

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Analytische bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit (IBESS – A3)

der Forschungsstelle(n)

BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung Berlin

Das IGF-Vorhaben 17518 N/1 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)

wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Berlin, d. 29.04.2015

Prof. Dr. Uwe Zerbst

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 17518 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Zusammenfassung

Ziel des DFG/AiF-Forschungsclusters IBESS war die Entwicklung einer Methodik zur bruchmechanischen Ermittlung von Wöhlerkurven von Schweißverbindungen. Dem vorliegenden *Teilprojekt* A3 kamen dabei zwei Aufgaben zu: (a) die Entwicklung einer analytischen bruchmechanischen Methodik und (b) die Koordinierung des insgesamt acht Partner umfassenden Clusters. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der erstgenannten Aufgabe zusammen.

Eine bruchmechanische Methode zur Ermittlung der Wöhlerkurve von Schweißverbindungen muss in der Lage sein, Kurzrissswachstum zu beschreiben. Kurzrissswachstum bedeutet, dass das klassische ΔK -Konzept nicht anwendbar ist, und dass die graduelle Entwicklung der Riss-schließeffekte modelliert werden muss. Die erste Forderung wurde in der IBESS-Methode durch die Formulierung eines plastizitätskorrigierten ΔK_p auf der Basis etablierter elastisch-plastischer Bruchmechanikkonzepte, die hinsichtlich zyklischer Belastung angepasst wurden, realisiert. Das zweite Problem wurde durch die Anwendung der zyklischen R-Kurve (der Schwellenwert ΔK_{th} als Funktion der Risstiefe bei kurzen Rissen) gelöst. Das ist möglich, weil der Schwellenwert die Riss-schließeffekte abbildet.

Die Methode muss ferner die Bestimmung einer physikalisch relevanten Ausgangsrissgröße für die Bruchmechanikanalyse erlauben. Das wurde durch die Anwendung eines Rissarrestkonzepts unter Nutzung der zyklischen R-Kurve gelöst. Die Größe eines halbkreisförmig angenommenen Oberflächenrisses, der auf dem Spannungsniveau der Dauerfestigkeit gerade noch bzw. gerade nicht mehr arretiert, definiert die Untergrenze dieses Ausgangsrisses. Liegen größere Defekte vor, die als Risse betrachtet werden können – das war bei den in IBESS untersuchten Schweißverbindungen durchweg nicht der Fall –, dann übernehmen diese die Funktion des Ausgangsrisses.

Unter Nutzung desselben Prinzips war es möglich, die Dauerfestigkeit einer Schweißverbindung zu berechnen, eine Anwendung, die in IBESS ursprünglich nicht vorgesehen war. Definiert wurde die Dauerfestigkeit als diejenige Spannungsamplitude, bei der entweder aller Risse arretierten (d.h., eine Wachstumsgeschwindigkeit $da/dN \leq 10^{-8}$ mm/Schwingspiel aufweisen) oder bis 10^7 Schwingspielen kein Versagen eintrat.

Oberhalb des Spannungsniveaus der Dauerfestigkeit wurde ausgeprägtes Mehrfachrissswachstum entlang des Nahtübergangs beobachtet. Dem wurde in der IBESS-Methode dadurch Rechnung getragen, dass der Übergang in äquidistante Abschnitte eingeteilt wurde, von denen jeder eine andere lokale Geometrie zugewiesen bekam. Die relevanten Parameter waren neben der Ausgangsrissgröße der Nahtübergangsradius, der Nahtanstiegswinkel, die Nahtüberhöhung und die Sekundärrisstiefe (z.B. aufgrund von Einbrand oder der Rauigkeit der verschweißten Bleche). Die statistische Variation dieser Parameter wurde für die untersuchten Konfigurationen empirisch ermittelt. Sowohl die Bestimmung des Zeitfestigkeitsastes als auch der Dauerfestigkeit (nach obiger Definition) wurde unter Nutzung dieser Information statistisch durchgeführt, d.h. im Ergebnis wurden Streubänder der kritischen Schwingspielzahl bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Dauerfestigkeit erhalten.

Da die Rissinitiiierungspunkte in den Nahtübergängen lagen, wurde die Werkstoffcharakterisierung nicht nur am Grundwerkstoff, sondern auch an gefügesimulierten Proben für die Wärmeinflusszone vorgenommen. Ein weiterer wichtiger Eingangsparameter der Analyse waren die Schweißeigenstressungen, und zwar nicht nur nach dem Fertigungsprozess, sondern auch nach einer längeren Phase der zyklischen Belastung. Es erwies sich als wesentlich, dass die Eigenstressumlagerung maßgeblich vom Spannungsverhältnis R abhängt.

Die IBESS-Rechnungen wurden an insgesamt 33 Wöhlerkurven für drei Schweißverbindungsformen (Stumpf- und Kreuzstöße, Längssteifen) mit jeweils zwei unterschiedlichen Realisierungen des Nahtübergangs, drei Stähle (S355NL, S355J2+N, S960QL), im ungeglühten und spannungsarmgeglühten Zustand und bei Spannungsverhältnissen R von -1 bis +0,5 durchgeführt.

Im Sinne einer IBESS-Prozedur wurden eine (umfassende) Basis-Option und eine vereinfachte Option eingeführt und getestet. Zusätzlich wurden innerhalb beider Optionen Vereinfachungen vorgeschlagen, die die praktische Anwendung von IBESS erleichtern sollen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Motivation.....	6
2. Das IBESS-Modell.....	7
2.1 Stadien der Rissausbreitung bei zyklischer Belastung.....	7
2.2 Risschließeffekte.....	9
2.3 Rissspitzenbelastung mechanisch kurzer Risse.....	10
2.4 Gradueller Aufbau des Risschließeffekts physikalisch kurzer Risse.....	13
2.5 Die Ermittlung der Ausgangsrissgröße.....	16
2.5.1 Literaturdaten.....	16
2.5.2 Einschlussgrößen der untersuchten Stähle.....	19
2.5.3 Weitere Vorüberlegungen.....	20
2.5.4 Umsetzung im IBESS-Modell.....	22
2.6 Bestimmung der Bauteildauerfestigkeit und des Zeitfestigkeitsastes.....	24
2.6.1 Prinzip.....	24
2.6.2 Realsierung: Spannungs-Tiefen-Profile.....	28
2.6.3 Realsierung: Risskoaleszenz.....	30
2.6.4 Realisierung: Statistik.....	31
3. Eingangsdaten.....	31
3.1 Werkstoffdaten.....	31
3.1.1 Übersicht.....	31
3.1.2 Werkstoffgefüge.....	32
3.1.3 Wechselfestigkeit σ_w	32
3.1.4 Statische und zyklische-Spannungs-Dehnung-Kurven.....	34
3.1.5 Rissausbreitungskurven (da/dN - ΔK -Kurven)	39
3.1.6 Schwellenwert $\Delta K_{th,LC}$ gegen Rissausbreitung-Langriss.....	39
3.1.7 Schwellenwert gegen Rissausbreitung ΔK_{th} (a) - physikalisch kurzer Riss.....	41
3.1.8 Bruchwiderstand.....	50
3.2 Geometriedaten.....	52
3.2.1 Untersuchte Schweißverbindungsformen.....	52

3.2.2 Parameter der lokalen Schweißnahtgeometrie.....	53
3.2.3 Winkelverzug und Kantenversatz.....	55
3.2.4 Sekundärkerben.....	55
3.2.5 Praktische Aspekte und Schweißnahtgüte.....	56
3.3. Eigenspannungen.....	60
3.3.1 Entstehung und bruchmechanische Behandlung.....	60
3.3.2 Eigenspannungen am Nahtübergang.....	62
3.3.3 Beeinflussung der Eigenspannungen bei zyklischer Belastung.....	65
4. IBESS-Prozedur - Grundstruktur und Validierung.....	69
4.1 Einführung.....	69
4.2 Rissfortschritt.....	70
4.3 Schwingfestigkeit.....	73
4.3.1 Parameterstudie und Grundstruktur der IBESS-Prozedur.....	73
4.3.2 Validierung an Stumpfstößen.....	81
4.3.2.1 S355NL-Verbindungen.....	81
4.3.2.2 S355J2+N-Verbindungen.....	88
4.3.2.3 S960QL-Verbindungen.....	91
4.3.3 Validierung an Kreuzstößen.....	101
4.3.3.1 S355NL-Verbindungen.....	101
4.3.3.2 S960QL-Verbindungen.....	111
4.3.4 Validierung an Längssteifen.....	119
4.3.4.1 Vorbemerkung.....	119
4.3.4.2 S355NL-Verbindungen.....	119
4.4 Anbindung an Schweißnahtgüten.....	127

4.5 Dauerfestigkeit.....	128
5. Zusammenfassung und offene Fragen.....	130
6. Literatur.....	136
7. Anhänge.....	143
Anhang A: Überblick über das DFG/AiF-Forschungscluster IBESS.....	143
Anhang B: Spannungs-Tiefen-Profile (tabelliert; IBESS-Option A).....	143
Anhang C: Spannungs-Tiefen-Profile (Validierung der Parametergleichungen von IBESS-Option B.....	174
Anlage: Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis.....	180
Anlage: Ergebnistransfer.....	180

1. Einleitung, Motivation

Das vorliegende *Projekt (A3)* ist Teil des von DFG und AiF geförderten Forschungsclusters IBESS (Integrale Bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen). Kernaufgabe dieses Teilprojekts war die Entwicklung einer Methode zur analytischen bruchmechanischen Ermittlung der Schwingfestigkeit. Zugleich lag die Koordinierung des Gesamtclusters in den Händen von *Teilprojekt A3*. Eine Übersicht über alle Teilprojekte und die daran beteiligten Institutionen gibt **Anhang A**.

In der Präambel zum Forschungscluster IBESS hatten die Antragsteller ausgeführt: „Für Schweißverbindungen insbesondere von Platten mittlerer und großer Dicke wurde in zahlreichen Studien demonstriert, dass das Stadium der Rissbildung zumeist so kurz ist, so dass es ohne größeren Fehler vernachlässigt werden kann. Besteht die Lebensdauer aber im Wesentlichen aus den Rissausbreitungsstadien, so liegt es nahe, sie als bruchmechanische Restfestigkeit zu ermitteln. Dieser Gedanke ist nicht neu. Bereits vor 40 Jahren hat Stephen Maddox vom *Welding Institute* Cambridge darauf hingewiesen, dass die Lebensdauerermittlung bei Schweißnähten eigentlich eine bruchmechanische Fragestellung ist [1], und seither haben sich weitere Autoren dieser Aussage angeschlossen (s. die Übersicht in [2], Abschn. 6.1.2). Obwohl in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Arbeiten zur Thematik publiziert wurden (s. stellvertretend für viele weitere [3]), existiert jedoch bis heute kein akzeptiertes Verfahren. Dass dem so ist, hat seine Ursache hauptsächlich in Problemen bei der Beschreibung eines adäquaten Ausgangsdefektzustandes, in der mangelhaften Kenntnis der Eigenspannungen und im Fehlen geeigneter elastisch-plastischer Bauteilbewertungskonzepte, die neben dem Langrisswachstum auch das erheblich kompliziertere Kurzrisswachstum, das ... den größten Teil der Lebensdauer umfasst, beschreiben können. Die Fortschritte der letzten Jahre geben jedoch Grund zu der Hoffnung, dass die Zeit für die Erarbeitung eines anwendungsfähigen Konzeptes reif ist.“

Während des Projekts wurde die Aufgabenstellung konkretisiert und ergänzt. Ein Bruchmechanikmodell, das die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen realistisch beschreiben soll, muss Lösungen für folgende Problemstellungen bieten:

- ◆ Adäquate Beschreibung des Risswachstumsverhaltens mechanisch kurzer Risse. Aufgrund der Platizitätsbedingungen an der Risspitze ist das konventionelle ΔK -Konzept nicht anwendbar und muss durch ein elastisch-plastisches Konzept ersetzt werden.
- ◆ Adäquate Beschreibung des Risswachstumsverhaltens physikalisch kurzer Risse. Obwohl definitionsmäßig unterschieden, sind die Größenbereiche mechanisch und physikalisch kurzer Risse weitgehend identisch. Das entscheidende Merkmal physikalisch kurzer Risse ist der graduelle Aufbau der Riss-schließeffekte während der Rissausbreitung.
- ◆ Die Nichtberücksichtigung der Besonderheiten sowohl des mechanisch als auch des physikalisch kurzen Risses hätte zur Folge, dass die Riss-spitzenbelastung und damit auch die Riss-erweiterung und Lebensdauer nicht-konservativ vorhergesagt, also überschätzt würden.
- ◆ Es ist eine Methodik zu entwickeln, die die adäquate Bestimmung der Ausgangsrissgröße für die Bruchmechanik-Analyse erlaubt. Dies ist v.a. für moderne Schweißnähte hoher Qualität erforderlich, bei denen Schweißnahtdefekte wie Schlackeeinschlüsse u.ä. vermieden werden.

- ◆ Über den ursprünglichen Antrag hinaus ergab sich während der Bearbeitung die Aufgabenstellung, eine Methode zur Bestimmung der Dauerfestigkeit bzw. der Schwingfestigkeit bei 10^7 Lastwechseln bereitzustellen.
- ◆ Bei Lastniveaus oberhalb der Dauerfestigkeit zeigte sich, dass Mehrfachrisse entlang des Nahtübergangs eine wesentliche Rolle spielen. Entsprechend war ein Konzept zu entwickeln, dass der Ausbreitung und Koaleszenz dieser Risse Rechnung trug.
- ◆ Im Zusammenhang mit den Mehrfachrissen war es erforderlich, die geometrische Variabilität der lokalen Schweißnahtgeometrie entlang des Nahtübergangs in die Betrachtungen einzubeziehen.
- ◆ Es stellte sich heraus, dass die rechnerische Bestimmung der Wöhlerkurve sinnvoll nur statistisch möglich war. Auch das würde im Modell entsprechend zu berücksichtigen sein.
- ◆ Schließlich ist die Kenntnis der Eigenspannungen und ihrer Auswirkung auf die Risserweiterung bei zyklischer Beanspruchung erforderlich.

Der vorliegende Bericht ist so aufgebaut, dass in Abschnitt 2 das Modell entlang der genannten Aspekte eingeführt und erläutert werden soll. Abschnitt 3 gibt einen Überblick über die im Projekt ermittelten experimentellen Eingangsgrößen und über die Modellparameter, für die spezielle Lösungen bereitgestellt werden. Deren Ableitung wird allerdings verkürzt wiedergegeben, da die ausführlichere Darstellung Gegenstand von Veröffentlichungen der Autoren ist, die an den entsprechenden Stellen zitiert werden. Abschnitt 4 enthält Validierungsbeispiele und eine Diskussion hinsichtlich der prozeduralen Umsetzung des IBESS-Modells, und Abschnitt 5 gibt neben der Zusammenfassung einen Ausblick auf Fragestellungen, bei denen die Autoren über den Projektabschluss hinaus Handlungsbedarf sehen. Ein Teil der Ergebnisse ist in Anhängen wiedergegeben, da er zu umfangreich ist, um in den Hauptteil integriert zu werden.

Das Teilprojekt A3 war Bestandteil des *IBESS-Clusters*, das so aufgebaut war, dass die Aktivitäten der einzelnen Teilprojekte ineinandergreifen sollten. Wo es erforderlich war, im vorliegenden Bericht auf Ergebnisse anderer Teilprojekte zurückzugreifen, werden diese zitiert und auszugsweise vorgestellt ohne dabei einen erschöpfenden Überblick zu geben. Dieser findet sich in den Berichten der entsprechenden *Teilprojekte*.

2. Das IBESS-Modell

2.1 Stadien der Rissausbreitung bei zyklischer Belastung

Die Lebensdauer eines schwingend belasteten Bauteils kann grob in drei Phasen unterteilt werden: Rissinitiierung, Ermüdungsrisswachstum und Bruch. Die Rissinitiierungsphase wird oft als die Phase betrachtet, während derer ein Riss gebildet wird und anschließend bis zu einer Größe wächst, die äußerlich sichtbar ist. Bei genauerem Hinsehen lässt sich diese Phase in mehrere Teilstadien untergliedern, (z.B. [4]):

(a) Das eigentliche („physikalische“) Rissinitiierungsstadium, in dem der Riss infolge der Akkumulation plastischer Deformation gebildet wird, geschieht in seltenen Fällen an defektfreien Oberflächen, häufiger jedoch in der Umgebung von Kratzern, Poren oder Einschlüssen, die als

Mikrokerben wirken und/oder infolge ihrer von der Werkstoffmatrix abweichenden Deformationseigenschaften unter äußerer Last Dehnungskonzentrationszonen ausbilden. Bei VHCF (*very high cycle fatigue*, d.h., Bruch nach 10^8 oder mehr Schwingspielen) findet die Rissinitiierung unter der Oberfläche, dort aber ebenfalls an Werkstoffdefekten statt [5].

(b) Nach der Initiierung weist der Riss zunächst noch Abmessungen in der Größenordnung charakteristischer Gefügedimensionen, z.B. der Korngröße auf. Das Risswachstum ist durch eine ungleichmäßige Rissfront sowie durch abwechselnde Be- und Entschleunigung oder sogar Arrestphasen charakterisiert. Die Arrestierung des größten einer Anzahl mikrostrukturell kurzer Risse bildet den Hintergrund des Dauerfestigkeitsphänomens [6].

(c) Mit zunehmender Rissgröße tritt der Gefügeeinfluss auf die lokale Erweiterung des Risses in den Hintergrund. Die Risswachstumsgeschwindigkeit verstetigt sich. Erreicht die Rissgröße die Größenordnung mechanischer Diskontinuitäten wie der Abmessungen der plastischen Zone oder eines Kerbspannungsfeldes, so spricht man von einem mechanisch kurzen Riss. Dessen Wachstum ist prinzipiell mit den Methoden der klassischen Bruchmechanik, nicht jedoch mit dem ΔK -Konzept beschreibbar. Auch der kurze Riss kann bei gleichbleibender äußerer Last stoppen und nicht weiterwachsen. Die Ursache dafür besteht im graduellen Aufbau des plastizitätsinduzierten Risschließeffekts ggf. in Kombination mit weiteren Risschließeffekten. Das Phänomen ist durch den Term „physikalisch kurzer Riss“ gekennzeichnet.

(d) Lange Risse sind oberhalb eines rissgrößenunabhängigen Schwellenwertes ΔK_{th} ausbreitungsfähig. Ihr Wachstum lässt sich mit dem Konzept der da/dN - ΔK -Kurve unter Berücksichtigung des Risschließeffekts (bzw. der Risschließeffekte) beschreiben. Für Belastung mit konstanter Amplitude handelt es sich heute weitgehend um eine Standardaufgabe. Diese Aussage trifft allerdings nicht zu, wenn die Belastungen – was häufig der Fall ist – in den Schwellenwertbereich der da/dN - ΔK -Kurve fallen. Beendet wird das Langrisswachstum durch den Bruch der Komponente.

Die unterschiedlichen Stadien der Ermüdungsrissausbildung sind in **Bild 1** schematisch dargestellt.

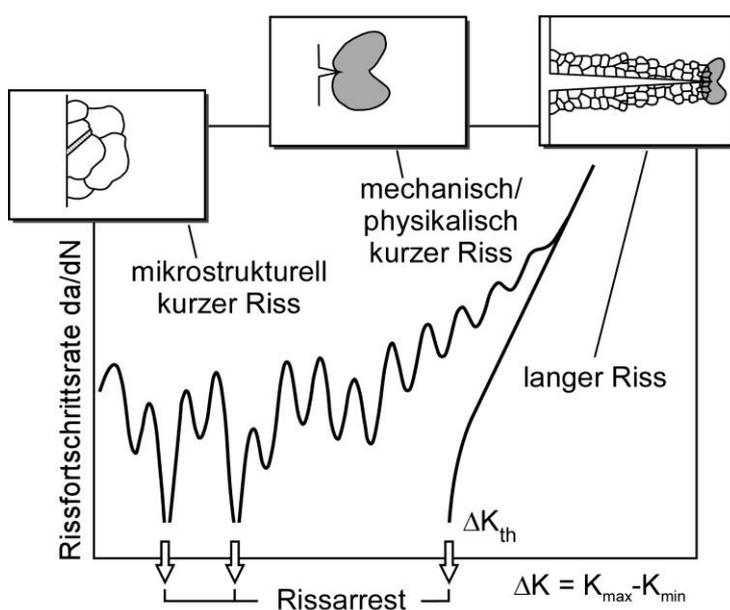


Bild 1: Stadien der Ermüdungsrissausbildung, schematisch.

2.2 Rissschließeffekte

Unter dem Rissschließeffekt versteht man, dass sich die Flanken eines zyklisch beanspruchten Risses bei Entlastung bereits oberhalb des Nulldurchgangs der Spannungen oder Spannungsintensitätsfaktoren schließen. Man nimmt an, dass nur der Lastbereich, in dem der Riss geöffnet ist, zur Risserweiterung beiträgt, während für den Bereich, in dem er geschlossen ist, keine Schädigung erfolgt. Die drei wichtigsten Mechanismen sind der plastizitäts-induzierte, der rauigkeits-induzierte und der korrosions-induzierte Rissschließeffekt (**Bild 2**), hinsichtlich dieser sowie weiterer Mechanismen s. z.B. [7]. Im vorliegenden Kontext sind alle drei Rissschließmechanismen von Relevanz, was die Problemstellung verkompliziert, da bislang nur der plastizitäts-induzierte Effekt quantitativ beschreibbar ist.

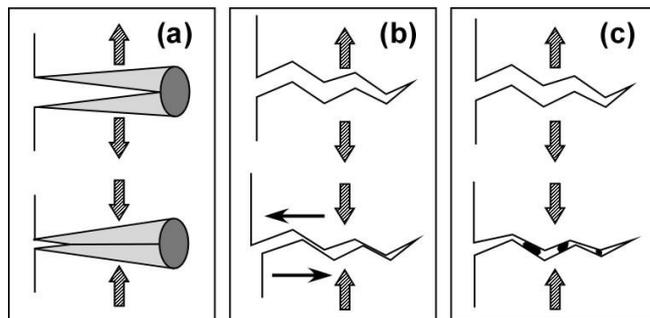


Bild 2: Rissschließeffekt. Unterschiedliche Mechanismen:

- (a) plastizitäts-induziert
- (b) rauigkeits-induziert
- (c) korrosions-induziert

(a) Der plastizitäts-induzierte Rissschließeffekt

Die plastische Zone, die sich bei Belastung vor der Rissspitze ausbildet, bleibt, wenn sich der Riss ausbreitet, auf den Rissflanken erhalten. Dort bewirkt sie eine Art „Aufdickung“ infolge derer sich die Rissflanken bereits oberhalb des Nulldurchgangs der Spannungen berühren.

(b) Der rauigkeitsinduzierte Rissschließeffekt

Der rauigkeits-induzierte Rissschließeffekt wird durch die Unebenheit der Rissflächen sowie Rissablenkung und Rissverzweigung bewirkt und schließt lokale Scherbruchanteile ein.

(c) Der korrosions-induzierte Rissschließeffekt

Beim korrosions-induzierten Rissschließeffekt erfolgt die „Aufdickung“ der Rissflanken durch Korrosionsprodukte. Bei niedrigen Spannungsverhältnissen $R (= K_{\min}/K_{\max})$ kann zudem die Oxidschicht aufgebrochen werden, und es entsteht eine Art Oxidschuttschicht, deren Dicke punktuell wesentlich größer ist als die ursprüngliche Oxidhaut. In [7] wird von einem Unterschied um einen Faktor 20 berichtet, der an einem an feuchter Atmosphäre getesteten niedrigfesten Stahl ermittelt wurde.

Die Höhe des Rissschließeffekts (bzw. der kombinierten Rissschließeffekte) wird in der Regel durch eine vom R -Verhältnis

$$R = K_{\min}/K_{\max} \quad (1)$$

und, bei kurzen Rissen, der Risstiefe a abhängige Rissschließfunktion U

$$U = \Delta K_{\text{eff}} / \Delta K = (K_{\text{max}} - K_{\text{op}}) / (K_{\text{max}} - K_{\text{min}}) \quad (2)$$

charakterisiert, wobei K_{max} und K_{min} die Ober- und Untergrenzen des K-Faktors im Schwingspiel sind, und K_{op} der Wert von K ist, oberhalb dessen der Riss geöffnet ist. ΔK_{eff} wird als effektive zyklische Rissspitzenbelastung bezeichnet, da davon ausgegangen wird, dass der Riss nur in geöffnetem Zustand wächst.

2.3 Rissspitzenbelastung mechanisch kurzer Risse

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass mechanisch kurze Risse mit dem ΔK -Konzept nicht adäquat beschreibbar sind, da die plastische Zone im Vergleich zur Risslänge nicht klein ist. Um den daraus resultierenden lokalen Platifizierungseffekt zu modellieren, wird ΔK durch einen plastizitätskorrigierten Wert ΔK_p ersetzt. Die Größe wird formal als

$$\Delta K_p = \sqrt{\Delta J \cdot E'}$$

$$E' = \begin{cases} E & \text{ebene Spannung} \\ E/(1-\nu^2) & \text{ebene Dehnung} \end{cases} \quad (3)$$

bestimmt. Hinsichtlich einer Diskussion des zyklischen J-Integrals ΔJ sei auf [8] verwiesen. Die vorliegende Arbeit folgt einem (leicht modifizierten) Ansatz von McClung [9,10] und ermittelt ΔJ als

$$\Delta J = \frac{\Delta K^2}{E'} \cdot [f(\Delta L_r)]^{-2} \quad (4)$$

Im IBESS-Ansatz wird die Funktion

$$\Delta L_r = \frac{\Delta F}{2F_Y} = \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}}{2\sigma_Y} \quad (5)$$

zu
$$\Delta L_r = \frac{\Delta \sigma_{\text{app}}}{2\sigma_0} \quad (6)$$

modifiziert, wobei $\Delta \sigma_{\text{app}}$ die Schwingbreite der außen anliegenden Spannung (bezogen auf den Bruttoquerschnitt) und σ_0 eine auf den Riss bezogene Referenzfließspannung ist, für die die Autoren in [11] (s.a. [12]) Parametergleichungen abgeleitet haben. Mit diesen wird die Größe wie folgt ermittelt:

(a) Platte unter Zugbelastung (Membranspannung), $\sigma_0 = \sigma_{m,0}$

$$\sigma_{m,0} = \left\{ C_0 + C_1 \cdot \left[\frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} \right] + C_2 \cdot \left[\frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} \right]^2 \right\} \cdot \sigma_Y \quad (7)$$

mit
$$C_0 = \min \left(C_{00} + \frac{\sigma_Y}{C_{01}}, 1 \right) \quad (8)$$

$$\text{Gültigkeitsbereich: } 2 \cdot 10^{-4} < \frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} < 0,3644$$

Die in **Tab. 1** gegebenen Koeffizienten C_i und C_{ii} wurden durch die Approximation von FEM-Ergebnissen erhalten.

Tab. 1: Koeffizienten von Gl. (7) und (8) für den tiefsten Punkt und die Oberflächenpunkte des halb elliptischen Oberflächenrisses.

	Tiefster Punkt	Oberflächenpunkte
C_{00} [-]	0,9245	0,9491
C_{01} [MPa]	5419	5863
C_1 [-]	-0,5297	-0,3050
C_2 [-]	0,3863	-0,5000

(b) Platte unter Biegebelastung, $\sigma_0 = \sigma_{b,0}$

$$\sigma_{b,0} = \left\{ C_0 + C_1 \cdot \left[\frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} \right] \right\} \cdot \sigma_Y \quad (9)$$

$$\text{Gültigkeitsbereich: } 2 \cdot 10^{-4} < \frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} < 0,2218$$

Koeffizienten C_i sind in **Tab. 2** wiedergegeben.

Tab. 2: Koeffizienten von Gl. (9) für den tiefsten Punkt und die Oberflächenpunkte des halb elliptischen Oberflächenrisses.

	Tiefster Punkt	Oberflächenpunkte
C_0 [-]	1,4374	1,5966
C_1 [-]	-1,2067	-0,6823

(a) Platten unter kombinierter Zug-Biege-Belastung

Für die Rechnung wird σ_0 entweder für Zug- oder Biegebelastung, $\sigma_{m,0}$ oder $\sigma_{b,0}$ ermittelt, wobei σ_m die am Bauteil anliegende Membran- und σ_b die am Bauteil anliegende Biegespannung bezeichnet. Diese wird dann aber hinsichtlich der jeweils anderen Lastkomponente korrigiert. Beispielsweise wird die zusätzliche Biegebelastung die ertragbare Zugbelastung reduzieren. Die Interaktionskurve zwischen $\sigma_m / \sigma_{m,0}$ und $\sigma_b / \sigma_{b,0}$ (**Bild 3**) wurde ebenfalls mittels FEM ermittelt und dann als

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{b,0}} = 1 + C_1 \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m,0}} \right) + C_2 \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m,0}} \right)^2 - 1 + C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m,0}} \right)^3 \quad (10)$$

mit
$$C_1 = C_{10} + C_{11} \cdot \left[\frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} \right] \quad (11)$$

und
$$C_2 = C_{20} + C_{21} \cdot \left[\frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} \right] \left[\frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} \right]. \quad (12)$$

approximiert.

Gültigkeitsbereich: $2 \cdot 10^{-4} < \frac{a \cdot c}{T \cdot T + c} < 0,2218$

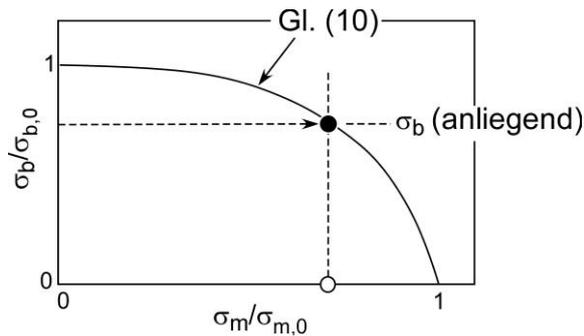


Bild 3: Referenzspannung bei gleichzeitiger Zug- und Biegebelastung; Interaktionskurve.

Die Koeffizienten C_i und C_{ii} sind in **Tab. 3** wiedergegeben.

Tab. 3: Koeffizienten von Gl. (10) bis (12) für den tiefsten Punkt und die Oberflächenpunkte des halbelliptischen Oberflächenrisses.

	Tiefster Punkt	Oberflächenpunkte
C_{10} [-]	0,0167	0,0113
C_{11} [-]	-1,8496	-0,4266
C_{20} [-]	-1,5310	-0,9405
C_{21} [-]	3,5736	2,8513

Die Plastizitätskorrekturfunktion $f(L_r)$ in Gl. (4) wird von etablierten Methoden wie R6 [13], BS7910 [14] oder SINTAP [15] übernommen und als

$$f(L_r) = \left[\frac{E \cdot \Delta \varepsilon_{ref}}{\Delta \sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta L_r^2}{E \cdot \Delta \varepsilon_{ref} / \Delta \sigma_{ref}} \right]^{-1/2} \quad (13)$$

ermittelt. Die Spannung σ_{ref} und die dazugehörige Dehnung ε_{ref} in Gl.(13) kennzeichnen Punkte auf der stabilisierten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left[\frac{\sigma_a}{K'} \right]^{1/n'} \quad (14)$$

Bild 4 zeigt einen Vergleich des nach Gl. (4ff) ermittelten zyklischen J-Integrals mit den Ergebnissen numerischer Analysen aus *IBESS-Teilprojekt G3*. Die Analyse wurde für einen Stumpfstoß aus S355NL durchgeführt, wobei die Spannungs-Dehnungs-Hysterese durch das Chaboche-Modell beschrieben wurde. Zugrundegelegt wurde eine Geometrie mit einem Nahtübergangsradius (zur Definition s. Abschnitt 3.2.3) von 1 mm. Entscheidend ist der lebensdauerbestimmende Kurzriszbereich. Es zeigt sich, dass Gl. (4ff) ΔJ bei einem flachen Nahtanstieg von 10° oberhalb einer Risstiefe von 0,15 mm moderat unterschätzt (**Bild 4a**). Bei einem Nahtanstiegswinkel von 30° dreht sich der Trend oberhalb eines Lastniveaus von 160 MPa (Spannungsamplitude) um (**Bild 4b**), so dass ΔJ zu hoch ermittelt wird. Im Zusammenhang mit der Diskussion der Validierungsergebnisse kommt der Autor noch einmal auf diese Problematik zurück.

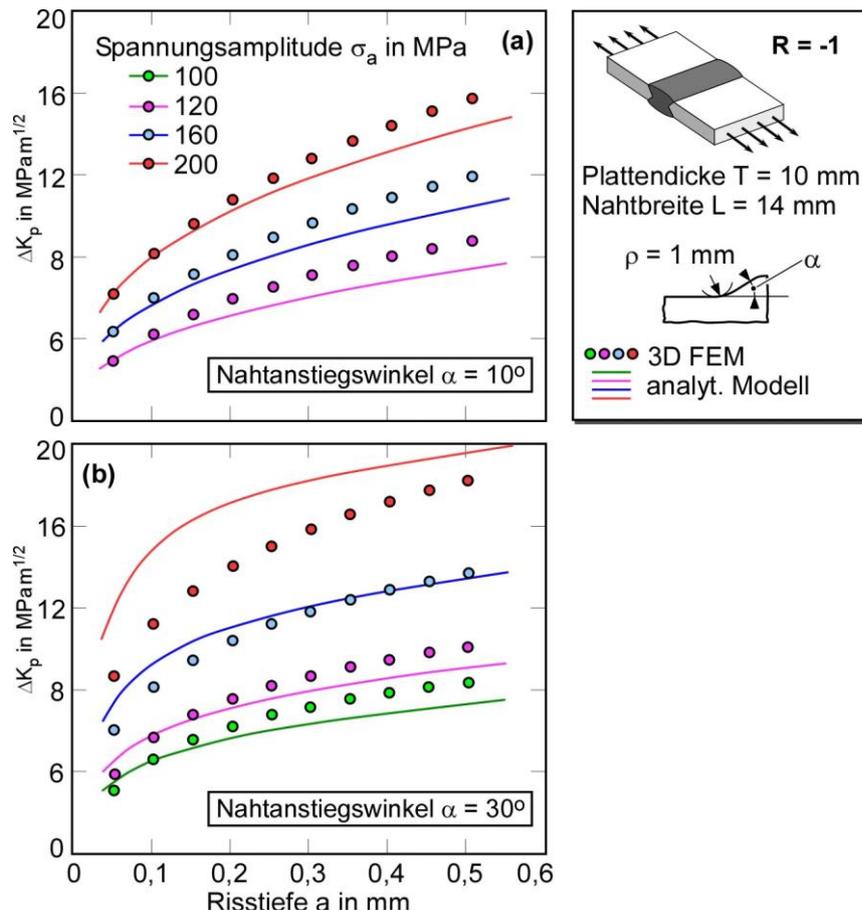


Bild 4: Vergleich numerisch und mittels IBESS-Modell (Gl.4ff) ermittelter Werte für ΔK_p als Funktion der Risstiefe ($= \sqrt{\Delta J \cdot E'}$).

