KL ... *knowledge level*) nach [Loebjinski, 2021]**

Sortierstufe	Sortiermethode	Kenntnisstufe	Mögliche Nachweismethoden
SGL 0	keine Festigkeitssortierung	-	semi-probabilistisch ohne Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte
SGL 1	visuelle Festigkeitssortierung nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5	KL 1	semi-probabilistisch ohne Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte
		KL 2a	semi-probabilistisch mit Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte durch Optimierung abhängig von den Beanspruchungen
		KL 3	probabilistisch exakte & Näherungsverfahren
SGL 2	apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung (visuelle Sortierung & zerstörungsfreie Prüfmethoden)	KL 2b KL 2c	semi-probabilistisch mit Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte aus aktualisierten Widerstandsparametern
		KL 3	probabilistisch exakte & Näherungsverfahren mit Aktualisierung/ Verbesserung des Widerstandsmodells
SGL 3	apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung (visuelle Sortierung, zerstörungsfreie/-arme Prüfmethoden)	KL 2b KL 2c	semi-probabilistisch mit Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte aus aktualisierten Widerstandsparametern
		KL 3	probabilistisch exakte & Näherungsverfahren mit Aktualisierung/ Verbesserung des Widerstandsmodells

Tabelle 55 zeigt, dass ohne eine Festigkeitssortierung der Holzbauteile (SGL 0) nur semi-probabilistische Nachweise geführt werden können. Eine Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte und somit die Ausnutzung von Tragfähigkeitsreserven ist dann nicht möglich. Die Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit können dann nur auf der Grundlage einer angenommenen Materialqualität geführt werden. Eine visuelle Untersuchung der Bau- und Konstruktionsteile – insbesondere hinsichtlich etwaig vorhandener Beschädigungen oder Verformungen – ist jedoch in jedem Fall erforderlich.

Erfolgt eine ausschließlich visuelle Festigkeitssortierung (SGL 1) können sowohl semi-probabilistische (KL 1 & KL 2a) als auch probabilistische Nachweismethoden (KL 3) angewendet werden. Die Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte ist in der Kenntnisstufe KL 2a jedoch

nur als Optimierung in Abhängigkeit von den Beanspruchungen und in situ ermittelten Lasten möglich. Hinsichtlich der probabilistischen Nachweismethoden (KL 3) sind keine zusätzlichen Aktualisierungen möglich. Die zum Erreichen der Sortierstufe SGL 1 erforderlichen Sortiermethoden sind durch die vorhandenen normativen Regeln und Sortiervorschriften DIN EN 14081-1 und DIN 4074-1/-5 umfassend geregelt. Die notwendige visuelle Festigkeitssortierung ist so umfassend wie möglich vorzunehmen, da die vollständige Anwendbarkeit der normativen Regelungen infolge der eingeschränkten Einsehbarkeit und handnahen Erreichbarkeit in bestehenden Konstruktionen ohnehin erschwert wird. Des Weiteren erfordert eine Bewertung der Materialqualität unter derartigen Einschränkungen eine umfassende Fachkenntnis.

Durch eine apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung unter Zuhilfenahme von zerstörungsfreien und -armen Mess- und Prüfmethode (SGL 2 & SGL 3) eröffnen sich weitere Möglichkeiten zur Aktualisierung der Nachweisverfahren. In den Kenntnisstufen KL 2b und KL 2c ist dann eine Aktualisierung der Teilsicherheitsbeiwerte anhand aktualisierter Widerstandsparameter möglich. In der Kenntnisstufe KL 3 können probabilistische Nachweisverfahren mit aktualisiertem Widerstandsmodell verwendet werden.

Für die in den Sortierstufen SGL 2 und SGL 3 erforderliche Festigkeitssortierung können die Regelungen der DIN 4074-1/-5 zur apparativ unterstützten visuellen Sortierung im übertragenen Sinne angewendet werden. Wie bereits erläutert, enthalten diese Sortiervorschriften keine konkreten Festlegungen auf welche Weise die apparativen Methoden gemeinsam mit den Regelungen der visuellen Sortierung anzuwenden sind. Für die weiteren Betrachtungen wird daher auf die Vorgehensweise der maschinellen Festigkeitssortierung zurückgegriffen.

Ein erster Ansatz für die Ableitung von Sortiergleichungen und -parametern wurde bereits in [Linke/et al., 2021] veröffentlicht. Das darin beschriebene Modell basiert jedoch noch auf der Annahme, dass die zerstörungsfrei durch Eindringtiefenmessung und zerstörungsarm an Bohrkernproben ermittelte Rohdichte ( $\rho_{TP}$  bzw.  $\rho_{BK}$ ) mit der in Bauteilversuchen ermittelten Rohdichte  $\rho_{BT}$  im Wesentlichen übereinstimmt. Diese Annahme hat sich in der weiteren Auswertung nicht vollumfänglich bestätigt (vgl. Abschnitte 5.3 und 5.4). Der nachfolgend beschriebene Ansatz berücksichtigt daher die in situ ermittelte Rohdichte.

## 6.2. Festlegung der Mess- und Zielgrößen

Die Methodik zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen soll auf Grundlage eines Regressionsmodelles zwischen in situ erfassbaren Messgrößen und den für die Nachweise der Standsicherheit erforderlichen Zielgrößen abgeleitet werden.

Im Kontext der Festigkeitssortierung von neuem Bauholz können Holzbauteile immer dann einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 zugeordnet werden, wenn die ermittelten charakteristischen Werte der Rohdichte, der Festigkeit und der Steifigkeit mindestens den normativ geregelten Kennwerten entsprechen. Im Falle von biegebeanspruchten Bauteilen wird hierzu die charakteristische Rohdichte, die charakteristische Biegefestigkeit und der Mittelwert des statischen Biege-Elastizitätsmoduls verwendet. Da die Rohdichte üblicherweise nur für den Nachweis der Tragfähigkeit von Anschlüssen und Verbindungen zum Tragen kommt, wird diese im Weiteren nicht als Zielgröße berücksichtigt. Sofern ihre Bestimmung in Einzelfällen erforderlich ist, kann diese in situ mit hinreichender Genauigkeit direkt mittels zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode ermittelt und qualitativ bewertet werden. Daher werden nachfolgend

nur die Biegebruchfestigkeit und der statische Biege-Elastizitätsmodul als Zielgrößen herangezogen.

Hinsichtlich der Festlegung der Messgrößen sind differenzierte Betrachtungen der möglichen Materialeigenschaften und -kennwerte erforderlich. Wie bereits im Abschnitt 3.2 erläutert, können die in DIN EN 14081-1 und DIN 4074-1/-5 aufgeführten Sortierkriterien an Bauteilen in bestehenden Konstruktionen nicht oder nur bedingt erfasst und bewertet werden. Des Weiteren besitzen nicht alle visuell messbaren Sortierkriterien einen Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. In DIN EN 14081-1 wird in festigkeitsverringemde Merkmale (Äste, Faserneigung, Rohdichte/Jahringbreite und Risse), geometrische Merkmale (Baumkante und Verformungen), biologische Merkmale (Befall durch holzverfärbende/-zerstörende Pilze und Insekten) sowie weitere Merkmale (Reaktionsholz, Einwüchse, mechanische Beschädigungen, u. ä.) unterschieden. Tabelle 56 zeigt eine Bewertung der Sortierkriterien hinsichtlich der Verwendbarkeit für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in situ.

**Tabelle 56: Bewertung visueller Sortierkriterien nach DIN 4074-1/-5 für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen**

Sortierkriterium	Bewertung
Ästigkeit „A“	festigkeitsminderndes Merkmal; in situ einfach messbar, sofern einsehbar → für in situ-Festigkeitssortierung geeignet
Faserneigung „FN“	festigkeitsminderndes Merkmal; in situ einfach messbar, sofern einsehbar → für in situ-Festigkeitssortierung geeignet
Risse „R“	tragfähigkeitsminderndes Merkmal; in situ einfach messbar, sofern einsehbar → für in situ-Festigkeitssortierung geeignet
Markröhre „MR“	festigkeitsmindernder Einfluss der Markröhre und des juvenilen Holzes tritt nur bei kleinen Querschnitten auf; in situ meist nicht messbar, da Hirnholzenden meist nicht einsehbar → für in situ-Festigkeitssortierung nicht geeignet
Jahringbreite „JB“	Indikator für Rohdichte, kein festigkeitsmindernder Einfluss; in situ meist nicht oder nur anhand von Bohrkernen messbar, da Hirnholzenden nicht einsehbar → für in situ-Festigkeitssortierung nicht geeignet
Baumkante „BK“	geometrisches Merkmal, keine Festigkeitsminderung → für in situ-Festigkeitssortierung nicht erforderlich
Verformungen/ Krümmungen „VK“	geometrisches Merkmal, keine Festigkeitsminderung → für in situ-Festigkeitssortierung nicht erforderlich
Verfärbungen „V“, Bläue „B“, Druckholz „DH“	kein festigkeitsmindernder Einfluss; in situ auf gealterte Oberfläche meist nicht erkennbar → für in situ-Festigkeitssortierung nicht geeignet/erforderlich
Fäule „F“, Insektenfraß „I“	Bewertung über holzschutztechnische Begutachtung; Restquerschnitt kann visuell sortiert werden → für in situ-Festigkeitssortierung nicht erforderlich

Aus Tabelle 56 geht hervor, dass lediglich die festigkeits- und tragfähigkeitsmindernden Kriterien Ästigkeit „A“, Faserneigung „FN“ und Risse „R“ als visuelle Sortierkriterien und Messgrößen für die in situ-Festigkeitssortierung in den Sortierstufen SGL 1-3 geeignet sind. Die übrigen Merkmale sind teilweise in bestehenden Konstruktionen nicht oder nur eingeschränkt einsehbar und messbar (Markröhre, Jahringbreite, Verfärbungen, u. ä.). Weitere Merkmale können

als Fehlflächen und Achsabweichungen in der Standsicherheitsbewertung berücksichtigt werden (Baumkante und Verformungen/ Krümmungen). Die Merkmale Fäule und Insektenfraß müssen ohnehin im Zuge der Instandsetzung aus holzschutztechnischer Sicht beseitigt werden. Die vorgenannten Merkmale werden daher im Weiteren nicht als Messgrößen berücksichtigt. Als zerstörungsfrei messbare Sortierkriterien werden in den Sortierstufen SGL 2-3 hinsichtlich der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung die Schallausbreitungsgeschwindigkeit „v“ als Indikator für die mittleren Materialeigenschaften des fehlerfreien Holzes sowie die übertragene elektrische Spannung „U“ zur Berücksichtigung der Signaldämpfung durch Fehlstellen und Wuchsmerkmalen innerhalb der Messstrecke herangezogen. Der dynamische Elastizitätsmodul „ $E_{dyn}$ “ wird aufgrund der engen Beziehung zum statischen Biege-Elastizitätsmodul ebenfalls als Messgröße berücksichtigt. Da zu dessen Ermittlung die Rohdichte erforderlich ist, ist dies allerdings nur in den Sortierstufe SGL 2b und SGL 3 der Fall. Die Rohdichte wird auf zwei unterschiedlichen Wegen als Sortierkriterium berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.1). In der Sortierstufe SGL 2b wird die aus der gemessenen Eindringtiefe rechnerisch ermittelte Rohdichte „ $\rho_{TP}$ “ herangezogen. Die an Bohrkernproben ermittelte Rohdichte „ $\rho_{BK}$ “ kommt hingegen aufgrund des höheren Aufwandes für deren Entnahme und labortechnische Untersuchung nur in der Sortierstufe SGL 3 zur Anwendung. Die vorgeschlagene Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung ist in Abbildung 119 schematisch dargestellt.

<b>Sortierstufe SGL 3 - apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risstiefe (Messgrößen: A/FN/R)</li> <li>- Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (Messgrößen: v/U)</li> <li>- Entnahme von Bohrkernproben (Messgrößen: <math>\rho_{BK}/E_{dyn}</math>)</li> </ul>	
<b>Sortierstufe SGL 2 - apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung</b>	
<b>Sortierstufe SGL 2a</b>	<b>Sortierstufe SGL 2b</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risstiefe (Messgrößen: A/FN/R)</li> <li>- Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (Messgrößen: v/U)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risstiefe (Messgrößen: A/FN/R)</li> <li>- Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (Messgrößen: v/U)</li> <li>- Eindringtiefenmessung (Messgrößen: <math>\rho_{TP}/E_{dyn}</math>)</li> </ul>
<b>Sortierstufe SGL 1 - visuelle Festigkeitssortierung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risstiefe (Messgrößen: A/FN/R)</li> </ul>	
<b>Sortierstufe SGL 0 - keine Festigkeitssortierung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung des allgemeinen Bauzustandes (Schäden und Verformungen)</li> </ul>	

Abbildung 119: Schematische Darstellung einer mehrstufigen in situ-Festigkeitssortierung

### 6.3. Regressionsanalyse

Die in Abschnitt 6.2 aufgeführten Messgrößen wurden in mehreren Kombinationen hinsichtlich der Ausprägung ihrer Beziehungen zu den Zielgrößen Biegebruchfestigkeit und statischem Biege-Elastizitätsmodul untersucht. Eine Übersicht über sämtliche untersuchte Kombinationen ist in Tabelle A. 4 in Anlage 4 zu finden. Für jede Holzart und Zielgröße ergaben sich jeweils 87 Kombinationen.

In den Sortierstufen SGL 2a/b und SGL 3 erfolgte bezüglich der Messgrößen Schallausbreitungsgeschwindigkeit „v“ und der übertragenen elektrische Spannung „U“ zusätzlich eine Unterscheidung anhand der Messmethode – d.h. direkte und indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung. Gleiches gilt für den in Sortierstufe SGL 2b und SGL 3 verwendeten dynamische Elastizitätsmodul „E<sub>dyn</sub>“, der entsprechend aus den direkt bzw. indirekt gemessenen Messgrößen errechnet wurde.

Eine zusätzliche Differenzierung der Messgrößen der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung wurde bezüglich der Zielgrößen getroffen. Die Regressionsbeziehungen zur Biegebruchfestigkeit sind mittels der Minima der Messgrößen „v“, „U“, „E<sub>dyn</sub>“ aufgestellt worden, da das Bruchverhalten und die Bruchfestigkeit durch die schwächere Bauteilseite bestimmt werden (vgl. a. [Steiger, 1997-1]). Die Beziehungen zum statischen Biege-Elastizitätsmodul wurden hingegen anhand der Mittelwerte der Messgrößen aufgestellt.

Je Zielgröße und untersuchter Holzart ergaben sich auf diese Weise 174 verschiedene Regressionsbeziehungen. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten sind in Anlage 4 aufgeführt (s. dort Tabelle A. 5 bis Tabelle A. 7). Die Korrelationskoeffizienten der am stärksten ausgeprägten Regressionsbeziehungen je Sortierstufe sind in Tabelle 57 zu finden. Daraus wird ersichtlich, dass die Ausprägung der Regressionsbeziehungen durch die Kombination aus visuell messbaren Wuchsmerkmalen und zerstörungsfrei/-arm messbaren Materialeigenschaften – d. h. zwischen den Sortierstufen SGL 1 und SGL 2a – deutlich gesteigert wird. Die Steigerung ist dabei bezogen auf den statischen Biege-Elastizitätsmodul stärker ausgeprägt als bezogen auf die Biegebruchfestigkeit. Dieses Verhältnis resultiert nach derzeitigem Untersuchungsstand aus der Beeinflussung des Bruchverhaltens und damit der messbaren Festigkeit durch die ausgewählten Wuchsmerkmale. Deren Einfluss auf die Steifigkeit ist im Allgemeinen geringer. Aus diesem Umstand heraus lässt sich auch erklären, dass die Korrelationskoeffizienten in den Sortierstufen SGL 2a/b und SGL 3 bezogen auf die Biegebruchfestigkeit geringer sind, als auf den statischen Biege-Elastizitätsmodul bezogen. Ein Einfluss der Messmethode – d.h. direkte oder indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung – ist aus den Korrelationskoeffizienten nicht zu erkennen.

**Tabelle 57: Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten der am stärksten ausgeprägten Regressionsbeziehungen**

Sortierstufe	Sortierkriterien	Prüfreihe/Holzart		
		Fichte	Kiefer	Eiche
Zielgröße: Biegebruchfestigkeit				
SGL 1	A, FN, R	0,407	0,598	0,476
SGL 2a	A, FN, R, v, U (direkte US-Messung)	0,517	0,707	0,785
	A, FN, R, v, U (indirekte US-Messung)	0,419	0,716	0,800
SGL 2b	A, FN, R, v, U, ρ (direkte US-Messung)	0,515	0,743	/
	A, FN, R, E, ρ (direkte US-Messung)	/	/	0,785
	A, FN, R, v, U, ρ (indirekte US-Messung)	0,505	0,742	/
	A, FN, R, E, ρ (indirekte US-Messung)	/	/	0,801
SGL 3	A, FN, R, v, U, ρ (direkte US-Messung)	0,535	0,702	/
	A, FN, R, E, ρ (direkte US-Messung)	/	/	0,788
	A, FN, R, v, U, ρ (indirekte US-Messung)	0,527	0,716	/
	A, FN, R, E, ρ (indirekte US-Messung)	/	/	0,808

**Tabelle 57 (fortgesetzt)**

Sortierstufe	Sortierkriterien	Prüfreihe/Holzart		
		Fichte	Kiefer	Eiche
Zielgröße: statischer Biege-Elastizitätsmodul				
SGL 1	A, FN, R	0,294	0,535	0,310
SGL 2a	A, FN, R, v, U (direkte US-Messung)	0,790	0,817	0,869
	A, FN, R, v, U (indirekte US-Messung)	0,799	0,816	0,878
SGL 2b	A, FN, R, E, ρ (direkte US-Messung)	0,829	0,855	0,872
	A, FN, R, E, ρ (indirekte US-Messung)	0,834	0,840	0,876
SGL 3	A, FN, R, E, ρ (direkte US-Messung)	0,863	0,829	0,876
	A, FN, R, E, ρ (indirekte US-Messung)	0,867	0,837	0,887

Der Vergleich der einzelnen Sortierstufen zeigt holzartspezifische Unterschiede. Während sich die Korrelationskoeffizienten in der Prüfreihe „Eiche“ sowohl bezogen auf die Biegebruchfestigkeit als auch auf den statischen Biege-Elastizitätsmodul zwischen den Sortierstufen 2 und 3 nur geringfügig unterscheiden, sind bei den untersuchten Nadelhölzern deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei dem untersuchten Fichtenholz sind die Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zur Biegebruchfestigkeit in den Sortierstufen SGL 2a und SGL 2b annähernd gleich und steigen geringfügig in der Sortierstufe SGL 3. Bezogen auf den statischen Biege-Elastizitätsmodul ist hingegen eine stetige Zunahme der Korrelationskoeffizienten zwischen Sortierstufe SGL 2a und SGL 3 zu verzeichnen. Für das untersuchte Kiefernholz ist ein entgegengesetztes Verhältnis festzustellen. Sowohl die Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zur Biegebruchfestigkeit als auch zum statischen Biege-Elastizitätsmodul nehmen zwischen der Sortierstufe SGL 2a und SGL 2b zu und in der Sortierstufe SGL 3 geringfügig ab.

#### 6.4. Ableitung von Grenzwerten für den Sortierparameter

Zur praktischen Anwendung der untersuchten Regressionsbeziehungen für die apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung ist die Ableitung von geeigneten Grenzwerten erforderlich. Dies erfolgte in Anlehnung an die Festlegungen der EN 14081-2:2018, Anhang B. Hierzu müssen lineare Regressionsbeziehungen zwischen den Schätzwerten der Zielgröße und der Zielgröße aufgestellt werden (s. Gl. 31 & Gl. 32). Die Ableitung von Grenzwerten der Sortierparameter ist in diesem Fall nur für die Sortierstufen SGL 2 a/b und 3 erforderlich. In der Sortierstufe 1 kann eine Zuordnung über die Grenzwerte der DIN 4074-1/-5 erfolgen. Die Schätzwerte der Zielgrößen wurden in den Sortierstufen SGL 2a/b und SGL 3 mit Hilfe der Regressionsgleichungen für die Beziehungen mit der jeweils stärksten Ausprägung rechnerisch ermittelt. Eine Auflistung der verwendeten Regressionsgleichungen ist in Anlage 4 zu finden (s. dort Tabelle A. 8). Die sich zwischen den Zielgrößen und deren Schätzwerten ergebenden Regressionsgleichungen und Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle A. 9 in Anlage 4 aufgeführt.

für Steifigkeitskennwerte:  $TP = a_{TP} \cdot IP + b_{TP}$  **Gl. 31**

für Festigkeitskennwerte:  $TP = a_{TP} \cdot IP + b_{TP} - t \cdot s_{\delta,TP}$  **Gl. 32**

mit: *TP* ... Zielgröße, „target property“ [N/mm<sup>2</sup>]; *IP* ... Schätzwert der Zielgröße bzw. Sortierparameter, „indicating property“ [N/mm<sup>2</sup>]; *a<sub>TP</sub>* ... Regressionskoeffizient der

*Zielgröße [/];  $b_{TP}$  ... Regressionskonstante der Zielgröße [/];  $t$  ... Faktor der Student'schen  $t$ -Verteilung (hier:  $t = 1,645$ )*

Durch Umstellung der nach Gl. 31 und Gl. 32 ermittelten Regressionsgleichungen können dann die Grenzwerte des Sortierparameters berechnet werden (s. Gl. 33). Hierbei werden die charakteristischen Kennwerte nach DIN EN 338 als Zielgröße eingesetzt.

$$S_{TP} = \frac{TP_{req} - b_{TP}}{a_{TP}} \quad \text{Gl. 33}$$

*mit:  $S_{TP}$  ... Grenzwert für den Schätzwerte der Zielgröße [N/mm<sup>2</sup>];  $TP_{req}$  ... erforderliche Zielgröße (hier: charakteristischen Kennwerte der jeweiligen Festigkeitsklassen nach EN 338, [N/mm<sup>2</sup>]);  $a_{TP}$  ... Regressionskoeffizient der Zielgröße [/];  $b_{TP}$  ... Regressionskonstante der Zielgröße [/]*

Die Grenzwerte der Sortierparameter wurden für folgende Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 abgeleitet:

- Nadelholz (Fichte/Kiefer): C18, C24, C30, C35, C40
- Laubholz (Eiche): D18, D30, D35, D40, D45

Die Berechnung der Grenzwerte ist nachfolgend am Beispiel der Festlegung des Grenzwertes für die Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338 für die Sortierung von Kiefernholz in der Sortierstufe SGL 2a mittels indirekter Ultraschall-Impulslaufzeitmessung dargestellt.

Regressionsgleichung zwischen dem statischen Biege-Elastizitätsmodul und dessen Schätzwerten:

$$E_m = 1,00 \cdot IP - 3,82 \cdot 10^{-11} \quad [N/mm^2]$$

Regressionsgleichung zwischen der Biegebruchfestigkeit und deren Schätzwerten:

$$f_m = 1,00 \cdot IP - 1,14 \cdot 10^{-13} - t \cdot 13,56 \quad [N/mm^2]$$

Erforderliche Zielgrößen nach DIN EN 338:2016, Tabelle 1:

$$TP_{Em,req} = 11000 \text{ N/mm}^2$$

$$TP_{fm,req} = 24 \text{ N/mm}^2$$

Grenzwert für den Sortierparameter bezogen auf den statischen Biege-Elastizitätsmodul:

$$S_{Em} = \frac{TP_{Em,req} - b_{TP,Em}}{a_{TP,Em}} = \frac{11000 \text{ N/mm}^2 + 3,82 \cdot 10^{-11}}{1,00} = 11000 \text{ N/mm}^2$$

Grenzwert für den Sortierparameter bezogen auf die Biegebruchfestigkeit:

$$S_{fm} = \frac{TP_{fm,req} - b_{TP,fm} + t \cdot s_{\delta,TP}}{a_{TP,fm}} = \frac{24 \text{ N/mm}^2 + 1,14 \cdot 10^{-13} + 1,645 \cdot 13,56}{1,00} = 46,31 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{fm} \approx 46 \text{ N/mm}^2$$

Die Überprüfung der abgeleiteten Grenzwerte erfolgte entsprechend der Festlegungen der DIN EN 14081-3:2016 für ausgabekontrollierte Sortiersysteme anhand der charakteristischen Materialkennwerte. Erfüllen die charakteristischen Kennwerte des Probenmaterials mindestens die Anforderungen der jeweiligen Festigkeitsklassen nach DIN EN 338, gelten die Grenzwerte als verifiziert. Andernfalls müssen die Grenzwerte angepasst und erneut überprüft werden.

Die Ermittlung der charakteristischen Werte der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls erfolgte nach DIN EN 384:2019 und DIN EN 14358:2016. In Anlehnung an die Festlegungen zur Ermittlung des charakteristischen Mittelwertes des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 384:2019, Gl. (10) wurde eine Grenzwertunterschreitung von maximal 5% als zulässig betrachtet. Die auf diese Weise abgeleiteten Grenzwerte sind in Tabelle A. 10 in Anlage 4 zusammengefasst.

Die sich anhand der abgeleiteten Grenzwerte der Sortierparameter ergebenden charakteristischen Werte der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls sind in Tabelle 58 und Tabelle 59 aufgeführt. Wie daraus ersichtlich, erfüllen diese die in DIN EN 338 festgelegten charakteristischen Kennwerte der betrachteten Festigkeitsklassen. Dementsprechend können die aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Grenzwerte zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen verwendet werden.

**Tabelle 58: Charakteristische Werte der Biegefestigkeit  $f_{m,k}$  in [N/mm<sup>2</sup>]**

	Holzart	Festigkeits- klasse nach DIN EN 338	charakteristische Kennwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]					
			SGL ...					
			2a (dir)	2a (ind)	2b (dir)	2b (ind)	3 (dir)	3 (ind)
Zielgröße: Biegebruchfestigkeit $f_{m,k}$	Fichte	C18	43,9	49,8	44,0	43,9	43,5	43,8
		C24	50,3	55,1	50,0	50,1	49,6	49,3
		C30	57,0	61,2	56,8	56,8	56,1	56,1
		C35	61,7	66,3	62,2	62,0	61,8	61,4
		C40	65,4	67,8	64,8	64,8	66,0	66,0
	Kiefer	C18	44,1	43,2	41,5	41,0	44,5	43,6
		C24	50,2	47,8	46,8	46,5	49,9	48,5
		C30	57,7	55,0	53,0	53,0	57,7	55,9
		C35	62,5	60,1	60,6	60,0	62,0	61,8
		C40	67,8	66,8	63,8	63,6	67,4	67,4
	Eiche	D18	44,8	42,5	41,5	40,0	41,7	41,1
		D30	58,3	53,4	54,1	51,8	54,0	53,2
		D35	63,6	58,9	60,4	58,8	61,2	59,5
		D40	68,8	63,8	64,9	62,3	65,8	64,3
		D45	74,9	70,2	70,3	68,9	69,9	70,7

**Tabelle 59: Charakteristische Werte des statischen Biege-Elastizitätsmoduls  $E_{0,mean}$  (in [N/mm<sup>2</sup>])**

	Holzart	Festigkeits- klasse nach DIN EN 338	charakteristische Kennwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]					
			SGL ...					
			2a (dir)	2a (ind)	2b (dir)	2b (ind)	3 (dir)	3 (ind)
Zielgröße: statischer Biege-Elastizitätsmodul $E_{0,mean}$	Fichte	C18	11277	11094	11358	11549	10643	10893
		C24	12374	12313	12535	12883	11911	12365
		C30	13257	13335	13411	13954	12830	13346
		C35	14201	14127	14515	14869	13943	14473
		C40	15107	15148	15491	16077	14853	15312
	Kiefer	C18	11692	11397	11448	11824	11724	12166
		C24	12456	12562	12421	12572	12725	13054
		C30	13223	13266	13191	13280	13566	13772
		C35	14351	14193	14396	14434	14695	14943
		C40	15458	15261	15537	15604	15732	15797
	Eiche	D18	10122	10208	9841	10454	10433	10610
		D30	11725	11824	11214	12130	12252	12107
		D35	12878	12973	12416	13385	13327	13097
		D40	14081	14122	13602	14500	14527	14238
		D45	14669	14688	14056	15225	15209	14985

Bei der zusätzlichen Betrachtung der Übereinstimmung der Zuordnung der einzelnen Prüfkörper anhand der versuchstechnisch ermittelten Werte der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls sowie anhand der Sortierparameter werden deutliche Unterschiede zwischen der Sortierung anhand der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls ersichtlich (s. Tabelle 60).

Tabelle 60 zeigt, dass sowohl bezogen auf die charakteristische Biegebruchfestigkeit als auch auf den mittleren statischen Biege-Elastizitätsmodul nur ein geringer Anteil des untersuchten Probenmaterials überschätzt wurde. Je nach Zielgröße, Holzart und Sortierstufe liegt dieser Anteil bei maximal 2,0 %. Dabei trat unter Verwendung des mittleren statischen Biege-Elastizitätsmoduls keine Überschätzung der Tragfähigkeit auf. Der Anteil der unterschätzten Prüfkörper ergibt sich hingegen für die beiden betrachteten Zielgrößen deutlich differenzierter. Bezogen auf die charakteristische Biegebruchfestigkeit wurden ca. (35 ... 60) % des untersuchten Probenmaterials unterschätzt. Die prozentuale Differenz zu den Klassengrenzwerten der versuchstechnisch abgeleiteten Festigkeitsklassen beträgt dabei bis zu  $\Delta_{max} = 32$  %. Bei Verwendung des mittleren statischen Biege-Elastizitätsmoduls liegt der Anteil der unterschätzten Prüfkörper zu ca. (4 ... 14) %. Die prozentuale Differenz zu den Klassengrenzwerten der versuchstechnisch abgeleiteten Festigkeitsklassen beträgt hier bis zu  $\Delta_{max} = 15$  %. Eine Übereinstimmung der zugeordneten Festigkeitsklassen bezogen auf die charakteristische Biegebruchfestigkeit tritt bei ca. (39 ... 65) % des untersuchten Probenmaterials auf. Bezogen auf den mittleren statischen Biege-Elastizitätsmodul beträgt der Anteil ca. (86 ... 96) %.

**Tabelle 60: Übereinstimmung zwischen der Festigkeitssortierung anhand von versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten und anhand der Sortierparameter (d/i ... direkte bzw. indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung)**

	Holzart	Zuordnung	Prozentuale Übereinstimmung in den Sortierstufen					
			SGL ...					
			2a (d)	2a (i)	2b (d)	2b (i)	3 (d)	3 (i)
Zielgröße: Biegebruchfestigkeit $f_{m,k}$	Fichte	unterschätzt	60,4%	58,4%	57,0%	59,4%	57,9%	59,4%
		gleich	38,6%	40,9%	42,7%	39,9%	41,0%	40,2%
		überschätzt	1,0%	0,7%	0,3%	0,7%	1,1%	0,4%
	Kiefer	unterschätzt	36,3%	35,7%	40,6%	42,4%	39,9%	35,3%
		gleich	63,0%	63,7%	58,5%	57,1%	59,6%	64,7%
		überschätzt	0,7%	0,7%	0,9%	0,4%	0,5%	0,0%
	Eiche	unterschätzt	41,6%	40,3%	44,3%	39,0%	38,7%	38,7%
		gleich	58,1%	57,7%	53,9%	58,3%	60,0%	60,0%
		überschätzt	0,3%	2,0%	1,8%	2,6%	1,3%	1,3%
Zielgröße: statischer Biege-Elastizitätsmodul $E_{0,mean}$	Fichte	unterschätzt	7,3%	7,6%	8,5%	8,5%	9,2%	7,7%
		gleich	92,7%	92,4%	91,5%	91,5%	90,8%	92,3%
		überschätzt	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Kiefer	unterschätzt	6,3%	3,7%	4,9%	4,9%	4,1%	4,6%
		gleich	93,7%	96,3%	95,1%	95,1%	95,9%	95,4%
		überschätzt	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Eiche	unterschätzt	9,7%	13,8%	9,2%	10,1%	11,6%	14,6%
		gleich	90,3%	86,2%	90,8%	89,9%	88,4%	85,8%
		überschätzt	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Im Hinblick auf die Anwendung der oben beschriebenen Methode zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist eine Verwendung der charakteristischen Biegebruchfestigkeit als Zielgröße zur Ableitung der Grenzwerte des Sortierparameters nicht zu empfehlen. Aufgrund des vergleichsweise hohen Anteils des unterschätzten Probenmaterials ist eine zuverlässige Bewertung der Tragfähigkeit der Holzbauteile sowie die Aufdeckung von Tragfähigkeitsreserven praktisch nicht möglich. Eine substanzschonende Instandsetzung kann auf diesem Wege nicht gewährleistet werden. Die Verwendung des mittleren statischen Biege-Elastizitätsmoduls hingegen ist angesichts des hohen Anteils an korrekt eingeschätztem Probenmaterial für die in situ-Festigkeitssortierung möglich.

## 6.5. Festlegung der Vorgehensweise für die in situ-Festigkeitssortierung

Auf Grundlage der eigenen Untersuchungen zur apparativ unterstützten visuellen Festigkeitssortierung kann festgestellt werden, dass durch die Kombination von ausgewählten visuell messbaren Wuchsmerkmalen mit zerstörungsfrei oder -arm messbaren Materialkennwerten eine zuverlässige Aussage über die Materialqualität des untersuchten Probenmaterials möglich ist. Die Zuverlässigkeit ist dabei wesentlich höher als allein auf Grundlage der visuellen Sortierung oder der zerstörungsfreien und-armen Prüfmethode. Dies ist eine zusätzliche Bestätigung der Feststellungen vorangegangener Untersuchungen zur Festigkeitssortierung von Holz mittels apparativer Unterstützung (vgl. bspw. [Blaß/Frese, 2002], [Denzler/Glos, 2009]).

Die Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Sortiermethode wesentlich von den verwendeten Mess- und Zielgrößen abhängt. Wird beispielsweise die charakteristische Biegebruchfestigkeit als Zielgröße für die Ermittlung der Sortierparameter und deren Grenzwerte verwendet, ist der Anteil an Holzbauteilen, deren tatsächliche Tragfähigkeit unterschätzt wird, deutlich höher als es für den mittleren statischen Biege-Elastizitätsmodul der Fall ist. Die Ursache hierfür liegt in den verwendeten zerstörungsfreien Prüfmethode – vor allem der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung – begründet. Die abgeleitete Sortiermethodik stützt sich in den Sortierstufen SGL 2 a/b und SGL 3 im Wesentlichen auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit. Diese Messgröße weist eine enge Beziehung zur Steifigkeit von Holz auf. Die Beziehung zur charakteristischen Biegefestigkeit ist im Gegensatz dazu schwächer ausgeprägt. Daher sollte bei der praktischen Anwendung zukünftig der mittlere statische Biege-Elastizitätsmodul als Zielgröße verwendet werden.

Grundlegend für die praktische Anwendung der abgeleiteten Sortiermethode ist die Festlegung der Anwendungsbereiche der jeweiligen Sortierstufen. Wie aus Tabelle 55 hervorgeht, ist abhängig von der Sortierstufe die Anwendung angepasster Nachweismethoden zur Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit möglich. Die Erforderlichkeit angepasster oder aktualisierter Nachweismethoden richtet sich im Wesentlichen auch nach der statisch-konstruktiven Aufgabe der Bauteile innerhalb der Konstruktion. So sind für untergeordnete Bauteile mit geringer statischer Relevanz nur ein geringer Kenntnisstand sowie semi-probabilistische Nachweise ohne Aktualisierungen für deren Bewertung ausreichend. Für die Bewertung des Haupttragwerkes, hochbeanspruchter oder stark geschädigter Bauteile kann hingegen ein höherer Kenntnisstand und damit eine genauere Sortierung erforderlich werden. Gleiches gilt für Bauteile und Konstruktionen von hohem denkmalpflegerischem Wert. Tabelle 61 zeigt eine Gegenüberstellung der Sortierstufen und der Kenntnisstufen nach [Loebjinski, 2021] und beispielhafter Anwendungsbereiche.

**Tabelle 61: Gegenüberstellung der Sortierstufen (SGL) und der Kenntnisstufen (KL) nach [Loebjinski, 2021] sowie beispielhafte Anwendungsbereiche**

Sortierstufe	Kenntnisstufe	Anwendungsbereiche
SGL 1	KL 1	- Unterkonstruktionen - Bauteile und Konstruktionen mit geringer Beanspruchung - Bauteile und Konstruktionen ohne denkmalpflegerischen Wert
	KL 2a	- Bauteile und Konstruktionen mit normaler Beanspruchung und/oder ohne denkmalpflegerischen Wert - Bauteile und Konstruktionen ohne oder mit geringer Schädigung
SGL 2	KL 2a-c	- Bauteile und Konstruktionen mit normaler Beanspruchung und/oder ohne denkmalpflegerischen Wert - Bauteile und Konstruktionen ohne oder mit geringer Schädigung
SGL 3	KL 2b, KL 2c, KL 3	- Bauteile und Konstruktionen mit hoher Beanspruchung und/oder denkmalpflegerischem Wert - Bauteile und Konstruktionen mit starken Schädigungen

Hinsichtlich der Relevanz der in DIN 4074-1/-5 aufgeführten Sortierkriterien für die visuelle Sortierung und deren Bewertung können auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen folgende Präzisierungen und Festlegungen getroffen werden.

**Relevante festigkeits- und tragfähigkeitsmindernde Sortierkriterien:**

*Für die in situ-Festigkeitsortierung sind lediglich die Ästigkeit, die Faserneigung und Schwindrisse relevant. Diese Messgrößen müssen in allen Sortierstufen erfasst werden. In der Sortierstufe SGL 1 können die in DIN 4074-1/-5 angegebenen Grenzwerte verwendet werden. In den Sortierstufen SGL 2a/b und SGL 3 gehen die nach DIN 4074-1/-5 berechneten Verhältniszahlen direkt in die Berechnung des Sortierparameters ein.*

*Die Sortierkriterien „Markröhre“, „Jahringbreite“ und „Verfärbungen“ sind in situ in den seltensten Fällen erfassbar. Des Weiteren sind sie hinsichtlich der Festigkeits-/Tragfähigkeitsminderung von untergeordneter Relevanz. Ihr Einfluss auf die Festigkeit und Tragfähigkeit wird von den unter 1) genannten Sortierkriterien überlagert. Eine Erfassung dieser Sortierkriterien ist daher in den Sortierstufen SGL 2a/b und SGL 3 nicht erforderlich. In der Sortierstufe SGL 1 sollten diese Merkmale – sofern einsehbar und messbar – jedoch miterfasst und anhand der Grenzwerte nach DIN 4074-1/-5 bewertet werden.*

**Geometrische Sortierkriterien:**

*Die geometrischen Sortierkriterien „Baumkante“, „Verformungen“ und „Krümmungen“ sind nur bei der Sortierung von neuem Bauholz relevant. Ihre Begrenzung dient der Herstellung formschlüssiger Anschlüsse und Auflager, da die spätere Einbausituation des Holzbauteiles zum Zeitpunkt der Sortierung noch nicht bekannt ist. Bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen ist sowohl die Einbausituation als auch der Kraftfluss bekannt und erfassbar. Daher können diese Sortierkriterien aus statisch-konstruktiver Sicht als Fehlfläche (Baumkante, Verformungen im Anschluss-/Auflagerbereich) oder als Außermittigkeit (Verformungen und Krümmungen) berücksichtigt und bewertet werden.*

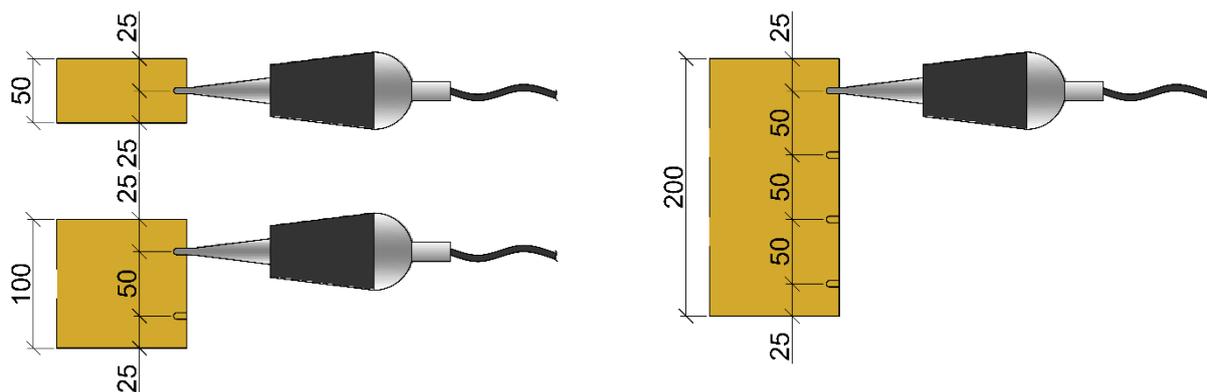
*Weitere geometrische Bauteilmerkmale – wie beispielsweise Fehlflächen oder oberflächliche Beschädigungen werden von der entwickelten Sortiermethodik nicht bei der Berechnung der Sortierparameter berücksichtigt. Um eine eventuelle Beeinflussung der Bauteiltragfähigkeit dennoch zu berücksichtigen, sollten derartige Bauteilmerkmale im Zuge der visuellen Untersuchung erfasst und dokumentiert werden.*

**Holzerstörende Organismen:**

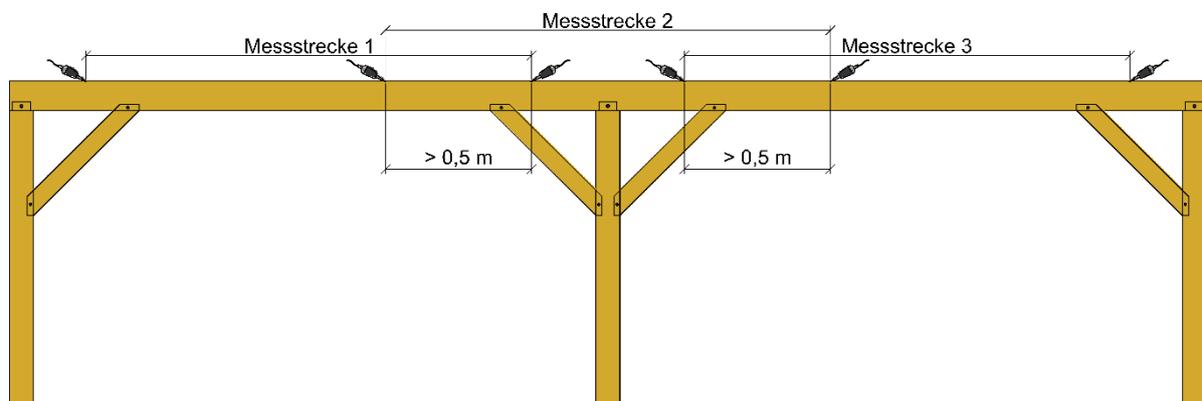
*Die Sortierkriterien „Fäule“ und „Insektenfraß“ besitzen nur einen indirekten Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Holzbauteiles. Zwar ruft ein Befall durch holzerstörende Organismen im fortgeschrittenen Stadium einen Substanzverlust sowie eine Reduzierung der Festigkeit und Tragfähigkeit hervor, jedoch beschränken sich diese auf die befallenen Querschnittsbereiche und Bauteilabschnitte. Die nicht befallenen, ungeschädigten Restquerschnitte weisen im Regelfall keine Festigkeits- oder Tragfähigkeitsreduzierung auf. Des Weiteren können Bauteile, die durch holzerstörende Insekten befallen oder bereits geschädigt sind, bereits in der nach DIN EN 17121 geforderten vorläufigen Untersuchung sowie eine holzschutztechnische Begutachtung erfasst werden. Die ungeschädigten Restquerschnitte können dann nach vorheriger Freilegung hinsichtlich der Sortierkriterien Äste, Faserneigung und Risse untersucht und bewertet werden. Die Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit ist dann unter Berücksichtigung des reduzierten Querschnittes und dessen vorhandener Materialqualität möglich.*

Bezüglich der Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung haben sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Messmethode – d.h. direkte oder indirekte

Messung – ergeben. Zur Durchführung direkter Messungen ist jedoch die Zugänglichkeit beider Hirnholzenden erforderlich. Diese ist in bestehenden Konstruktionen in den meisten Fällen nicht gegeben. Daher kann hier nur die indirekte Messung zum Einsatz kommen. Bei größeren Bauteilquerschnitten werden in diesem Fall jedoch nur die Randbereiche des Querschnittes erfasst. Sind diese beispielsweise durch holzerstörende Organismen vorgeschädigt, können die Messergebnisse verfälscht werden. Ebenso muss bei der Anwendung der indirekten Ultraschall-Impulslaufzeitmessung darauf geachtet werden, dass das für die visuelle Sortierung maßgebliche Wuchsmerkmal – d.h. die „schwächste Stelle“ – innerhalb des Messbereiches liegt. Vor der Festlegung der Messbereiche ist daher eine eingehende Inaugenscheinnahme der Bauteiloberflächen erforderlich. Bei größeren Bauteildimensionen können mehrere, nebeneinanderliegende Messungen erforderlich sein. Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen und den Erfahrungen der praktischen Anwendung sollte je 50 mm Querschnittsbreite/-höhe eine Messstrecke vorgesehen werden (s. Abbildung 120). Bei größeren Bauteillängen oder bei Bauteilen mit Zwischenauflagern wie bspw. Sparren und Pfetten empfiehlt sich die Aufteilung in mehrere, sich überlappende Messbereiche (s. Abbildung 121). Sind die Hirnholzenden ausreichend zugänglich, sollte die direkte Messmethode ergänzend zur indirekten Messung vorgenommen werden. Auch dabei sind mehrere, über den Querschnitt verteilte Messbereiche vorzusehen.



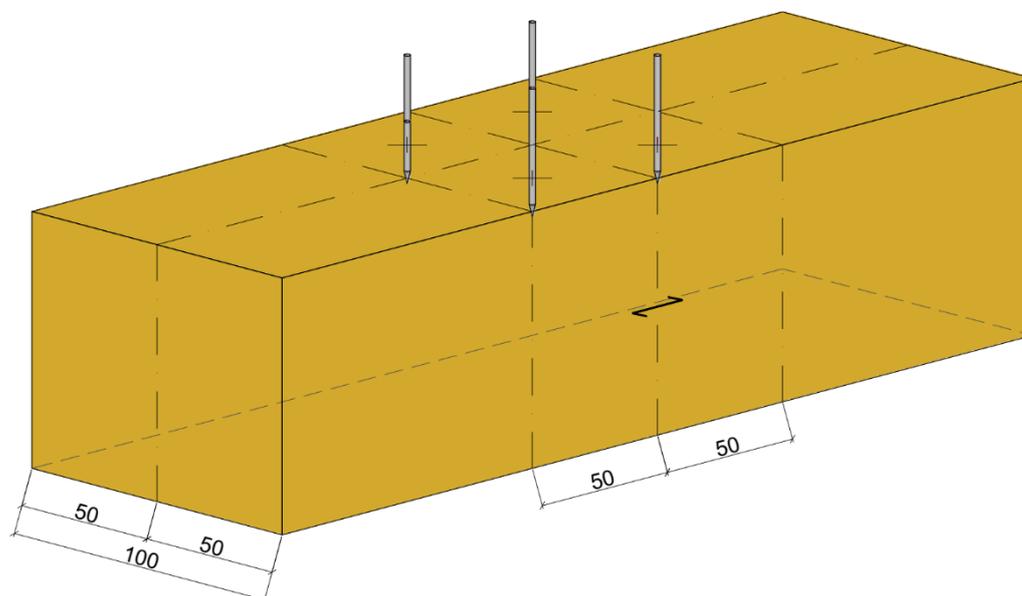
**Abbildung 120: Anordnung der Messstellen für die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bezogen auf die Querschnittsbreite (eigene Darstellung, Draufsicht)**



**Abbildung 121: Anordnung der Messstrecken für die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bezogen auf die Bauteillänge (eigene Darstellung)**

Die Anwendung der Eindringtiefenmessung zur Bestimmung der Rohdichte in der Sortierstufe SGL 2b ist auf die Untersuchung von Anschlussbereichen – bspw. Vorholzbereiche von Versätzen, Lochleibungen stiftförmiger Verbindungsmittel – oder lokal begrenzter Bauteilbereiche

begrenzt. Aufgrund der Inhomogenität von Holz ist eine Übertragung der lokal ermittelten Rohdichte auf das gesamte Bauteil nicht sinnvoll. Gleichzeitig müssen die Messungen in einem ausreichenden Umfang durchgeführt werden. Entsprechend der durchgeführten Betrachtungen zum erforderlichen Messumfang sollten in einem Raster von 50 x 50 mm mindestens 4 Messungen erfolgen (s. Abbildung 122).



**Abbildung 122: Anordnung der Messpunkte für die Eindringtiefmessung (eigene Darstellung)**

Bei der Bohrkernprobenentnahme zur Ermittlung der Rohdichte in der Sortierstufe SGL 3 muss darauf geachtet werden, dass die Entnahmestelle repräsentativ für das gesamte Bauteil ist. Dementsprechend muss diese Entnahmestelle innerhalb des Messbereiches der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung liegen. Die entnommenen Bohrkernproben müssen analog den Festlegungen der DIN EN 408 bezüglich der Bestimmung der Rohdichte von Holzbauteilen frei von Fehlern wie beispielsweise Ästen, Risse, Harzgallen oder ähnlicher Strukturstörungen sein. Des Weiteren müssen die Bohrkernproben in größtmöglicher Länge entnommen werden, um den natürlichen Streubereich der Rohdichte zu erfassen. Hinsichtlich der erforderlichen Probenanzahl sollten je 2 lfd. Metern Bauteillänge mindestens 4 Bohrkernproben entnommen werden. Generell muss bei der Probenentnahme darauf geachtet werden, dass die Bauteile nicht unverhältnismäßig geschwächt werden. Die Bohrlöcher müssen in jedem Fall durch passgenau eingeklebte Holzpfropfen verschlossen werden.

## 6.6. Zusammenfassung

Für eine zuverlässige qualitative Bewertung der Materialqualität ist eine Kombination mehrerer Mess- und Prüfmethode sowie eine gemeinsame Aus- und Bewertung der entsprechenden Messergebnisse erforderlich. Die derzeit bauaufsichtlich eingeführten normativen Regelungen treffen hierfür nur allgemeine Festlegungen. Bei der apparativ unterstützten visuellen Festigkeitssortierung wird dabei von einem zweistufigen Vorgehen ausgegangen, welches sich in eine visuelle „Vor“-Sortierung und eine „Nach“-Sortierung mit zerstörungsfreien Prüfmethode untergliedert. Durch dieses Vorgehen werden jedoch die Defizite beider methodischen Ansätze nicht beseitigt. Die visuelle Sortierung ermöglicht keine zuverlässige Feststellung von Holzbauteilen mit hoher und sehr hoher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse  $\geq$ C30/D35 nach DIN EN 338). Bei der alleinstehenden Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethode wird der

Einfluss von festigkeits- und tragfähigkeitsmindernden Wuchs- und Bauteilmerkmalen nicht erfasst und berücksichtigt. Diesem Umstand kann durch die Verwendung von Sortierparametern analog den Festlegungen für die maschinelle Festigkeitssortierung von neuem Bauholz nach DIN EN 14081-2 entgegengewirkt werden. Erste Ansätze hierzu wurden in vereinzelt Untersuchungen bereits betrachtet (vgl. bspw. [Kessel/et al., 1997]). Jedoch weisen diese Vorschläge Defizite auf, welche eine uneingeschränkte Anwendung in bestehenden Konstruktionen nicht zulassen. Daher wurden eigene Betrachtungen zur Entwicklung einer Methodik für die in situ-Festigkeitssortierung auf Grundlage der eigenen Materialuntersuchungen geführt (s. Abschnitte 6.1 und 6.2).

Die entwickelte Methodik wurde als mehrstufiges Modell aufgestellt. Hierdurch ist eine Anpassung des Aufwandes der Sortierung entsprechend der Funktion und des Erhaltungszustandes der Holzbauteile sowie die Verwendung angepasster Nachweismethoden für die Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit möglich. Handelt es sich beispielsweise um untergeordnete Bauteile, ist eine weniger umfängliche Sortierung ausreichend. Für die Bauteile, welche maßgeblich für die Trag- und Funktionsfähigkeit der gesamten Konstruktion sind, wäre eine umfänglicher Sortierung notwendig.

Die durchgeführten Betrachtungen zeigen, dass die Zuverlässigkeit der Sortierung in den höheren Stufen – d.h. durch Hinzunahme weiterer zerstörungsfrei oder -arm messbarer Kennwerte – steigt. Maßgeblich hierfür sind jedoch die verwendeten Mess- und Zielgrößen. Die Sortierung des untersuchten Probenmaterials anhand der nach DIN EN 14081-2 abgeleiteten Grenzwerte zeigt, dass generell nur ein geringer Anteil hinsichtlich der Tragfähigkeit überschätzt wird ( $p \leq 2\%$ ). Bei Verwendung der charakteristischen Biegebruchfestigkeit als Zielgröße für die Sortierung beträgt der Anteil der unterschätzten Prüfkörper  $p = (35 \dots 60)\%$ . Dies kann in der Praxis zu Fehleinschätzungen und ungerechtfertigten Eingriffen in die bestehende Bausubstanz führen. Unter Ansatz des mittleren statischen Biege-Elastizitätsmoduls beträgt der Anteil an unterschätzten Holzbauteilen nur  $p = (4 \dots 14)\%$ , was einer wesentlich höheren Zuverlässigkeit entspricht. Für die praktische Anwendung ist daher die Verwendung des mittleren statischen Biege-Elastizitätsmoduls als Zielgröße notwendig.

Die Ergebnisse der durchgeführten Betrachtungen veranschaulichen weiterhin, dass eine alleinige visuelle Sortierung zu ungenau und nicht ausreichend zuverlässig ist, um die Materialqualität von Holzbauteilen zu erfassen und zu bewerten. In den eigenen, systematischen Materialversuchen ergab sich eine Übereinstimmung zwischen der durch die visuelle Sortierung abgeschätzte und der versuchstechnisch ermittelten Tragfähigkeit von  $p = (6 \dots 19)\%$ . Der Anteil der Unterschätzung lag bei  $p = (74 \dots 91)\%$ . In der Praxis würde dies zu einer ungerechtfertigten Abwertung hinsichtlich der Materialqualität führen. Daraus können scheinbare Tragfähigkeitsdefizite und unnötige Eingriffe in die bestehende Bausubstanz resultieren. Die Sortierung mit Hilfe der vorgeschlagenen Methodik für die in situ-Festigkeitssortierung stellt eine wesentliche Verbesserung dar. Hierdurch ist eine genauere Bestimmung der Materialqualität möglich. In der Praxis können so Tragfähigkeitsreserven und -defizite zuverlässiger aufgedeckt und bei der Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit berücksichtigt werden. Dadurch werden substanzschonendere, wirtschaftlichere und ökologischere Eingriffe in bestehende Konstruktionen ermöglicht.

## **7. Erprobung der Methode zur in situ-Festigkeitssortierung**

Die in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass durch Kombination der visuellen Sortierung mit zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode eine wesentlich genauere Aussage zur Materialqualität von Holzbauteilen möglich ist. Die aus den vergleichenden Materialversuchen abgeleitete Methode für die in situ-Festigkeitssortierung ergab hohe Übereinstimmungen zwischen der durch zerstörungsfreie und -arme getroffenen Klassenzuordnung und den Zuordnungen, welche anhand der in den zerstörenden Biegeversuchen ermittelten Materialkennwerten getroffen wurde. Dabei erwies sich die Zielgröße statischer Biege-Elastizitätsmodul als besser geeignet als die Biegebruchfestigkeit. Die untersuchte Methodik erlaubt zusätzlich eine Reduzierung der visuell zu erfassenden Sortierkriterien. Hinsichtlich der Anwendung der zerstörungsfreien und -armen Mess-/Prüfmethode sind ebenfalls bestimmte Rahmenbedingungen und Festlegungen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 6.5).

Zur Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode zur in situ-Festigkeitssortierung sind weitere Untersuchungen notwendig. Dieses Erfordernis leitet sich zum einen aus dem Umstand ab, dass die vergleichenden Materialuntersuchungen an neuem Bauholz unter Laborbedingungen geführt wurden. Zum anderen ist es notwendig, die anhand der im Vorangegangenen beschriebenen Untersuchungen festgelegten Rahmenbedingungen zu überprüfen und gegebenenfalls zu konkretisieren.