(a) Nahtanstiegswinkel $\alpha = 10^\circ$; (b) $\alpha = 30^\circ$.

2.4 Gradueller Aufbau des Risschließeffekts physikalisch kurzer Risse

Das Prinzip des graduellen Aufbaus des Risschließeffekts (bzw. der Risschließeffekte) gibt **Bild 5** wieder. Diese sind von der Belastungsgeschichte und damit auch von der Risslänge abhängig. Beim Ausgangsriss a_i kann für die Bruchmechanik-Analyse von einem vollständig geöffnetem Riss ausgegangen werden ($U = 1$). Während der Risserweiterung nimmt U dann graduell ab, um bei Erreichen der Langrisstiefe schließlich einen konstanten Wert ($U < 1$) zu erreichen.

Die entscheidende Annahme des IBESS-Modells ist, dass sich der graduelle Aufbau des Risschließeffekts beim physikalisch kurzen Riss in der sogenannten zyklischen R-Kurve abbildet. Darunter versteht man die Abhängigkeit des Schwellenwertes ΔK_{th} von der Riss-

erweiterung Δa (**Bild 6**). Der Schwellenwert besteht aus einem werkstoffspezifischen, intrinsischen Beitrag $\Delta K_{th,eff}$ und einem Beitrag infolge der Rissschließeffekte $\Delta K_{th,op}(\Delta a)$. Letzterer hängt vom Werkstoff und von weiteren Parametern, v.a. dem Spannungsverhältnis R und auch von den Umgebungsbedingungen ab; hinsichtlich einer eingehenderen Diskussion s. [16].

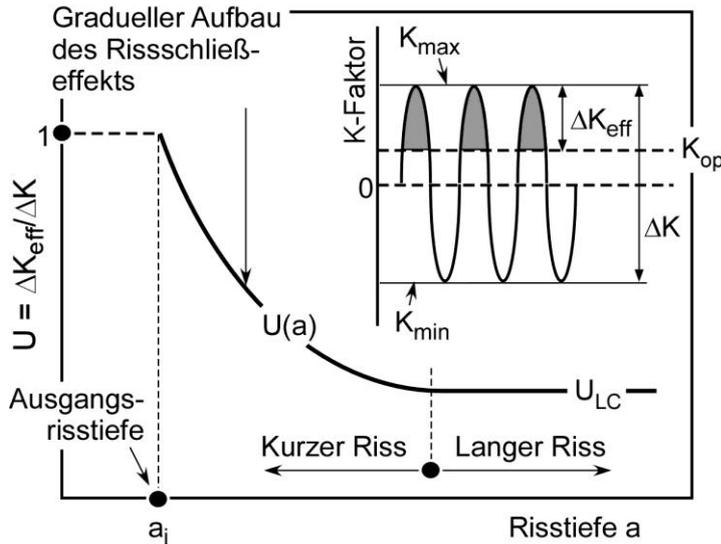


Bild 5: Aufbau des Rissschließeffekts des physikalisch kurzen Risses, schematisch.

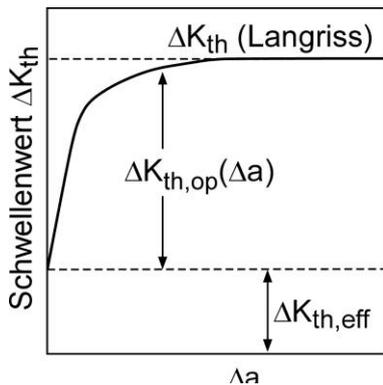


Bild 6: Komponenten der zyklischen R-Kurve, schematisch.

Im Rahmen des IBESS-Ansatzes wird die Rissschließfunktion $U(a)$ mit der zyklischen R-Kurve wie folgt verknüpft (s.a. **Bild 7**):

$$\frac{U(a) - 1}{U_{LC} - 1} = \frac{\Delta K_{th}(a) - \Delta K_{th,eff}}{\Delta K_{th,LC} - \Delta K_{th,eff}} \quad (15)$$

Dabei kennzeichnen U_{LC} und $\Delta K_{th,LC}$ die jeweiligen riszlängenunabhängigen Größen für den langen Riss (LC – long crack).

Die in IBESS für lange Risse genutzte Rissschließfunktion U_{LC} sieht wie folgt aus:

$$U_{LC} = \Delta K_{eff} / \Delta K = (1 - \sigma_{op} / \sigma_{max}) / (1 - R). \quad (16)$$

Die Rissausbreitungsrate wird mit Hilfe des sogenannten NASGRO-Ansatzes [17,18]

$$\frac{da}{dN} = C \cdot [U(a) \cdot \Delta K_p]^m \cdot \left[1 - \frac{\Delta K_{th}(a)}{\Delta K_p} \right]^p \quad (17)$$

berechnet, wobei aber Bereich 3 der da/dN - ΔK -Kurve (Übergang zum Bruch) = 1 gesetzt wird, da er zur Lebensdauer nur sehr wenig beiträgt. Der Exponent p ist ein empirischer Anpassparameter zur Beschreibung der da/dN - ΔK -Kurve im Schwellenwertbereich. Die Langriss-Korrekturfunktion σ_{op}/σ_{max} ergibt sich ebenfalls nach NASGRO

$$f = \frac{\sigma_{open}}{\sigma_{max}} = \begin{cases} A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3 & \text{for } R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & \text{for } -2 < R < 0 \end{cases} \quad (18)$$

mit den Koeffizienten

$$A_0 = \left(0,825 - 0,34\alpha_g + 0,05\alpha_g^2 \right) \left[\cos \left(\frac{\pi/2 \cdot \sigma_{max}}{\sigma_{Y,cyc}} \right) \right]^{(1/\alpha_g)}, \quad (19)$$

$$A_1 = \left(0,415 - 0,071\alpha_g \right) \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Y,cyc}}, \quad (20)$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \quad (21)$$

und $A_3 = 2A_0 + A_1 - 1. \quad (22)$

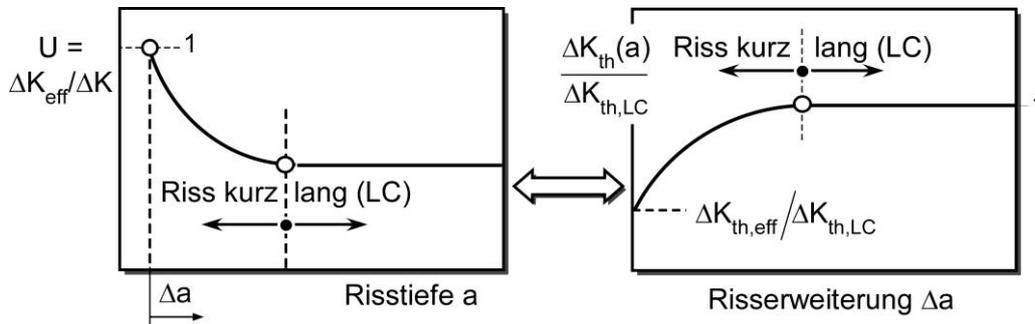


Bild 7: Riss-schließfunktion $U(a)$ und zyklische R-Kurve $\Delta K_{th}(a)$ als komplementäre Informationen.

Abweichend vom Originalansatz in [17,18] wird in Gl. (19) und (20) anstelle der statischen Fließlast $\sigma_f = 0,5(\sigma_Y + R_m)$ die zyklische Fließgrenze $\sigma_{Y,cyc}$ eingesetzt, und der Parameter $\sigma_{max}/\sigma_{cyc}$ wird in Anlehnung an einen Vorschlag von McClung [19] durch die entsprechenden K-Faktoren ersetzt:

$$\frac{K_{max}}{K_{Y,cyc}} = \frac{Y \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sigma_{Y,cyc} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} = \frac{Y \cdot \sigma_{max}}{\sigma_{Y,cyc}} \quad (23)$$

Die Größe Y beschreibt dabei die Geometriefunktion der betrachteten Struktur. Der Constraintfaktor α_g wurde als $\alpha_g = 2,5$ an die Experimente angepasst. **Bild 8** gibt einen Vergleich der auf Riss-schließen korrigierten Riss-spitzenbelastung entsprechend IBESS mit einem alterna-

tiven, auf Halbkreisrisse beschränkten Ansatz nach Dowling [20] wieder. Der Vergleich wird auf der Ebene des ΔJ_{eff} geführt, wobei letzteres nach Gl. (3) formal in $\Delta K_{p,\text{eff}} = U(a) \cdot \Delta K_p$ umgerechnet werden kann. Es zeigt sich, dass der IBESS-Ansatz die zyklische Rissspitzenbelastung moderat höher berechnet, wobei v.a. der Effekt bei kleinen, lebensdauerbestimmenden Risslängen gering ist. So beträgt der Unterschied bei $a = 1 \text{ mm}$ 15% auf der Ebene von ΔJ und 7% auf der Ebene von ΔK . Auf die Restlebensdauer umgerechnet entspräche das bei Annahme von $m = 3$ in Gl. (17) einen um 22,5% geringeren Wert nach IBESS verglichen mit dem Dowling-Modell.

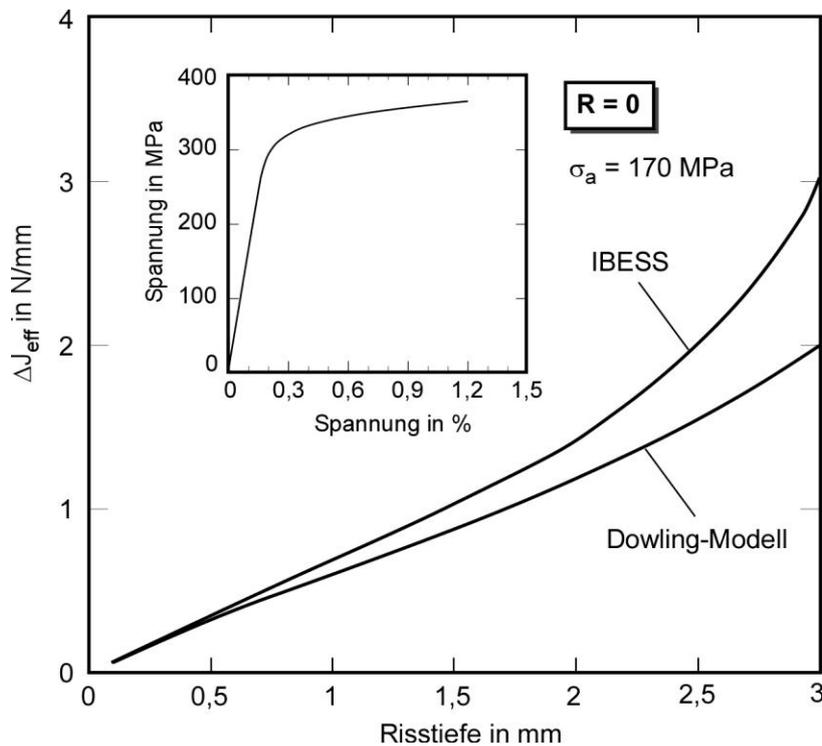


Bild 8: Vergleich des effektiven zyklischen J-Integrals nach Dowling [20] mit dem des vorliegenden IBESS-Modells.

Geometrie: Platte mit Halbkreisriss

2.5 Die Ermittlung der Ausgangsrissgröße

2.5.1 Literaturdaten

Die Bruchmechanik-Analyse erfordert eine Ausgangsrissgröße a_i für die Ermittlung der Restlebensdauer. Frühere Arbeiten haben diese entweder aufgrund experimenteller Ergebnisse (z.B. Wöhlerkurven) „zurückgerechnet“ oder aufgrund empirischer Erfahrungen festgelegt. In einem im Jahre 2009 publizierten Aufsatz [21] schreiben Zhang und Maddox: „Metallurgische Untersuchungen haben ergeben, dass die mittlere Tiefe solcher Defekte 0,15 mm beträgt, während die maximale Tiefe bei etwa 0,4 mm liegt. Eine Übersicht bei Grover [22] geht davon aus, dass selbst Hochqualitätsnähte Defekte mit einer Tiefe bis zu 0,1 mm aufweisen.“ In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben über Ausgangsdefektgrößen, die im Sinne von Ausgangsrissen behandelt werden. Etliche Autoren arbeiten mit theoretisch angesetzten Größen, ohne deren Herkunft im Einzelnen zu begründen. Übersichten finden sich in [2, 22-25].

Experimentelle, metallografisch oder fraktografisch ermittelte Ausgangsdefektgrößen bewegen sich für Stähle beispielsweise in der Größenordnung von $50 \mu\text{m}$ [26,27], $20\text{-}150 \mu\text{m}$ [28], $10\text{-}400 \mu\text{m}$ [29] und $130 \pm 46 \mu\text{m}$ [30]. Die Liste ließe sich mit Verweis auf die erwähnten Übersichten ergänzen. Sie ist allerdings insofern problematisch, als in vielen Fällen unterschiedliche Merk-

male von Schlackeeinschlüssen über Einbrandkerben und, im Extremfall, Bindefehlern vermengt werden. Hinzu kommt, dass Untersuchungen an Bauteilen tendentiell größere Streubänder mit dem Trend zu höheren oberen Grenzwerten ergeben als Untersuchungen an Proben. So erhielten etwa Bokalrud und Karlsen [31] bei der Auswertung von 827 zufällig gewählten Messstellen in Schiffsblechen mittlere Ausgangsdefekttiefen von 110 μm und Moan et al. [32] an Rohrverbindungen in Offshorestrukturen sogar von 380 μm . Die Liste ließe sich, wie erwähnt, ergänzen. Obwohl die Daten in etlichen Fällen sogar statistisch aufbereitet vorliegen, ein Beispiel gibt **Bild 9** wieder, haben sie sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht als zielführend erweisen.

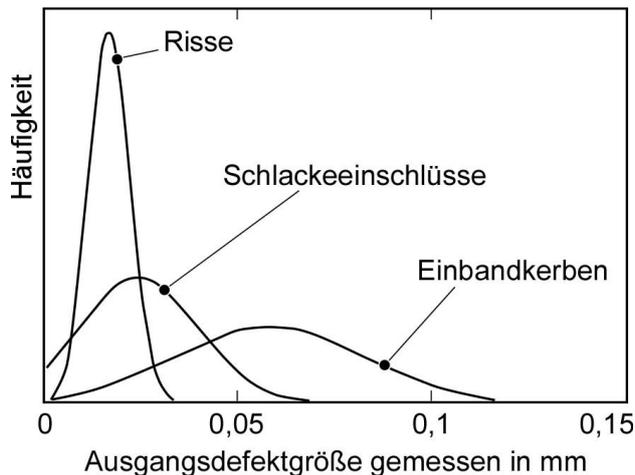


Bild 9: Statistische Größenverteilungen von Defekten in einer als Hochqualitätsnaht eingestuften Schweißverbindung aus einem C-Mn-Stahl, nach [33].

Neben experimentell direkt ermittelten Ausgangsrisssgrößen finden sich in der Literatur Angaben über angepasste Daten, wobei v.a. eine Rückwärtsanpassung an Wöhlerkurven vorgenommen wird. Ein Beispiel findet sich in [34], wo die Autoren eine Ausgangsrisstiefe von $a_i = 51 \mu\text{m}$ bei einer Geometrie des halbelliptischen Risses von $a_i/c_i = 0,286$ vorschlagen. Nykänen et al. [35] haben unlängst ihren alten Vorschlag von $a_i = 200 \mu\text{m}$ [3] aufgrund neuerer Schwingfestigkeitsdaten auf $a_i = 50 \mu\text{m}$ reduziert.

Erwähnt werden soll schließlich noch ein Ansatz, nach dem die Ausgangsrisstiefe im Sinne eines unteren Grenzwertes theoretisch bestimmt wird. Vergleichbar dem im folgenden Abschnitt vorgestellten IBESS-Modell schätzen Lawrence und Mazumdar [36] a_i so ab, dass der Riss im Kerbdehnungsfeld gerade nicht mehr arretieren würde. Mit Hilfe von per Finite-Elemente-Simulationen ermittelten Spannungsgradienten erhalten die Autoren einen Ausdruck

$$a_i = 0,1878 \cdot T^{1/2} / (\alpha R_m). \quad (24)$$

Gl. (24) ist einheitenbehaftet, wobei die Plattendicke T in Zoll (inch, 1 in = 25,4 mm), und die Zugfestigkeit R_m in ksi (1 ksi = $6,895 \cdot 10^{-3}$ MPa) einzusetzen ist. Der Parameter α ist eine Fitgröße an die Finite-Elemente-Ergebnisse der Autoren.

Neben der Ausgangsrisstiefe a_i spielt die Ausgangsrisssgeometrie a_i/c_i als Startparameter für die Analyse eine Rolle. Auch das ist insofern problematisch, als im Falle von Mehrfachrisse entlang des Nahtübergangs bereits frühzeitig und dann wiederholt Koaleszenz-Ereignisse auftreten, bei denen sich das a/c -Verhältnis der resultierenden Risse sprunghaft verkleinert. Das ist in **Bild 10** illustriert. Die Unterschiede zwischen hand- und maschinengeschweißter Naht

sind in der gleichmäßigeren Nahtgeometrie der Maschinennaht begründet, die dazu führt, dass die Zahl der Rissinitiations- (bzw. Arrest)-Stellen entlang des Nahtübergangs gleichmäßiger verteilt ist, was selbstverständlich einen Effekt auf die spätere Rissentwicklung hat.

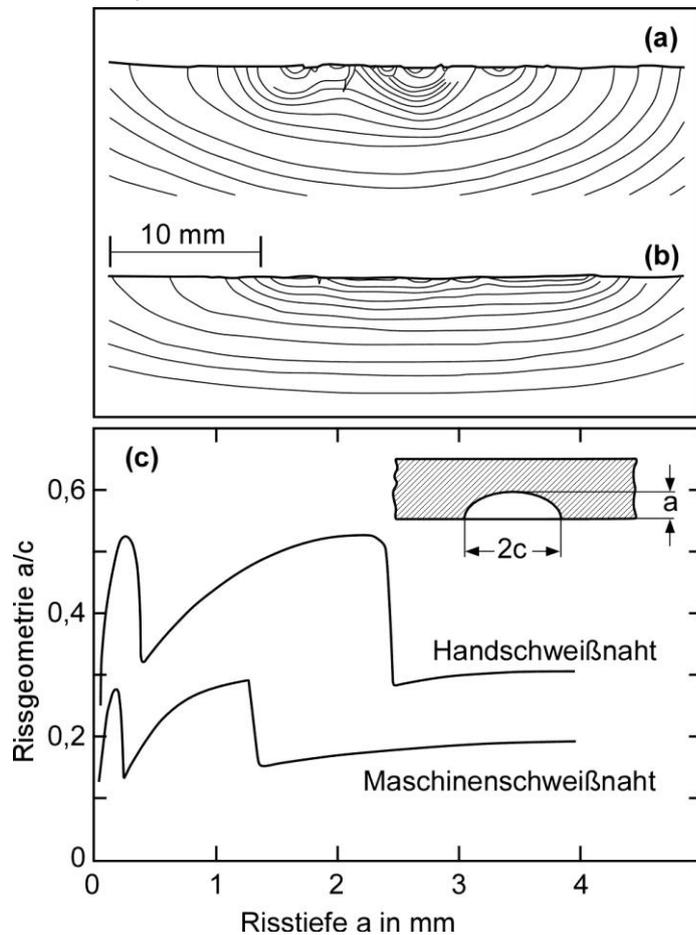


Bild 10: Frühe Risserweiterung (a) bei einer hand- und (b) einer maschinengeschweißten Naht.

(c) Unterschiedliche Entwicklung der Rissgeometrie a/c;

nach [37].

Es ist klar, dass ein derart komplexes Muster nicht mit einem einfachen Ansatz beschrieben werden kann. Ungeachtet dessen wurden in der Literatur eine Reihe von Versuchen unternommen, Rissgeometrien a/c in Abhängigkeit von der Risstiefe für Schweißverbindungen zu Analyse Zwecken abzuschätzen. Anstelle einer detaillierten Diskussion sei auf die bereits im Zusammenhang mit der Initiierungsrisstiefe erwähnten Zusammenfassungen, v.a. [2] verwiesen. Beispielsweise schlagen Bell und Vosikovski [38] eine einfache Beziehung

$$\frac{a}{c} = \exp(-ka) \quad (25)$$

vor. Die weiteste Verbreitung hat eine Beziehung von Engesvik und Moan [30] gefunden

$$\frac{a}{c} = \begin{cases} 2a/(6.34a - 0.27) & \text{for } a \leq 3\text{mm} \\ 0 & \text{for } a > 3\text{mm} \end{cases} \quad (26)$$

die unter anderem in die IIW-Richtlinie 1823 [39] übernommen wurde, wo eine Ausgangsrisstiefe von $a_i = 50$ bis $100 \mu\text{m}$ kombiniert mit der Rissgeometrie nach Gl. (26) empfohlen wird. **Bild 11** gibt einen Vergleich unterschiedlicher experimenteller und theoretischer Rissgeometrieentwicklungen wieder. Im IBESS-Modell wird das a/c-Verhältnis als Funktion der Risstiefe einschließlich der „Sprünge“ bei Koaleszenz-Ereignissen explizit berechnet.

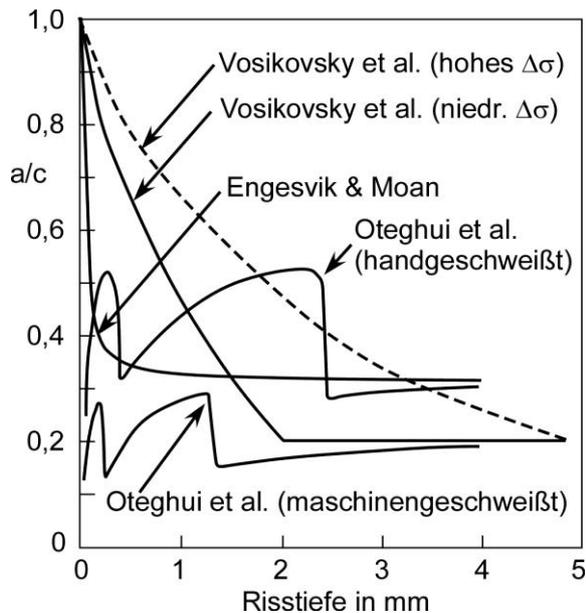


Bild 11: Experimentelle Daten und Abschätzungen der Entwicklung der Rissgeometrie a/c als Funktion der Risstiefe. Die „Sprünge“ kommen durch wiederholte Koaleszenz-Ereignisse zustande;

nach [37].

2.5.2 Einschlussgrößen der untersuchten Stähle

Bild 12 illustriert typische Rissinitiierungsstellen am Nahtübergang, wie sie bei handgeschweißten Nähten zu erwarten sind (s.a. die Übersichten in [37] und [40]). Bei modernen maschinell gefertigten Maschinennähten ist es möglich, diese Defekte weitgehend zu vermeiden. Bei den für die Validierung des IBESS-Modells gefertigten MAG- und WIG-Nähten war genau dies der Fall. Neben den typischen Schweißnahtdefekten existieren jedoch in Form nichtmetallischer Einschlüsse bereits aus der Stahlherstellung nichtmetallische Einschlüsse, die ebenfalls als Rissinitiierungsstellen in Betracht kommen. Bereits 1967 nahmen Signes et al. [41] metallografische Untersuchungen an Kehlnantverbindungen aus hochfestem Stahl vor, in deren Ergebnis sie zahlreiche derartige Einschlüsse im ehemals auf- und angeschmolzenen Nahtbereich fanden. Deren Abmessungen variierten zwischen 19 und 430 μm bei einem Mittel von 76 μm , ihre Lage war 50 bis 75 μm unterhalb der Oberfläche. Die Autoren charakterisierten die Form der Teilchen als scharfkantig mit Kerbradien kleiner 2.5 μm .

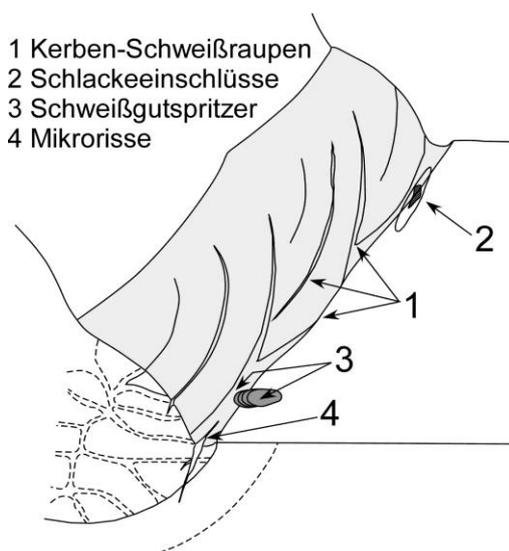


Bild 12: Typische Rissinitiierungsstellen bei handgeschweißten Nähten;

nach [37].

Auch im Rahmen der vorliegenden Studie wurden in den *IBESS-Teilprojekten G1* und *A1* in den Materialbereichen in der Nähe der Nahtübergänge Untersuchungen zur Größe von Einschlussteilchen durchgeführt. Ein Teil der Ergebnisse ist in **Bild 13** wiedergegeben. Die Schliche, partiell ergänzt durch computertomographische Untersuchungen, ergaben für den niedrigfesten Stahl S355NL mittlere Einschlussdurchmesser von 9,4 (bzw. 11,2) μm bei Maximalwerten $< 30 \mu\text{m}$ und für den hochfesten Stahl S960 QL mittlere Einschlussdurchmesser von 13 μm bei Maximalwerten $< 40 \mu\text{m}$.

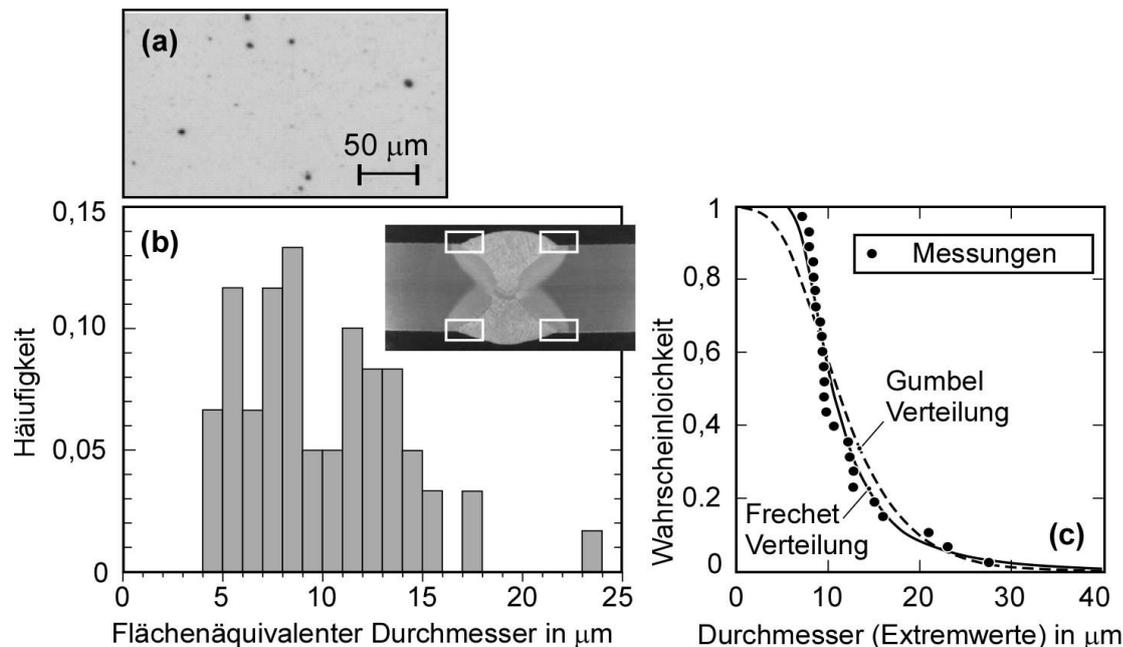


Bild 13: Größe nichtmetallischer Einschlüsse nahe des Nahtübergangs von in IBESS untersuchten Stumpfschweißverbindungen aus S355NL; (a) Schlicht; (b) Histogramm; (c) Verteilungen; *IBESS-Teilprojekte G1* und *A1*.

2.5.3 Weitere Vorüberlegungen

Um die weitere Vorgehensweise zu verstehen, ist es zunächst notwendig, noch einmal das Verhalten kurzer Risse in ihrer frühen Ausbreitungsphase zu reflektieren. In Abschnitt 2.1 hatte der Autor unter Punkt (b) formuliert: „Die Arretierung des größten einer Anzahl mikrostrukturell kurzer Risse bildet den Hintergrund des Dauerfestigkeitsphänomens“. Murakami [42] führt dazu aus: „Dauerfestigkeit ist der Schwellenwert der Spannung für das Risswachstum, nicht die kritische Spannung für Rissinitiierung.“ Mit Bezug auf unlegierte Stähle gibt der Autor an derselben Stelle die Spannung für Rissinitiierung als 2-3% kleiner an als die Spannung für Rissarrest. Das bedeutet, dass eine große Zahl mikrostrukturell kurzer Risse nach einer anfänglichen Ausbreitungsphase arretiert wird. Die Spannung, unterhalb derer das für alle Risse zutrifft, ist die Dauerfestigkeit. Wird diese Schwelle, z.B. aufgrund von Korrosion als zeitabhängigem Phänomen überwunden, so fällt die Wöhlerkurve auch bei Lastspielzahlen $> 10^6$ - 10^7 weiter ab [6].

Auf mikrostruktureller Ebene ereignet sich Rissarrest, wenn der Riss auf ein Hindernis, z.B. auf die Grenze eines benachbarten Kornes mit deutlich unterschiedlicher Kristallorientierung trifft. Allerdings kann die kritische Rissgröße für Arrest nicht einfach der Korngröße gleichgesetzt werden, da statistisch nicht bei jedem Rissübergang zu einem benachbarten Korn eine hinreichend unterschiedliche Kristallorientierung zu erwarten ist. Murakami merkt dazu an: „Die

Dauerfestigkeit ergibt sich als Folge der mittleren Festigkeitseigenschaften der Mikrostruktur und nicht direkt aus der Korngröße.“ So gibt er die Arrestrissgröße eines 0,13%-Kohlenstoffstahls in der Größenordnung von 100 μm an, obwohl die mittlere Korngröße gerade einmal 34 μm betrug [42]. Entscheidend dürften letztlich die Gleitvorgänge im Zusammenhang mit der Ausbildung der plastischen Zone vor der Risspitze jenseits der Korngrenze sein. In Kerben stellt sich der Sachverhalt noch etwas komplizierter dar, da die mit der Entfernung vom Kerbgrund abklingende Spannung ebenfalls zum Arrest eines anfänglich schnell wachsenden Risses beitragen kann. In diesem Fall lässt sich der Riss hinsichtlich seiner Größe bereits als „mechanisch/physikalisch kurz“ definieren, was insofern wichtig ist, als ihm, anders als dem mikrostrukturell kurzen Riss mit klassischer Kontinuumsbruchmechanik beizukommen ist.

Hinsichtlich des IBESS-Modells lässt sich aufgrund dieser und weiterer Überlegungen eine Reihe von Annahmen formulieren:

- (a) Die Ausgangsrissgröße für die Bruchmechanik-Analyse weist eine Untergrenze auf, die durch den Arrest ursprünglich wachstumsfähiger Risse gegeben ist.
- (b) Ist ein Ausgangsdefekt, der z.B. aufgrund ungenügender Einbindung ins Matrixmaterial als Riss betrachtet werden kann, für ein vorgegebenes Lastniveau größer als die Arrestrissgröße, so ist dessen Abmessung als Ausgangsrissgröße anzusprechen. Bei den im Rahmen von IBESS untersuchten Proben wurden solche Defekte wie erwähnt, nicht gefunden.
- (c) Auf dem Lastniveau der Dauerfestigkeit ist genau von einem Riss an der Arrest-Wachstums-Grenze auszugehen. Unterhalb arretieren alle Risse, womit sie für die Lebensdauer nicht von Belang sind, oberhalb ist in Abhängigkeit von Schwankungen der lokalen Geometrie z.B. entlang des Nahtübergangs von mehreren wachstumsfähigen Rissen auszugehen, wobei deren Zahl mit zunehmendem Lastniveau ansteigen sollte.
- (d) Als Ausgangsrissgeometrie auf dem Dauerfestigkeitsniveau erscheint eine Halbkreisform ($a/c = 1$) sinnvoll, wenn man annimmt, dass Koaleszenz bis dahin keine Rolle spielt. Ist der Ausgangsriss durch Defekte gegeben, die größer sind als die Arrestgrenze, so bestimmen diese auch die Geometrie des Ausgangsrisses.
- (e) Ist die Ausgangsrissgröße bekannt, so kann umgekehrt das Lastniveau ermittelt werden, das der Dauerfestigkeit entspricht.
- (f) Bruchmechanisch ist die Dauerfestigkeit durch den Schwellenwert gegen Ermüdungsrissausbreitung ΔK_{th} bestimmt, der aber für physikalisch kurze Risse bekannt sein muss. Anders formuliert: Der üblicherweise ermittelte Langrisschwellenwert $\Delta K_{th,LC}$ ist hier nicht relevant. Eine Perspektive eröffnet jedoch die in Abschnitt 2.4 angesprochene zyklische R-Kurve, mittels derer Rissarrestrechnungen durchgeführt werden können.