Die praktische Erprobung erfolgte an fünf bestehenden, historischen Konstruktionen. Dabei handelte es sich um die Dachkonstruktionen eines Schulgebäudes aus dem frühen 20. Jahrhundert, die Deckenkonstruktion eines Schlosses aus dem 17. Jahrhundert, die Dachkonstruktionen zweier Kirchen aus dem 13. und 14. Jahrhundert sowie die Dachkonstruktion eines märkischen Mittelflurhauses aus dem späten 18. Jahrhunderts. Neben der Überprüfung der aus vergleichenden Materialuntersuchungen abgeleiteten Methode zur in situ-Festigkeitssortierung soll anhand dieser Beispiele auch der praktische Nutzen einer eingehenden Bauzustandsuntersuchung und in situ-Festigkeitssortierung dargestellt werden.

## 7.2. Laboruntersuchungen an Holzbauteilen aus historischen Holzkonstruktionen

### 7.2.1. Fallstudie 1 – Dachkonstruktion der Fichtenberg-Oberschule, Berlin

#### Objektbeschreibung

Das heutzutage als „Fichtenberg-Oberschule“ bekannte Gymnasium in Berlin-Steglitz wurde im Jahre 1904 als „Öffentliche höhere Mädchenschule“ gegründet. Aufgrund der stetig wachsenden Schülerzahl und der damit zunehmenden Raumnot beschloss man im Jahre 1910 nach mehrmaligen Umzügen der Einrichtung innerhalb des Bezirkes Steglitz-Zehlendorf den Neubau eines Schulgebäudes. Das neue Schulgebäude entwarf der Berliner Architekt und Gemeindebaumeister Hans Heinrich Müller (\* 1879, † 1951) in dem um die Jahrhundertwende in Mode gekommenen Landhausstil (s. Abbildung 123). Nach nur etwa zwei Jahren Bauzeit konnte der Neubau 1912 an die nun als „Kaiserin Auguste Viktoria-Lyzeum“ bekannte Einrichtung übergeben werden (s. a. [Wasmuth/et al., 2016]).



**Abbildung 123: Straßenansicht der „Fichtenberg-Oberschule“ in Berlin-Steglitz (Süd-Ost-Ansicht, Bildquelle: [Savin, 2015])**

Das Schulgebäude ist in drei Flügel unterteilt (s. Abbildung 124). Die südwestlichen und nordöstlichen Flügel sind zur Straße hin ausgerichtet, wobei der nordöstliche Flügel gegenüber dem südwestlichen Flügel zurückspringt. Auf dessen Rückseite schließt sich der nordwestliche Flügel an.

Die nord- und südwestlichen Flügel umfassen Unterrichts-, Werkstatt- und Laborräume. Deren Dachkonstruktionen sind als zimmermannsmäßige Konstruktionen ausgeführt. Die grundlegende Tragkonstruktion ist ein Pfettendach mit vierfach stehendem Stuhl und Hängesprengwerk (s. Abbildung 125).

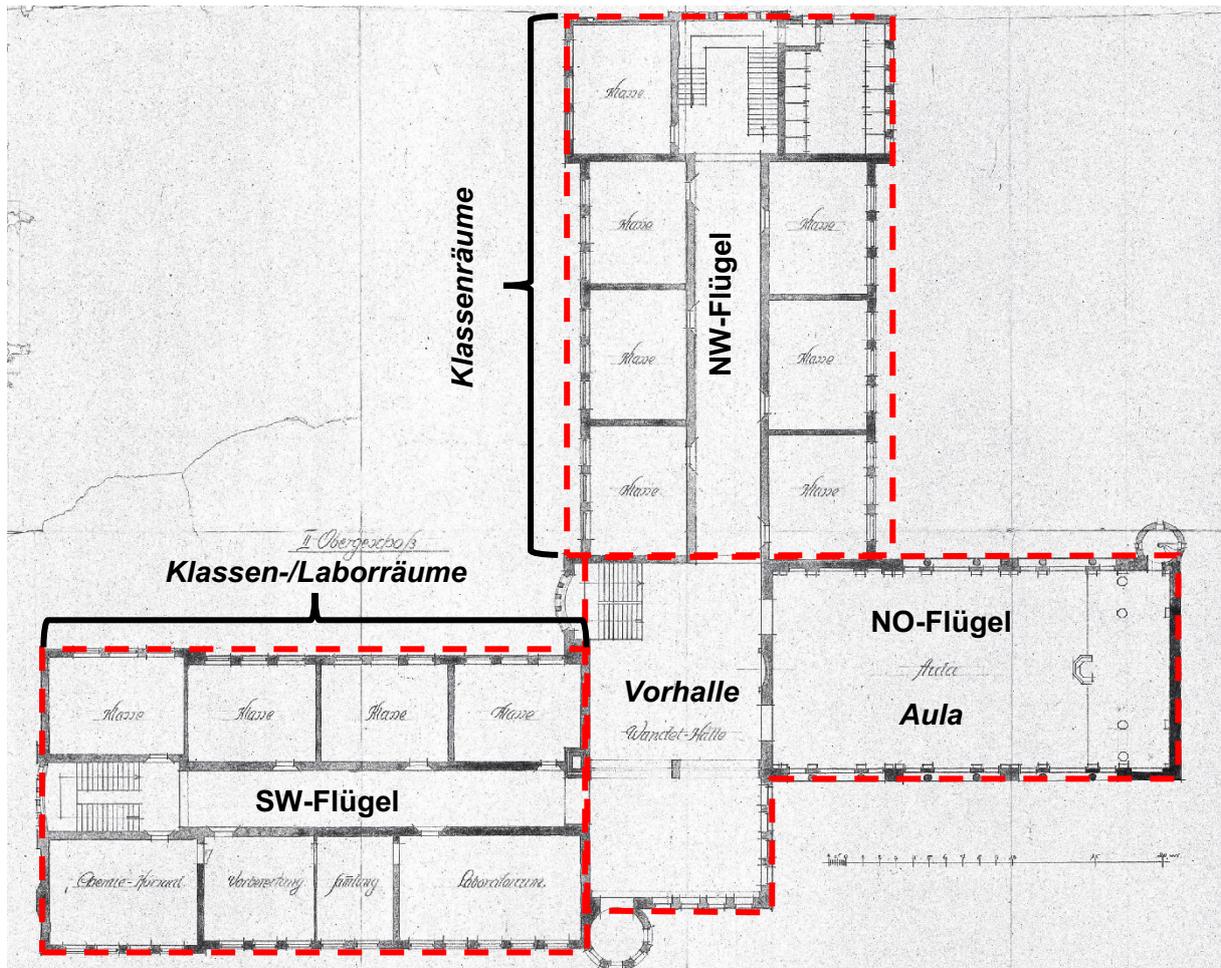


Abbildung 124: Bauzeitlicher Grundriss des Dachgeschosses (aus [Wasmuth/et al. 2016])

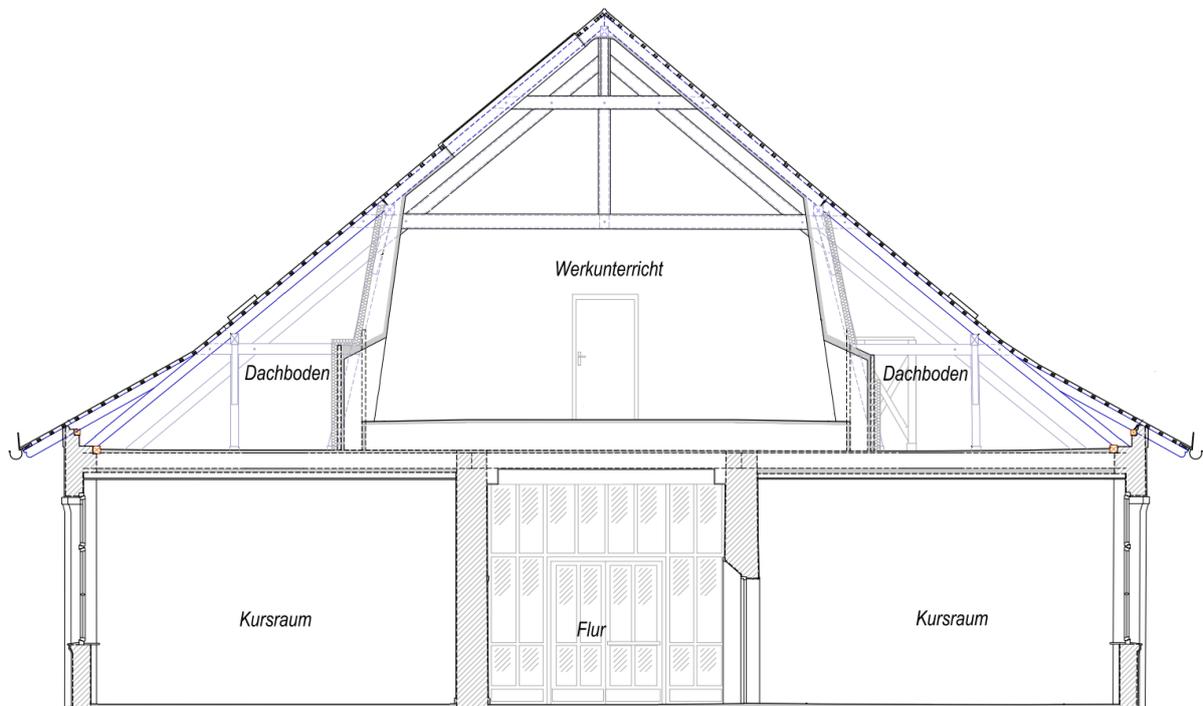


Abbildung 125: Querschnitt des Dachgeschosses – Südwest-Flügel (Auszug aus [FPK, 2018])

Im Nordost-Flügel des Schulgebäudes befindet sich die Aula, welche von einer Gewölbedecke mit Stuckkassetten (Rabitzdecke) abgeschlossen wird (s. Abbildung 126). Die Dachkonstruktion oberhalb der Aula wurde als Pfettendach in zimmermannsmäßiger und ingenieurmäßiger Holzbauweise ausgeführt (s. Abbildung 126 und Abbildung 127). Das Haupttragsystem bildeten insgesamt fünf Dreigelenk-Bögen mit Sprengwerk in Hetzer-Bauweise (I-Querschnitt mit veränderlicher Querschnittshöhe). Die Brettschichtholzbinden wiesen unterschiedliche Krümmungen und Neigungen auf, da die Dachkonstruktion als Walmdach ausgeführt war. In Querrichtung des Daches waren zusätzlich Zugbänder aus Vollholz angebracht. Die Aussteifung in Längsrichtung des Daches erfolgte über den Stuhl der Firstpfette, d. h. über hölzerne Streben, die mittels zimmermannsmäßiger Verbindungen (Zapfen und Holznägel) an die Stuhlsäulen der Firstpfette angeschlossen waren und über die Kopfbänder unterhalb der Firstpfette selbst. Als Pfetten dienten sowohl Vollholzbauteilen (Fuß-/Firstpfette) als von Brettschichtholzbauteilen (Fischbauchträger, d.h. gerade Biegeträger mit entsprechend dem Biegemomentenverlauf veränderlicher Querschnittshöhe). Die Brettschichtholzbauteile lagen dabei auf einer zimmermannsmäßigen Stütz-/Stuhlkonstruktion – bestehend aus Stielen und Kopfbändern aus Vollholz – auf, welche über Bolzenverbindungen mit den Hauptträgern verbunden waren. Auf den insgesamt neun Pfetten lagen die Sparren auf. Die Rabitzdecke über der Aula wurde von einem sekundären Tragsystem aus gebogenen Brettschichtholzbauteilen getragen, welche über Längsriegel an der Dachkonstruktion befestigt waren.

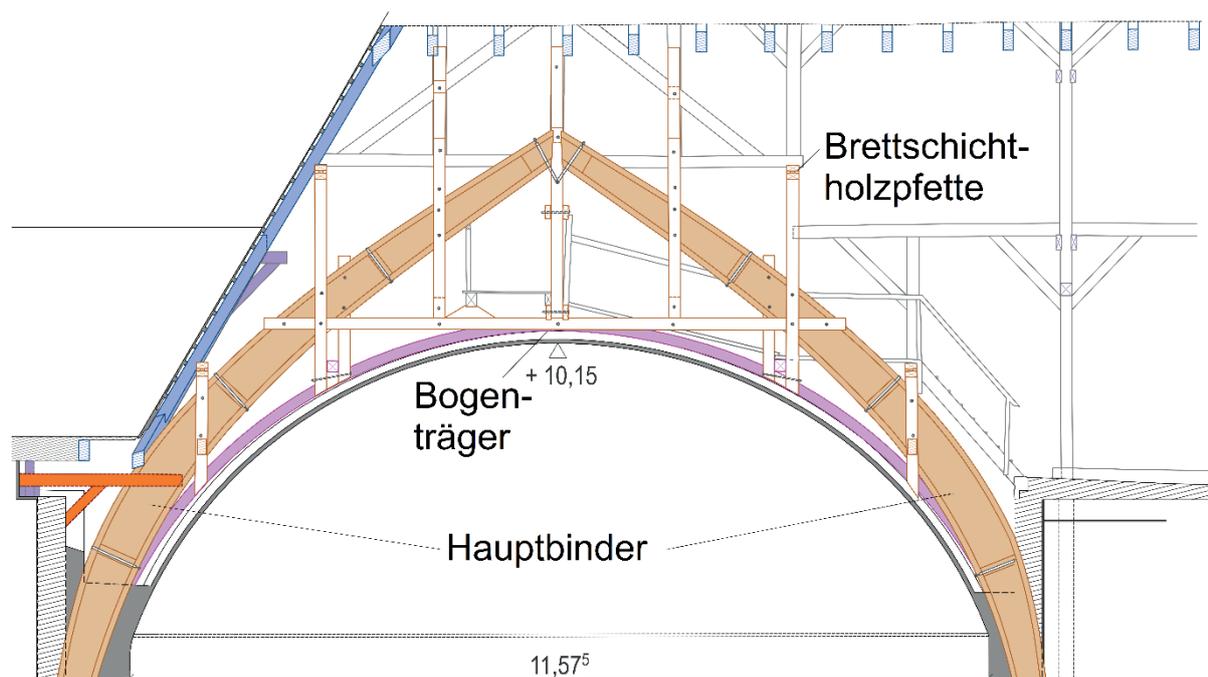
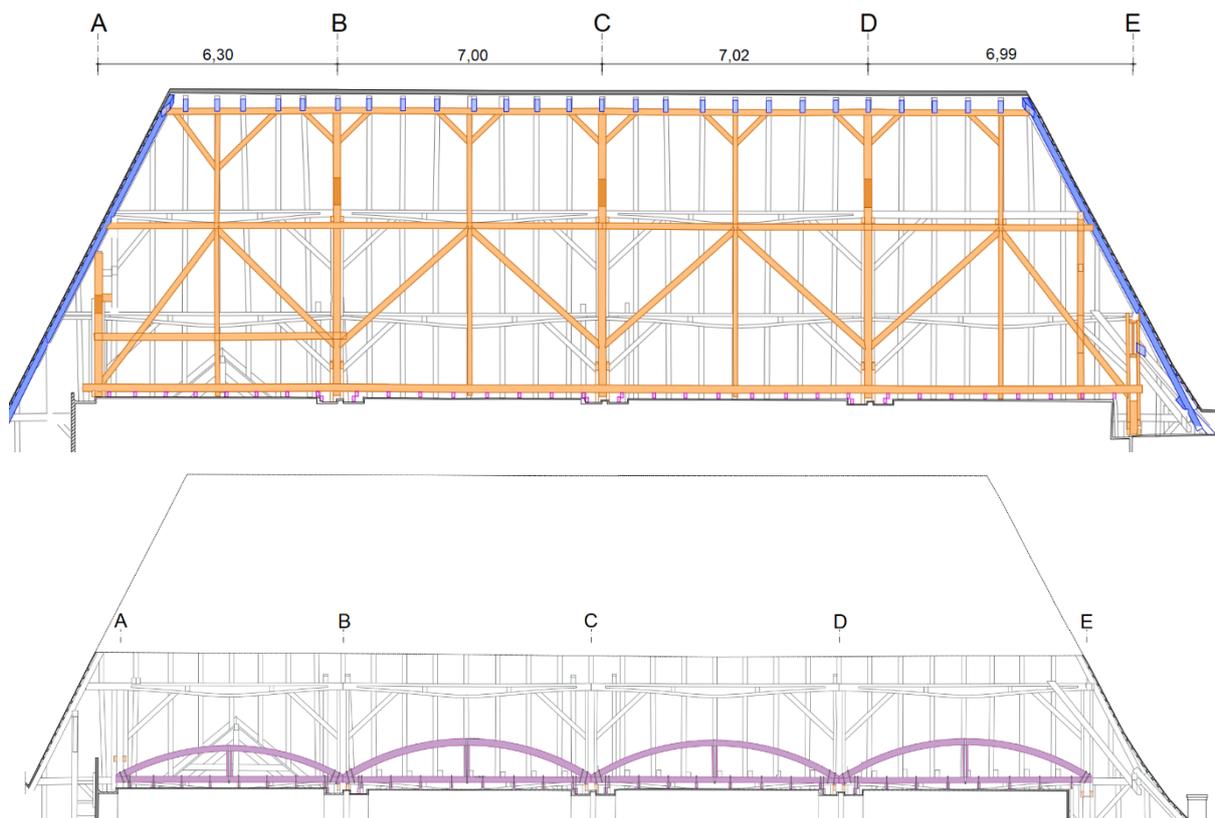


Abbildung 126: Querschnitt des Dachgeschosses – Nordost-Flügel (aus [Wasmuth/et al. 2016])



**Abbildung 127: Längsschnitte des Dachgeschosses – Nordost-Flügel – oben: Schnitt entlang der Firstpfette; unten: Schnitt entlang der Bogenträger (aus [Wasmuth/et al. 2016])**

Im Ergebnis der im Zeitraum 2015-2016 durchgeführten Bauzustandsuntersuchungen wurden mehrfach Schädigungen der Brettschichtholzbauteile durch Risse in den Brettschichtholzlamellen und offene Klebefugen sowie mechanische Beschädigungen in den Anschlüssen festgestellt (s. bspw. [Wasmuth/et al., 2016]). Eine umfängliche Erfassung und Bewertung des Bauzustandes – insbesondere der vorhandenen Tragfähigkeit der Brettschichtholzbauteile – erfolgte nicht. Eine labortechnische Untersuchung zur Art und Festigkeit der Verklebung ergab, dass die Klebefugen die Anforderungen der aktuell geltenden Regelwerke nicht erfüllt. Daher wurde 2017 die Entscheidung zum Rückbau der Dachkonstruktion und die Errichtung eines Ersatzneubaus in Stahlbauweise getroffen.

In der Rückschau betrachtet, war die Einschätzung der Trag- und Funktionsfähigkeit der Dachkonstruktion im Allgemeinen und der Brettschichtholzbauteile im Besonderen nicht zutreffend. Die Bewertung der Tragfähigkeit der Klebefugen entsprechend aktueller, für Kunstharzklebstoffe entwickelter Regelwerke war in diesem Fall nicht zielführend. Ebenso blieb der tatsächlich verwendete Klebstoff weitestgehend unberücksichtigt (vgl. a. [Lübken/et al., 2021]). Da es sich bei dem verwendeten Klebstoff schon allein aufgrund des Bauwerksalters nicht um einen Kunstharz-Klebstoff, sondern nur um einen auf natürlichen Proteinen basierenden Leim (Kasein-Leim) handeln kann, wäre eine Interpretation der Versuchsergebnisse auf Grundlage wissenschaftlicher Untersuchungen aus den 1930-50er Jahren sinnvoll gewesen, wie dies beispielsweise in [Winter/et al., 2013] und [Linke/Rug, 2018] dargestellt wird.

Da es sich um eine denkmalgeschützte Konstruktion handelte, sind Teile des Dachtragwerkes für die Erhaltung und Ausstellung gesichert worden. Ein weiterer Teil wurde mit Unterstützung

der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen der Stadt Berlin für die Durchführung materialtechnischer Untersuchungen bereitgestellt.

### **Durchgeführte Untersuchungen**

Die Untersuchungen zur Tragfähigkeit und Materialqualität des in der Dachkonstruktion verbauten Holzes erfolgten an Prüfkörpern in Bauteildimension. Hierzu wurden aus Teilen des zur Verfügung gestellten Probenmaterials (Zugbänder der seitlichen Bogenbinder, Stege der Brettschichtholzbauteile (hochkant verklebte Bohlen) und des Stuhls der Firstpfette insgesamt 61 stabförmige Prüfkörper (Holzart: Fichte/Picea abies) mit Abmessungen von  $b/h/l = (50-60/80-85/1520-1620)$  mm hergestellt.

Das Ziel der Untersuchungen war die Überprüfung der Anwendbarkeit der abgeleiteten Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung. Die zu diesem Zweck durchgeführten Materialversuche entsprachen den in Abschnitt 5.2 beschriebenen vergleichenden Untersuchungen und unterteilten sich wie folgt:

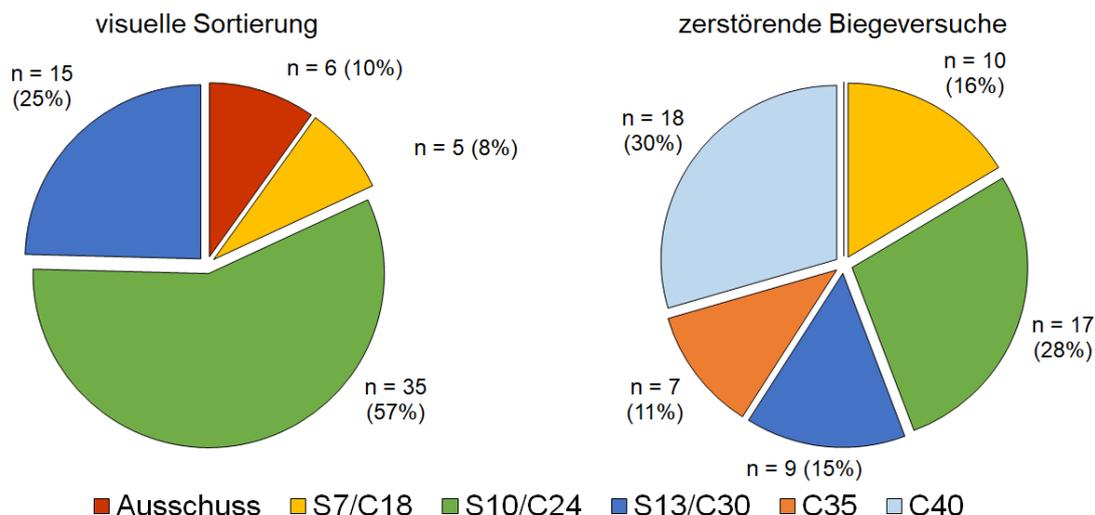
- Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1:2012
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
- Ermittlung der Rohdichte, der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in 4-Punkt-Biegeversuchen nach DIN EN 408:2012, Abschnitte 7, 10 und 19

Die Durchführung der Materialuntersuchungen erfolgte an der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (UG), Eberswalde im Rahmen zweier studentischen Forschungsarbeit an der HNEE Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde (s. [Maier/et al., 2019] und [Mühlisch, 2021]).

### **Ergebnisse und Auswertung**

#### ***Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1***

Die visuelle Sortierung ergab, dass etwa die Hälfte ( $p = 57 \%$ ) des untersuchten Probenmaterials eine durchschnittliche Tragfähigkeit aufweist (Sortierklasse S 10 nach DIN 4074-1:2012). Ein Viertel ( $p = 25 \%$ ) der Prüfkörper wies eine überdurchschnittliche Tragfähigkeit auf (Sortierklasse S 13 nach DIN 4074-1:2012). Die übrigen 18 % des Probenmaterials verteilten sich zu annähernd gleichen Teilen auf die Sortierklasse S 7 nach DIN 4074-1:2012 (geringe Tragfähigkeit;  $p = 8 \%$ ) beziehungsweise auf die Klasse „Ausschuss“ (nicht als Bauholz im Sinne der DIN 4074-1:2012 verwendbar;  $p = 10 \%$ ). Die ausschlaggebenden Sortierkriterien für die Zuordnung zu den Sortierklassen S 7 und S 10 waren Äste und Risse. Das maßgebliche Kriterium für die Zuordnung zu der Klasse „Ausschuss“ waren in allen sechs Fällen die vorhandenen Schwindrisse. Die Verteilung des Probenmaterials auf die Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 ist in Abbildung 128 dargestellt.



**Abbildung 128: Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung und zerstörender Biegeversuche**

Die Ergebnisse der visuellen Sortierung entsprechen tendenziell der in den vergleichenden Untersuchungen an neuem Bauholz festgestellten Verteilung auf die Sortierklassen nach DIN 4074-1 (vgl. Abschnitt 5.2.3, Abbildung 50). Auch dabei entsprach der überwiegende Teil des untersuchten Fichtenholzes den Sortierklassen S 10 / S 13 nach DIN 4074-1:2012. Die ausschlaggebenden Sortierkriterien waren dabei vor allem Äste. Die Risse und die Faserneigung waren überwiegend in der Sortierklasse S 7 und der Klasse „Ausschuss“ maßgebend für die Zuordnung.

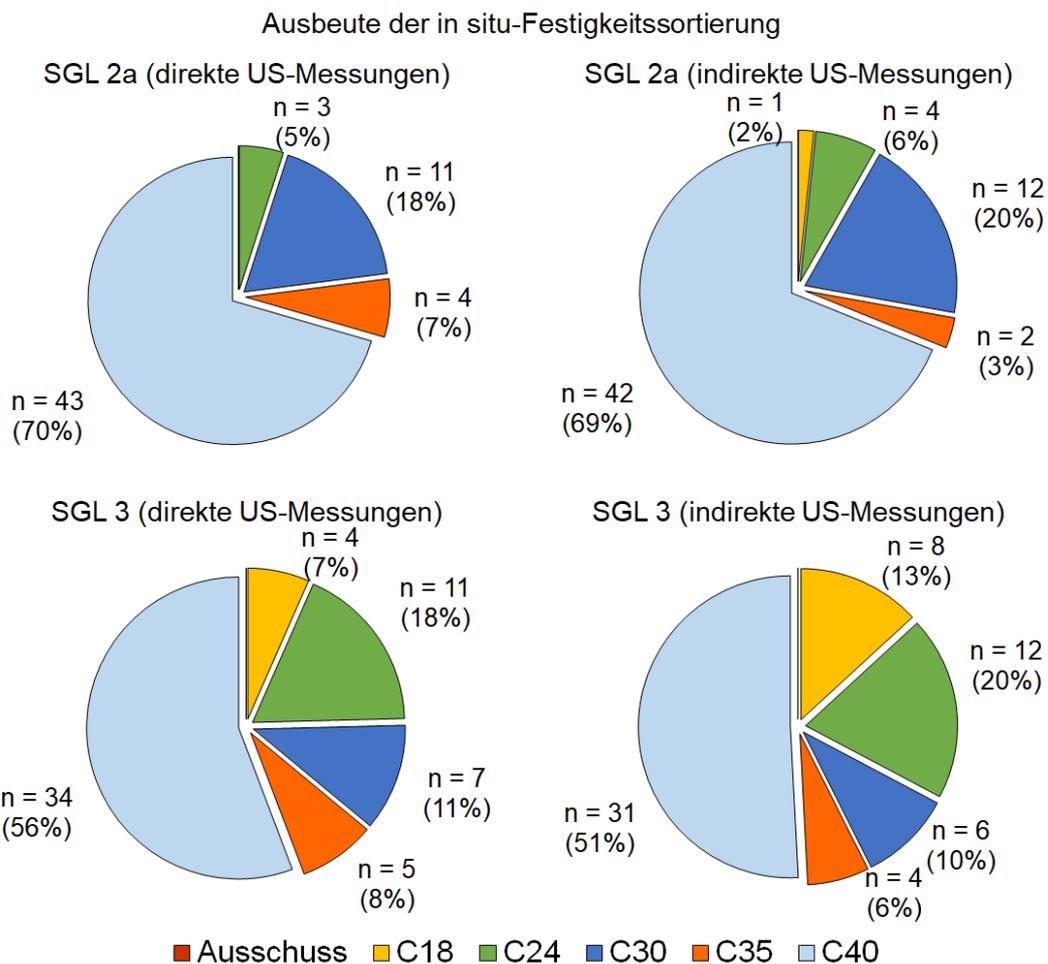
### ***Festigkeitsortierung mittels Sortierparametern***

Im zweiten Schritt der Fallstudie wurde das Probenmaterial mit Hilfe der in Kapitel 6 erläuterten Methodik nach der Festigkeit sortiert. Anwendung fand die in situ-Festigkeitsortierung in den Stufen SGL 2a (visuelle Sortierung und Ultraschall-Impulslaufzeitmessung) und SGL 3 (visuelle Sortierung, Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Ermittlung der Rohdichte an Bohrkernproben). Die Sortierstufe SGL 2b (visuelle Sortierung, Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Ermittlung der Rohdichte durch Eindringtiefenmessung) ist nicht angewendet worden, da diese Methode nur lokal begrenzte Aussagen liefern kann und somit nur für die Bewertung einzelner Bauteilabschnitte wie bspw. Schadstellen, Anschlüsse, Verbindungsbereiche geeignet ist (vgl. Abschnitt 6.5).

Die Sortierung des Probenmaterials erfolgte entsprechend der Sortiergleichungen und Grenzwerte, welche auf Grundlage des statischen Biege-Elastizitätsmoduls ermittelt wurden. Diese Methode ergab in den Untersuchungen an neuem Bauholz die beste Übereinstimmung zur tatsächlichen Materialqualität des Probenmaterials. Die auf der Biegebruchfestigkeit basierenden Sortiergleichungen und -grenzwerte erwiesen sich hingegen als zu ungenau und damit nicht praxistauglich (vgl. Abschnitte 6.4 und 6.5). Die sich anhand dieser Vorgehensweise ergebende Sortierausbeute ist in der nachfolgenden Tabelle 62 sowie Abbildung 129 dargestellt.

**Tabelle 62: Ergebnisse der in situ-Festigkeitsortierung (d/i ... direkte/indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung)**

Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Sortierstufe			
	SGL 2a,d	SGL 2a,i	SGL 3d	SGL 3i
Ausschuss	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
C 18	0 (0 %)	1 (2 %)	4 (7 %)	8 (13 %)
C 24	3 (5 %)	4 (6 %)	11 (18 %)	12 (20 %)
C 30	11 (18 %)	12 (20 %)	7 (11 %)	6 (10 %)
C 35	4 (7 %)	2 (3 %)	5 (8 %)	4 (6 %)
C 40	43 (70 %)	42 (69 %)	34 (56 %)	31 (51 %)



**Abbildung 129: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung**

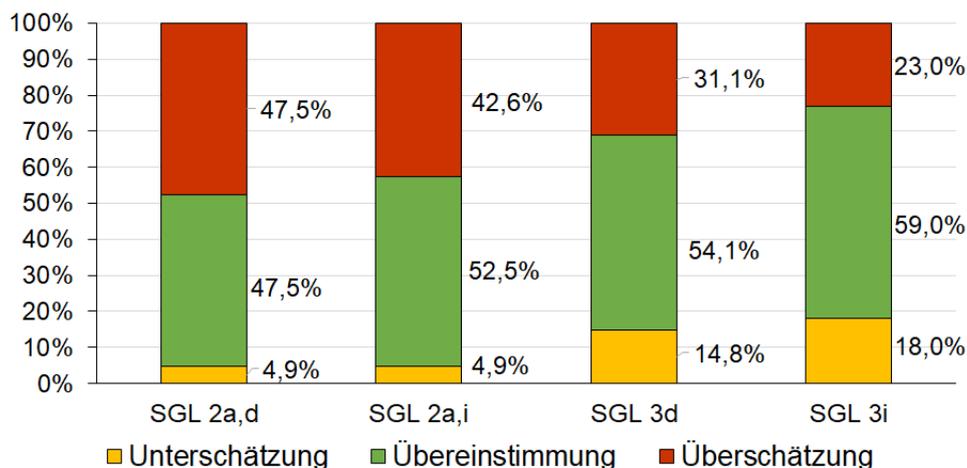
Wie aus dem Vergleich zwischen Abbildung 128 und Abbildung 129 ersichtlich wird, verbessert sich die Verteilung des untersuchten Probenmaterials auf die Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 durch die Anwendung der in situ-Festigkeitsortierung deutlich. Der Anteil an Prüfkörpern mit überdurchschnittlicher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse  $\geq$  C30 nach DIN EN 338) erhöhte sich in beiden Sortierstufen wesentlich (SGL 2a,d/i:  $p = (95/92) \%$ ; SGL 3d/i:  $p = (75/67) \%$ ). Dabei fällt auch auf, dass dieser Anteil in der Sortierstufe SGL 3 geringer ist als in der SGL 2a. Ebenso wird ersichtlich, dass der Anteil an Prüfkörpern mit geringer und üblicher Tragfähigkeit (Festigkeitsklassen C18/C24 nach DIN EN 338) zwischen SGL 2a und SGL 3 sichtbar ansteigt.

Der Anteil an nicht als Bauholz verwendbaren Prüfkörpern (Klasse „Ausschuss“) ist in allen vier Fällen nicht mehr vorhanden.

Zur Bewertung der Anwendbarkeit der Sortiermethode wurde die Übereinstimmung zwischen der Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 basierend auf der in situ-Festigkeitssortiermethode sowie anhand der in zerstörenden Biegeversuchen ermittelten Materialkennwerte (Rohdichte, Biegebruchfestigkeit, statischer Biege-Elastizitätsmodul) herangezogen. Analog den Festlegungen der DIN EN 384:2019, Abschnitt 5.5.2 ist eine Grenzwertunter- und -überschreitung von maximal 5 % als tolerierbar betrachtet. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Tabelle 63 und Abbildung 130 dargestellt.

**Tabelle 63: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte**

Sortierstufe	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,d	4,9%	47,5%	47,5%
SGL 2a,i	4,9%	52,5%	42,6%
SGL 3d	14,8%	54,1%	31,1%
SGL 3i	18,0%	59,0%	23,0%



**Abbildung 130: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten**

Die Überprüfung der Sortierergebnisse zeigt, dass zwar etwa zwei Drittel des untersuchten Probenmaterials korrekt eingeschätzt wurde, jedoch liegt der Anteil an Über- und Unterschätzungen bei  $p \approx (12 \dots 33) \%$ . Des Weiteren fällt auf, dass der Anteil an überschätzten Prüfkörpern in der Sortierstufe SGL 2a deutlich höher ist als in der Sortierstufe SGL 3. Dadurch lässt sich der höhere Anteil an Prüfkörpern mit einer Zuordnung zur Festigkeitsklasse C40 nach DIN EN 338 erklären (s. a. Abbildung 129). Ebenso zeigt sich, dass in der Sortierstufe SGL 3 der Anteil an unterschätzten Prüfkörpern etwa dem (2 ... 3)-fachen des Anteils in der Stufe SGL 2a entspricht. Dies erklärt die Unterschiede in der Sortierausbeute an Proben mit geringer bis üblicher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse C18/C24 nach DIN EN 338, s. a. Abbildung 129).

Die ersten Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die aus den vergleichenden Untersuchungen an neuem Bauholz abgeleitete Sortiermethode noch zu große Über- und Unterschätzungen ergibt, um die Materialqualität von historischen Holzbauteilen zuverlässig einzuschätzen.

Die Ursache hierfür liegt nach derzeitigem Untersuchungsstand in dem unterschiedlichen Bruchverhalten des untersuchten Probenmaterials begründet. Eine Einzelfallbetrachtung des untersuchten Probenmaterials aus altem Fichtenholz zeigte, dass die fehleingeschätzten Prüfkörper – anders als die Prüfkörper aus neuem Bauholz – überwiegend im Bereich von Querschnittsschwächungen im Zugbereich infolge von angeschnittenen Ästen, lokal begrenzten ungünstigen Faserverläufen und Fehlflächen aus Verbindungen und Anschlüssen versagten.

Die in Kapitel 6 beschriebene Sortiermethode berücksichtigt zwar das Vorhandensein einzelner Wuchsmerkmale, jedoch ist die Einbeziehung der Häufigkeit und Lage der Merkmale aufgrund der Vielfältigkeit der Ausprägung durch universelle, rechnerische Ansätze nur sehr schwer möglich. Daher wurde im Rahmen dieser Fallstudie eine Anpassung der Methode durch Einbeziehung von Korrekturbeiwerten vorgenommen.

In einem ersten Ansatz wurde ein globaler Korrekturfaktor  $k_{IP}$  verwendet. Dieser dient der zusätzlichen Absicherung der rechnerisch ermittelten Sortierparameter (s. Gl. 34).

$$IP_{red} = IP \cdot k_{IP}$$

Gl. 34

mit:  $IP_{red}$  ... global abgesicherter Sortierparameter [ $N/mm^2$ ];  $IP$  ... rechnerisch ermittelter Sortierparameter [ $N/mm^2$ ];  $k_{IP}$  ... globaler Korrekturfaktor zur Absicherung des rechnerisch ermittelten Sortierparameters [1]

Die Verbesserung der Sortiermethode durch Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors wurde empirisch durch Ansatz des Faktors mit  $k_{IP} = (0,95/0,90/0,85/0,80)$  und Betrachtung der Übereinstimmung der Festigkeitsklassenzuordnung überprüft. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Abbildung 131 und Abbildung 132 sowie Tabelle 64 und Tabelle 65 dargestellt.

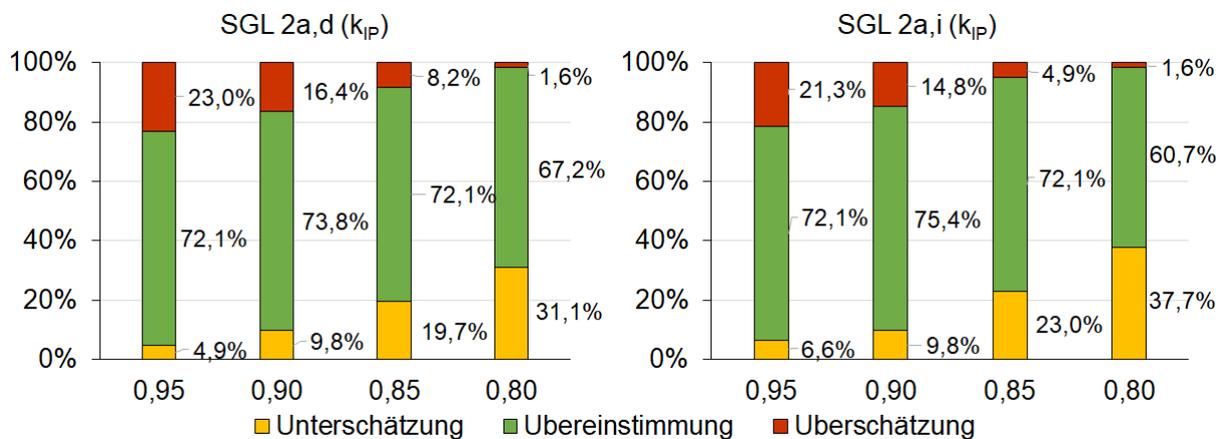


Abbildung 131: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors  $k_{IP}$  (Sortierstufe SGL 2a)

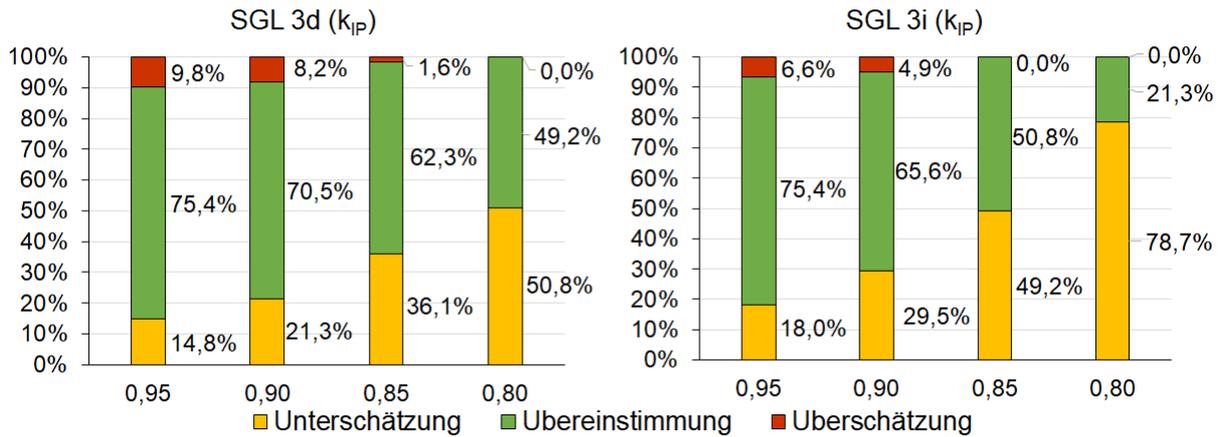


Abbildung 132: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors k<sub>IP</sub> (Sortierstufe SGL 3)

Tabelle 64: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung (Sortierstufe SGL 2a) und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors k<sub>IP</sub>

Sortierstufe	Korrekturfaktor	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,d	k <sub>IP</sub> = 0,95	4,9%	65,6%	29,5%
	k <sub>IP</sub> = 0,90	9,8%	65,6%	24,6%
	k <sub>IP</sub> = 0,85	19,7%	70,5%	9,8%
	k <sub>IP</sub> = 0,80	31,1%	60,7%	8,2%
SGL 2a,i	k <sub>IP</sub> = 0,95	4,9%	67,2%	27,9%
	k <sub>IP</sub> = 0,90	8,2%	73,8%	18,0%
	k <sub>IP</sub> = 0,85	23,0%	68,9%	8,2%
	k <sub>IP</sub> = 0,80	36,1%	57,4%	6,6%

Tabelle 65: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung (Sortierstufe SGL 3) und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors k<sub>IP</sub>

Sortierstufe	Korrekturfaktor	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 3d	k <sub>IP</sub> = 0,95	14,8%	72,1%	13,1%
	k <sub>IP</sub> = 0,90	21,3%	72,1%	6,6%
	k <sub>IP</sub> = 0,85	36,1%	59,0%	4,9%
	k <sub>IP</sub> = 0,80	52,5%	45,9%	1,6%
SGL 3i	k <sub>IP</sub> = 0,95	18,1%	77,0%	4,9%
	k <sub>IP</sub> = 0,90	26,2%	68,9%	4,9%
	k <sub>IP</sub> = 0,85	49,2%	49,2%	1,6%
	k <sub>IP</sub> = 0,80	65,6%	32,8%	1,6%

Die Betrachtungen zur Absicherung des Sortierparameters zeigen, dass sich die Überschätzung der Materialqualität durch die Verwendung eines globalen Korrekturfaktors signifikant reduzieren lässt. Bezogen auf die praktische Anwendung bedeutet das unter anderem, dass der Anteil an Bauteilen mit geringer Tragfähigkeit deutlich reduziert ist. Gleichzeitig ist jedoch zu verzeichnen, dass – insbesondere in der Sortierstufe SGL 3 – der Anteil an unterschätzten Prüfkörpern steigt. Bereits bei einer zusätzlichen Sicherheit von 15 % ( $k_{IP} = 0,85$ ) werden je nach Sortierstufe ca. (36 ... 66) % der Holzbauteile unterschätzt. Dies bietet zwar zusätzliche Sicherheiten, jedoch können dadurch im Einzelfall Tragfähigkeitsdefizite „herbeigeführt“ werden, die in der Realität nicht vorhanden sind. Im Endresultat hätte diese Unterschätzung eine unrealistische Bewertung der Standsicherheit und weniger substanzschonende Maßnahmen zur Folge. Um derartige Fehleinschätzungen zu begrenzen, wäre in der Sortierstufe SGL 2a ein Korrekturfaktor von  $k_{IP} \geq 0,95$  und in der Sortierstufe SGL 3 von  $k_{IP} \geq 0,90$  anzusetzen. In diesem Fall liegt die Übereinstimmung bei etwa (65 ... 73) %.

Die Ursache für die Fehleinschätzungen ist in dem Umstand zu sehen, dass die vorgeschlagene Sortiermethode zwar visuell erkenn- und messbare Wuchsmerkmale entsprechend ihrer Merkmalsausprägung – beispielsweise Astdurchmesser und Risstiefen – berücksichtigt, deren Lage und tatsächlicher Verlauf im Holzbauteil werden jedoch nicht erfasst. Die durchgeführten Materialversuche zeigten, dass letztere maßgeblich für das Bruchverhalten und damit für die messbaren Materialkennwerte verantwortlich sind. Daher ist eine Erfassung und Berücksichtigung durch Wuchs- und Bauteilmerkmale hervorgerufene Schwachstellen oder „Sollbruchstellen“ notwendig. Dies kann beispielsweise im Zuge der visuellen Begutachtung und Sortierung erfolgen. Hierbei ist es ebenfalls möglich, den Einfluss der vorhandenen Wuchsmerkmale auf das Bauteilversagen durch eine fachkundige Einschätzung zu beurteilen. Die rechnerische Berücksichtigung der Ergebnisse der fachkundigen Untersuchung können im Einzelfall durch einen entsprechenden Korrekturfaktor ( $k_{vis}$ ) erfolgen (s. Gl. 35).

$$IP_{red} = IP \cdot (1 - k_{vis})$$

**Gl. 35**

*mit:  $IP_{red}$  ... global abgesicherter Sortierparameter [ $N/mm^2$ ];  $IP$  ... rechnerisch ermittelter Sortierparameter [ $N/mm^2$ ];  $k_{vis}$  ... Korrekturfaktor zur Absicherung des rechnerisch ermittelten Sortierparameters basierend auf dem prognostischen Bruchverhalten [/]*

Der Ansatz eines Korrekturfaktors im Einzelfall ist beispielsweise bei Astansammlungen, starker Rissbildung und ungünstigen Faserneigungen im Zugbereich – vor allem in den hochbeanspruchten Bauteilabschnitten – sowie bei Ästen und Astansammlungen im Bereich von Lasteinleitungen notwendig.

Die Auswirkungen der Einbeziehung eines derartigen Korrekturfaktors wurde analog der oben beschriebenen Vorgehensweise unter Ansatz von  $k_{vis} = (0,10/0,15/0,20/0,25)$  überprüft. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Abbildung 133 und Abbildung 134 sowie Tabelle 66 dargestellt.

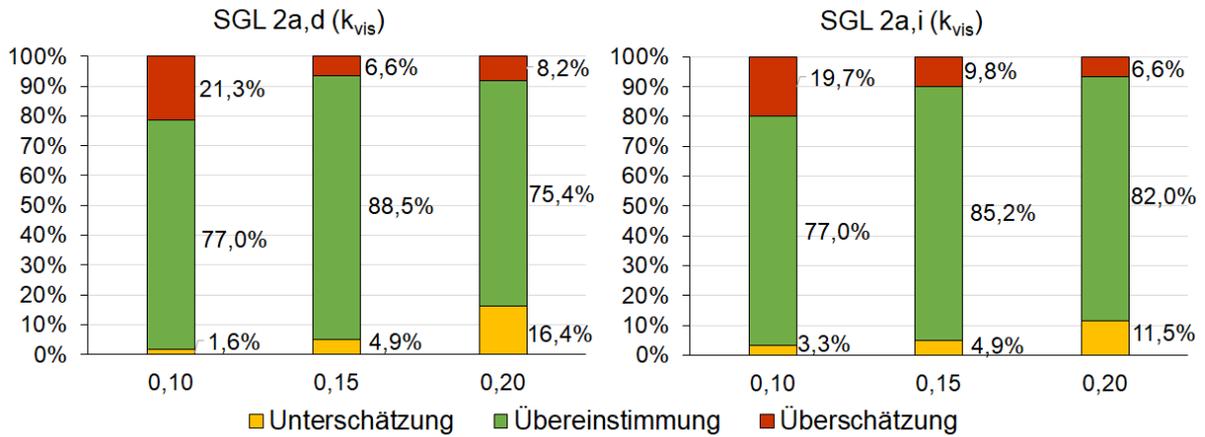


Abbildung 133: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors  $k_{vis}$  (Sortierstufe SGL 2a)

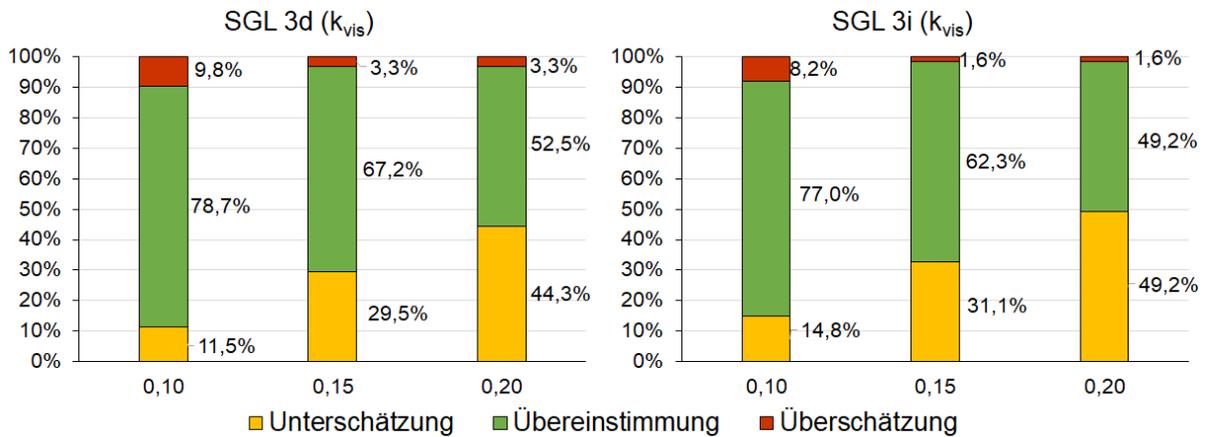


Abbildung 134: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors  $k_{vis}$  (Sortierstufe SGL 3)

Tabelle 66: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des Korrekturfaktors  $k_{vis}$

Sortierstufe	Korrekturfaktor	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,d	$k_{vis} = 0,10$	0,0%	75,4%	24,6%
	$k_{vis} = 0,15$	13,1%	78,7%	8,2%
	$k_{vis} = 0,20$	6,6%	80,3%	13,1%
SGL 2a,i	$k_{vis} = 0,10$	3,3%	75,4%	21,3%
	$k_{vis} = 0,15$	4,9%	80,3%	14,8%
	$k_{vis} = 0,20$	13,1%	72,1%	14,8%
SGL 3d	$k_{vis} = 0,10$	9,8%	80,3%	9,8%
	$k_{vis} = 0,15$	32,8%	60,7%	6,6%
	$k_{vis} = 0,20$	45,9%	49,2%	4,9%
SGL 3i	$k_{vis} = 0,10$	14,8%	78,7%	6,6%
	$k_{vis} = 0,15$	41,0%	55,7%	3,3%
	$k_{vis} = 0,20$	49,2%	47,5%	3,3%

Aus den dargestellten Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich durch die Verwendung eines Einzelfall-Korrekturfaktors eine Verbesserung der Übereinstimmung erreichen lässt. Jedoch sind auch hier ähnliche Tendenzen wie bei der Verwendung eines globalen Korrekturfaktors zu erkennen. Unter Ansatz höherer Korrekturfaktoren ist eine signifikante Reduzierung der Überschätzung bei gleichzeitigem Anstieg der unterschätzten Proben zu beobachten. Dieses Verhältnis ist in der Sortierstufe SGL 3 ausgeprägter als in der Sortierstufe SGL 2a. Insgesamt ist das Verhältnis jedoch günstiger als bei Verwendung des globalen Korrekturfaktors. Ausgehend von den in Abbildung 133 und Abbildung 134 dargestellten Ergebnissen wird in der Sortierstufe SGL 2a bei  $k_{vis} \leq 0,15$  ein vertretbares Verhältnis zwischen Übereinstimmung und Unter-/Überschätzung erreicht. In der Sortierstufe SGL 3 liegt die Schwelle bei  $k_{vis} \leq 0,10$ .

### Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die aus vergleichenden Materialuntersuchungen an neuem Bauholz abgeleitete Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung prinzipiell für die praktische Anwendung geeignet ist. Die festgestellten Unsicherheiten können durch die Verwendung von Korrekturfaktoren weitestgehend ausgeglichen werden. Dabei ist der Ansatz eines auf den Einzelfall bezogenen Korrekturfaktor auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens gegenüber einem globalen Sicherheits-/Korrekturfaktor vorzuziehen. Je nach Sortierstufe werden (7 ... 15) % der untersuchten Holzbauteile überschätzt. Dies ist aus ingenieurmäßiger Sicht vertretbar. Diese Herangehensweise zeigt jedoch auch, dass zur Durchführung der in situ-Festigkeitsortierung fachkundiges Personal mit einer Expertise zum Trag- und Bruchverhalten von Holzbauteilen erforderlich ist.

Gleichzeit ist die Zuverlässigkeit der Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung wesentlich größer als auf Grundlage einer ausschließlichen visuellen Sortierung nach DIN 4074-1. Hiernach lag die Unterschätzung bei  $p \approx 61$  %, die Übereinstimmung nur bei  $p \approx 23$  % und die Überschätzung bei  $p \approx 16$  %. Durch Anwendung der vorgeschlagenen Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung können somit vorhandene Tragfähigkeitsreserven zuverlässiger aufdecken. Bei dem untersuchten Probenmaterial ergaben sich hierbei Reserven im Bereich von (6 ... 11) N/mm<sup>2</sup> bezogen auf die charakteristische Biegefestigkeit und (1.000 ... 2.000) N/mm<sup>2</sup> hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Das entspricht einer Erhöhung von  $\Delta f_{m,k} \approx (25 \dots 67)$  % beziehungsweise  $\Delta E_{0,mean} \approx (8 \dots 27)$  %. Die Anwendung der vorgeschlagenen Sortier-Methodik ist somit eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen.

### 7.2.2. Fallstudie 2 – Deckenkonstruktion des Schlosses Friedenstein, Gotha

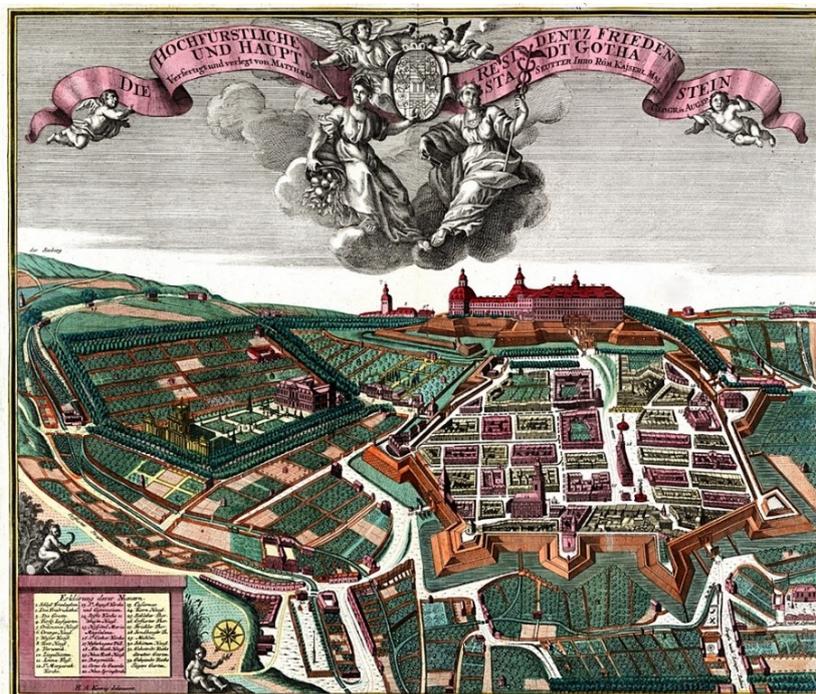
#### Objektbeschreibung

Das Schloss Friedenstein in Gotha wurde in den Jahren 1643-1656 im Auftrag von Herzog Ernst I. „dem Frommen“ von Sachsen-Gotha-Altenburg erbaut. Der Erfurter Baumeister und Architekten Caspar Vogel (\* um 1600, † 1663) plante die Schlossanlage im Stil des französischen Frühbarocks als vierflügeliges Gebäude (s. Abbildung 135).



**Abbildung 135: Ansicht des Schloss Friedenstein in Gotha (Süd-Ost-Ansicht, Bildquelle: [Otrebski, 2018])**

Die Schlossanlage wurde als Zitadelle angelegt, wobei man Teile der Befestigungen der um das Jahr 1567 geschleiften Festung Grimmenstein in das neue Schloss integrierte (s. a. Abbildung 136). Im frühen 18. Jahrhundert erfolgte dann aber die Entfestigung des Schlosses und der Stadt Gotha selbst.



**Abbildung 136: Zeitgenössischer Kupferstich der Schlossanlage Friedenstein (im Vordergrund rechts: Befestigungsanlagen; Bildquelle: Seutter, um 1738)**

Das eigentliche Schloss ist als vierflügeliges Gebäude – bestehend aus einem viergeschossigen Hauptgebäude (Nordflügel), den daran anschließenden dreigeschossigen Seitenflügeln (Ost-/Westflügel) und dem Torgebäude im Süden – errichtet (s. Abbildung 137). Auf der Nordseite befinden sich zwei vorgelagerte Nebengebäude. Die Seitenflügel laufen in zwei viergeschossigen turmartigen Kopfbauten aus.



**Abbildung 137: Luftaufnahme der Schlossanlage Friedenstein in Gotha (Nord-Ost-Ansicht, Bildquelle: [STSG, 2017])**

Die Schlossanlage war vorrangig als Repräsentativbau und herzogliche Wohnstätte mit umfangreichen Garten- und Parkanlagen sowie einer Orangerie angelegt. Gleichzeitig waren aber auch Verwaltungen, Archive und Kunstsammlungen im Schloss angesiedelt. Heutzutage beherbergt das Schloss mehrere Museen, das Thüringische Staatsarchiv und die Forschungsbibliothek Gotha.

Seit dem Jahr 2018 werden am Westflügel umfassende Sanierungsarbeiten durchgeführt. Neben der Instandsetzung der Fundamente (Mauerwerkspfeiler), der hölzernen Dachkonstruktion und der historischen Stuckdecken erfolgt auch die Errichtung eines barrierefreien Zuganges (s. [STSG, 2020]). Im Zuge dessen wurden Teile der historischen Deckenkonstruktionen zurückgebaut und die Deckenbalken für die Durchführung materialtechnischer Untersuchungen bereitgestellt, um im Rahmen zukünftiger Instandsetzungsmaßnahmen eine genauere Bewertung der Holztragwerke zu ermöglichen.

### **Durchgeführte Untersuchungen**

Die Untersuchungen zur Tragfähigkeit und Materialqualität der in der Deckenkonstruktion verbauten Holzbauteile wurden an Prüfkörpern in Bauteildimension durchgeführt. Das hierzu bereitgestellte Probenmaterial bestand aus zehn Balkenabschnitten aus Fichtenholz (*Picea abies*) mit Abmessungen von  $b/h/l \approx (300 \dots 360/270 \dots 300/2600)$  mm. Jeweils zwei Balkenabschnitte gehörten zu einem Deckenbalken. Die Balkenabschnitte wurden in je vier Prüfkörper in Bauteildimensionen mit Abmessungen von  $b/h/l \approx (80 \dots 180/100 \dots 150/2600)$  mm aufgeteilt. Insgesamt ergab sich ein Prüfkörperumfang von  $n = 39$ . Bei den weiteren Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass die ursprüngliche Einbaulage der Prüfkörper – d.h. Lage des Prüfkörpers im Deckenbalken – beibehalten wurde.

Ziel der Untersuchungen war ebenfalls die Überprüfung der Anwendbarkeit der abgeleiteten Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung. Die zu diesem Zweck durchgeführten Materialversuche entsprachen den in Abschnitt 5.2 beschriebenen vergleichenden Untersuchungen und unterteilten sich wie folgt:

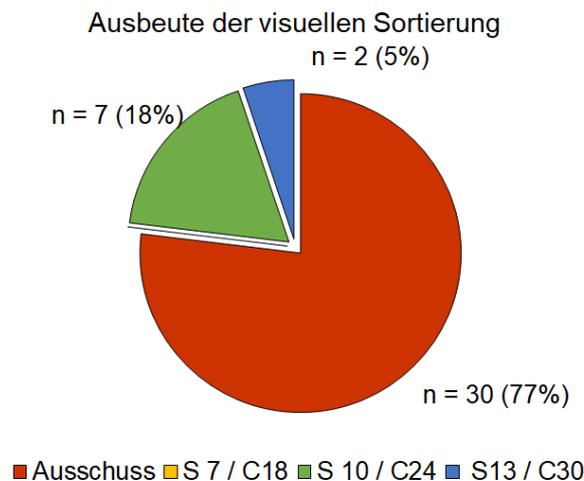
- Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1:2012
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
- Ermittlung der Rohdichte, der Biegebruchfestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in 4-Punkt-Biegeversuchen nach DIN EN 408:2012, Abschnitte 7, 10 und 19

Die Durchführung der Materialuntersuchungen erfolgte an der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (UG), Eberswalde im Rahmen einer auftragsmäßigen Materialprüfung (s. [Rug/Linke, 2021]).

## Ergebnisse und Auswertung

### Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1

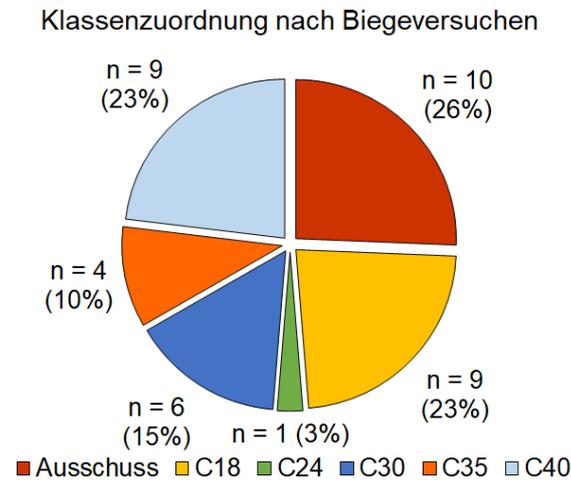
Die visuelle Sortierung ergab, dass etwa drei Viertel ( $p = 77\%$ ) des untersuchten Probenmaterials keiner Sortierklasse nach DIN 4074-1:2012 zugeordnet werden konnten und dementsprechend nicht als Bauholz verwendbar wäre. Ausschlaggebend hierfür waren vor allem ausgeprägte Schwindrisse und Faserneigungen. Jedoch wiesen einzelne Prüfkörper auch Längskrümmungen und lokal begrenzte Schädigungen durch holzerstörende Pilze auf. Für etwa ein Fünftel der Prüfkörper ( $p = 18\%$ ) ergab sich eine durchschnittliche Tragfähigkeit (Sortierklasse S 10 nach DIN 4074-1:2012). Die übrigen beiden Prüfkörper konnten der Sortierklasse S13 nach DIN 4074-1:2012 (d.h. überdurchschnittliche Tragfähigkeit) zugeordnet werden (s. a. Abbildung 138).



**Abbildung 138: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung**

Die Ergebnisse der visuellen Sortierung zeigen, dass die strenge Anwendung der für neues Bauholz geltenden Sortierregeln zur Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen nicht geeignet ist. Die Deckenbalken wurden nicht aufgrund von Überbeanspruchung, starken Verformungen oder Bauteilversagens aus dem Tragwerk ausgebaut. Ihre Tragfähigkeit war auch nach ca. 370 Jahren noch gegeben. Somit ist eine genauere Beurteilung und der Einsatz zusätzlicher Mess- und Prüfmethode erforderlich. Dies wird vor allem bei dem Vergleich der Ergebnisse der visuellen Sortierung mit den auf Grundlage der zerstörenden Biegeversuche möglichen Zuordnungen des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 deutlich (s. Abbildung 139). Daraus wird ersichtlich, dass nur etwa ein Viertel ( $p = 26\%$ ) keine ausreichende Tragfähigkeit aufweist, um als Bauholz

verwendet zu werden. Etwa die Hälfte der Prüfkörper wiesen sogar eine hohe Tragfähigkeit auf (Festigkeitsklasse  $\geq$  C30 nach DIN EN 338:2016,  $p = 48 \%$ ). Die übrigen Prüfkörper besaßen eine geringe bis durchschnittliche Tragfähigkeit (Festigkeitsklassen C18 und C24 nach DIN EN 338:2016,  $p = 26 \%$ ). Die Übereinstimmung der Klassenzuordnung auf Grundlage der visuellen Sortierung und der zerstörenden Biegeversuche beträgt  $p \approx 28 \%$ . Etwa zwei Drittel ( $p \approx 69 \%$ ) der Prüfkörper wurden durch die visuelle Sortierung unterschätzt. Die übrigen  $p = 3 \%$  des Probenmaterials wies eine geringe Tragfähigkeit auf.



**Abbildung 139: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der zerstörenden Biegeversuche**

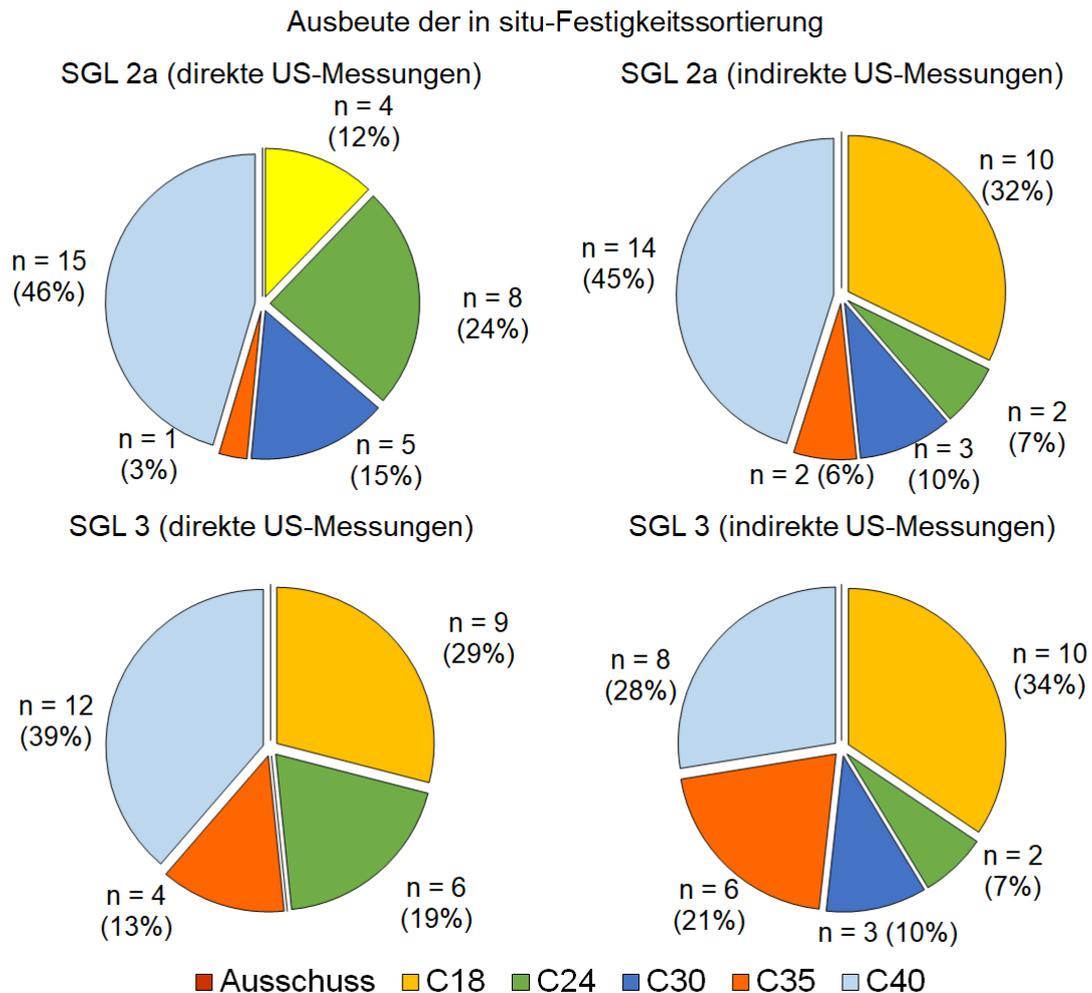
Die Ergebnisse der durchgeführten Materialversuche zeigen somit, dass zur genauen Bewertung der Materialqualität umfassendere Untersuchungen an den Holzbauteilen erforderlich sind.

### ***Festigkeitsortierung mittels Sortierparametern***

Die Festigkeitsortierung mittels Sortierparameters erfolgte entsprechend der in Abschnitt 7.2.1 erläuterten Vorgehensweise. Betrachtet wurden dabei ebenfalls die Sortierstufen SGL 2a und SGL 3 unter Ansatz der auf dem statischen Biege-Elastizitätsmoduls basierenden Sortiergleichungen und Grenzwerten. Die sich auf diesem Wege ergebende Sortierausbeute ist in der nachfolgenden Tabelle 67 sowie Abbildung 140 dargestellt.

**Tabelle 67: Ergebnisse der in situ-Festigkeitsortierung (d/i ... direkte/indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung)**

Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Sortierstufe			
	SGL 2a,d	SGL 2a,i	SGL 3d	SGL 3i
Ausschuss	6 (15 %)	8 (20 %)	8 (21 %)	10 (26 %)
C 18	4 (10 %)	10 (26 %)	9 (23 %)	10 (26 %)
C 24	8 (21 %)	2 (5 %)	6 (15 %)	2 (5 %)
C 30	5 (13 %)	3 (8 %)	0 (0 %)	3 (8 %)
C 35	1 (3 %)	2 (5 %)	4 (10 %)	6 (15 %)
C 40	15 (38 %)	14 (36 %)	12 (31 %)	8 (20 %)



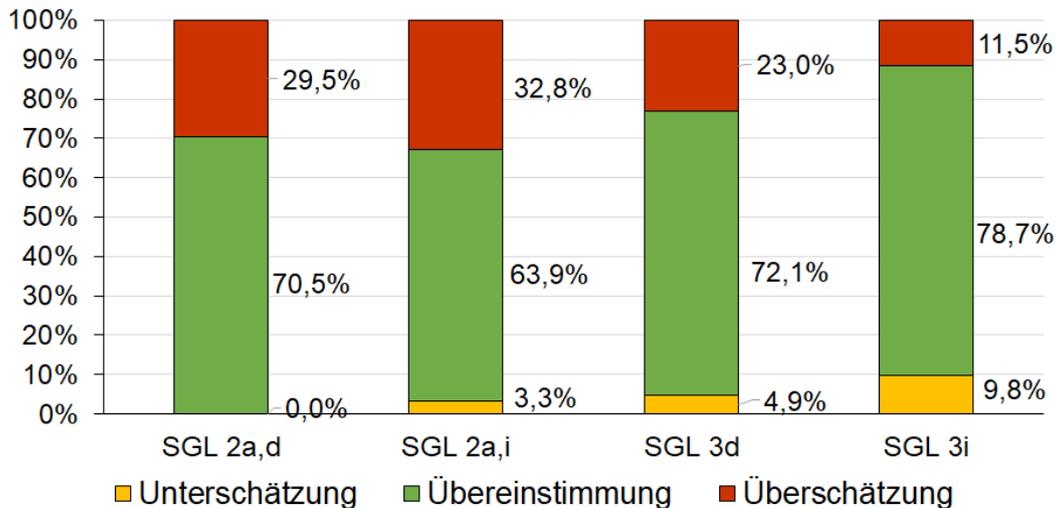
**Abbildung 140: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung**

Wie der Vergleich zwischen Abbildung 138 und Abbildung 140 zeigt, verbessert sich die Verteilung des untersuchten Probenmaterials auf die Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 durch die Anwendung der in situ-Festigkeitssortierung deutlich. Der Anteil der Prüfkörper mit überdurchschnittlicher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse  $\geq$  C30 nach DIN EN 338) erhöhte sich in beiden Sortierstufen wesentlich (SGL 2a,d/i:  $p = (54/49) \%$ ; SGL 3d/i:  $p = (41/43) \%$ ). Ebenso wie in der in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Fallstudie ist auch hier der betreffende Anteil in der Sortierstufe SGL 3 geringer als in der SGL 2a. Ebenso wird ersichtlich, dass der Anteil an Prüfkörpern mit geringer und üblicher Tragfähigkeit (Festigkeitsklassen C18/C24 nach DIN EN 338) zwischen SGL 2a,d und SGL 3d sichtbar ansteigt. Der Anteil der nicht als Bauholz verwendbaren Prüfkörpern (Klasse „Ausschuss“) verringerte sich deutlich und entspricht dem durch die Biegeversuche nachweisbaren Anteil ( $n = (6/10)$ ,  $p = (15/26) \%$ , vgl. Abbildung 139).

Die Bewertung der Anwendbarkeit der Methode zur in situ-Festigkeitssortierung erfolgte ebenfalls analog der bisherigen Vorgehensweise, das heißt durch Vergleich der Zuordnungen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 basierend auf der in situ-Festigkeitssortiermethode und anhand der in den Biegeversuchen ermittelten Materialkennwerte (vgl. Abschnitt 7.2.1, S. 199). Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Tabelle 68 und Abbildung 141 dargestellt.

**Tabelle 68: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten**

Sortierstufe	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,d	0,0%	70,5%	29,5%
SGL 2a,i	3,3%	63,9%	32,8%
SGL 3d	4,9%	72,1%	23,0%
SGL 3i	9,8%	78,7%	11,5%

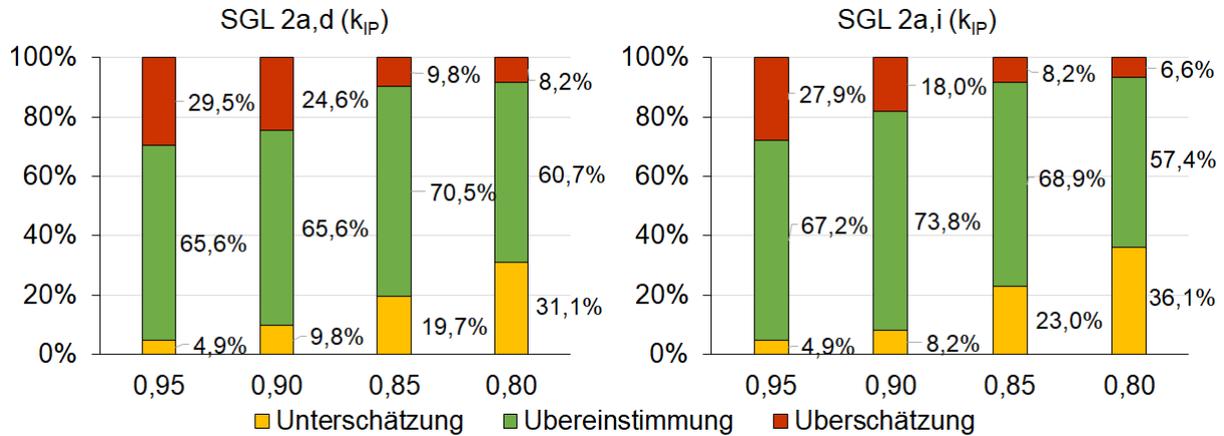


**Abbildung 141: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten**

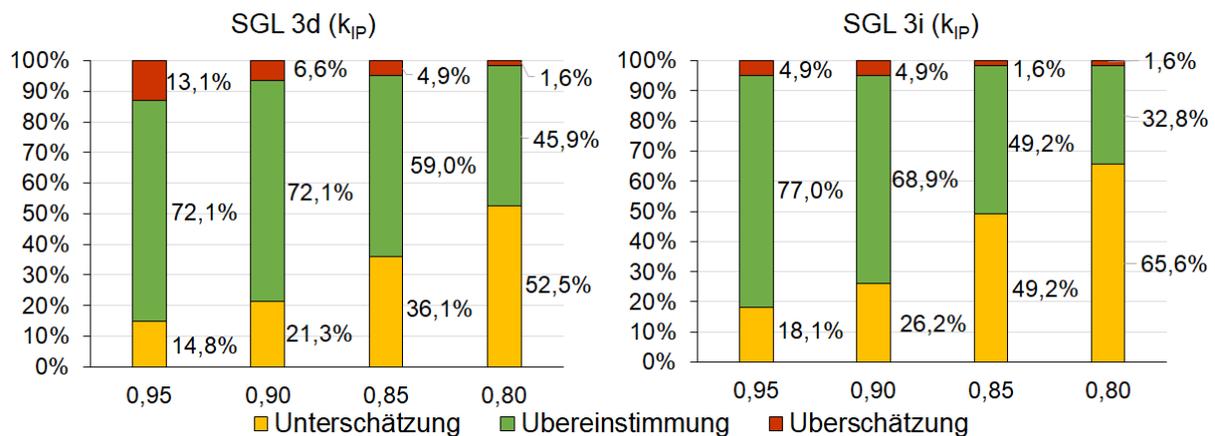
Die Überprüfung der Sortierergebnisse zeigt, dass etwa zwei Drittel des untersuchten Probenmaterials korrekt eingeschätzt wurde. Jedoch liegt der Anteil an Über- und Unterschätzungen bei  $p \approx (21 \dots 36) \%$ . Des Weiteren fällt auf, dass der Anteil an überschätzten Prüfkörpern in der Sortierstufe SGL 2a deutlich höher ist als in der Sortierstufe SGL 3. Dadurch lässt sich der höhere Anteil an Prüfkörpern mit einer Zuordnung zur Festigkeitsklasse C40 nach DIN EN 338 erklären (s. a. Abbildung 140). Der Anteil der in der Sortierstufe SGL 3 unterschätzten Prüfkörpern beträgt etwa das (2 ... 3)-fache des Anteils in der Stufe SGL 2a, was ebenfalls die Unterschiede in der Sortierausbeute hinsichtlich der Prüfkörper mit geringer bis üblicher Tragfähigkeit erklärt (Festigkeitsklasse C18 und C24 nach DIN EN 338, s. a. Abbildung 140).

Die Ergebnisse dieser Fallstudie stimmen tendenziell mit denen der in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Untersuchungen überein. Als Ursache für die eingeschränkte Aussagegenauigkeit ist hier ebenfalls die Beeinflussung des Bruchverhaltens durch Bauteilmerkmale, welche nicht direkt in die Sortierentscheidung einfließen. Das Bauteilversagen wurde durch die vorhandenen Querschnittsschwächungen (Beilkerben auf der Unterseite der Prüfkörper) aber auch durch ein Fortschreiten der vorhandenen Schwindrisse verursacht. Teilweise trat ein abruptes, vorzeitiges Versagen auf. Hierdurch werden die messbaren Materialkennwerte negativ beeinflusst. Derartige Beeinträchtigungen lagen bei den aus neuem Bauholz hergestelltem Probenmaterial nicht vor.

Die Anpassung der Sortiermethode mittels globalem Korrekturfaktor (s. a. Gl. 34 auf S. 200) mit  $k_{IP} = (0,95/0,90/0,85/0,80)$  zeigt eine Reduzierung der Überschätzungen (s. Tabelle 69 sowie Abbildung 142 und Abbildung 143). Der Anteil der unterschätzten Prüfkörpern stieg jedoch signifikant an. Zur Begrenzung der Fehleinschätzungen wäre daher ein Korrekturfaktor von  $k_{IP} \geq 0,95$  anzusetzen. In diesem Fall liegt die Übereinstimmung bei etwa (65 ... 77) %.



**Abbildung 142: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors  $k_{IP}$  (Sortierstufe SGL 2a)**



**Abbildung 143: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors  $k_{IP}$  (Sortierstufe SGL 3)**

**Tabelle 69: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors  $k_{IP}$**

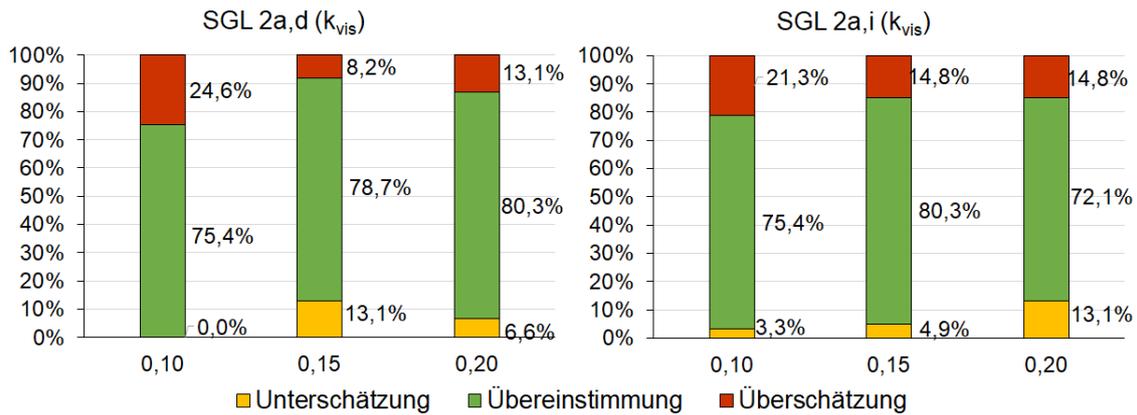
Sortierstufe	Korrekturfaktor	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,d	$k_{IP} = 0,95$	4,9%	65,6%	29,5%
	$k_{IP} = 0,90$	9,8%	65,6%	24,6%
	$k_{IP} = 0,85$	19,7%	70,5%	9,8%
	$k_{IP} = 0,80$	31,1%	60,7%	8,2%

**Tabelle 69 (fortgesetzt)**

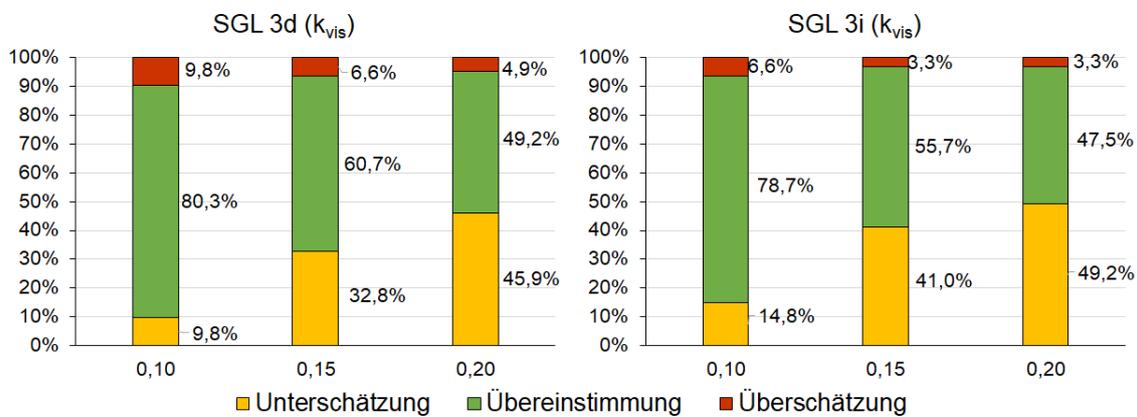
Sortierstufe	Korrekturfaktor	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,i	$k_{IP} = 0,95$	4,9%	67,2%	27,9%
	$k_{IP} = 0,90$	8,2%	73,8%	18,0%
	$k_{IP} = 0,85$	23,0%	68,9%	8,2%
	$k_{IP} = 0,80$	36,1%	57,4%	6,6%
SGL 3d	$k_{IP} = 0,95$	14,8%	72,1%	13,1%
	$k_{IP} = 0,90$	21,3%	72,1%	6,6%
	$k_{IP} = 0,85$	36,1%	59,0%	4,9%
	$k_{IP} = 0,80$	52,5%	45,9%	1,6%
SGL 3i	$k_{IP} = 0,95$	18,1%	77,0%	4,9%
	$k_{IP} = 0,90$	26,2%	68,9%	4,9%
	$k_{IP} = 0,85$	49,2%	49,2%	1,6%
	$k_{IP} = 0,80$	65,6%	32,8%	1,6%

Hinsichtlich der Anpassung der Sortiermethode mittels globalem Korrekturfaktor ist ebenfalls eine tendenzielle Übereinstimmung zur ersten Fallstudie zu erkennen. Als Ursache für die Fehleinschätzungen ist hier ebenfalls die Lage der visuell erfassten Sortierkriterien zu sehen. Auch die Beeinträchtigung durch vorhandenen Querschnittsschwächungen (hier: Beilkerben) darf in diesem Zusammenhang nicht unberücksichtigt bleiben. Daran zeigt sich, dass eine umfassende visuelle Begutachtung einschließlich einer fachkundigen Bewertung der vorhandenen Wuchs- und Bauteilmerkmale hinsichtlich des Bauteilversagens zwingende Voraussetzung für eine genaue Sortierung ist.

Die dementsprechende Anpassung der Sortiermethode mittels eines Korrekturfaktor für das prognostische Bruchverhalten (s. a. Gl. 35 auf S. 202) mit  $k_{vis} = (0,10/0,15/0,20)$  zeigt eine signifikante Reduzierung der Überschätzungen (s. Abbildung 144 und Abbildung 145 sowie Tabelle 70). Dieser liegt abhängig von dem gewählten Sicherheitsniveau bei  $p \approx (8 \dots 25) \%$  in der Sortierstufe SGL 2a und  $p \approx (3 \dots 10) \%$  in der Sortierstufe SGL 3. Der Anteil an unterschätzten Prüfkörpern zeigt jedoch ein gegenläufiges Verhalten. Bei Ansatz von zu hohen Sicherheiten steigt dieser erwartungsgemäß. Dabei ist der Anstieg in der Sortierstufe SGL 3 deutlich größer als in der Sortierstufe SGL 2.



**Abbildung 144: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors  $k_{vis}$  (Sortierstufe SGL 2a)**



**Abbildung 145: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors  $k_{vis}$  (Sortierstufe SGL 3)**

**Tabelle 70: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors  $k_{vis}$**

Sortierstufe	Korrekturfaktor	Anteil der Unterschätzung	Anteil der Übereinstimmung	Anteil der Überschätzung
SGL 2a,d	$k_{vis} = 0,10$	0,0%	75,4%	24,6%
	$k_{vis} = 0,15$	13,1%	78,7%	8,2%
	$k_{vis} = 0,20$	6,6%	80,3%	13,1%
SGL 2a,i	$k_{vis} = 0,10$	3,3%	75,4%	21,3%
	$k_{vis} = 0,15$	4,9%	80,3%	14,8%
	$k_{vis} = 0,20$	13,1%	72,1%	14,8%
SGL 3d	$k_{vis} = 0,10$	9,8%	80,3%	9,8%
	$k_{vis} = 0,15$	32,8%	60,7%	6,6%
	$k_{vis} = 0,20$	45,9%	49,2%	4,9%
SGL 3i	$k_{vis} = 0,10$	14,8%	78,7%	6,6%
	$k_{vis} = 0,15$	41,0%	55,7%	3,3%
	$k_{vis} = 0,20$	49,2%	47,5%	3,3%

Die Ergebnisse der Betrachtungen zur Anpassung der Sortiermethode mittels Korrekturfaktoren sind mit denen in der vorangegangenen Fallstudie vergleichbar. Auch hier sind tendenzielle Übereinstimmungen zwischen dem Ansatz eines globalen und eines auf den Einzelfall bezogenen Korrekturfaktors festgestellt worden. Ebenso führte die Verwendung des einzelfallbezogenen Korrekturfaktors zu einem günstigeren Verhältnis zwischen Fehleinschätzungen und Übereinstimmungen. Ausgehend von den in Abbildung 144 und Abbildung 145 dargestellten Ergebnissen wird in der Sortierstufe SGL 2a bei  $k_{vis} = 0,15$  ein vertretbares Verhältnis zwischen Übereinstimmung und Unter-/Überschätzung erreicht. In der Sortierstufe SGL 3 liegt die Schwelle bei  $k_{vis} \leq 0,10$ .

### Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen belegen ebenfalls, dass die Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung prinzipiell für die praktische Anwendung geeignet ist. Zwar sind – ähnlich wie bei der in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Fallstudie – Unsicherheiten der Sortierung festzustellen, jedoch können diese durch die vorgeschlagenen Korrekturfaktoren weitestgehend abgesichert werden. Der Ansatz eines auf den Einzelfall bezogenen Korrekturfaktor auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens sollte dabei einem globalen Korrekturfaktor vorgezogen werden. Je nach Sortierstufe werden (5 ... 15) % der untersuchten Holzbauteile überschätzt. Dies ist aus ingenieurmäßiger Sicht vertretbar.

Die Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass die Zuverlässigkeit der Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung gegenüber einer ausschließlichen visuellen Sortierung wesentlich höher ist. Letztere ergab eine Übereinstimmung von  $p \approx 28$  %. Hingegen wurden  $p \approx 69$  % der Prüfkörper hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit unterschätzt. Daraus resultieren erhebliche Tragfähigkeitsdefizite, welche in der Praxis zu einer unrealistischen Bewertung der Konstruktion führen. Dieses Defizit kann durch die Anwendung der vorgeschlagenen Sortiermethode wesentlich reduziert werden. Die sich durch eine genauere und zuverlässigere Festigkeitssortierung ergebenden Tragfähigkeitsreserven liegen im Bereich von (5 ... 16) N/mm<sup>2</sup> bei der charakteristischen Biegefestigkeit und (1.000 ... 3.000) N/mm<sup>2</sup> hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Das entspricht einer Erhöhung von  $\Delta f_{m,k} \approx (17 \dots 67)$  % sowie  $\Delta E_{0,mean} \approx (8 \dots 27)$  %. Darüber hinaus konnte mit Hilfe der genaueren Festigkeitssortierung etwa die Hälfte des untersuchten Probenmaterials eine Zuordnung zu den Festigkeitsklassen C18-C40 nach DIN EN 338:2016 vorgenommen werden. Auf Grundlage der ausschließlich visuellen Sortierung wären die betreffenden Holzbauteile keiner Festigkeitsklasse zuordenbar und damit als Bauholz für tragende Zwecke nicht verwendbar gewesen.

Die Nutzbarkeit derartiger Tragfähigkeitsreserven stellt somit eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen dar. Gleichzeitig zeigt die Fallstudie auch, dass zur Durchführung der in situ-Festigkeitsortierung eine besondere Fachkunde hinsichtlich des Trag- und Bruchverhaltens von Holzbauteilen erforderlich ist.

## 7.3. Erprobung der Methodik an bestehenden Holzkonstruktionen

### 7.3.1. Fallstudie 3 – Dachkonstruktion der „Wunderblutkirche“ St. Nikolai, Bad Wilsnack

#### Objektbeschreibung

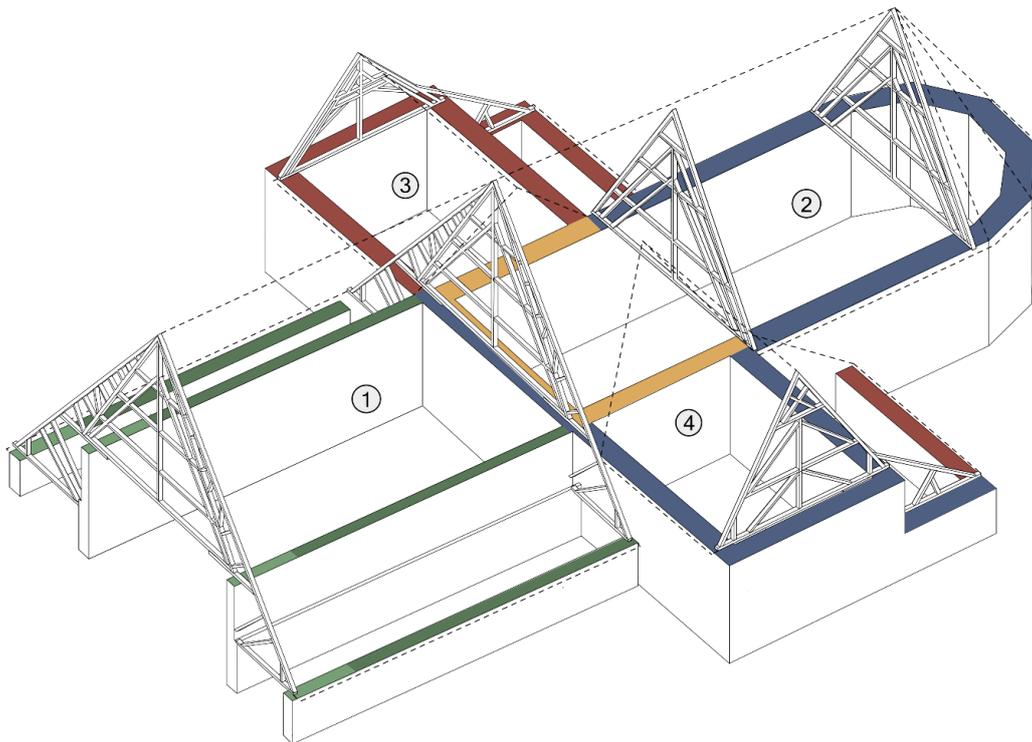
Die evangelische St. Nikolai-Kirche in Bad Wilsnack (Brandenburg, s. Abbildung 146) blickt auf eine rund 730 Jahre währende Baugeschichte zurück. Der erste Kirchenbau, dessen Errichtung auf den Zeitraum 1286-1300 datiert werden konnte, brannte nach einem Überfall durch den Ritter Heinrich von Bülow im Jahre 1383 vollständig nieder. Bereits ein Jahr später wurde mit der Wiedererrichtung der Kirche begonnen (s. a. [Seemann, 2018], [Trapp, o.D.]). Im Zusammenhang mit der Zerstörung der Kirche entstand die Legende vom sogenannten „Blutwunder“. Den Erzählungen nach fand der damalige Pfarrer Cabbuez bei Aufräumarbeiten drei blutbefleckte Hostien in den Trümmern der ursprünglichen Kirche. Dass die Hostien die Zerstörung unversehrt überstanden hatten, wurde als Wunder angesehen. Diese Legende gab der Kirche ihren bis heute erhalten gebliebenen Namen „*Wunderblutkirche*“ und räumte ihr den Rang einer der wichtigsten Wallfahrtskirchen in Nord- und Nordwesteuropa ein. Bereits nach kurzer Zeit erwies sich die wiedererrichtete Kirche als zu klein, um dem stetig wachsenden Pilgerstrom Herr zu werden. Etwa um das Jahr 1450 wurde daher mit der Errichtung einer neuen Kirche im Stil der Norddeutschen Backsteingotik begonnen. Die beinahe durchgängige Bauphase dauerte bis etwa zur Reformation im 16. Jahrhundert an. In den darauffolgenden Jahrhunderten wurde die Kirche stetig umgebaut und rekonstruiert (s. a. [Trapp, o.D.]).



**Abbildung 146: Ansicht der Wunderblutkirche St. Nikolai in Bad Wilsnack (Süd-West-Ansicht, Bildquelle: [Seemann, 2018])**

Der bis heute nahezu unveränderte Grundriss der Kirche ist dreischiffig mit kreuzförmiger Anordnung (s. a. Abbildung 147). Die Decke ist als Kreuzrippengewölbe ausgeführt. Das Hauptschiff (Langhaus und Chor) wird über ein zweijochiges Querhaus mit den beiden Seitenschiffen verbunden. Das Querhaus verläuft mittig zwischen Langhaus und Chor und umfasst auf der Ostseite eine Kapelle. Die Seitenschiffe beherbergen die Sakristei und weitere Kapellen.

Die Außenfassade wird durch zahlreiche, mit Glasmalereien versehene Maßwerköffnungen und Strebepfeiler unterbrochen.



Quelle: Büro KVO, November 2004. *Bauhistorische Untersuchung am Dachstuhl St. Nikolaikirche Bad Wilsnack*

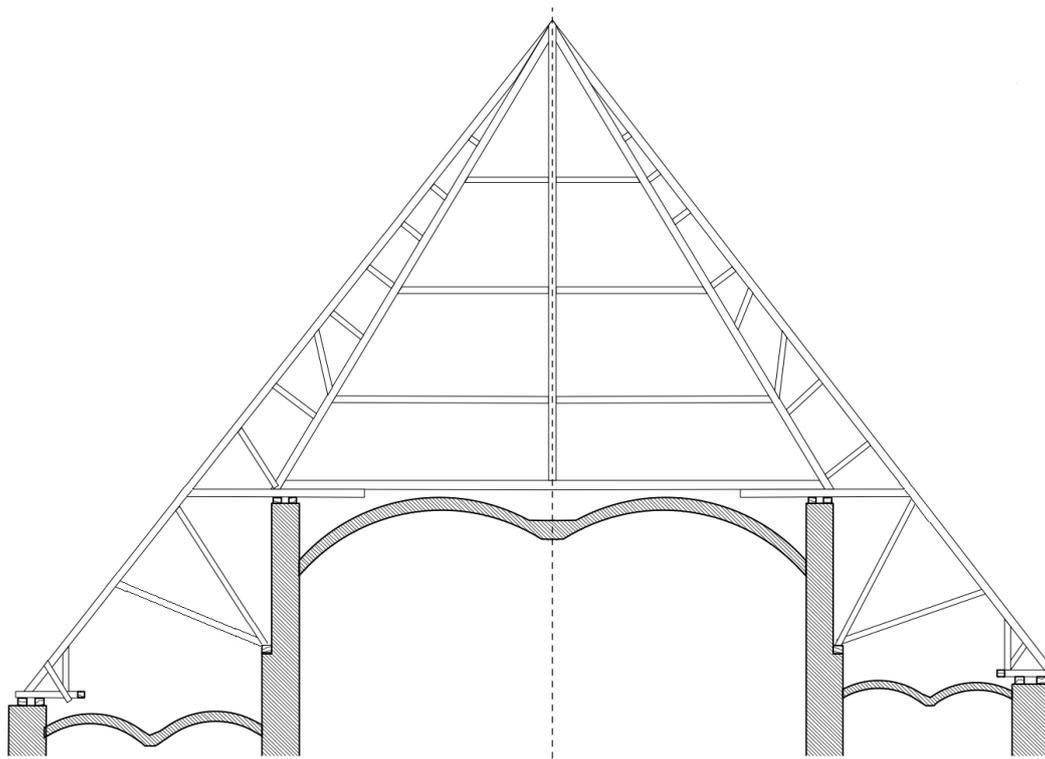
■ 1453d ■ 1519-21d ■ um 1590 ■ 1756d ■ überwiegend 19. Jh.

**Abbildung 147: Dachkonstruktionen der Wunderblutkirche mit Datierung – (1) Langhaus, (2) Chor, (3) nördliches Quer-/Seitenschiff, (4) südliches Quer-/Seitenschiff (aus [Seemann, 2015])**

Die ursprünglichen Dachkonstruktionen sind zum überwiegenden Teil bis heute unverändert erhalten (s. a. Abbildung 148 und Abbildung 149). Das Langhaus wird von einem Kehlbalkendach mit Hängewerk überspannt und besteht aus sechs Hauptgebinden mit jeweils ein bzw. zwei dazwischen angeordneten Neben(Leer-)Gebinden. Das Chordach ist ebenfalls ein Kehlbalkendach mit Hängewerk, wobei die Hängesäule jeweils von zwei Streben gestützt wird. Die Dachkonstruktionen über den Seitenschiffen sind als Kehlbalkendach mit zweifach liegendem Stuhl (nördliches Seitenschiff) sowie als spätgotische Dachkonstruktion mit einfach stehendem Stuhl (südliches Seitenschiff) ausgeführt.



**Abbildung 148: Dachkonstruktion über dem Hauptschiff/Langhaus (Bildquelle: Linke, 2018)**



**Abbildung 149: Schematische Darstellung Dachkonstruktion über dem Hauptschiff/Langhaus (aus [Seemann, 2015])**

Aufgrund ihrer bewegten Geschichte und der Repräsentation von mehreren Jahrhunderten Kunst- und Bautechnikgeschichte, wurde die „Wunderblutkirche“ unter Denkmalschutz gestellt (s. [BDLAM, 2016-1]). Seit 2002 fördern die Deutsche Stiftung Denkmalschutz und die Ernst-Ritter-Stiftung die Sanierung der Kirche (s. [DSD, o. D.-1]). Im Jahr 2015 wurde mit umfassenden statisch-konstruktive Untersuchungen hinsichtlich des Bauzustandes und der Planung der Instandsetzung des gesamten Bauwerkes begonnen (s. [Seemann, 2018]). Zwei Jahre später begannen die Sanierungsarbeiten, welche in sieben Bauabschnitten über einen Zeitraum von sieben Jahren ausgeführt werden sollen. Ein wesentlicher Teil der Maßnahmen betrifft die Stabilisierung und Instandsetzung der hölzernen Dachkonstruktionen.

### **Durchgeführte Untersuchungen**

Im Zuge der Instandsetzung der Dachkonstruktion wurden in 2018 stichprobenartige Untersuchungen hinsichtlich der Materialqualität des verbauten Holzes in einem Teilbereich der Dachkonstruktion durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen war die Erprobung ausgewählter zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode an eingebauten Holzbauteilen sowie die Erarbeitung einer Datengrundlage für die Bewertung der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung.

Die zu diesem Zweck durchgeführte Bauwerksuntersuchungen umfassten folgende Teiluntersuchungen:

- Begutachtung der Konstruktion und Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
- Entnahme von Bohrkernproben zur labortechnischen Ermittlung der Rohdichte in Anlehnung an DIN EN 408 und der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung in Anlehnung an DIN 52185

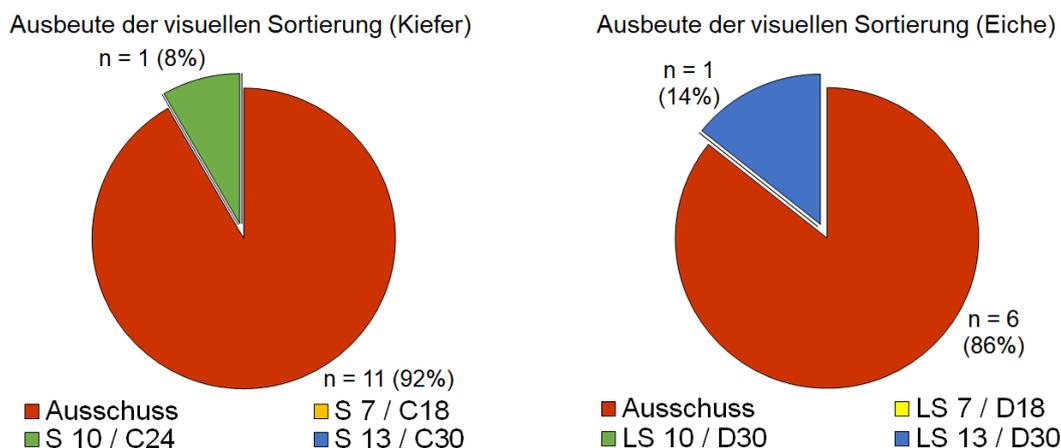
Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Dachkonstruktion des Langhauses (s. Abbildung 147, Nr. 1). In diesem Bereich wurden insgesamt 19 Bauteile aus 4 Gebinden untersucht. Diese Bauteile waren aus Kiefern- (*Pinus sylvestris*) und Eichenholz (*Quercus spez.*).

Die vorläufigen Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden bereits in [Loebjinski/ et al., 2019] veröffentlicht. Die darin beschriebene Sortierung erfolgte anhand der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung entsprechend der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Vorgehensweise und der in [Linke/et al., 2019] veröffentlichten Grenzwerte der Schallausbreitungsgeschwindigkeit. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen darüberhinausgehend hinsichtlich der Anwendbarkeit der in Kapitel 6 vorgestellten Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung betrachtet.

## Ergebnisse und Auswertung

### Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1

Die visuelle Sortierung ergab, dass beinahe sämtliche untersuchten Holzbauteile keiner Sortierklasse nach DIN 4074-1:2012/5:2008 zugeordnet werden konnte (Kiefer:  $p = 92\%$ , Eiche:  $p = 83\%$ , s. a. Abbildung 150 ). Lediglich für jeweils ein Bauteil war eine Zuordnung zur Sortierklasse S10 (Kiefer) nach DIN 4074-1:2012 bzw. zur Sortierklasse LS 13 (Eiche) nach DIN 4074-5:2008 möglich. Ausschlaggebend hierfür waren bei den betreffenden 17 Bauteilen Querschnittsschwächungen durch Baumkante und durch holzerstörende Organismen.

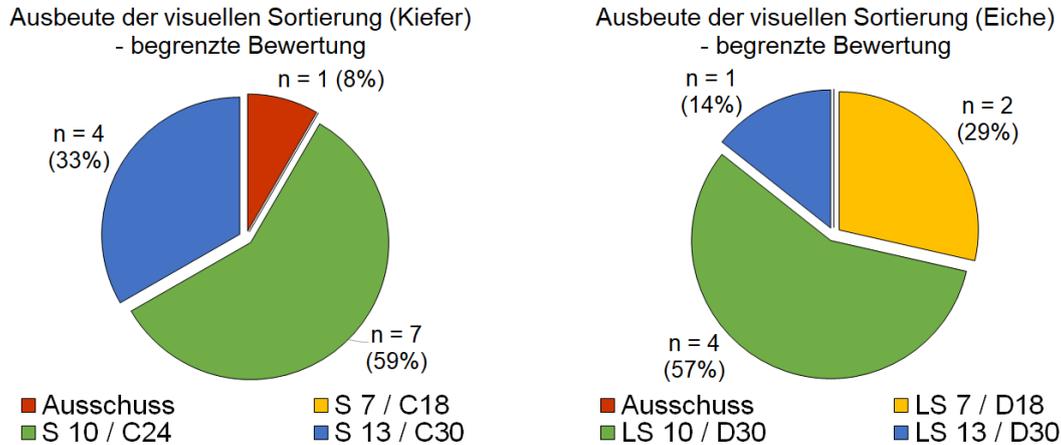


**Abbildung 150: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung**

Derartige Bauteilmerkmale haben jedoch keinen direkten Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holzbauteilen. Der Einfluss auf die Tragfähigkeit resultiert hauptsächlich aus der Reduzierung des tragenden Querschnitts. Der ungeschädigte Restquerschnitt weist hingegen keine Reduzierung der Materialkennwerte auf. Der nicht mehr tragfähige, geschädigte Randbereich kann bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Konstruktionen jedoch in den statischen Berechnungen berücksichtigt werden (vgl. a. Abschnitt 6.2). Daher ist es ausreichend, die entsprechenden Merkmale zwar im Zuge der Begutachtung zu erfassen, eine Berücksichtigung bei der Festigkeitssortierung ist jedoch nicht erforderlich.

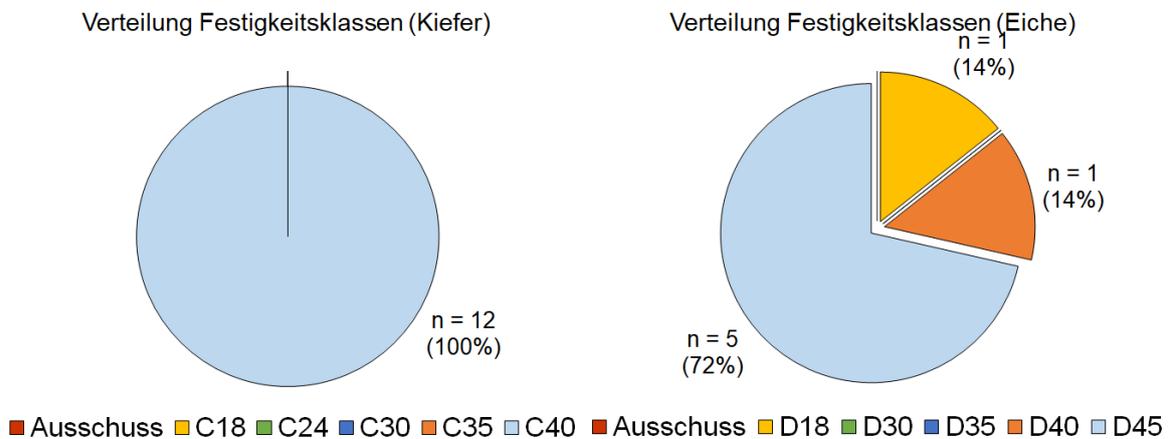
Abbildung 151 zeigt die Zuordnung der untersuchten Holzbauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012/5:2008 und Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 unter Vernachlässigung von Querschnittsreduzierungen durch Baumkante und holzerstörende Organismen. Daraus wird ersichtlich, dass nur für ein Bauteil aus Kiefernholz keine Klassenzuordnung möglich

ist. Maßgeblich hierfür war die Faserneigung. Der überwiegende Teil der Holzbauteile wies hingegen eine durchschnittliche (Sortierklassen S10/LS10 nach DIN 4074-1:2012/-5:2008 bzw. Festigkeitsklassen C24/D30 nach DIN EN 338:2016) bis überdurchschnittliche Tragfähigkeit (Sortierklassen S13/LS13 nach DIN 4074-1:2012/-5:2008 bzw. Festigkeitsklassen C30/D30 nach DIN EN 338:2016) auf.



**Abbildung 151: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung ohne Berücksichtigung der Kriterien Baumkante und Fäule**

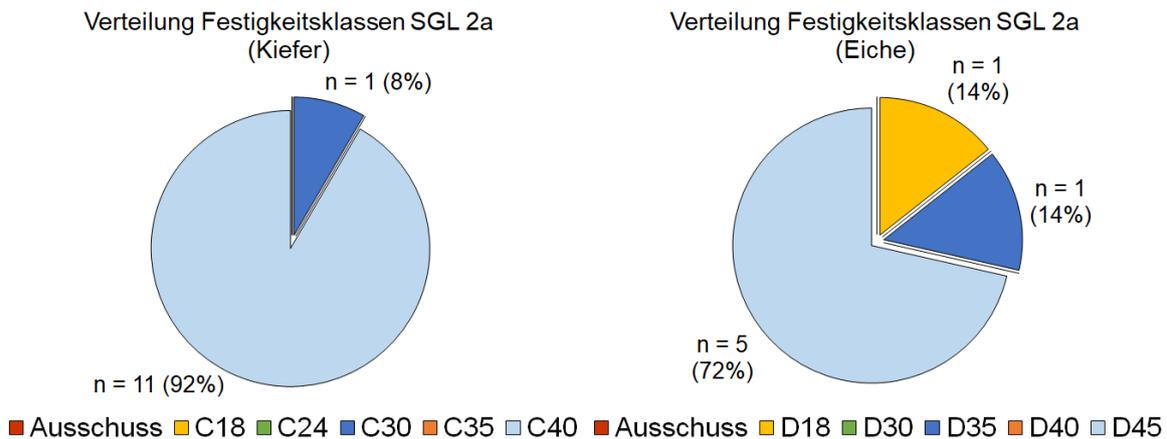
Der Vergleich der Ergebnisse der visuellen Sortierung mit der Zuordnung der Holzbauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der labortechnisch ermittelten Kennwerte Rohdichte und Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung zeigt, dass lediglich eine tendenzielle Übereinstimmung zwischen den Klassenverteilungen besteht (s. Abbildung 152). Es ist festzustellen, dass die vorhandenen Tragfähigkeitsreserven mit Hilfe der visuellen Sortierung nicht vollständig ausgeschöpft werden können. Insbesondere bei dem untersuchten Kiefernholz wird deutlich, dass die Materialqualität bei allen Bauteilen unterschätzt wurde. Bei dem untersuchten Eichenholz betrug der Anteil der Unterschätzung  $p \approx 86\%$ . Ein Bauteil wurde überschätzt ( $p \approx 14\%$ ). Diese Ergebnisse zeigen, dass die visuelle Sortierung zu ungenau ist, um die Materialqualität zuverlässig abzuschätzen. Hierfür sind umfassende Untersuchungen an den Holzbauteilen erforderlich.



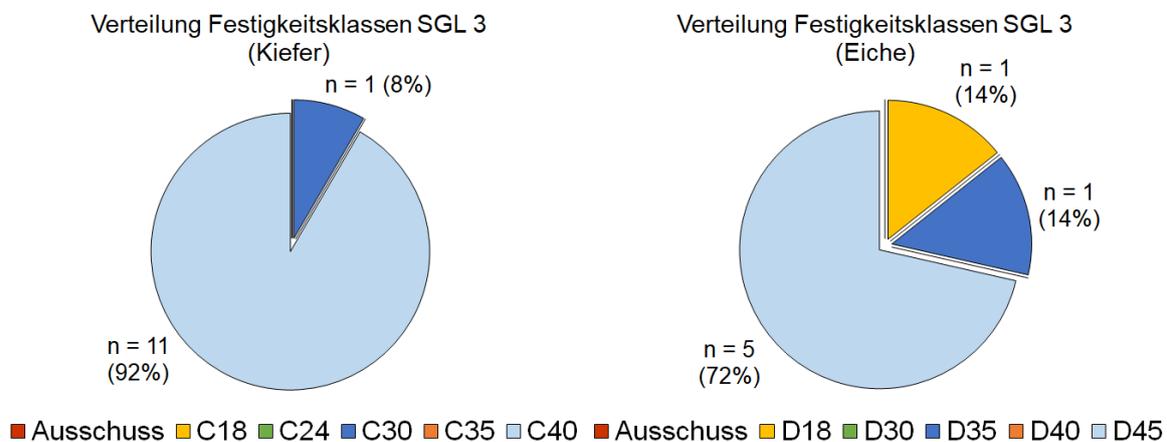
**Abbildung 152: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte und Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung**

### Festigkeitssortierung mittels Sortierparametern

Die im Zuge der Bauwerksuntersuchung aufgenommenen Messergebnisse wurden entsprechend der in Abschnitt 6.5 beschriebenen Methode für die Sortierung anhand eines Sortierparameters verwendet. Analog der in Abschnitt 7.1 erläuterten Vorgehensweise erfolgte die in situ-Festigkeitssortierung in den Sortierstufen SGL 2a und SGL 3 unter Ansatz der auf dem statischen Biege-Elastizitätsmoduls basierenden Sortiergleichungen und Grenzwerte. Zusätzlich wurde ein Korrekturfaktor auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens („Einzelfall-Korrekturfaktor“ nach Abschnitt 7.2.1, Gl. 35) berücksichtigt. Die sich hierbei ergebende Sortierausbeute ist in der nachfolgenden Abbildung 153 und Abbildung 154 dargestellt.