Dass auf dem Niveau der Dauerfestigkeit gerade der Übergang von keinem zu einem ausbreitungsfähigen Riss vorliegt, bestätigt **Bild 14**. Bei den Arbeiten in *IBESS-Teilprojekt A1* wurden die Versuche bei mehreren Proben nach ca. 1/4 bis 1/3 der zu erwartenden Lebensdauer unterbrochen. Wie im oberen Teil des Bildes illustriert, wurden die Proben anlassgeglüht, um die bis dato freigelegten Rissoberflächen farblich zu kennzeichnen. Anschließend wurde die

Anzahl der Risse im Rasterelektronenmikroskop ausgezählt, und zwar getrennt nach „alle Risse“ und „Risse einer Tiefe $> 50\mu\text{m}$ “. Es zeigte sich der anderweitig aus der Literatur [43] bekannte Trend, dass die Anzahl der Risse entlang des Nahtübergangs mit dem Lastniveau zunimmt. Da die Abhängigkeit im vorliegenden Fall näherungsweise einer Gerade folgt, ist es möglich, auf die Anzahl der Risse auf dem Lastniveau der Dauerfestigkeit zu extrapolieren, das in diesem Fall grob einer Nennspannungsamplitude $\sigma_a = 100\text{ MPa}$ entspricht. Tatsächlich ergibt sich dafür eine Risszahl von 0 bzw. 1.

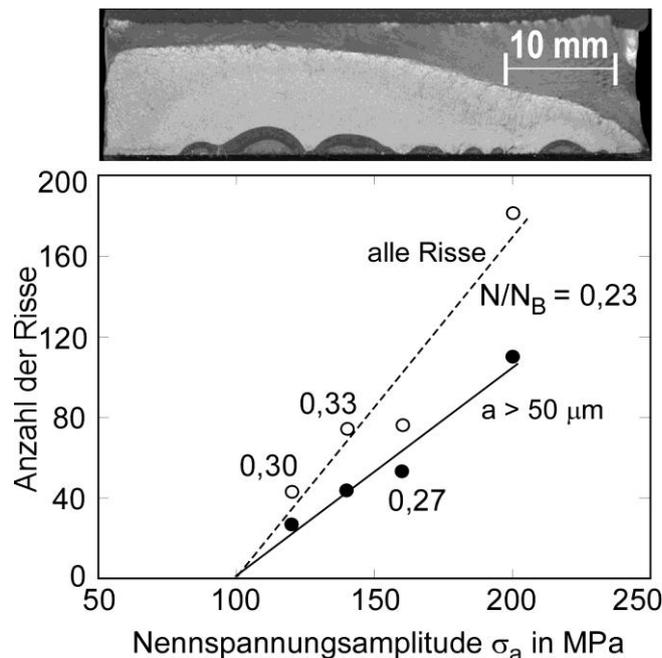


Bild 14: Experimentell nachgewiesene Oberflächenrisse am Nahtübergang von Stumpfstoßen aus S355NL bei etwa 1/4 bis 1/3 der Gesamtlebensdauer. Die Risse wurden durch eine Glühbehandlung sichtbar gemacht (Beispiel oben); Arbeiten in *IBESS-Teilprojekt A1*.

Die zunehmende Anzahl an Rissen bei höherem Lastniveau ist Anlass für eine weitere Annahme des IBESS-Modells als Untersetzung von Annahme (d):

- (g) Es ist davon auszugehen, dass Risse bevorzugt dort wachsen werden, wo die lokale Belastung am höchsten ist. Dass dabei entlang der Naht Unterschiede auftreten, ergibt sich aus Unterschieden in der lokalen Nahtgeometrie, die durch Parameter wie Nahtübergangsradius ρ , Nahtanstiegswinkel α und Nahtüberhöhung h , aber auch Sekundärkerben, z.B. Einbrand oder Oberflächenrauigkeit der Walzhaut der verschweißten Bleche definiert sind (**Bild 15**). Für das IBESS-Modell bedeutet das, dass die Analyse nur statistisch durchgeführt werden kann, wobei die Variation der Nahtgeometrie entlang des Nahtübergangs berücksichtigt werden muss. Einen ähnlichen Ansatz haben bereits Lecsek et al. [43] verfolgt.

2.5.4 Umsetzung im IBESS-Modell

Bei der Ausgangsrisstiefe basierend auf der Rissarrestannahme handelt es sich um eine Untergrenze, die beim Vorhandensein größerer als Risse zu betrachtender Ausgangsdefekte (Kratzer, Bindefehler etc.), wie erwähnt, nicht anwendbar ist. Der hier ermittelte Ausgangsrisse wird als werkstoffspezifisch angenommen und entsprechend für die glatte Probe und ein Spannungsverhältnis $R = -1$ berechnet. Eine weitere Annahme ist, dass es sich um einen halbkreisförmigen Oberflächenriss ($a = c$) handelt, was wiederum voraussetzt, dass wir es mit

einem Einzelriss zu tun haben und nicht mit einem Riss, der bereits aus der Koaleszenz mehrerer Risse hervorgegangen ist. Tatsächlich lässt sich letzteres jedoch nicht mit Sicherheit ausschließen, da über die Rissentwicklung im Stadium des mikrostrukturell kurzen Risses (Abschnitt 2.1) keine Information vorliegt. Der Riss, der im vorhandenen Modell arretiert wird, ist bereits im Stadium des mechanisch/physikalisch kurzen Risses.

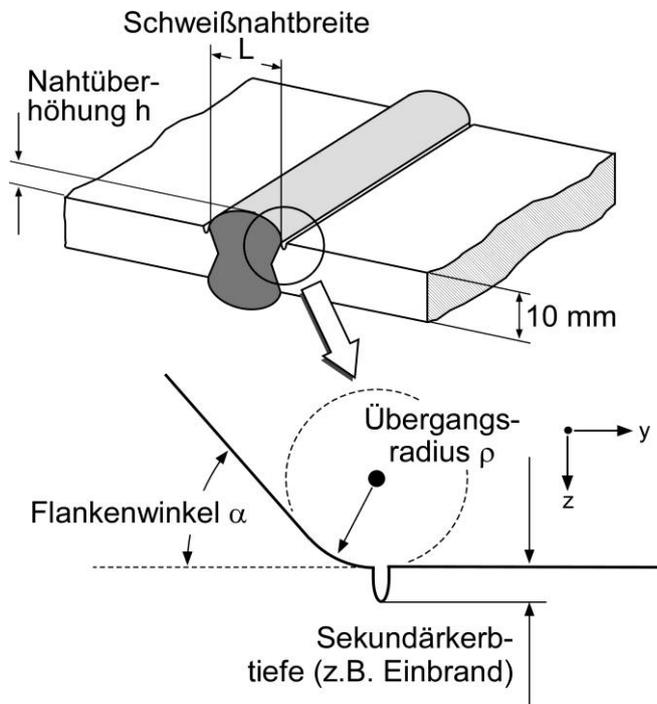


Bild 15: Parameter der lokalen Nahtgeometrie einer Stumpfschweißnaht.

Die Rissarrestbetrachtung beruht auf dem Konzept der zyklischen R-Kurve. Zunächst wird mittels Gl. (3ff) die sog. *Crack Driving Force*-Kurve für eine glatte Werkstoffprobe unter Zugbelastung mit einem halbkreisförmigen Riss berechnet, in **Bild 16** mit „Rissspitzenbelastung (Lastniveau Dauerfestigkeit des Werkstoffs)“ bezeichnet. Das dabei zugrunde gelegte Lastniveau ist die Werkstoffdauerfestigkeit σ_w (bzw. $\Delta\sigma_w$). Der Index „w“ steht für Wechselfestigkeit und bedeutet: bei $R = -1$. Mit zunehmender Risstiefe ergibt sich bei der glatten Probe eine höhere Rissspitzenbelastung ΔK_p . Der Übergang von Arrest zu gerade wachstumsfähig ist gegeben, wenn sich die *Crack Driving Force*-Kurve und die zyklische R-Kurve tangential berühren. Dazu wird die zyklische R-Kurve in das Bild eingefügt. Auf der Ordinate ist sie durch ihren unteren Grenzwert, den intrinsischen Schwellenwert $\Delta K_{th,eff}$ fixiert. Aus dem Tangentenkriterium ergibt sich die Risstiefe des Halbkreisrisses bei Rissarrest und – am Ausgangspunkt der zyklischen R-Kurve – die Ausgangsrisstiefe a_i . **Bild 17** gibt beide Größen für die Grundwerkstoffe der beiden untersuchten Stähle S355NL und S960QL wieder.

Ein benötigter Eingangsparameter ist die Wechselfestigkeit σ_w des jeweiligen Werkstoffs. Sofern diese nicht verfügbar ist, kann sie innerhalb bestimmter Grenzen aus der Zugfestigkeit R_m oder – bei Schweißnähten geeigneter – aus der Härte HV bestimmt werden:

$$\sigma_w \approx 0,45 R_m \approx 1,6 HV . \quad (27)$$

Eine eingehendere Diskussion dieser Beziehungen findet sich in Abschnitt 3.1.3. Die Daten in Bild 17 wurden mittels Abschätzung von σ_w aus R_m berechnet, wobei sich das Streumaß aus einem angenommenen Variationskoeffizienten für R_m von $Var = 0,05$ [44] ergab. Der Variationskoeffizient ist das Verhältnis aus Standardabweichung und Erwartungswert einer Verteilung.

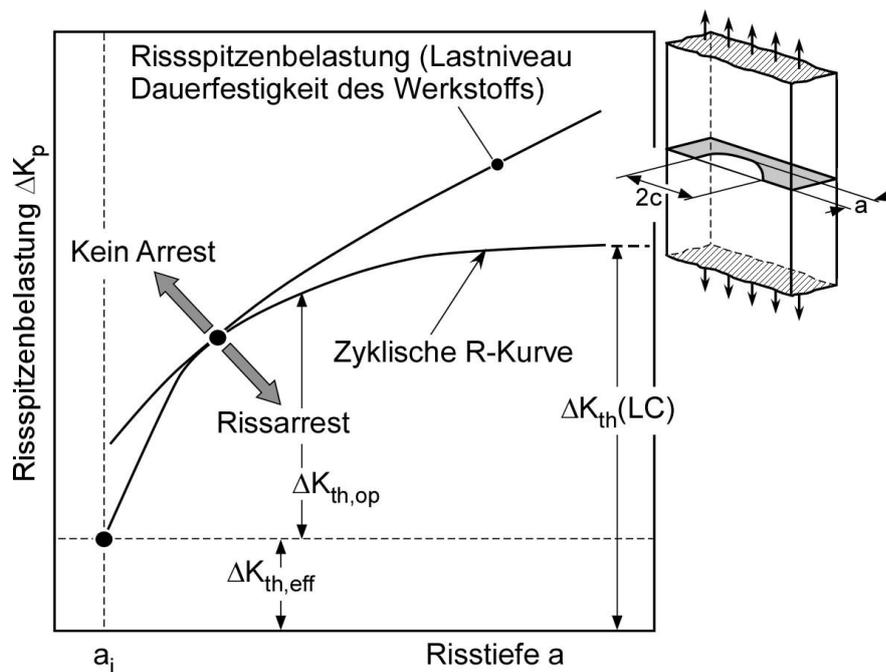


Bild 16: R-Kurven-Analyse zur Bestimmung von a_i .

2.6 Bestimmung der Bauteildauerfestigkeit und des Zeitfestigkeitsastes

2.6.1 Prinzip

Die Ermittlung der Dauerfestigkeit der Schweißverbindung folgt prinzipiell derselben Vorgehensweise wie in Bild 16, nur dass diesmal neben der zyklischen R-Kurve die Ausgangsrissstiefe a_i als angenommener Werkstoffkennwert eine Eingangsgröße ist. Für verschiedene Spannungsniveaus werden ΔK_p - a -Kurven der Schweißkonfiguration berechnet. Das Spannungsniveau derjenigen Kurve, die die zyklische R-Kurve tangential berührt, definiert die Dauerfestigkeit der Verbindung (**Bild 18**).

Hinsichtlich des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve sind die Dinge insofern komplizierter, als entlang des Nahtübergangs gleichzeitig mehrere Risse wachstumsfähig sind. Deren Zahl nimmt mit dem Lastniveau zu (Bild 14) und hängt darüber hinaus von der Gleichmäßigkeit der lokalen Nahtgeometrie ab (Bild 10 a+b). Im Rahmen des IBESS-Modells wird dem so Rechnung getragen, dass der Nahtübergang in äquidistante Abschnitte eingeteilt wird (**Bild 19**), denen jeweils eine lokale Nahtgeometrie als Zufallsparameter zugewiesen wird, wobei in die Routine korrigierend eingegriffen wird, wenn sich unmittelbar benachbarte Abschnitte geometrisch zu stark unterscheiden. Die wichtigsten geometrischen Parameter sind der Nahtübergangsradius ρ , der Nahtanstiegswinkel α , die Nahtüberhöhung h und die Tiefe von Sekundärkerben k , z.B. Einbrand, Oberflächenrauigkeit bei gewalzten Blechen u.a. (Bild 15). Als Modellannahme enthält jeder der Abschnitte genau mittig einen halbkreisförmigen Ausgangsriss der nach Abschnitt 2.5.4 ermittelten Größe a_i . **Bild 20** gibt ein Beispiel der Variation der Geometrieparameter ρ und α aus *IBESS-Teilprojekt A1* wieder.

Die Risse in den einzelnen Abschnitten werden ungleich schnell wachsen, wobei die Zahl der aktiven Risse mit höherem Lastniveau zunimmt. Berühren sich zwei Risse, so koaleszieren sie, d.h., sie werden in der Analyse in einen neuen Riss umgewandelt, der die beiden Ursprungsrisse aufnimmt. Überschreitet die Risslänge an der Oberfläche einen bestimmten Betrag, so kommt es vor, dass der tiefste Punkt und die beiden Oberflächenpunkte des Risses in verschiedene Abschnitten des Nahtübergangs mit unterschiedlicher lokaler Nahtgeometrie fallen. In der

Analyse angesetzt wird in solchen Fällen das lokale Spannungstiefenprofil in jeweils dem Abschnitt, in dem der Punkt des Risses liegt.

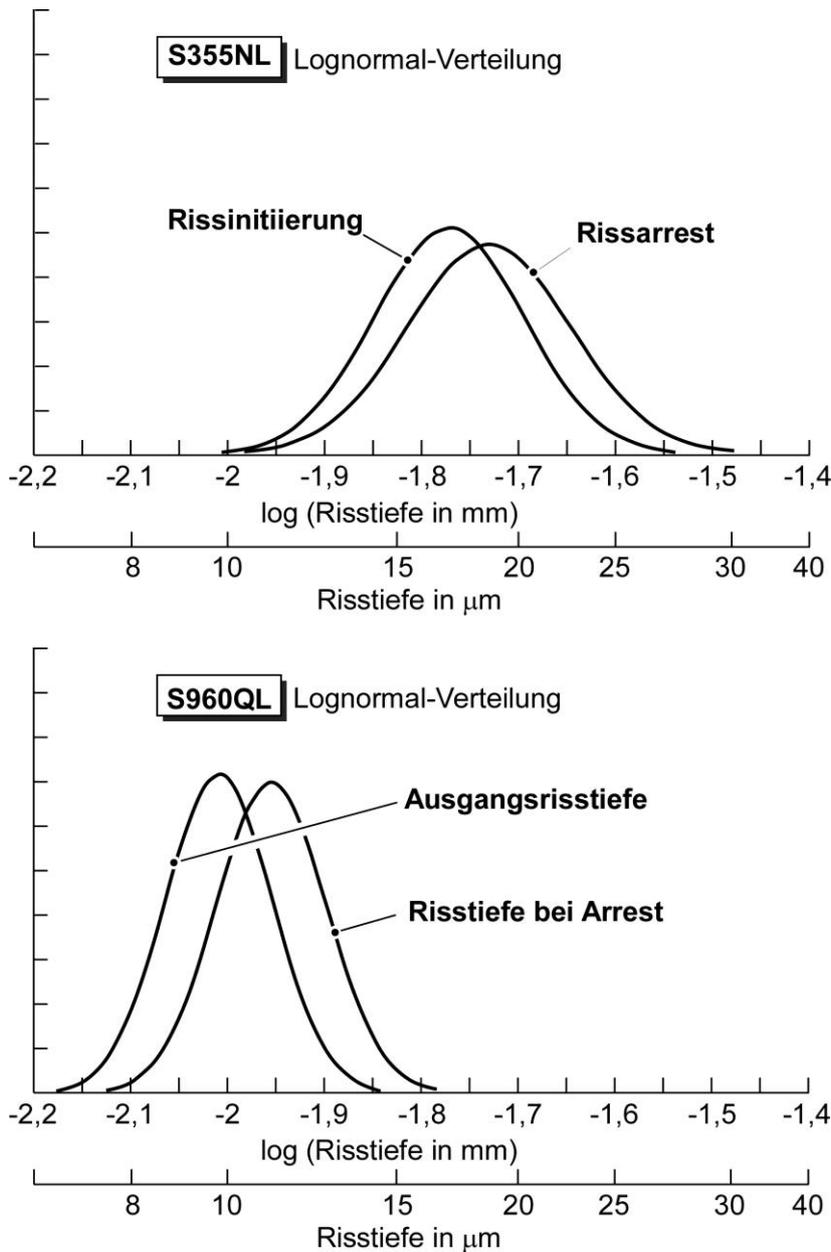


Bild 17: Beispiel für die Risstiefen bei Rissarrest sowie die Ausgangsrisstiefen der Stähle S355NL und S960Q. Im vorliegenden Fall wurde die Dauerfestigkeit als $(0,45 \pm 0,0225) R_m$ (Grundwerkstoff) abgeschätzt.

Abgebrochen wird die Rechnung, wenn die Obergrenze des K_p -Wertes im Schwingenspiel, $K_{\max,p}$, die Zähigkeit des Werkstoffs (bzw. einen unteren Perzentilwert, wenn die Größe statistisch gegeben ist) erreicht, oder aufgrund eines anderen Kriteriums, z.B. wenn die Risstiefe einen bestimmten Wert relativ zur Plattendicke überschreitet. Die Unterschiede aufgrund der abweichenden Kriterien sind eher gering, wenn sie so gewählt sind, dass die „verschenkte“ Restlebensdauer sehr begrenzt ist, was oberhalb $a/T = 0,5$ in der Regel anzunehmen ist. Als Bauteildauerfestigkeit wird im Sinne einer Arbeitsdefinition zunächst das Spannungsniveau definiert, bei dem auch nach 10^7 Schwingspielen kein Versagen eintritt.

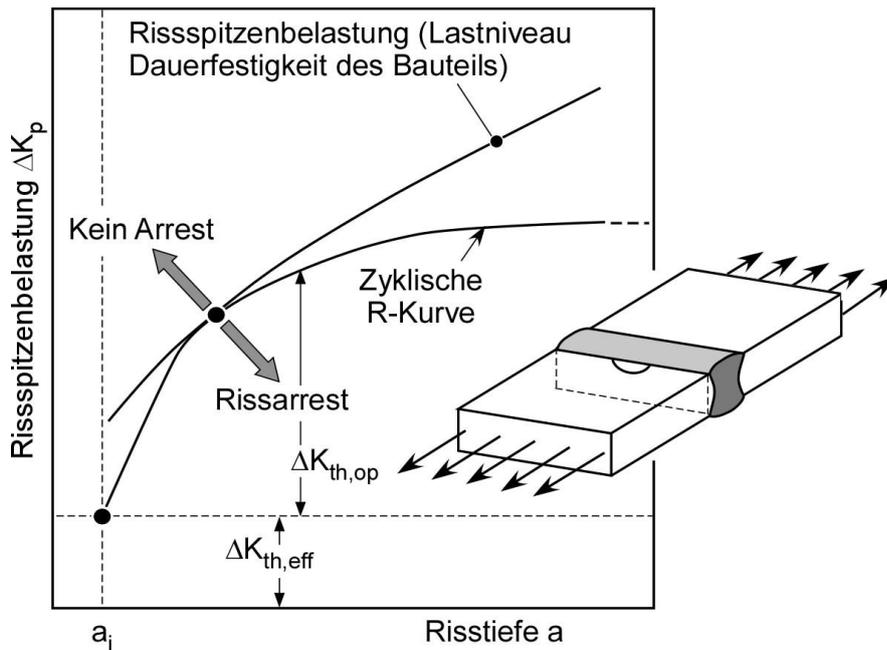


Bild 18: R-Kurven-Analyse zur Bestimmung der Dauerfestigkeit des Bauteils.

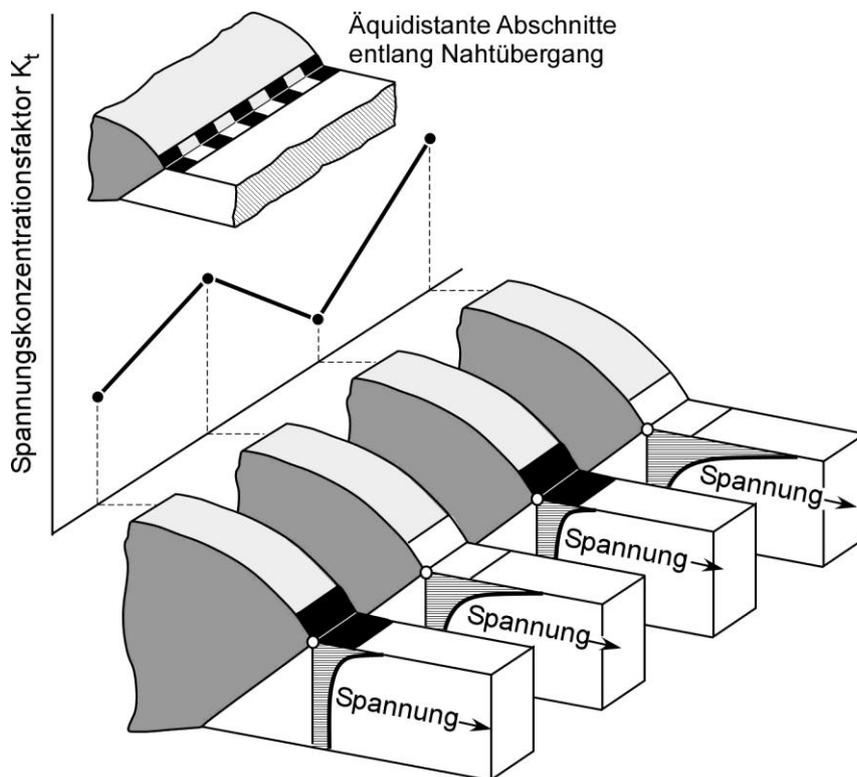


Bild 19: Einteilung des Nahtübergangs in äquidistante Abschnitte.

Jedem Abschnitt wird stochastisch eine bestimmte Geometrie entsprechend Bild 15 zugewiesen.

In **Bild 21** sind zwei Modellvarianten des IBESS-Ansatzes wiedergegeben. *Option A* bezieht den Sekundärkerb auf der Lastseite ein, d.h., das Spannungsprofil schließt die durch ihn verursachte Lastüberhöhung ein und reduziert den rechnerischen Querschnitt entsprechend um die Kerbtiefe k . *Option B*, als weniger aufwändiges Näherungsverfahren ignoriert den Einfluss des Kerbs auf die Spannungen und addiert die Tiefe des Kerbs k zur Ausgangsrisstiefe a_i hinzu. Im Sinne des bruchmechanischen Dreiecks (**Bild 22**) bedeutet das, dass der Sekundärkerb entweder auf der Bauteil/Belastungsseite berücksichtigt (*Option A*) oder als Teil des Risses verstanden wird (*Option B*).

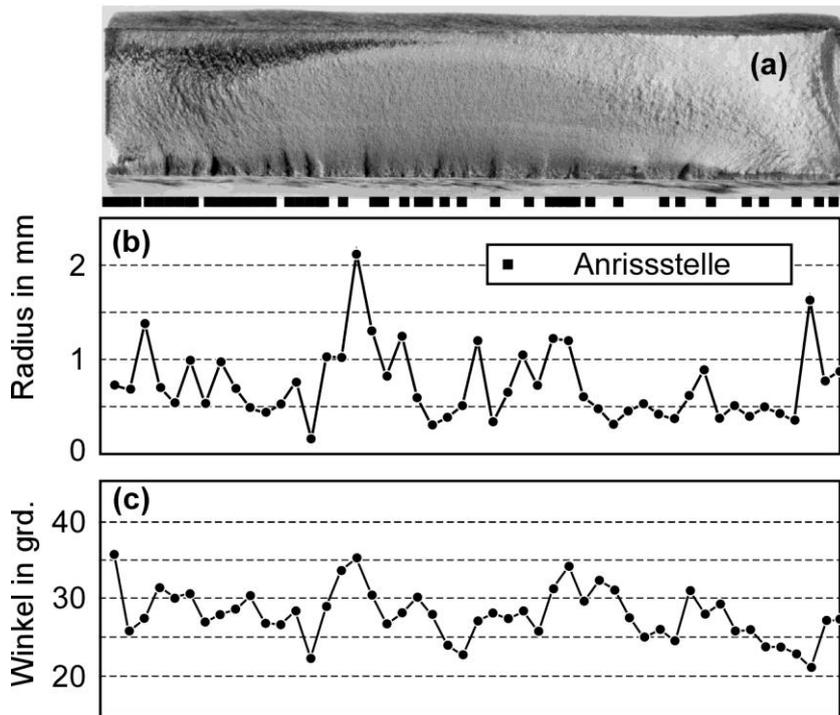


Bild 20: Beispiel für die Variation der lokalen Geometrieparameter Nahtübergangsradius ρ und Nahtanstiegswinkel α (s. Bild 15) entlang des Nahtübergangs.

Eine eindeutige Korrelation mit den Rissinitiationsstellen konnte nicht festgestellt werden.

Ergebnisse aus *IBESS-Teilprojekt A1*.

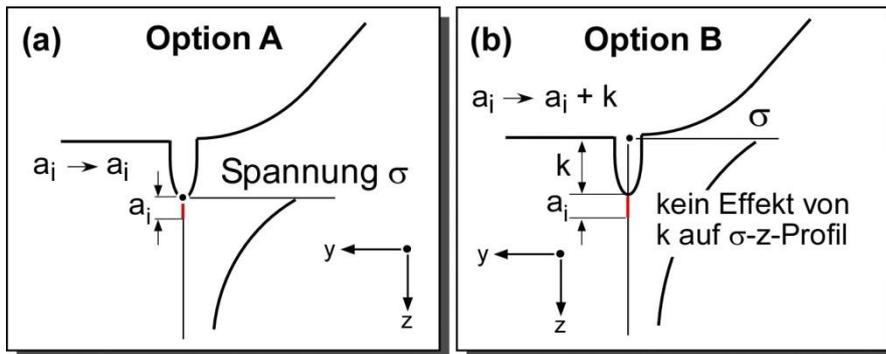


Bild 21: IBESS-Modellvarianten

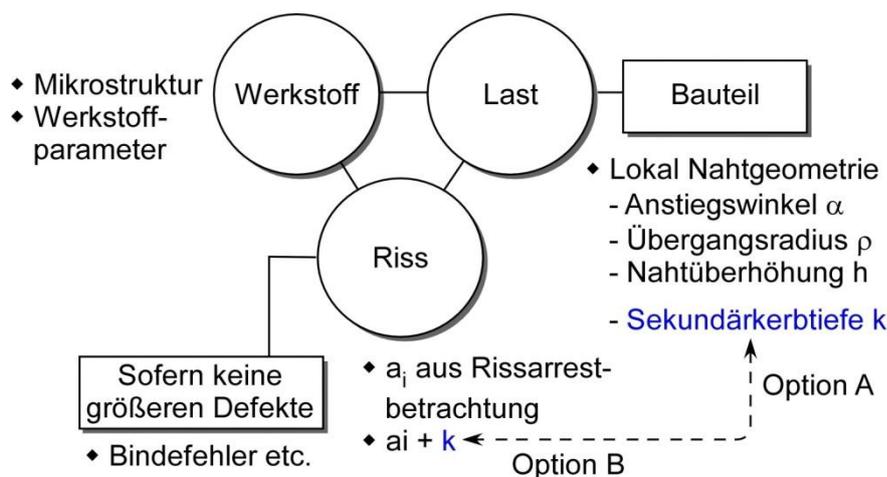


Bild 22: IBESS-Optionen A und B im bruchmechanischen Dreieck.

2.6.2 Realsierung: Spannungs-Tiefen-Profile

Für die analytische Umsetzung von *Option A* stellt IBESS für Platten mit einer Dicke von $T = 10$ mm mit FEM ermittelte, tabellierte Spannungs-Tiefen-Profile für die erste Hauptspannung bis zu einer Tiefe von $0,5 T$ zur Verfügung (**Anhang B**). Die variierten Parameter umfassen:

- ♦ den Nahttyp: X- und V-Naht (auch anwendbar auf entsprechend Kreuzstoß bzw. Quersteife, wenn die Versteifungen lastfrei sind),
- ♦ den Belastungstyp: Zug und Biegung,
- ♦ den Nahtübergangsradius (ρ in mm) : 0,1 / 0,2 / 0,3 / 0,4 / 0,5 / 1 / 4,
- ♦ den Nahtanstiegswinkel (α in grad.): 10 / 20 / 30 / 45 / 60,
- ♦ die Nahtüberhöhung (h in mm): 0,75 / 2 und
- ♦ die Sekundärkerbtiefe (k in mm): 0 / 0,1 / 0,3.

Für *Option B* stellt IBESS Parametergleichungen für Spannungs-Tiefen-Profile zur Verfügung, die mit Ausnahme der Sekundärkerbtiefe k dieselben Parameter der lokalen Nahtgeometrie berücksichtigen. Dabei handelt es sich um Erweiterungen (bezüglich der Variationsbreite der geometrischen Parameter) und Verbesserungen vorhandener Ansätze, s. **Anhang C**. Abgeleitet wurden die Lösungen für Stumpfstöße (**Bild 23**). Wie die Spannungs-Tiefen-Profile für *Option A* sind diese auch auf versteifte Geometrien (Versteifungen nicht lasttragend) anwendbar, und zwar die Lösung für die X-Naht auf den Kreuzstoß und die Lösung für die V-Naht auf die Quersteife. Die Nahtüberhöhung wird in diesen Fällen als Grenzmaß $h = 3$ mm angenommen.

Im Einzelnen wurden folgende Parametergleichungen erhalten:

$$\sigma_y(z) = \frac{K_t \cdot \sigma_N}{2\sqrt{2}} \left[\left(\frac{z}{\rho} + \frac{1}{2} \right)^{-0.5} + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\rho} + \frac{1}{2} \right)^{-1.5} \right] \cdot \frac{1}{G} \quad (28)$$

mit

$$G_m = \begin{cases} 1 & \text{for } z/\rho \leq (x/\rho)_0 \\ q_1 + \frac{q_2 \cdot e^{-E \cdot T}}{1 + E^{q_3} \cdot \gamma^{q_4} \cdot e^{-E \cdot T}} & \text{for } z/\rho > (x/\rho)_0 \end{cases}, \quad (29)$$

$$\gamma = \frac{z}{T} - (z/\rho)_0 \cdot \frac{\rho}{T}, \quad (30)$$

und

$$E = q_5 \cdot \left(\frac{\rho}{T} \right)^{q_6 \cdot \alpha^{q_7}} + 1.5 \cdot \alpha^{q_8 \cdot \rho^{q_9}} - q_{10} \cdot \left(\frac{h}{T} \right)^{q_{11} \cdot \alpha} - q_{12} \cdot \frac{h \cdot \alpha}{\rho}. \quad (31)$$

Gültigkeitsbereich: $\alpha = 10 - 60^\circ$; $\rho = 0,1 - 4$ mm; $\rho/T = 0,01 - 0,4$; $h = 0,75 - 3$ mm

Die Koeffizienten in Gl. (28) – (31) sind in **Tab. 4** gegeben.

Tab. 4: Koeffizienten in Gl. (28) – (31).

Schweißnahtgeometrie	X -Naht	X und V-Naht	V-Naht
Belastung	Zug	Biegung	Zug
Koeffizient			
$(x/\rho)_0$	0,1	0,12	0,12
q_1	0,081	0,08	0,06
q_2	0,919	0,92	0,94
q_3	3	2,5	2,5
q_4	0,8	0,8	0,8
q_5	0,6199	1,8240	1,7872
q_6	-0,221	-0,134	-0,1105
q_7	-0,1541	-0,1805	-0,2309
q_8	-0,1939	-0,2011	-0,1441
q_9	-0,2346	-0,3214	-0,4331
q_{10}	1,7375	3,1312	2,7871
q_{11}	0,1502	0,0567	0,08
q_{13}	0,0081	0,0052	0,0016

Auch hinsichtlich des in Gl. (28) benötigten Spannungskonzentrationsfaktors K_t wurden erweiterte und verbesserte Gleichungen ermittelt:

$$K_t = p_1 + \left[p_2 + p_3 \cdot \left(\frac{h}{T} \right)^{p_4 \cdot \alpha} \right] \cdot \alpha^{p_5} \cdot e^{-p_6 \cdot \alpha} \cdot \left(\frac{\rho}{T} \right)^{-p_7 \cdot \alpha} \cdot \left[0,025 + \left(\frac{\rho}{T} \right)^{-p_8} \right] \quad (32)$$

Gültigkeitsbereich: $\alpha = 10 - 60^\circ$; $\rho = 0,1 - 4 \text{ mm}$; $\rho/T = 0,01 - 0,4$; $h = 0,75 - 3 \text{ mm}$

Die Koeffizienten in Gl. (32) sind in **Tab. 5** gegeben.