**Abbildung 153: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung – Sortierstufe SGL 2a**



**Abbildung 154: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung – Sortierstufe SGL 3**

Wie sich aus dem Vergleich der Verteilung der untersuchten Holzbauteile auf die Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 zeigt, ergeben sich anhand der Methode zur in situ-Festigkeitssortierung tendenziell die gleichen Zuordnungen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 wie anhand labortechnisch ermittelter Kennwerte (vgl. Abbildung 152 mit Abbildung 153 und Abbildung 154). Bei den untersuchten Kiefernholzbauteilen ist lediglich ein Bauteil sowohl in der Sortierstufe SGL 2a als auch in der Stufe SGL 3 unterschätzt worden. Die Abweichung des Sortierparameters zu den Grenzwerten der korrekten Festigkeitsklasse beträgt dabei  $p = 18\%$  (SGL 2a) beziehungsweise  $p = 12\%$  (SGL 3). Ein weiteres Eichenholzbauteil wurde ebenfalls in beiden Sortierstufen unterschätzt. Die Abweichungen betragen hier

$p = 2\%$  (SGL 2a) und  $p = 5\%$  (SGL 3). Die betreffenden Bauteile wiesen umfängliche Fraßspuren holzerstörender Insekten sowie lokal begrenzte Fäule auf, welche auf einen Querschnittsbereich mit reduzierter Tragfähigkeit hindeuten. Es ist daher davon auszugehen, dass die Messergebnisse hierdurch verfälscht wurden. Um derartige Fehleinschätzungen zu vermeiden, ist die Entfernung der geschädigten Bereiche (Bebeilen) und Bewertung der vorhandenen Restquerschnitte hinsichtlich deren tatsächlich vorhandener Tragfähigkeit notwendig.

### **Schlussfolgerungen**

Die Ergebnisse dieser Fallstudie zeigen, dass mit Hilfe der vorgeschlagenen Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung die Materialqualität der Holzbauteile im eingebauten Zustand zuverlässig abgeschätzt werden kann. Jeweils ein Bauteil je untersuchter Holzart wurde hinsichtlich seiner Tragfähigkeit überschätzt. Der prozentuale Anteil liegt damit bei  $p \approx 8\%$  (Kiefer) sowie  $p \approx 14\%$  (Eiche) und ist aus ingenieurmäßiger Sicht vertretbar.

Der Vergleich mit der Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 auf Grundlage der visuellen Sortierung belegt deren geringe Zuverlässigkeit. Hierüber wurde die Tragfähigkeit der Bauteile bei  $p \approx 95\%$  überschätzt. Bei strenger Anwendung der für neues Bauholz geltenden Sortiervorschriften – d.h. unter Einbeziehung der Querschnittsreduzierungen durch Baumkante und durch holzerstörende Organismen – werden sämtliche Bauteile unterschätzt ( $p = 100\%$ ). Die daraus resultierenden Tragfähigkeitsdefizite können in der Praxis zu einer unrealistischen Bewertung der Konstruktion und unverhältnismäßigen Eingriffen in die bestehende Bausubstanz führen.

Eine genauere und zuverlässigere Festigkeitssortierung mit Hilfe zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode kann dieses Defizit beseitigen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass hierüber teils erhebliche Tragfähigkeitsreserven aufgedeckt werden können. Diese liegen bei von  $(10 \dots 16) \text{ N/mm}^2$  bei der charakteristischen Biegefestigkeit und  $(2.000 \dots 3.000) \text{ N/mm}^2$  hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Das entspricht einer Erhöhung von  $\Delta f_{m,k} \approx (33 \dots 67)\%$  sowie  $\Delta E_{0,mean} \approx (7 \dots 27)\%$ . Darüber hinaus war für drei Bauteile eine Zuordnung zu den Festigkeitsklassen C40 sowie D45 nach DIN EN 338:2016 möglich. Auf Grundlage der ausschließlich visuellen Sortierung wären die betreffenden Holzbauteile keiner Festigkeitsklasse zuordenbar und damit als Bauholz für tragende Zwecke nicht verwendbar gewesen.

Die Ergebnisse der beschriebenen Fallstudie zeigen, dass durch eine genauere in situ-Festigkeitssortierung eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen möglich ist. Hierfür ist eine umfassende Begutachtung der Bauteile erforderlich, um den Einfluss von Wuchs- und Bauteilmerkmalen auf die Tragfähigkeit und das Bruchverhalten bewerten zu können. Eine besondere Fachkunde hinsichtlich des Trag- und Bruchverhaltens von Holzbauteilen ist dabei Voraussetzung.

### **7.3.2. Fallstudie 4 – Dachkonstruktion der St.-Nikolai-Kirche, Jüterbog**

#### **Objektbeschreibung**

Die evangelische Pfarrkirche St. Nikolai-Kirche in Jüterbog (Brandenburg, s. Abbildung 155) fand bereits im Jahre 1307 eine erste urkundliche Erwähnung (s. [Seemann, 2018]) und ist eng mit der Reformation verbunden. Der Prediger Johann Tetzel (\* um 1460, † 1519) betrieb hier seinen Ablasshandel, Thomas Müntzer (\* 1489, † 1525) hielt im Jahre 1517 die

Osterpredigt (s. [DSD, o. D.-2]). Der älteste Teil des Kirchenbaus – das ursprünglich vierjochige Langhaus – wurde um die Jahrhundertwende des 13. und 14. Jahrhunderts erbaut und bis in das Jahr 1333 um ein weiteres Joch in Westrichtung erweitert (s. [BLDAM, 2016-2], [Seemann, 2018]). Bis zum Ende des 15. Jahrhunderts folgten weitere Anbauten und Erweiterungen – um 1440 der Westbau, im Jahr 1417 der nördliche Turm, im Jahr 1457 der Chor mit Umgang, im Jahr 1488 das nördliche Seitenschiff und um 1500 der südliche Turm und Anbau (vgl. a. [Dehio, 1906], [Seemann, 2018], [Fritz, 2020]). Aber auch in den darauffolgenden Jahrhunderten wurden Renovierungsarbeiten an der Kirche durchgeführt – im Jahr 1617 wurde die durch einen Sturm zerstörte Spitze des Nordturms ersetzt, in den 1820er/70er und 1930er Jahren fanden umfassende Renovierungsarbeiten der Innenräume statt. Im Jahr 1974 wurde Instandsetzungsarbeiten an der Dachkonstruktion vorgenommen (vgl. [Dehio, 1906], [Seemann, 2018], [Fritz, 2020]).



**Abbildung 155: Süd-Ansicht der Pfarrkirche St. Nikolai in Jüterbog (Bildquelle: [Janßen, 2021])**

Der Grundriss der Kirche ist dreischiffig mit kreuzförmiger Anordnung (s. Abbildung 156). Die Türme waren ursprünglich freistehend und wurden im Zuge der Erweiterung im 15. Jahrhundert an das Langschiff angeschlossen. Die Anbauten an der Nord- und Südseite sind zweigeschossig und binden in die Dachkonstruktion des Hauptdaches ein.

Die ursprünglichen Dachkonstruktionen sind bis heute weitestgehend unverändert erhalten (s. a. Abbildung 157). Das Langhaus und der Chor werden von einer spätgotischen Dachkonstruktion mit zweifach stehendem Stuhl und umfänglichen Längs- und Queraussteifungen überdacht. Die Dachkonstruktionen über den Seitenschiffen sind als Kehlbalckendach mit zweifach liegendem Stuhl ausgeführt. Im nördlichen Seitenschiff sind insgesamt sieben Gebinde angeordnet, welche durch hölzerne Windrispen in Längs- und durch in die Stuhlsäulen

einbindende Fußstreben in Querrichtung ausgesteift sind (s. Abbildung 158). Die Binderbalken der ersten fünf Gebinde sind aufgrund der Wölbung der Gewölbedecke durchtrennt und als Stichbalken ausgeführt.

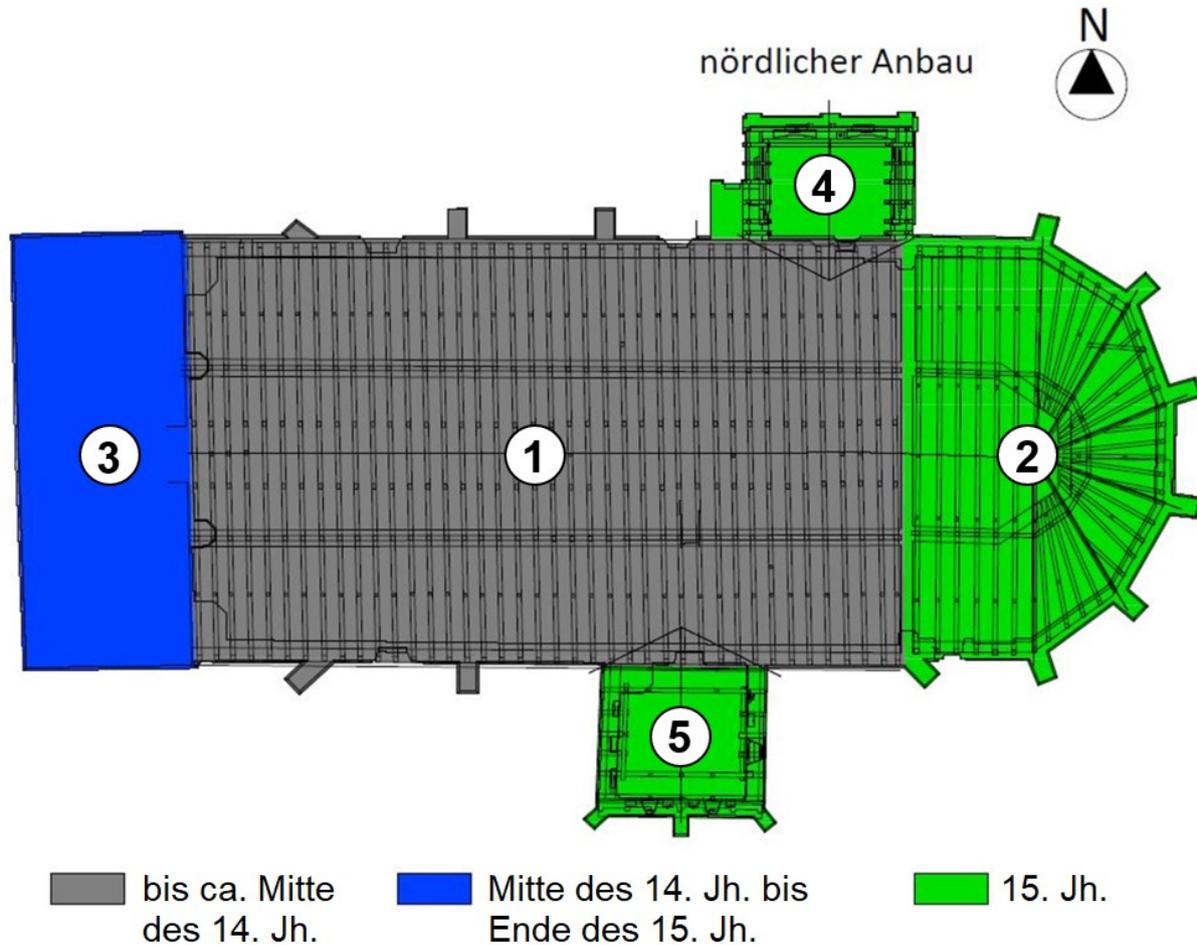


Abbildung 156: Grundriss der Pfarrkirche mit Datierung – (1) Langhaus, (2) Chor, (3) Nord-/Südturm, (4) nördliches Quer-/Seitenschiff, (5) südliches Quer-/Seitenschiff (Bildquelle: [Fritz, 2020], bearbeitet durch den Verfasser)



Abbildung 157: Dachkonstruktion über dem Hauptschiff/Langhaus (Bildquelle links: Mühlisch, 2019; Bildquelle rechts: [Seemann, 2018])

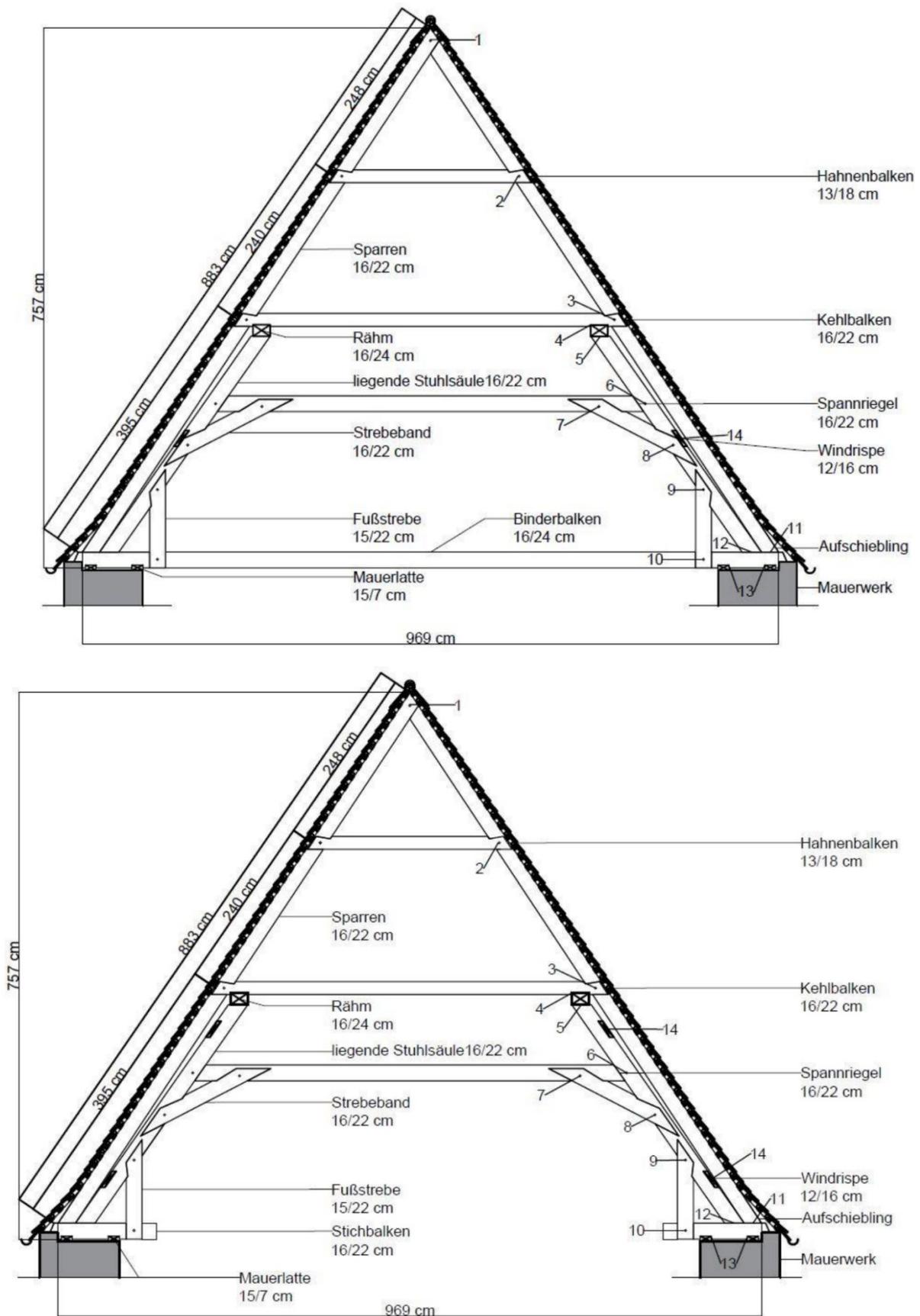


Abbildung 158: Zeichnerische Darstellung der Dachkonstruktion über dem nördlichen Seitenschiff – oben: Vollgebinde; unten: Leergebinde (aus [Fritz, 2020])

Die Pfarrkirche St. Nikolai wurde aufgrund ihrer historischen Bedeutung im Zusammenhang mit der Reformation zum Denkmal erklärt (s. [BDLAM, 2016-2], [DSD, o. D.-2]). Seit 1992 fördert die Deutsche Stiftung Denkmalschutz die Sanierung der Innenausstattung der Kirche (s. [DSD, o. D.-2]). Nach einer umfassenden Bauzustandsuntersuchung in 2015 wurden umfangreiche Schädigungen infolge eines Befalls durch den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) und daraus resultierende Verformungen festgestellt. Die bei der Instandsetzung in den 1970er Jahren ausgeführten Sanierungsmaßnahmen erfolgten zum überwiegenden Teil nicht fachgerecht (s. [Seemann, 2018]). Seit 2018 werden daher Instandsetzungsarbeiten ausgeführt, welche innerhalb eines Zeitraums von vier Jahren abgeschlossen werden sollen. Der maßgebliche Teil der vorgesehenen Maßnahmen betrifft die hölzernen Dachkonstruktionen.

### **Durchgeführte Untersuchungen**

Im Zuge der baubegleitenden Bauwerksuntersuchungen während der Instandsetzung der Dachkonstruktion wurden 2019 stichprobenartige Untersuchungen hinsichtlich der Materialqualität des verbauten Holzes an der Dachkonstruktion des nördlichen Seitenschiffes durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen war neben der Erfassung des baulichen Zustandes der Holzkonstruktion und der vorhandenen Schädigungen auch die Ermittlung der vorhandenen Tragfähigkeit der Holzbauteile. In diesem Zusammenhang wurden ausgewählte zerstörungsfreie und -arme Prüfmethode erprobt und eine Datengrundlage für die Bewertung der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung erarbeitet.

Die zu diesem Zweck durchgeführte Bauwerksuntersuchungen umfassten folgende Teiluntersuchungen:

- Begutachtung der Konstruktion und Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
- Entnahme von Bohrkernproben zur labortechnischen Ermittlung der Rohdichte in Anlehnung an DIN EN 408

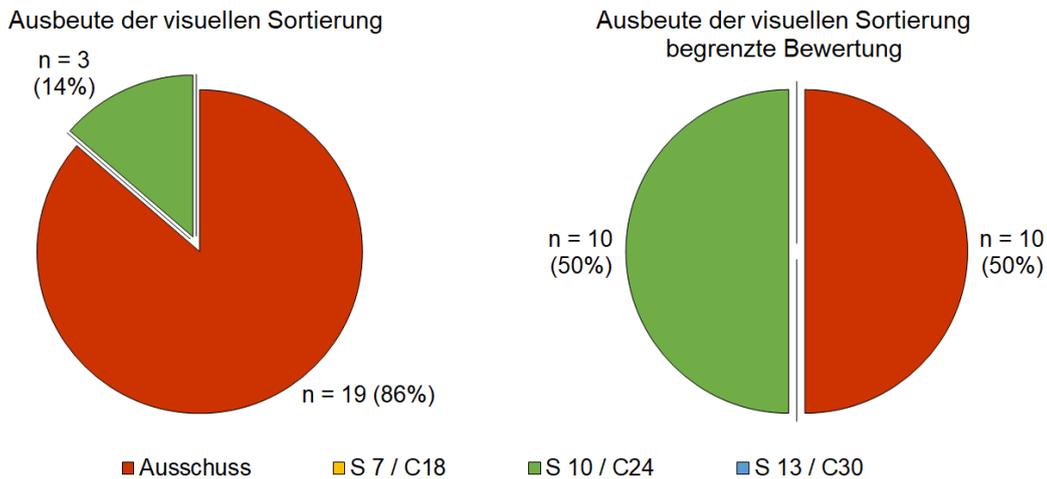
Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit an der HNEE Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde (s. [Fritz, 2020]) in Kooperation mit der VHÖB Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (UG), Eberswalde und konzentrierten sich dabei auf die Dachkonstruktion des nördlichen Seitenschiffes (s. Abbildung 156, Nr. 4). In diesem Bereich wurden insgesamt 24 Bauteile aus 2 Gebinden hinsichtlich der Materialqualität untersucht (Holzart: Kiefer, *Pinus sylvestris*).

### **Ergebnisse und Auswertung**

#### **Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1**

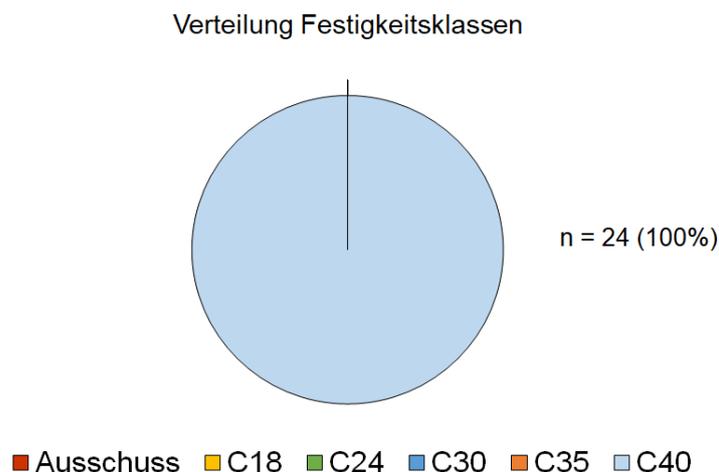
Die visuelle Sortierung ergab, dass der überwiegende Teil der untersuchten Holzbauteile keiner Sortierklasse nach DIN 4074-1:2012 zugeordnet werden konnte ( $p = 86 \%$ , s. a. Abbildung 159, links). Lediglich für fünf Bauteile war eine Zuordnung zu den Sortierklassen S10 (3 Bauteile) und S13 (2 Bauteile) nach DIN 4074-1:2012 möglich. Ausschlaggebend hierfür waren bei den übrigen 19 Bauteilen vorrangig Risse sowie Querschnittsschwächungen durch Baumkante und holzzerstörende Organismen. Wie bereits unter Abschnitt 7.3.1 erläutert, haben letztere keinen direkten Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des gesamten Holzbauteils. Sie bilden lediglich einen nicht mehr tragfähigen Querschnittsbereich, der bei

der Tragfähigkeitsbewertung als Fehlfläche berücksichtigt werden kann. Gleiches gilt für die Baumkante. Daher können derartige Merkmale bei der eigentlichen Festigkeitsortierung unberücksichtigt bleiben. Aus Abbildung 159 (rechts) wird ersichtlich, dass unberücksichtigt der Sortierkriterien „Baumkante“ und „Fäule“ für etwa die Hälfte der nicht zuordenbaren Bauteile eine Zuordnung zu den Sortierklassen S10/S13 nach DIN 4074-1:2012 möglich ist. Ausschlaggebend für die Zuordnung zur Klasse „Ausschuss“ sind dann Äste, ausgeprägte Faserneigungen und umfängliche Risse.



**Abbildung 159: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der Kriterien Baumkante und Fäule**

Der Vergleich der Ergebnisse der visuellen Sortierung mit der Zuordnung der Holzbauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte zeigt, dass keine Übereinstimmung zwischen den Klassenverteilungen besteht, da alle untersuchten Bauteile der Festigkeitsklasse C40 nach DIN EN 338:2016 zuzuordnen wären (s. Abbildung 160). Die zuverlässige Erfassung der Materialqualität ist über eine ausschließlich visuelle Sortierung nicht möglich.

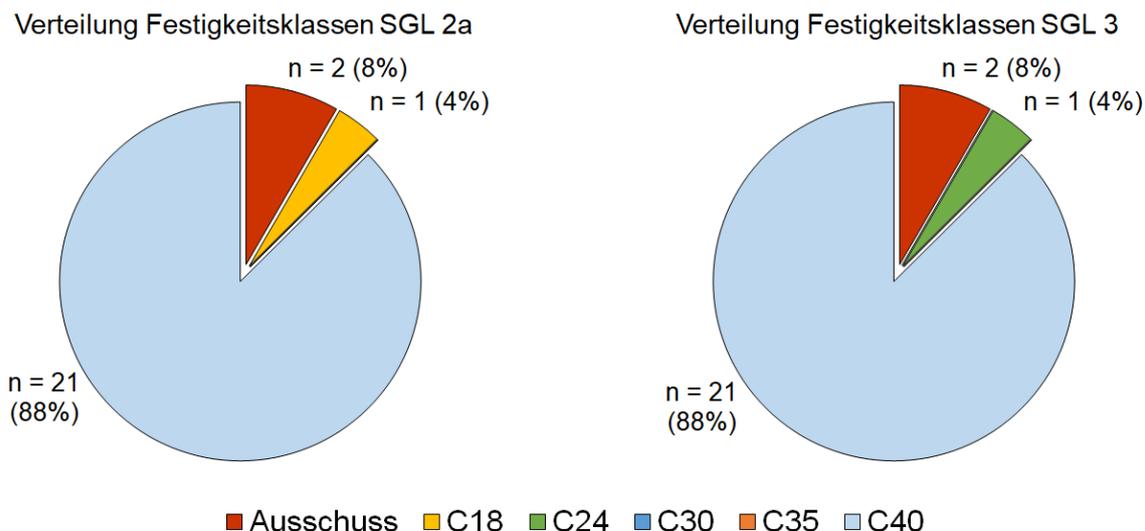


**Abbildung 160: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte**

Diese Ergebnisse zeigen erneut, dass die visuelle Sortierung nicht ausreichend genau ist, um die Materialqualität zuverlässig abzuschätzen. Somit sind umfassendere Untersuchungen an den Holzbauteilen erforderlich.

### Festigkeitssortierung mittels Sortierparametern

Die während der Bauwerksuntersuchung aufgenommenen Messergebnisse wurden analog der in Abschnitt 7.3.1 erläuterten Vorgehensweise zur Erprobung der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung verwendet. Diese erfolgte in den Sortierstufe SGL 2a und SGL 3 unter Ansatz des statischen Biege-Elastizitätsmoduls als Zielgröße. Der Korrekturfaktor auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens („Einzelfall-Korrekturfaktor“ nach Abschnitt 7.2.1, Gl. 35) wurde ebenfalls berücksichtigt. Die sich hierbei ergebende Sortierausbeute ist in der nachfolgenden Abbildung 161 dargestellt.



**Abbildung 161: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung**

Wie aus Abbildung 161 hervorgeht, ergeben sich anhand der Methode zur in situ-Festigkeitssortierung tendenziell die gleichen Zuordnungen wie anhand labortechnisch ermittelter Kennwerte. Lediglich drei Bauteile wurden in beiden Sortierstufen unterschätzt. Die Abweichungen des Sortierparameters zu den Grenzwerten der korrekten Festigkeitsklasse betragen  $p = (22...63) \%$ . Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Bauteile neben der bei der visuellen Sortierung berücksichtigten Fäule auch Schäden durch holzerstörende Insekten aufwiesen. Derartige Schädigungen erzeugen einen Querschnittsbereich mit reduzierter Tragfähigkeit. Eine Beeinflussung der Messergebnisse der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung durch die biologischen Schädigungen kann nach derzeitigem Untersuchungsstand nicht ausgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 7.3.1, S. 220).

### Schlussfolgerungen

Die praktische Anwendung der vorgeschlagenen Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung in dieser Fallstudie zeigt erneut, dass hierüber die Materialqualität der Holzbauteile im eingebauten Zustand zuverlässig abgeschätzt werden kann. Lediglich 3 Bauteile wurden hinsichtlich seiner Tragfähigkeit überschätzt. Der prozentuale Anteil liegt damit bei  $p = 12,5 \%$  und ist aus ingenieurmäßiger Sicht vertretbar.

Die geringe Zuverlässigkeit einer ausschließlichen visuellen Sortierung wird ebenfalls durch den Vergleich der Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 bestätigt. Auch ohne Berücksichtigung der Querschnittsreduzierungen durch Baumkante und holzerstörende Organismen werden sämtliche Bauteile unterschätzt ( $p = 100 \%$ ).

Dies kann in der Praxis zu einer unrealistischen Bewertung der Konstruktion und unverhältnismäßigen, weniger substanzschonenden Eingriffen in die bestehende Bausubstanz führen.

Durch die genauere und zuverlässigere in situ-Festigkeitsortierung können erhebliche Tragfähigkeitsreserven aufgedeckt werden. Diese liegen bei von (10 ... 16) N/mm<sup>2</sup> bei der charakteristischen Biegefestigkeit und (2.000 ... 3.000) N/mm<sup>2</sup> hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Das entspricht einer Erhöhung von  $\Delta f_{m,k} \approx (33 \dots 67) \%$  sowie  $\Delta E_{0,mean} \approx (17 \dots 27) \%$ . Des Weiteren war für zehn Bauteile eine Zuordnung zur Festigkeitsklasse C40 nach DIN EN 338:2016 möglich. Diese Bauteile konnten auf Grundlage der ausschließlich visuellen Sortierung keiner Festigkeitsklasse zugeordnet. Dementsprechend wären sie als Bauholz für tragende Zwecke nicht verwendbar gewesen.

Die Ergebnisse bestätigen, dass durch eine genauere in situ-Festigkeitsortierung eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen möglich ist. Ebenso wird auch deutlich, dass eine ausschließliche und strenge visuelle Sortierung unzureichend ist. Eine umfassende visuelle Untersuchung der Bauteile ist jedoch unverzichtbar, um die vorhandenen Wuchs- und Bauteilmerkmale zuverlässig bewerten zu können. Hierfür ist eine besondere Fachkunde erforderlich.

### 7.3.3. Fallstudie 5 – Dachkonstruktion eines Wohnstallhauses, Fehrbellin

#### Objektbeschreibung

Die Erbauung des denkmalgeschützten Fachwerkhauses in Fehrbellin (Brandenburg, s. Abbildung 162) ist auf das Jahr 1786 datiert (s. [BLDAM, 2016-3]). Das Gebäude war Teil eines ursprünglich als Vierseitenhof angelegten Gehöftes, welches seit dem 17. Jahrhundert durchgängig im Besitz derselben Familie ist. Es handelt sich dabei um ein sogenanntes Mittelflurhaus, das ursprünglich als Wohnstallhaus genutzt wurde (s. [Schwarz/et al., 2003]).



Abbildung 162: Nord-Ansicht des Fachwerkhauses in Fehrbellin (Bildquelle: [SVBR, 2021])

Mittelflurhäuser – auch Dielenhäuser genannt – sind ein für die Mark Brandenburg typische Bauweise des 15.-19. Jahrhunderts, welcher sich aus dem Niedersächsischen Hallenhaus entwickelte (s. [Radig, 1966]). Derartige Häuser kennzeichnen sich durch ihren zur Straße hin angelegten Giebel und den längs durch das Erdgeschoss verlaufenden Flur. Im vorderen Teil befand sich die als Wohn-, Arbeits-, Speise- und Schlafraum genutzte Diele, wohingegen der hintere Teil als Stall genutzt wurde. Die sogenannte „Schwarzküche“ befand sich üblicherweise in der Mitte des Gebäudes. Der Dachraum diente als Lager für Einstreu und Futter. Im 19.-20. Jahrhundert wurde das Gebäude zu einem reinen Wohngebäude umgebaut (s. [Schwarz/et al., 2003]). In den 1970er und 1990er Jahren erfolgte umfassende Instandsetzungsarbeiten an den Giebelwänden und der Dacheindeckung.

Die Dachkonstruktion des Fachwerkhäuses ist ein Kehlbalkendach mit zweifach stehendem Stuhl (s. a. Abbildung 164 und Abbildung 164). Die Tragkonstruktion besteht aus insgesamt 13 Gebinden – bestehend aus zwei Sparren (Dachneigung ca.  $(47 \dots 49)^\circ$ ), einem Kehlbaken sowie einem Deckenbalken als Zugband. Die Gebinde sind auf einem zweifach stehenden Stuhl – bestehend aus jeweils einem Stuhlrähm sowie drei Stuhlsäulen mit Kopfbändern und vereinzelt Steigbändern zwischen Deckenbalken und Stuhlsäulen – aufgelagert und werden durch diese in Längsrichtung ausgesteift. Die Giebelgebinde sind als Fachwerkkonstruktion ausgeführt.

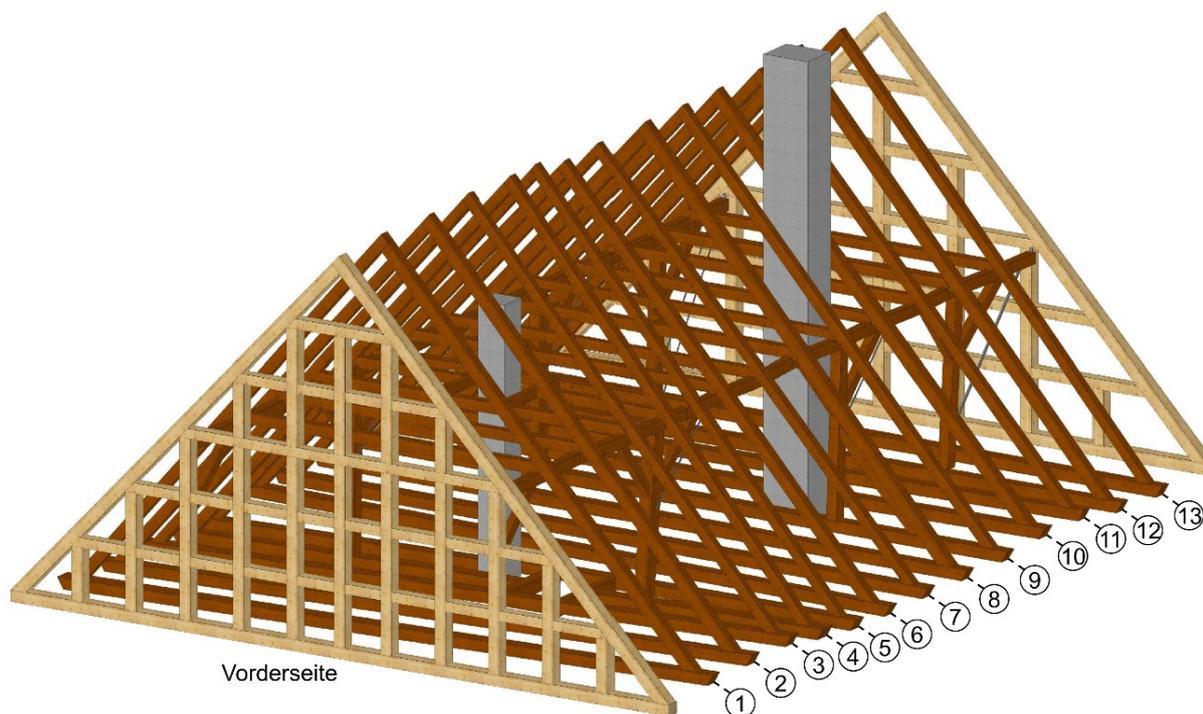
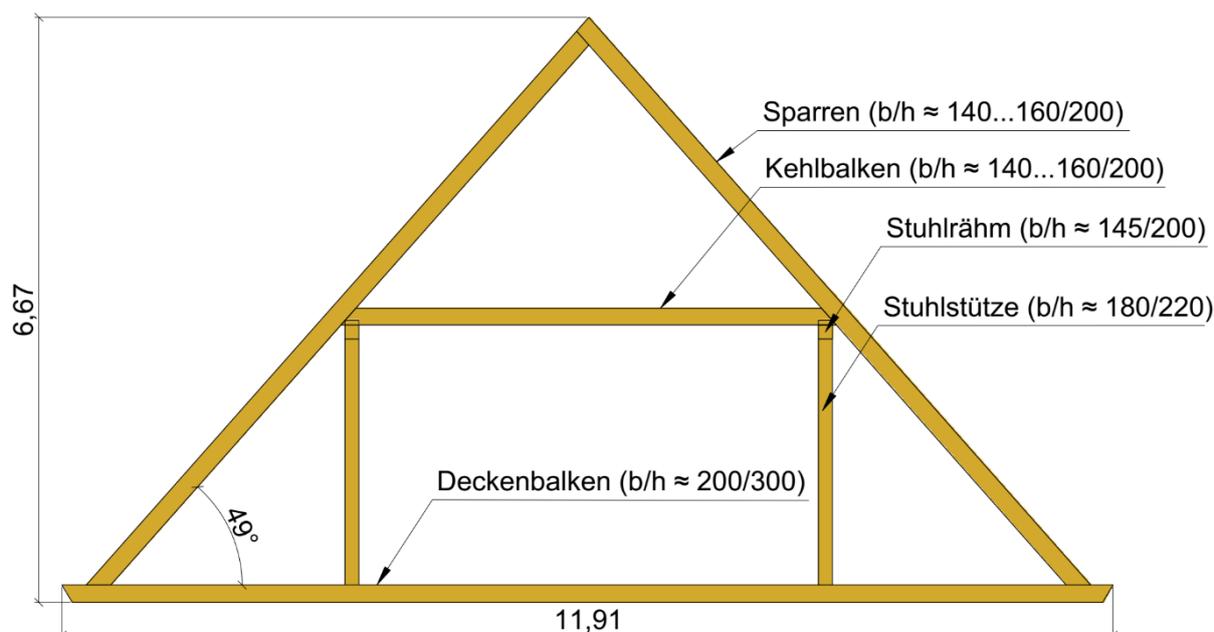


Abbildung 163: Isometrie der Dachkonstruktion (aus [SVBR, 2021])



**Abbildung 164: Schnittansicht der Dachkonstruktion (aus [SVBR, 2021])**

Die in der Dachkonstruktion verwendete Holzbauteile sind aus Kiefernholz (*Pinus sylvestris*) hergestellt und stammen augenscheinlich aus mehreren älteren Bauwerken. Dies betrifft vor allem die Bauteile des stehenden Stuhles sowie die Kehlbalken. Ausschlaggebend hierfür ist die große Variabilität der Bauteilquerschnitte sowie die zahlreichen Aussparungen in den Bauteiloberflächen. Letztere umfassen Einkerbungen für Staken und Zapfenlöcher ohne sichtbaren derzeitigen Nutzen.

Das Gebäude wurde als „gut erhaltenes Beispiel eines zweigeschossigen märkischen Mittelflurhauses“ unter Denkmalschutz gestellt (s. [Schwarz/et al., 2003]). Aufgrund von umfangreichen Schädigungen durch holzerstörende Organismen, deutlicher Verformungen und der daraus resultierenden Beeinträchtigung der Trag- und Funktionsfähigkeit der Dachkonstruktion beantragte die Bauherrschaft die Denkmalrechtliche Erlaubnis zu deren Instandsetzung bei der zuständigen Denkmalschutzbehörde. Diese fordert eine Begutachtung der Dachkonstruktion. Eine dementsprechende Bauzustandsuntersuchung erfolgte im Zeitraum 2020-2021. Neben der Erfassung und Bewertung der vorhandenen Schädigungen und Verformungen umfasste diese auch die Ermittlung der vorhandenen Materialqualität als Grundlage für die Erarbeitung substanzschonenden und denkmalgerechter Instandsetzungsmaßnahmen.

### Durchgeführte Untersuchungen

Im Zuge der umfassenden Bauwerksuntersuchungen wurden auch Untersuchungen hinsichtlich der Materialqualität des in der Dachkonstruktion verbauten Holzes durchgeführt. Das Ziel war die zerstörungsfreie Ermittlung der vorhandenen Tragfähigkeit der Holzbauteile. Die im Rahmen der Bauwerksuntersuchung gewonnenen Datengrundlage wurde zur Bewertung der praktischen Anwendbarkeit der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung verwendet. Die zu diesem Zweck durchgeführte Bauwerksuntersuchungen umfassten folgende Teiluntersuchungen:

- Begutachtung der Konstruktion und Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen

- Entnahme von Bohrkernproben zur labortechnischen Ermittlung der Rohdichte in Anlehnung an DIN EN 408

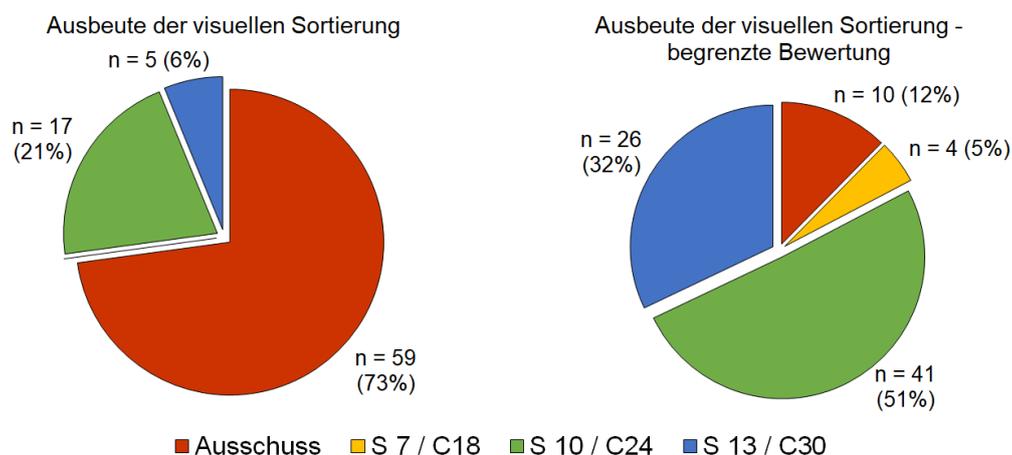
Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines Gutachtauftrages des Sachverständigenbüros Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug, Eberswalde (s. [SVBR, 2021]) und konzentrierten sich auf die hölzerne Dachkonstruktion. In diesem Bereich sind insgesamt 68 Bauteile hinsichtlich ihrer Materialqualität untersucht worden (Holzart: Kiefer, *Pinus sylvestris*).

## Ergebnisse und Auswertung

### Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1

Die visuelle Sortierung ergab, dass der überwiegende Teil der untersuchten Holzbauteile keiner Sortierklasse nach DIN 4074-1:2012 zugeordnet werden konnte ( $p = 73\%$ , s. a. Abbildung 165, links). Lediglich für etwa ein Viertel der Bauteile war eine Zuordnung zu den Sortierklassen S10 ( $p = 23\%$ ) und S13 ( $p = 6\%$ ) nach DIN 4074-1:2012 (s. a. Abbildung 165, links) möglich. Ausschlaggebend für die Zuordnung zur Klasse „Ausschuss“ waren bei den betreffenden 59 Bauteilen vorrangig Verformungen (Längskrümmungen und Verdrehungen) sowie Querschnittsschwächungen durch Baumkante und holzerstörende Organismen. Insbesondere letztere haben keinen direkten Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holzbauteilen, sodass diese bei der Zuordnung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 unberücksichtigt bleiben können (vgl. Abschnitt 7.3.1).

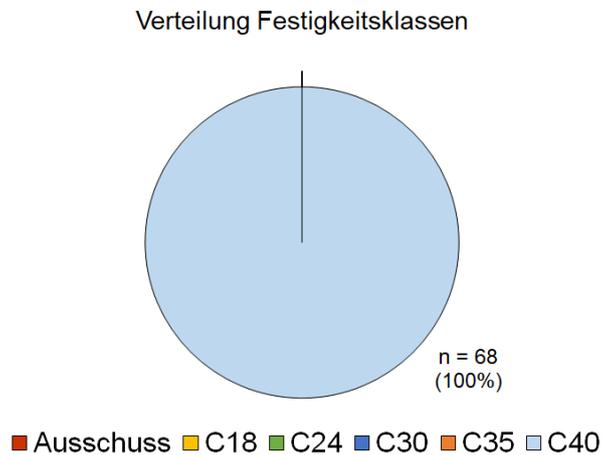
Aus Abbildung 165 (rechts) wird ersichtlich, dass unberücksichtigt der Sortierkriterien „Verformungen“, „Baumkante“, „Fäule“ und „Insektenfraß“ für etwa die Hälfte der untersuchten Bauteile ( $p = 51\%$ ) eine Zuordnung zur Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1:2012 möglich ist. Ein Drittel ( $p = 32\%$ ) entsprach der Sortierklasse S13 nach DIN 4074-1:2012. Weitere vier Holzbauteile ( $p = 5\%$ ) wiesen zumindest eine geringe Tragfähigkeit auf (Sortierklasse S7 nach DIN 4074-1:2012). Der Anteil an nicht zuordenbaren Bauteilen beträgt dann nur noch  $p = 12\%$ . Ausschlaggebend für die Sortierentscheidung sind Äste, ausgeprägte Faserneigungen und umfängliche Risse.



**Abbildung 165:** Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der Kriterien Baumkante, Verformungen, Fäule und Insektenfraß

Der Vergleich der Ergebnisse der visuellen Sortierung mit der Zuordnung der Holzbauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der labortechnisch ermittelten

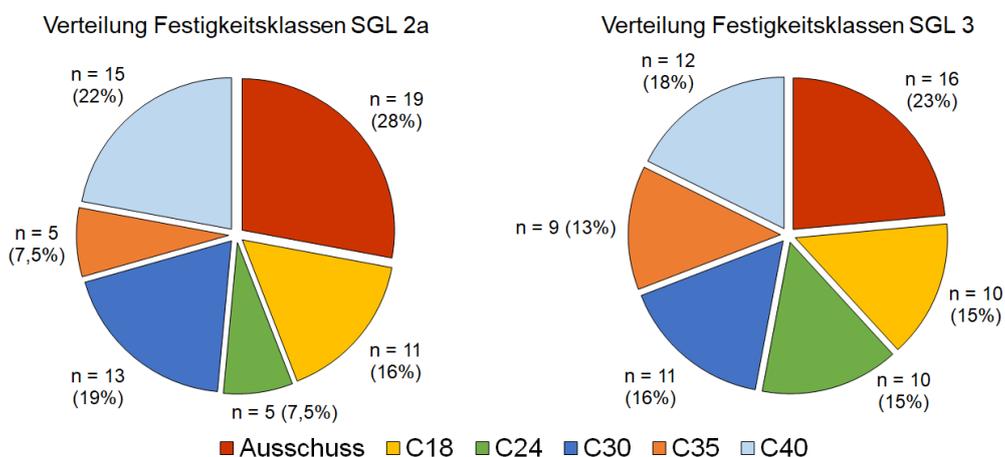
Rohdichte zeigt, dass keine signifikante Übereinstimmung zwischen den Klassenverteilungen besteht, da alle untersuchten Bauteile der Festigkeitsklasse C40 nach DIN EN 338:2016 zuzuordnen wären (s. Abbildung 166). Ebenso ist festzustellen, dass die Tragfähigkeitsreserven mit Hilfe der visuellen Sortierung nicht vollständig ausgeschöpft werden können, da die Materialqualität deutlich unterschätzt wird. Auch anhand dieser Untersuchungsergebnisse bestätigt sich, dass die visuelle Sortierung nicht ausreichend genau ist, um die Materialqualität zuverlässig abzuschätzen.



**Abbildung 166: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte**

***Festigkeitsortierung mittels Sortierparametern***

Die während der Bauwerksuntersuchung aufgenommenen Messergebnisse wurden analog der in Abschnitt 7.3.1 erläuterten Vorgehensweise zur Erprobung der Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung verwendet. Diese erfolgte in den Sortierstufe SGL 2a und SGL 3 unter Ansatz des statischen Biege-Elastizitätsmoduls als Zielgröße. Der Korrekturfaktor auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens („Einzelfall-Korrekturfaktor“ nach Abschnitt 7.2.1, Gl. 35) wurde ebenfalls berücksichtigt. Die sich hierbei ergebende Sortierausbeute ist in der nachfolgenden Abbildung 167 dargestellt.



**Abbildung 167: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung – links: Sortierstufe SGL 2a; rechts: Sortierstufe SGL 3**

Abbildung 167 zeigt, dass sich anhand der Methode zur in situ-Festigkeitssortierung tendenziell eine Verbesserung der Sortierausbeute einstellt. Der Anteil an Holzbauteilen mit sehr hoher Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse C35/C40 nach DIN EN 338) beträgt etwa ein Drittel (SGL 2a:  $p = 29,5\%$ ; SGL 3:  $p = 31\%$ ). Allein mittels der visuellen Sortierung wäre dieser nicht nachweisbar gewesen. Gleichzeitig ist jedoch auch festzustellen, dass der Anteil an Holzbauteilen mit geringer Tragfähigkeit (Festigkeitsklasse C18 nach DIN EN 338;  $p = (16/15)\%$ ) sowie der Anteil der Klasse „Ausschuss“ ( $p = (28/23)\%$ ) gegenüber der visuellen Sortierung deutlich gestiegen ist. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass die betreffenden Bauteile umfangreiche Schädigungen durch holzerstörende Insekten aufwiesen. ES ist von einer Verfälschung der Messergebnisse der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung durch die geschädigte Holzsubstanz auszugehen (vgl. Abschnitt 7.3.1, S. 220). In diesen Fällen ist eine Freilegung durch Bebeilen und erneute Beurteilung der ungeschädigten Restquerschnitte notwendig.

### Schlussfolgerungen

Auch diese praktische Erprobung der vorgeschlagenen Sortier-Methodik zeigt, dass mit deren Hilfe die Materialqualität der Holzbauteile im eingebauten Zustand zuverlässig abgeschätzt werden kann. Die festgestellten Unterschätzungen der Materialqualität lassen sich darauf zurückführen, dass die Messergebnisse durch die umfassenden Schädigungen durch holzerstörende Insekten verfälscht wurden. Eine Freilegung der ungeschädigten Restquerschnitte durch Bebeilen und erneute Beurteilung ist erforderlich. Eine Überschätzung der Materialqualität ist in dieser Fallstudie nicht festgestellt worden.

Die geringe Zuverlässigkeit einer ausschließlichen visuellen Sortierung wird ebenfalls durch den Vergleich der Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 bestätigt. Auch ohne Berücksichtigung der Querschnittsreduzierungen durch Baumkante und holzerstörende Organismen werden sämtliche Bauteile unterschätzt ( $p = 100\%$ ). Dies kann in der Praxis zu einer unrealistischen Bewertung der Konstruktion und unverhältnismäßigen, weniger substanzschonenden Eingriffen in die bestehende Bausubstanz führen.

Durch die genauere und zuverlässigere in situ-Festigkeitssortierung können erhebliche Tragfähigkeitsreserven aufgedeckt werden. Diese liegen bei  $(6 \dots 16) \text{ N/mm}^2$  bei der charakteristischen Biegefestigkeit und  $(1.000 \dots 3.000) \text{ N/mm}^2$  hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Das entspricht einer Reserve von  $\Delta f_{m,k} \approx (25 \dots 67)\%$  und  $\Delta E_{0,mean} \approx (8 \dots 27)\%$ . Des Weiteren war für acht Bauteile eine Zuordnung zu den Festigkeitsklasse C30-C40 nach DIN EN 338:2016 möglich. Diese Bauteile konnten auf Grundlage der ausschließlich visuellen Sortierung keiner Festigkeitsklasse zugeordnet. Dementsprechend wären sie als Bauholz für tragende Zwecke nicht verwendbar gewesen.

Die Ergebnisse bestätigen erneut, dass die genauere in situ-Festigkeitssortierung eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen ermöglicht. Ebenso wird auch verdeutlicht, dass eine ausschließliche und strenge visuelle Sortierung unzureichend ist. Eine umfassende visuelle Untersuchung der Bauteile ist jedoch unverzichtbar, um die vorhandenen Wuchs- und Bauteilmerkmale zuverlässig zu bewerten und organische Schädigungen einzugrenzen. Hierfür ist eine besondere Fachkunde erforderlich.

## 7.4. Zusammenfassung

Die auf Grundlage der eigenen, vergleichenden Materialversuche entwickelten Methodik zur in situ Festigkeitssortierung wurde in zusätzlichen Laboruntersuchungen an Holzbauteilen aus zwei historischen Holzkonstruktionen sowie im Rahmen von Bauzustandsuntersuchungen an drei bestehenden, historischen Holzkonstruktionen erprobt. Die Erprobung diente zum einen der Überprüfung der Übertragbarkeit der in Untersuchungen an neuen Holzbauteilen gewonnenen Ergebnisse auf Holzbauteile in bestehenden Holzkonstruktionen. Zum anderen sollte die vorgeschlagene Methodik hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit überprüft werden, um gegebenenfalls erforderliche Anpassungen vornehmen zu können.

Die Ergebnisse der durchgeführten Materialversuche haben gezeigt, dass die Methodik prinzipiell geeignet ist, um die Materialqualität von Holzbauteilen zuverlässig und mit hinreichender Genauigkeit zu bewerten. Die zusätzlichen Untersuchungen ergaben jedoch auch, dass für historische Holzkonstruktionen typische Bauteilmerkmale – insbesondere lokale Querschnittschwächungen durch Anschlüsse und Verbindungen sowie oberflächliche Beschädigungen wie Beilkerben – einen Einfluss auf das Trag- und Bruchverhalten und damit auf die messbaren Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte besitzen. Derartige Merkmale traten bei den in Kapitel 5 beschriebenen vergleichenden Materialuntersuchungen nicht auf und werden daher von der in Kapitel 6 vorgeschlagenen Methodik bei der Berechnung der Sortierparameter nicht berücksichtigt. Die Zuverlässigkeit der Sortier-Methodik wird dadurch beeinträchtigt. Dieses Defizit konnte jedoch durch die Verwendung von Korrekturfaktoren beseitigt werden. Eine genaue und zuverlässige Aussage zur Materialqualität ist dadurch möglich.

Je nach Sortierstufe wurden nur noch (5 ... 15) % der untersuchten Holzbauteile hinsichtlich ihrer Materialqualität überschätzt, was aus ingenieurmäßiger Sicht vertretbar ist. Diese Herangehensweise zeigt jedoch auch, dass zur Durchführung der in situ-Festigkeitssortierung fachkundiges Personal mit einer Expertise zum Trag- und Bruchverhalten von Holzbauteilen erforderlich ist. Die im Zuge von Bauzustandsuntersuchungen an bestehenden, historischen Holzkonstruktionen durchgeführte Erprobung in situ bestätigt die Ergebnisse der Laborversuche an Holzbauteilen aus historischen Gebäuden.

Insgesamt zeigte die labortechnische und praktische Erprobung, dass die Zuverlässigkeit der vorgeschlagenen Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung eine wesentliche Verbesserung hinsichtlich der derzeitigen Praxis ist. Derzeit erfolgt im Zuge der Bauzustands- und Tragfähigkeitsbewertung bestehender Konstruktionen nur in den seltensten Fällen eine Erfassung und Bewertung der Materialqualität. Selbst dann wird das in den bestehenden Konstruktionen verbaute Holz nur visuell sortiert. Die an Probenmaterial aus historischen Holzkonstruktionen durchgeführten Untersuchungen haben hingegen gezeigt, dass eine ausschließliche visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5 zu ungenau ist, um die Materialqualität zuverlässig abzuschätzen. Der Anteil an unterschätzten Holzbauteile betrug etwa zwei Drittel ( $p = (61 \dots 69) \%$ ). Hingegen betrug die Übereinstimmung zwischen der anhand der visuellen Sortierung abgeschätzten und durch zerstörende Versuche ermittelten Materialqualität nur  $p = (23 \dots 28) \%$ . Daraus resultieren erhebliche Tragfähigkeitsdefizite, welche in der Praxis zu einer unrealistischen Bewertung der Konstruktion und damit zu nicht fachgerechten, wenig substanzschonenden und unwirtschaftlichen Eingriffen in die bestehende Bausubstanz führen können. Dieses Defizit kann durch die Anwendung der vorgeschlagenen Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung wesentlich reduziert werden. In den vorgestellten Fallstudien ergaben sich

hierbei Reserven im Bereich von (17 ... 67) % bezogen auf die charakteristische Biegefestigkeit und (7 ... 27) % hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Die Anwendung der vorgeschlagenen Sortier-Methodik ist somit eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen.

Die im Rahmen der labortechnischen und praktischen Erprobung gewonnen Erkenntnisse wurden weiterhin genutzt, um die in Abschnitt 6.5 getroffenen Festlegungen zur Vorgehensweise bei der in situ-Festigkeitssortierung weiter zu präzisieren. Ein Vorschlag für eine diesbezügliche Richtlinie ist in der Anlage 5 zu finden. Perspektivisch ist eine Integration der vorgeschlagenen Sortier-Methodik in die aktuellen Regelwerke zur Erfassung und Bewertung bestehender, historischer (Holz-)Konstruktionen DIN CEN/TS 17440:2020 und DIN EN 17121:2019 denkbar (s. a. Abbildung 168).

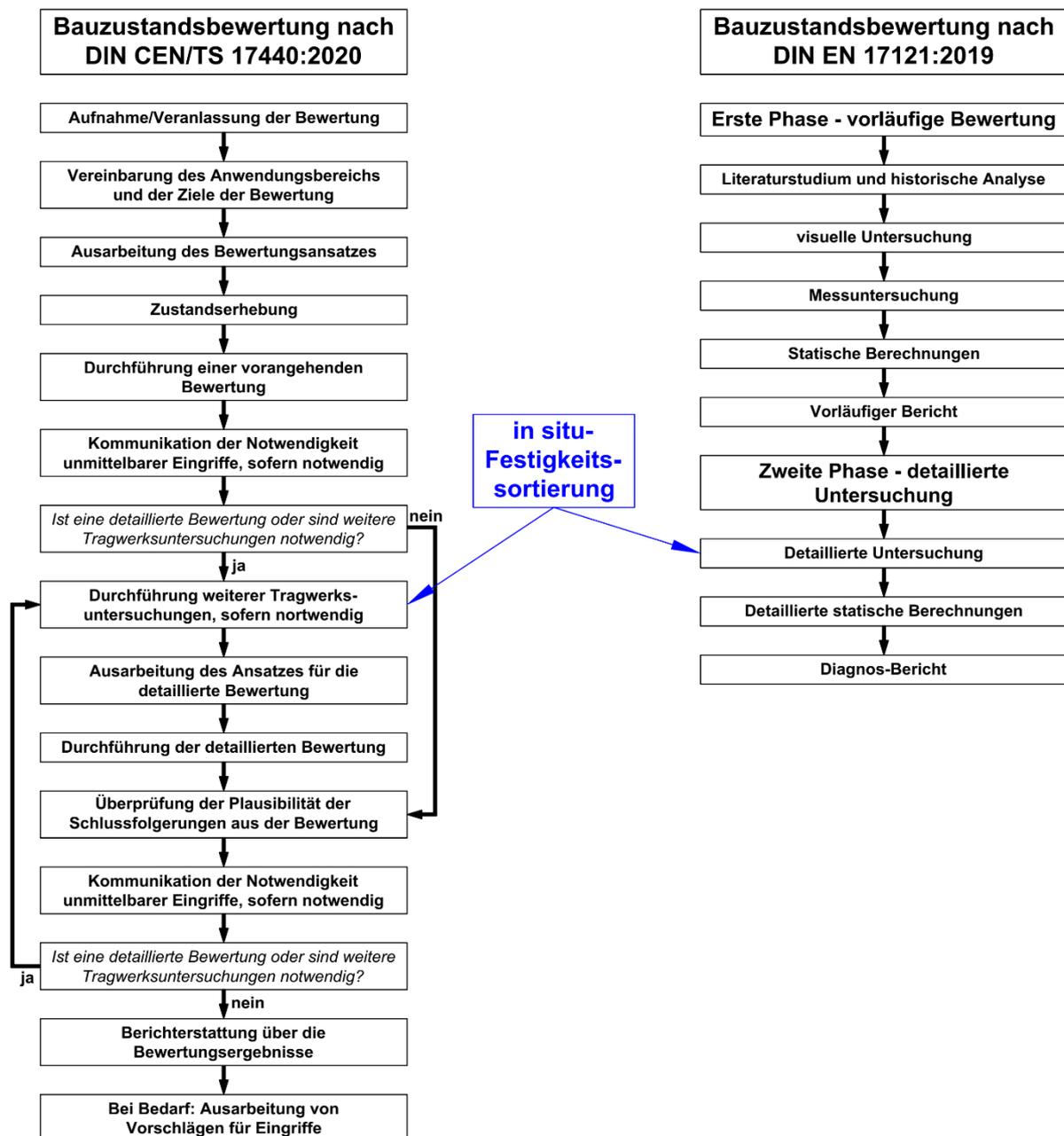


Abbildung 168: Integration der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung in die Bauzustandsbewertung nach DIN CEN/TS 17440:2020 und DIN EN 17121:2019

Die praktische Anwendung der in Anlage 5 vorgeschlagenen Richtlinie für die in situ-Festigkeitsortierung wird am Beispiel eines Sparrens (Holzart: Kiefer) aus der Dachkonstruktion des Wohnstallhauses in Fehrbellin (s. Fallstudie 5 in Abschnitt 7.3.3) dargestellt.

Im Zuge der durchgeführten Bauzustandsuntersuchungen wurde das Bauteil auf Grundlage der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1:2012 der Sortierklasse S10 zugeordnet (entspricht Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338). Ausschlaggebend hierfür war eine Faserneigung von  $FN = 10\%$ . Anhand der übrigen in situ relevanten visuell erkenn- und messbaren Wuchsmerkmale Ästigkeit ( $A = 0$ ) und Schwindrisse ( $R = 0,2$ ) wäre eine Zuordnung zur Sortierklasse S13 möglich gewesen (entspricht Festigkeitsklasse C30 nach DIN EN 338). Um die Materialqualität genauer zu bewerten, erfolgte eine in situ-Festigkeitsortierung in den Sortierstufen SGL 2a (visuelle Sortierung und indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung) und SGL 3 (visuelle Sortierung, indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Rohdichteermittlung an Bohrkernproben). Hieraus resultieren folgende Kennwerte:

- Schallausbreitungsgeschwindigkeit:  $v_{\text{mean}} = 4841 \text{ m/s}$
- übertragene elektrische Spannung:  $U_{\text{peak,mean}} = 4 \text{ mV}$
- Rohdichte der Bohrkernproben:  $\rho_{\text{BK,mean}} = 562 \text{ kg/m}^3$
- dynamischer Elastizitätsmodul:  $E_{\text{dyn}} = 13171 \text{ N/mm}^2$

Anhand der in Anlage 5 aufgeführten Gleichungen Gl. (8) und Gl. (10) ergeben sich die Sortierparameter wie nachfolgend dargestellt. Der Ansatz des Korrekturfaktors  $k_{\text{vis}}$  war in diesem Fall nicht erforderlich, da im Bereich der Lasteinleitungen keine Schwachstellen vorhanden waren und das Bauteil keiner Fehlflächen oder oberflächliche Beschädigungen aufwies.

Berechnung des Sortierparameters in der Sortierstufe SGL 2a:

$$IP_{\text{SGL2a}} = k_{\text{vis}} \cdot (a \cdot A + b \cdot FN + c \cdot R + d \cdot v_{\text{mean}} + e \cdot U_{\text{mean}} + f)$$

mit: Koeffizienten/Konstanten a...f nach Anlage 5, Tabelle 1

$$IP_{\text{SGL2a}} = (-4498,54 \cdot 0,0 + 145,37 \cdot 0,1 + 2585,26 \cdot 0,2 + 7,44 \cdot 4841 + 7,05 \cdot 4 - 24266,37)$$

$$IP_{\text{SGL2a}} = 12310,46 \text{ N/mm}^2$$

Berechnung des Sortierparameters in der Sortierstufe SGL 3:

$$IP_{\text{SGL3}} = k_{\text{vis}} \cdot (a \cdot A + b \cdot FN + c \cdot R + d \cdot E_{\text{dyn}} + e \cdot \rho_{\text{mean}} + f)$$

mit: Koeffizienten/Konstanten a...f nach Anlage 5, Tabelle 3

$$IP_{\text{SGL3}} = (-4999,29 \cdot 0,0 + 4106,75 \cdot 0,1 - 944,20 \cdot 0,2 + 1,41 \cdot 13171 - 37,55 \cdot 562 + 15954,43)$$

$$IP_{\text{SGL3}} = 13814,27 \text{ N/mm}^2$$

Mit Hilfe dieser Sortierparameter ist eine Zuordnung des Bauteils in die Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 möglich. Hierfür gelten die in Tabelle A. 10 in Anlage 4 aufgeführten Grenzwerte (s. a. Tabelle 71).

**Tabelle 71: Grenzwerte des Sortierparameters zur Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 (für Kiefernholz)**

Holzart (Messmethode)	Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Grenzwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]	
		SGL 2a	SGL 3
Kiefer (Indirekte Ultraschall- Impulslaufzeit- messung)	C18	9000	9700
	C24	11000	11700
	C30	12000	12700
	C35	13000	13700
	C40	14000	14700

Entsprechend der in Tabelle 71 aufgeführten Grenzwerte des Sortierparameters ist in der Sortierstufe SGL 2a eine Zuordnung zur Festigkeitsklasse C30 nach DIN EN 338 möglich. In der Sortierstufe SGL 3 ergibt sich darüber hinaus eine Zuordnung zur Festigkeitsklasse C35. Die hierdurch nutzbar gewordenen Tragfähigkeitsreserven

Durch die genauere und zuverlässigere in situ-Festigkeitssortierung können erhebliche Tragfähigkeitsreserven aufgedeckt werden. Diese liegen bei von (6 ... 11) N/mm<sup>2</sup> bei der charakteristischen Biegefestigkeit und (1.000 ... 2.000) N/mm<sup>2</sup> hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Das entspricht einer Erhöhung von  $\Delta f_{m,k} \approx (25 \dots 46) \%$  bezogen auf die Biegefestigkeit sowie  $\Delta E_{0,mean} \approx (9 \dots 18) \%$  bezogen auf den Biege-Elastizitätsmodul.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1. Zusammenfassung der Untersuchungen

Im Zuge der Instandhaltung und -setzung bestehender Konstruktionen sind die für die Errichtung von Neubauten geltenden Bemessungsregeln anzuwenden. Die hierfür erforderlichen Eingangsgrößen – wie bspw. die Materialqualität – werden in der Praxis meist nur abgeschätzt. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die für neues Bauholz normativ geregelte Festigkeitssortierung in bestehenden Konstruktionen nicht oder nur mit großen Einschränkungen angewendet werden könne. Zur Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen im eingebauten Zustand sind alternative Sortier-Methoden erforderlich. Hierzu liegen bis dato keine einheitlichen normativen Regelungen vor. Daher wird in der Praxis keine Festigkeitssortierung vorgenommen. Tragfähigkeitsreserven und -defizite können so nicht berücksichtigt werden. Dies kann zu unwirtschaftlichen, unverhältnismäßigen bis hin zu nicht fachgerechten Eingriffen in die bestehende Bausubstanz führen. Insbesondere im Fall von denkmalgeschützten, historischen Konstruktionen ist dies nicht vertretbar.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Hierbei sollte das in Deutschland bauaufsichtlich eingeführte normative System der Festigkeitssortierung von neuem Bauholz hinsichtlich des aktuellen europäischen Entwicklungstrends überprüft und für die Anwendung an bestehenden Konstruktionen adaptiert werden. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der kombinierten Anwendung der visuellen Sortierung und ausgewählten zerstörungsfreien und -armen Mess- und Prüfmethode. Die Untersuchungen umfassten als Schwerpunkte

- die Quantifizierung der methodenspezifischen Genauigkeit/Zuverlässigkeit und Offenlegung von potenziellen Fehlerquellen,
- die Entwicklung statistisch abgesicherter Modelle zur Auswertung von Ergebnissen aus zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode und
- die Festlegung von Rahmenbedingungen für die zuverlässige Anwendung von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode.

Die zu diesem Zweck durchgeführten Untersuchungen umfassten neben einer ausführlichen Literaturstudie zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen, zur Bauzustandsbewertung bestehender Konstruktionen und der zerstörungsfreien/-armen Prüfung von Holz auch vergleichende Materialversuche zur Anwendbarkeit ausgewählter zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode (Ultraschall-Impulslaufzeitmessung, Rohdichtermittlung mittels Eindringtiefenmessung und anhand von Bohrkernproben), die Entwicklung einer Methodik für die in situ-Festigkeitssortierung sowie deren Erprobung an bestehenden Holzkonstruktionen. Die wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen werden anhand der nachfolgenden Thesen wiedergegeben.

- 1. Die in Deutschland aktuell bauaufsichtlich eingeführten Regeln für die Bauzustandserfassung sind für eine umfassende Bewertung bestehender Holzkonstruktionen nicht geeignet.***

Der überwiegende Teil der aktuell in Deutschland verfügbaren Regeln zur Bauzustandserfassung ist baustoff- bzw. bauartunabhängig. Des Weiteren dienen sie der Erfassung des Bauzustandes im Zuge regelmäßiger Überprüfungen hinsichtlich augenscheinlicher

Beschädigungen und Verformungen. Festlegungen hinsichtlich der zu führenden Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise werden nur allgemein getroffen. Eine Aktualisierung der Eingangsgrößen (Einwirkungen, Materialqualität) wird darin nicht geregelt. Die verfügbaren holzbauspezifischen Richtlinien beschränken sich schwerpunktmäßig auf eine visuelle Erfassung und Bewertung des Bauzustandes im Allgemeinen und der Materialqualität im Besonderen. Der seit ca. 25 Jahren im deutschsprachigen Raum bestehende Stand der Technik hinsichtlich der Funktionsfähigkeitsprüfung von bestehenden Holzkonstruktionen wird darin nicht widerspiegelt. Im direkten Vergleich mit den europaweit verfügbaren Richtlinien und Regelwerken ist ein deutliches Defizit hinsichtlich der Strukturierung, Durchführung und Analyse einer Bauzustandsuntersuchung erkennbar.

**II. *Zur Abschätzung der Materialqualität von historischen Holzbauteilen in situ ist die visuelle Sortierung ist nicht ausreichend genau.***

Die umfassende Literaturstudie zeigt, dass die visuelle Sortierung klare Defizite hinsichtlich einer zuverlässigen Abschätzung der Materialqualität in situ aufweist. Im Wesentlichen sind dies die geringe Trennschärfe, die Abhängigkeit von der subjektiven Einschätzung des Sortierenden und die erforderliche vollständige Einsehbarkeit des gesamten Bauteiles. Des Weiteren gehen die Sortierregeln davon aus, dass die spätere Einbausituation zum Zeitpunkt der Sortierung nicht definiert ist. Daher werden auch Kriterien berücksichtigt, die keinen direkten Einfluss auf die Festigkeit und Steifigkeit besitzen bzw. in situ genau erfasst und im Rahmen der Planung von Instandsetzungsmaßnahmen berücksichtigt werden können (bspw. Baumkante, Verformungen, Schädigungen durch holzerstörende Organismen). Weiterhin ergaben wissenschaftliche Untersuchungen, dass die visuell erfass- und messbaren Sortierkriterien nur auf relativ geringem Niveau mit den tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten korrelieren. Die eigenen, systematischen Materialuntersuchungen bestätigen die Defizite der visuellen Sortierung. Im Ergebnis der an neuem Bauholz durchgeführten vergleichenden Materialversuche war festzustellen, dass die Übereinstimmung der mittels visueller Sortierung abgeschätzten und der in zerstörenden Bauteilversuchen ermittelten Materialqualität nur bei  $p = (6 \dots 19) \%$  liegt. Bei den labortechnischen Untersuchungen von Probenmaterial aus historischen Holzkonstruktionen lag der Anteil bei  $p = (23 \dots 28) \%$ . Der überwiegende Teil des untersuchten Probenmaterials wurde durch alleinige visuelle Sortierung hinsichtlich seiner Tragfähigkeit unterschätzt ( $p = (61 \dots 91) \%$ ). Eine Erfassung der Materialqualität von Holzbauteilen in situ ist somit durch alleinige und strenge Anwendung der visuellen Sortierung nicht zuverlässig möglich.

**III. *Die Materialeigenschaften von historischen Holzbauteilen lassen sich mit zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode zuverlässiger ermitteln.***

Ausgehend von der durchgeführten Literaturstudie und dem Stand der Normung ist davon auszugehen, dass die Anwendung zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode für die Erfassung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen zuverlässiger ist, als eine alleinige visuelle Sortierung. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten vergleichenden Materialversuche zeigten, dass die ausgewählten zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode (Ultraschall-Impulslaufzeitmessung, Eindringtiefenmessung und Bohrkernproben) grundlegend zur Ermittlung der Materialeigenschaften von historischen Holzbauteilen geeignet sind. Die Übereinstimmung zwischen der mittels Ultraschall-Impulslaufzeitmessung abgeschätzten und in zerstörenden Bauteilversuchen ermittelten Materialqualität beträgt

$p \approx (50 \dots 70) \%$ . Die Untersuchungen zur zerstörungsfreien und -armen Ermittlung der Rohdichte ergaben sogar Übereinstimmungen von  $p \approx (70 \dots 100) \%$  im Vergleich zur Klassenzuordnung anhand der in zerstörenden Bauteilversuchen ermittelten Rohdichte. Dies stellt eine wesentlichere Verbesserung gegenüber der alleinigen visuellen Sortierung dar.

**IV. Die Kombination der visuellen Sortierung mit zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode ermöglicht eine Verbesserung der Aussagegenauigkeit.**

Grundlegende Untersuchungen zur visuellen Sortierung an neuem Bauholz und zur Sortierung mit zerstörungsfreien Prüfmethode zu Beginn der 2000er Jahre zeigten bereits, dass sowohl eine ausschließlich visuelle Sortierung als auch der alleinige Einsatz zerstörungsfreier Prüfmethode zu einer geringeren Aussagezuverlässigkeit führt. Die Kombination beider Ansätze beseitigt dieses Defizit.

Die eigenen, systematischen Untersuchungen an neuem Bauholz haben gezeigt, dass bei alleiniger Anwendung zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode die Genauigkeit der Aussage über die Materialqualität zum Teil noch vergleichsweise gering ist. Gleiches gilt für eine ausschließliche visuelle Sortierung. Die durchgeführten Untersuchungen zur in situ-Festigkeitssortierung ergaben, dass dieses Defizit mit Hilfe einer auf einer multiplen Regression basierenden Methode weitestgehend beseitigt werden kann. Hierüber ist es möglich, sowohl die Ausprägung relevanter visuell mess- und erfassbarer Wuchs- und Bauteilmerkmale als auch die Ergebnisse zerstörungsfreier und -armer Prüfmethode simultan für die Sortierung zu verwenden. Die Anwendung der entwickelten Sortier-Methodik auf das untersuchte Probenmaterial aus neuem Bauholz ergab Übereinstimmungen im Bereich von  $p = (86 \dots 96) \%$ . Lediglich  $p = (4 \dots 14) \%$  wurden hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit überschätzt. In den zusätzlichen Untersuchungen an Probenmaterial aus historischen Konstruktionen betrug der Anteil der überschätzten Proben  $p = (5 \dots 15) \%$ . Dies ist aus ingenieurmäßiger Sicht vertretbar.

**V. Die Methode zur in situ-Festigkeitssortierung ermöglicht die zuverlässige Ermittlung von Tragfähigkeitsreserven und -defiziten in historischen Holzkonstruktionen.**

Sowohl die an neuem Bauholz durchgeführten Untersuchungen als auch die Fallstudien zur Erprobung der Methode zu in situ-Festigkeitssortierung zeigen, dass nur durch den kombinierten Einsatz der visuellen Sortierung und der zerstörungsfreien und -armen Prüfmethode eine zuverlässige Aussage hinsichtlich der Materialqualität möglich ist. Insbesondere aus den an altem Bauholz und den in situ durchgeführten Fallstudien wird ersichtlich, dass bei strenger Anwendung der visuellen Sortierung die Zuordnung zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1/-5 vorwiegend anhand von sekundären, nicht festigkeitsrelevanten Kriterien – wie bspw. Baumkante, Schädigungen durch holzerstörende Organismen – getroffen wird. Diese besitzen jedoch nur einen Einfluss auf die Bauteiltragfähigkeit – meist in Form einer Querschnittsschwächung – jedoch nicht auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Daher können diese Kriterien bei den Tragfähigkeitsnachweisen und der Planung von Instandsetzungsmaßnahmen gesondert berücksichtigt werden. Bleiben sie bei der Sortierentscheidung unberücksichtigt, werden die festigkeitsrelevanten Merkmale (bspw. Ästigkeit, Faserneigung) sowie die zerstörungsfrei und -arm gemessenen Materialkennwerte maßgebend. In diesen Fällen wurden überwiegend höhere Tragfähigkeiten festgestellt. In den durchgeführten Fallstudien ergaben sich hierbei Reserven im Bereich von  $(17 \dots 67) \%$  bezogen auf die charakteristische Biegefestigkeit und  $(7 \dots 27) \%$  hinsichtlich des Mittelwertes des Elastizitätsmoduls. Gleichzeitig

konnten einzelnen Bauteile – welche auf Grundlage der visuellen Sortierung nicht als Bauholz verwendbar gewesen wären – einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 zugeordnet werden. Die Anwendung der vorgeschlagenen Sortier-Methodik ist somit eine wesentliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Praxis bei der Bewertung bestehender Holzkonstruktionen.

## **8.2. Forschungsausblick**

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigten, dass mit Hilfe der vorgeschlagenen Methodik eine in situ-Festigkeitsortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen zuverlässig möglich ist. Voraussetzung hierfür ist die Beachtung der entsprechenden Rahmenbedingungen (s. dazu a. Anlage 5). Die Einhaltung dieser Bedingungen ist erforderlich, da die vorgeschlagene Methodik nach derzeitigem Stand der Entwicklung noch gewissen Einschränkungen unterliegt. Diese Anwendungsgrenzen sowie der sich daraus ableitende Forschungsbedarf wird nachfolgend näher erläutert. Es ist davon auszugehen, dass die Durchführung der angeführten weiteren Untersuchungen zu einer Verbesserung der Aussagegenauigkeit und Zuverlässigkeit der vorgeschlagenen Sortier-Methodik führt.

### ***Beanspruchung der Bauteile und Konstruktionsweise***

In den vergleichenden Materialuntersuchungen wurden nur auf Biegung beanspruchte Bauteile mit rechteckigem Querschnitt betrachtet. Die Anwendbarkeit ist daher nur auf zimmermannsmäßige Konstruktionen – wie bspw. Dachkonstruktionen, Fachwerkkonstruktionen, Holzbalkendecken – aus Vollholzbauteilen beschränkt. Um die Übertragbarkeit der Methodik auf Ingenieurholzbauwerke – wie beispielsweise zusammengesetzte Bauteil (Brett- und Bohlenbinderkonstruktionen, Brettschichtholzbauteile) oder Fachwerkbinder – zu gewährleisten, sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Diese Notwendigkeit leitet sich zum einen daraus ab, dass die Einsehbarkeit der einzelnen Holzbauteile in zusammengesetzten Querschnitten stärker eingeschränkt ist, als es bei zimmermannsmäßigen Konstruktionen der Fall ist. Hierdurch wird die Erfassung der sortierrelevanten Wuchs- und Bauteilmerkmale zusätzlich erschwert. Die eigenen, systematischen Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass ein Verzicht auf die Erfassung visuell erkenn- und messbarer Merkmale zu einer Reduzierung der Aussagegenauigkeit und Zuverlässigkeit führt. Dementsprechend ist eine Anpassung der Methodik einschließlich der Erprobung zerstörungsfreier, bildgebender Mess- und Prüfmethode (bspw. Röntgenstrahlung, Ultraschall-Echo-Verfahren) erforderlich.

Zum anderen ist für die Einzelquerschnitte in zusammengesetzten Querschnitten überwiegend deren Zugtragfähigkeit maßgeblich für die Tragfähigkeit des Bauteils (v. a. Brettschichtholz, „T“-Klassen nach DIN EN 338). Die vorgeschlagene Methodik geht von einer vorwiegenden Biegebeanspruchung aus verwendet als Zielgröße den statischen Biege-Elastizitätsmodul. Daher ist die Ableitung eines Regressionsmodells zu den Zielgrößen Zugfestigkeit und Zug-Elastizitätsmodul erforderlich. Hierzu sind umfassende, systematische Materialversuche notwendig.

### ***Verwendete Messgeräte und -methoden***

Die vorgeschlagene Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung basiert auf der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung mit dem Messgerät „Sylvatest Trio“ (Fa. CBT CBS, Lausanne/CH). Ausgehend von den Ergebnissen der durchgeführten Literaturstudie bestehen zwischen der mit

verschiedenen Messgeräten messbaren Schallausbreitungsgeschwindigkeit Differenzen. Des Weiteren kann ein Einfluss der bei der Eindringtiefmessung aufgebrachte Schlagenergie nach derzeitigem Untersuchungsstand nicht vollends ausgeschlossen werden.

Um die Verwendbarkeit anderer Messgeräte und -methoden zu überprüfen und gegebenenfalls zu ermöglichen, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dies kann zum einen durch Kalibrierung der Sortiergleichungen und deren Grenzwerte auf Grundlage weiterer, systematischer Materialversuche unter Verwendung alternativer Messgeräte erfolgen. Zum anderen besteht auch die Möglichkeit, Korrekturfaktoren für die Umrechnung der sortierrelevanten Messgrößen Schallausbreitungsgeschwindigkeit, übertragene elektrische Spannung und Eindringtiefe der Stahlstifte in vergleichenden Untersuchungen mit unterschiedlichen Messgeräten zu ermitteln.

### ***Einfluss der Messlänge auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit***

Aus den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen ist kein einheitlicher Trend hinsichtlich des Einflusses der Messlänge auf die messbare Schallausbreitungsgeschwindigkeit zu erkennen. Während in einzelnen Untersuchungen kein signifikanter Einfluss festgestellt wurde, deuteten die Ergebnisse anderer Untersuchungen auf einen möglichen Einfluss hin. Letzterer wird durch die mit der Messlänge exponentiell zunehmenden Signaldämpfung und der Streuung der Rohdichte entlang der Bauteilhauptachse begründet. Eine abschließende Klärung dieser Fragestellung ist bis dato noch nicht erfolgt. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

### ***Einfluss der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit***

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Messgrößen der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung liegen bis dato mehrere Anpassungsgleichungen vor. Dabei handelt es sich jedoch um holzartspezifische Formeln. Insbesondere für Laubhölzer liegen keine spezifischen Anpassungsgleichungen vor. Zwar kann nach derzeitigem Untersuchungsstand davon ausgegangen werden, dass diese auch näherungsweise für andere Holzarten angewendet werden können. Eine uneingeschränkte Übertragbarkeit wurde jedoch bis dato nicht nachgewiesen. Daher sind nach derzeitigem Forschungsstand weitere Untersuchungen zur Ableitung holzartspezifischer Anpassungsformeln notwendig.

---

## Quellenverzeichnis

### Normen, Zulassungen, Richtlinien

- [ASTM D 245] ASTM D 245 – Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber; American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 1927
- [CEN/TC 250, 2017] CENTC250 WG N2107 M515 WG2 T1 Second draft of TS „Assessment of Existing Structures“; CEN/TC 250/ WG 2, 2017
- [DIN 1052:1940] DIN 1052:1940 – Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1940
- [DIN 4074:1939] DIN 4074:1939 – Bauholz, Gütebedingungen; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, März 1939
- [DIN 4074-1:1958] DIN 4074-1:1958 – Bauholz für Holzbauteile – Gütebedingungen für Bauschnittholz (Nadelholz); DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1958
- [DIN 4074-2:1958] DIN 4074-2:1958 – Bauholz für Holzbauteile – Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz); DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1958
- [DIN 4074-1:1989] DIN 4074-1:1989 – Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit – Nadelschnittholz; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 1989
- [DIN 4074-3:1989] DIN 4074-3:1989 – Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit – Sortiermaschinen – Anforderungen und Prüfung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 1989
- [DIN 4074-4:1989] DIN 4074-4:1989 – Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit – Sortiermaschinen – Nachweis der Eignung zur maschinellen Schnittholzsortierung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 1989
- [DIN 4074-1:2003] DIN 4074-1:2003 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003
- [DIN 4074-3:2003] DIN 4074-3:2003 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 3: Sortiermaschinen für Schnittholz, Anforderungen und Prüfung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003
- [DIN 4074-4:2003] DIN 4074-4: 2003 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 4: Nachweis der Eignung zur maschinellen Schnittholzsortierung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003
- [DIN 4074-5:2003] DIN 4074-5:2003 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003
- [DIN 4074-1:2008] DIN 4074-1:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2008
- [DIN 4074-3:2008] DIN 4074-3:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 3: Apparate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von

- Schnittholz; Anforderungen und Prüfung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2008
- [DIN 4074-4:2008] DIN 4074-4:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 4: Nachweis der Eignung zur apparativ unterstützten Schnittholzsortierung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2008
- [DIN 4074-5:2008] DIN 4074-5:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2008
- [DIN 4074-1:2012] DIN 4074-1:2012 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2012
- [DIN 4074-2:2021] DIN 4074-2:2021 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 2: Baurundholz (Nadelholz); DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Januar 2021
- [DIN 20000-5:2016] DIN 20000-5:2016 – Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2016
- [DIN 52182:1976] DIN 52182:1976 – Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 1976
- [DIN 52185:1976] DIN 52185:1976 – Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 1976
- [DIN 52192:1979] DIN 52185:1976 – Prüfung von Holz – Druckversuch quer zur Faserrichtung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Mai 1979
- [DIN 53435:1983] DIN 53435:1983 – Prüfung von Kunststoffen – Biegeversuch und Schlagbiegeversuch an Dynstat-Probekörpern; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juli 1983
- [DIN 68364:2003] DIN 68364:2003 – Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Mai 2003
- [DIN CEN/TS 17440:2020] DIN CEN/TS 17440:2020 – Bewertung und Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2020
- [DIN EN 338:2016] DIN EN 338:2016 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juli 2016
- [DIN EN 384:2019] DIN EN 384:2019 – Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Februar 2019
- [DIN EN 408:2012] DIN EN 408:2012 – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2012
- [DIN EN 1912:2013] DIN EN 1912:2013 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2013

- [DIN EN 1990:2021] DIN EN 1990:2021 – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2021
- [DIN EN 1995-1-1:2010] DIN EN 1995-1-1:2010 – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2021
- [DIN EN 1995-1-1/NA:2013] DIN EN 1995-1-1/NA:2013 – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, August 2013
- [DIN EN 13183-1:2002] DIN EN 13183-1 – Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juli 2002
- [DIN EN 13183-2:2002] DIN EN 13183-2 – Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juli 2002
- [DIN EN 14081-1:2016] DIN EN 14081-1:2016 – Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 2016
- [DIN EN 14081-2:2006] DIN EN 14081-2:2018 – Holzbauwerke – Nach der Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, März, 2006
- [DIN EN 14081-2:2018] DIN EN 14081-2:2018 – Holzbauwerke – Nach der Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2018
- [DIN EN 14081-3:2006] DIN EN 14081-3:2018 – Holzbauwerke – Nach der Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 3: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, März 2006
- [DIN EN 14081-3:2018] DIN EN 14081-3:2018 – Holzbauwerke – Nach der Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 3: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2018
- [DIN EN 14081-4:2009] DIN EN 14081-4:2009 – Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 4: Maschinelle Sortierung – Einstellungen von Sortiermaschinen für maschinenkontrollierte Systeme; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2009
- [DIN EN 15898:2020] DIN EN 15898:2020 – Erhaltung des kulturellen Erbes – Allgemeine Begriffe DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Februar 2020
- [DIN EN 16085:2012] DIN EN 16085:2012 – Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren der Probenentnahme an Materialien des kulturellen Erbes – Allgemeine Regeln; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2012

- [DIN EN 16096:2012] DIN EN 16096:2012 – Erhaltung des kulturellen Erbes – Zustands-erhebung und Bericht für das gebaute Kulturerbe; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2012
- [DIN EN 17121:2019] DIN EN 17121:2017 – Erhaltung des kulturellen Erbes – Historische Holzkonstruktionen – Leitlinien für die Bewertung vor Ort; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2019
- [DRG, 1926] Vorläufige Bestimmungen für Holztragwerke (BH); Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft, Berlin, Dezember 1926
- [DRB, 1990] Richtlinie für die Diagnostik von hölzernen Hochbaukonstruktionen bei der Deutschen Reichsbahn – Entwurf; Deutsche Reichsbahn Generaldirektion, Berlin, September 1990; In: Recontie Ingenieurbüro Holz GmbH (Hrsg.): Studie „Schadensdiagnostik und Verfahren zur Ermittlung der Resttragfähigkeit hölzerner Baukonstruktionen, vor allem von Hallenbauten“, 1990
- [FprCEN/TS 17440:2020] FprCEN/TS 17440:2020 – Bewertung und Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Januar 2020
- [ISO 13822:2010] ISO 13822:2010 – Bases for design of structures – Assessment of existing structures; International Organization for Standardization, Genf, August 2010
- [KDT-Ri, 1985] Mitteilung Nr. 2/85 des Fachausschusses Ingenieurholzbau und des Institutes für Industriebau „Bauzustandsanalyse, Instandsetzung und Erhöhung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen“ (KDT-Richtlinie, Entwurf, September 1985)
- [M-VVTB, 2021] Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.): Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen Ausgabe 2020/1; Berlin, Januar 2021
- [ONR 24009:2013] ONR 24009:2013 – Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Hochbauten; Austrian Standards International, Wien, Mai 2013
- [ÖNORM B 4100-2:1951] ÖNORM B 4100-2:1951 – Berechnung und Ausführung der Tragwerke – Holzbau – Holztragwerke; Österreichisches Normeninstitut, Wien, März 1951
- [RI-EBW-PRÜF 2017] Ri-EBW-PRÜF 2017 – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2017
- [SIA 163:1953] SIA 163:1953 – Sortierung von Bauholz; SIA Schweizer Ingenieurs- und Architektenverein, Zürich, Dezember 1953
- [SIA 265:2012] SIA 265:2012 – Holzbau; SIA Schweizer Ingenieurs- und Architektenverein, Zürich, Januar 2012
- [SIA 269:2011] SIA 269:2011 – Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken; SIA Schweizer Ingenieurs- und Architektenverein, Zürich, Januar 2011
- [SIA 269/5:2011] SIA 269/5:2011 – Erhaltung von Tragwerken – Holzbau; SIA Schweizer Ingenieurs- und Architektenverein, Zürich, Januar 2011
- [Tegerns. Gebr., 1985] Tegernseer Gebräuche – Gebräuche im inländischen Handel mit Rundholz, Schnittholz, Holzwerkstoffen und anderen Holzhalbwaren. Fassung 1985
- [TGL 1-204 Bl. 8:1965] TGL 1-204 Blatt 8:1965 – Prüfung von Holz – Bestimmung der Biegefestigkeit und Schlagzähigkeit an kleinen Proben (Dynstatprüfung); Zentralinstitut für Holztechnologie, Dresden, 1965

- [TGL 117-0767:1963] TGL 117-0767:1963 – Bauschnittholz – Gütebedingungen; Amt für Standardisierung der DDR, Berlin, 1963
- [UNI 11119:2004] UNI 11119:2004 – Cultural Heritage – Wooden Artefacts – Load-bearing structures – On site inspection for the diagnosis of timber members; UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Mailand, Juli 2004
- [UNI 11138:2004] UNI 11138:2004 – Cultural Heritage – Wooden Artefacts – Load bearing structures of buildings – Criteria for the preliminary evaluation, design and execution of works; UNI Ente Nazionale Italiano die Unificazione, Mailand, November 2004
- [USDA C295, 1923] Department Circular 295 – Basic grading rules and working stresses for structural timbers; United States Department of Agriculture, Washington D.C., Oktober 1923
- [VDI 6200:2010] VDI 6200:2010 – VDI-Richtlinie – Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung; Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2010
- [WTA 7-2:2019] WTA-Merkblatt 7-2:2019 – Historische Holzkonstruktionen – Zustandsermittlung und Beurteilung der Tragfähigkeit geschädigter und verformter Holzkonstruktionen; WTA wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, 2019

## Veröffentlichungen, Bücher

- [Abels, 2010] Abels M.: Begutachtung einer Kirchendachkonstruktion mit der Beurteilungsmatrix für Holzkonstruktionen. In: Bausubstanz 3 (2012) Heft 4, S. 23-31
- [Anthony/et al., 2009] Anthony R. W., Dugan K. D., Anthony D. J.: A Grading Protocol for Structural Lumber and Timber in Historic Structures. In: Journal of Preservation Technology 40 (2009) Heft 2, S. 3-9
- [Arbelaez, 2019] Arbelaez R.: Exploratory Study of Salvaged Lumber as Feedstock for Cross-Laminated Timber (CLT. Masterarbeit; Oregon State University (2019) Corvallis (OR)
- [ARGEBAU, 2008] Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU): Hinweise und Beispiele zum Vorgehen beim Nachweis der Standsicherheit beim Bauen im Bestand. Fassung April 2008
- [Arriaga/et al., 2005] Arriaga F., Esteban M., Relea E.: Evaluation oft he load carriing capacity of large cross section coniferous timber in standing structures; In: Materials and Constructions Vol. 55 (2005), No. 280, S. 43-52
- [Augustin, 1998] Augustin M.: Ermittlung der Auswirkungen der neu geregelten Sortiervorschriften für Kantholzquerschnitte für österreichische Sägebetriebe und Holzbauunternehmen; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1998
- [Augustin, 2004] Augustin M.: Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz. Diplomarbeit; TU Graz, Lehrstuhl für Holzbau (2004), Graz
- [Åstrand/Åström, 2000] Åstrand E., Åström A.: The use oft he Tracheid effect for non-contact measurement of strength related properties of wood; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 2000
- [Bacher, 2008] Bacher M.: Comparison of different machine strength grading principles; In: Conference COST E53, 2008

- [Baradit/et al., 2006] Baradit E., Aedo R., Correa J.: Knots Detection in Wood using Microwaves; In: Wood Science and Technology 40 (2006), S. 118-123
- [Baron, 2009] Baron T.: Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren; Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen (2009)
- [Bartunkova, 2012] Bartunkova E.: Non-destructive test of timber; Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering (2012), Brno (CZ)
- [Beall, 2000] Beall F. C.: Subsurface Sensing of Properties and Defects in Wood and Wood Products; In: Subsurface Sensing Technologies and Applications Vol. 1, No. 2 (2000), S. 181 – 204
- [Blaß/Frese, 2002] Blaß H. J., Frese M.: Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung. Forschungsbericht; Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe (2002)
- [Blaß/Frese, 2004] Blaß H. J., Frese M.: Sortierverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung; In: Holz als Roh und Werkstoff 62 (2004), S. 325-334
- [Blaß/Görlacher, 1996] Blaß H. J., Görlacher R.: Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz; In: mikado 5 (1996), S. 64-71
- [Bogosanovic/et al., 2010] Bogosanovic M., Anbuky A. A., Emms G. W.: Overview and comparison of microwave noncontact wood measurement techniques; In: Journal of Wood Science 56 (2010), S. 357-365
- [Bonamini, 1995] Bonamini G.: Instandsetzung von Holzkonstruktionen – Bauzustandsanalyse; In: Blaß H. J., Görlacher R., Steck G. (Hrsg.): STEP 2 – Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Bauteile, Konstruktionen, Details; Fachverlag Holz (1995), S. D3/1 – D3/10
- [Bonamini/et al., 2001] Bonamini G., Noferi M., Togni M.: On-site grading of old timber; In: Wooden Handwork/Wooden Carpentry: European Restoration Sites, Elsevier (2001), S. 205-210
- [Boström, 1994] Boström L.: Machine Strength Grading – Comparison of Four Different Systems. SP Report 1994:49; Swedish National Testing and Research Institute (1994)
- [Brandstätter, 2000] Brandstätter M.: Entwicklung einer berührungslosen Festigkeitssortierung mit Röntgentechnologie; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 2000
- [Brol/et al., 2012] Brol J., Dawczynski S., Malczyk A., Adamczyk K.: Testing timber beams after 130 years of utilization; In: Journal of Heritage Conservation 32 (2012) S. 100-104
- [Bronneck, 1927] Bronneck H.: Holz im Hochbau – Ein neuzeitliches Hilfsbuch für den Entwurf, die Berechnung und Ausführung Zimmermans- und Ingenieursmässiger Holzwerke im Hochbau. Springer Verlag, Wien. 1927
- [Brühweiler, 2011] Brühweiler E.: Das neue Schweizer Normenwerk zum Umgang mit bestehenden Tragwerken; In: Stahlbau 80 (2011), Heft 6, S. 379-388
- [Bucur/Archer, 1984] Bucur V., Archer R. R.: Elastic constants for wood by an ultrasonic method; In: Wood Science and Technology 18 (1984) S. 255-265
- [Burmester, 1965] Burmester A.: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 23 (1965) Heft 6, S. 227-236

- [Burmester, 1967] Burmester A.: Änderung von Festigkeitseigenschaften des Kiefernholzes durch Alterung. In: *Materialprüfung* 9 (1967), Nr. 7, S. 267-270
- [Cavalli/et al., 2016] Cavalli A., Cibecchini D., Togni M., Sousa H. S.: A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. In: *Construction and Building Materials* 114 (2016) S. 681-687
- [Cavalli/et al., 2017] Cavalli A., Cibecchini D., Goli G., Togni M.: Shear modulus of old timber; In: *iForest – Biogeosciences and Forestry* 10 (2017) S. 446-450
- [Cavalli/Togni, 2013] Cavalli A., Togni M.: How to improve the on-site MOE assessment of old timber beams combining NDT and visual strength grading; In: *Nondestructive Testing and Evaluation* 28 (2013), Heft 3, S. 252-262
- [Ceccotti/Togni, 1996] Ceccotti A., Togni M.: NDT on ancient timber beams: Assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods; In: *10<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (1996) Lausanne (CH)
- [Cooper/et al., 1996] Cooper P., Ung T., Aucoin J.-P., Timusk C.: The Potential for re-use of preservative-treated utility poles removed from service. In: *Waste Management & Research* 14 (1996) S. 263-279
- [Cown, 1978] Cown D. J.: Comparison of Pilodyn and Torsiometer methods for the rapid assessment of wood density in living trees; In: *New Zealand Journal of Forestry Sciences* 8 (1978) Heft 3, S. 384-391
- [Cruz/et al., 2013] Cruz H., Yeomans D., Tsakanika E., Macchioni N., Jorissen A., Touza M., Mannucci M., Lorenço P. B.: Guidelines for the On-Site Assessment of historic Timber Structures; In: *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis and Restoration* Vol. 9 (2015), Heft 3, S. 277-289
- [Dehio, 1906] Dehio G.: *Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler – Band 2 – Nordostdeutschland*; Wasmuth-Verlag, Berlin (1906)
- [Denkmalpflege BW, 2011] Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): *UNESCO-Welterbe Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen in Baden-Württemberg und Bayern*. 2011
- [Denzler, 2007] Denzler J. K.: Machine strength grading – an overview over existing machines; In: *COST E53, WG 3 Meeting*, 2007
- [Denzler/et al., 2005] Denzler J. K., Diebold R., Glos P.: Machine Strength grading – commercially used grading machines – current developments; In: *14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Eberswalde, Germany, 2005, S. 11-16
- [Denzler/Glos, 2009] Denzler J., Glos P.: Maschinelle Festigkeitssortierung von Schnittholz; In: *Zukunft Holz – Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotential* (2009), S. 355-359
- [Denzler/Weidenhiller, 2015] Denzler J., Weidenhiller A.: Microwave scanning as an additional grading principle for sawn timber; In: *European Journal of Wood Products* 73 (2015), S. 423-431
- [Deppe/Rühl, 1993] Deppe H.-J., Rühl H.: Zur Beurteilung alter Bauhölzer – 1. Rohdichte und Druckfestigkeit. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 51 (1993) S. 379-383
- [Descamps/et al., 2005] Descamps T., Van Parys L., Datoussaïd S.: Non destructive tests for wood properties determination; In: *14th International*

- Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Eberswalde, Germany, 2005, S. 351-358
- [DGfH, 1993] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Möglichkeiten und Grenzen der Holzsortierung mittels Ultraschall; In: Bau-technik 70 (1993), Heft 11, S. 700-701
- [DGfH, 1997] Fachtagung des Arbeitsausschusses 13 „Erhaltung alter Bausubstanz“ der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München, 1997
- [Diebold, 1997] Diebold R.: Möglichkeiten der maschinellen Sortierung mit dem Euro-GreComat; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1997, S. B/1-1 – B/1-19
- [Dietsch/Köhler, 2010] Dietsch P. (Ed.), Köhler J. (Ed.): Assessment of Timber Structures; Shaker Verlag GmbH, 2010
- [Dill-Langer/et al., 2006] Dill-Langer G., Aicher S., Bernauer W.: Reflection measurements at timber glue-lines by means of ultrasound shear waves; In: Otto Graf Journal 16 (2005) S. 273-283
- [Divos/et al., 2000] Divos F., Daniel I., Bejo L.: Defect Detection in Timber by Stress Wave Time and Amplitude; In: 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (2000), Sopron, HU
- [Döring/Mantau, 2018] Döring P., Mantau U.: Rohstoffmonitoring Holz – Altholz im Entsorgungsmarkt – Herkunft und Aufbereitung 2016 – Teilbericht. Informationssysteme für Rohstoffe, Celle (2018)
- [Ebner, 2018] Ebner F.: Festigkeitsuntersuchung an verbauten Konstruktionshölzern. Masterarbeit; Otto-Friedrich-Universität Bamberg (2018)
- [Eckstein/Saß, 1994] Eckstein D., Saß U.: Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation; In: Holz als Roh- und Werkstoff 52 (1994) S. 279-286
- [Ehlbeck/Görlacher, 1987] Ehlbeck J., Görlacher R.: Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an altem Konstruktionsholz; In: Schmidt H. (Hrsg.): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke – Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1987, Sonderdruck (1987) S. 235-247
- [Ehlbeck/Görlacher, 1990] Ehlbeck J., Görlacher R.: Zur Problematik bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. In: bauen mit holz 2 (1990), S. 117-121
- [Ehlbeck/Görlacher, 1993] Ehlbeck J., Görlacher R.: Probleme bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. In: Schmidt H. (Hrsg.): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke – Sonderforschungsbereich 315, Sonderband „Erhaltungskonzepte“ (1993) S. 201-208
- [Elburg, 2013] Elburg R.: Älteste erhaltene Holzkonstruktionen; In: Antike Welt: Zeitschrift für Archäologie und Kulturgeschichte (2013)
- [Erhardt/et al., 1996] Erhardt D., Mecklenburg M. F., Tumosa C. S., Olstad T. M.: New versus Old Wood: Differences and Similarities in Physical, Mechanical and Chemical Properties. In: Proceedings 250th 11th Triennial Meeting of the ICOM Committee for Conservation, Edinburgh, Scotland, 1st-6th September 1996, Volume II, S. 903-910
- [Erler, 1993] Erler K.: Alte Holzbauwerke – Beurteilen und Sanieren. 1. Auflage. Verlag für Bauwesen Berlin-München, 1993
- [Erler/et al., 1988] Erler K., Knospe D., Lambrecht: Untersuchungen zu Festigkeiten und Anpassungsfaktoren alter Holzkonstruktionen.

- Forschungsbericht G2; Technische Hochschule Wismar, Sektion Technologie des Bauwesens (1988), Wismar
- [Erler/Knospe, 1989] Erler K., Knospe D.: Untersuchungen zu Festigkeiten und Anpassungsfaktoren alter Holzkonstruktionen. Forschungsbericht G4; Technische Hochschule Wismar, Sektion Technologie des Bauwesens (1989), Wismar
- [Erler/Müller, 1984] Erler K., Müller K.: Grundlagen zur Rekonstruktion von Holzkonstruktionen. Forschungsbericht A 3 für die Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau; Ingenieurhochschule Wismar, Sektion Technologie des Bauwesens, 1984
- [Erler/Pohlmann, 1985] Erler K., Pohlmann W.: Untersuchungen mit der Rammsonde nach Petermann an Kanthölzern aus Fichte und Kiefer; In: Bauzeitung 39 (19859 Heft 12, S. 567-569
- [Faggiano/et al., 2013] Faggiano B., Grippa M. R., Calderoni B.: Non-destructive tests and bending tests on chestnut structural timber; In: Advanced Materials Research 778 (2013) S. 167-174
- [Falk/et al.,1999] Falk R. H., Green D., Lantz S. C.: Evaluation of lumber recycled from an industrial military building. In: Forest Products Journal 49 (1999) Heft 5, S. 49-55
- [Falk/et al., 2000] Falk R. H., Green D., Rammer D., Lantz S. F.: Engineering evaluation of 55-Year-old timber columns recycled from an industrial military building. In: Forest Products Journal 50 (2000) Heft 4, S. 71-76
- [Falk/et al., 2008] Falk R. H., Maul D. G., Cramer S. M., Evans J. Herian V.: Engineering Properties of Douglas-Fir Lumber reclaimed from deconstructed buildings. Forschungsbericht FPL-RP-650. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (2008)
- [Feio, 2005] Feio A.: Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structura Behaviour; Universidado de Minho (2005)
- [Feio/Machado, 2015] Feio A., Machado J. S.: Combined information from visual and NDT/SDT methods; In: Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State 251ort h Art Report – Combined use of NDT/SDT methods 251ort he assessment of structural timber members; Université de Mons (2015), S. 137-144
- [Fernandez-Golfin/et al., 2003] Fernandez-Golfin J. I., Diez M. R., Hermoso E.: Relationships between grade determining properties of spanish scots and laricio pine structural timber; In: Materials and Constructions 53 (2003), No. 270, S. 45-55
- [Fritz, 2017] Fritz J.: Vergleichende Untersuchungen zur zerstörungsfreien/-armen Ermittlung der Materialeigenschaften von verbautem Holz. Bachelorarbeit; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2017)
- [Fritz/et al., 2018] Fritz J., Linke G., Rug W.: Untersuchung zur Anwendbarkeit der Eindringtiefmessung für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Holzkonstruktionen; In: Holzbau im Bestand, Band 2 – Substanzschonende Erhaltung von historischen Holztragwerken. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2018)
- [Fritz, 2019-1] Fritz J.: Weiterentwicklung der verfügbaren Prüfgeräte für die Eindringtiefmessung an Holzbauteilen. Forschungsprojekt; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2019)

- [Fritz, 2019-2] Fritz J.: Bestimmung der Rohdichte mittels zerstörungsfreien/-armen Prüfmethode. Forschungsprojekt; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2019)
- [Fritz, 2020] Fritz J.: Instandsetzung historischer Dachkonstruktionen am Beispiel der Dachkonstruktion des nördlichen Anbaus der St. Nikolaikirche Jüterbog, Brandenburg. Masterarbeit; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2021)
- [Frühwald/Hasenstab, 2010] Frühwald K., Hasenstab A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Laubholz in Holzbauprodukten und im eingebauten Zustand; In Fachtagung Bauwerksdiagnose (2010), Berlin
- [Gaber, 1936] Gaber E.: Der Einfluss von Fehlern auf die Holzfestigkeit nach Versuchen und Rechnung; In: Die Bautechnik 14 (1936) Heft 6, S. 64 – 68
- [Gaber, 1937] Gaber E.: Der Verlust an Tragkraft hölzerner Balken bei gleichzeitigem Vorhandensein mehrerer Holzfehler; In: Die Bautechnik 15 (1937) Heft 35, S. 455-459
- [Gehri, 1995] Gehri E.: Sortierung mittels Ultraschallverfahren; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1995, S. C/1-1 – C/1-9
- [Gehri, 1998] Gehri E.: Die Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1998
- [Glos, 1995] Glos P.: Holz im technischen Einsatz, Perspektiven der Sortierung und Qualitätssicherung; In: Internationales Holzbauforum, Garmisch-Partenkirchen, 1995
- [Glos, 2000] Glos P.: Stand der Entwicklung der Sortiernorm DIN 4074 unter Berücksichtigung maschineller Sortierverfahren; In: Grazer Holzbau Fachtagung 2000
- [Glos/Gamm, 1987] Glos P., Gamm A.: Untersuchung zur Festigkeit von Fichten-Bauholz nach Schädlingsbefall infolge Waldschäden (Bericht Nr. 85502); Institut für Holzforschung der Technischen Universität München (1987)
- [Glos/Lederer, 2000] Glos P., Lederer B.: Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte (Bericht Nr. 98508); Institut für Holzforschung der Technischen Universität München (2000)
- [Glos/Schulz, 1980] Glos P., Schulz H.: Stand und Aussichten der maschinellen Schnittholzsortierung; In: Holz als Roh- und Werkstoff 38 (1980), S. 409-417
- [Glos/Torno, 2009] Glos P., Torno S.: Sortierhilfen und Erläuterungen zur Anwendung der DIN 4074 in der Praxis. Bericht Nr. 09509. 2. Überarbeitete Auflage; Institut für Holzforschung der Technischen Universität München (2009)
- [Görlacher, 1984] Görlacher R.: Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), S. 219-222
- [Görlacher, 1987] Görlacher R.: Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: ein „in situ“-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte; In: Holz als Roh- und Werkstoff 45 (1987) S. 273-278
- [Görlacher, 1990] Görlacher R.: Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Ausziehweidstandsmessung; In: bauen mit holz 12 (1990) S. 904-908

- [Görlacher, 1992] Görlacher R.: Unter die Lupe genommen: Alte Holzkonstruktionen – Bauzustandsanalyse für historische Holzkonstruktionen. In: Bauzeitung 46 (1992), S. 650-652
- [Görlacher, 1992-2] Görlacher R.: Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Bestimmung des Elastizitätsmoduls; In: Holzbau-Statik-Aktuell Ausgabe Juli 1992/2, S. 15-20
- [Görlacher, 1997] Görlacher R.: Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Grademaster 403; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1997, S. B/2-2 – B/2-10
- [Görlacher, o.D.] Görlacher R.: Methoden der zerstörungsfreien Prüfung von altem Konstruktionsholz. Undatiert/Ohne Verlag, o.ä.
- [Görlacher/Hättich, 1990] Görlacher R., Hättich R.: Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrwiderstandsmessung; In: bauen mit holz 6 (1990) S. 455-459
- [Görlacher/Kromer, 1992] Görlacher R., Kromer M.: Untersuchung alter Holzkonstruktionen: Ermittlung von Spannungen in einem Bauteil; In: bauen mit holz 11 (1992) S. 912-919
- [Graf, 1935] Graf O.: Warum brauchen wir Güteklassen für deutsches Holz?; In die Bautechnik 13 (1935) Heft 14, S. 187- 191
- [Graf, 1938] Graf O.: Tragfähigkeit der Bauhölzer und der Holzverbindungen – Grundlagen für die Beurteilung der Hölzer nach Güteklassen. Zulässige Beanspruchungen; In: Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Heft 20 (1938), Berlin
- [Graf, 1939] Graf O.: Über den Einfluß der Baumkante auf die Tragfähigkeit der Bauhölzer; In: Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Heft 23 (1939), Berlin
- [Graf, 1940] Graf O.: Aus neueren Versuchen mit Bauholz; In: Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Heft 26 (1940), Berlin
- [Graf, 1941] Graf O.: Aus Versuchen mit Bauholz und mit hölzernen Bauteilen; In: Holz als Roh- und Werkstoff 4 (1941), Heft 10, S. 347-359
- [Graf, 1944-1] Graf O.: Erläuterungen zu DIN 4074 – Gütebedingungen für Bauholz; Merkhefte des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Merkheft 2 (1944), 2. Auflage, Berlin
- [Graf, 1944-2] Graf O.: Gütevorschriften für Bauholz; In: Silvae Orbis No. 15 (1944), S. 41-59
- [Green/et al., 2001] Green D. W., Falk R. H., Lantz F. S.: Effect of heart checks on flexural properties of reclaimed 6-by-8 Douglas-Fir timbers. In: Forest Products Journal 51 (2001) Heft 7/8, S. 82-88
- [Grippa, 2009] Grippa M. R.: Structural identification of ancient timber constructions by non-destructive techniques; Dissertation, Universität Neapel Federico II (2009)
- [Hanhijärvi/et al., 2005] Hanhijärvi A., Ranta-Maunus A., Turk G.: Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade-Project – phase 1; VTT Publications (2005), Espoo (FIN)
- [Hanhijärvi/Ranta-Maunus, 2008] Hanhijärvi A., Ranta-Maunus A.: Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the

- Combigrade-Project – phase 2; VTT Publications (2008), Espoo (FIN)
- [Hasenstab, 2006] Hasenstab A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation; Technische Universität Berlin (2006)
- [Heinke, 2015] Heinke M.: Einfluss von Fehlstellen durch Verbindungsmittel auf die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung von Bauholz. Bachelorarbeit; Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde, Fachbereich Holztechnik (2015)
- [Henriques/et al., 2011] Henriques D. F., Nunes L., Machado J. S., de Brito J.: Timber in Buildings: Estimation of some Properties using Pilodyn® and Resistograph®; In: Proceedings International Conference on Durability of Building Materials and Components, 12.-15. April 2011, Porto (PT)
- [Iniguez/et al., 2010] Iniguez G., Arriaga F., Esteban M., Bobadilla I., Gonzalez C., Maritnez R.: In situ non-destructive density estimation 254ort he assessment of existing timber structures; In: WCTE World Conference on Timber Engineering 2010, Trentino (IT)
- [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-1] Iniguez-Gonzalez G., Monton J., Arriaga F., Segues E.: In-Situ Assessment of Structural Timber Density Using Non-Destructive and Semi-Destructive Testing; In: BioResources 10 (2015) Heft 2, S. 2256-2265
- [Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-2] Iniguez-Gonzalez G., Arriaga F., Esteban M., Llana D. F.: Standardization of nondestructive methods in the assessment of existing timber structures; In: Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State of the Art Report – Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members; Université de Mons (2015), S. 15-21
- [Jackson, 1920] Jackson A.: Über die Größe der zulässigen Beanspruchungen des Holzes im Ingenieurbau, vor allem für freitragende Holzkonstruktionen; In: Der Holzbau Nr. 3 & 4 (1920), S. 9-13
- [James/et al. ,1985] James W. L., Yen Y.-H., King R. J.: A Microwave method for measuring moisture content, density and grain angle of wood. Research Note FPL-0250; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (1985), Madison, WI
- [JRC, 2015] Dimova S., Pinto A., Luechinger P., Denton S. (Hrsg.): JRC Science and Policy Report – New European Technical Rules 254ft he254 Assessment and Retrofitting of Existing Structures – Policy Framework, Existing Regulations ans Standards, Prospect for CEN Guidance; European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2015
- [Karsulovic/et al., 2000] Karsulovic J. T., Leon L. A., Gaete L.: Ultrasonic Detection of Knots and Annual Ring Orientation in Pinus Radiata Lumber; In: Wood and Fiber Science 32 (2000), Vol. 3, S. 278-286
- [Kasal, 2003] Kasal B.: Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members; In: Forest Product Journal 53 (2003) Heft 11/12, S. 55-58
- [Kasal/Anthony, 2004] Kasal B., Anthony R. W.: advances in in situ evaluation of timber structures; In: Progress in structural engineering and materials (2004) Heft 6, S. 94-103
- [Kasal/Tannert, 2010] Kasal B., Tannert T. (Hrsg.): RILEM State-of-the-Art-Report In Situ Assessment of Structural Timber. Springer Verlag, Berlin, 2010