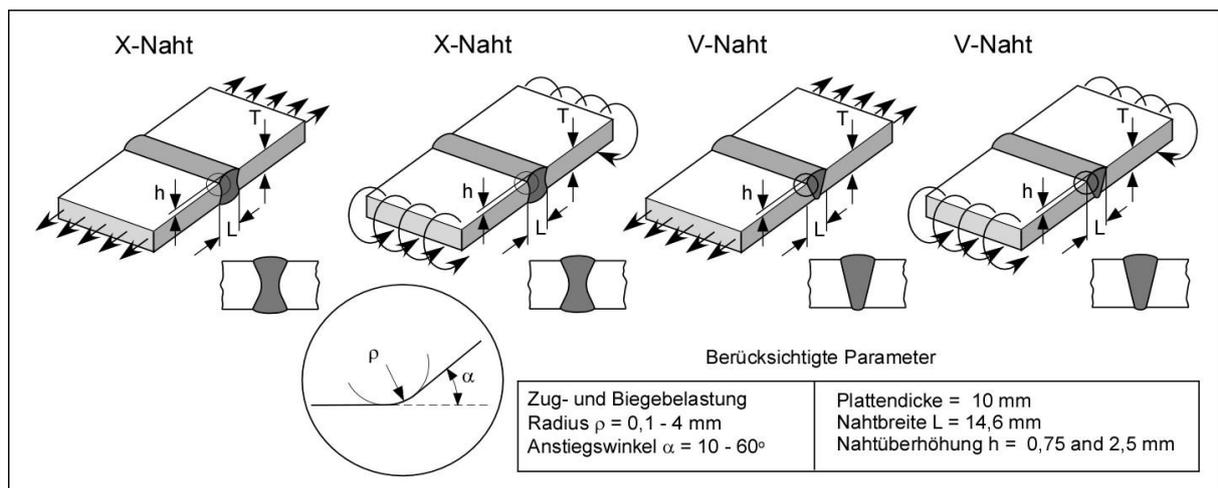
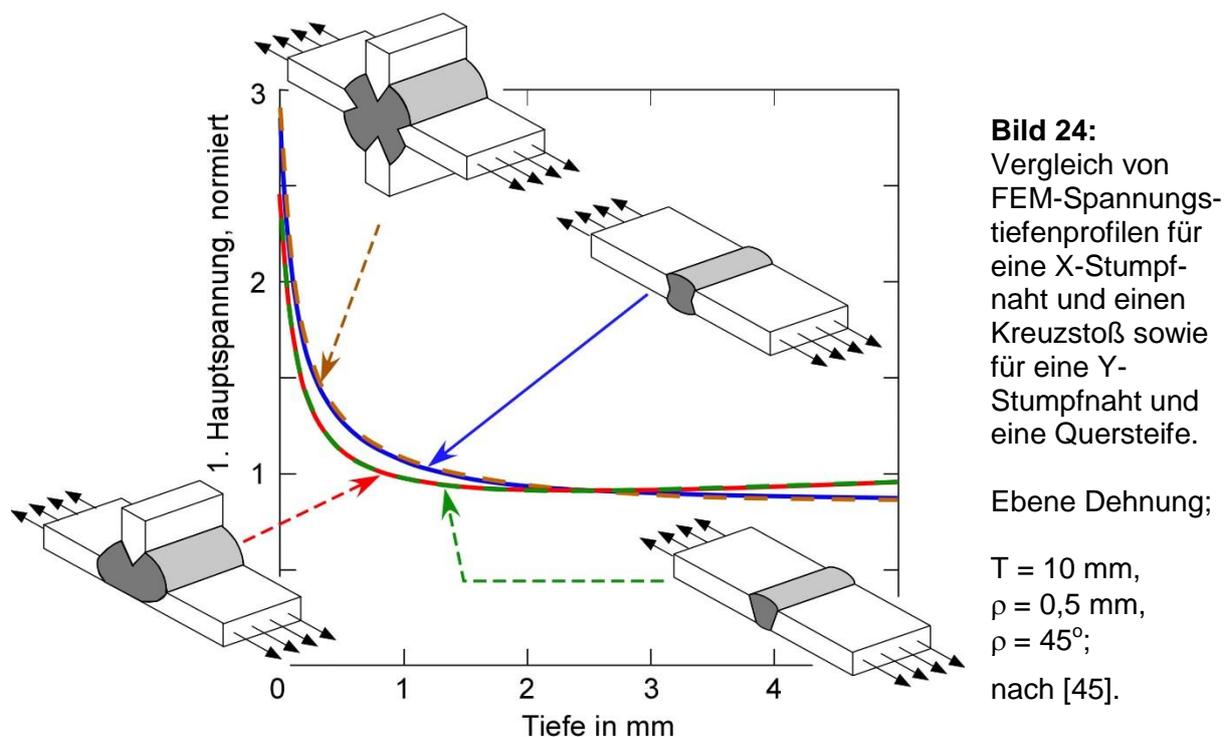


Bild 23: Schweißverbindungsformen, für die Parametergleichungen für K_t und σ_y -z-Profile abgeleitet wurden.

Tab. 5: Koeffizienten in Gl. (32)

Schweißnahtgeometrie, Belastungstyp	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8
X-Naht, Zug	1,1493	0,2661	1,4086	0,5108	1,3522	1,6872	0,2778	0,5413
X-Naht, Biegung	1,0940	-0,3957	1,2485	0,1299	1,1742	1,7412	0,2847	0,5966
V-Naht, Zug	1,1282	0,2108	0,8777	0,3184	1,2578	1,8753	0,2814	0,5899
V-Naht, Biegung	1,1202	0,0679	1,1681	0,3357	1,2640	1,6446	0,2828	0,5569

Die Möglichkeit, die Lösungen für die X-Stumpfnah auch auf den Kreuzstoß und die Lösung für die V-Stumpfnah auch auf die Quersteife zu übertragen, illustriert **Bild 24**, wo entsprechende FE-Daten für eine Plattendicke T von 10 mm, einen Nahtübergangsradius ρ von 0,5 mm und einen Nahtanstiegswinkel α von 45° vergleichend gegenüber gestellt sind. Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Master-Arbeit [45] im vorliegenden *IBESS-Teilprojekt A3* durchgeführt.



2.6.3 Realisierung: Risskoaleszenz

Für lange Risse existieren in Regelwerken wie [14] Vorschriften, wann für zwei koplanare Risse Koaleszenz anzunehmen ist, wobei zwischen den verschiedenen Vorschriften gewisse Unterschiede bestehen [46]. Auf kurze Risse sind die Regeln aber nicht einfach übertragbar, s. z.B. die Diskussion in [47]. Das gegenwärtig realisierte IBESS-Modell nimmt Koaleszenz an, wenn sich die Oberflächenpunkte zweier koplanarer halb-elliptischer Oberflächenrisse gerade berühren, ohne dabei die lokale Spannungserhöhung infolge der Wechselwirkung der Risspitzen zu berücksichtigen. Für den zusammengewachsenen Riss werden dann folgende Abmessungen angenommen: Länge an der Oberfläche = Summe der Risslängen der beiden vorherigen Einzelrisse; Risstiefe = Tiefe des zuvor tieferen Risses. Dabei ist die erstgenannte Annahme nichtkonservativ (folgt man [48], allerdings nur moderat), während die zweite konservativ ist. Tatsächlich werden sich die beiden aufeinander zuwachsenden Risse gegen-

seitig beeinflussen, d.h., die Rissspitzenbelastung der einander zugewandten Rissspitzen wird bei Unterschreitung eines bestimmten Abschnittes größer sein, als wenn kein benachbarter Riss vorhanden wäre. In der Folge wachsen die Risse bereits zusammen, bevor sich ihre Spitzen berühren. Dann braucht es jedoch in der Realität zusätzliche, im Modell nicht berücksichtigte Zeit, bis der neue Riss in die Halbellipsenform hineingewachsen ist. Nach [48], wo sich die Autoren speziell mit der Koaleszenz von Rissen am Nahtübergang auseinandersetzen, liefert ein Modell wie das in IBESS derzeit realisierte hinsichtlich der erhaltenen Lebensdauer v.a. bei geringen Spannungsniveaus befriedigende Ergebnisse, während es bei höheren Lastniveaus zu konservativen Vorhersagen führt. Anzumerken ist, dass die derzeitige Methode in IBESS für Änderungsvorschläge offen ist. Arbeiten dazu wurden in *IBESS-Teilprojekt G4* durchgeführt.

2.6.4 Realisierung: Statistik

Bild 25 illustriert die statistische Ermittlung der Schwingfestigkeit. Unter Nutzung der statistischen Verteilungen für den Nahtübergangsradius ρ , den Nahtantiegswinkel α , die Nahtüberhöhung h und die Sekundärkerbtiefe k sowie die Ausgangsrisstiefe a_i wird jedem der zuvor festgelegten äquidistanten Abschnitte entlang des Nahtübergangs stochastisch eine bestimmte Geometrie zugewiesen. Diese wird aus der Spanne der statistisch verteilten Werte in den Grenzen zwischen 10% und 90% Wahrscheinlichkeit gewählt. Dabei wird darauf geachtet, dass benachbarten Abschnitten alternierend jeweils ein Parameter unterhalb bzw. oberhalb des Erwartungswertes zugewiesen wird.

Für die auf diese Weise „ausgewürfelte“ Komponente wird nach dem oben beschriebenen Schema die Lebensdauer berechnet. Anschließend wird die Analyse zunächst auf demselben Lastniveau, dann auf anderen Lastniveaus mehrfach wiederholt, wobei jedesmal eine zufällig eingestellte Geometrie zugrundeliegt. Im Ergebnis erhält man das im Bild dargestellte Streuband des Zeitfestigkeitsastes. Die statistische Ermittlung der Dauerfestigkeit folgt einem abweichenden Schema. Auch dabei werden für ein bestimmtes Lastniveau mehrere Rechnungen durchgeführt. Ausgewertet wird dann aber, ob die Struktur dauerhaft ist oder nicht. Kriterium ist, dass bei einer Schwingspielzahl von $N = 10^7$ noch kein Versagen eingetreten ist oder alle Risse arretiert sind (d.h., eine Wachstumsrate von $da/dN \leq 10^{-8}$ mm/Schwingspiel aufweisen). Bei niedrigen Lastniveaus ist das durchweg der Fall. Oberhalb einer bestimmten Spannungsamplitude wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bruch bei $N \leq 10^7$ auftritt, dann aber zunehmen und schließlich 100% erreichen. Auf diese Weise lässt sich die Dauerfestigkeit als Wahrscheinlichkeitsmaß ermitteln.

3. Eingangsdaten

3.1 Werkstoffdaten

3.1.1 Übersicht

Die für die Analyse benötigten Werkstoffdaten umfassen:

- ♦ die Dauerfestigkeit des Werkstoffs (glatte Probe, $R = -1$),
- ♦ die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve,
- ♦ die da/dN - ΔK -Kurve für den langen Riss,
- ♦ den Langrisswellenwert $\Delta K_{th,LC}$ für das Spannungsverhältnis R , dem das Bauteil ausgesetzt ist,
- ♦ den intrinsischen Schwellenwert $\Delta K_{th,eff}$ und
- ♦ die zyklische R-Kurve $\Delta K_{th}(a)$.

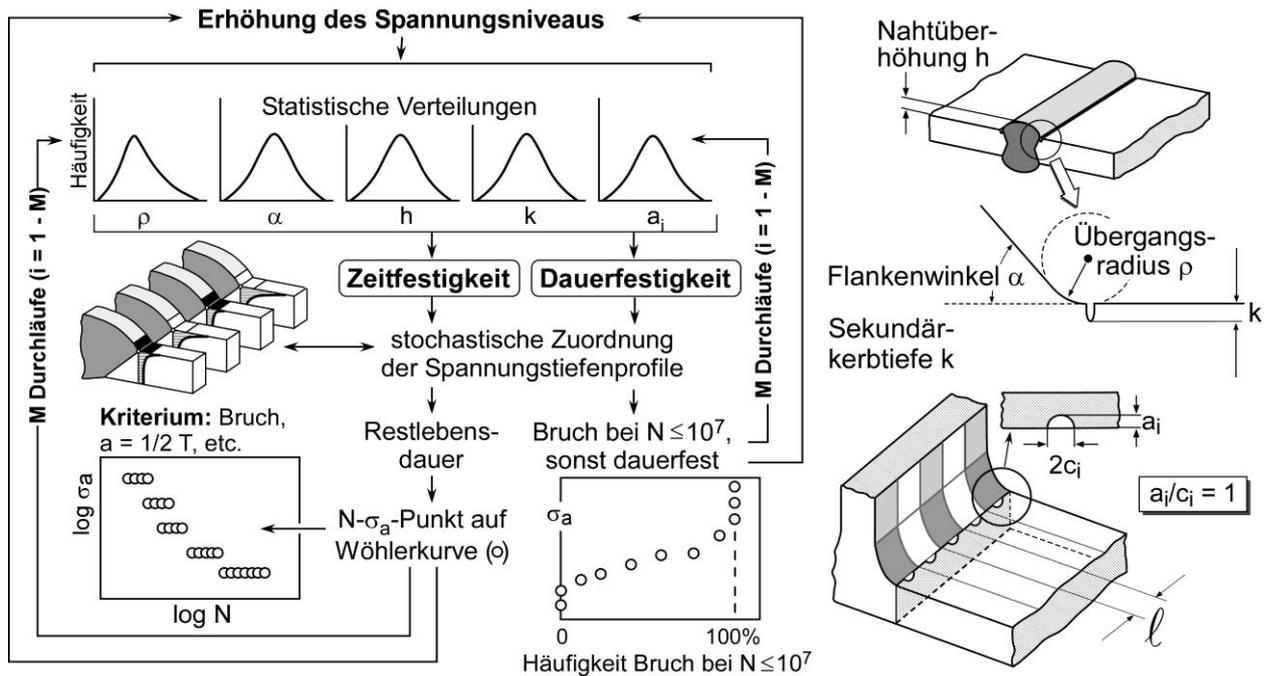


Bild 25: Statistische Ermittlung der Zeit- und Dauerfestigkeit im IBESS-Modell; schematische Darstellung.

3.1.2 Werkstoffgefüge

Alle diese Daten wurden im Rahmen des IBESS-Projekts explizit ermittelt. **Bild 26** zeigt das Gefüge der beiden untersuchten Werkstoffe S355NL und S960QL, und zwar jeweils der Grundwerkstoffe (oben) und der Wärmeeinflusszonen (WEZ) (unten). Es ist davon auszugehen, dass der Riss am Nahtübergang entstehen wird (s. z.B. **Bild 27**), der in das Gebiet der Wärmeeinflusszone fällt. Deren Struktur ist allerdings nicht einheitlich sondern durch Grob- und Feinkornbereiche gekennzeichnet. **Bild 28** gibt Härteprofile (HV1) der Naht einschließlich der Wärmeeinflusszone einer Stumpfschweißverbindung aus S355NL und S960QL wieder. In *IBESS-Teilprojekt G1* wurden entsprechende Proben in einer speziellen Wärmebehandlung erzeugt. Diese Gefügesimulation nutzte die Daten einer SYSWELD-Simulation in Verbindung mit örtlichen Temperaturmessungen beim Schweißvorgang in *IBESS-Teilprojekt G2*. „Validiert“ wurden die erhaltenen Gefüge durch den Vergleich der Mikrostrukturen und vergleichende Härtemessungen an der realen Naht und den gefügesimulierten Proben. Ein Beispiel für das Original und das „simulierte“ Gefüge des S355NL zeigt **Bild 29**.

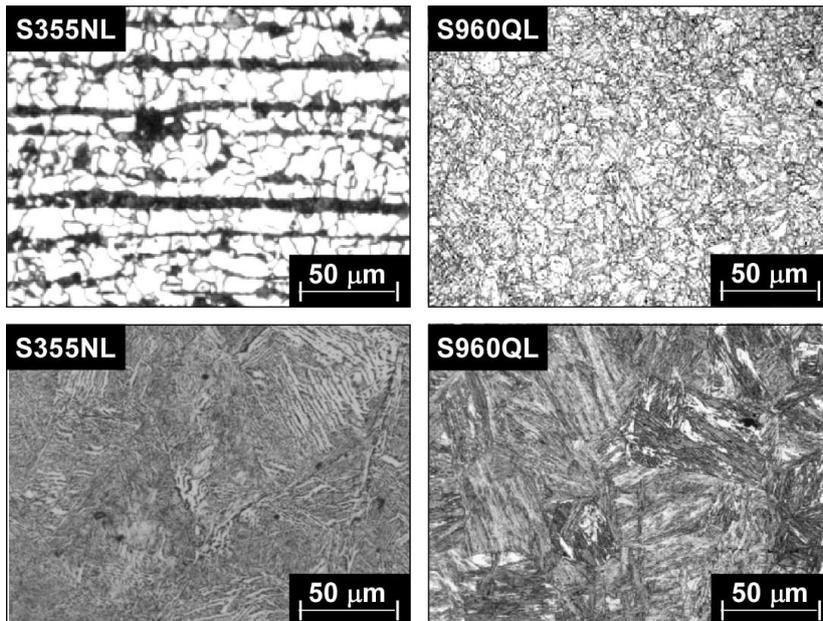


Bild 26:
Gefüge der untersuchten Werkstoffe S3255NL und S960QL;

Oben: Grundwerkstoff;

Unten: Wärmeeinflusszone

IBESS-Teilprojekte G und A11.

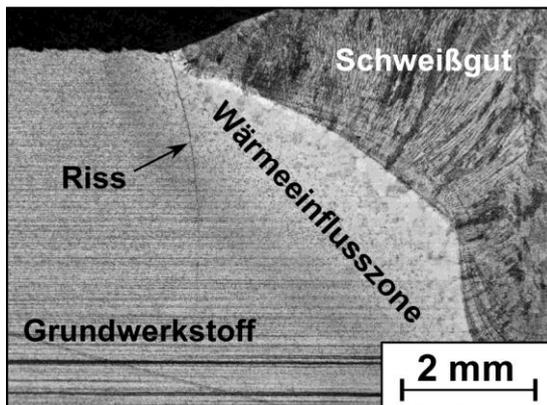


Bild 27: Beispiel für den Initiierungsort und den Wachstumspfad eines Ermüdungsrisse;

IBESS-Teilprojekt A1.

3.1.3 Wechselfestigkeit σ_w

Die Dauerfestigkeit bei $R = -1$ wurde in *IBESS-Teilprojekt G1* mittels Treppenstufenverfahren bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Tab. 6** wiedergegeben. Bei der praktischen Anwendung von IBESS wird der Aufwand gefügesimulierter Proben in der Regel nicht leistbar sein. Statt dessen wird die Analyse entweder auf der Grundlage der Grundwerkstoffdaten durchgeführt werden, was in Abschnitt 4.3.1 diskutiert werden wird, oder die Dauerfestigkeit wird aus Ersatzdaten, bevorzugt der Härte abgeschätzt, wie dies mittels Gl. (27) geschehen kann. Dass dieser einfache Ansatz akzeptable Schätzwerte ergibt, ist in **Bild 30** demonstriert, bei dem die Daten der vier untersuchten Gefüge und Gefügebereiche nach **Tab. 6** eingetragen sind.

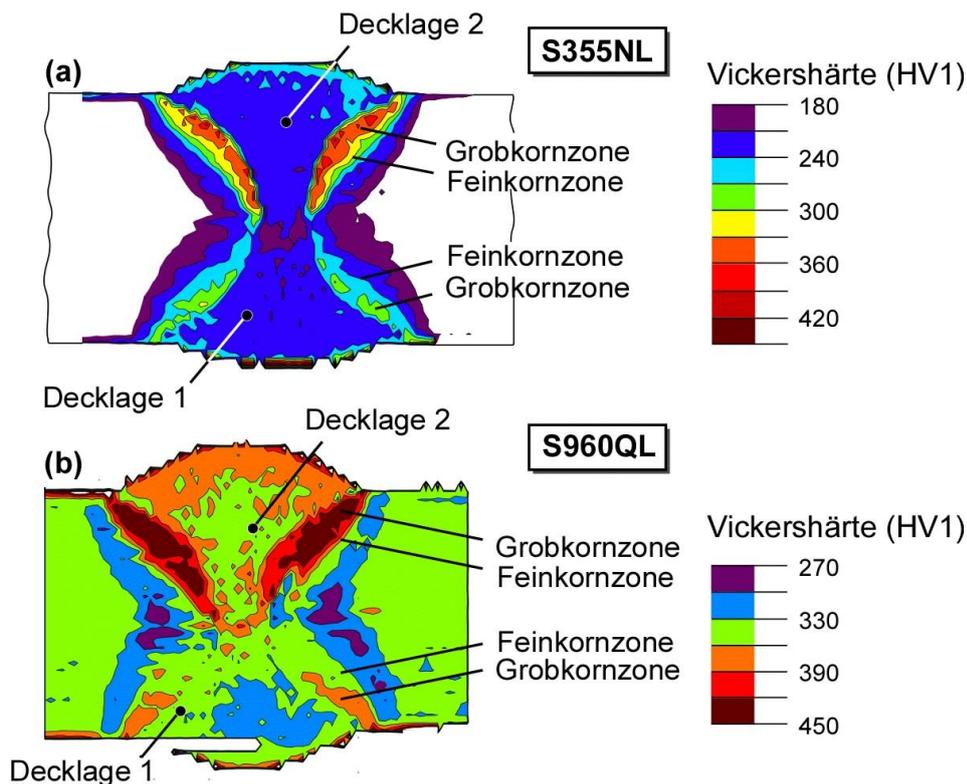


Bild 28:
Unterscheidung
Der Werkstoff-
bereiche einer
Schweißnaht
anhand von
Härteprofilen;

IBESS-
Teilprojekt G1.

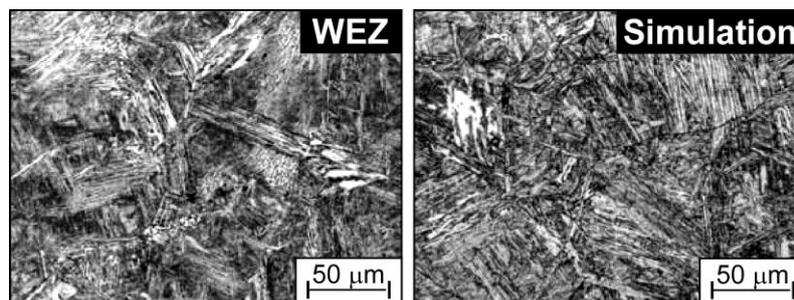


Bild 29: Vergleich von Ori-
ginal- und simuliertem
WEZ-Gefüge;

IBESS-Teilprojekt G1.

3.1.4 Statische und zyklische-Spannungs-Dehnung-Kurven

Die ebenfalls in *IBESS-Teilprojekt G1* ermittelten statischen Spannungs-Dehnungs-Kurven sowie die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in den **Bildern 31 bis 36** wiedergegeben. Die Daten für die beiden Grundwerkstoffe wurden im Sinne der Qualitätssicherung zusätzlich gegen Literaturdaten geprüft (Bilder 33 und 34).

Bild 36 zeigt den Vergleich der statischen und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der Grundwerkstoffe der Stähle S355NL (10mm-Blech) und S355J2-N (3mm-Blech). Während sich die statischen Fließgrenzen wohl v.a. wegen des höheren Umformgrades des S355J2+N deutlich unterscheiden, sind die Unterschiede auf der Ebene der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve nur gering. Als Konsequenz war es zulässig, für die IBESS-Analyse der 3mm-Bleche die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven des S355NL einschließlich der WEZ-Daten zugrunde zu legen.

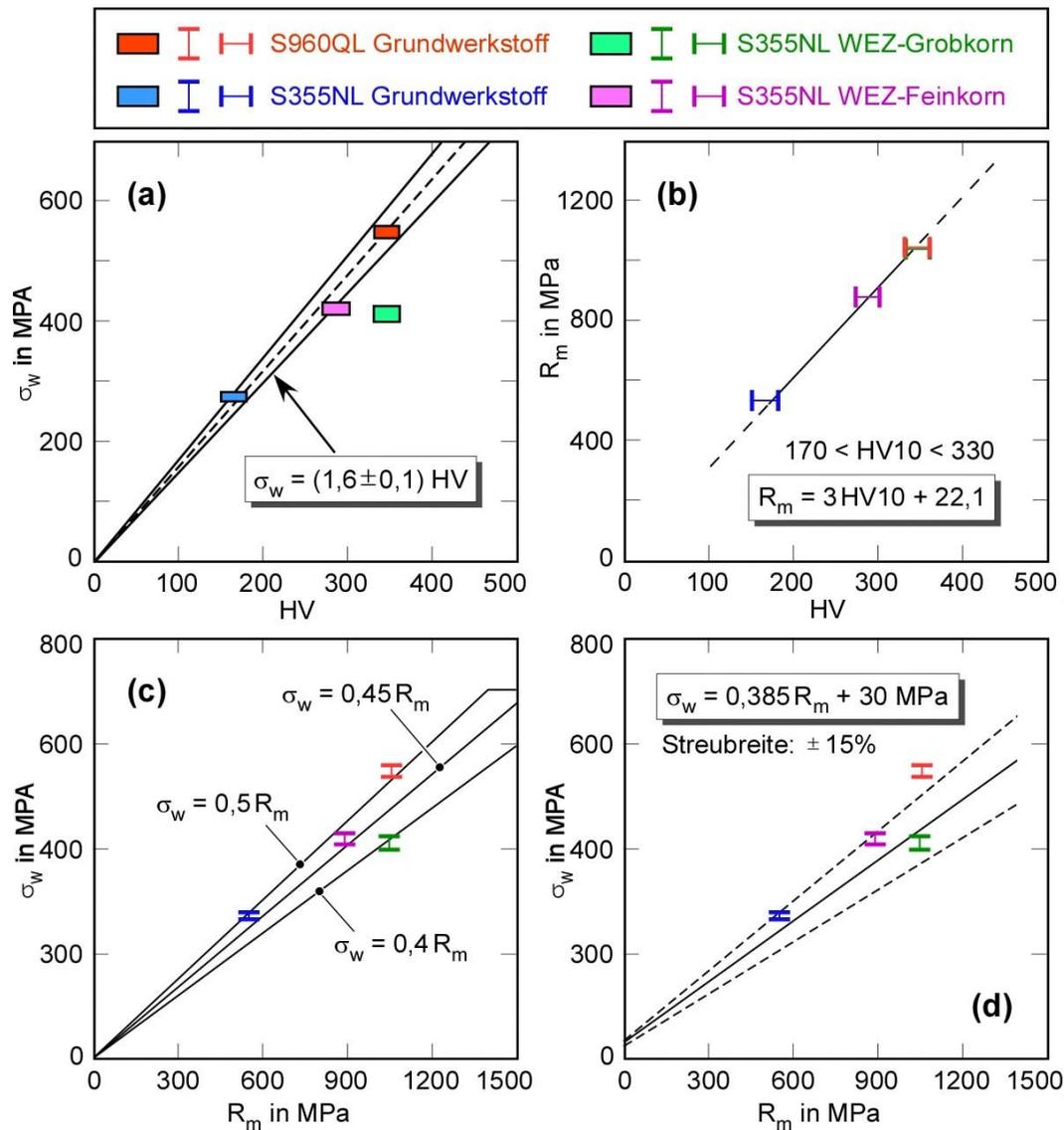


Bild 30: Anwendung von Abschätzformeln (z.B. Gl. 27) für die Dauerfestigkeit auf die in IBESS untersuchten Gefüge und Gefügebereiche. (a) σ_w -HV nach [42]; (b) R_m -HV nach [49]; (c) σ_w - R_m nach [49]; (d) σ_w - R_m nach [50].

Tab. 6: Mittels Treppenstufenverfahren (*stair case*) ermittelte Dauerfestigkeit der Grundwerkstoffe des S355NL und des S960QL sowie verschiedener Bereiche der Wärmeeinflusszone des S355NL; *IBESS-Teilprojekt G1*.

Werkstoff	Wechselfestigkeit σ_w in MPa	Standardabweichung zu σ_w in MPa
S355NL Grundwerkstoff	275	7
S355NL WEZ-Grobkornzone (Decklage 2 nach Bild 27)	zwischen 400 und 425	
S355NL WEZ-Feinkornzone (Decklage 2 nach Bild 27)	421	10
S960QL Grundwerkstoff	zwischen 540 und 560	

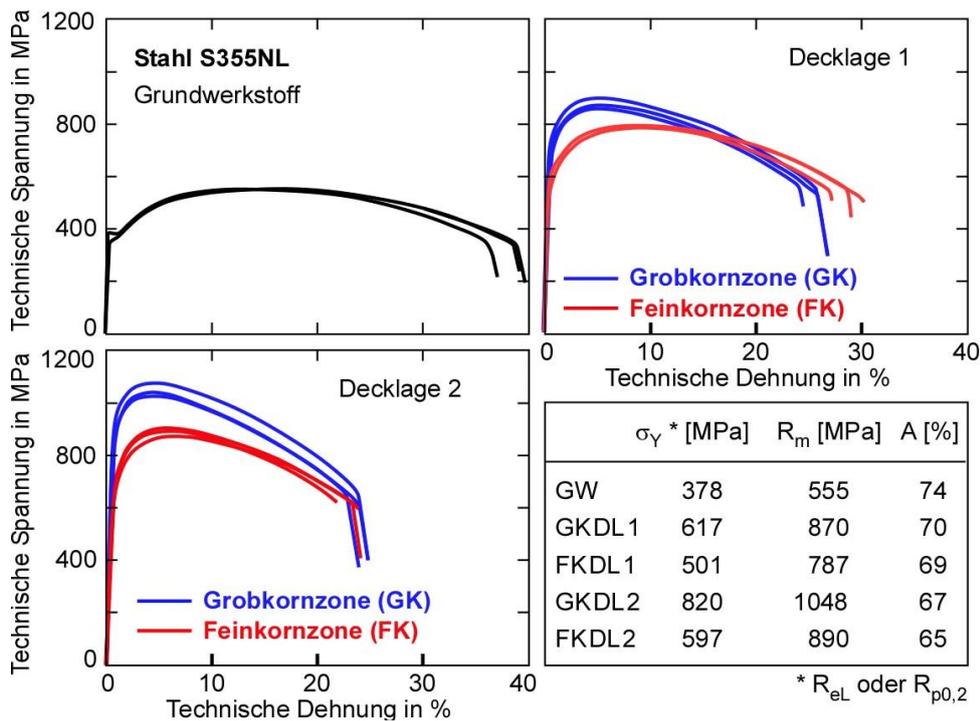


Bild 31: Statische Spannungs-Dehnungs-Kurven des Stahls S355NL; Grundwerkstoff und verschiedene Bereiche der Wärmeeinflusszone, vgl. Bild 28.

IBESS-Teilprojekt G1.

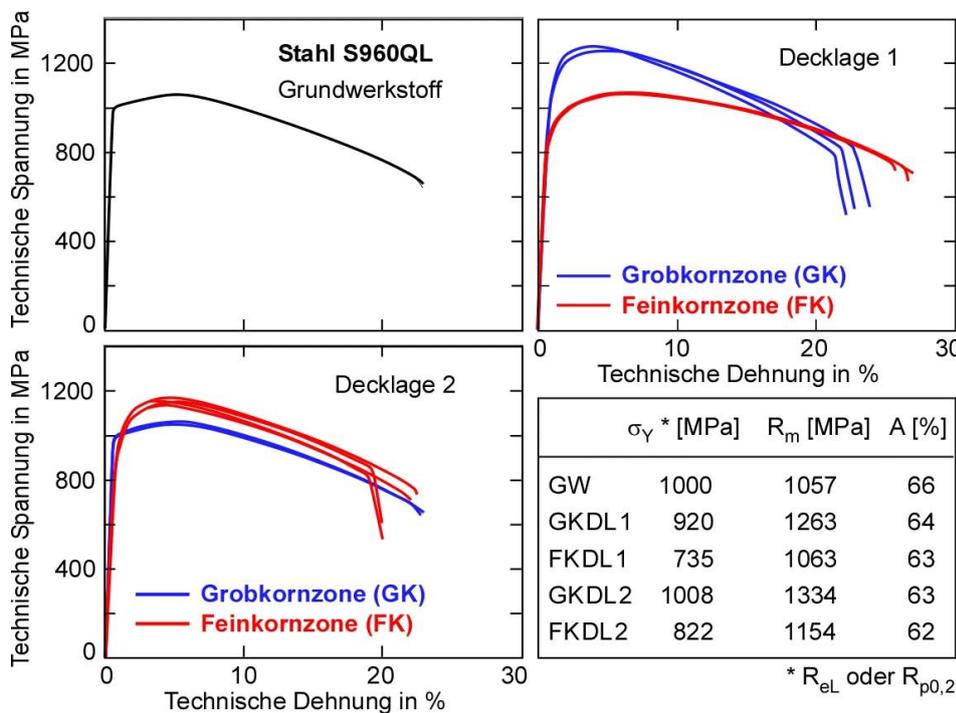


Bild 32: Statische Spannungs-Dehnungs-Kurven des Stahls S960QL; Grundwerkstoff und verschiedene Bereiche der Wärmeeinflusszone, vgl. Bild 28.

IBESS-Teilprojekt G1.

(GW = Grundwerkstoff / GK = Grobkorn / FK = Feinkorn / DL = Decklage)

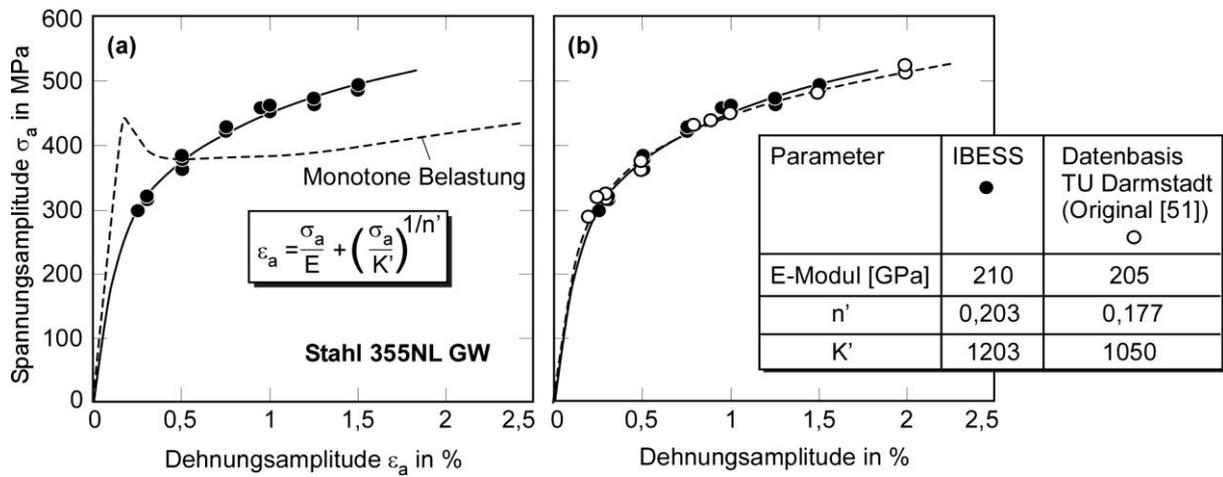


Bild 33: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve des Stahls S355NL, Grundwerkstoff; Vergleich mit Literaturdaten nach [51]; *IBESS-Teilprojekt G1*.

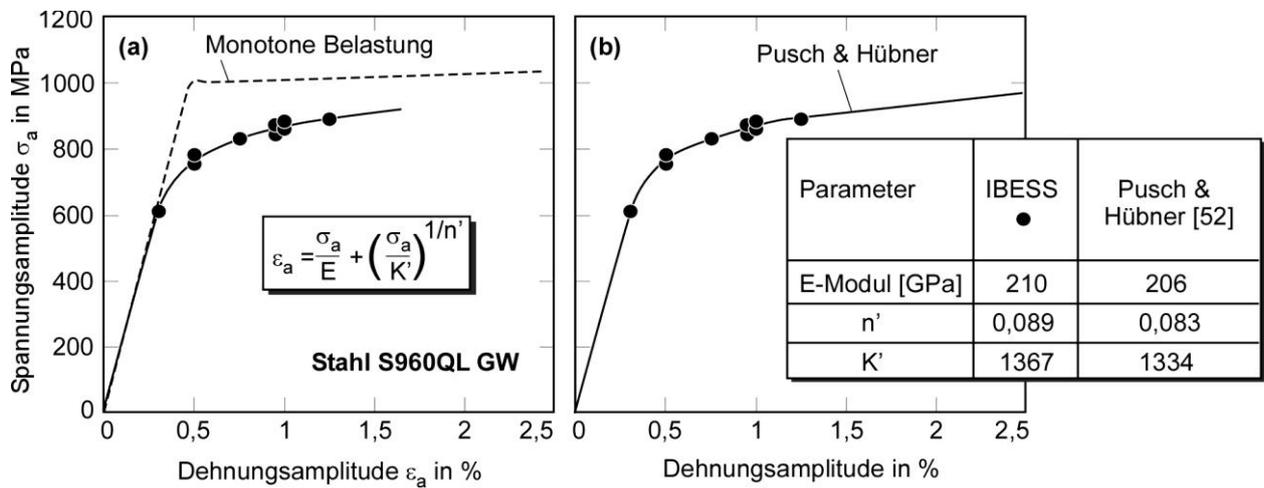


Bild 34: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve des Stahls S960QL, Grundwerkstoff; Vergleich mit Literaturdaten nach [52]; *IBESS-Teilprojekt G1*.

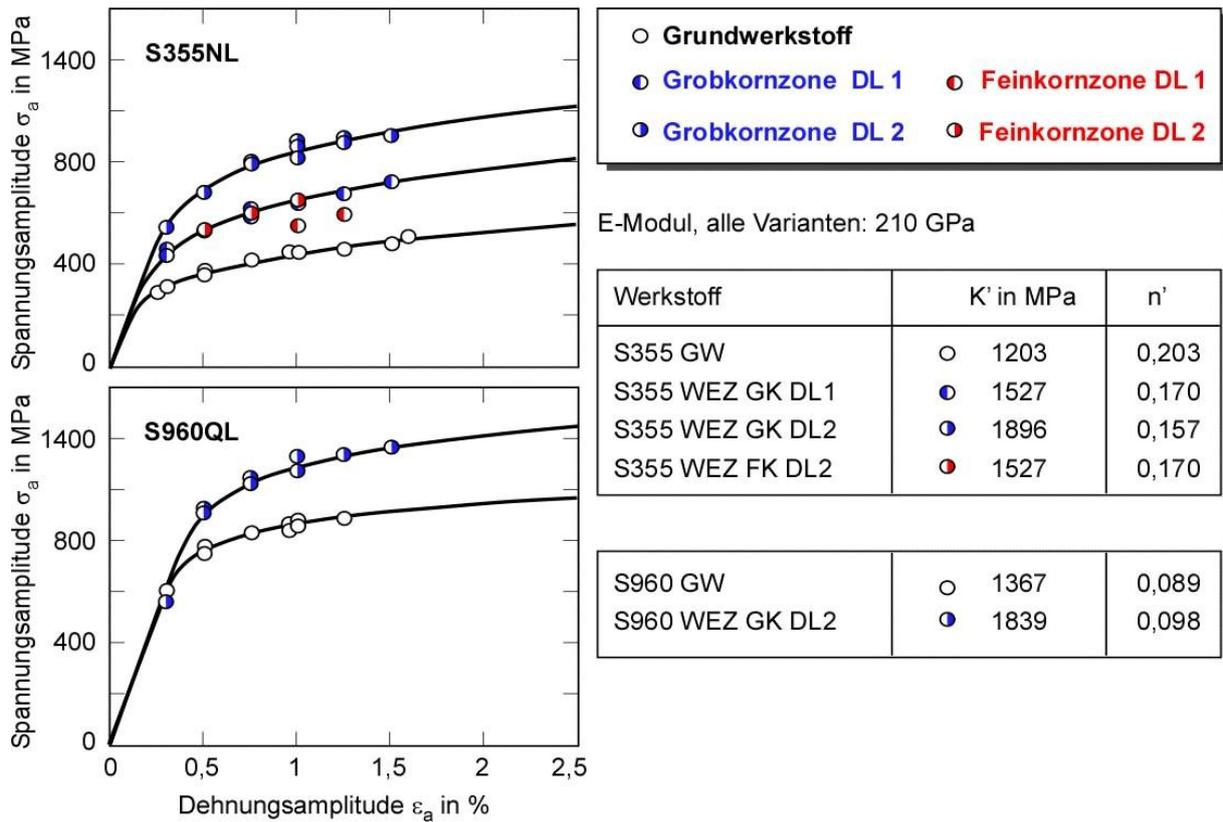


Bild 35: Zykliche Spannungs-Dehnungs-Kurven der Stähle S355NL und S960QL, Grundwerkstoffe sowie verschiedene Bereiche der Wärmeeinflusszonen; *IBESS-Teilprojekt G1*.

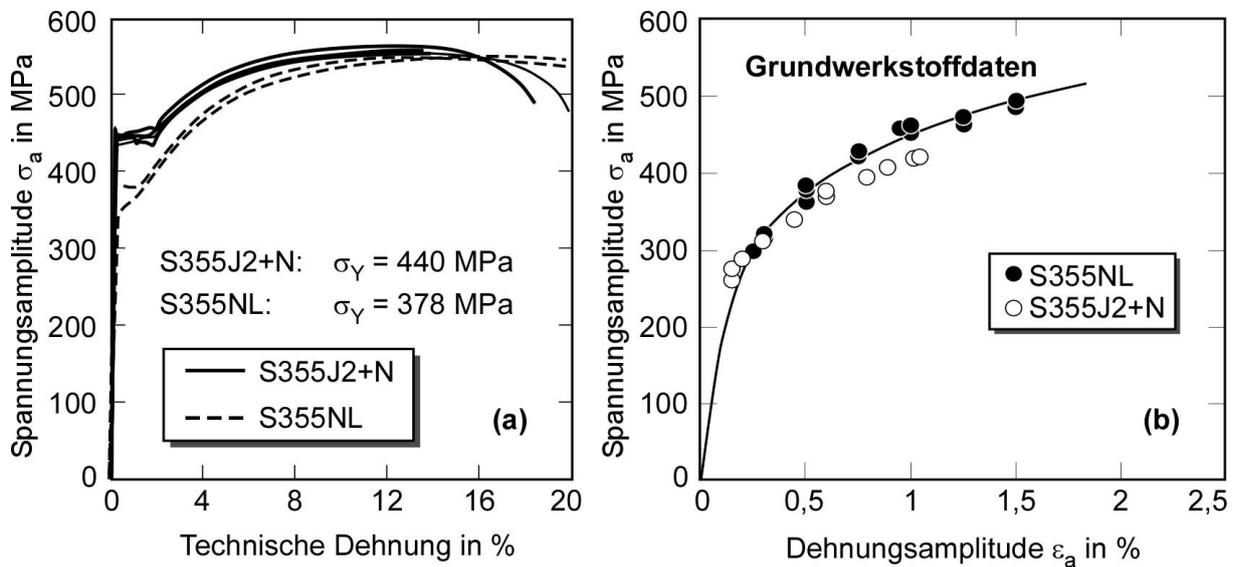


Bild 36: Statische und zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve des S355J2-N (3mm-Blech) im Vergleich zu den Daten des S3255NL (10 mm-Blech), vorliegendes *IBESS-Teilprojekt*.

3.1.5 Rissausbreitungskurven (da/dN - ΔK -Kurven)

Rissausbreitungskurven zur Beschreibung von Langrisswachstum wurden im vorliegenden IBESS-Teilprojekt für die R-Verhältnisse -1; -0,5; 0; 0,1; 0,5 und 0,7 ermittelt. Die Originalkurven sind in den **Bildern 37a** und **38a** wiedergegeben. Zusätzlich zeigt **Bild 39** einen Vergleich mit Referenzkurven für Schweißnähte aus der Literatur. Im Paris-Bereich zeigt sich eine hinreichend gute Übereinstimmung mit den riss-schließkorrigierten da/dN - ΔK -Daten, die die Anwendung der Referenzdaten anstelle individueller Messungen erlaubt. Hingegen im Schwellenwertbereich tendieren die Referenzkurven zu erheblicher Konservativität, weshalb sie im Rahmen des hier angestrebten Ziels, der Berechnung der Schwingfestigkeit ungeeignet sind.

Für die vorliegenden Analysen wurden die Originaldaten mittels Gl. (18ff) riss-schließkorrigiert. Die Ergebnisse sind den **Bildern 37b** und **38b** zu entnehmen, wo jeweils auch der für die späteren Rechnungen verwendete Parametersatz wiedergegeben ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Gefügeeinfluss im Parisbereich der Kurve allenfalls moderat ist, so dass die Grundwerkstoffdaten angewendet werden können. Das trifft jedoch nicht in gleicher Weise auf den Schwellenwertbereich zu (s. Abschnitt 3.1.6).

3.1.6 Schwellenwert $\Delta K_{th,LC}$ gegen Rissausbreitung - Langriss

Eine ausführliche Übersicht über den heutigen Stand bei der Ermittlung dieser Größe bieten die Autoren in [16]. **Tab. 7** fasst die derzeit gebräuchlichen sowie neuere Methoden der Schwellenwertermittlung zusammen. Beim Vergleich zeigt sich, dass die allgemein angewendeten Lastabsenkungsmethoden gemäß der Prüfstandards ASTM E 647[54] und ISO 12108 [55] in einer Reihe von Fällen nichtkonservative Ergebnisse liefern, d.h., den Schwellenwert unterschätzen. Insbesondere ist das der Fall, wenn andere als der plastizitäts-induzierte Riss-schließeffekt, v.a. der korrosions-induzierte (vgl. Abschn. 2.2) eine Rolle spielen. Der Effekt ist v.a. bei geringen R-Verhältnissen ausgeprägt. Dass er auch in der vorliegenden Studie zum Tragen kommt, zeigen die **Bilder 40** und **41**, wo der konventionell ermittelte Langriss-Schwellenwert (LC = *long crack*) mit dem in Anschluss an die *Compression-precracking*-Methode ermittelten Schwellenwert für die Grundwerkstoffe des S355NL und des S960QL sowie für die Wärmeinflusszone des S355NL verglichen wird. Den IBESS-Analysen werden die alternativ erzeugten, niedrigeren Schwellenwerte zugrunde gelegt.

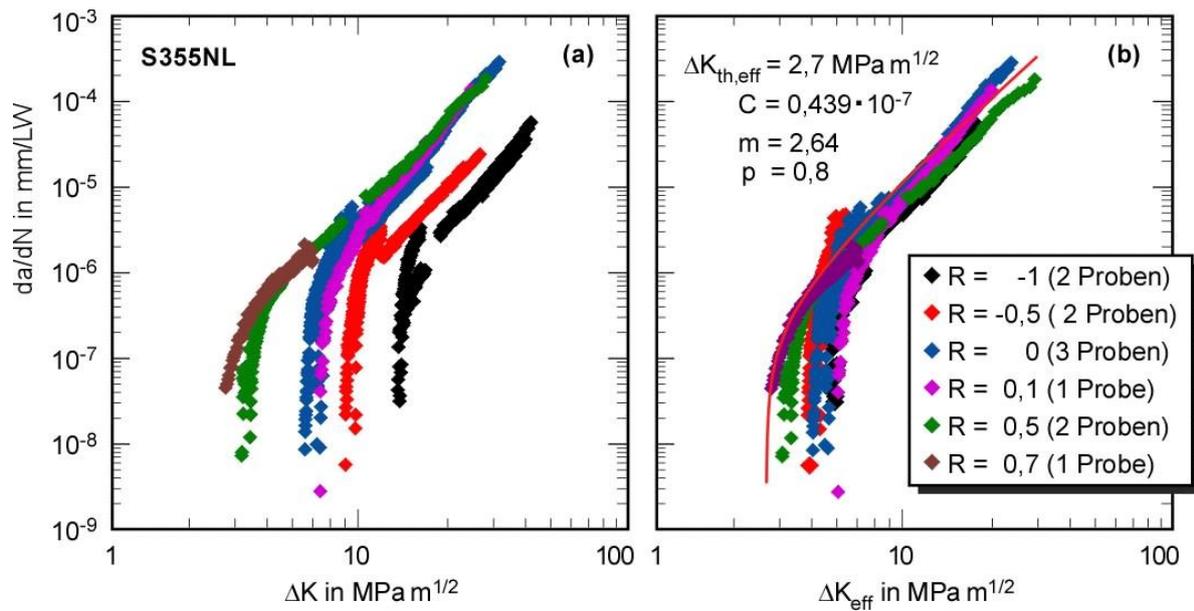


Bild 37: Im vorliegenden Teilprojekt ermittelte da/dN - ΔK -Kurven für den Werkstoff S355NL; (a) Rohdaten; (b) Rissschließkorrigierte Daten.

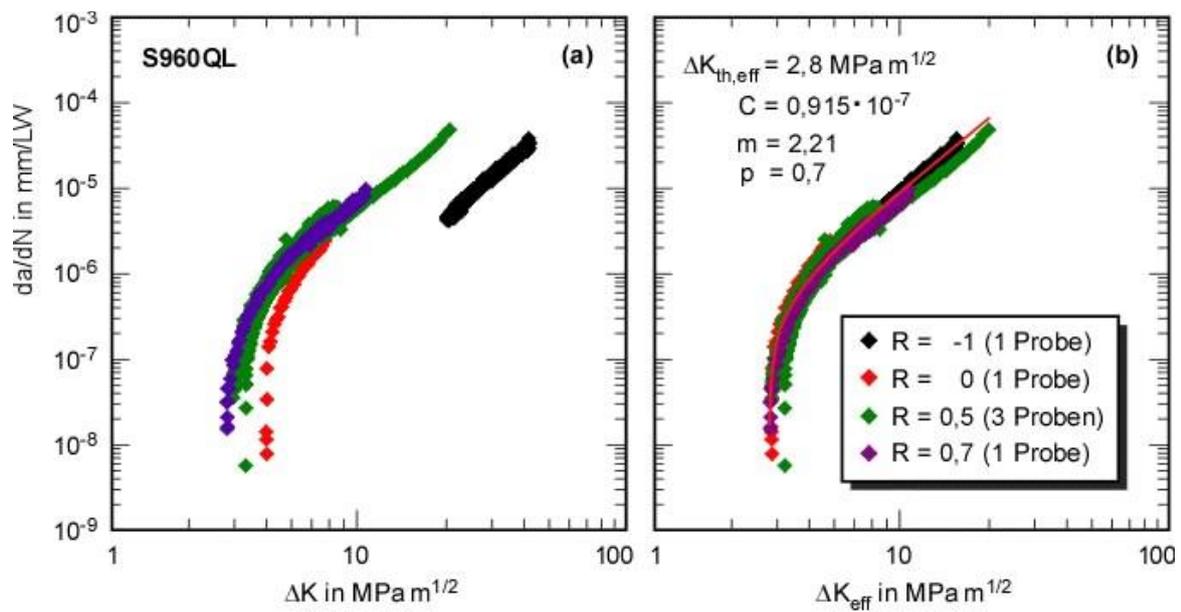


Bild 38: Im vorliegenden Teilprojekt ermittelte da/dN - ΔK -Kurven für den Werkstoff S960QL; (a) Rohdaten; (b) Rissschließkorrigierte Daten.

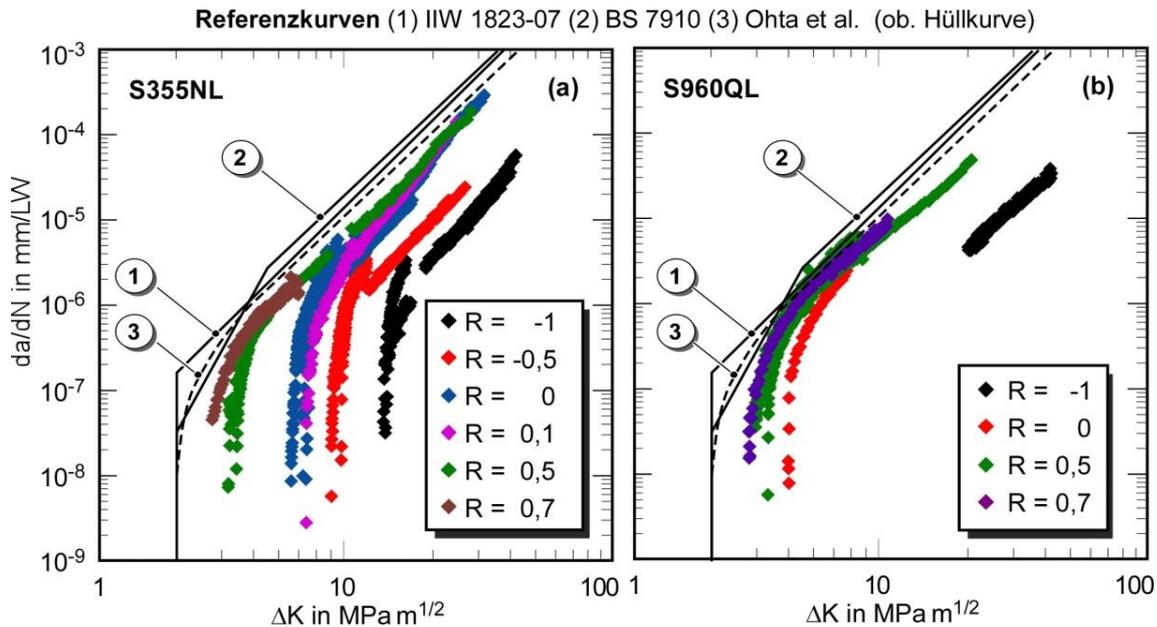


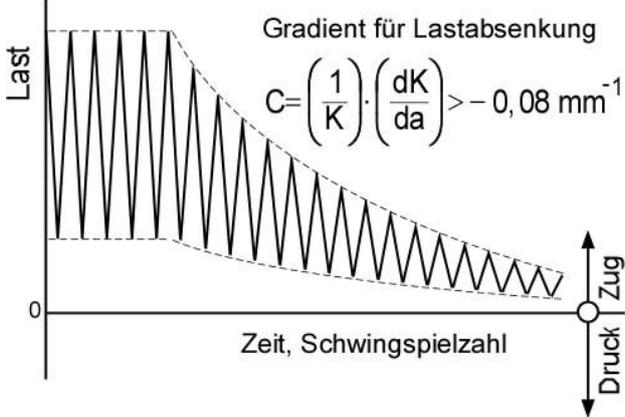
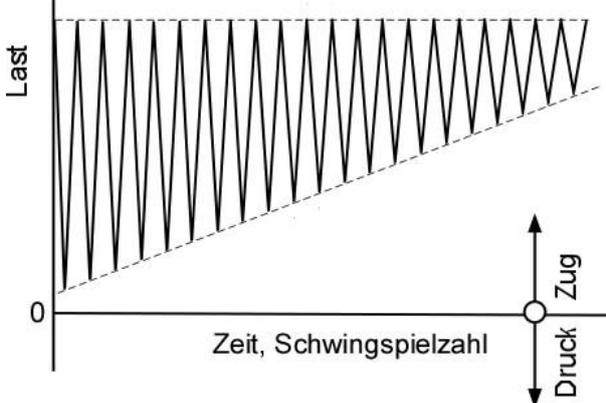
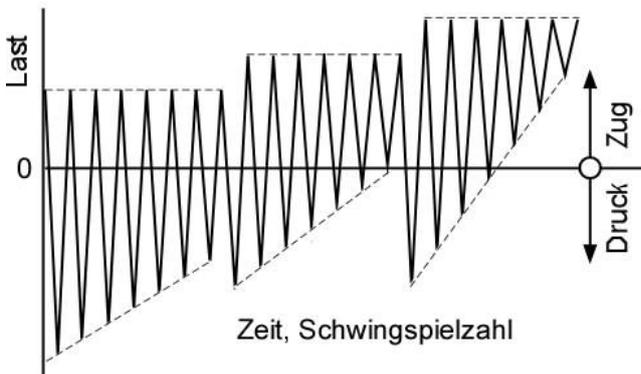
Bild 39: Im vorliegenden Teilprojekt ermittelte da/dN - ΔK -Kurven für die Werkstoffe S355NL und S960QL, Vergleich mit Referenzdaten aus der Literatur; (1) [39]; (2) [53]; (3) [14].

3.1.7 Schwellenwert gegen Rissausbreitung ΔK_{th} (a) - physikalisch kurzer Riss

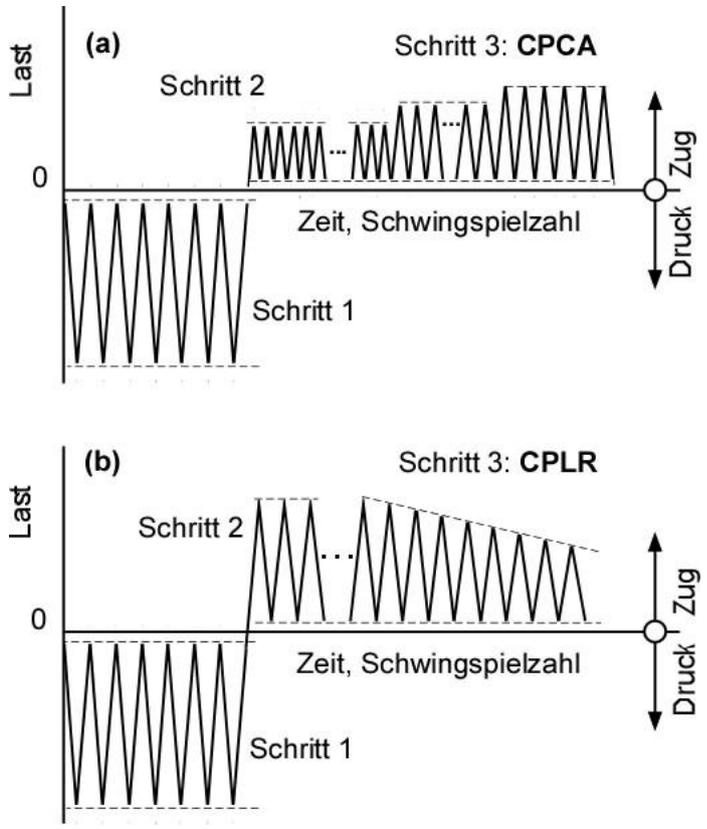
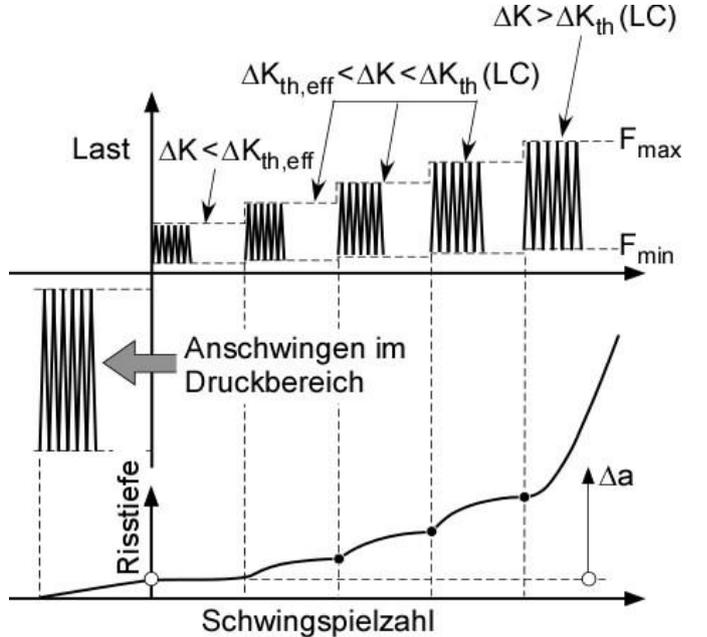
Der Ermittlung der Funktion ΔK_{th} (a), d.h. der zyklischen R-Kurve kommt im IBESS eine Schlüsselrolle zu, weshalb die Methodik an dieser Stelle ausführlicher erläutert werden soll. Das Grundprinzip ist bereits in Tab. 7 (letzte Spalte wiedergegeben). Beim *Compression precracking* wird die gekerbte Probe so belastet, dass sowohl die Ober- als auch die Unterlast, K_{max} und K_{min} , im Druckbereich angesetzt sind. Unter Druck würde ein Riss normalerweise nicht wachsen, jedoch entstehen beim Zudrücken des Kerbs geringfügige Deformationen vor der Risspitze, die beim Zurückfedern bei der ersten Entlastung Zugeigenspannungen zurücklassen. Das ist in **Bild 42** illustriert. Das Zugeigenspannungsfeld reicht je nach Werkstoff einige Hundertstel bis Zehntel Millimeter in das Ligament hinein, und erzeugt gemeinsam mit der anliegenden Last ein ΔK , das jedoch mit zunehmender Risslänge geringer wird, bis der Riss schließlich an der Grenze des Zugeigenspannungsfeldes arretiert. Der entscheidende Vorteil der Methode ist, dass der Riss am Ende der Prozedur keinen Riss-schließeffekt aufgebaut hat, d.h., $U = 1$ wie beim Ausgangsriss der IBESS-Analyse gefordert.

Bei der anschließenden Zugebelastung bei ΔK geringfügig oberhalb des intrinsischen Wertes $\Delta K_{th,eff}$ wächst der Riss zunächst, wird dann aber infolge des graduellen Aufbaus des Riss-schließeffekts nach einer bestimmten Laufstrecke wieder arretiert. ΔK wird geringfügig erhöht, und das Ganze wiederholt, bis schließlich der Langriss-schwellenwert $\Delta K_{th,LC}$ überschritten ist, und der Riss nicht mehr stehen bleibt. Aus der Verbindung der Arrestpunkte erhält man die zyklische R-Kurve. Das in IBESS realisierte Verfahren hat sich an die in [56] ausgearbeitete Methodik angelehnt. Wichtig ist insbesondere, dass die Schwingbreite des ΔK beim *Compression precracking* so klein wie möglich ist, da ΔK sonst die R-Kurve beeinflusst [56]. V.a. bei hochfesten Materialien ist der in dieser Phase erzeugte Riss sehr klein, so dass die Gefahr besteht, dass er nicht hinreichend groß ist, um vom Kerbfeld nicht mehr beeinflusst zu werden. Aus diesem Grund wird der Kerbgrund vor dem Ermüden mit einer Rasierklinge verschärft.

Tab. 7: Experimentelle Methoden zur Ermittlung des Schwellenwertes ΔK_{th} (hinsichtlich der Literatur s. [16]).

Methode	Anmerkungen
 <p>Gradient für Lastabsenkung</p> $C = \left(\frac{1}{K}\right) \cdot \left(\frac{dK}{da}\right) > -0,08 \text{ mm}^{-1}$	<p>Lastabsenkungsmethode</p> <p>Standardmethode, z.B. ASTM E 647 [54], Um einen Einfluss des plastizitäts-induzierten Riss-schließeffekts zu vermeiden, darf die Lastabsenkungsrate C einen bestimmten Wert nicht überschreiten. In Fällen, bei denen der rauhigkeits- oder korrosions-induzierte Riss-schließeffekt zum Tragen kommen kann, kann die Methode zu nicht-konservativen ΔK_{th} führen.</p>
	<p>K_{max}-Methode</p> <p>Ebenfalls im Standard [54] zugelassen. Es können nur intrinsische (riss-schließfreie) Schwellenwerte bei hohem Lastverhältnis R ermittelt werden. Riss-schließeffekte kommen entsprechend nicht zum Tragen.</p>
	<p>Modifizierte K_{max}-Methode</p> <p>Entspricht im Wesentlichen der K_{max}-Methode, nur dass mit einer Probe mehrfach hintereinander Schwellenwerte bestimmt werden [57]. Vorteile wie bei der ursprünglichen K_{max}-Methode.</p>

Tab. 7: Fortsetzung

Methode	Anmerkungen
	<p>Methoden mit Anrisserzeugung im Druckbereich (CP = compression precracking, CA = constant amplitude; LR = load reduction)</p> <p>In jüngerer Zeit durch eine Reihe von Autoren angewendet (s. [58-61]).</p> <p>Beim <i>Compression precracking</i> (Schritt 1; Unter- und Oberlast im Druckbereich) bilden sich bei Erstbelastung im Bereich der monotonen plastischen Zone Zugeigenspannungen aus. Der Riss wächst bis zum Ende dieses Bereiches und arretiert dann. Vorteil ist, dass dabei kein Riss-schließeffekt aufgebaut wird. Im Anschluss wird die Methode in zwei Varianten fortgesetzt. Nach einer Phase, während derer stabile Rissöffnungsverhältnisse erzeugt werden (Schritt 2), wird die Last entweder schrittweise erhöht (CPCA) oder von einem höheren Niveau aus abgesenkt (CPLR).</p>
	<p>Zyklische R-Kurve</p> <p>Die Methode [56] ist dem <i>Compression precracking</i> vergleichbar, nur fällt die Homogenisierungsphase (Schritt 2) weg. Stattdessen wird ΔK unmittelbar nach Schritt 1 (bei konstantem R-Verhältnis schrittweise erhöht, wobei der Riss zunächst wächst und dann infolge des Aufbaus des plastizitäts-induzierten Riss-schließeffekts arretiert. Im Ergebnis erhält man eine $\Delta K_{th}-\Delta a$-Kurve, wie sie beispielsweise für (physikalisch) kurze Risse typisch ist. Wird der Riss auf einer Laststufe nicht mehr arretiert, so ist der Langriss-schwellenwert (LC = long crack) erreicht.</p>

Ein weiteres Problem ergibt sich, wenn neben dem plastizitäts-induzierten der (potentiell zeit-abhängige) korrosions-induzierte Riss-schließeffekt zum Tragen kommt. In diesem Fall wird der Gesamteffekt verstärkt und der Übergang vom kurzen zum langen Riss wird zu einer größeren Risstiefe verschoben (**Bild 43**). Denkbar ist aber auch ein nachteiliger Korrosionseffekt, der den

Schwellenwert reduziert. Tatsächlich haben die Autoren mit Ausnahme des S355NL-Grundwerkstoffes bei allen untersuchten Materialien bzw. Materialzuständen (WEZ-Gefüge) bei niedrigen R-Verhältnissen Oxidablagerungen auf den Bruchflächen gefunden. Um Fehlmessungen aufgrund des zeitabhängigen korrosions-induzierten Effekts und etwaige elektrische Effekte auszuschließen, haben sie die ursprünglich angewendete Einprobenmethodik, bei der der Rissfortschritt mittels Potentialmethode aufgezeichnet wird, durch eine Mehrprobenmethodik ergänzt. Dabei wird jeweils nur ein Lasterhöhungsschritt vorgenommen, und der Rissfortschritt wird fraktografisch auf der Bruchfläche ausgemessen. Im Falle des S355NL waren die Ergebnisse beider Methoden identisch (**Bild 44**).