- [Kessel, 1990] Kessel M. H.: Festigkeitsuntersuchung von Eichenbalken; In: Bauen mit Holz (1990), Heft 3, S. 174-180
- [Kessel/et al., 1997] Kessel M. H., Huse M., Marutzky R., Plinke B.: Festigkeitssortierung von Kantholz mit Ultraschall, Anforderungen an Geräte und Personal, Vorbereitung zur Zulassung nach DIN 4074/prEN 519 – Schlussbericht zum Projekt S-342 der Stiftung Industrieforschung; Fachhochschule Hildesheim, Labor für Holztechnik & WKI Wilhelm Klauditz Institut Fraunhofer Institut für Holzforschung, Braunschweig, 1997
- [Kessel/et al., 1998] Kessel M. H., Plinke B., Augustin R., Huse M.: Strength grading of construction timber with large cross sections; In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Montreux/Schweiz (1998), S. 557-562
- [Kessel/Sandoz, 1989] Kessel M. H., Sandoz J. L.: Zur Effizienz der Festigkeitssortierung von Fichtenkantholz – Einfluss der Klassengrenzen der Sortierparameter; In: Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989), S. 323-327
- [Kloiber/Drdacky, 2015] Kloiber M., Drdacky M.: Prediction of mechanical properties by means of semi-destructive methods; In: Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State of the Art Report – Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members; Université de Mons (2015), S. 69-91
- [Kolb/Gruber, 1981] Kolb H., Gruber R.: Radiometrisches Verfahren für die Holzsortierung – Teil 2: Grundlagen für die Anwendung; In: Holz als Roh- und Werkstoff 39 (1981), S. 367-77
- [Kollmann, 1982] Kollmann F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band – Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag, Berlin. 1982
- [Kollmann/Krech, 1960] Kollmann F., Krech H.: Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung – Ein Beitrag zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung; In: Holz als Roh- und Werkstoff 18 (1960) Heft 2, S. 40-54
- [Kranitz, 2014] Kranitz K.: Effect of natural aging on wood. Dissertation; Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich (2014, Zürich (CH))
- [Kranitz/et al., 2010] Kranitz K., Deublin M., Niemz P.: Strength estimation of aged wood by means of ultrasonic devices; In: The Future of Quality Control for Wood & Wood Products, The Final Conference of COST Action E53 (2010); Edinburgh
- [Kranitz/et al., 2014] Kranitz K., Deublein M., Niemz P.: Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. In: Materials and Structures 47 (2014) S. 925-936
- [Kranitz/et al., 2016] Kranitz K., Sonderegger W., Bues C.-T., Niemz P.: Effects of aging on wood: a literature review. In: Wood Science and Technology 50 (2016) S. 7-22
- [Kranitz/Niemz, 2010] Kranitz K., Niemz P.: Untersuchungen zu Eigenschaften von gealtertem Holz; In: Forschungskolloquium Holzbau Forschung + Praxis (2010), Stuttgart
- [Krohn, Palm, 1981] Krohn H., Palm K.: Radiometrisches Verfahren für die maschinelle Holzsortierung – Teil 1: Entwicklung und Beschreibung des Verfahrens; In: Holz als Roh- und Werkstoff 39 (1981), S. 207-210
- [Kruglowa, 2012] Kruglowa T.: In-situ assessment of density and material properties in timber structures by non-destructive and semi-destructive testing; Chalmers University of Technology, Department of Civil

- and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Timber Structures (2012)
- [Krzosek/Bacher, 2011] Krzosek S., Bacher M.: Aktueller Stand der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz in Polen und in Europa; In: Annals of Warsaw University of Life Science, Forestry and Wood Technology No. 74 (2011), S. 254-259
- [Kufner, 1977] Kufner M.: Maschinelle Schnittholzsortierung und ihr möglicher Einfluß auf die Holzverwendung; In: Holz als Roh- und Werkstoff 35 (1977), S. 173-178
- [Kuipers, 1986] Kuipers J.: Effect of age and /or load on timber strength. In: Proceedings of 19th CIB-W18 Meeting, Florenz (1986) Paper 19-6-1
- [Lang, 2004] Lang A.: Charakterisierung des Altholzaufkommens in Deutschland; Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg (2004)
- [Lear, 2005] Lear G. C.: Improving the Assessment of In Situ Timber Members with the Use of Nondestructive testing techniques; North Carolina State University, Faculty of Civil Engineering (2005)
- [Lechner/Kliger, 2015] Lechner T., Kliger R.: Practical procedure for estimating the density of timber with portable X-ray equipment; In: Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State of the Art Report – Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members; Université de Mons (2015), S. 93-106
- [Linke/et al., 2019] Linke G., Rug W., Pasternak H.: Strength grading of structural timber in existing structures with the ultrasonic time-of-flight measurement; In: SHATIS 2019 5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Guimaraes/Portugal (2019)
- [Linke/et al., 2021] Linke G., Rug W., Pasternak H.: Strength grading of structural timber in existing structures – Study on the apparatus supported grading with the ultrasonic time-of-flight measurement; In: PROHITEC 2020 4th International Conference on Protection of Historical Constructions, Athen, Griechenland (2021)
- [Linke/Mühlisch, 2018] Linke G., Mühlisch S.: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand – Vergleichende Materialuntersuchungen an Neuholz – Holzart: Fichte. Versuchsbericht; Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik UG, Eberswalde (2018)
- [Linke/Mühlisch, 2019-1] Linke G., Mühlisch S.: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand – Vergleichende Materialuntersuchungen an Neuholz – Holzart: Kiefer. Versuchsbericht; Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik UG, Eberswalde (2019)
- [Linke/Mühlisch, 2019-2] Linke G., Mühlisch S.: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand – Vergleichende Materialuntersuchungen an Neuholz – Holzart: Eiche. Versuchsbericht; Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik UG, Eberswalde (2019)
- [Linke/Rug, 2018] Linke G., Rug W.: Untersuchungen zur Tragfähigkeit einer historischen Brettschichtholz-Konstruktion; In: Rug W. (Hrsg.): Holzbau im Bestand – Historische Holztragwerke – Beispiele für substanzschonende Erhaltung; Beuth Verlag GmbH Berlin – Wien – Zürich, 2018, S. 258-290
- [Lißner/Rug, 2000] Lißner K., Rug W.: Fachwerkbau – Baurechtliche bzw. Bautechnische Kriterien und Grenzen der Sanierung von

- denkmalgeschützten Fachwerkbauten; In: Holzbau 2000 – 16. Holzbauseminar, Quedlinburg (2000)
- [Lißner/Rug, 2015] Lißner K., Rug W.: Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitte der DIN 1052:August 2004 (aktualisierte Fassung aus dem Jahre 2004 unter Berücksichtigung der Einführung der Eurocodes); Dresden/Berlin, 2015
- [Lißner/Rug, 2018] Lißner K., Rug W.: Holzbausanierung beim Bauen im Bestand. 2. Auflage; VDI Springer Verlag, Berlin, 2018
- [Llana/et al., 2013] Llana D. F., Iniguez-Gonzalez G., Arriaga F., Niemz P.: Influence of Temperature and Moisture Content in Non-destructive values of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.); In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium (2013) Madison (USA)
- [Llana/et al., 2015] Llana D. F., Hermoso E., Izquierdo S. T., Bobadilla I., Iniguez-Gonzalez G.: The effect of moisture content on nondestructive probing measurements; In: 19th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood, Rio de Janeiro, Brasilien (2015), S. 187-191
- [Llana/et al., 2016] Llana D. F., Iniguez-Gonzalez G., Arriaga F., Wang X.: Time-of-Flight Adjustment Procedure for Acoustic Measurements in Structural Timber; In: BioResources 11 (2016) Heft 2, S. 3303-3317
- [Llana/et al., 2020] Llana D. F., Iniguez-Gonzalez G., Diez M. R., Arriaga F.: Non-destructive testing used on timber in Spain: a literature review; In: Maderas. Ciencia y tecnología. 22 (2020) Heft 2, S. 133-156
- [Loebjinski, 2021] Loebjinski M.: Bewertung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen beim Bauen im Bestand – Ein Beitrag zur substanzschonenden Erhaltung von bestehenden Gebäuden. Dissertation; Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fakultät 6 Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau (2021)
- [Loebjinski/et al., 2017] Loebjinski M., Rug W., Pasternak H.: Zuverlässigkeitsbewertung von Holzbauteilen im Bestand. In: Bauingenieur, Band 92 (2017), S. 65-73
- [Loebjinski/et al., 2018-1] Loebjinski M., Rug W., Pasternak H.: Variantenuntersuchung zur Bewertung der Zuverlässigkeit von typischen Deckenkonstruktionen beim Holzbau im Bestand. In: Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung + Praxis, Stuttgart 2018
- [Loebjinski/et al., 2018-2] Loebjinski M., Köhler J., Rug W., Pasternak H.: Development of an optimisation-based and practice orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures. In: International Association for Life Cycle Civil Engineering, Ghent (2018)
- [Loebjinski/et al., 2019] Loebjinski M., Linke G., Rug W., Pasternak H.: Redevelopment of a wooden roof construction under preservation order; In: SHATIS 2019 5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Guimaraes/Portugal (2019)
- [Löwenmark, 2009] Löwenmark S.: On-site assessment of timber structures; Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Timber Structures (2009)
- [Lundgren/et al., 2006] Lundgren N., Hagmann O., Johansson J.: Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave

- scanning of sawn timber II: evaluation of models generated on a pixel level; In: Journal of Wood Science 52 (2006), S. 39-43
- [Lübken/et al., 2021] Lübken V., Linke G., Pfriem A., Weiß M., Rug W.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von historischen Brett-schichtholzbauteilen; In: Bauingenieur (in Vorbereitung)
- [Machado, 2013] Machado J. S.: In situ Evaluation of the Reference Properties of Structural Timber Members. Use of Available Tools and Information; In: Advanced Materials Research Vol. 778 (2013), S. 137-144
- [Machado, 2015] Machado J. S.: Reliability of prediction by combining direct and indirect measurements; In: Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State of the Art Report – Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members; Université de Mons (2015), S. 1-13
- [Machado/et al., 2011] Machado J. S., Lourenco P. B., Palma P.: Assessment of structural properties of timber members in situ – a probabilistic approach; In: Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures SHATIS (2011), Lisbon (PT)
- [Machado/et al., 2015] Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State of the Art Report – Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members. Université de Mons (2015)
- [Mannes, 2009] Mannes D. C.: Non-destructive testing of wood by means of Neutron Imaging in comparison with similar methods; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2009)
- [Meierhofer, 1988] Meierhofer U.: Schraubenauszugfestigkeit und Tragfähigkeit von Fichten- und Tannenholz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 46 (1988), S. 15-17
- [Meierhofer/Richter, 1988] Meierhofer U., Richter K.: Sortierung und Qualität von Bauholz – Teil 1: Holzeigenschaften und Sortierung; In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1988) Heft 27/28, S. 810-815
- [Meierhofer/Richter, 1989-1] Meierhofer U., Richter K.: Sortierung und Qualität von Bauholz – Teil II: Die Erfassung der Holzcharakteristika in Forschung und Entwicklung; In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1989) Heft 7, S. 173-179
- [Meisel/et al., 2013] Meisel A., Silly G., Moosbrugger T., Ferk H. J., Schickhofer G.: Historische Dachtragwerke im Raum Graz – Methodik zur Zustandsbeurteilung; In: Bautechnik 90 (2013), Heft 10, S. 660-673
- [Montero/et al., 2015] Montero M. J., de la Mata J., Esteban M., Hermoso E.: Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section for structural use of scots pine from Spain; In: Maderas. Ciencia y tecnología 17 (2015) Heft 2, S. 407-420
- [Mosoarca/Keller, 2018] Mosoarca M., Keller A. I.: A complex assessment methodology and procedure for historic roof structures. In: International Journal of Architectural Heritage 12 (2018), Heft 4, S. 578-598
- [Mühlisch, 2019] Mühlisch S.: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand – Vergleichende Materialuntersuchung von Bauholz – Festigkeitssortierung von Fichten-, Kiefern- und Eichenholz. Forschungsprojekt; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2019)

- [Mühlisch, 2021] Mühlisch S.: Erprobung einer apparativen unterstützten Sortiermethode für die in-situ Festigkeitssortierung von altem Bauholz. Masterarbeit; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2021)
- [Nakielski, 2012] Nakielski B.: Festigkeitsuntersuchungen an Holz mittels Ultraschall. Diplomarbeit; Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde, Fachbereich Holztechnik (2012)
- [Neuenschwander/et al., 1997] Neuenschwander J., Niemz P., Kucera L. J.: orientierende Untersuchungen zur Anwendung der bildgebenden Ultraschallprüfung zur Fehlererkennung in Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 55 (1997) S. 339-340
- [Niemz/et al., 1997] Niemz P., Zürcher E., Kucera L. J., Bernatowicz G.: Prüfung von vor 160 Jahren unter Wasser verbautem Holz; In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1997) Nr. 48, S. 991-995
- [Niemz/et al., 1999-1] Niemz P., Kucera L. J., Schob M., Scheffler M.: Experimentelle Untersuchungen zur Erkennung von Defekten in Holz mittels Ultraschall; In: Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999), S. 96-102
- [Niemz/et al., 1999-2] Niemz P., Kucera L. J., Bernatowicz G.: Untersuchungen zum Einfluß des Faserwinkels auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999), S. 225
- [Niemz/et al., 2002] Niemz P., Kucera L. J., Haller P., Koban M.: Experimentelle Untersuchungen zur Schallausbreitung in Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2002), S. 46-47
- [Niemz, 2003] Niemz P.: Schallausbreitung in Holz und Holzwerkstoffen; In: Holz-Zentralblatt Nr. 102 (2003), S. 1470-1471
- [Niemz/Kucera, 1997] Niemz P., Kucera L. J.: Einfluss künstlich erzeugter Defekte und natürlicher Holzfehler auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit; In: Holz-Zentralblatt Nr. 50 (1997), S. 796
- [Nier, 1994] Nier J.: Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an alten Bauhölzern und daraus abgeleitete Erkenntnisse zur Tragfähigkeitsbeurteilung. Dissertation; Technische Hochschule Leipzig, Fakultät für Bauingenieurwesen (1994)
- [Osuna-Sequera/et al., 2020] Osuna-Sequera C., Llana D. F., Iniguez-Gonzalez G., Arriaga F.: The influence of cross-section variation on bending stiffness assessment in existing timber structures; In: Engineering Structures 204 (2020) 110082
- [Palm, 1995] Palm K.: Maschinelle Holzsortierung; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1995, S. B/1-1 – B/1-25
- [Piazza, 2009] Piazza M.: Behavior and rehabilitation of traditional timber structures. In: Proceedings of PROHITEC 2009 International Conference „Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies“, 2009, S. 75-83
- [Piazza/Riggio, 2008] Piazza M., Riggio M.: Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures; In: Journal of Building Appraisal, Vol. 3 (2008), No. 4, S. 267-296
- [Pischl, 1997] Pischl R.: Ein bekanntes Produkt auf neuen Wegen; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1997, S. A-1 – A-30
- [Pischl, 1998] Pischl R.: Es gibt kein „Gutes Bauholz“ mehr; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 1998, S. 1-15
- [Plinke, 2005] Plinke B.: Nondestructive Testing of Finger-Jointed structural timber: Overview of possible methods, results of preliminary

- evaluations and possibilities for industrial implementation; In: 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (2005), Eberswalde, S. 75-85
- [Pošta/Dolejš, 2015] Pošta J., Dolejš J.: Non-Destructive Assessment of Timber Elements with an Emphasis on Radiometry; In: International Journal of Architectural Heritage 9 (2015) Heft 6, S: 655-664
- [Pölzleitner/Schwings., 2000] Pölzleitner W., Schwingshagl G.: INTELLIWOOD – Die Nutzung optoelektrischer Einheiten zur Erfassung von Sortiermerkmalen; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 2000
- [Proceq, 1999] Proceq SA (Hrsg.): Pilodyn. Datenblatt; Proceq SA, Zürich (1999)
- [Radig, 1966] Radig W.: Das Bauernhaus in Brandenburg und im Mittelbegebiet; Akademie Verlag, Berlin (1966)
- [Rammer, 1999] Rammer D. R.: Evaluation of Recycled Timber Members. In: Proceedings of the 5th ASCE Materials Engineering Congress, Cincinnati/Ohio (1999) S. 46-51
- [Reiss, 2016] Reiss L.: Untersuchung zur Beeinflussung der Ultraschallgeschwindigkeit durch den Faserwinkel von Kiefernkanthölzern. Bachelorarbeit; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2016)
- [Rinn, 1992] Rinn F.: Chancen und Grenzen bei der Untersuchung von Konstruktionshölzern mit der Bohrwiderstandsmethode; In: bauen mit holz 9 (1992) S. 745-748
- [Rinn, 2006] Rinn F.: Konzept für Zustandsanalysen von Holzkonstruktionen. In: bauen mit Holz (2006), Heft 10, S. 26-33
- [Ross, 2015] Ross J. R. (Ed.): Nondestructive Evaluation of Wood, Second Edition. General Technical Report FPL-GTR-238; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (2015), Madison, WI
- [Rug, 2006] Rug W.: 100 Jahre Forschung für den Holzbau; In: DGfH Aktuell Nr. 95 (2006), S. 33-50
- [Rug, 2014] Rug W.: EC5 und Bauen im Bestand. In: 21. Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT 2014, Bauen im Bestand Schriftenreihe Statik und Dynamik 1/2014, BTU Cottbus (2014)
- [Rug, 2016] Rug W.: Holzbau im Bestand – Ausgewählte historische Bemessungs- und Konstruktionsnormen von 1917 bis 2007; Beuth Verlag GmbH, Berlin (2016)
- [Rug, 2018] Rug W.: Bewertung der Standsicherheit von Holztragwerken beim Bauen im Bestand – Bauzustandsuntersuchung und -bewertung. In: Holzbau im Bestand, Band 2 – Substanzschonende Erhaltung von historischen Holztragwerken. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2018)
- [Rug/Firzlaff, 1996] Rug W., Firzlaff J.: Untersuchungen zur Festigkeit von Altholz mittels Bohrkernentnahme – Regressionsanalysen zur Festigkeit als Funktion der Rohdichte des Holzes; Recontie GmbH, Berlin und Fachhochschule Eberswalde, Fachbereich Holztechnik; Berlin, 1996 (unveröffentlicht)
- [Rug/Linke, 2016] Rug W., Linke G.: Untersuchung zur Beziehung zwischen den physikalisch-mechanischen Kennwerten von Prüfkörpern in Bauteildimension und kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern. Forschungsbericht; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holztechnik (2016), 2. Überarbeitete Fassung (unveröffentlicht)

- [Rug/Linke, 2017] Rug W., Linke G.: Bestimmung der Rohdichte mittels Messung der Eindringtiefe. Versuchsbericht; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen (2017/ unveröffentlicht)
- [Rug/Linke, 2021] Rug W., Linke G.: Untersuchungen zur Materialqualität von Holzbauteilen aus Nadelholz – Schloss Friedenstein, Gotha. Prüfbericht. Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (UG), Eberswalde (2021)
- [Rug/Mönck, 2015] Rug W., Mönck W.: Holzbau – Bemessung und Konstruktion. 16., vollständig überarbeitete Auflage. Beuth Verlag, Berlin. 2015
- [Rug/Seemann, 1988] Rug W., Seemann A.: Festigkeit von Altholz; In: Holztechnologie 29 (1988) Heft 4, S. 186-190
- [Rug/Seemann, 1989-1] Rug W., Seemann A.: Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen; In: Holztechnologie 30 (1989), Heft 2, S. 69-73
- [Rug/Seemann, 1989-2] Rug W., Seemann A.: Festigkeit von Altholz; In: bauen mit holz 10 (1989), S. 696-699
- [Rug/Seemann, 1991-1] Rug W., Seemann A.: Analysis 261ft he structural state of repair, preservation and repair of historic timber loadbearing structures. In: Proceedings of the International Timber Engineering Conference, London, 1991, S. 4.35-4.42
- [Rug/Seemann, 1991-2] Rug W., Seemann A.: Strength of old timber. In: Building Research and Information 19 (1991) Heft 1, S. 31-37
- [Rug/et al., 2011] Rug W., Eichbaum G., Linke G.: Vergleichende Festigkeitsuntersuchungen an Holz mit dem Dynstat-Verfahren; In: Holztechnologie 52 (2011) Heft 6, S. 34-40
- [Rug/et al., 2013] Rug W., Linke G., Winter L.: Untersuchungen zur Festigkeit der Klebefugen von historischem Brettschichtholz; In: Bautechnik 90 (2013), Heft 10, S. 651-659
- [Sandomeer/Steiger, 2009] Sandomeer M. K., Steiger R.: Potenzial der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz; In: Zukunft Holz – Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotential (2009), S. 361-370
- [Sandoz, 1989] Sandoz J.-L.: Grading of construction timber by ultrasound; In: Wood Science and Technology 23 (1989) S. 95-108
- [Sandoz, 1996] Sandoz J.-L.: Ultrasonic Solid Wood Evaluation in Industrial Application; In: 10<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (1996), Lausanne (CH)
- [Sandoz/Benoit, 2002] Sandoz J.-L., Benoit Y.: AUS Timber Grading: Industrial Applications; In: 13<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (2002), Berkeley (USA)
- [Sandoz/Benoit, 2007] Sandoz J.-L., Benoit Y.: Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurements; In: COST E 53 Conference (2007), Warschau (PL)
- [Sandoz/et al., 2000] Sandoz J.-L., Benoit Y., Demay L.: Wood testing using Acousto-ultrasonic; In: WCTE World Conference on Timber Engineering 2000, Vancouver (CAN)
- [Schaechterle, 1929-1] Schaechterle K.: Versuche der Deutschen Reichsbahn mit Bauhölzern verschiedener Herkunft; In: Die Bautechnik Heft 7 (1929), S. 99-104

- [Schaechterle, 1929-2] Schaechterle K.: Versuche der Deutschen Reichsbahn mit Bauhölzern verschiedener Herkunft; In: Die Bautechnik Heft 13 (1929), S. 203-207
- [Schajer, 2001] Schajer G. S.: Lumber strength grading using x-ray scanning; In: Forest Products Journal 51 (2001), Vol.1, S. 43-50
- [Scheffler/et al., 2002] Scheffler M., Niemz P., Hardtke H.-J.: Numerische Simulation der Schallausbreitung in Holz bei Vorhandensein von Defekten; In: Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2002), S. 397-404
- [Schickhofer, 2000] Schickhofer G.: INTELLIWOOD – Arbeitspaket 3: Festigkeitssortierung; In Grazer Holzbau-Fachtagung 2000
- [Schickhofer/Augustin, 2000] Schickhofer G., Augustin M.: INTELLIWOOD – Allseitige Erfassung der relevanten Sortiermerkmale für BSH – Lamellen und Darstellung der Zusammenhänge mit den Zugkenngrößen; In: Grazer Holzbau-Fachtagung 2000
- [Schickhofer/Brandner, 2011] Schickhofer G., Brandner R.: Alterung und (Rest)Tragfähigkeit von Bauholz; In: 2. Grazer Holzbau-Sonderfachtagung (2011), S. H-1 – H-13
- [Schlotzhauer/et al., 2018] Schlotzhauer P., Wilhelms F., Lux C., Bollmus S.: Comparison of three systems for automatic grain angle determination on European hardwood for construction use; In: European Journal of Wood and Wood Products 76 (2018), S. 911-923
- [Schob/et al., 1997] Schob M., Niemz P., Kucera L. J., Baradit E.: Einfluss von Holzfehlergröße und Messanordnung auf die Schallgeschwindigkeit in Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 55 (1997), S. 235-236
- [Schulz/et al., 1984] Schulz H., Aufseß H. v., Verron T.: Eigenschaften eines Fichtenbalkens aus altem Dachstuhl. In: Holz als Roh und Werkstoff 42 (1984) S. 109
- [Schwarz/et al., 2003] Schwarz U., Metzler M.: Denkmaltopographie Bundesrepublik Deutschland – Denkmale in Brandenburg – Band 13.2 Landkreis Ostprignitz-Ruppin – Teil 2: Gemeinde Fehrbellin, Amt Lindow (Mark) und Stadt Rheinsberg; Wernersche Verlagsgesellschaft, Worms (2003)
- [Seemann, 1989] Seemann A.: Berechnung alter Holzkonstruktionen. In: 6. Informationstag – Theoretische und experimentelle Baumechanik, Technische Universität Dresden, 1989
- [Seemann, 2018] Seemann A.: Substanzschonende Sanierung von Holztragwerken – Beispiele aus der Praxis. In: Rug W. (Hrsg.): Holzbau im Bestand – Historische Holztragwerke – Beispiele für substanzschonende Erhaltung; Beuth-Verlag, Berlin, 2018
- [Seitz, 1929] Seitz H.: Bauholz; In: Die Bautechnik Heft 7 (1929), S. 96-99
- [Solar, 1988] Solar F.: Festigkeitssortierung von Schnittholz; In: Holzforschung und Holzverwertung 40 (1988), Heft 5, S. 87-90
- [Sousa, 2013] Sousa H. S.: Methodology for safety evaluation of existing timber elements. Ph.D.-Thesis; University of Minho, Department of Civil Engineering (2013)
- [Spycher/ et al., 2008] Spycher M., Schwarze F., Steiger R.: Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties; In: Wood Science and Technology 42 (2008) S. 325-342
- [Stapel/Rais, 2010] Stapel P., Rais A.: Maschinelle Schnittholzsortierung in Europa; In: LWF aktuell 77 (2010), S. 20-22

- [Steiger, 1991] Steiger R.: Festigkeitssortierung von Kantholz mittels Ultraschall; In: Holz-Zentralblatt 59 (1991) S. 985-989
- [Steiger, 1995-1] Steiger R.: Biege-, Zug- und Druckversuche an Schweizer Fichtenholz; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (1995)
- [Steiger, 1995-2] Steiger R.: Versuche an Fichten-Kanthölzern: Biegemoment-Normalkraft-Interaktion. IBK-Bericht Nr. 209; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (1995)
- [Steiger, 1996] Steiger R.: Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierte M/N-Beanspruchung – Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (1996)
- [Steiger, 1997-1] Steiger R.: Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichtenholz; In: Holzforschung und Holzverwertung 5 (1997), S. 83-90
- [Steiger, 1997-2] Steiger R.: Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall; In: Holz-Forschung, Holz-Verwertung (1997), S. 28-35
- [Steiger/Arnold, 2009] Steiger R., Arnold M.: Strength grading of Norway Spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system; In: Wood Science and Technology 43 (2009), S. 259-278
- [Tanaka/Divos, 2000] Tanaka T., Divos F.: Wood inspection by thermography; In: Proceedings 263rd the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (2000), Sopron, HU
- [Tannert/et al., 2014] Tannert T., Anthony R. W., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., Rinn F., Widmann R., Yamaguchi N.: In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques; In: Materials and Structures 47 (2014) S. 767-785
- [Teder/et al., 2011] Teder M., Pilt K., Miljan M., Lainurm M., Kruuda R.: Overview of some non-destructive methods for in situ assessment of structural timber; In: 3rd International Conference CIVIL ENGINEERING (2011) Band II Materials and Structures, S. 137-143
- [Thaler/et al., 2012] Thaler N., Lesar B., Humar M.: Correlation between brown rot decay and Pilodyn measurements; In: European Journal of Wood Products 70 (2012) S. 893-895
- [Thunell, 1955] Thunell B.: Gütebestimmung und zerstörungsfreie Prüfung von Bauholz; In: Holz als Roh und Werkstoff 13 (1955), Heft 3, S. 101-111
- [Thunell, 1971] Thunell B.: Sortierung und Festigkeit; In: Holz als Roh- und Werkstoff 29 (1971) Heft 9, S. 349-353
- [Thümmler, 1991] Thümmler U.: Holzuntersuchung mit der Bohrwiderstandsmethode; In: bauen mit holz 12 (1991), S. 942-945
- [Tichelmann/Grimminger, 1993] Tichelmann K., Grimminger U.: Zerstörungsfreie Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Konstruktionsholz durch Ultraschall-Laufzeitmessung; In: Bautechnik 70 (1993) Heft 4, S. 218-228
- [Tobisch/Mittag, 1998] Tobisch S., Mittag C.: Zerstörungsfreie Untersuchungen von Schädphänomenen an Bauholz (1) – Einfluss simulierter Schadstellen auf die Kenngrößen der Ultraschall- und Bohrwiderstandsmessung; In: Holz-Zentralblatt Nr. 16 (1998), S. 236-238

- [Unterweiser/Schickhofer, 2010] Unterweiser H., Schickhofer G.: Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement; In: European Journal of Wood Products 69 (2010), S. 171-181
- [Unterweiser/Schickhofer, 2012] Unterweiser H., Schickhofer G.: Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf die dynamischen Eigenschaften von unsortierten Fichtenbrettern; In: European Journal of Wood Products 70 (2012), S. 629-638
- [Waubke, 1988] Waubke N.: Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. Einflüsse anwendungsbezogener Parameter; In: bauen mit holz 3 (1988), S. 152-154
- [Waubke/Märkl, 1982] Waubke N. V., Märkl J.: Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. Teil 1: Vorversuche mit Kanthölzern; In: Holz als Roh- und Werkstoff 40 (1982), S. 189-192
- [Weimar, 2000] Weimar H.: Aspekte der stofflichen Charakterisierung von Altholz. Diplomarbeit; Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, 2000
- [Wenzel/Kleinmanns, 1999] Wenzel F., Kleinmanns J (Hrsg.): Historische Holztragwerke – Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen. Sonderforschungsbe- reich 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Baugefüge, Konstruktionen, Werkstoffe“, Universität Karlsruhe, 1999
- [Witomski/et al., 2014] Witomski P., Krajewski A., Kozakiewicz P.: Selected mechanical properties of Scots pine wood from antique churches of Central Poland. In: European Journal of Wood Products 72 (2014) S. 293-296
- [Wyckhuysse/Maldague, 2002] Wyckhuysse A., Maldague X.: Wood inspection by infrared thermography; In: Proceedings of the 4th International Workshop on Advances Signal Processing for NonDestructive Evaluation (2002), S. 201-206
- [Yamaguchi, 2015] Yamaguchi N.: Screw withdrawal resistance for reliability-based evaluation of timber in existing structures; In: Machado J. S., Riggio M., Descamps T. (Hrsg.): State of the Art Report – Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members; Université de Mons (2015), S. 115-130
- [Zimmer/Kothe, 1990] Zimmer K., Kothe E.: Berechnungsgrundlagen für die Nachweise der Trag- und Nutzungsfähigkeit alter Holzkonstruktionen. Forschungsbericht; Technische Universität Dresden (1990)

## Sonstige Quellen

- [BBSR, 2021] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung BBR (Hrsg.): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2020; BBSR, Deichmanns Aue 31-37, 53179 Bonn
- [BLDAM, 2016-1] Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Hrsg.): Denkmale in Brandenburg – Objekt nr. 09105007 – Wunderblutkirche Sankt Nikolai, Bad Wilsnack; zuletzt abgerufen am 20.11.2021 unter <https://ns.gis-bldam-brandenburg.de/hida4web/view?docId=obj09161186.xml>
- [BLDAM, 2016-2] Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Hrsg.): Denkmale in Brandenburg – Objekt nr. 09161186 – Stadtkirche St. Nikolai, Jüterbog; zuletzt abgerufen am 21.11.2021 unter <https://ns.gis-bldam-brandenburg.de/hida4web/view?docId=obj09105007.xml>

- [BLDAM, 2016-3] Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Hrsg.): Denkmale in Brandenburg – Denkmale in Brandenburg – Objektnr. 09170947 – Wohnhaus, Dorfstraße 49, Fehrbellin, Brunne; zuletzt abgerufen am 26.11.2021 unter <https://ns.gis-bldam-brandenburg.de/hida4web/view?docId=obj09170947.xml>
- [DSD, o. D.-1] Deutsche Stiftung Denkmalschutz (Hrsg.): Wunderblutkirche St. Nikolai Bad Wilsnack, Brandenburg (<https://www.denkmalschutz.de/denkmal/ev-st-nikolaikirche-wunderblutkirche.html>); zuletzt abgerufen am 20.11.2021
- [DSD, o. D.-2] Deutsche Stiftung Denkmalschutz (Hrsg.): Nikolaikirche Jüterbog, Brandenburg (<https://www.denkmalschutz.de/denkmal/nikolaikirche-jueterbog.html>); zuletzt abgerufen am 21.11.2021
- [FPK, 2018] FPK Ingenieurgesellschaft mbH: Fichtenberg Oberschule, Berlin-Steglitz – Bestandsaufnahme Dachstuhl; FPK Ingenieurgesellschaft mbH, Am Bürohochhaus 2-4, 14478 Potsdam
- [Janßen, 2021] Janßen J.H.: Die Pfarrkirche St. Nikolai in Jüterbog, Landkreis Teltow-Fläming, Brandenburg, Deutschland. Fotografie, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0
- [Maier/et al., 2019] Maier A., Schwartpaul T., Liese A.: Untersuchung zur Tragfähigkeit von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Ingenieurtechnologisches Projekt; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachbereich Holzingenieurwesen, 2019
- [Otrebski, 2018] Otrebski A.: Gotha – Schloss Friedenstein. Fotografie, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0
- [UBA, 2021] Umweltbundesamt (Hrsg.): Abfallaufkommen; zuletzt abgerufen am 20.04.2022 unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/resources-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>
- [Savin, 2015] Savin A.: Die Fichtenberg-Oberschule in der Rothenburgstraße, Berlin-Steglitz. Fotografie, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0
- [Seemann, 2015] Planzeichnung zum Bauvorhaben: Ev. Pfarr- und Wallfahrtskirche St. Nikolai Bad Wilsnack; Planinhalt: Dachkonstruktion – Gebindearten; aufgestellt am 30.03.2015 von: Dipl.-Ing. Axel Seemann, Beratender Ingenieur; Hufelandstraße 17, 10407 Berlin
- [STSG, 2017] Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten (Hrsg.): Luftbild des Schlosses Friedenstein in Gotha. Fotografie; abgerufen als .jpg-Datei am 13.11.2021 unter: <https://www.thueringer-schloesser.de/objekt/schloss-friedenstein-mit-herzoglichem-park/>
- [STSG, 2020] Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten (Hrsg.): Ein Jahr Großbaustelle Schloss Friedenstein Gotha. Abgerufen als .pdf-Datei am 14.11.2021 unter [www.stiftungfriedenstein.de](http://www.stiftungfriedenstein.de)
- [SVBR, 2021] Gutachterliche Stellungnahme zum Bauzustand der hölzernen Dachkonstruktion – Fachwerkhaus, Fehrbellin OT Brunne; aufgestellt am 13.12.2021 von: Sachverständigenbüro Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug, Carl-von-Ossietzky-Straße 8, 16225 Eberswalde (unveröffentlicht)
- [Trapp, o. D.] Internetauftritt der Evangelischen Kirchgemeinde Bad Wilsnack und des Fördervereins der Wunderblutkirche St. Nikolai Bad Wilsnack e.V. (<http://www.wunderblutkirche.de/>); zuletzt abgerufen am 20.11.2021
- [Wasmuth/et al., 2016] Wasmuth G., Köhler S., Flecken R.: Fichtenbergschule Berlin Steglitz – Bestandsdokumentation Dachstuhl; büro west denkmalpflege, Geneststraße 5, 10829 Berlin

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umsatzanteile der Leistungsbereiche des Zimmerer- und Holzbaugewerbes (eigene Darstellung) .....	2
Abbildung 2: Bauaufsichtlich und normativ geregeltes System der Festigkeitssortierung in Deutschland (eigene Darstellung) .....	7
Abbildung 3: Teil der Dachkonstruktion der „Wunderblutkirche“ St. Nikolai, Bad Wilsnack/Brandenburg, erbaut ca. 1520 (Bildquelle: Linke, 2018).....	8
Abbildung 4: Schematisierung der Wuchs- und Bauteilmerkmale zur Sortierung von Bauholz nach USDA Department Circular 295 (nach [USDA C295, 1923], S. 6ff, eigene Darstellung) .....	12
Abbildung 5: Zusammenhang der zulässigen Spannungen der Sortierklassen nach USDA C295 (nach [USDA C295, 1923], Fig. 1).....	12
Abbildung 6: Schnittklassen und Grenzwerte für zulässige Baumkante nach DIN 4074:1939 (nach [Graf, 1944-2], Abb. 5).....	18
Abbildung 7: Vergleich der Ausbeute der Sortierung nach verschiedenen Kriterien (nach [Blaß/Görlacher, 1996]) .....	23
Abbildung 8: Vergleich des Sortiererergebnisses bei Sortierung einer Stichprobe durch mehrere Personen (nach [Augustin, 1998] und [Augustin, 2004]) .....	26
Abbildung 9: Entwicklung der maschinellen Festigkeitssortierung (nach [Glos, 2000], eigene Darstellung) .....	27
Abbildung 10: Einfluss der Rohdichte auf die Festigkeit und Steifigkeit von schwedischer Kiefer nach Untersuchungen von THUNELL und SCHLYTER (nach [Kollmann, 1982]) .....	29
Abbildung 11: Einfluss der Rohdichte und der Ästigkeit (a) auf die Festigkeit und Steifigkeit von Holz nach Untersuchungen von GLOS/GAMM an 280 Balken aus Fichtenholz (nach [Glos/Gamm, 1987]).....	29
Abbildung 12: Einfluss des Elastizitätsmoduls auf die Festigkeit von Nadelholz nach Untersuchungen von SUNLEY, McKEAN/HOYLE und BENIČÁK/FRATIŠA (nach [Kufner, 1977]) .....	30
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Arbeitsweise ausgewählter Sortiermaschinen (nach [Denzler, 2007], eigene Darstellung).....	31
Abbildung 14: Schema der Funktionsfähigkeitsprüfung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen (nach [Rug, 2018], dort Abbildung 12, mit eigenen Ergänzungen).....	40
Abbildung 15: Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen nach [UNI 11119:2004], Abschnitt 7.5 & 7.6 (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 16: Ablauf der Bauzustandsbewertung und Instandsetzung bestehender Konstruktionen nach [JRC, 2015] (die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [JRC, 2015]).....	47
Abbildung 17: Ablauf der Bauzustandsbewertung bestehender Konstruktionen nach [JRC, 2015] (die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [JRC, 2015]).....	48
Abbildung 18: Ablauf der Bauzustandsbewertung nach [DIN CEN/TS 17440:2020] (die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [DIN CEN/TS 17440:2020]) .....	50
Abbildung 19: Bauzustandserfassung und -bewertung nach DIN EN 17121:2019 (eigene Darstellung, die enthaltenen Verweise beziehen sich auf die Abschnitte in [DIN EN 17121]).....	51
Abbildung 20: Differenz zwischen versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten und charakteristischen Kennwerten nach EN 338 (für neues Bauholz ( <i>Pinus pinaster</i> AIT.), Sortierklasse E nach NP 4305:2005/Festigkeitsklasse C18 nach EN 338:2009; nach [Machado/et al., 2011]; ohne Angaben zum Stichprobenumfang).....	56
Abbildung 21: Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften von altem Holz (nach [Kranitz, 2014], überarbeitet durch den Verfasser).....	58
Abbildung 22: Longitudinal- und Transversalwellen (nach [Baron, 2009], überarbeitet durch den Verfasser) .....	65
Abbildung 23: Messmethoden der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (eigene Darstellung nach [Kessel, 1990]).....	66

Abbildung 24: Einfluss des Winkels zwischen Faser- und Ausbreitungsrichtung auf die Schallgeschwindigkeit von Fichten- und Buchenholz (nach [Niemz/et al., 1999-2]).....	71
Abbildung 25: Einfluss der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit (für Fichtenholz nach [Sandoz, 1993]).....	72
Abbildung 26: Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Schallgeschwindigkeit nach Literaturangaben (berechnet nach Gl. 4, Gl. 5, Gl. 7, Gl. 9 und Gl. 10 mit $v_\omega = 5000$ m/s).....	74
Abbildung 27: Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit nach Literaturangaben (berechnet nach Gl. 6 und Gl. 8 mit $v_\omega = 5000$ m/s).....	75
Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf eines Ultraschall-Impulses (nach [Sandoz/et al., 2000]).....	77
Abbildung 29: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte und der Schallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Literaturangaben (vgl. Tabelle A. 1).....	78
Abbildung 30: Regressionsbeziehungen zwischen der Biegefestigkeit und der Schallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Literaturangaben (vgl. Tabelle A. 1).....	78
Abbildung 31: Regressionsbeziehungen zwischen dem statischen Biege-Elastizitätsmodul und der Schallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen Elastizitätsmodul nach Literaturangaben (vgl. Tabelle A. 1).....	79
Abbildung 32: Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Rohdichte (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2).....	84
Abbildung 33: Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2).....	85
Abbildung 34: Regression zwischen den mittleren Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Rohdichte (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2).....	85
Abbildung 35: Regression zwischen den mittleren Kennwerten von Bohrkernproben und von kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern – Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 2).....	86
Abbildung 36: Regressionen zwischen der Rohdichte und der Druckfestigkeit von Bohrkernproben und kleinen, fehlerfreien Norm-Prüfkörpern (Quader/Prismen) nach Literaturangaben.....	87
Abbildung 37: Prüfvorrichtungen zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Bohrkernproben – links: Bohrkernproben $\varnothing$ 15 mm, Prüfung in einer Universalprüfmaschine (eigene Darstellung); rechts: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus (eigene Darstellung).....	87
Abbildung 38: Prüfvorrichtungen zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Bohrkernproben – links: Bohrkernproben $\varnothing$ 4,8 mm, Prüfung mit spezieller Vorrichtung (aus [Kasal/Anthony, 2004]); rechts: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus (eigene Darstellung).....	88
Abbildung 39: Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe eines Stahlstifts und den Materialkennwerten von Holzbauteilen – oben: Rohdichte (Nadelholz); Mitte: Rohdichte (Laubholz); unten: Druck-/Biegefestigkeit (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle A. 3).....	93
Abbildung 40: Prüfgerät zur Eindringtiefenmessung – Pilodyn 6J (Bildquelle: <a href="http://www.istemi.it">www.istemi.it</a> ).....	94
Abbildung 41: Prüfgerät zur Eindringtiefenmessung – Woodpecker Wood Test Hammer (Fa. DRC Italia, Ancona/Italien, Bildquelle: [Rug/Linke, 2017]).....	95
Abbildung 42: Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Eindringtiefe bei Nadelholz (nach ausgewählten Literaturangaben, vgl. Tabelle 20).....	96
Abbildung 43: Einfluss der Anzahl der Messungen je Messbereich (nach [Görlacher, 1987]).....	97
Abbildung 44: Schematischer Ablauf der systematischen Untersuchungen.....	100
Abbildung 45: Durchführung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen – oben: direkte Längsdurchschallung; unten: indirekte Längsdurchschallung (Bildquelle: Linke, 2019).....	103
Abbildung 46: Messprinzip der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (eigene Darstellung) – oben: direkte Längsdurchschallung; unten: indirekte Längsdurchschallung.....	103

Abbildung 47: Vier-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN 408:2012 mit entsprechendem Biegemoment-/Querkraftverlauf (eigene Darstellung) .....	105
Abbildung 48: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche (eigene Darstellung) .....	105
Abbildung 49: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche – Auflagerung und Kippsicherung durch Gabellager (Bildquelle: [Linke/Mühlisch, 2018]) .....	106
Abbildung 50: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 auf Grundlage der visuellen Sortierung .....	109
Abbildung 51: Verteilung der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit – Prüfreihe „Fichte“	110
Abbildung 52: Verteilung der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit – Prüfreihe „Kiefer“.	111
Abbildung 53: Verteilung der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit – Prüfreihe „Eiche“.	111
Abbildung 54: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 – Prüfreihe „Fichte“ .....	112
Abbildung 55: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 – Prüfreihe „Kiefer“ .....	112
Abbildung 56: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Eiche“ .....	113
Abbildung 57: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Fichte“ .....	115
Abbildung 58: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Kiefer“ .....	116
Abbildung 59: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Eiche“ .....	116
Abbildung 60: Wertebereiche der Rohdichte in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 – oben links: Prüfreihe „Fichte“; oben rechts: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ .....	117
Abbildung 61: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Zugbruch mit Rissfortsetzung .....	119
Abbildung 62: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Zugbruch über gesamte Querschnittshöhe .....	119
Abbildung 63: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – kombinierter Zug-/Schubbruch .....	119
Abbildung 64: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Versagen durch Zug- & Druckbruch .....	120
Abbildung 65: Bruchverhalten – Prüfreihe „Fichte“ – Schubversagen .....	120
Abbildung 66: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – Zugbruch mit Rissfortsetzung .....	121
Abbildung 67: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – Zugbruch über gesamte Querschnittshöhe .....	121
Abbildung 68: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – Versagen durch Zug- & Druckbruch .....	121
Abbildung 69: Bruchverhalten – Prüfreihe „Kiefer“ – kombinierter Zug-/Schubbruch .....	122
Abbildung 70: Bruchverhalten – Prüfreihe „Eiche“ – Zugbruch mit Rissfortsetzung .....	122
Abbildung 71: Bruchverhalten – Prüfreihe „Eiche“ – Versagen durch Zug- & Druckbruch .....	123
Abbildung 72: Verteilungen – Prüfreihe „Fichte“ – links: Biegebruchfestigkeit; rechts: statischer Biege-Elastizitätsmodul .....	124
Abbildung 73: Verteilungen – Prüfreihe „Kiefer“ – links: Biegebruchfestigkeit; rechts: statischer Biege-Elastizitätsmodul .....	124
Abbildung 74: Verteilungen – Prüfreihe „Eiche“ – links: Biegebruchfestigkeit; rechts: statischer Biege-Elastizitätsmodul .....	124
Abbildung 75: Wertebereiche der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Fichte“ .....	125
Abbildung 76: Wertebereiche der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Kiefer“ .....	126
Abbildung 77: Wertebereiche der Biegefestigkeit und des statischen Biege-Elastizitätsmoduls in den visuell festgestellten Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 – Prüfreihe „Eiche“ .....	126
Abbildung 78: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen – Prüfreihe „Fichte“ .....	129

---

Abbildung 79: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen – Prüfreihe „Kiefer“ .....	130
Abbildung 80: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen – Prüfreihe „Eiche“ .....	130
Abbildung 81: Übereinstimmung der Klassenzuordnung zwischen der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1/-5 und der Sortierung auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche .....	131
Abbildung 82: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche festgestellten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – Prüfreihe „Fichte“ (oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung) .....	132
Abbildung 83: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche festgestellten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – Prüfreihe „Kiefer“ (oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung).....	133
Abbildung 84: Wertebereiche der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den auf Grundlage der zerstörenden Materialversuche festgestellten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 – Prüfreihe „Eiche“ (oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung) .....	134
Abbildung 85: Aufteilung der Probenabschnitte und Entnahme der Bohrkernproben (eigene Darstellung) .....	142
Abbildung 86: Verteilung der an Bohrkernproben ermittelten Rohdichte – oben links: Prüfreihe „Fichte“; oben rechts: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe Eiche .....	144
Abbildung 87: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe).....	145
Abbildung 88: Abweichungen der Rohdichte (in rot: Variationskoeffizient nach DIN 68364:2003) ....	146
Abbildung 89: Dichteunterschiede innerhalb eines Stammes – links: Veränderung entlang der Stammachse für verschiedene Holzarten (eigene Darstellung nach [Kollmann, 1982]); rechts: Dichteunterschiede in einem Kiefernstamm (nach [Niemz/Sonderegger, 2017]) .....	147
Abbildung 90: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte im Vergleich zu Literaturangaben – für Fichtenholz .....	148
Abbildung 91: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte im Vergleich zu Literaturangaben – für Kiefernholz.....	148
Abbildung 92: Regressionsbeziehungen zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte im Vergleich zu Literaturangaben – für Eichenholz .....	149
Abbildung 93: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ .....	150
Abbildung 94: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und basierend auf der Referenzrohddichte .....	151
Abbildung 95: Einfluss des Probenumfangs auf die Zuverlässigkeit von Bohrkernproben (links: aus [Machado, 2013], dort Bild 4; rechts: aus [Machado, 2015], dort Bild 2) .....	152
Abbildung 96: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe) – Prüfreihe „Fichte“ .....	152
Abbildung 97: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe) – Prüfreihe „Kiefer“ .....	153
Abbildung 98: Wertebereiche der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; BK ... Bohrkernprobe) – Prüfreihe „Eiche“ .....	153

Abbildung 99: Abweichungen der Rohdichte bezogen auf die Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Probenumfang $n$ .....	154
Abbildung 100: Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Probenumfang $n$ .....	154
Abbildung 101: Regressionsgeraden in Abhängigkeit vom Probenumfang $n$ .....	155
Abbildung 102: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und basierend auf der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Probenumfang.....	155
Abbildung 103: Prüfgerät „WoodPecker Wood Test Hammer“ der Fa. DRC Italia – oben: Impulshammer; Mitte: analoge Messuhr; unten: digitaler Messschieber; rechts: Schlagstifte (Bildquelle: [Rug/Linke, 2017]).....	157
Abbildung 104: Durchführung der Eindringtiefmessungen (eigene Darstellung).....	157
Abbildung 105: Messprinzip der Eindringtiefmessungen (eigene Darstellung).....	158
Abbildung 106: Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte im Vergleich zu Literaturangaben – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten Prüfreihe „Eiche“ .....	159
Abbildung 107: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Fichte“ .....	161
Abbildung 108: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Kiefer“ .....	161
Abbildung 109: Verteilung der Rohdichte – Prüfreihe „Eiche“.....	162
Abbildung 110: Wertebereiche der Rohdichte (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; PK ... Probekörperabschnitte; TP ... aus Eindringtiefe rechnerisch ermittelt) .....	162
Abbildung 111: Abweichungen der Rohdichte der Probenabschnitte $\rho_{PK,12}$ – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ (rot markiert: Variationskoeffizient nach DIN 68364:2003) .....	164
Abbildung 112: Abweichungen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte $\rho_{TP,12}$ – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ (rot markiert: Variationskoeffizient nach DIN 68364:2003) .....	164
Abbildung 113: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 anhand der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und der Referenzrohddichte – oben: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; unten: Prüfreihe „Eiche“ .....	166
Abbildung 114: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der Rohdichte von Bohrkernproben und basierend auf der Referenzrohddichte .....	167
Abbildung 115: Wertebereiche der aus der Eindringtiefe berechneten Rohdichte und der Referenzrohddichte mit reduziertem Probenumfang (B ... Prüfkörper in Bauteildimensionen; TP ... Rohdichte aus Eindringtiefmessung) – v.o.n.u.: Prüfreihe „Fichte“, „Kiefer“, „Eiche“ .....	169
Abbildung 116: Abweichungen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte bezogen auf die Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Messumfang $n$ – links: Prüfreihe „Fichte“; Mitte: Prüfreihe „Kiefer“; rechts: Prüfreihe „Eiche“ .....	170
Abbildung 117: Korrelationskoeffizienten (oben) und Regressionsgeraden (unten) in Abhängigkeit vom Messumfang $n$ .....	171
Abbildung 118: Übereinstimmung der Klassenzuordnung anhand der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und basierend auf der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Messumfang .....	171
Abbildung 119: Schematische Darstellung einer mehrstufigen in situ-Festigkeitsortierung .....	179
Abbildung 120: Anordnung der Messstellen für die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bezogen auf die Querschnittsbreite (eigene Darstellung, Draufsicht) .....	188
Abbildung 121: Anordnung der Messstrecken für die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bezogen auf die Bauteillänge (eigene Darstellung) .....	188
Abbildung 122: Anordnung der Messpunkte für die Eindringtiefmessung (eigene Darstellung).....	189
Abbildung 123: Straßenansicht der „Fichtenberg-Oberschule“ in Berlin-Steglitz (Süd-Ost-Ansicht, Bildquelle: [Savin, 2015]).....	192
Abbildung 124: Bauzeitlicher Grundriss des Dachgeschosses (aus [Wasmuth/et al. 2016]) .....	193
Abbildung 125: Querschnitt des Dachgeschosses – Südwest-Flügel (Auszug aus [FPK, 2018]) .....	193
Abbildung 126: Querschnitt des Dachgeschosses – Nordost-Flügel (aus [Wasmuth/et al. 2016]) ....	194

---

Abbildung 127: Längsschnitte des Dachgeschosses – Nordost-Flügel – oben: Schnitt entlang der Firstpfette; unten: Schnitt entlang der Bogenträger (aus [Wasmuth/et al. 2016]) .....	195
Abbildung 128: Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung und zerstörender Biegeversuche .....	197
Abbildung 129: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung .....	198
Abbildung 130: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten .....	199
Abbildung 131: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ (Sortierstufe SGL 2a).....	200
Abbildung 132: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ (Sortierstufe SGL 3).....	201
Abbildung 133: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $k_{vis}$ (Sortierstufe SGL 2a).....	203
Abbildung 134: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $k_{vis}$ (Sortierstufe SGL 3).....	203
Abbildung 135: Ansicht des Schloss Friedenstein in Gotha (Süd-Ost-Ansicht, Bildquelle: [Otrebski, 2018]).....	205
Abbildung 136: Zeitgenössischer Kupferstich der Schlossanlage Friedenstein (im Vordergrund rechts: Befestigungsanlagen; Bildquelle: Seutter, um 1738) .....	205
Abbildung 137: Luftaufnahme der Schlossanlage Friedenstein in Gotha (Nord-Ost-Ansicht, Bildquelle: [STSG, 2017]).....	206
Abbildung 138: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung.....	207
Abbildung 139: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der zerstörenden Biegeversuche .....	208
Abbildung 140: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung .....	209
Abbildung 141: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten .....	210
Abbildung 142: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ (Sortierstufe SGL 2a).....	211
Abbildung 143: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ (Sortierstufe SGL 3).....	211
Abbildung 144: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $k_{vis}$ (Sortierstufe SGL 2a).....	213
Abbildung 145: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitsortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $k_{vis}$ (Sortierstufe SGL 3).....	213
Abbildung 146: Ansicht der Wunderblutkirche St. Nikolai in Bad Wilsnack (Süd-West-Ansicht, Bildquelle: [Seemann, 2018]) .....	215

Abbildung 147: Dachkonstruktionen der Wunderblutkirche mit Datierung – (1) Langhaus, (2) Chor, (3) nördliches Quer-/Seitenschiff, (4) südliches Quer-/Seitenschiff (aus [Seemann, 2015]).....	216
Abbildung 148: Dachkonstruktion über dem Hauptschiff/Langhaus (Bildquelle: Linke, 2018) .....	216
Abbildung 149: Schematische Darstellung Dachkonstruktion über dem Hauptschiff/Langhaus (aus [Seemann, 2015]) .....	217
Abbildung 150: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung .....	218
Abbildung 151: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung ohne Berücksichtigung der Kriterien Baumkante und Fäule .....	219
Abbildung 152: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte und Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung .....	219
Abbildung 153: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung – Sortierstufe SGL 2a .....	220
Abbildung 154: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung – Sortierstufe SGL 3 .....	220
Abbildung 155: Süd-Ansicht der Pfarrkirche St. Nikolai in Jüterbog (Bildquelle: [Janßen, 2021]) .....	222
Abbildung 156: Grundriss der Pfarrkirche mit Datierung – (1) Langhaus, (2) Chor, (3) Nord-/Südturm, (4) nördliches Quer-/Seitenschiff, (5) südliches Quer-/Seitenschiff (Bildquelle: [Fritz, 2020], bearbeitet durch den Verfasser) .....	223
Abbildung 157: Dachkonstruktion über dem Hauptschiff/Langhaus (Bildquelle links: Mühlisch, 2019; Bildquelle rechts: [Seemann, 2018]) .....	223
Abbildung 158: Zeichnerische Darstellung der Dachkonstruktion über dem nördlichen Seitenschiff – oben: Vollgebinde; unten: Leergebinde (aus [Fritz, 2020]) .....	224
Abbildung 159: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der Kriterien Baumkante und Fäule .....	226
Abbildung 160: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte .....	226
Abbildung 161: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung .....	227
Abbildung 162: Nord-Ansicht des Fachwerkhauses in Fehrbellin (Bildquelle: [SVBR, 2021]) .....	228
Abbildung 163: Isometrie der Dachkonstruktion (aus [SVBR, 2021]) .....	229
Abbildung 164: Schnittansicht der Dachkonstruktion (aus [SVBR, 2021]) .....	230
Abbildung 165: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 und den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der visuellen Sortierung mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der Kriterien Baumkante, Verformungen, Fäule und Insektenfraß .....	231
Abbildung 166: Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der labortechnisch ermittelten Rohdichte .....	232
Abbildung 167: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitsortierung – links: Sortierstufe SGL 2a; rechts: Sortierstufe SGL 3 .....	232
Abbildung 168: Integration der Methodik zur in situ-Festigkeitsortierung in die Bauzustandsbewertung nach DIN CEN/TS 17440:2020 und DIN EN 17121:2019 .....	235

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung von visuell nach der Festigkeit sortiertem Bauholz zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 am Beispiel von mitteleuropäischem Nadel-schnittholz (Auszug aus [DIN EN 1912:2013], Tabelle 1).....	5
Tabelle 2: Kennwerte von Bauholz nach ausgewählten amtlichen Bauvorschriften des frühen 20. Jahrhunderts (nach [Bronneck, 1927]) .....	9
Tabelle 3: Schnittklassen nach DIN 4074:1939 (nach [Graf, 1944-2], Tab. 3) .....	18
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen zerstörungsfrei messbaren Schätzwerten der Festigkeit (Indicating properties „IP“) und zerstörend gemessenen Festigkeiten (aus [Denzler/Glos, 2009]).....	23
Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten möglicher Sortierkriterien und Festigkeitseigenschaften ermittelt an Brettern und Bohlen aus europäischem Nadelholz (aus [Glos, 1995]) .....	29
Tabelle 6: Ausgewählte, für die maschinelle Festigkeitssortierung nutzbare Messmethoden.....	32
Tabelle 7: Methoden der maschinellen Sortierung (nach [Denzler, 2007], [Denzler/et al., 2005], [Krzosek/Bacher, 2011]).....	32
Tabelle 8: Einstellwerte für maschinenkontrollierte Sortiersysteme am Beispiel der Anlage „Goldeneye 702“ (Auszug aus DIN EN 14081-4 nach [Denzler, 2007]) .....	33
Tabelle 9: Einstellwerte für maschinenkontrollierte Sortiersysteme am Beispiel von Festigkeitsklassen für Nadelholz basierend auf der Schwingungsmessung (Auszug aus [DIN EN 14081-2:2018], Tabelle D.2).....	33
Tabelle 10: Sortiermerkmale und Grenzwerte nach [UNI 11119:2004], Tabelle 1 .....	42
Tabelle 11: Festlegungen zur Aktualisierung der Baustoffeigenschaften im Zuge einer Bauzustandserfassung anhand des Kenntnisstandes (nach [SIA 269/5:2011], Abschnitt C.1) .....	43
Tabelle 12: Methoden für die Bauzustandserfassung von Holzkonstruktionen (auszugsweise entnommen aus [SIA 269/5:2011], Anhang C, Tabelle 3; ergänzt um die Bemerkungen nach [Lißner/Rug, 2018]).....	44
Tabelle 13: Beispiele für Regelwerke zum Umgang mit bestehenden Konstruktionen (auszugsweise entnommen aus [JRC, 2015], Kapitel II, S. 25 ff).....	46
Tabelle 14: Ausgewählte Untersuchungen zum Alterungseinfluss an europäischen und nordamerikanischen Nadel-/Laubhölzern.....	59
Tabelle 15: Ausgewählte zerstörungsfreie/-arme Methoden zur Untersuchung von Holz.....	63
Tabelle 16: Ausgewählte Untersuchungen zur Anwendung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitsuntersuchung und -sortierung von Bauholz (chronologisch geordnet) .....	67
Tabelle 17: Beziehungen zwischen mechanischen Eigenschaften und dynamisch gemessenen Kennwerten (für Fichtenholz, nach [Sandoz/et al., 2000]) .....	76
Tabelle 18: Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit für die Zuordnung von Nadel-Schnittholz (Fichtenholz) zu den Festigkeitsklassen nach EN 338 .....	79
Tabelle 19: Ausgewählte Untersuchungen zur Anwendung von Bohrkernproben für die Festigkeitsuntersuchung von Bauholz (chronologisch geordnet).....	83
Tabelle 20: Übersicht über ausgewählte Untersuchungen zur Anwendung der Eindringtiefmessung für die Untersuchung von Holzbauteilen (chronologisch geordnet) .....	90
Tabelle 21: Prüfkörper-Querschnitt im Vergleich zur Schnittholzeinteilung nach DIN 4074-1:2012 und DIN 4074-5:2008 (dort jeweils Tabelle 1).....	102
Tabelle 22: Verteilung des Probenmaterials auf die Sortierklassen für Nadel- und Laubholz nach DIN 4074-1:2012 & DIN 4074-5:2008 .....	107
Tabelle 23: Zuordnung von visuell nach DIN 4074-1/-5 sortiertem Bauholz zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 (nach [DIN 1912:2013], Tabellen 1 & 2).....	108
Tabelle 24: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit .....	109

Tabelle 25: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen ausgewählten Sortierkriterien und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit.....	113
Tabelle 26: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der Rohdichte .....	115
Tabelle 27: Korrelationen zwischen ausgewählten Sortierkriterien und der Rohdichte .....	118
Tabelle 28: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der Biegebruchfestigkeit .....	123
Tabelle 29: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen ausgewählten Sortierkriterien und der Rohdichte.....	127
Tabelle 30: Gegenüberstellung der charakteristischen Kennwerte des untersuchten Probenmaterials nach visueller Sortierung mit den charakteristischen Kennwerten nach DIN EN 338:2016 (rot markiert: Kennwerte nach DIN EN 338 nicht erreicht) .....	128
Tabelle 31: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten .....	135
Tabelle 32: Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen den aus der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit berechneten und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten .....	136
Tabelle 33: Abweichungen zwischen den aus der gemessenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit berechneten und den in zerstörenden Materialversuchen ermittelten Materialkennwerten .....	136
Tabelle 34: Regressionsbeziehungen zwischen der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit sowie dem Biege-Elastizitätsmodul (Korrelationskoeffizienten s. Tabelle 31) .....	138
Tabelle 35: Übereinstimmung zwischen der Sortierung über die Schallausbreitungsgeschwindigkeit und über die tatsächlichen Materialkennwerte .....	138
Tabelle 36: Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 basierend auf den zerstörenden Biegeversuchen und der Sortierung anhand der Schallausbreitungsgeschwindigkeit.....	139
Tabelle 37: Prüfkörper zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit .....	140
Tabelle 38: Ermittelte Messwertabweichungen.....	141
Tabelle 39: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der Bohrkern-Rohdichte .....	143
Tabelle 40: Verhältniswerte der Rohdichte .....	145
Tabelle 41: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper .....	146
Tabelle 42: Abweichungen der Rohdichte aus Voruntersuchungen an kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern und Bohrkernproben (nach [Rug/Linke, 2016]) .....	147
Tabelle 43: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte mit ausgewählten Literaturangaben .....	148
Tabelle 44: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper nach Umrechnung anhand der Verhältniswerte in Tabelle 40 .....	149
Tabelle 45: Verhältniswerte der Rohdichte in Abhängigkeit von der Probenanzahl n .....	153
Tabelle 46: Korrelationskoeffizienten zwischen der Rohdichte von Bohrkernproben und der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Probenumfang n (PK ... Probekörper).....	154
Tabelle 47: Korrelationskoeffizienten zwischen der Eindringtiefe und der Rohdichte .....	158
Tabelle 48: Übersicht über die Lage- und Streuparameter der aus der Eindringtiefe errechneten Rohdichte $\rho_{tp,12}$ und der Rohdichte der Probekörperabschnitte $\rho_{PK,12}$ .....	161
Tabelle 49: Verhältniswerte der Rohdichte .....	163
Tabelle 50: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper .....	163
Tabelle 51: Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen den Rohdichtekennwerten .....	165
Tabelle 52: Wertebereich der Abweichungen der Rohdichte bezogen auf einzelne Prüfkörper nach Umrechnung anhand der Verhältniswerte in Tabelle 40 .....	165
Tabelle 53: Verhältniswerte der Rohdichte in Abhängigkeit von der Messungsanzahl n .....	168
Tabelle 54: Korrelationskoeffizienten zwischen der aus der Eindringtiefe rechnerisch ermittelten Rohdichte und der Referenzrohddichte in Abhängigkeit vom Messumfang n .....	170

Tabelle 55: Gegenüberstellung der Sortierstufen (SGL ... <i>strength grading level</i> ) und der Kenntnisstufen (KL ... <i>knowledge level</i> ) nach [Loebjinski, 2021] .....	176
Tabelle 56: Bewertung visueller Sortierkriterien nach DIN 4074-1/-5 für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen .....	178
Tabelle 57: Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten der am stärksten ausgeprägten Regressionsbeziehungen .....	180
Tabelle 58: Charakteristische Werte der Biegefestigkeit $f_{m,k}$ in [N/mm <sup>2</sup> ].....	183
Tabelle 59: Charakteristische Werte des statischen Biege-Elastizitätsmoduls $E_{0,mean}$ (in [N/mm <sup>2</sup> ]) ...	184
Tabelle 60: Übereinstimmung zwischen der Festigkeitssortierung anhand von versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten und anhand der Sortierparameter (d/i ... direkte bzw. indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung).....	185
Tabelle 61: Gegenüberstellung der Sortierstufen (SGL) und der Kenntnisstufen (KL) nach [Loebjinski, 2021] sowie beispielhafte Anwendungsbereiche .....	186
Tabelle 62: Ergebnisse der in situ-Festigkeitssortierung (d/i ... direkte/indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung).....	198
Tabelle 63: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte .....	199
Tabelle 64: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung (Sortierstufe SGL 2a) und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ .....	201
Tabelle 65: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung (Sortierstufe SGL 3) und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ .....	201
Tabelle 66: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $k_{vis}$ .....	203
Tabelle 67: Ergebnisse der in situ-Festigkeitssortierung (d/i ... direkte/indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung).....	208
Tabelle 68: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten	210
Tabelle 69: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 anhand der in situ-Festigkeitssortierung und auf Grundlage zerstörend ermittelter Materialkennwerte unter Einbeziehung des globalen Korrekturfaktors $k_{IP}$ .....	211
Tabelle 70: Übereinstimmung zwischen der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 nach in situ-Festigkeitssortierung und zerstörend ermittelten Materialkennwerten unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $k_{vis}$ .....	213
Tabelle 71: Grenzwerte des Sortierparameters zur Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 (für Kiefernholz).....	237

## **Anlagen**

## Anlage 1 – Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen dynamischen Kennwerten der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Kennwerten von Bauholz

Tabelle A. 1: Korrelations- & Regressionsbeziehungen zwischen dynamischen Kennwerten und den physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Bauholz aus Fichten-/Kiefern-/Eichenholz nach ausgewählter Literatur (chronologisch und nach Holzarten geordnet)

Holzart	Quelle	Rohdichte $\rho$	Biegefestigkeit $f_m$	stat. Biege-E-Modul $E_m$
Fichte/Tanne	[Waubke/Märkl, 1982]	/	$f_m = 0,9 \cdot 10^{-6} v^2 + 5,567$ ( $r = 0,586$ )	$E_m = 3,5 \cdot 10^3 v^2 - 456$ ( $r = 0,768$ )
	[Waubke, 1988]	/	$v^2 \leftrightarrow f_m$ : $r = (0,32 \dots 0,55)$ $E_{dyn} \leftrightarrow f_m$ : $r = (0,37 \dots 0,61)$	$v^2 \leftrightarrow E_m$ : $r = (0,42 \dots 0,77)$ $E_{dyn} \leftrightarrow E_m$ : $r = (0,61 \dots 0,85)$
	[Sandoz, 1989]	$\rho = 658000 / (4640 - v^2 \cdot 10^4)$ ( $r = 0,43$ )	$f_m = ((v - 3630)/275)^2$ ( $r = 0,68$ )	$E_m = 290 \cdot 10^{-2} / (v^2 \cdot 10^4 - 995 \cdot 10^{-7})$ ( $r = 0,82$ )
	[Schöne, 1989]	/	$f_m = -8,1 + 4,28 \cdot 10^{-3} E_{dyn}$ ( $r = k. A.$ )	$E_{dyn} \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,924$
	[Steiger, 1991]	/	$f_m = 0,02 \cdot v - 82$ ( $r = 0,633$ )	$E_m = 5,43 \cdot v - 17250$ ( $r = 0,677$ )
	[Boström, 1994]	/	$f_{m,45/120} = 0,0174 v - 37,0$ ( $r = 0,447$ ) $f_{m,45/120} = 0,0378 E_{dyn} + 4,5$ ( $r = 0,583$ ) $f_{m,70/170} = 0,0119 v - 12,8$ ( $r = 0,436$ ) $f_{m,70/170} = 0,0301 E_{dyn} + 13,2$ ( $r = 0,574$ ) $f_{m,45/195} = 0,0228 v - 66,1$ ( $r = 0,707$ ) $f_{m,45/195} = 0,0428 E_{dyn} - 0,8$ ( $r = 0,787$ )	/
	[Steiger, 1995-2], [Steiger, 1996]	/	$f_m = 0,021 \cdot v_{min} - 77,3$ ( $r = 0,60$ )	$E_m = 6,156 \cdot v_{mean} - 22984$ ( $r = 0,75$ )
	[Sandoz, 1996]	/	/	$E_m = 4,896 \cdot v - 14660$ ( $r = 0,95$ )
	[Ceccotti/Togni, 1996]	/	$v_{dir}^2 \leftrightarrow f_m$ : $r = 0,75$ $v_{ind}^2 \leftrightarrow f_m$ : $r = 0,84$ $E_{dyn,dir} \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,79$ $E_{dyn,ind} \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,87$	$v_{dir} \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,85$ $v_{ind} \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,85$ $E_{dyn,ind} \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,93$
	[Kessel/et al., 1997] [Kessel/et al., 1998]	$r = 0,093$	$f_m = 0,0186 v - 68,202$ ( $r = 0,646$ )	$E_m = 4,9081 v - 16380$ ( $r = 0,667$ )
[Augustin, 1998], [Augustin, 2004]	/	$f_m = 0,06 \cdot v_{min} - 304,96$ ( $r = 0,687$ )	$E_m = 11,93 \cdot v_{mean} - 56491,65$ ( $r = 0,840$ )	

Tabelle A. 1 (fortgesetzt)

Holzart	Quelle	Rohdichte $\rho$	Biegefestigkeit $f_m$	stat. Biege-E-Modul $E_m$
Fichte/Tanne	[Hanhijärvi/ et al., 2005]	IP $\leftrightarrow$ $\rho$ : $r = (0,39...0,48)$	IP $\leftrightarrow$ $f_m$ : $r = (0,65...0,69)$	IP $\leftrightarrow$ $E_m$ : $r = (0,73...0,77)$
	[Hanhijärvi/ Ranta-Maunus, 2008]	$v \leftrightarrow \rho$ : $r = 0,36$ IP $\leftrightarrow \rho$ : $r = 0,69$	$v \leftrightarrow f_m$ : $r = 0,71$ IP $\leftrightarrow f_m$ : $r = 0,76$	$v \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,74$ IP $\leftrightarrow E_m$ : $r = 0,79$
	[Steiger/Arnold, 2009]	/	$f_m = 0,0034 E_{dyn} - 5,25$ ( $r = 0,62$ )	$E_m = 0,8586 E_{dyn} - 1357$ ( $r = 0,77$ )
Kiefer	[Hanhijärvi/ et al., 2005]	IP $\leftrightarrow \rho$ : $r = (0,69...0,73)$	IP $\leftrightarrow f_m$ : $r = (0,81...0,89)$	IP $\leftrightarrow E_m$ : $r = (0,82...0,87)$
	[Hanhijärvi/ Ranta-Maunus, 2008]	$v \leftrightarrow \rho$ : $r = 0,59$ IP $\leftrightarrow \rho$ : $r = 0,66$	$v \leftrightarrow f_m$ : $r = 0,76$ IP $\leftrightarrow f_m$ : $r = 0,77$	$v \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,81$ IP $\leftrightarrow E_m$ : $r = 0,82$
	[Ebner, 2018]	/	$f_m = 0,001 v_{dir} - 2,9082$ ( $r = 0,468$ ) $f_m = 0,0005 v_{ind} + 0,1192$ ( $r = 0,245$ ) $f_m = 0,0012 E_{dyn,dir} + 0,9372$ ( $r = 0,409$ ) $f_m = 0,0013 E_{dyn,ind} + 0,9769$ ( $r = 0,402$ )	$E_m = 0,2823 E_{dyn,dir} + 310,5$ ( $r = 0,531$ ) $E_m = 0,2487 E_{dyn,ind} + 377,12$ ( $r = 0,421$ )
	[Osuna-Sequera/ et al., 2020]	/	/	$E_m = 0,89 E_{dyn} - 1870$ ( $r = 0,837$ )
Eiche	[Kessel, 1990]	/	$v \leftrightarrow f_m$ : $r = 0,85$	$v \leftrightarrow E_m$ : $r = 0,64$
nicht holzartspezifisch	[Kranitz/Niemz, 2010]	$\rho = 0,022 E_{dyn} + 113,96$ ( $r = 0,78$ )	/	/
	[Nakielski, 2012]	/	$f_m = 0,0202 v_{min,dir} - 72,848$ ( $r = 0,50$ ) $f_m = 0,0168 v_{min,ind} - 54,542$ ( $r = 0,614$ )	$E_m = 5,3073 v_{mean,dir} - 18300$ ( $r = 0,72$ ) $E_m = 3,2254 v_{mean,ind} - 6280,8$ ( $r = 0,61$ )

## Anlage 2 – Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und kleinen, fehlerfreien Normproben

Tabelle A. 2: Korrelations- und Regressionsbeziehungen sowie Umrechnungsfaktoren zwischen den Kennwerten von Bohrkernproben und kleinen, fehlerfreien Normproben nach ausgewählter Literatur (chronologisch und nach Holzarten geordnet)

Holzart	Quelle	Rohdichte $\rho$	Druckfestigkeit $f_{c,0}$
Fichte	[Erler/Knospe, 1989]	$\rho_{kf} = 0,96 \cdot \rho_{BK} + 0,32$ ( $r = 0,53$ )	$f_{c,0,kf} = 0,20 \cdot f_{c,0,BK} + 22,13$ ( $r = 0,33$ ) $f_{c,0,kf} = 0,86 \cdot f_{c,0,BK}$
	[Rug/Seemann, 1989-2]	$\rho_{kf} = (1,07 \dots 1,13) \cdot \rho_{BK}$	$f_{c,0,kf} = (1,14 \dots 1,25) \cdot f_{c,0,BK}$
	[Rug/Linke, 2016]	$\rho_{kf} = 0,742 \cdot \rho_{BK} + 116,35$ ( $r = 0,665$ )	$f_{c,0,kf} = 0,992 \cdot f_{c,0,BK} + 4,575$ ( $r = 0,734$ )
Kiefer	[Erler/Knospe, 1989]	$\rho_{kf} = 0,86 \cdot \rho_{BK} + 0,56$ ( $r = 0,87$ )	$f_{c,0,kf} = 0,51 \cdot f_{c,0,BK} + 8,09$ ( $r = 0,72$ ) $f_{c,0,kf} = 0,72 \cdot f_{c,0,BK}$
	[Rug/Seemann, 1989-2]	$\rho_{kf} = (0,94 \dots 1,10) \cdot \rho_{BK}$	$f_{c,0,kf} = (0,82 \dots 1,14) \cdot f_{c,0,BK}$
	[Machado/et al., 2011]	$\rho_{kf} = 0,7559 \cdot \rho_{BK} + 128,27$ ( $r = 0,787$ )	/
	[Iniguez-Gonzalez/ et al., 2015-1]	$\rho_{kf} = 0,779 \cdot \rho_{BK} + 80$ ( $r = 0,894$ ) für $\varnothing = 10$ mm $\rho_{kf} = 0,827 \cdot \rho_{BK} + 87$ ( $r = 0,894$ ) für $\varnothing = 16$ mm	/
	[Rug/Linke, 2016]	$\rho_{kf} = 0,683 \cdot \rho_{BK} + 149,49$ ( $r = 0,745$ )	$f_{c,0,kf} = 0,504 \cdot f_{c,0,BK} + 24,76$ ( $r = 0,348$ )
Eiche	[Erler/Knospe, 1989]	$\rho_{kf} = 0,48 \cdot \rho_{BK} + 3,69$ ( $r = 0,70$ )	$f_{c,0,kf} = 0,55 \cdot f_{c,0,BK} + 12,95$ ( $r = 0,59$ ) $f_{c,0,kf} = 0,80 \cdot f_{c,0,BK}$
	[Rug/Seemann, 1989-2]	$\rho_{kf} = (1,03 \dots 1,17) \cdot \rho_{BK}$	$f_{c,0,kf} = (1,01 \dots 1,18) \cdot f_{c,0,BK}$
	[Rug/Linke, 2016]	$\rho_{kf} = 1,115 \cdot \rho_{BK} - 93,04$ ( $r = 0,768$ )	$f_{c,0,kf} = 0,451 \cdot f_{c,0,BK} + 36,17$ ( $r = 0,654$ )
Buche	[Rug/Seemann, 1989-2]	$\rho_{kf} = 0,95 \cdot \rho_{BK}$	$f_{c,0,kf} = 1,01 \cdot f_{c,0,BK}$
Edelkastanie	[Fritz, 2017]	$\rho_{kf} = 0,685 \cdot \rho_{BK} + 0,173$ ( $r = 0,81$ )	/
Nicht holzartspezifisch	[Rug/Seemann, 1988]	/	$f_{c,0,kf} = 0,9 \cdot f_{c,0,BK} + 0,5$ ( $r = 0,94$ ) $f_{c,0,kf,mean} = 0,93 \cdot f_{c,0,BK,mean}$ $f_{c,0,kf,05} = 0,91 \cdot f_{c,0,BK,05}$

Tabelle A. 2 (fortgesetzt)

Holzart	Quelle	Rohdichte $\rho$	Druckfestigkeit $f_{c,0}$
Nicht holzartspezifisch	[Rug/Seemann, 1989-1]	/	$f_{c,0,kf} = 1,04 \cdot f_{c,0,BK}$ (für $\varnothing = 10$ mm) $f_{c,0,kf} = 0,98 \cdot f_{c,0,BK}$ (für $\varnothing = 15$ mm)
	[Kasal, 2003], [Kasal/Anthony, 2004]	/	$f_{c,0,kf} = 1,21 \cdot f_{c,0,BK} - 4,53$ ( $r = 0,943$ )

### Anlage 3 – Korrelations- und Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe eines Stahlstiftes und den physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Bauholz

Tabelle A. 3: Korrelations- & Regressionsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe eines Stahlstiftes und den physikalisch-mechanischen Eigenschaften Bauholz nach ausgewählter Literatur (chronologisch und nach Holzarten geordnet)

Holzart	Quelle	Rohdichte $\rho$	Biege-/Druckfestigkeit/ Biege- Elastizitätsmodul $f_m/f_{c,0}/E_m$
Fichte/Tanne	[Görlacher, 1987]	für n = 16: $\rho = -0,032 \cdot t_p + 0,855$ (r = -0,91) für n = 4: $\rho = -0,0271 \cdot t_p + 0,795$ (r = -0,81) für n = 2: $\rho = -0,0218 \cdot t_p + 0,730$ (r = -0,74)	/
	[Erler/Knospe, 1989]	r = -0,77 (NH)	/
	[Cavalli/Togni, 2013]	$\rho = -14,9 \cdot t_p + 629$ (r = -0,883)	/
	[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	$\rho = -0,0078 \cdot t_p + 0,6369$ (r = -0,682)	/
Kiefer	[Erler/et al., 1988]	$\rho = 0,713 - 0,0197 \cdot t_p$ (r = k. A.)	$f_{c,0} = 75,55 - 2,35 \cdot t_p$ (r = k. A.)
	[Erler/Knospe, 1989]	r = -0,25...-0,813 (AH) r = -0,36 (NH)	/
	[Iniguez-Gonzalez/et al., 2015-1]	$\rho = -15,52 \cdot t_p + 709$ (r = -0,548)	/
	[Iniguez/et al., 2010]	für Pinus radiata: $\rho = -20,54 \cdot t_p + 693,03$ (r = -0,781) für Pinus sylvestris: $\rho = -20,54 \cdot t_p + 726,07$ (r = -0,781) für Pinus nigra: $\rho = -20,54 \cdot t_p + 683,16$ (r = -0,781) für Pinus pinaster: $\rho = -20,54 \cdot t_p + 737,07$ (r = -0,781)	/
	[Henriques/et al., 2011]	$\rho = -32,05 \cdot t_p + 1059,07$ (r = -0,895)	$f_{c,0} = 85,13 - 2,80 \cdot t_p$ (r = -0,782)
	[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	$\rho = -0,0145 \cdot t_p + 0,8927$ (r = -0,675)	/

Tabelle A. 3 (fortgesetzt)

Holzart	Quelle	Rohdichte $\rho$	Biege-/Druckfestigkeit/ Biege- Elastizitätsmodul $f_m/f_{c,0}/E_m$
Eiche	[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	$\rho = -0,0133 \cdot t_p + 0,9083$ ( $r = -0,500$ )	/
Robinie	[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	$\rho = -0,0547 \cdot t_p + 1,3334$ ( $r = -0,858$ )	/
Edelkastanie	[Feio, 2005]	Serie 1: $\rho = -60,1 \cdot t_p + 1115,16$ ( $r = -0,883$ ) Serie 2: $\rho = -48,58 \cdot t_p + 1029,67$ ( $r = -0,954$ )	/
	[Grippa, 2009]	$\rho = -15,57 \cdot t_p + 815,51$ ( $r = -0,575$ )	/
	[Bartunkova, 2012]	$r = -0,557$	$r = -0,346 (f_{c,0})$
	[Faggiano/et al., 2013]	$r = -0,706$	$r = -0,588 (f_m)$ $r = -0,766 (E_m)$
	[Fritz, 2017]	$\rho_{kf} = -0,0108 \cdot t_p + 0,73$ ( $r = -0,55$ ) $\rho_{BK} = -0,0141 \cdot t_p + 0,81$ ( $r = -0,68$ )	$f_{c,o,kf} = -0,1887 \cdot t_p + 51,89$ ( $r = -0,07$ ) $f_{c,o,kf} = -0,9643 \cdot t_p + 67,53$ ( $r = -0,53$ )
	[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	$\rho = -0,0146 \cdot t_p + 0,7833$ ( $r = -0,643$ )	/
Nicht holzartspezifisch	[Descamps/et al., 2005]	für $\omega > 10$ %: $r = -0,825$ für $\omega \leq 10$ %: $r = -0,825$ $\rho = 0,1185 \cdot (E_m/t_p^{0,5}) + 100,37$ ( $r = -0,943$ )	/
	[Teder/et al., 2011]	$\rho = -26,74 \cdot t_p + 896,55$ ( $r = -0,465$ )	$f_m = 191,71 - 10,59 \cdot t_p$ ( $r = -0,697$ )
	[Rug/Linke, 2017] [Fritz/et al., 2018]	$\rho = -0,0144 \cdot t_p + 0,832$ ( $r = -0,745$ )	/

## Anlage 4 – Ergebnisse der Regressionsanalyse zur Ermittlung der Sortierparameter

Tabelle A. 4: Übersicht über die untersuchten Regressionsbeziehungen

Sortier-Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen							
		A	FN	R	v	U	E <sub>dyn</sub>	$\rho_{tp}$	$\rho_{BK}$
SGL 1	1	X							
	2		X						
	3			X					
	4	X	X						
	5	X		X					
	6		X	X					
	7	X	X	X					
SGL 2a	8				X				
	9				X	X			
	10	X			X				
	11	X			X	X			
	12		X		X				
	13		X		X	X			
	14			X	X				
	15			X	X	X			
	16	X	X		X				
	17	X	X		X	X			
	18	X		X	X				
	19	X		X	X	X			
	20		X	X	X				
	21		X	X	X	X			
	22	X	X	X	X				
	23	X	X	X	X	X			
SGL 2b	24				X			X	
	25				X	X		X	
	26						X		
	27						X	X	
	28	X			X			X	
	29	X			X	X		X	
	30	X					X		
	31	X					X	X	
	32		X		X			X	
	33		X		X	X		X	
	34		X				X		
	35		X				X	X	
	36			X	X			X	
	37			X	X	X		X	
	38			X			X		

Tabelle A. 4 (fortgesetzt)

Sortier-Stufe	Ifd. Nr.	Messgrößen							
		A	FN	R	v	U	E <sub>dyn</sub>	ρ <sub>tp</sub>	ρ <sub>BK</sub>
SGL 2b	39			X			X	X	
	40	X	X		X			X	
	41	X	X		X	X		X	
	42	X	X				X		
	43	X	X				X	X	
	44	X		X	X			X	
	45	X		X	X	X		X	
	46	X		X			X		
	47	X		X			X	X	
	48		X	X	X			X	
	49		X	X	X	X		X	
	50		X	X			X		
	51		X	X			X	X	
	52	X	X	X	X			X	
	53	X	X	X	X	X		X	
	54	X	X	X			X		
55	X	X	X			X	X		
SGL 3	56				X				X
	57				X	X			X
	58						X		
	59						X		X
	60	X			X				X
	61	X			X	X			X
	62	X					X		
	63	X					X		X
	64		X		X				X
	65		X		X	X			X
	66		X				X		
	67		X				X		X
	68			X	X				X
	69			X	X	X			X
70			X			X			
71			X			X		X	
72	X	X		X				X	
73	X	X		X	X			X	
74	X	X				X			
75	X	X				X		X	
76	X		X	X				X	
77	X		X	X	X			X	
78	X		X			X			

Tabelle A. 4 (fortgesetzt)

Sortier-Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen							
		A	FN	R	v	U	E <sub>dyn</sub>	ρ <sub>tp</sub>	ρ <sub>BK</sub>
SGL 3	79	X		X			X		X
	80		X	X	X				X
	81		X	X	X	X			X
	82		X	X			X		
	83		X	X			X		X
	84	X	X	X	X				X
	85	X	X	X	X	X			X
	86	X	X	X			X		
	87	X	X	X			X		X

Tabelle A. 5: Korrelationskoeffizienten der untersuchten Regressionsbeziehungen zwischen den zerstörungsfrei/-arm messbaren Messgrößen und den Zielgrößen (direkt/indirekt ... direkte bzw. indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung) – Prüfreihe „Fichte“

Sortier-Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 1	1	A	0,365		0,267	
	2	FN	0,194		0,132	
	3	R	0,003		0,080	
	4	A, FN	0,403		0,291	
	5	A, R	0,367		0,273	
	6	FN, R	0,196		0,148	
	7	A, FN, R	0,407		0,294	
SGL 2a	8	V	0,389	0,375	0,776	0,786
	9	v, U	0,393	0,386	0,776	0,786
	10	A, v	0,502	0,478	0,787	0,794
	11	A, v, U	0,502	0,479	0,788	0,794
	12	FN, v	0,406	0,397	0,760	0,787
	13	FN, v, U	0,407	0,397	0,776	0,787
	14	R, v	0,389	0,375	0,779	0,790
	15	R, v, U	0,394	0,387	0,779	0,790
	16	A, FN, v	0,512	0,489	0,787	0,795
	17	A, FN, v, U	0,514	0,489	0,788	0,795
	18	A, R, v	0,504	0,479	0,789	0,797
	19	A, R, v, U	0,504	0,481	0,790	0,797
	20	FN, R, v	0,407	0,391	0,779	0,791
	21	FN, R, v, U	0,408	0,398	0,779	0,791
	22	A, FN, R, v	0,515	0,491	0,789	0,798
	23	A, FN, R, v, U	0,517	0,491	0,790	0,799

Tabelle A. 5 (fortgesetzt)

Sortier- Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 2b	24	$v, \rho_{tp}$	0,387	0,384	0,804	0,812
	25	$v, U, \rho_{tp}$	0,390	0,391	0,805	0,812
	26	$E_{dyn}$	0,379	0,377	0,806	0,815
	27	$E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,396	0,399	0,825	0,834
	28	$A, v, \rho_{tp}$	0,495	0,488	0,817	0,821
	29	$A, v, U, \rho_{tp}$	0,495	0,488	0,819	0,821
	30	$A, E_{dyn}$	0,491	0,484	0,819	0,825
	31	$A, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,493	0,484	0,823	0,826
	32	$FN, v, \rho_{tp}$	0,407	0,401	0,804	0,812
	33	$FN, v, U, \rho_{tp}$	0,408	0,405	0,805	0,813
	34	$FN, E_{dyn}$	0,403	0,397	0,806	0,816
	35	$FN, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,406	0,397	0,811	0,818
	36	$R, v, \rho_{tp}$	0,388	0,385	0,812	0,820
	37	$R, v, U, \rho_{tp}$	0,392	0,394	0,812	0,820
	38	$R, E_{dyn}$	0,380	0,378	0,815	0,825
	39	$R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,387	0,381	0,819	0,826
	40	$A, FN, v, \rho_{tp}$	0,509	0,501	0,817	0,821
	41	$A, FN, v, U, \rho_{tp}$	0,511	0,501	0,819	0,821
	42	$A, FN, E_{dyn}$	0,507	0,498	0,819	0,825
	43	$A, FN, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,507	0,498	0,823	0,827
	44	$A, R, v, \rho_{tp}$	0,499	0,491	0,823	0,828
	45	$A, R, v, U, \rho_{tp}$	0,499	0,492	0,825	0,828
	46	$A, R, E_{dyn}$	0,495	0,487	0,826	0,832
	47	$A, R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,497	0,488	0,829	0,833
	48	$FN, R, v, \rho_{tp}$	0,409	0,403	0,812	0,821
	49	$FN, R, v, U, \rho_{tp}$	0,410	0,408	0,812	0,821
	50	$FN, R, E_{dyn}$	0,405	0,398	0,815	0,826
	51	$FN, R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,408	0,399	0,819	0,827
52	$A, FN, R, v, \rho_{tp}$	0,514	0,505	0,823	0,829	
53	$A, FN, R, v, U, \rho_{tp}$	0,515	0,505	0,825	0,829	
54	$A, FN, R, E_{dyn}$	0,511	0,502	0,826	0,833	
55	$A, FN, R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,512	0,502	0,829	0,834	
SGL 3	56	$v, \rho_{BK}$	0,409	0,404	0,844	0,852
	57	$v, U, \rho_{BK}$	0,412	0,413	0,844	0,852
	58	$E_{dyn}$	0,359	0,367	0,815	0,838
	59	$E_{dyn}, \rho_{BK}$	0,415	0,418	0,856	0,866
	60	$A, v, \rho_{BK}$	0,503	0,496	0,857	0,862
	61	$A, v, U, \rho_{BK}$	0,503	0,497	0,857	0,862

Tabelle A. 5 (fortgesetzt)

Sortier-Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 3	62	A, E <sub>dyn</sub>	0,475	0,476	0,832	0,850
	63	A, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,500	0,490	0,860	0,864
	64	FN, v, ρ <sub>BK</sub>	0,428	0,422	0,844	0,852
	65	FN, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,429	0,427	0,844	0,852
	66	FN, E <sub>dyn</sub>	0,396	0,399	0,817	0,838
	67	FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,425	0,416	0,849	0,855
	68	R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,418	0,413	0,848	0,857
	69	R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,422	0,424	0,848	0,857
	70	R, E <sub>dyn</sub>	0,367	0,375	0,821	0,843
	71	R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,416	0,408	0,852	0,859
		A, FN, v, ρ <sub>BK</sub>	0,521	0,514	0,857	0,862
	73	A, FN, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,522	0,514	0,857	0,862
	74	A, FN, E <sub>dyn</sub>	0,504	0,502	0,834	0,850
	75	A, FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,517	0,508	0,860	0,864
	76	A, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,515	0,508	0,860	0,866
	77	A, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,515	0,509	0,860	0,866
	78	A, R, E <sub>dyn</sub>	0,486	0,486	0,836	0,854
	79	A, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,512	0,502	0,863	0,867
	80	FN, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,439	0,433	0,848	0,857
	81	FN, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,440	0,439	0,848	0,857
	82	FN, R, E <sub>dyn</sub>	0,406	0,409	0,822	0,843
	83	FN, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,437	0,428	0,852	0,859
	84	A, FN, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,534	0,527	0,860	0,866
85	A, FN, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,535	0,527	0,860	0,866	
86	A, FN, R, E <sub>dyn</sub>	0,516	0,514	0,838	0,854	
87	A, FN, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,531	0,522	0,863	0,867	

Tabelle A. 6: Korrelationskoeffizienten der untersuchten Regressionsbeziehungen zwischen den zerstörungsfrei/-arm messbaren Messgrößen und den Zielgrößen (direkt/indirekt ... direkte bzw. indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung) – Prüfreihe „Kiefer“

Sortier-Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 1	1	A	0,597		0,533	
	2	FN	0,039		0,010	
	3	R	0,017		0,051	
	4	A, FN	0,598		0,533	

Tabelle A. 6 (fortgesetzt)

Sortier- Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 1	5	A, R	0,597		0,535	
	6	FN, R	0,043		0,052	
	7	A, FN, R	0,598		0,535	
SGL 2a	8	V	0,524	0,557	0,759	0,765
	9	v, U	0,590	0,600	0,769	0,780
	10	A, v	0,692	0,704	0,815	0,810
	11	A, v, U	0,707	0,716	0,816	0,816
	12	FN, v	0,524	0,558	0,761	0,765
	13	FN, v, U	0,591	0,601	0,770	0,780
	14	R, v	0,524	0,558	0,760	0,766
	15	R, v, U	0,590	0,600	0,770	0,781
	16	A, FN, v	0,693	0,704	0,816	0,810
	17	A, FN, v, U	0,707	0,716	0,816	0,816
	18	A, R, v	0,693	0,704	0,816	0,811
	19	A, R, v, U	0,707	0,716	0,817	0,816
	20	FN, R, v	0,524	0,558	0,760	0,766
	21	FN, R, v, U	0,591	0,601	0,770	0,781
	22	A, FN, R, v	0,693	0,704	0,817	0,811
23	A, FN, R, v, U	0,707	0,716	0,817	0,816	
SGL 2b	24	v, $\rho_{tp}$	0,587	0,610	0,801	0,790
	25	v, U, $\rho_{tp}$	0,636	0,623	0,802	0,794
	26	$E_{dyn}$	0,586	0,609	0,800	0,791
	27	$E_{dyn}$ , $\rho_{tp}$	0,578	0,600	0,803	0,796
	28	A, v, $\rho_{tp}$	0,733	0,742	0,850	0,835
	29	A, v, U, $\rho_{tp}$	0,742	0,742	0,851	0,835
	30	A, $E_{dyn}$	0,730	0,739	0,843	0,832
	31	A, $E_{dyn}$ , $\rho_{tp}$	0,732	0,741	0,853	0,839
	32	FN, v, $\rho_{tp}$	0,588	0,611	0,802	0,790
	33	FN, v, U, $\rho_{tp}$	0,636	0,624	0,803	0,795
	34	FN, $E_{dyn}$	0,587	0,610	0,801	0,791
	35	FN, $E_{dyn}$ , $\rho_{tp}$	0,587	0,610	0,807	0,795
	36	R, v, $\rho_{tp}$	0,588	0,610	0,801	0,790
	37	R, v, U, $\rho_{tp}$	0,637	0,624	0,803	0,794
	38	R, $E_{dyn}$	0,587	0,609	0,800	0,791
	39	R, $E_{dyn}$ , $\rho_{tp}$	0,587	0,610	0,806	0,794
	40	A, FN, v, $\rho_{tp}$	0,733	0,742	0,851	0,836
	41	A, FN, v, U, $\rho_{tp}$	0,742	0,742	0,851	0,836
	42	A, FN, $E_{dyn}$	0,730	0,739	0,845	0,833

Tabelle A. 6 (fortgesetzt)

Sortier- Stufe	Ifd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 2b	43	A, FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>tp</sub>	0,732	0,741	0,855	0,839
	44	A, R, v, ρ <sub>tp</sub>	0,733	0,742	0,850	0,835
	45	A, R, v, U, ρ <sub>tp</sub>	0,743	0,742	0,851	0,835
	46	A, R, E <sub>dyn</sub>	0,730	0,739	0,844	0,832
	47	A, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>tp</sub>	0,732	0,741	0,854	0,839
	48	FN, R, v, ρ <sub>tp</sub>	0,588	0,611	0,802	0,790
	49	FN, R, v, U, ρ <sub>tp</sub>	0,637	0,624	0,803	0,795
	50	FN, R, E <sub>dyn</sub>	0,587	0,610	0,801	0,791
	51	FN, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>tp</sub>	0,587	0,610	0,807	0,795
	52	A, FN, R, v, ρ <sub>tp</sub>	0,733	0,742	0,851	0,836
	53	A, FN, R, v, U, ρ <sub>tp</sub>	0,743	0,742	0,852	0,836
	54	A, FN, R, E <sub>dyn</sub>	0,730	0,739	0,845	0,833
	55	A, FN, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>tp</sub>	0,732	0,742	0,855	0,839
SGL 3	56	v, ρ <sub>BK</sub>	0,508	0,547	0,757	0,779
	57	v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,570	0,591	0,762	0,794
	58	E <sub>dyn</sub>	0,410	0,455	0,576	0,620
	59	E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,521	0,559	0,768	0,794
	60	A, v, ρ <sub>BK</sub>	0,689	0,701	0,821	0,829
	61	A, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,700	0,713	0,821	0,835
	62	A, E <sub>dyn</sub>	0,663	0,675	0,712	0,731
	63	A, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,697	0,707	0,828	0,836
	64	FN, v, ρ <sub>BK</sub>	0,509	0,547	0,757	0,779
	65	FN, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,570	0,593	0,762	0,794
	66	FN, E <sub>dyn</sub>	0,414	0,457	0,577	0,620
	67	FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,523	0,559	0,766	0,788
	68	R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,513	0,550	0,758	0,779
	69	R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,575	0,598	0,763	0,795
	70	R, E <sub>dyn</sub>	0,414	0,458	0,576	0,620
71	R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,527	0,562	0,767	0,788	
72	A, FN, v, ρ <sub>BK</sub>	0,689	0,701	0,821	0,830	
73	A, FN, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,700	0,713	0,821	0,835	
74	A, FN, E <sub>dyn</sub>	0,664	0,675	0,712	0,731	
75	A, FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,697	0,707	0,829	0,837	
76	A, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,691	0,703	0,821	0,830	
77	A, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,702	0,716	0,821	0,835	
78	A, R, E <sub>dyn</sub>	0,665	0,676	0,712	0,731	
79	A, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,699	0,709	0,828	0,836	
80	FN, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,514	0,551	0,758	0,779	

Tabelle A. 6 (fortgesetzt)

Sortier-Stufe	Ifd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 3	81	FN, R, v, U, $\rho_{BK}$	0,575	0,599	0,763	0,795
	82	FN, R, $E_{dyn}$	0,418	0,460	0,577	0,620
	83	FN, R, $E_{dyn}$ , $\rho_{BK}$	0,528	0,562	0,767	0,788
	84	A, FN, R, v, $\rho_{BK}$	0,691	0,703	0,822	0,830
	85	A, FN, R, v, U, $\rho_{BK}$	0,702	0,716	0,822	0,836
	86	A, FN, R, $E_{dyn}$	0,665	0,676	0,712	0,731
	87	A, FN, R, $E_{dyn}$ , $\rho_{BK}$	0,699	0,709	0,829	0,837

Tabelle A. 7: Korrelationskoeffizienten der untersuchten Regressionsbeziehungen zwischen den zerstörungsfrei-/arm messbaren Messgrößen und den Zielgrößen (direkt/indirekt ... direkte bzw. indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung) – Prüfreihe „Eiche“

Sortier-Stufe	Ifd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße stat. Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 1	1	A	0,272		0,083	
	2	FN	0,363		0,300	
	3	R	0,226		0,088	
	4	A, FN	0,438		0,306	
	5	A, R	0,355		0,121	
	6	FN, R	0,405		0,304	
	7	A, FN, R	0,476		0,310	
SGL 2a	8	V	0,697	0,730	0,861	0,874
	9	v, U	0,697	0,753	0,861	0,874
	10	A, v	0,753	0,770	0,867	0,875
	11	A, v, U	0,753	0,780	0,868	0,875
	12	FN, v	0,711	0,379	0,863	0,874
	13	FN, v, U	0,711	0,757	0,862	0,874
	14	R, v	0,725	0,754	0,863	0,876
	15	R, v, U	0,725	0,768	0,863	0,876
	16	A, FN, v	0,762	0,775	0,868	0,876
	17	A, FN, v, U	0,762	0,783	0,868	0,876
	18	A, R, v	0,779	0,793	0,869	0,877
	19	A, R, v, U	0,780	0,798	0,869	0,877
	20	FN, R, v	0,734	0,758	0,863	0,876
	21	FN, R, v, U	0,734	0,771	0,863	0,876
	22	A, FN, R, v	0,784	0,796	0,869	0,878
	23	A, FN, R, v, U	0,785	0,800	0,869	0,878
	24	v, $\rho_{tp}$	0,727	0,757	0,857	0,868

Tabelle A. 7 (fortgesetzt)

Sortier-Stufe	Ifd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 2b	25	$v, U, \rho_{tp}$	0,727	0,773	0,857	0,868
	26	$E_{dyn}$	0,688	0,724	0,851	0,864
	27	$E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,731	0,765	0,863	0,878
	28	$A, v, \rho_{tp}$	0,762	0,782	0,864	0,870
	29	$A, v, U, \rho_{tp}$	0,762	0,790	0,864	0,870
	30	$A, E_{dyn}$	0,734	0,758	0,860	0,868
	31	$A, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,766	0,787	0,869	0,874
	32	$FN, v, \rho_{tp}$	0,734	0,760	0,858	0,868
	33	$FN, v, U, \rho_{tp}$	0,734	0,775	0,859	0,868
	34	$FN, E_{dyn}$	0,708	0,737	0,855	0,865
	35	$FN, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,737	0,765	0,863	0,872
	36	$R, v, \rho_{tp}$	0,745	0,771	0,860	0,869
SGL 2b	37	$R, v, U, \rho_{tp}$	0,746	0,781	0,861	0,869
	38	$R, E_{dyn}$	0,707	0,739	0,854	0,865
	39	$R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,749	0,775	0,865	0,873
	40	$A, FN, v, \rho_{tp}$	0,769	0,786	0,865	0,871
	41	$A, FN, v, U, \rho_{tp}$	0,769	0,793	0,865	0,871
	42	$A, FN, E_{dyn}$	0,752	0,771	0,864	0,869
	43	$A, FN, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,772	0,790	0,870	0,875
	44	$A, R, v, \rho_{tp}$	0,779	0,795	0,867	0,872
	45	$A, R, v, U, \rho_{tp}$	0,780	0,800	0,867	0,872
	46	$A, R, E_{dyn}$	0,753	0,773	0,863	0,870
	47	$A, R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,783	0,800	0,872	0,876
	48	$FN, R, v, \rho_{tp}$	0,748	0,772	0,861	0,869
	49	$FN, R, v, U, \rho_{tp}$	0,749	0,782	0,861	0,869
	50	$FN, R, E_{dyn}$	0,721	0,747	0,857	0,866
	51	$FN, R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,751	0,776	0,866	0,873
	52	$A, FN, R, v, \rho_{tp}$	0,783	0,797	0,867	0,872
	53	$A, FN, R, v, U, \rho_{tp}$	0,783	0,801	0,868	0,872
	54	$A, FN, R, E_{dyn}$	0,764	0,781	0,865	0,870
	55	$A, FN, R, E_{dyn}, \rho_{tp}$	0,785	0,801	0,872	0,876
SGL 3	56	$v, \rho_{BK}$	0,725	0,757	0,859	0,875
	57	$v, U, \rho_{BK}$	0,725	0,775	0,860	0,875
	58	$E_{dyn}$	0,685	0,726	0,842	0,864
	59	$E_{dyn}, \rho_{BK}$	0,731	0,765	0,864	0,882
	60	$A, v, \rho_{BK}$	0,760	0,783	0,867	0,879
	61	$A, v, U, \rho_{BK}$	0,761	0,792	0,867	0,879
	62	$A, E_{dyn}$	0,736	0,766	0,855	0,872

Tabelle A. 7 (fortgesetzt)

Sortier- Stufe	lfd. Nr.	Messgrößen	Korrelationskoeffizienten			
			Zielgröße Biegebruchfestigkeit		Zielgröße stat. Biege-Elastizitätsmodul	
			direkt	indirekt	direkt	indirekt
SGL 3	63	A, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,765	0,790	0,872	0,884
	64	FN, v, ρ <sub>BK</sub>	0,734	0,762	0,860	0,875
	65	FN, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,734	0,778	0,860	0,875
	66	FN, E <sub>dyn</sub>	0,705	0,739	0,845	0,865
	67	FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,738	0,768	0,865	0,880
	68	R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,744	0,772	0,863	0,877
	69	R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,745	0,784	0,864	0,877
	70	R, E <sub>dyn</sub>	0,710	0,747	0,848	0,868
	71	R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,749	0,779	0,868	0,882
	72	A, FN, v, ρ <sub>BK</sub>	0,769	0,788	0,868	0,879
	73	A, FN, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,769	0,796	0,868	0,879
	74	A, FN, E <sub>dyn</sub>	0,752	0,776	0,858	0,873
	75	A, FN, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,773	0,795	0,873	0,884
	76	A, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,779	0,798	0,871	0,881
	77	A, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,781	0,803	0,872	0,882
	78	A, R, E <sub>dyn</sub>	0,759	0,786	0,860	0,876
	79	A, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,784	0,806	0,876	0,887
	80	FN, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,748	0,774	0,863	0,877
	81	FN, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,749	0,786	0,864	0,877
	82	FN, R, E <sub>dyn</sub>	0,722	0,754	0,849	0,869
83	FN, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,753	0,781	0,868	0,882	
84	A, FN, R, v, ρ <sub>BK</sub>	0,783	0,801	0,871	0,881	
85	A, FN, R, v, U, ρ <sub>BK</sub>	0,784	0,805	0,872	0,882	
86	A, FN, R, E <sub>dyn</sub>	0,769	0,791	0,862	0,876	
87	A, FN, R, E <sub>dyn</sub> , ρ <sub>BK</sub>	0,788	0,808	0,876	0,887	

Tabelle A. 8: Regressionsbeziehungen zwischen den Mess- und Zielgrößen und deren Schätzwerten (d/i ... direkte bzw. indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung)

Sortier- stufe SGL	Regressionsgleichung
Prüfreihe „Fichte“	
2a (d)	$f_m = -35,36 \cdot A - 66,45 \cdot FN + 8,04 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,d} - 0,01 \cdot U_{\min,d} - 33,72$
	$E_m = -3179,87 \cdot A + 2158,02 \cdot FN - 1814,55 \cdot R + 8,46 \cdot v_{\text{mean},d} - 2,29 \cdot U_{\text{mean},d} - 33338,18$
2a (i)	$f_m = -31,99 \cdot A - 59,25 \cdot FN + 7,30 \cdot R + 0,01 \cdot v_{\min,i} + 0,01 \cdot U_{\min,i} - 12,46$
	$E_m = -2512,07 \cdot A + 5558,06 \cdot FN - 2470,64 \cdot R + 7,70 \cdot v_{\text{mean},i} - 1,58 \cdot U_{\text{mean},i} - 28760,08$
2b (d)	$f_m = -34,50 \cdot A - 75,09 \cdot FN + 12,21 \cdot R + 0,01 \cdot v_{\min,d} - 0,01 \cdot U_{\min,d} + 0,06 \cdot \rho_{TP} - 47,31$
	$E_m = -2951,41 \cdot A + 1876,32 \cdot FN - 3841,61 \cdot R + 1,40 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 10,48 \cdot \rho_{TP} - 955,79$

Tabelle A. 8 (fortgesetzt)

Sortierstufe SGL	Regressionsgleichung
2b (i)	$f_m = -32,90 \cdot A - 66,94 \cdot FN + 11,56 \cdot R + 0,01 \cdot v_{\min,i} + 0,001 \cdot U_{\min,i} + 0,06 \cdot \rho_{TP} - 30,17$
	$E_m = -2466,13 \cdot A + 4806,19 \cdot FN - 4282,60 \cdot R + 1,34 \cdot E_{\text{dyn,mean},i} - 6,05 \cdot \rho_{TP} - 877,00$
3 (d)	$f_m = -35,30 \cdot A - 85,73 \cdot FN + 22,11 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,d} - 0,01 \cdot U_{\min,d} + 0,03 \cdot \rho_{BK} - 39,28$
	$E_m = -3251,79 \cdot A + 328,04 \cdot FN - 2710,03 \cdot R + 1,42 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 24,10 \cdot \rho_{BK} + 4817,95$
3 (i)	$f_m = -34,16 \cdot A - 80,54 \cdot FN + 21,82 \cdot R + 0,01 \cdot v_{\min,d} + 0,004 \cdot U_{\min,d} + 0,03 \cdot \rho_{BK} - 22,98$
	$E_m = -2863,33 \cdot A + 2005,79 \cdot FN - 2948,63 \cdot R + 1,33 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 15,97 \cdot \rho_{BK} + 3832,15$
Prüfreihe „Kiefer“	
2a (d)	$f_m = -36,39 \cdot A + 6,36 \cdot FN - 1,10 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,d} + 0,05 \cdot U_{\min,d} - 55,37$
	$E_m = -5236,32 \cdot A + 3248,95 \cdot FN + 2896,58 \cdot R + 8,04 \cdot v_{\text{mean},d} + 2,00 \cdot U_{\text{mean},d} - 27824,44$
2a (i)	$f_m = -36,02 \cdot A - 14,07 \cdot FN + 0,89 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,i} + 0,05 \cdot U_{\min,i} - 45,98$
	$E_m = -4498,54 \cdot A + 145,37 \cdot FN + 2585,26 \cdot R + 7,44 \cdot v_{\text{mean},i} + 7,05 \cdot U_{\text{mean},i} - 24266,37$
2b (d)	$f_m = -35,09 \cdot A + 1,90 \cdot FN - 10,83 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,d} + 0,04 \cdot U_{\min,d} + 0,07 \cdot \rho_{TP} - 99,80$
	$E_m = -5093,92 \cdot A + 4951,40 \cdot FN - 808,10 \cdot R + 1,40 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 20,44 \cdot \rho_{TP} - 5648,11$
2b (i)	$f_m = -36,64 \cdot A - 8,69 \cdot FN - 4,86 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,i} + 0,01 \cdot U_{\min,i} + 0,06 \cdot \rho_{TP} - 76,97$
	$E_m = -4922,47 \cdot A + 4142,83 \cdot FN + 795,77 \cdot R + 1,24 \cdot E_{\text{dyn,mean},i} - 15,60 \cdot \rho_{TP} + 6669,83$
3 (d)	$f_m = -36,64 \cdot A + 3,85 \cdot FN - 24,59 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,d} + 0,04 \cdot U_{\min,d} + 0,01 \cdot \rho_{BK} - 58,68$
	$E_m = -5505,28 \cdot A + 2686,49 \cdot FN - 1822,37 \cdot R + 1,44 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 41,11 \cdot \rho_{BK} + 16413,86$
3 (i)	$f_m = -35,37 \cdot A - 9,33 \cdot FN - 27,79 \cdot R + 0,02 \cdot v_{\min,d} + 0,05 \cdot U_{\min,d} + 0,02 \cdot \rho_{BK} - 48,52$
	$E_m = -4999,29 \cdot A + 4106,75 \cdot FN - 944,20 \cdot R + 1,41 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 37,55 \cdot \rho_{BK} + 15954,43$
Prüfreihe „Eiche“	
2a (d)	$f_m = -25,02 \cdot A - 30,93 \cdot FN - 22,43 \cdot R + 0,03 \cdot v_{\min,d} - 0,004 \cdot U_{\min,d} - 64,64$
	$E_m = -1907,09 \cdot A - 102,03 \cdot FN - 381,27 \cdot R + 7,68 \cdot v_{\text{mean},d} + 0,16 \cdot U_{\text{mean},d} - 21288,38$
2a (i)	$f_m = -19,85 \cdot A - 19,93 \cdot FN - 19,52 \cdot R + 0,03 \cdot v_{\min,i} + 0,02 \cdot U_{\min,i} - 74,18$
	$E_m = -1140,92 \cdot A + 2165,54 \cdot FN - 1536,67 \cdot R + 8,00 \cdot v_{\text{mean},i} - 0,23 \cdot U_{\text{mean},i} - 22292,03$
2b (d)	$f_m = -20,43 \cdot A - 22,66 \cdot FN - 19,44 \cdot R + 0,005 \cdot E_{\text{dyn,min},d} - 0,10 \cdot \rho_{TP} + 60,69$
	$E_m = -1993,12 \cdot A - 1728,29 \cdot FN - 1783,53 \cdot R + 1,21 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 12,13 \cdot \rho_{TP} + 5181,10$
2b (i)	$f_m = -17,61 \cdot A - 15,49 \cdot FN - 17,98 \cdot R + 0,01 \cdot E_{\text{dyn,min},i} - 0,09 \cdot \rho_{TP} + 56,83$
	$E_m = -1302,25 \cdot A - 449,76 \cdot FN - 1398,43 \cdot R + 1,27 \cdot E_{\text{dyn,mean},i} - 10,87 \cdot \rho_{TP} + 4127,75$
3 (d)	$f_m = -21,13 \cdot A - 26,35 \cdot FN - 20,41 \cdot R + 0,005 \cdot E_{\text{dyn,min},d} - 0,07 \cdot \rho_{BK} + 44,53$
	$E_m = -2263,01 \cdot A - 965,82 \cdot FN - 2269,79 \cdot R + 1,19 \cdot E_{\text{dyn,mean},d} - 13,56 \cdot \rho_{BK} + 6369,03$
3 (i)	$f_m = -18,69 \cdot A - 18,60 \cdot FN - 19,47 \cdot R + 0,005 \cdot E_{\text{dyn,min},i} - 0,07 \cdot \rho_{BK} + 38,01$
	$E_m = -1661,99 \cdot A + 527,26 \cdot FN - 2017,90 \cdot FN + 1,26 \cdot E_{\text{dyn,mean},i} - 11,46 \cdot \rho_{BK} + 4644,13$

Tabelle A. 9: Regressionsbeziehungen zwischen den Zielgrößen und deren Schätzwerten

Holzart	Sortierstufe	Regressionsgleichung	Korrelationskoeffizient	
Fichte	SGL 2a (dir)	$f_m = 0,97 \cdot IP + 1,26 \cdot t - 14,06$	$r = 0,502$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP + 2,18 \cdot 10^{-11}$	$r = 0,790$	
	SGL 2a (ind)	$f_m = 1,04 \cdot IP - 6,14 \cdot t - 14,10$	$r = 0,497$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP + 2,18 \cdot 10^{-11}$	$r = 0,796$	
	SGL 2b (dir)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 7,82 \cdot 10^{-14} - t \cdot 13,91$	$r = 0,515$	
		$E_m = 1,01 \cdot IP - 664,27$	$r = 0,841$	
	SGL 2b (ind)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 4,98 \cdot 10^{-14} - t \cdot 14,01$	$r = 0,505$	
		$E_m = 1,02 \cdot IP - 1137,27$	$r = 0,849$	
	SGL 3 (dir)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 7,11 \cdot 10^{-15} - t \cdot 13,95$	$r = 0,535$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 452,60$	$r = 0,869$	
	SGL 3 (ind)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 5,68 \cdot 10^{-14} - t \cdot 14,03$	$r = 0,527$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 837,81$	$r = 0,877$	
	Kiefer	SGL 2a (dir)	$f_m = 1,00 \cdot IP - 7,11 \cdot 10^{-14} - t \cdot 13,73$	$r = 0,707$
			$E_m = 1,00 \cdot IP - 3,46 \cdot 10^{-11}$	$r = 0,817$
SGL 2a (ind)		$f_m = 1,00 \cdot IP - 1,14 \cdot 10^{-13} - t \cdot 13,56$	$r = 0,716$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 3,82 \cdot 10^{-11}$	$r = 0,816$	
SGL 2b (dir)		$f_m = 1,00 \cdot IP - 5,68 \cdot 10^{-14} - t \cdot 12,54$	$r = 0,743$	
		$E_m = 0,99 \cdot IP - 284,13$	$r = 0,848$	
SGL 2b (ind)		$f_m = 1,00 \cdot IP - 5,68 \cdot 10^{-14} - t \cdot 12,56$	$r = 0,742$	
		$E_m = 0,99 \cdot IP - 561,03$	$r = 0,832$	
SGL 3 (dir)		$f_m = 1,00 \cdot IP - 2,13 \cdot 10^{-14} - t \cdot 14,00$	$r = 0,702$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 464,66$	$r = 0,827$	
SGL 3 (ind)		$f_m = 1,00 \cdot IP + 9,24 \cdot 10^{-14} - t \cdot 13,73$	$r = 0,716$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 770,74$	$r = 0,834$	
Eiche		SGL 2a (dir)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 4,97 \cdot 10^{-14} - t \cdot 11,96$	$r = 0,785$
			$E_m = 1,00 \cdot IP - 2,36 \cdot 10^{-11}$	$r = 0,869$
	SGL 2a (ind)	$f_m = 1,00 \cdot IP - 1,07 \cdot 10^{-13} - t \cdot 11,58$	$r = 0,800$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 7,28 \cdot 10^{-12}$	$r = 0,878$	
	SGL 2b (dir)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 4,97 \cdot 10^{-14} - t \cdot 12,16$	$r = 0,785$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP + 1,82 \cdot 10^{-12}$	$r = 0,872$	
	SGL 2b (ind)	$f_m = 1,00 \cdot IP - 7,11 \cdot 10^{-15} - t \cdot 11,76$	$r = 0,801$	
		$E_m = 0,99 \cdot IP - 311,99$	$r = 0,883$	
	SGL 3 (dir)	$f_m = 1,00 \cdot IP + 9,24 \cdot 10^{-14} - t \cdot 12,12$	$r = 0,788$	
		$E_m = 0,99 \cdot IP - 36,10$	$r = 0,876$	
	SGL 3 (ind)	$f_m = 1,00 \cdot IP - 2,13 \cdot 10^{-14} - t \cdot 12,12$	$r = 0,808$	
		$E_m = 1,00 \cdot IP - 1,46 \cdot 10^{-11}$	$r = 0,887$	

Tabelle A. 10: Grenzwerte für den Sortierparameter

	Holzart	Festigkeits- klasse nach DIN EN 338	Grenzwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]					
			SGL ...					
			2a (dir)	2a (ind)	2b (dir)	2b (ind)	3 (dir)	3 (ind)
Zielgröße: Biegebruchfestigkeit	Fichte	C18	41	46	41	41	41	41
		C24	47	51	47	47	47	47
		C30	53	57	53	53	53	53
		C35	58	62	58	58	58	58
		C40	64	67	63	63	63	63
	Kiefer	C18	41	40	39	39	41	41
		C24	47	46	45	45	47	47
		C30	53	52	51	51	53	53
		C35	58	57	56	56	58	58
		C40	63	62	61	61	63	63
	Eiche	D18	41	37	38	37	38	38
		D30	53	49	50	49	50	50
		D35	58	54	55	54	55	55
		D40	63	59	60	59	60	60
		D45	68	64	65	64	65	65
Zielgröße: statischer Biege-Elastizitätsmodul	Fichte	C18	9000	9000	9500	9900	9400	9800
		C24	11000	11000	11500	11850	11400	11800
		C30	12000	12000	12500	12850	12400	12800
		C35	13000	13000	13500	13800	13400	13800
		C40	14000	14000	14500	14800	14400	14800
	Kiefer	C18	9000	9000	9400	9600	9400	9700
		C24	11000	11000	11400	11600	11400	11700
		C30	12000	12000	12400	12600	12400	12700
		C35	13000	13000	13400	13600	13400	13700
		C40	14000	14000	14400	14600	14400	14700
	Eiche	D18	9400	9500	9000	9900	9600	9600
		D30	10900	11000	10500	11400	11200	11200
		D35	11900	12000	11500	12400	12200	12200
		D40	12900	13000	12500	13400	13200	13200
		D45	13400	13500	13000	14000	13800	13800

**Anlage 5 – Vorschlag für eine Richtlinie zur Durchführung der in situ-Festigkeitssortierung**

---

# **Richtlinie für die in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen**

## **Einleitung**

Die nachfolgend beschriebene Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung dient der Ermittlung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen. Sie basiert auf der Kombination einer visuellen Untersuchung und Sortierung der Bauteile mit der zerstörungsfreien und -armen Messung von Materialkennwerten, welche in engem Zusammenhang mit den Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten von Holz stehen. Die Bewertung der Materialqualität erfolgt über die Berechnung eines sogenannten Sortierparameters, anhand dessen eine Zuordnung der untersuchten Bauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 möglich ist.