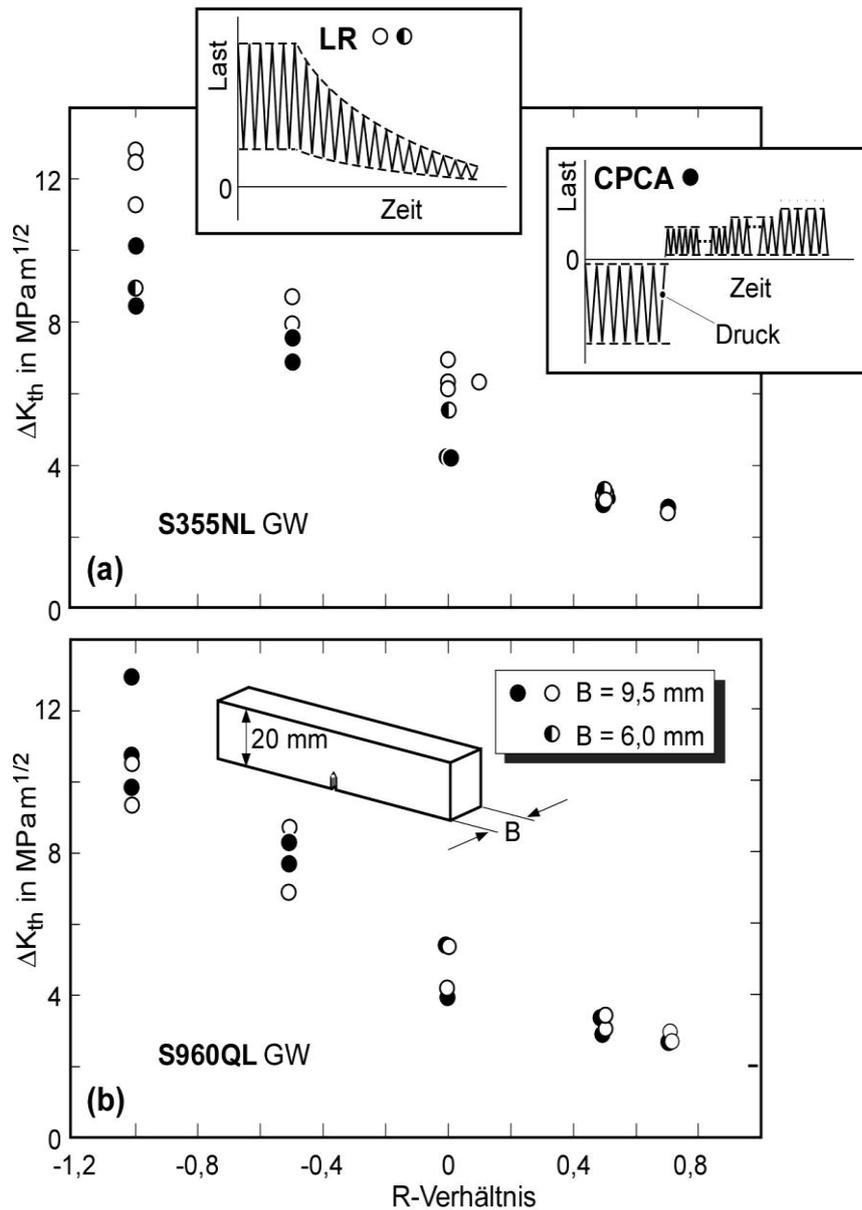


Bild 40:
Nach unterschiedlichen Methoden ermittelte Langrisschwellenwerte der Grundwerkstoffe des S355NL und des S960QL.

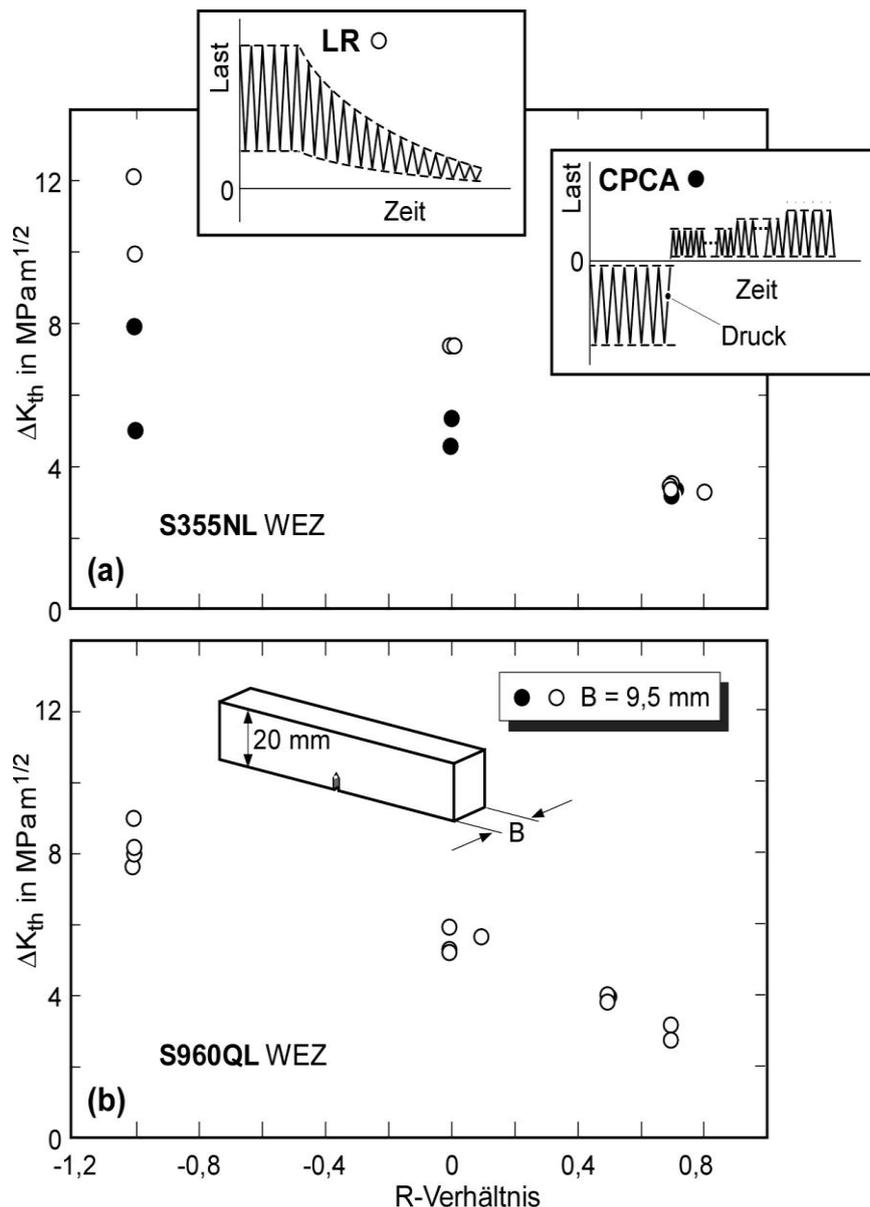


Bild 41:
Nach unterschiedlichen Methoden ermittelte Langrisschwellenwerte der Wärmeeinflusszonen des S355NL und des S960QL.

Es sei an dieser Stelle betont, dass die Ermittlung zyklischer R-Kurven derzeit noch nicht Stand der Wissenschaft ist. Außer von den Autoren wurde die Methode bislang nur in zwei Forschungseinrichtungen in Leoben angewendet, und es fehlen sowohl eine Prüfrichtlinie als auch *Round Robin*-Untersuchungen zum Erweis der Anwendungstauglichkeit. Die Ergebnisse stehen also unter einem gewissen Vorbehalt. Den Autoren ist es bislang, v.a. aufgrund unregelmäßiger Rissfronten, auch nicht gelungen, verlässliche Daten für die WEZ-Gefüge zu generieren. Hier kam im Weiteren eine Näherungsmethode zur Ermittlung der zyklischen R-Kurve zum Einsatz, die die Autoren ebenfalls im Rahmen von IBESS entwickelt und in [62] publiziert haben. Das Verfahren knüpft an die inhaltliche Verwandtschaft der zyklischen R-Kurve mit dem Kitagawa-Takahashi-Diagramm [63] an, wie sie in **Bild 45** illustriert ist.

Tatsächlich entsprechen sich beide Kurven, wenn eine geringfügige Korrektur am Kitagawa-Takahashi-Diagramm vorgenommen wird. In der gegenwärtigen Formulierung entspräche der Ursprung dieses Diagramms, $\Delta a = 0$ einem Schwellenwert von $\Delta K_{th} = 0$. Das ist jedoch nicht richtig, da der kleinstmögliche Schwellenwert das intrinsische $\Delta K_{th,eff}$ ist. Der Fehler ist durch Einführung eines zusätzlichen Terms a^* leicht zu beheben, wobei a^* aus eben jener Bedingung

gewonnen wird. Damit lässt sich die zyklische R-Kurve aus dem Kitagawa-Takahashi-Diagramm wie folgt abschätzen:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th,LC} \cdot \sqrt{\frac{\Delta a + a^*}{\Delta a + a^* + a_0}}, \quad (33)$$

wobei der El-Hadad-Parameter a_0 [64]

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th,LC}}{Y \cdot \Delta \sigma_D} \right)^2 \quad (34)$$

durch die zusätzliche Risstiefe

$$a^* = a_0 \cdot \frac{(\Delta K_{th,eff} / \Delta K_{th,LC})^2}{1 - (\Delta K_{th,eff} / \Delta K_{th,LC})^2} \quad (35)$$

ergänzt wird.

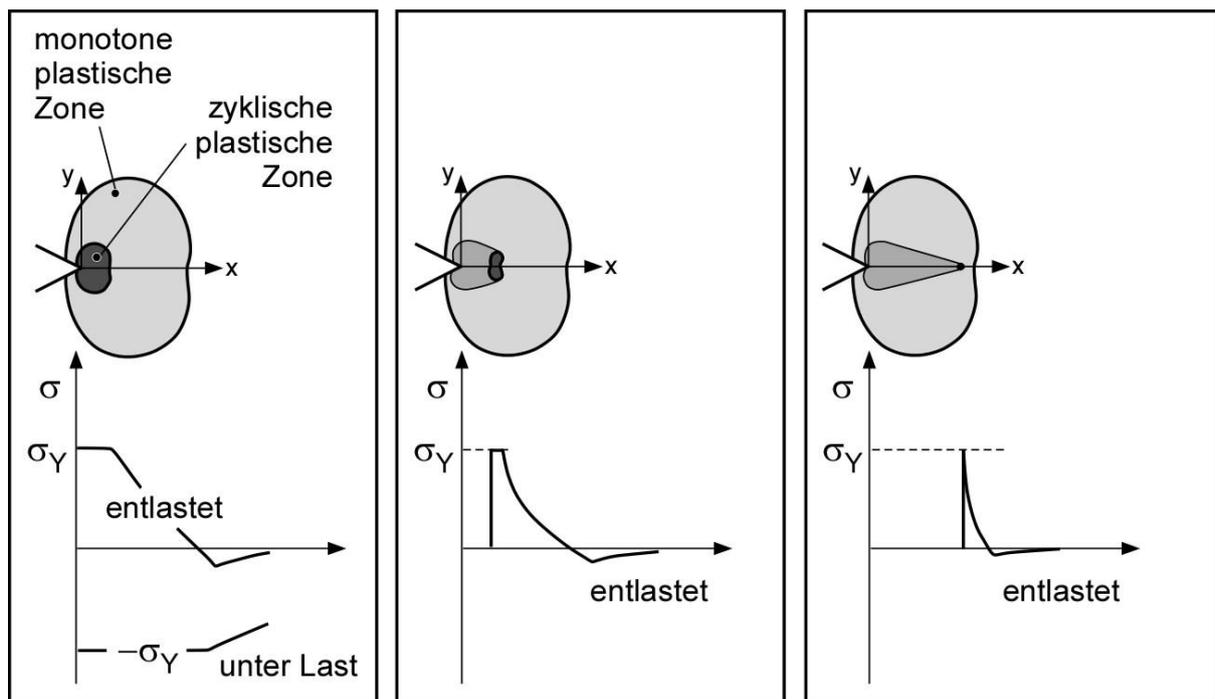


Bild 42: Entwicklung der plastischen Zone und der Eigenspannungen vor dem Riss beim *Compression precracking*. (a) erster Lastzyklus; (b) nach geringfügiger Risserweiterung; (c) bei Rissarrest; nach [56].

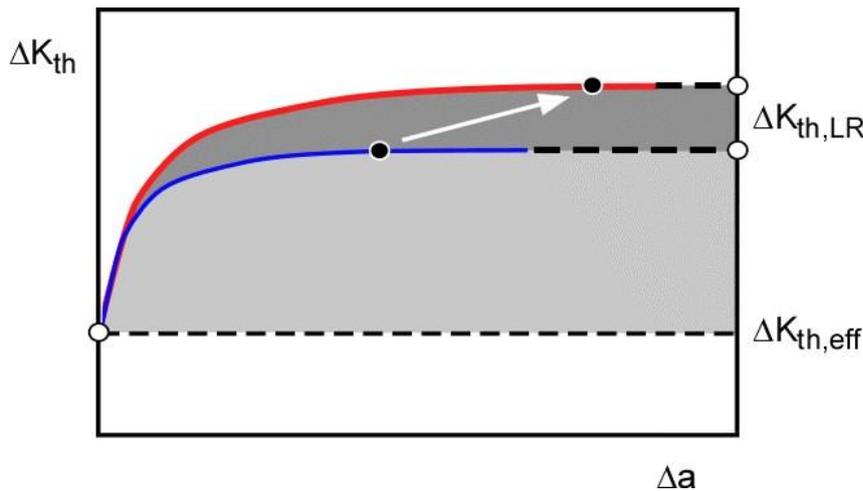


Bild 43: Kombiniertes Effekt verschiedener Risschließmechanismen; schematisch;

Blaue Kurve: plastizitäts-induzierter Risschließeffekt;

Rote Kurve: zusätzlicher korrosions-induzierter Risschließeffekt.

In der Literatur finden sich verschiedentlich Werte für a_0 , s. z.B. die Übersicht in [65]. Dabei ist aber zu beachten, dass diese zumeist für eine Formfunktion von $Y = 1$ in Gl. (34) wiedergegeben werden. Das IBESS-Modell erfordert jedoch einen Wert $Y = 0,728$ für den halbkreisförmigen Ausgangsrisse [66], so dass a_0 zunächst umgerechnet werden muss. Neben dem intrinsischen und dem Langrisschwellenwert, $\Delta K_{th,eff}$ und $\Delta K_{th,LC}$, setzt Gl. (34) die Kenntnis der Dauerfestigkeit σ_D voraus, die, wenn nicht anderweitig verfügbar, für $R = -1$ aus der Härte oder Zugfestigkeit abgeschätzt werden kann (Gl. 27 und Bild 30).

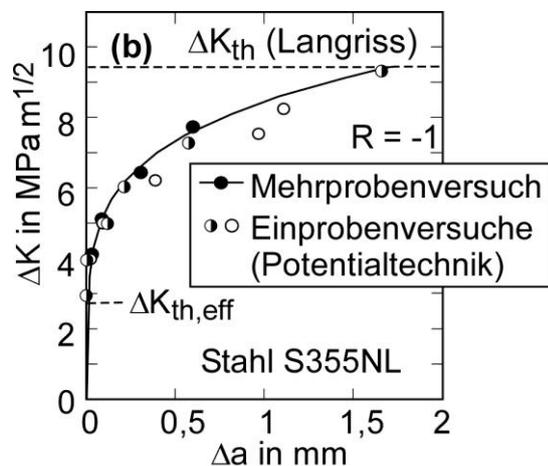


Bild 44: Vergleich von mittels Ein- und Mehrprobentechnik aufgenommenen zyklischer R-Kurven des Stahls S355NL, Grundwerkstoff.

Bei von -1 abweichenden R-Verhältnissen ist zunächst eine Umrechnung von σ_D vorzunehmen. Nach dem Vorschlag der Autoren kann diese mittels eines Haigh-Ansatzes z.B. nach Goodman [67] geschehen. Die Korrektur erfolgt in diesem Fall als

$$\sigma_a(R) = \sigma_w / \left(1 + \frac{\gamma(R) \cdot \sigma_w}{R_m} \right) \quad (36)$$

wobei σ_w die Wechselfestigkeit (σ_D bei $R = -1$) und $\gamma(R)$ ein Faktor ist, der einfach als

$$\gamma = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1+R}{1-R} \quad (37)$$

ermittelt werden kann. So ergibt sich γ als 0 für $R = -1$, als $1/3$ für $R = -0,5$, als 1 für $R = 0$ und als 3 für $R = +0,5$. **Bild 46** zeigt die Anwendung des Ansatzes für S355NL-Grundwerkstoff-Daten verschiedener R-Verhältnisse.

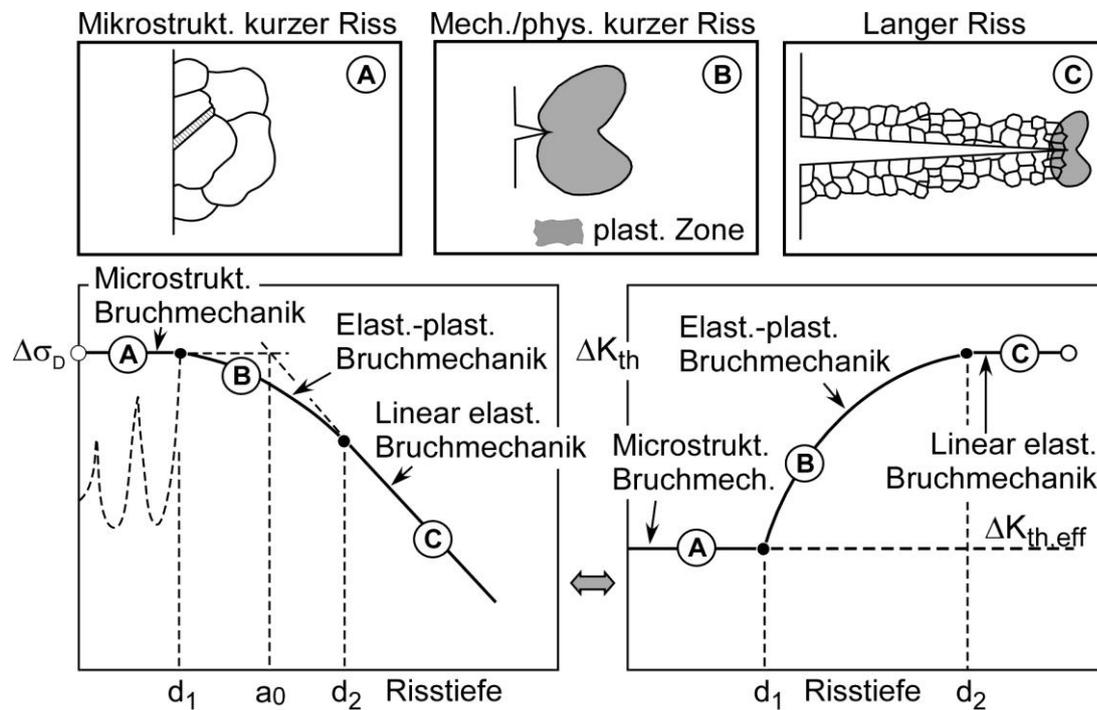


Bild 45: Kitagawa-Takagashi-Diagramm (links) und zyklische R-Kurve (rechts). In beide Diagramme sind die Stadien des mikrostrukturell kurzen, des mechanisch/physikalisch kurzen und des langen Risses eingetragen.

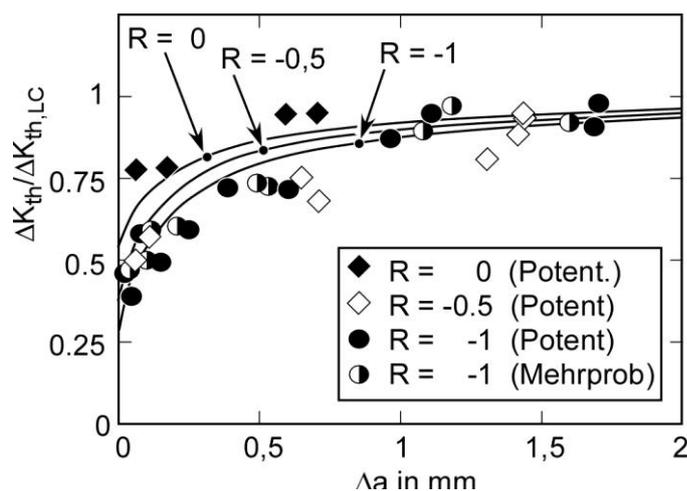


Bild 46: Vergleich mittels Gl.(33ff) abgeschätzter zyklischer R-Kurven mit experimentellen Daten; S355NL, Grundwerkstoff; nach [62].

Bei der Anwendung der zyklischen R-Kurve im Rahmen von Rissarrest-Analysen (s. Abschn. 2.5.4) ist es wichtig, die R-Kurve im Bereich kleiner Risserweiterung Δa hinreichend gut zu beschreiben. Dies ist der Grund, warum die verbreitete Fitfunktion nach McEvily (z.B. [68])

$$\Delta K_{th,op} = (1 - e^{-k \cdot \Delta a})(K_{op,LC} - K_{min}) \quad (38)$$

mit nur einem Anpassparameter, k , nicht zum Einsatz kommt. Stattdessen sehen die Autoren einen sehr einfachen Ansatz

$$\Delta K_{th}(\Delta a) = A \cdot \Delta a^B + \Delta K_{th,eff} \quad (39)$$

vor. **Tab. 8** gibt die in den nachfolgenden IBESS- Analysen angewendeten Koeffizienten wieder.

Tab. 8: Anpassparameter an die zyklische R-Kurve nach Gl. (39); (ΔK_{th} in MPa m^{1/2}; Δa in mm)

Werkstoff	R-Verhältnis	A	B	Anmerkungen
S355NL Grundwerkstoff	-1	6,292	0,412	
	0	1,924	0,299	
	0,5	0,37	0,5	
S355NL WEZ, Feinkornzone, Decklage 2	-1	4,861	0,255	nach Gl. (33) abgeschätzt; danach an Gl. (39) angepasst
	0	2,589	0,342	
	0,5	1,293	0,562	
S960QL Grundwerkstoff	-1	5,579	9,248	
	0	3,711	0,026	
	0,5	3,208	0,007	

Abschließend in diesem Abschnitt sei auf eine weitere potentielle Vereinfachung hingewiesen. Man kann davon ausgehen, dass der intrinsische Schwellenwert, $\Delta K_{th,eff}$, ein echter Werkstoffkennwert ist [16], und er hängt v.a. von der Steifigkeit, d.h. den elastischen Materialeigenschaften und dem Kristallgitter ab. So geben die Autoren in [69] eine einfache Korrelation

$$\Delta K_{th,eff} \approx 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot E \quad (40)$$

$$(\Delta K_{th,eff} \text{ in MPa m}^{1/2} \text{ und } E \text{ in MPa})$$

wieder. Anknüpfend an die These in [70], wonach $\Delta K_{th,eff}$ zusätzlich vom Burgersvektor b abhängig ist, sieht ein unlängst publizierter Ansatz eine Beziehung

$$\Delta K_{th,eff} = \frac{3}{4} E \cdot \sqrt{|b|} \quad (41)$$

vor [71]. Der Betrag des Burgersvektors $|b|$ beträgt bei Metallen wie Stahl oder Aluminium je nach Gittertyp 0,25 oder 0,29 nm.

3.1.8 Bruchwiderstand

Eine weitere potentielle Eingangsgröße für die IBESS-Prozedur ist der Bruchwiderstand des Werkstoffs. Er wird dann benötigt, wenn als Versagenskriterium Bruch vorgegeben ist. Im vorliegenden Fall wurde der Bruchwiderstand der duktilen Grundwerkstoffe des S355NL und S960QL auf der Grundlage von ISO 12135 [72] als statische J-R-Kurve und der Bruchwiderstand der entsprechenden WEZ-Gefüge, der in den Bereich des duktil-spröden Übergangsbereichs fiel, als statistische Verteilung des kritischen J-Integrals gemäß ASTM E 1921 [73] ausgewertet (**Bilder 47** und **48**). Wegen der geringen Blechdicke von $T = 10$ mm wurde die Auswertung der J-R-Kurven geringfügig modifiziert, indem die weniger strengen Gültigkeitskriterien des unlängst revidierten Standards ASTM E 1820-11 [74] angewendet wurden:

$$J_{\max} = \min \begin{cases} \frac{1}{10}(W - a_0) \cdot \sigma_Y \\ \frac{1}{10}B \cdot \sigma_Y \end{cases} \quad (42)$$

$$\Delta a_{\max} = 0,25(W - a_0) \quad (43)$$

Während für den S960QL sowohl ein $J_{0,2,BL}$ als auch ein $J_{0,2}$ als Widerstand gegen stabile Rissinitiierung auswertbar war, konnte für den S355NL lediglich ein $J_{0,2}$ -Wert bestimmt werden.

Die statistische Auswertung des Bruchwiderstands im duktil-spröden Übergangsbereich, die für die Charakterisierung der WEZ-Gefüge erforderlich war, beruht auf der Grundidee des zuerst in [75] vorgeschlagenen sog. *Weakest link*-Modells, des „Modells des schwächsten Ketten Gliedes“. Stochastisch über das Ligament verteilt finden sich bruchauslösende Gefügeschwachstellen. Wird der Spannungspeak vor dem Riss mit steigender Belastung in das Ligament vorgeschoben, löst er den Bruch der Probe oder Struktur aus, sobald er die Stelle einer solchen Schwachstelle erreicht. Je nachdem, ob diese sich nahe am Ausgangsriss oder weiter davon entfernt befindet, ist dazu ein unterschiedlicher Betrag an Arbeit erforderlich, was sich in einem unterschiedlichen Bruchwiderstand J_c niederschlägt. Bei Schweißverbindungen und insbesondere WEZ-Gefügen sind die bevorzugten Gefügeschwachstellen versprödete Grobkornbereiche, wie sie in **Bild 49** für verschiedene Nahtvarianten schematisch dargestellt sind.

Im Ergebnis hängt das Streuband des Risswiderstandes davon ab, über welche Länge die Rissfront solche versprödeten Gefügebereiche schneidet [76]. Eine ausführliche Diskussion zu diesem Thema findet sich in dem im Rahmen von IBESS entstandenen Beitrag der Autoren in [40], ebenso Hinweise auf die allgemeinere Vorgehensweise für Schweißnähte [77]. Für die vorliegenden Untersuchungen war die Problematik der Ermittlung des Bruchwiderstands an realen Schweißnähten jedoch nicht relevant, da die Versuche mit WEZ-simuliertem Gefüge durchgeführt wurden.

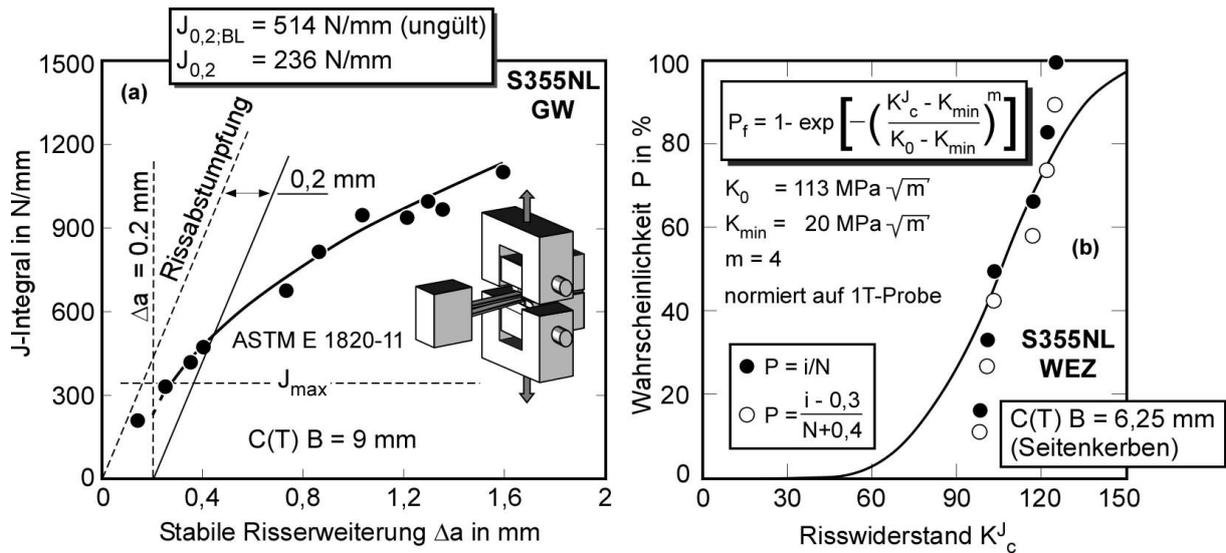


Bild 47: Bruchwiderstand des Stahls S355NL; links: J-R-Kurve des Grundwerkstoffs; rechts: Statistische Verteilung des Bruchwiderstands des WEZ-Gefüges.

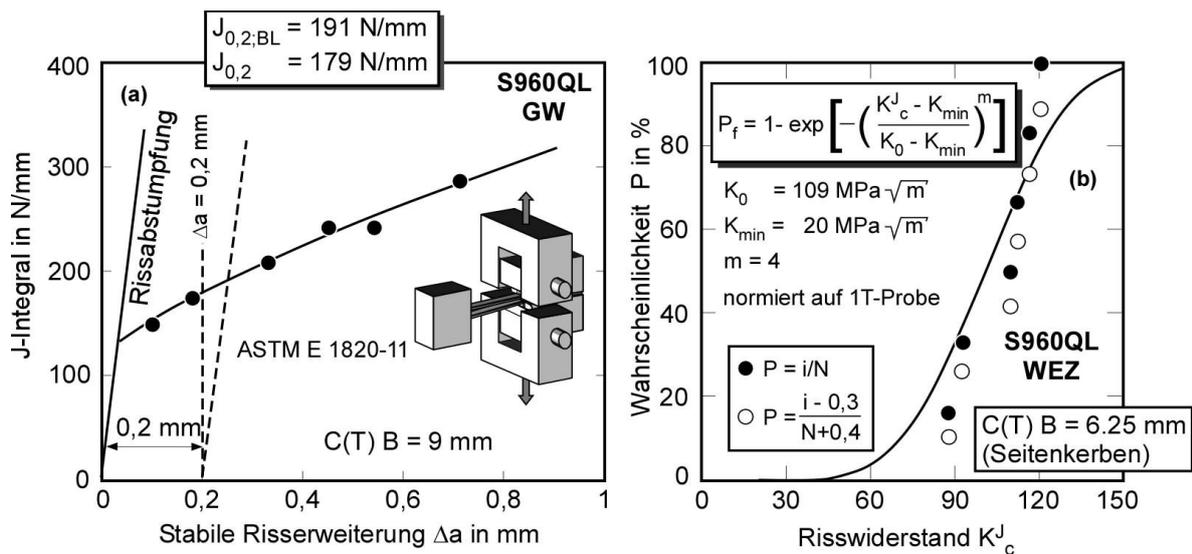


Bild 48: Bruchwiderstand des Stahls S960QL; links: J-R-Kurve des Grundwerkstoffs; rechts: Statistische Verteilung des Bruchwiderstands des WEZ-Gefüges.

Formal in K_c^J umgerechnet

$$K_c^J = \sqrt{J_c \cdot E / (1 - \nu^2)} \quad (44)$$

wird der Bruchwiderstand durch eine 3-parametrische Weibullverteilung

$$P = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(K_c^J - K_{\min})}{K_0 - K_{\min}} \right]^m \right\} \quad (45)$$

beschrieben, bei der zwei Parameter, der Formparameter m und der Schwellwertparameter K_{\min} als $m = 4$ und $K_{\min} = 20 \text{ MPa m}^{1/2}$ fixiert sind, und nur der Skalenparameter K_0 an die experimentellen Daten angepasst wird [73]. Die Werte sind in den Bildern 47 und 48 gezeigt, wo auch ersichtlich ist, dass die Wiedergabe der experimentellen Daten durch Gl. (45) nicht optimal ist. Der Gültigkeitsbereich der Methode ist für ferritische Stähle mit Fließgrenzen zwischen $\sigma_Y = 275$ und 825 MPa angegeben. Die ausgewerteten WEZ-Gefüge der vorliegenden Studie wiesen jedoch eine bainitische Mikrostruktur auf. Prinzipiell ließe sich die Anpassung durch die freie Wahl der Parameter m und K_{\min} verbessern, worauf aber in der vorliegenden Studie verzichtet wurde. Aus Bild 27 ist ersichtlich, dass der Riss vor dem Bruchereignis ausgehend von der WEZ in den Grundwerkstoff hineingelaufen war.

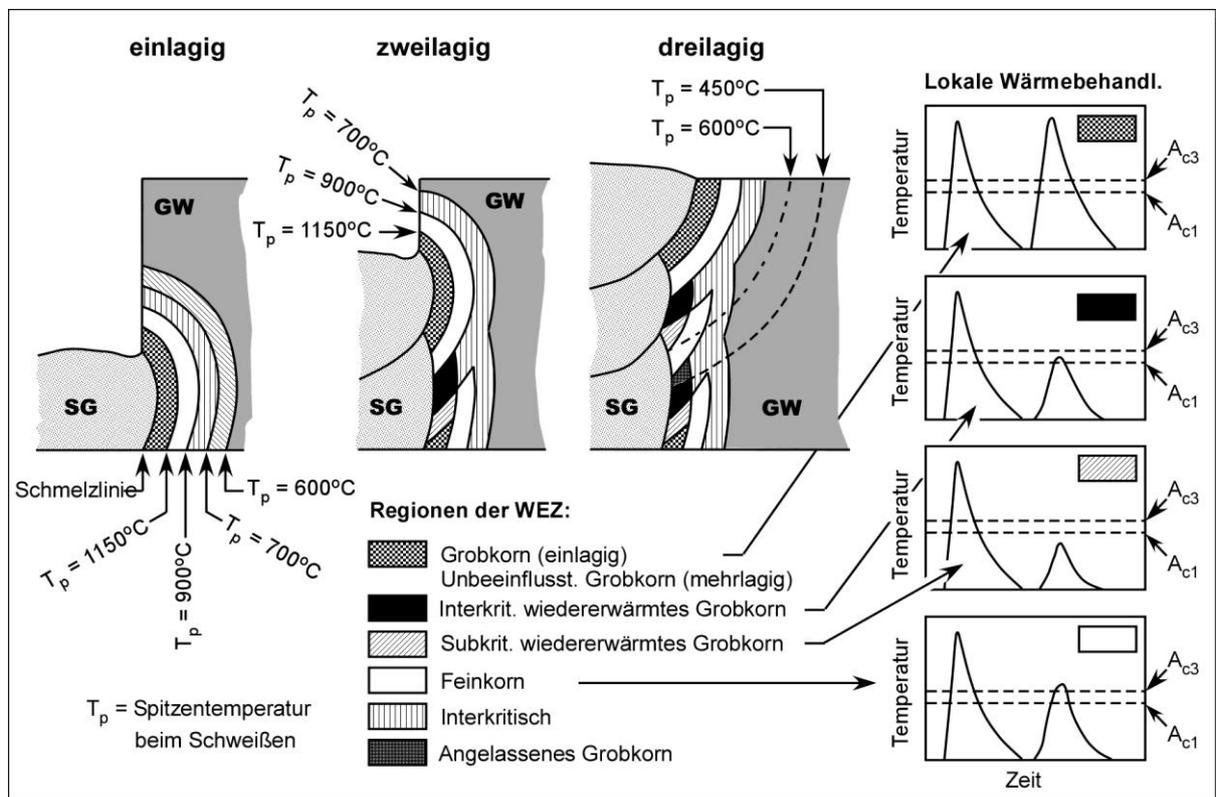


Bild 49: Schematische Darstellung der WEZ-Mikrostruktur eines C-Mn-Stahls; von links nach rechts: Einlagen-, Zweilagigen- und Dreilagenschweißung; nach [78].

3.2 Geometriedaten

3.2.1 Untersuchte Schweißverbindungsformen

Bild 50 gibt eine Übersicht über die in IBESS untersuchten Schweißverbindungsformen. Dabei handelt es sich um Stumpfnähte, Kreuzstöße und Längssteifen aus den Werkstoffen S355NL und S960QL, bei denen jeweils zwei unterschiedliche Nahtgeometrien erzeugt wurden (**Bilder 51** und **52**). Hinzu kamen Stumpfstoße aus 3mm-Blechen aus S355J2+N. Die übrigen Blech-

dicken waren durchweg 10 mm. Schweißverfahren waren Wolfram-Inertgas (WIG) und Metall-Aktivgas (MAG). Ein Teil der Proben wurde im Schweißzustand belassen, ein anderer spannungsarmgeglüht. Alle Proben wurden in *IBESS-Teilprojekt G2* gefertigt.

3.2.2 Parameter der lokalen Schweißnahtgeometrie

Als Eingangsdaten für die Validierung wurden in *IBESS-Teilprojekt A1* für die wesentlichen Probensätze die Parameter der lokalen Nahtgeometrie (Bild 15) mittels Linienscan vermessen (**Bild 53**) und statistisch ausgewertet. Die Daten für die Längssteifen wurden in *IBESS-Teilprojekt A4* erhoben. Ein Beispiel zeigt **Bild 54**. Zusammenfassend sind alle Ergebnisse in **Tab. 9** wiedergegeben.

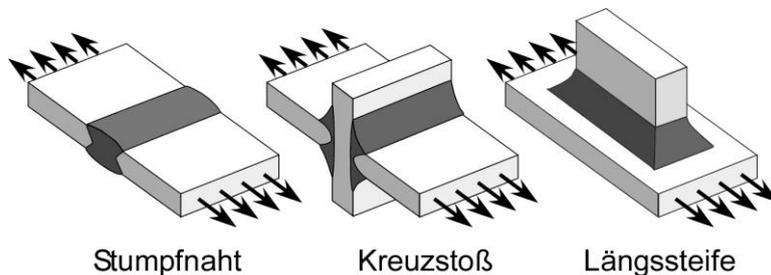


Bild 50: Im Rahmen des IBESS-Projekts untersuchte Schweißverbindungsformen; von links nach rechts: Stumpfstöße, Kreuzstöße und Längssteifen.

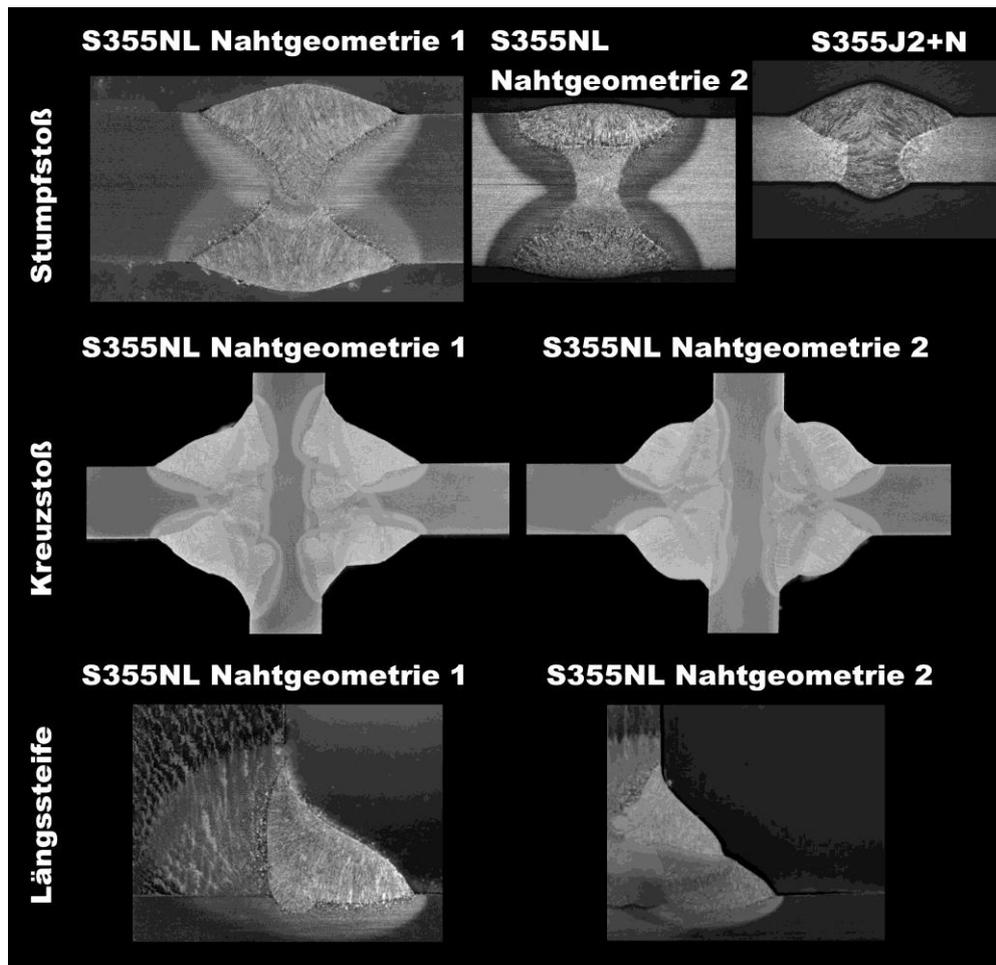


Bild 51: Schliffbilder der lokalen Nahtgeometrien der untersuchten Schweißverbindungsformen aus S355NL und S355J2+N.

IBESS-Teilprojekt G1

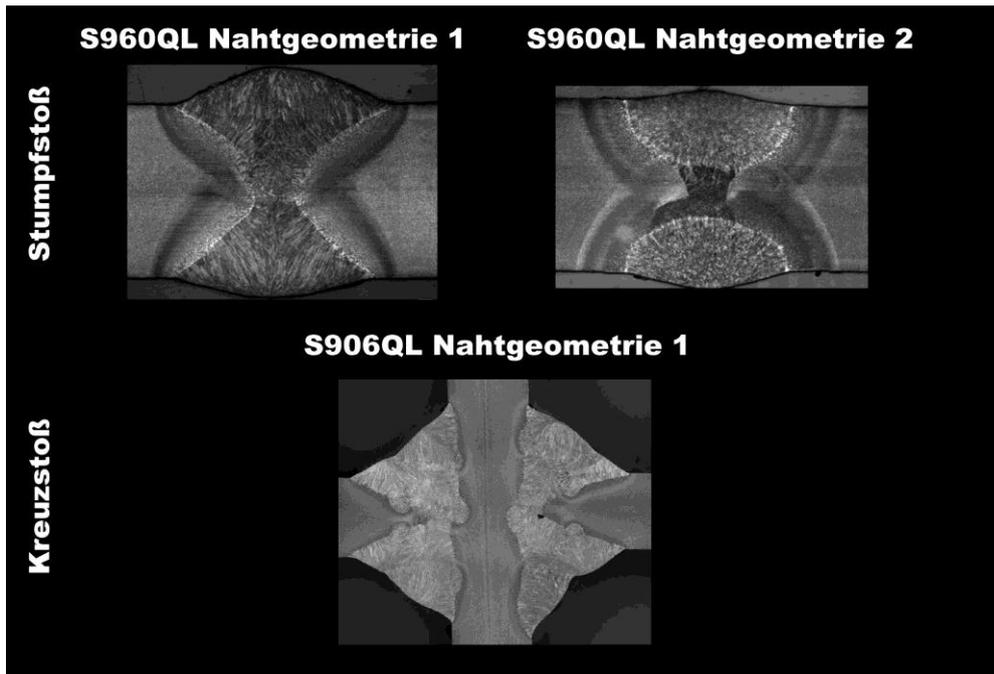


Bild 52: Schliffbilder der lokalen Nahtgeometrien der untersuchten Schweißverbindungsformen aus S960QL.

IBESS-Teilprojekt G1

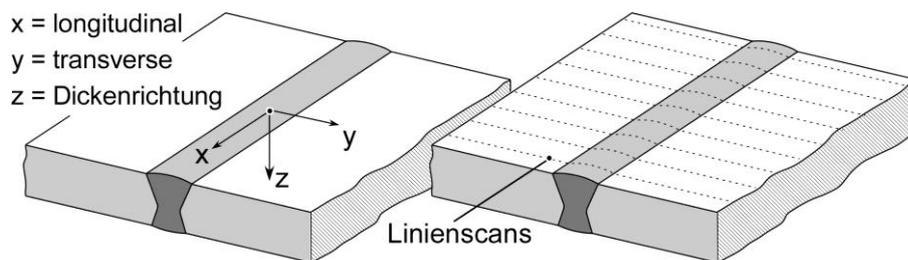


Bild 53: Koordinatensystem an der Schweißnaht (links); Ausrichtung der Linienscans (rechts).

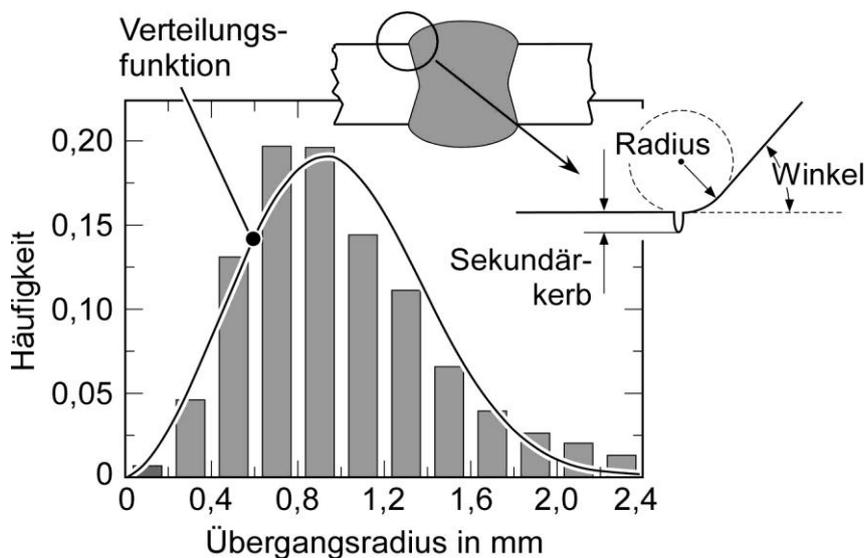


Bild 54: Beispiel für die statistische Auswertung der lokalen Schweißnahtgeometrie entlang des Nahtübergangs; Nahtübergangsradius; Stumpfstoße aus S355NL;

IBESS-Teilprojekt A1.

Ein spezielles Problem, das in **Bild 55** illustriert ist, ist die Definition des Nahtübergangsradius ρ . Dargestellt ist ein Übergangsradius von nominell 1 mm. Die Abtastung mit Laserscanner erbrachte jedoch lokal verteilt viele kleinere Radien in der Größenordnung von 150 bis 300 μm

als Folge einer inhomogenen Oberfläche [79]. Es liegt auf der Hand, dass die Größe dieser Radien durch die Spitze der Abtastnadel oder den Abstand zwischen den gescannten Punkten beeinflusst wird. Sind diese fein genug, so tritt die Oberflächenrauigkeit an die Stelle des geometrischen Übergangs, was natürlich keinen Sinn macht. In IBESS ist das Problem so gelöst, dass ρ eher als eine globale Größe verstanden wird, während die Irregularität der Oberfläche, ihre Rauigkeit den Sekundärkerben zugeordnet ist. Völlige Objektivität ist jedoch nicht erreichbar, weil die Oberfläche eine gewisse Welligkeit aufweist, die nicht als Kerben aufgefasst werden kann. Allerdings wird die Oberflächenwelligkeit bei der Ermittlung der Rauhtiefe nach Standard [81] weitgehend ausgeschlossen.

3.2.3 Winkelverzug und Kantenversatz

Die globalen Geometrieabweichungen der Proben, d.h., Kantenversatz und Winkelverzug wurden so gering wie möglich gehalten. Ungeachtet dessen wurden alle Proben im Rahmen von *IBESS Teilprojekt G2* vermessen und dokumentiert um ggf zu einem späteren Zeitpunkt darauf zurückgreifen zu können. Die Daten sind in **Bild 56** zusammengefasst.

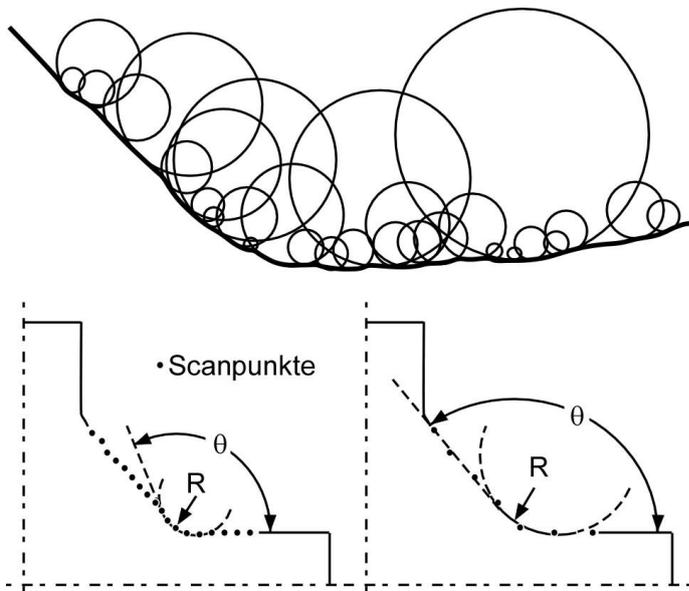


Bild 55: Ermittlung des Nahtübergangsradius. Abhängigkeit der formal ermittelten Radien vom Abstand zwischen den gescannten Punkten;

nach [79].

3.2.4 Sekundärkerben

Unter Sekundärkerben sollen im Folgenden entweder Einbrandkerben oder Rauigkeitsgrüben auf der Oberfläche der Bleche verstanden werden, z.B. in der Walzhaut. Ein Beispiel für letzteres von IBESS-Proben aus S355NL, durch das die Autoren auf das Problem aufmerksam geworden sind, gibt **Bild 57** wieder. Bei geometrisch regelmäßigen Nähten spielt auch die Nahtschuppung eine Rolle [80]. Im Rahmen der in IBESS untersuchten Fälle stellte sich die Oberflächenrauigkeit der Walzhaut als entscheidender Faktor heraus. Die entsprechenden Sekundärkerbtiefen für die untersuchten Stähle sind statistisch aufbereitet in **Bild 58** wiedergegeben. Die Messung und Auswertung erfolgte in *IBESS-Teilprojekt A1* mittels Tastschnittverfahren nach ISO 4287 [81].

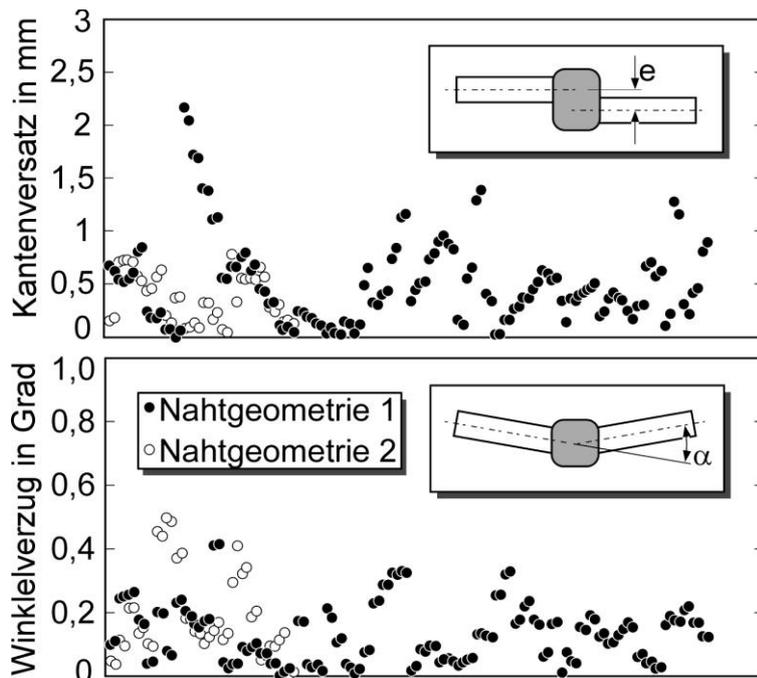


Bild 56:
Winklervorzug und Kantenversatz aller geschweißter Proben;

IBESS-Teilprojekt G2.

Beispiele für Spannungstiefenprofile an Nahtabschnitten unterschiedlicher lokaler Geometrie sind in **Bild 59** wiedergegeben.

3.2.5 Praktische Aspekte und Schweißnahtgüte

In der Praxis dürfte die Information über die lokale Nahtgeometrie kaum je in der Vollständigkeit vorliegen wie in Tab. 9, so dass sich der Anwender anders behelfen muss. In einer im Rahmen des vorliegenden IBESS Teilprojekts angefertigten Masterarbeit hat der Autor eine Reihe von Literaturstellen hinsichtlich der Parameter Nahtübergangsradius ρ und Nahtanstiegswinkel α ausgewertet [45]. Ursprungsquellen für die Studie waren [82-88]. Die Ergebnisse sind vereinfacht in **Bild 60** zusammengestellt, wo für jeden der ausgewerteten Datensätze der Mittel- bzw. Erwartungswert μ , die Standardabweichung σ und der Variationskoeffizient Var wiedergegeben ist. Zwar ist v.a. hinsichtlich des Nahtübergangsradius eine gewisse Vorsicht angesagt, da die Quellen in der Regel keinen Aufschluss darüber geben, wie die Größe ermittelt wurde, dennoch zeigt sich eine so große Bandbreite, dass die Vorgabe von Einstiegsdaten für die Analyse schwierig oder allenfalls sehr konservativ möglich ist. Eine endgültige Entscheidung ist allerdings erst nach einer Sensibilitätsanalyse der IBESS-Analyse hinsichtlich des Effekts der beiden Eingangsparameter auf die Zeit- und Dauerfestigkeit möglich. Der vorbehaltliche Vorschlag in [45] sieht als konservative Grenzwerte für Schmelzschweißverbindungen Werte für $\alpha = 65^\circ \pm 10^\circ$ ($Var = 0,15$) und für $\rho = 0,5 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$ ($Var = 0,8$) vor.

Die letzten Jahre haben Bestrebungen gesehen, die konventionellen Schweißnahtgütekriterien nach ISO 5817 hinsichtlich ihres Effekts auf die Schwingfestigkeit zu modifizieren [39, 80,89-92]. So sieht VOLVO in einem Werksstandard [90] drei Güteklassen vor: VD (keine Nahtnachbehandlung, normale Qualität), VC VD (keine Nahtnachbehandlung, hohe Qualität) und VB (nachbehandelte Nähte), für die sie Grenzwerte für Einbrandkerben, Übergangsradien, geometrischen Versatz etc. definieren. Ein Beispiel für die Kriterien hinsichtlich des Übergangsradius zeigt **Bild 61**. Die aktuellste Version von ISO 5817 [93] enthält einen (vorerst informativen) Anhang (C), der die konventionellen Schweißnahtgütekriterien im Hauptteil durch zusätzliche Forderungen ergänzt, damit sie bestimmten FAT-Klassen nach IIW [39] genügen.

Bislang sind diese auf die FAT-Klassen 63, 90 und 125 begrenzt, denen bei Einbeziehung der verschärften oder zusätzlichen Anforderungen die Gütekriterien C63, B90 und D125 zur Seite gestellt werden. Ein auszugsweises Beispiel ist in **Tab. 10** wiedergegeben, ausführlichere Informationen finden sich im Bericht zu *IBESS-Teilprojekt A1*. Die Kriterien können beispielsweise als Eingangsgrößen für IBESS-Analysen dienen. Andererseits ist es denkbar, die Methode für Sensitivitätsstudien einzusetzen, die die Aussagekraft der neuen Gütekriterien erhärten und diese ggf. verbessern können.

Tab. 9: Statistisch aufbereitete Daten der lokalen Nahtgeometrie der verschiedenen Datensätze, die in IBESS für die Validierung benutzt wurden; Messung und statistische Aufbereitung: *IBESS-Teilprojekt A1*.

Verbind.-form	Ausführung ¹⁾	Werkstoff	Radius ρ in mm			Winkel α in grd.			Überhöhung h in mm		
			Quantil in %			Quantil in %			Quantil in %		
			10	50	90	10	50	90	10	50	90
Stumpfst.	MAG/NG1/U	S355NL	0,47	0,87	1,61	24,4	31,9	39,4	1,33	1,57	1,82
Stumpfst.	MAG/NG1/G	S960QL	0,53	1,08	2,19	18,5	25,1	31,6	1,53	2,02	2,52
Stumpfst.	WIG/NG2/U	S355NL	0,20	0,72	2,58	2,00	17,28	32,56	0,49	0,82	1,15
Stumpfst.	WIG/NG2/G	S355NL	0,31	0,68	1,53	6,5	16,5	26,5	0,27	0,63	0,98
Stumpfst.	WIG/NG2/G	S960QL	0,43	1,37	4,33	14,5	18,0	21,4	0,50	0,83	1,16
Stumpfst.	MAG/U ²⁾	S355J2+N	0,11	0,25	0,53	26,4	35,4	44,3	0,95	1,14	1,33
Kreuzst.	MAG/NG1/U	S355NL	0,43	1,22	3,46	28,4	36,6	44,8	9,50	9,86	10,2
Kreuzst.	MAG/NG1/U	S960QL	0,21	0,40	0,75	30,3	37,0	43,8	7,82	8,76	9,69
Kreuzst.	MAG/NG1/G	S960QL	0,16	0,43	1,11	24,4	36,6	48,8	7,73	8,72	9,70
Kreuzst.	MAG/NG2/U	S355NL	0,05	0,11	0,21	79,1	91,6	104,1	8,91	9,90	10,9
Kreuzst.	MAG/NG2/G	S355NL	0,05	0,10	0,21	80,7	87,0	93,4	8,89	9,17	9,44
Längsst.	MAG/NG1/U	S355NL		0,15			42,7 51,0				
Längsst.	MAG/NG2/U	S355NL		0,28			34,1				

¹⁾ Schweißverfahren WIG oder MAG, NG = Nahtgeometrie, U = nicht geblüht, G = geblüht. Das in einigen Fällen geometrische Unterschiede zwischen geblühten und nichtgeblühten Verbindungen auftreten, hat seine Ursache darin, dass die Datensätze an verschiedenen geschweißten Blechlosen erhoben wurden.

²⁾ Abweichend von den übrigen Datensätzen lagen hier Bleche einer Dicke von 3 mm vor. Alle anderen Bleche wiesen eine Dicke von 10 mm auf.

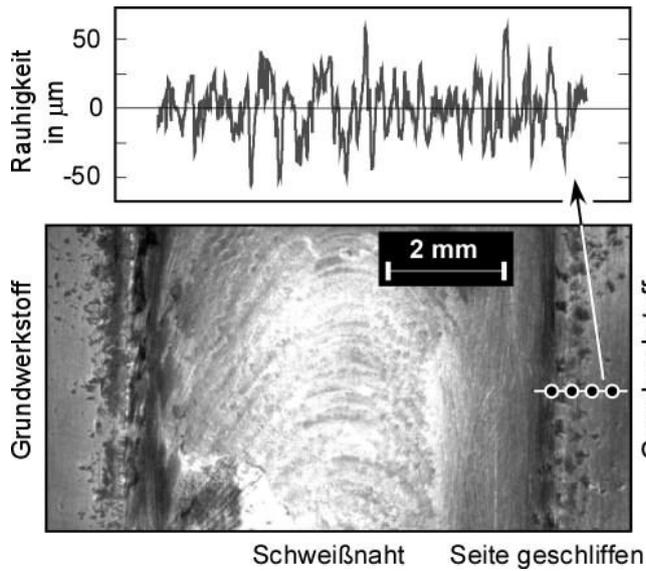


Bild 57: Beispiel für die Oberflächenrauhigkeit des an die Schweißnaht heranreichenden Grundmaterials aufgrund der Walzhaut.

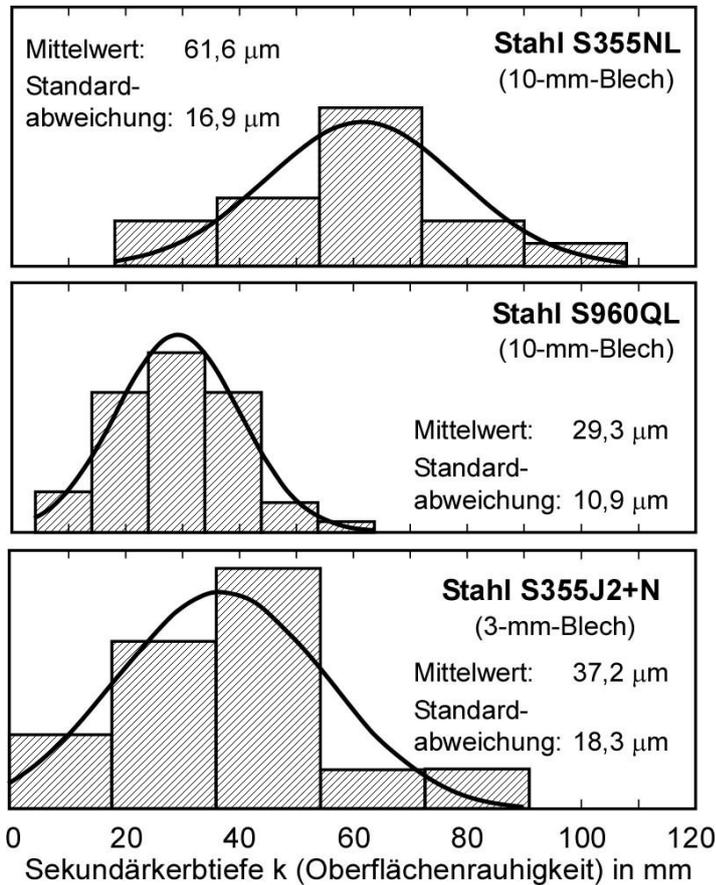


Bild 58: Mittels Tastschnittverfahren ermittelte Oberflächenrauhigkeit der Stähle S355NL, S960QL und S355J2+N

IBESS-Teilprojekt A1.

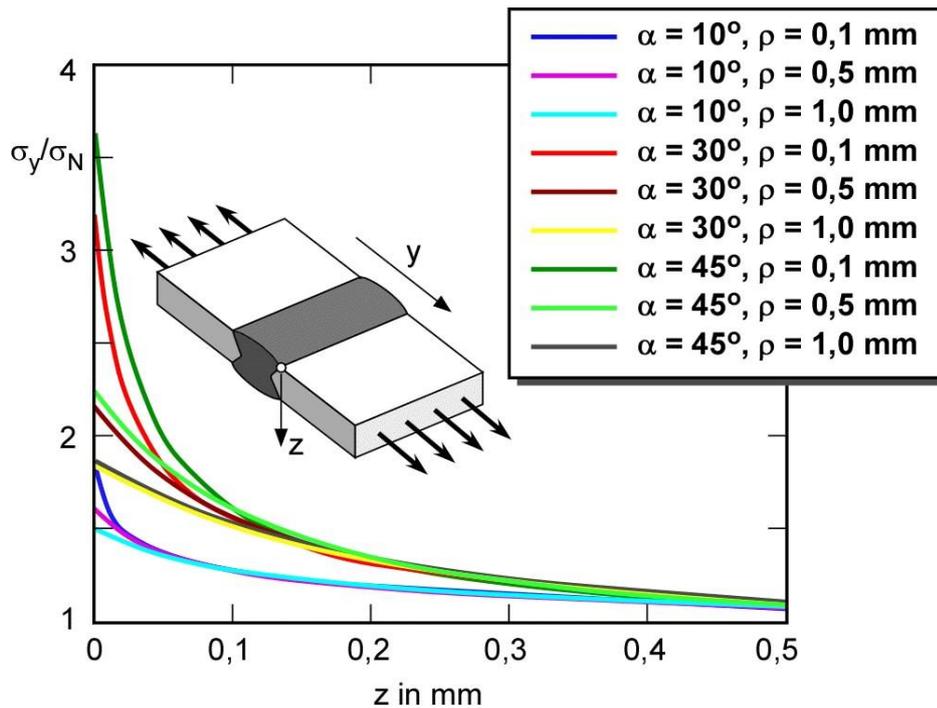


Bild 59: Beispiele für Spannungstiefenprofile in Abhängigkeit von der lokalen Geometrie des Nahtübergangs.

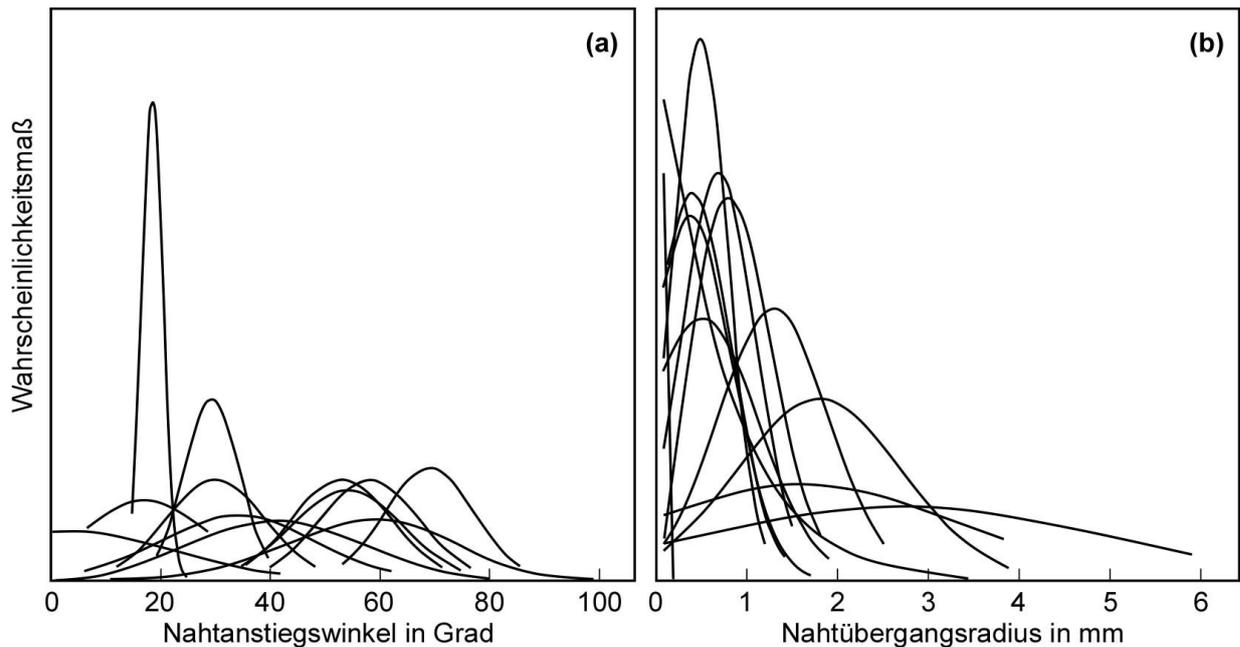
Hinsichtlich der geometrischen Größen s. Bild 15.

Tab. 10: Zusätzliche Forderungen nach ISO 5817 (2014 [93]), damit Gütekriterium (Klasse B) mit FAT-Klasse 125 korrespondiert (B125). Auswahl (Stumpfstoß, $T \geq 0,5$ mm).