Die systematischen Materialuntersuchungen, auf Grundlage derer die Sortiermethodik abgeleitet wurde, haben ergeben, dass durch die kombinierte Bewertung von visuell erfassbaren Wuchsmerkmalen und zerstörungsfrei/-arm messbaren Materialeigenschaften eine genaue und zuverlässige Ermittlung der Materialqualität möglich ist.

## **1 Anwendungsbereich**

Diese Richtlinie dient der Festlegung von Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Durchführung einer Festigkeitssortierung von Holzbauteilen im eingebauten Zustand. Mit Hilfe der beschriebenen Methoden soll eine genaue und zuverlässige Erfassung und Bewertung der Materialqualität von Holzbauteilen ermöglicht werden. Hierdurch können Tragfähigkeitsdefizite und -reserven aufgedeckt und bei der Bewertung der Trag- und Funktionsfähigkeit bestehender Konstruktionen berücksichtigt werden. Auf diesem Wege soll eine fachgerechte, substanzschonende und wirtschaftliche Instandhaltung und -setzung bestehender, historischer und denkmalgeschützter Konstruktionen ermöglicht werden.

Die Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung gilt für alle Holzbauteile aus Nadel- (Fichten-/Kiefernholz) und Laubholz (Eichenholz) mit rechteckigem Querschnitt in zimmermannsmäßig und ingenieurmäßig ausgeführten Konstruktionen. Eine Anwendung für Brettschichtholzbauteile, Duo-/Trio--Balken und Holzwerkstoffe ist nicht vorgesehen.

## **2 Weiterführende Normen und Regelwerke**

Diese Richtlinie gilt im Zusammenhang mit den nachfolgend aufgelisteten Normen.

*DIN 4074-1 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz*

*DIN 4074-3 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 3: Apparate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von Schnittholz*

*DIN 4074-5 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz*

*DIN 20000-5:2016 – Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt*

*DIN EN 338 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*

*DIN EN 384 – Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*

*DIN EN 408 – Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*

*DIN EN 1310 – Rund- und Schnittholz – Messung der Merkmale*

*DIN EN 1912 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten*

*DIN EN 13183-1 – Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*

*DIN EN 13183-2 – Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren*

*DIN EN 14081-1 – Holzbauwerke – nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

*DIN EN 17121:2019 – Erhaltung des kulturellen Erbes – Historische Holzkonstruktionen – Leitlinien für die Bewertung vor Ort von tragenden Holzkonstruktionen*

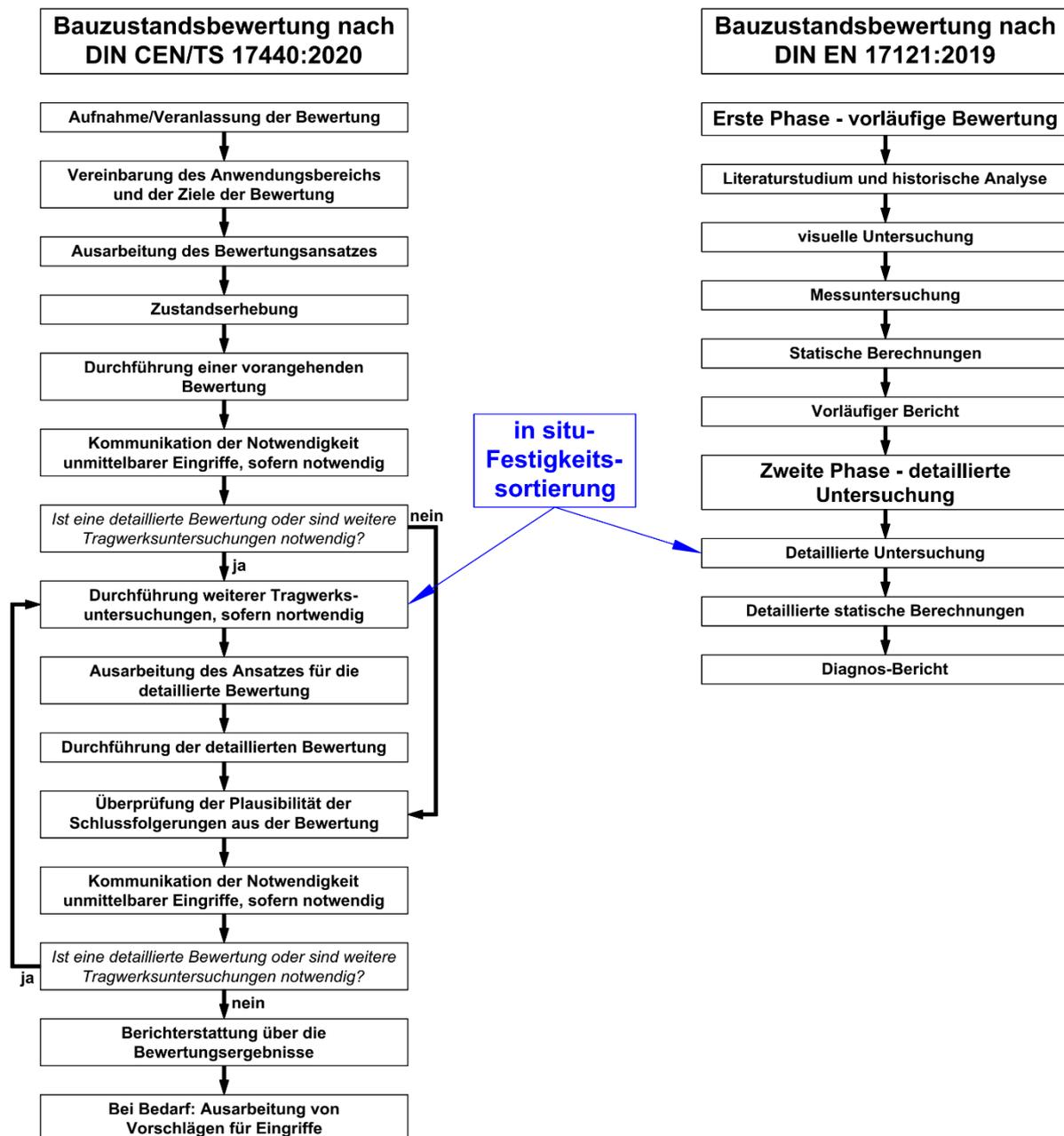
*DIN CEN/TS 17440:2020 – Bewertung und Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken*

In der Richtlinie wird sowohl datiert als auch undatiert auf weitere Normen Bezug genommen. Bei datierten Verweisen gelten die Festlegungen der jeweiligen Fassung. Bei undatierten Verweisen gelten die Festlegungen der letzten Fassung zum Erscheinungsdatum dieser Richtlinie

### **3 Einordnung der Methodik in bestehende Regelwerke**

Die in dieser Richtlinie beschriebene Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung steht im Kontext mit den bauaufsichtlich eingeführten Normen für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz (DIN EN 14081-1, DIN 4074-1/-3/-5 und DIN 20000-5, s. a. MVV TB Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen).

Der Einsatz ist im Rahmen der weiterführenden, detaillierten Untersuchungen hinsichtlich der Bauzustandsbewertung bestehender Konstruktionen entsprechend der DIN EN 17121 und DIN CEN/TS 17440 vorgesehen (s. a. Bild 1).



**Bild 1: Integration der Methodik zur in situ-Festigkeits-sortierung in die Bauzustandsbewertung nach DIN CEN/TS 17440:2020 und DIN EN 17121:2019**

## 4 Grundlagen der Methodik zur in situ-Festigkeits-sortierung

Die in dieser Richtlinie beschriebene Methodik zur in situ-Festigkeits-sortierung von Holzbau- teilen in bestehenden Konstruktionen basiert auf dem kombinierten Einsatz der visuellen Sor- tierung und zerstörungsfreien sowie -armen Mess- und Prüfmethode.

Die Methodik ist in drei Stufen unterteilt, wobei der Umfang der durchzuführenden Unters- uchungen und Messung von Stufe zu Stufe zunimmt. Dieser leitet sich aus der Funktion der zu untersuchenden Bauteile in der Konstruktion beziehungsweise deren denkmalpflegerische Relevanz ab. Des Weiteren wird der Erhaltungszustand der Bauteile in die Festlegung der anzuwendenden Stufe einbezogen. Das Stufenkonzept ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

<b>Sortierstufe SGL 3 - apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchungen: visuelle Sortierung, zerstörungsfreie Messung dynamischer Kenngrößen, zerstörungsarme Ermittlung der Rohdichte</li> <li>- Anwendungsbereich: Bauteile und Konstruktionen mit hoher Beanspruchung und/oder denkmalpflegerischem Wert; Bauteile und Konstruktionen mit starken Schädigungen</li> </ul>	
<b>Sortierstufe SGL 2 - apparativ unterstützte visuelle Festigkeitssortierung</b>	
<b>Sortierstufe SGL 2a</b>	<b>Sortierstufe SGL 2b</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchungen: visuelle Sortierung, zerstörungsfreie Messung dynamischer Kenngrößen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchungen: visuelle Sortierung, zerstörungsfreie Messung dynamischer Kenngrößen, zerstörungsfreie Ermittlung der Rohdichte</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anwendungsbereich: Bauteile und Konstruktionen mit normaler Beanspruchung und/oder ohne denkmalpflegerischen Wert; Bauteile und Konstruktionen mit geringer Schädigungen</li> </ul>	
<b>Sortierstufe SGL 1 - visuelle Festigkeitssortierung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchungen: visuelle Sortierung</li> <li>- Anwendungsbereich: Bauteile und Konstruktionen mit geringer/normaler Beanspruchung und/oder ohne denkmalpflegerischen Wert; Bauteile und Konstruktionen mit geringer Schädigungen</li> </ul>	

**Bild 2: Stufenkonzept der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung**

## 5 Voraussetzungen und Anforderungen an die Durchführung

### 5.1 Allgemeine Voraussetzungen

Um eine umfassende und zuverlässige Bewertung der Materialqualität zu ermöglichen, muss die Zugänglichkeit und Einsehbarkeit der Holzbauteile gewährleistet sein. Dies betrifft zum einen die Sicherstellung der handnahen Erreichbarkeit der Holzbauteile. Hierzu können Rückbaumaßnahmen sowie das Einrichten entsprechender Arbeitsgerüste und Laufstege notwendig werden.

Des Weiteren sollten die Holzbauteile von etwaigen Schädigungen durch holzerstörende Organismen (Fraß-/Fäuleschäden) befreit werden. Die Feststellung derartiger Schädigungen ist im Zuge der vorläufigen Bauzustandsuntersuchungen im Sinne der DIN EN 17121:2019 und DIN CEN/TS 17440:2020 möglich. Die Freilegung kann beispielsweise durch Bebeilen der Holzbauteile bis auf die ungeschädigten Restquerschnitte erfolgen. Hiernach ist eine zuverlässige Beurteilung deren Materialqualität und Tragfähigkeit möglich.

### 5.2 Messung der visuell erfassbaren Wuchs- und Bauteilmerkmale

Im Zuge der in dieser Richtlinie beschriebenen in situ-Festigkeitssortierung sind die wesentlichen festigkeits- und tragfähigkeitsbeeinflussenden Wuchs- und Bauteilmerkmale nach DIN 4074-1 und DIN 4074-5 zu erfassen. Konkret ist eine Messung der Ästigkeit, der Faserneigung und der vorhandenen (Schwind-)Risse erforderlich. Die Messung dieser Merkmale und Berechnung der Sortierkriterien erfolgt entsprechend der Festlegungen der DIN 4074-1, DIN 4074-5 und DIN EN 1310.

Darüber hinaus sind geometrische Sortiermerkmale wie Baumkante, Verformungen und Krümmungen zu erfassen. Deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit kann im Zuge statischer Berechnungen als Fehlflächen oder Außermittigkeit berücksichtigt werden. Weitere geometrische Bauteilmerkmale – wie beispielsweise lokal begrenzte Fehlflächen oder oberflächliche Beschädigungen sollten ebenfalls erfasst und dokumentiert werden.

Die nach DIN 4074-1 und DIN 4074-5 für neues Bauholz geltenden Sortiermerkmale Markröhre, Jahringbreite, Verfärbungen, Fäule und Insektenfraß sind für die in situ-Festigkeitssortierung nicht relevant und müssen nicht erfasst werden.

### **5.3 Messung der Holzfeuchtigkeit und des Umgebungsklimas**

Die Holzfeuchtigkeit und die klimatischen Umgebungsbedingungen müssen bei der Untersuchung der Holzbauteile erfasst werden, um die zerstörungsfrei und -arm gemessenen Materialeigenschaften gegebenenfalls auf Referenzbedingungen umzurechnen. Die Messungen sind entsprechend der Festlegungen der DIN EN 13183-2 (Schätzung durch elektrische Widerstandsmessung) vorzunehmen. Ist die Entnahme von Probenmaterial möglich, sollte die Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1 ermittelt werden.

### **5.4 Ermittlung zerstörungsfrei messbarer Materialeigenschaften**

Zusätzlich zu den visuell erfassbaren Wuchs- und Bauteilmerkmalen kommen in den Sortierstufe SGL 2 zerstörungsfreie Mess- und Prüfmethode zum Einsatz. Dabei werden sowohl dynamische Kenngrößen als auch die Rohdichte zerstörungsfrei ermittelt.

#### **5.4.1 Dynamische Kenngrößen**

Die dynamischen Kenngrößen werden mit Hilfe der Ultraschall-Impulslaufzeit erfasst. Zu deren Anwendung gelten die nachfolgenden Festlegungen.

##### **5.4.1.1 Kenngrößen**

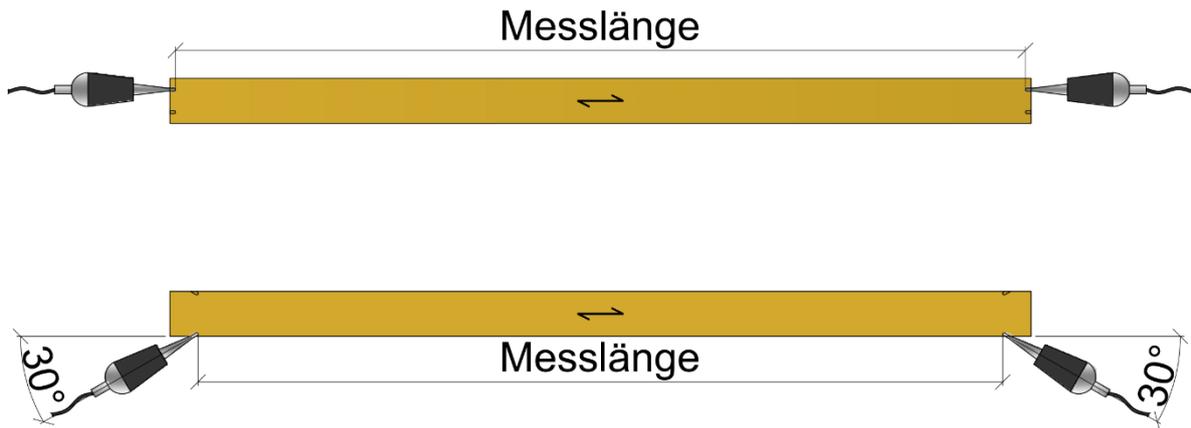
Als dynamische Kenngrößen werden die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschall-Impulses sowie die während der Messung übertragene maximale elektrische Spannung verwendet.

##### **5.4.1.2 Messgeräte**

Die Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung leitet sich aus umfassenden Untersuchungen ab, bei denen das Messgerät „Sylvatest Trio“ (Hersteller: CBT CBS, Lausanne/Schweiz) verwendet wurde. Dementsprechend gelten die in dieser Richtlinie beschriebenen Rahmenbedingungen nur für Messungen mit diesem Messgerät. Sollen andere Messgeräte zum Einsatz kommen, muss die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in systematischen Untersuchungen nachgewiesen werden. Gegebenenfalls sind zusätzliche Umrechnungen der gemessenen Kenngrößen auf Grundlage vergleichender Untersuchungen erforderlich.

##### **5.4.1.3 Messmethode**

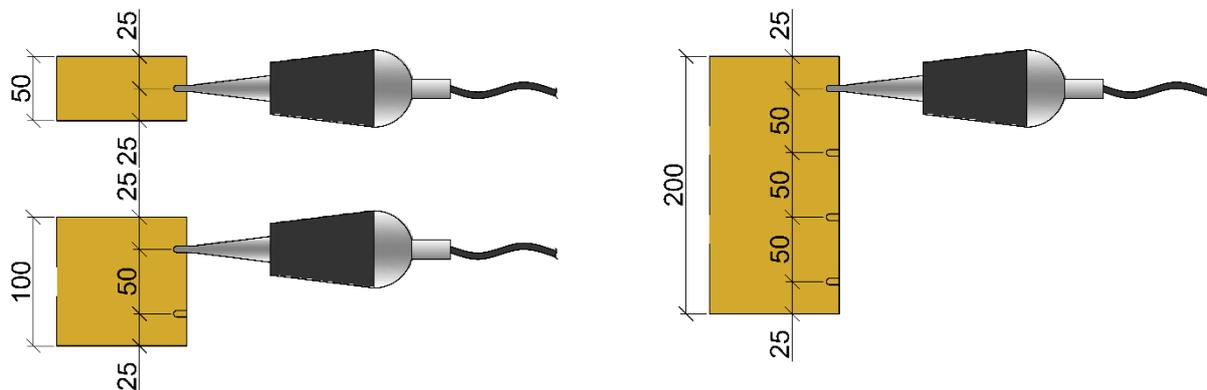
Für die Ermittlung der dynamischen Kenngrößen in situ hat sich die indirekte Messmethode bewährt (s. Bild 3). Die direkte Messmethode sollte ergänzend durchgeführt werden, sofern die Hirnholzenden der Holzbauteile im eingebauten Zustand zugänglich sind.



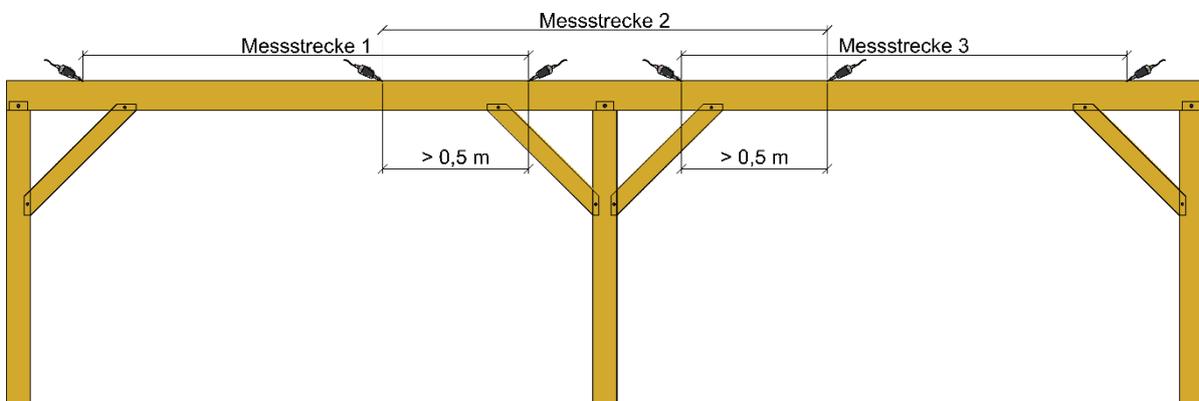
**Bild 3: Messmethoden der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung – oben: direkte Messung; unten: indirekte Messung**

#### 5.4.1.4 Messstellen und Messstrecken

Die Anzahl der Messstellen und Messstrecken je Bauteil ist abhängig von den Bauteildimensionen. Je 50 mm Querschnittsbreite und -höhe ist mindestens eine Messung vorzunehmen (s. Bild 4). Bei größeren Bauteillängen oder bei Bauteilen mit Zwischenauflagern wie bspw. Sparren und Pfetten ist die Aufteilung in mehrere, sich überlappende Messbereiche erforderlich (s. Bild 5). Unabhängig von deren Anzahl sollten die Messungen an allen zugänglichen Seiten der Holzbauteile vorgenommen werden.



**Bild 4: Anordnung der Messstellen für die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bezogen auf die Querschnittsbreite/-höhe**



**Bild 5: Beispielhafte Anordnung der Messstrecken für die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bezogen auf die Bauteillänge**

#### 5.4.1.5 Korrektur der Messergebnisse

Die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit muss auf eine Referenzbedingungen von  $\omega = 12\%$  Holzfeuchtigkeit und  $\vartheta = 20\text{ °C}$  Umgebungstemperatur umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt entsprechend Gl. (1) bis Gl. (3).

Korrekturformeln zur Berücksichtigung der Holzfeuchtigkeit:

$$v_{12} = v_{\omega} + 29 \cdot (\omega - 12) \quad (\text{für } \omega \leq 32\%) \quad \text{Gl. (1)}$$

$$v_{12} = 580 + v_{\omega} + 4 \cdot (\omega - 32) \quad (\text{für } \omega > 32\%) \quad \text{Gl. (2)}$$

mit:  $v_{12}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega = 12\%$ ;  $v_{\omega}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\omega \neq 12\%$ ;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Korrekturformel zur Berücksichtigung der Temperatur:

$$v_{20} = v_{\vartheta} \sqrt{1 - 0,0008 \cdot (\vartheta - 20)} \quad (\text{für } \omega = 12\%) \quad \text{Gl. (3)}$$

mit:  $v_{20}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\vartheta = 20\text{ °C}$ ;  $v_{\vartheta}$  ... Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei  $\vartheta \neq 20\text{ °C}$ ;  $\vartheta$  ... Temperatur;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

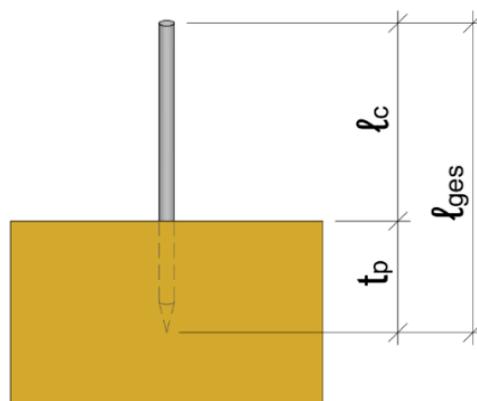
Die oben aufgeführten Gleichungen gelten mit hinreichender Genauigkeit für alle Nadel- und Laubholzarten. Liegen andere Anpassungsgleichungen vor, ist deren Verwendung möglich, sofern deren Anwendbarkeit durch umfassende labortechnische Untersuchungen nachgewiesen ist.

#### 5.4.2 Zerstörungsfreie Ermittlung der Rohdichte

Sollen mit Hilfe der Methodik zur in situ-Festigkeitssortierung nur Bauteilabschnitte – beispielsweise lokal begrenzte Schadstellen – oder Anschluss- und Verbindungsbereiche untersucht werden, kann in der Sortierstufe SGL 2b zusätzlich die zerstörungsfrei mit Hilfe der Eindringtiefmessung ermittelte Rohdichte einbezogen werden. Hierzu gelten folgende Festlegungen.

##### 5.4.2.1 Kenngrößen

Bei der Eindringtiefmessung wird ein Stahlstift mit einer definierten Schlagenergie in die Holzoberfläche eingetrieben. Als Kenngröße dient die Eindringtiefe (s. Bild 6). Aus dieser können Rückschlüsse auf die Rohdichte gezogen werden.



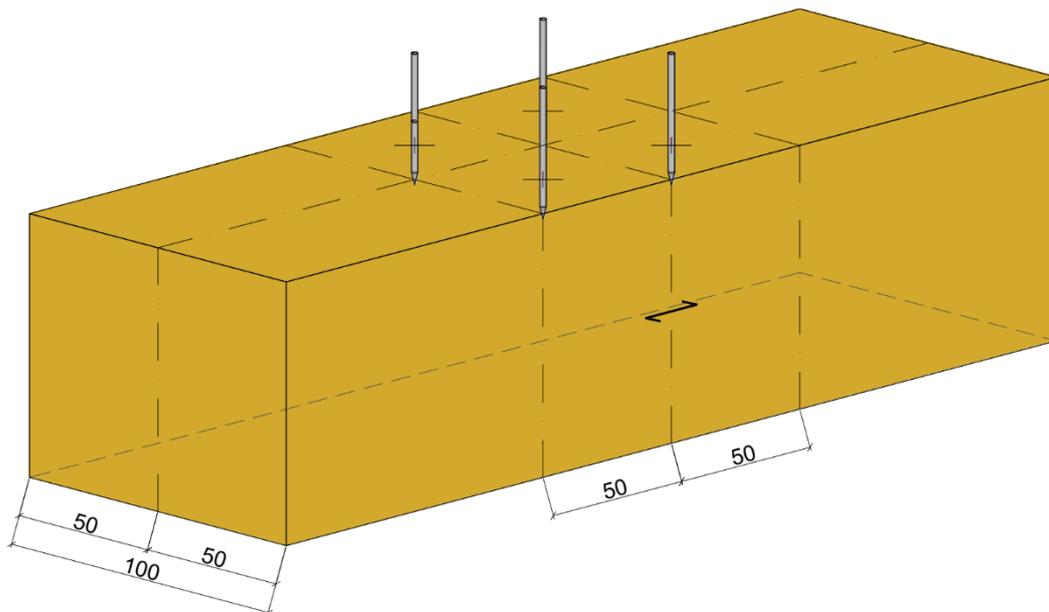
**Bild 6: Messprinzip der Eindringtiefmessung**

#### 5.4.2.2 Messgeräte

Die in Abschnitt 6.2 dieser Richtlinie beschriebene Berechnung der Sortierparameter erfolgt auf Grundlage der aus der Eindringtiefmessung rechnerisch ermittelten Rohdichte. Die hierzu zu verwendenden Berechnungsgleichungen leiten sich aus vergleichenden Untersuchungen mit dem Messgerät „Wood Pecker Wood Test Hammer“ (Hersteller: DRC Italia) ab. Die in dieser Richtlinie beschriebenen Rahmenbedingungen gelten nur für Messungen mit diesem Messgerät. Sollen andere Messgeräte zum Einsatz kommen, muss die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in systematischen Untersuchungen nachgewiesen werden. Gegebenenfalls sind zusätzliche Umrechnungen der gemessenen Kenngrößen auf Grundlage vergleichender Untersuchungen erforderlich.

#### 5.4.2.3 Durchführung der Messung

Die Messung der Einschlagtiefe erfolgt senkrecht zur Bauteiloberfläche. Die Anzahl der Messungen ist abhängig von der Größe des zu untersuchenden Bauteilabschnittes. Als Richtwert sollten mindestens vier benachbarte Messungen in einem Raster von 50 x 50 mm vorgenommen werden (s. Bild 7).



**Bild 7: Anordnung der Messpunkte für die Eindringtiefmessung**

Die Ermittlung der Eindringtiefe erfolgt entsprechend Bild 6. Die Länge des überstehenden Schaftes sollte auf 0,1 mm genau gemessen werden.

#### 5.4.2.4 Korrektur der Messergebnisse

Die gemessene Eindringtiefe muss auf eine Referenz-Holzfeuchtigkeit von  $\omega = 12\%$  umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt entsprechend Gl. (4).

$$t_{p,12} = t_{p,\omega} \cdot \left[ 1 - (0,0073 \cdot (\omega - 12)) \right] \quad \text{Gl. (4)}$$

mit:  $t_{p,12}$  ... Eindringtiefe bei  $\omega = 12\%$ ;  $t_{p,\omega}$  ... Eindringtiefe bei  $\omega \neq 12\%$ ;  $\omega$  ... Holzfeuchtigkeit

Die Korrektur-Gleichung gilt mit hinreichender Genauigkeit für alle Nadel- und Laubholzarten. Liegen andere Anpassungsgleichungen vor, ist deren Verwendung möglich, sofern deren Anwendbarkeit durch umfassende labortechnische Untersuchungen nachgewiesen ist.

#### 5.4.2.5 Berechnung der Rohdichte

Die Ermittlung der rechnerischen Rohdichte erfolgt mit Hilfe der nachfolgenden Gleichungen Gl. (5) bis Gl. (7).

$$\text{für Fichtenholz: } \rho_{tp} = -0,0086 \cdot t_p + 0,6541 \quad \text{Gl. (5)}$$

$$\text{für Kiefernholz: } \rho_{tp} = -0,0123 \cdot t_p + 0,7981 \quad \text{Gl. (6)}$$

$$\text{für Eichenholz: } \rho_{tp} = -0,019 \cdot t_p + 0,962 \quad \text{Gl. (7)}$$

mit:  $\rho_{tp}$  ... rechnerische Rohdichte [ $\text{g/cm}^3$ ];  $t_p$  ... gemessene Eindringtiefe [mm]

## 5.5 Ermittlung zerstörungswarm messbarer Materialeigenschaften

Besteht die Möglichkeit, Probenmaterial aus den Holzbauteilen zu entnehmen, ist eine Festigkeitssortierung in der Sortierstufe SGL 3 möglich. Hierbei werden die in der Sortierstufe SGL 2 durchgeführten zerstörungsfreien Untersuchungen durch die zerstörungswarm ermittelte Rohdichte (Bohrkernverfahren) ersetzt. An dem entnommenen Probenmaterial können neben der Rohdichte auch weitere Materialeigenschaften ermittelt werden.

### 5.5.1 Ermittlung der Rohdichte

Die Ermittlung der Rohdichte von Bohrkernproben erfolgt grundlegend entsprechend den Festlegungen der DIN EN 408. Darüber hinaus werden folgende Festlegungen getroffen.

#### 5.5.1.1 Entnahme der Bohrkernproben

Die Entnahme des Probenmaterials sollte mittels handelsüblicher Zapfenschneider oder Zuwachsbohrer senkrecht zur Faserrichtung erfolgen. In der Praxis haben sich Proben mit  $\varnothing$  15 mm bewährt. Die Entnahmestelle sollte repräsentativ für das gesamte Bauteil sein und sollte innerhalb des Messbereiches der Ultraschall-Impulszeitmessung liegen. Die entnommenen Bohrkernproben müssen analog den Festlegungen der DIN EN 408 bezüglich der Bestimmung der Rohdichte von Holzbauteilen frei von Merkmalen wie beispielsweise Ästen, Risse, Harzgallen oder ähnlicher Strukturstörungen sein. Des Weiteren müssen die Bohrkernproben in größtmöglicher Länge entnommen werden, um den natürlichen Streubereich der Rohdichte zu erfassen. Eine Länge von 20 mm sollte nicht unterschritten werden. Hinsichtlich der erforderlichen Probenanzahl sollten je 2 lfd. Metern Bauteillänge mindestens 4 Bohrkernproben entnommen werden. Generell muss bei der Probenentnahme darauf geachtet werden, dass die Bauteile mit Hinblick auf deren Trag- und Funktionsfähigkeit nicht unverhältnismäßig geschwächt werden. Die Bohrlöcher müssen in jedem Fall durch passgenau eingeklebte Holzpfropfen verschlossen werden.

### 5.5.1.2 Ermittlung der Rohdichte

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgt gravimetrisch in Anlehnung an DIN EN 384, das heißt durch Aufnahme von Masse und Volumen der Bohrkernproben. Dies sollte mit einer Messgenauigkeit von 0,01 mm und 0,01 g erfolgen.

Die Bohrkernproben sind im Vorfeld unter Klimabedingungen von  $\vartheta = 20 \text{ °C}$  Lufttemperatur und  $\varphi = 65 \text{ %}$  rel. Luftfeuchtigkeit zu klimatisieren. Bei den meisten Holzarten stellt sich dabei eine Holzfeuchtigkeit von  $\omega \approx 12 \text{ %}$  ein. Ist dies nicht möglich, sollte die Holzfeuchtigkeit der Bohrkernproben im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1 ermittelt werden.

Die Anpassung der Rohdichte auf eine Referenzholzfeuchtigkeit von  $\omega = 12 \text{ %}$  kann entsprechend der Festlegungen der DIN EN 384 erfolgen.

### 5.5.2 Ermittlung weiterer Materialeigenschaften und Merkmale

Neben der Ermittlung der Rohdichte können Bohrkernproben auch für weitere Untersuchungen verwendet werden, wie bspw. zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1, zur Ermittlung der Druckfestigkeit oder chemische Laboruntersuchungen. Ebenso sind Holzartbestimmungen, Dendrochronologie, holzschutztechnische Untersuchungen zur Schädigung durch holzzerstörende Organismen möglich.

Diese Untersuchungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Richtlinie. Deren Ergebnisse fließen nicht in die Festigkeitssortierung entsprechend Abschnitt 6 dieser Richtlinie ein. Sie können jedoch genutzt werden, um zusätzliche Erkenntnisse über den Erhaltungszustand der Holzbauteile und deren Eigenschaften zu gewinnen.

## 6 Festigkeitssortierung

### 6.1 Allgemeines

#### 6.1.1 Sortierstufe SGL 1

Die Festlegung der rechnerisch anzusetzenden Kennwerte kann in der Sortierstufe SGL 1 über die Zuordnung der visuell nach DIN 4074-1/-5 festgelegten Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 entsprechend den Regelungen der DIN EN 1912 erfolgen.

#### 6.1.2 Sortierstufen SGL 2 und SGL 3

Die Festlegung der rechnerisch anzusetzenden Materialkennwerte erfolgt anhand eines Sortierparameters. Hierbei handelt es sich um einen Schätzwert für die Materialeigenschaften.

### 6.2 Berechnung der Sortierparameter

#### 6.2.1 Vorbemerkungen

Die Berechnung der Sortierparameter erfolgt mittels Regressionsgleichungen, die sich aus den Beziehungen zwischen den zerstörungsfrei und -arm ermittelten Sortierkriterien und Kenngrößen sowie der Steifigkeit von Holzbauteilen ergeben.

Zur rechnerischen Ermittlung der Sortierparameter ist gegebenenfalls die Verwendung eines Korrekturfaktors zur Absicherung der rechnerischen ermittelten Sortierparameter auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens notwendig. Der Ansatz dieses Korrekturfaktors ist beispielsweise erforderlich, wenn das untersuchte Holzbauteil lokale Schwächungen („Sollbruchstellen“) aufweist, welche nicht in die Sortierentscheidung eingehen aber das Trag- und

Bruchverhalten beeinflussen können. Dies ist beispielsweise bei Astansammlungen, starker Rissbildung und ungünstigen Faserneigungen im Zugbereich – vor allem in den hochbeanspruchten Bauteilabschnitten, Ästen und Astansammlungen im Bereich von Lasteinleitungen, lokale Querschnittschwächungen (bspw. Einschnitte/Kerven/etc.), und oberflächlichen Beschädigungen der Randfasern (bspw. Beilkerben) notwendig.

### 6.2.2 Sortierstufe SGL 2

Der Sortierparameter wird nach der Gleichungen Gl. (8) und (9) berechnet.

$$IP_{SGL2a} = k_{vis} \cdot (a \cdot A + b \cdot FN + c \cdot R + d \cdot v_{mean} + e \cdot U_{mean} - f) \quad \text{Gl. (8)}$$

$$IP_{SGL2b} = k_{vis} \cdot (a \cdot A + b \cdot FN + c \cdot R + d \cdot E_{dyn} + e \cdot \rho_{mean} - f) \quad \text{Gl. (9)}$$

mit:  $IP_{SGL2a/b}$  ... Sortierparameter;  $k_{vis}$  ... Korrekturfaktor zur Absicherung der rechnerischen ermittelten Sortierparameter auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens ( $k_{vis} = 0,15$ );  $a...f$  ... Koeffizienten und Konstante nach Tabelle 1 und 2 ;  $A$  ... Ästigkeit [°];  $FN$  ... Faserneigung [°];  $R$  ... Risstiefe [°];  $v_{mean}$  ... mittlere Schallgeschwindigkeit aus direkter oder indirekter Messung [m/s];  $U_{mean}$  ... mittlere übertragene elektrische Spannung aus direkter oder indirekter Messung [mV];  $E_{dyn}$  ... dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>];  $\rho_{mean}$  ... mittlere Rohdichte, errechnet aus gemessener Eindringtiefe [kg/m<sup>3</sup>]

**Tabelle 1: Koeffizienten und Konstanten zur Berechnung der Sortierparameter – SGL 2a**

Sortierstufe SGL 2a							
	Holzart	a	b	c	d	e	f
Direkte Messung	Fichte	-3179,87	2158,02	-1814,55	8,46	-2,29	-33338,18
	Kiefer	-5236,32	3248,95	2896,58	8,04	2,00	-27824,44
	Eiche	-1907,09	-102,03	-1381,27	7,68	0,16	-21288,38
Indirekte Messung	Fichte	-2512,07	5558,06	-2470,64	7,70	-1,58	-28760,08
	Kiefer	-4498,54	145,37	2585,26	7,44	7,05	-24266,37
	Eiche	-1140,92	2165,54	-1536,67	8,00	-0,23	-22292,03

**Tabelle 2: Koeffizienten und Konstanten zur Berechnung der Sortierparameter –SGL 2b**

Sortierstufe SGL 2b							
	Holzart	a	b	c	d	e	f
Direkte Messung	Fichte	-2951,41	1876,32	-3841,61	1,40	-10,48	-955,79
	Kiefer	-5093,92	4951,4	-808,10	1,40	-20,44	5648,11
	Eiche	-1993,12	-1728,29	-1783,53	1,21	-12,13	5181,10
Indirekte Messung	Fichte	-2466,13	4806,19	-4282,60	1,34	-6,05	-877,00
	Kiefer	-4922,47	4142,83	795,77	1,24	-15,60	6669,83
	Eiche	-1302,25	-449,76	-1398,43	1,27	-10,87	4127,75

Die Gleichungen Gl. (8) und (9) leiten sich aus systematischen Untersuchungen unter Verwendung der in Abschnitt 5.4 angegebenen Messmethoden und -geräte ab. Eine unmittelbare Verwendung der Gleichungen zur Berechnung des Sortierparameters anhand von Messergebnissen anderer Methoden ist nicht möglich.

### 6.2.3 Sortierstufe SGL 3

Die Berechnung des Sortierparameters erfolgt nach der Gleichungen Gl. (10).

$$IP_{SGL3} = k_{vis} \cdot (a \cdot A + b \cdot FN + c \cdot R + d \cdot E_{dyn} + e \cdot \rho_{mean} - f) \quad \text{Gl. (10)}$$

mit:  $IP_{SGL3}$  ... Sortierparameter;  $k_{vis}$  ... Korrekturfaktor zur Absicherung der rechnerischen ermittelten Sortierparameter auf Grundlage des prognostischen Bruchverhaltens ( $k_{vis} = 0,10$ );  $a \dots f$  ... Koeffizienten und Konstante nach Tabelle 3;  $A$  ... Ästigkeit [°];  $FN$  ... Faserneigung [°];  $R$  ... Risstiefe [mm];  $E_{dyn}$  ... dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>];  $\rho_{mean}$  ... mittlere Rohdichte der Bohrkernproben [kg/m<sup>3</sup>]

**Tabelle 3: Koeffizienten und Konstanten zur Berechnung der Sortierparameter – Sortierstufe SGL 3 (Zielgröße: statischer Biege-Elastizitätsmodul)**

Sortierstufe SGL 3							
	Holzart	a	b	c	d	e	f
Direkte Messung	Fichte	-3251,79	328,04	-2710,03	1,42	-24,10	4817,95
	Kiefer	-5505,28	2686,49	-1822,37	1,44	-41,11	16413,86
	Eiche	-2263,01	-965,82	-2269,79	1,19	-13,56	6369,03
Indirekte Messung	Fichte	-2863,33	2005,79	-2948,63	1,33	-15,97	3832,15
	Kiefer	-4999,29	4106,75	-944,20	1,41	-37,55	15954,43
	Eiche	1661,99	527,26	-2017,80	1,26	-11,46	4644,13

Die Gleichung Gl. (10) leiten sich aus systematischen Untersuchungen unter Verwendung der in Abschnitt 5.4 angegebenen Messmethoden und -geräte ab. Eine unmittelbare Verwendung zur Berechnung des Sortierparameters anhand von Messergebnissen anderer Methoden ist nicht möglich.

### 6.3 Zuordnung zu den Festigkeitsklassen

Die Zuordnung der untersuchten Holzbauteile zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 erfolgt anhand der in Tabelle 4 aufgeführten Grenzwerte. Ein Holzbauteil kann immer dann einer Festigkeitsklasse zugeordnet werden, wenn der rechnerisch ermittelte Sortierparameter dem Grenzwert der entsprechenden Festigkeitsklasse entspricht.

**Tabelle 4: Grenzwerte des Sortierparameters zur Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338**

Holzart	Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Grenzwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]	
		direkte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung	indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung
SGL 2a			
Fichte	C18	9000	9000
	C24	11000	11000
	C30	12000	12000
	C35	13000	13000
	C40	14000	14000

Tabelle 4 (fortgesetzt)

Holzart	Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Grenzwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]	
		direkte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung	direkte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung
Kiefer	C18	9000	9000
	C24	11000	11000
	C30	12000	12000
	C35	13000	13000
	C40	14000	14000
Eiche	D18	9400	9500
	D30	10900	11000
	D35	11900	12000
	D40	12900	13000
	D45	13400	13500
SGL 2b			
Fichte	C18	9500	9900
	C24	11500	11850
	C30	12500	12850
	C35	13500	13800
	C40	14500	14800
Kiefer	C18	9400	9600
	C24	11400	11600
	C30	12400	12600
	C35	13400	13600
	C40	14400	14600
Eiche	D18	9000	9900
	D30	10500	11400
	D35	11500	12400
	D40	12500	13400
	D45	13000	14000
SGL 3			
Fichte	C18	9400	9800
	C24	11400	11800
	C30	12400	12800
	C35	13400	13800
	C40	14400	14800
Kiefer	C18	9400	9700
	C24	11400	11700
	C30	12400	12700
	C35	13400	13700
	C40	14400	14700

**Tabelle 4 (fortgesetzt)**

Holzart	Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Grenzwerte in den Sortierstufen [N/mm <sup>2</sup> ]	
		direkte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung	direkte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung
Eiche	D18	9600	9600
	D30	11200	11200
	D35	12200	12200
	D40	13200	13200
	D45	13800	13800

## 7 Dokumentation und Kennzeichnung

Die Ergebnisse der in situ-Festigkeitssortierung sollten in schriftlicher und zeichnerischer Form dokumentiert werden. Die Dokumentation muss nachvollziehbar erfolgen, sodass eine Zuordnung der Ergebnisse zu den jeweiligen Bauteilen problemlos möglich ist und mindestens folgende Angaben enthalten sein:

- Bezeichnung des Bauteils
- Bauteildimensionen, ggf. Angabe des sortierten Bereiches sofern nicht die gesamte Bauteillänge untersucht wurde
- Holzart und Holzfeuchtigkeit
- Festigkeitsklasse nach DIN EN 338

Eine beispielhafte Dokumentation kann der Anlage zu dieser Richtlinie entnommen werden.

Eine Kennzeichnung der nach der Festigkeit sortierten Bauteile im Sinne der DIN EN 14081-1:2019, Abschnitt 7.2 „Angaben entweder auf dem Holz (Verfahren A) oder auf der Verpackungseinheit (Verfahren B)“ ist nicht zwingend erforderlich. Die zu erstellende Dokumentation kann als Kennzeichnung im Sinne der DIN EN 14081-1:2019, Abschnitt 7.3 „Angaben in Unterlagen, die dem nach Festigkeit sortierten Bauholz für tragende Zwecke beiliegen“ betrachtet werden.

## 8 Qualifikation

Die Durchführung der in situ-Festigkeitssortierung erfordert eine besondere Fachkunde. Neben Kenntnissen über die normativen Regelungen bezüglich der Sortierung von Bauholz nach der Tragfähigkeit und die verwendeten Mess- und Prüfmethode ist eine umfassende Fachkunde über das Trag- und Bruchverhalten von Holzbauteilen notwendig.

Die besondere Fachkunde ist durch eine vom Deutschen Institut für Bautechnik e.V. zertifizierte Schulung nachzuweisen.

## Anlage – Beispiel-Dokumentation

<b>Dokumentation zur in situ-Festigkeitssortierung von Holzbauteilen</b>	
<b>I. Angaben zum Bauwerk</b>	
Name des Bauwerks:	
Ortsangabe:	
Bauwerksalter:	
Besonderheiten:	
<b>II. Angaben zur durchgeführten Festigkeitssortierung</b>	
Name der ausführenden Institution:	
Name des Sortierenden:	
Datum der Sortierung:	
Angewendete Sortierstufe:	<input type="checkbox"/> Sortierstufe SGL 1 <input type="checkbox"/> Sortierstufe SGL 2 <input type="checkbox"/> Sortierstufe SGL 3
Angewendete Methoden und Messgeräte:	<input type="checkbox"/> Erfassung visuell messbarer Merkmale <input type="checkbox"/> Ultraschall-Impulslaufzeitmessung <i>Messgerät:</i> <input type="checkbox"/> Eindringtiefenmessung <i>Messgerät:</i> <input type="checkbox"/> Bohrkernentnahme ( $\emptyset =$ mm)
<b>III. Angaben zum Holzbauteil</b>	
Bauteilbezeichnung:	
Position des Bauteils:	<i>Anmerkung: Position des Bauteils bspw. durch Auszug aus zeichnerischen Bestandsunterlagen darstellen</i>
Holzart:	
Bauteildimensionen:	b =            mm;    h =            mm;    l =            mm

Allgemeiner Zustand/ Besonderheiten/ holzschutztechnische Feststellungen:			
<b>IV. Messergebnisse</b>			
Umgebungsbedingungen:	Lufttemperatur	$\vartheta =$	°C
	relative Luftfeuchtigkeit	$\varphi =$	%
	<i>Messgerät:</i>		
Holzfeuchtigkeit: <i>Messung n. EN 13183-2</i>	Mittelere Holzfeuchte	$\omega =$	%
	<i>Messgerät:</i>		
Allgemeiner Zustand/ Besonderheiten/ holzschutztechnische Feststellungen/ Verformungen:			
Zeichnerische Darstellung			
<i>Vorderseite</i>			
<i>Unterseite</i>			
<i>Rückseite</i>			
<i>Oberseite</i>			

<b>Visuell messbare Merkmale</b>			
Ästigkeit:	max. Ast-Ø =	mm bezogen auf	mm Bauteilbreite
Risstiefe:	mittl. Risstiefe =	mm bezogen auf	mm Bauteilbreite
Faserneigung:	max. Faserneigung =	%	
<b>Ultraschall-Impulslaufzeitmessung</b>			
Messlänge:	ℓ =	m	
mittlere Impulslaufzeit:	t <sub>mean</sub> =	µs	
mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit:	v <sub>mean</sub> =	m/s	
mittlere übertragene elektrische Spannung:	U <sub>mean</sub> =	mV	
<b>Eindringtiefenmessung</b>			
mittlere Eindringtiefe:	t <sub>p</sub> =	mm	
<b>Bohrkernentnahme</b>			
mittlere Rohdichte:	ρ <sub>mean</sub> =	kg/m <sup>3</sup>	
mittlere Holzfeuchte:	ω <sub>mean</sub> =	%	
<b>IV. Berechnung des Sortierparameters</b>			
<b>Ausgangswerte</b>			
Visuell erfassbare Merkmale:	Ästigkeit:	A =	
	Risstiefe:	R =	
	Faserneigung:	FN =	
Ultraschall-Impulslaufzeitmessung: (Messwerte auf θ = 20 °C und ω = 12 % korrigiert)	Schallausbreitungs- geschwindigkeit:	v <sub>mean</sub> =	m/s
	übertragene elektr. Spannung:	U <sub>mean</sub> =	mV
	dynamischer Elastizitätsmodul:	E <sub>dyn</sub> =	N/mm <sup>2</sup>
Rohdichte: (Messwerte auf ω = 12 % korrigiert)	aus Eindringtiefe berechnet:	ρ <sub>tp</sub> =	kg/m <sup>3</sup>
	an Bohrkernproben gemessen:	ρ <sub>BK</sub> =	kg/m <sup>3</sup>
<b>Sortierparameter</b>			
für Sortierstufe SGL 2:	IP <sub>SGL2</sub> =	N/mm <sup>2</sup>	
für Sortierstufe SGL 3:	IP <sub>SGL3</sub> =	N/mm <sup>2</sup>	
<b>V. Sortierergebnis</b>			
in Sortierstufe SGL 1:	Festigkeitsklasse	nach DIN EN 338	
in Sortierstufe SGL 2:	Festigkeitsklasse	nach DIN EN 338	
in Sortierstufe SGL 3:	Festigkeitsklasse	nach DIN EN 338	

<b>V. Fotodokumentation</b>	