Merkmal	Bezeichnung		Hauptteil	Anhang C
	Lfd. Nr.	ISO 6520-1		
Nahtüberhöhung h ¹⁾	1.9	502	≤ 1 mm +0,1L max. 5 mm	$\leq 0,2$ mm +0,1L max. 2 mm
Übergangsradius ρ	-	5052		≥ 4 mm
Anstiegswinkel α	1.12	505	$\leq 30^\circ$	$\leq 30^\circ$
Kantzenversatz	3.1	5071	$\leq 0,1 T + 0,2$ mm max. 3 mm ¹⁾	$\leq 0,05 T$ max. 1,5 mm
Winkelverzug	3.2 ²⁾	508	$\leq 1^\circ$	$\leq 1^\circ$
Schweißspritzer	1.23	602		nicht zulässig

¹⁾ für $T = 0,5 - 3$ mm, oberhalb $T = 3$ mm: $\leq 0,1 T$; max. 3 mm

²⁾ in früheren Versionen von ISO 5817, im neuen Dokument nicht mehr enthalten



Schweißverfahren	Nahtanstiegswinkel [°]			Nahtübergangsradius [mm]			Verteilung	Quelle
	μ	σ	Var	μ	σ	Var		
k.A.	61,54	14,57	0,24	0,87	0,66	0,76	Weibull	[82]
MAG	-	-	-	1,27	0,79	0,62	Weibull	[83]
MAG	-	-	-	3,22	0,41	0,13	Weibull	[83]
MAG	44,18	16,48	0,12	0,97	0,41	0,42	Weibull	[84]
MAG	-	-	-	2,1-2,7	0,2-1,0	0,07-0,48	Gauß	[85]
Lichtbogen-Hand	54	10	0,19	1,3	0,6	0,46	k.A.	[86]
Lichtbogen	30	9	0,30	2,7	2,2	0,81	k.A.	[87]
Lichtbogen-Hand	58	9	0,16	0,7	0,4	0,57	k.A.	[87]
Lichtbogen-Hand	53	9	0,17	1,6	1,7	1,06	k.A.	[86]
Lichtbogen-Hand	69	8	0,12	1,8	0,9	0,50	k.A.	[86]
UP	34	14	0,41	0,5	0,3	0,60	k.A.	[86]
UP	29,3	2,5	0,09	0,05	0,02	0,47	Gauß	[88]
Laser	3,6	18,7	5,2	0,40	0,44	1,13	Gauß	[88]
Hybrid	17,0	11,4	0,67	0,52	0,62	1,19	Gauß	[88]
Hybrid	18,5	1,9	0,1	0,41	0,42	1,02	Gauß	[88]

Bild 60: Literaturdaten für Nahtanstiegswinkel und Nahtübergangsradien von mit verschiedenen Schweißverfahren hergestellten Schweißverbindungen; nach [45].

3.3. Eigenspannungen

3.3.1 Entstehung und bruchmechanische Behandlung

Schweißerspannungen entstehen als Folge veränderter Schrumpfung beim Abkühlprozess. Das betrifft einerseits das Volumen der Naht selbst, wo einzelne Regionen zur gleichen Zeit unterschiedliche Temperaturen und – deutlich unterhalb der Erstarrungstemperatur, wenn der Werkstoff bereits eine deutliche Streckgrenze aufweist – unterschiedliche Steifigkeiten und Festigkeiten aufweisen, andererseits die Gesamtstruktur. Wenn Teilkomponenten in einen grö-

ßeren Rahmen (komplexe Strukturen, Rohrleitungssysteme etc.) eingefügt werden, so können elastische Spannungen über größere Distanz (engl. *long range residual stresses* [94]) die Folge sein. Die IIW-Richtlinie [39] spricht von „globalen Eigenspannungen“.

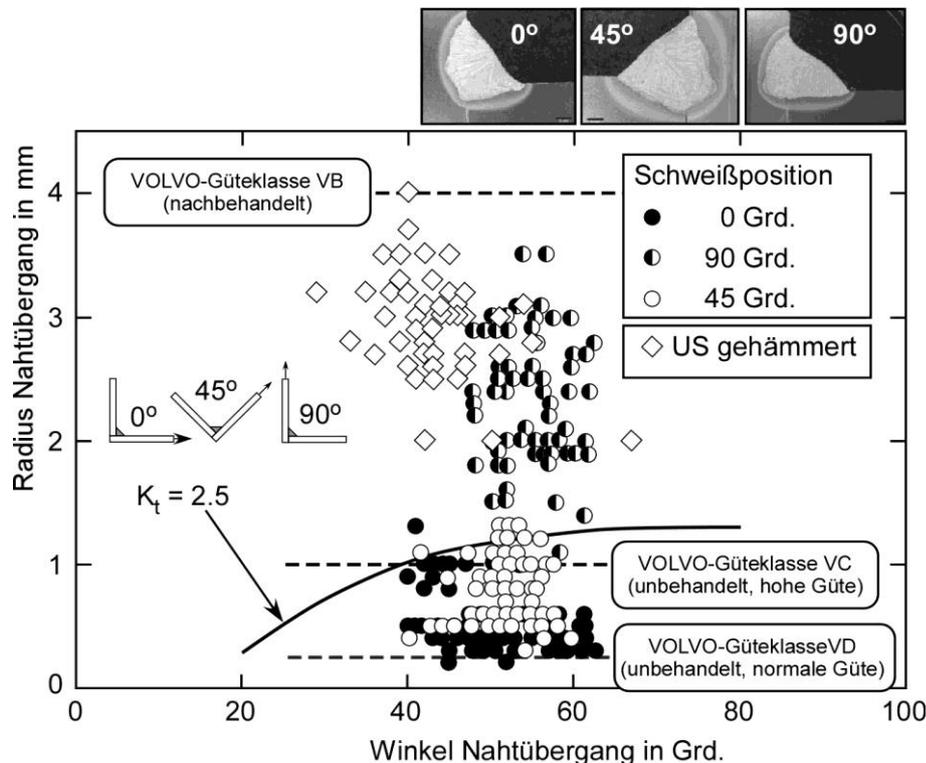


Bild 61: Für verschiedene Schweißpositionen mittels Abdrucktechnik ermittelte Werte für den Übergangsradius und den Nahtanstiegswinkel, Stahl S355J.

Zusätzlich sind die Schweißnahtgütekriterien nach VOLVO-Standard [90] eingetragen; nach [83].

Neben der verhinderten Schrumpfung führt die γ - α -Umwandlung des Kristallgitters (etwa bei ferritischen Stählen) infolge lokaler Volumenausdehnung zur Beeinflussung des Eigenspannungszustandes. Hinsichtlich der Intensität des Effekts spielt die Umwandlungstemperatur eine Rolle, die durch die Prozessführung, genauer die Abkühlgeschwindigkeit ($t_{8/5}$ -Zeit) und den Legierungsgehalt des Stahls beeinflusst wird.

In der Bruchmechanik wird zwischen Primär- und Sekundärspannungen unterschieden, die bei der Bewertung eines Bauteils gegen Bruch auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden. Primärspannungen werden wie Lastspannungen, Sekundärspannungen auf eine davon abweichende Weise behandelt (ausführlicher in [15,40,94]). Schweiß Eigenspannungen können sowohl als Primär- als auch als Sekundärspannungen klassifiziert werden, je nachdem, ob die ihnen zugrundeliegenden Kräfte und Momente im potentiell risstragenden Querschnitt im inneren Gleichgewicht stehen oder nicht. Ein schematisches Beispiel für das gleichzeitige Auftreten von Primär- und Sekundär(eigen)spannungen bietet **Bild 62**. Eigenspannungen, die ihren Entstehungsort entfernt von der betrachteten Naht haben (die erwähnten *long range stresses*), sollen nachfolgend als Reaktionsspannungen bezeichnet werden. Sie sind in jedem Fall als Primärspannungen anzusprechen. Ist eine Schweißverbindung „in sich selbst verspannt“, was z.B. bei der Längssteife der Fall ist, so ergibt sich ein Mischzustand aus Primär- und Sekundärspannungen, der nicht oder nur schwer auseinanderzurechnen ist. Auch in diesem Fall bleibt zu meist nur die Klassifikation als Primärspannung. Schließlich wirken sich Eigenspannungen den Primärspannungen vergleichbar aus, wenn die räumliche Ausdehnung des Spannungsfeldes verglichen mit den potentiellen Rissabmessungen groß ist. Das ist im (lebensdauerbestimmenden) Kurzrisstadium der Fall [94].

Eine Fehlklassifizierung von tatsächlichen Sekundärspannungen als Primärspannungen wirkt sich in der Bruchmechanik-Analyse in konservativer Weise aus, d.h., die Last beim Bruch wird unter- und die Lebensdauer überschätzt, wobei ergänzt werden muss, dass Druckeigenstressspannungen hinsichtlich der Bewertung auf Bruch in Richtlinien wie [13-15] nicht berücksichtigt werden. In der Regel wird der Einfluss auf die Lebensdauer aber eher moderat sein. Aus diesem Grund werden Schweißstressspannungen im IBESS-Modell generell als Primärspannungen behandelt. Die prinzipielle Methodik zur Einbeziehung von Sekundärspannungen in die Bruchmechanik-Analyse wird jedoch von den Autoren in [40] ausführlicher diskutiert.

Bei zyklischer Belastung kommt den Eigenstressspannungen, nachfolgend durch den Index „r“ (σ^r , K^r) bezeichnet, die Funktion einer zusätzlichen Mittelspannungskomponente zu, so dass das Spannungsverhältnis R zu höheren (oder niedrigeren) Werten verschoben wird, während die Schwingbreite der Belastung $\Delta\sigma$ bzw. ΔK unbeeinflusst bleibt. In K-Faktoren ausgedrückt:

$$R = \frac{K_{\min} + K^r}{K_{\max} + K^r} \quad (46)$$

$$\Delta K = (K_{\max} + K^r) - (K_{\min} + K^r) = K_{\max} - K_{\min} + K^r - K^r = K_{\max} - K_{\min} \quad (47)$$

Im IBESS-Modell ist das sowohl auf der Ebene des K-Faktors als auch, da die Eigenstressspannungen, wie erwähnt, generell als Primärspannungen behandelt werden, auf der Ebene des Plastizitätskorrekturfaktors L_r (bzw. ΔL_r) zu berücksichtigen, hier durch die Erhöhung oder Erniedrigung der anliegende Spannung σ_{app} in Gl. (6).

3.3.2 Eigenstressspannungen am Nahtübergang

Ein nicht triviales Problem ist, dass die Eigenstressspannungen quantitativ bekannt sein müssen, und das nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in Tiefenrichtung. Methoden zu ihrer Ermittlung sind Messungen (Röntgen, Bohrloch, Neutronenstreuung) und die rechnerische Simulation des Schweißprozesses mit geeigneten FE-Programmen. Dass hier ungeachtet großer Bemühungen noch immer Defizite bestehen, haben unlängst umfangreiche *Round Robin*-Untersuchungen ans Licht gebracht [95]. Um den Aufwand der individuellen Ermittlung der Eigenstressspannungen zu vermeiden, bieten Dokumente wie der britische Bruchmechanik-Standard BS 7910 [14] Kompendien von Eigenstressspannungsprofilen als obere Hüllkurven zu gemessenen und berechneten Literaturdaten. Aber auch hier ist Vorsicht geboten, da die Ursprungsdaten in etlichen Fällen (z.B. [96]) eine Mischung aus Primär-, d.h. Reaktions-, und Sekundärspannungen darstellen, wobei erstere für spezifische Konfigurationen ermittelt wurden, und nicht einfach auf andere Komponenten übertragbar sind. Ein weiteres Problem der Kompendien ist, dass nicht hinsichtlich des Bestimmungsortes, also der Nahtmitte, des Nahtübergangs etc. unterschieden wird, obwohl die Eigenstressspannungen zwischen diesen beiden Stellen deutliche Gradienten aufweisen. Ein Beispiel zeigt **Bild 63**, wo ein Kompendium-Profil experimentellen, in *IBESS-Teilprojekt G2* gemessenen Eigenstressspannungen am Ort des Nahtübergangs gegenübergestellt ist. Es ist ersichtlich, dass das Kompendium-Profil für die Aufgabenstellung von IBESS praktisch keinen Aussagewert besitzt.

In **Bild 64** sind Tiefenprofile transversaler Eigenstressspannungen WIG- und MAG-geschweißter Stumpfstoße an Platten aus S355NL wiedergegeben, die in *IBESS-Teilprojekt G2* mit unter-

schiedlichen Methoden ermittelt wurden. Es zeigt sich, dass an der Oberfläche im Bereich des Nahtübergangs, wo sich aufgrund des lokalen Kerbs das frühe, für die Lebensdauer entscheidende Risswachstum abspielt, praktisch keine Zugeigenspannungen existieren. Bestätigt wird diese Beobachtung durch Eigenspannungsmessungen entlang der Oberfläche (**Bild 65**).

Vergleichbare Ergebnisse wurden mit Ausnahme der Längssteifen auch für alle anderen in IBESS untersuchten Konfigurationen, d.h. alle Stumpfstoße und Kreuzstoße aus S355NL und S960QL erzielt. Die Eigenspannungstiefenprofile der beiden Nahtausführungen der Längssteifen aus S355NL sind vergleichbar, weshalb in **Bild 66** nachfolgend nur eines, dasjenige für Nahtgeometrie 2 wiedergegeben werden soll. Anders als bei den anderen Geometrien beträgt die mittels Röntgenbeugung ermittelte transversale Eigenspannung in diesen Fällen 0,27 (NG1) bzw. 0,43 (NG2) der Fließgrenze, allerdings mit einer immensen Streuung zwischen 0,23 und 0,63 σ_Y (NG2). Ursache dürfte sein, dass die Längssteifen „in sich verspannt“ sind, so dass eine Mischung aus Reaktions- (als Primär-) und Sekundärspannungen vorliegt.

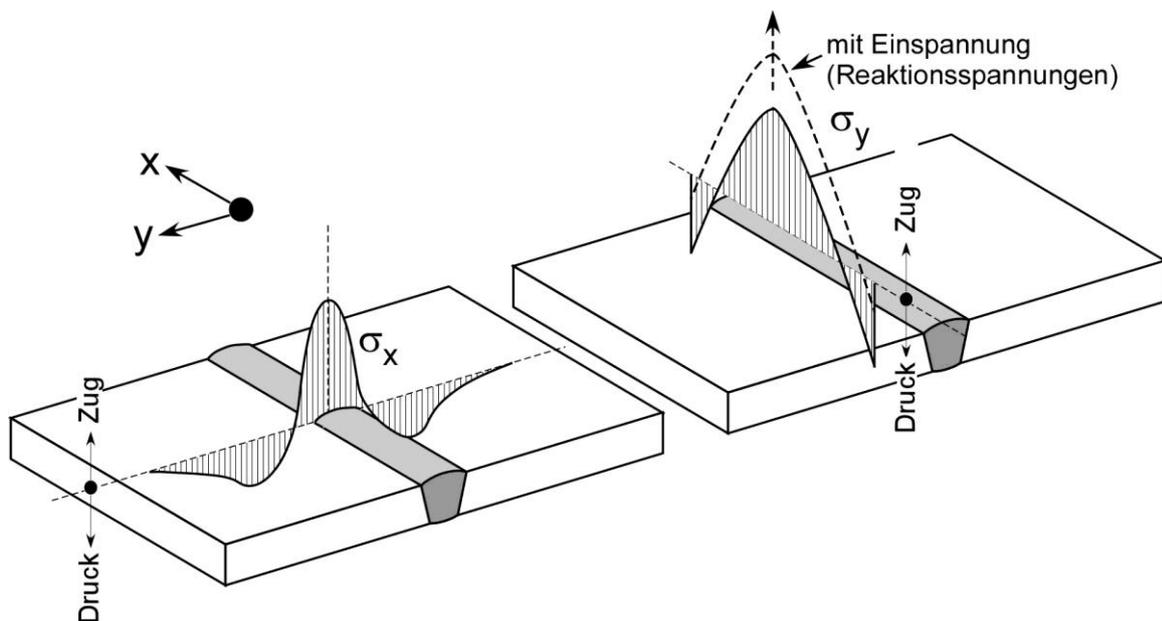


Bild 62: Longitudinale (σ_x) und transversale (σ_y) Eigenspannungen in einer geschweißten Platte. Hinsichtlich σ_y ist schematisch dargestellt, wie infolge der Einspannung der Platte beim Schweißen zusätzliche Reaktionsspannungen aufgebaut werden.

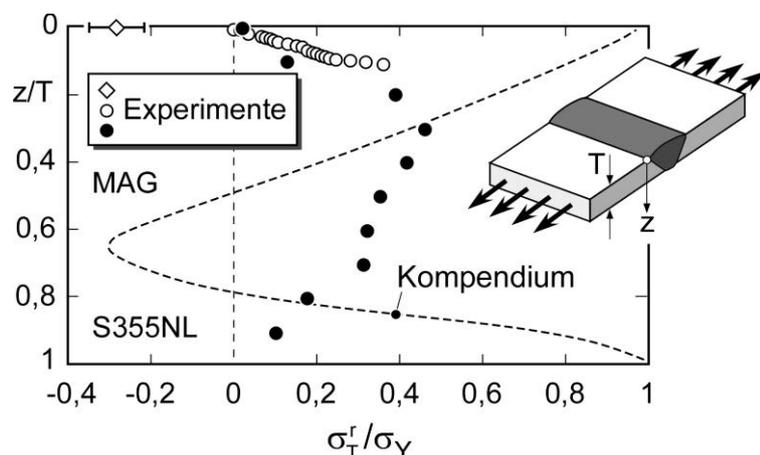


Bild 63: Am Nahtübergang experimentell ermitteltes Tiefenprofil der transversalen Eigenspannungen σ_T^r ; Stumpfstoß; Vergleich mit Kompendiumslösung nach [14];

IBESS-Teilprojekt G2.

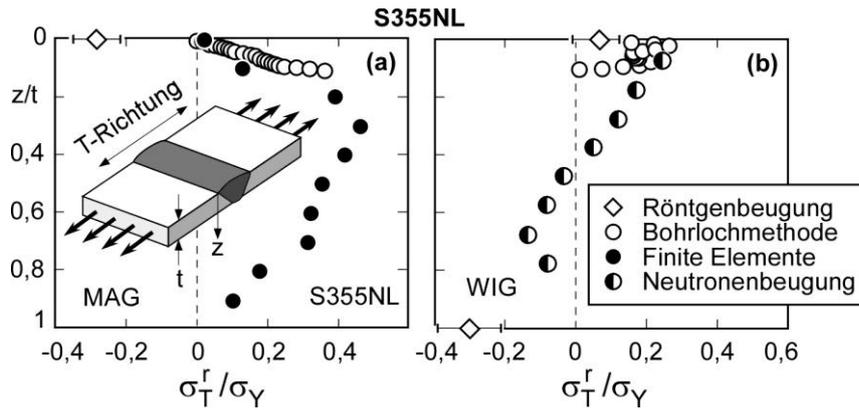


Bild 64: Tiefenprofile transversaler Eigenspannungen σ_T^r ; S355NL; Stumpfstöße; (a) MAG-, (b) WIG-geschweißt;

IBESS-Teilprojekt G2.

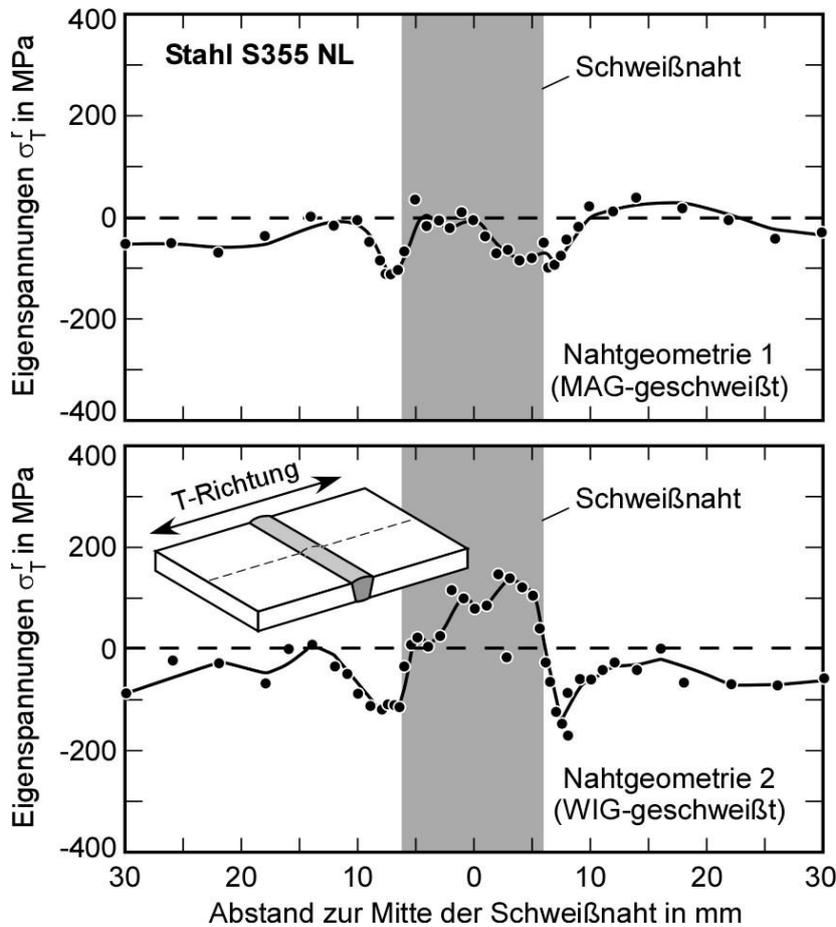


Bild 65: Oberflächenprofile der transversalen Eigenspannungen σ_T^r ; Stumpfstoß; S355NL;

Oben: MAG-geschweißt

Unten: WIG-geschweißt

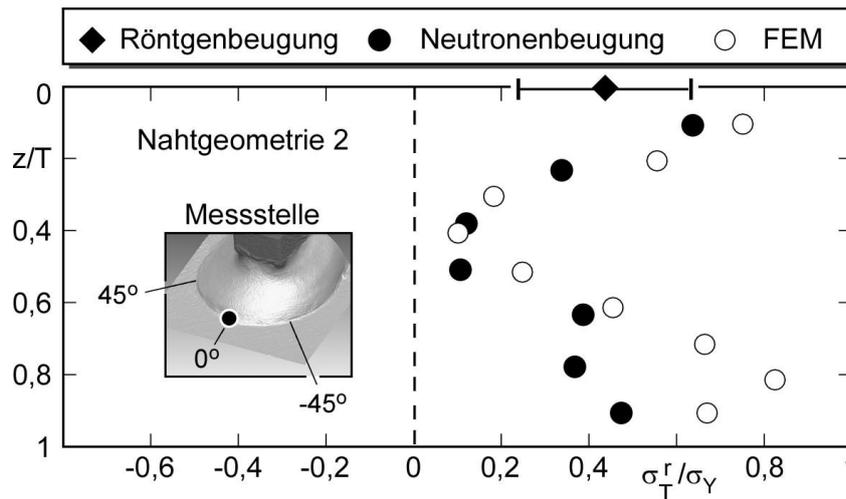


Bild 66: Tiefenprofile transversaler Eigenspannungen σ_r^r ; S355NL; Längssteife; (a) MAG-, (b) WIG-geschweißt;

IBESS-Teilprojekt G2.

3.3.3 Beeinflussung der Eigenspannungen bei zyklischer Belastung

Es ist bekannt, dass Eigenspannungen infolge zyklischer Belastung abgebaut werden können (hinsichtlich einer Übersicht s. [97]). Das ist immer dann der Fall, wenn die Primärspannungen σ^p einen Wert

$$\sigma^p \geq \sigma_Y - \sigma^r \quad (48)$$

überschreiten. Gelegentlich geschieht das bereits während des ersten Lastzyklus, wenn dessen Spannungsspitze die Fließgrenze überschreitet. Aber auch danach ist bei entfestigenden Werkstoffen, bei denen die Fließgrenze bis zum Erreichen eines stabilisierten Zustands graduell abnimmt, eine weitere Reduzierung möglich [98,99]. Ein experimentelles Beispiel zeigt **Bild 67**.

FEM-Analysen, die im Rahmen von *IBESS-Teilprojekt G3* durchgeführt wurden, bestätigen den experimentellen Trend, dass die Eigenspannungen infolge der zyklischen Belastung abnehmen (**Bilder 68** und **69**). Sie ergeben jedoch einen gravierenden Unterschied zwischen der zyklischen Belastung bei $R = -1$ und derjenigen bei $R = 0$. Für $R = -1$ ergibt sich ein weitgehender Abbau der Eigenspannungen (d.h., diese tendieren zunehmend gegen null), und das insbesondere sowohl für ursprüngliche Zugeigenspannungen (Bild 68a) als auch für ursprüngliche Druckeigenspannungen (Bild 69). Für $R = 0$ sagen die Simulationen jedoch den Aufbau von Druckeigenspannungen im Kerbgrund voraus. Auch das gilt sowohl für ursprüngliche Zugeigenspannungen (Bild 68b) als auch für ursprüngliche Druckeigenspannungen (Bild 69b). Im letztgenannten Fall nehmen die Druckeigenspannungen unter der zyklischen Belastung zu. Dieses Ergebnis scheint zunächst im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen in Bild 67a zu stehen, bei denen die zyklische Belastung ja auch bei $R = 0$ erfolgt ist. Zu beachten ist jedoch, dass die Experimente an einer schwach gekerbten, die Simulationen jedoch an einer stark gekerbten Struktur, die die lokale Plastifizierung begünstigt, durchgeführt wurden.

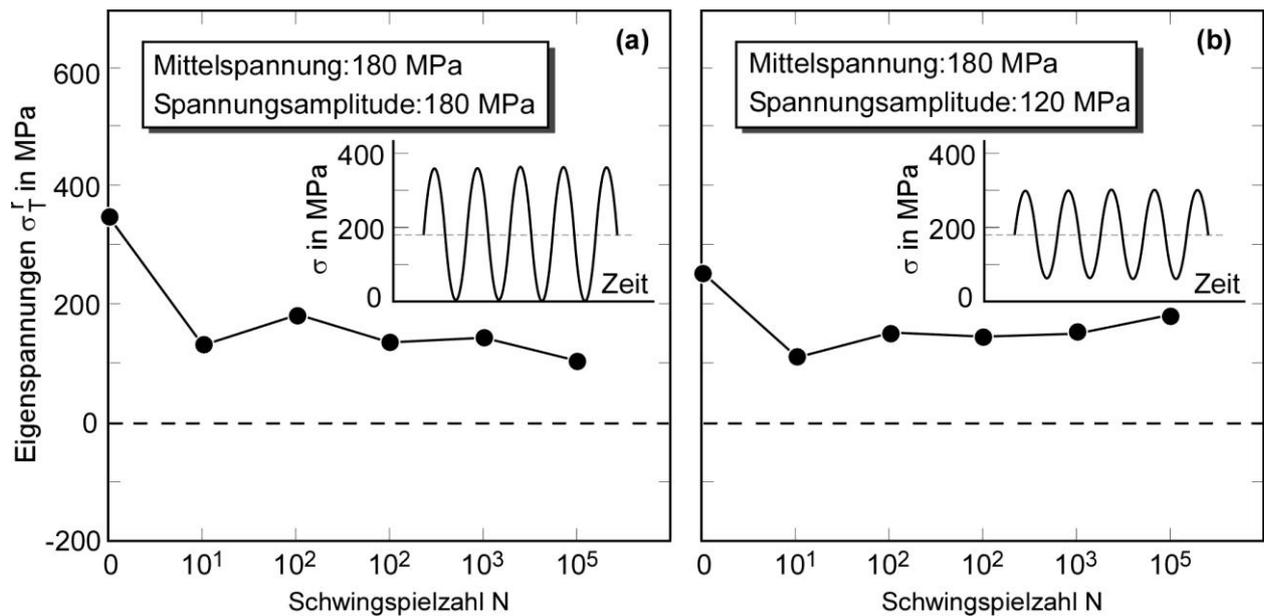


Bild 67: Gemessene Veränderung der transversalen Eigenspannungen infolge von Schwingbelastung ausgehend von ursprünglichen Zugeigenspannungen; Stumpfstoß; dickwandig, geringe Kerbwirkung, S355N; nach [100]; (a) R-Verhältnis = 0 (b) R-Verhältnis = 0,2; Ermittlung der Eigenspannungen im Kerbgrund; Messung mittels Röntgenbeugung.

Die Ergebnisse der Simulationen sind auf den Kerbgrund beschränkt, und sie lassen sich auch darüber hinaus nicht eins-zu-eins auf die Validierungsversuche übertragen. Was sie jedoch erlauben, ist die Vorhersage von Trends:

(a) Für ein R-Verhältnis von $R = -1$ sollten die IBESS-Rechnungen zufriedenstellende Ergebnisse erbringen, wenn die Eigenspannungen auf null gesetzt, bzw. – was dasselbe ist – gar nicht berücksichtigt werden. Das gilt natürlich nur, wenn keine verbleibenden Reaktionsspannungen vorhanden sind, was bei den in IBESS untersuchten Stumpfnähten und Kreuzstößen aber der Fall ist.

(b) Bei nominellen R-Verhältnissen von 0 und 0,5 ist zu erwarten, dass die bei der zyklischen Belastung aufgebauten bzw. verstärkten Druckeigenspannungen das reale R-Verhältnis unter die Werte von 0 bzw. 0,5 absenken. Wird das nicht berücksichtigt, so ist mit konservativen Vorhersagen der Rissauabreitungsgeschwindigkeit und der Schwingfestigkeit zu rechnen, da die Risspitzenbelastung mit real zu hohem R berechnet wird.

(c) Da Eigenspannungen an plastische Verformung gebunden sind, sollte der Effekt für weniger feste Werkstoffe (S355), den oberen Bereich des Zeitfestigkeitsastes und stärker gekerbte Strukturen ausgeprägter sein als für höherfeste Werkstoffe (S960), den unteren Bereich des Zeitfestigkeitsastes und weniger stark gekerbte Strukturen.

Bild 70 illustriert ein Beispiel (Stumpfschweißnähte aus 355NL), bei dem die Schweißeigenspannungen tatsächlich keinen Einfluss auf die Schwingfestigkeit haben (Trend a). Die Wöhlerkurven für den geglühten und den spannungsarmgeglühten Zustand fallen praktisch zusammen. Dass der Einfluss des R-Verhältnisses bei höheren Lastniveaus geringer wird (Trend c) ist in **Bild 71** gezeigt. Allerdings ist hinsichtlich der Interpretation der experimentellen Daten eine gewisse Vorsicht geboten, da in etlichen Fällen nicht genügend im Sinne von IBESS „gültige“ Daten erzeugt werden konnten, um eine statistisch abgesicherte Aussage zu ermöglichen.

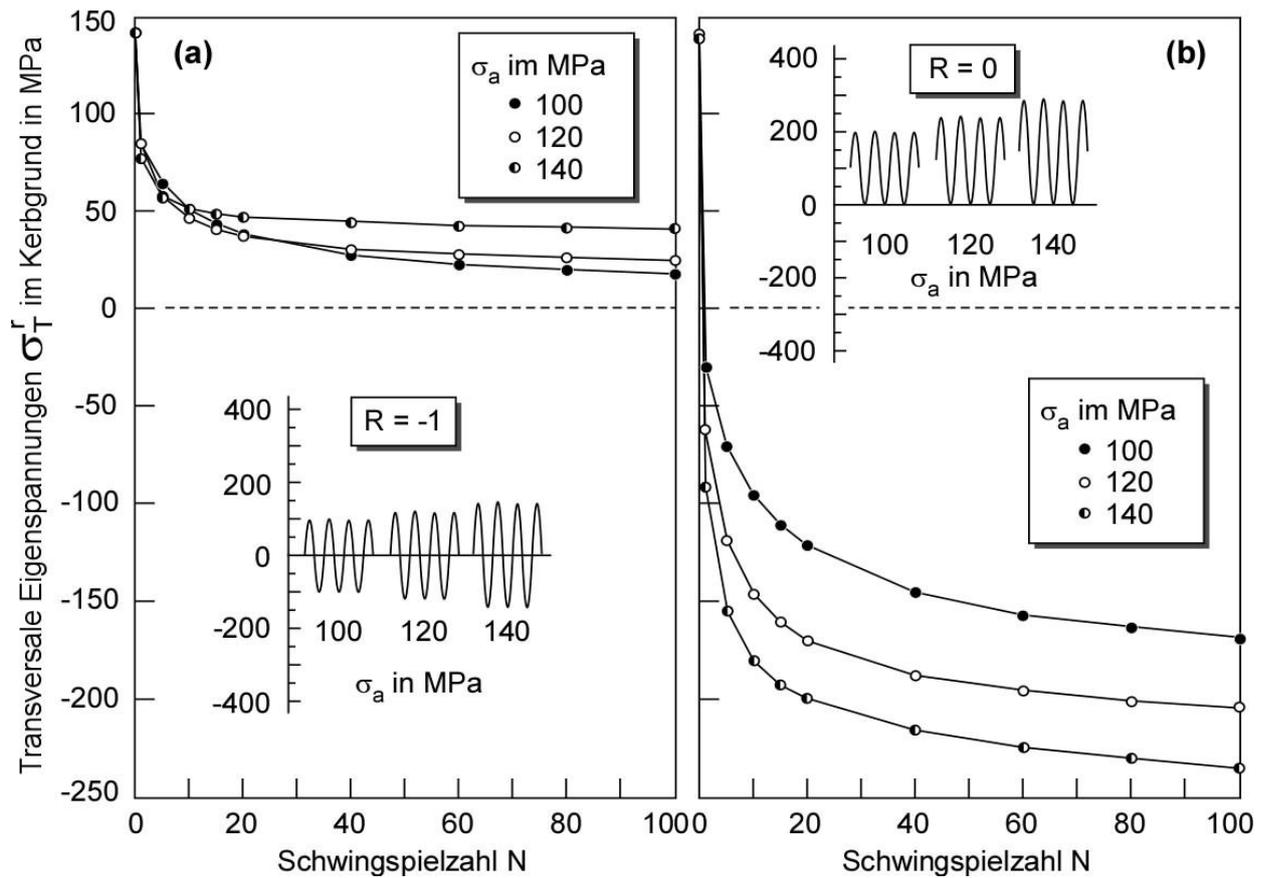


Bild 68: Simulierte Veränderung der transversalen Eigenstressungen bei Schwingbelastung ausgehend von ursprünglichen Zugeigenstressungen; Kreuzstoß; starke Kerbwirkung, S355N; *IBESS-Teilprojekt G3*; (a) R-Verhältnis = -1; (b) R-Verhältnis = 0; Ermittlung der Eigenstressungen im Kerbgrund; Finite-Elemente-Modellierung (Materialmodell nach Chaboche).

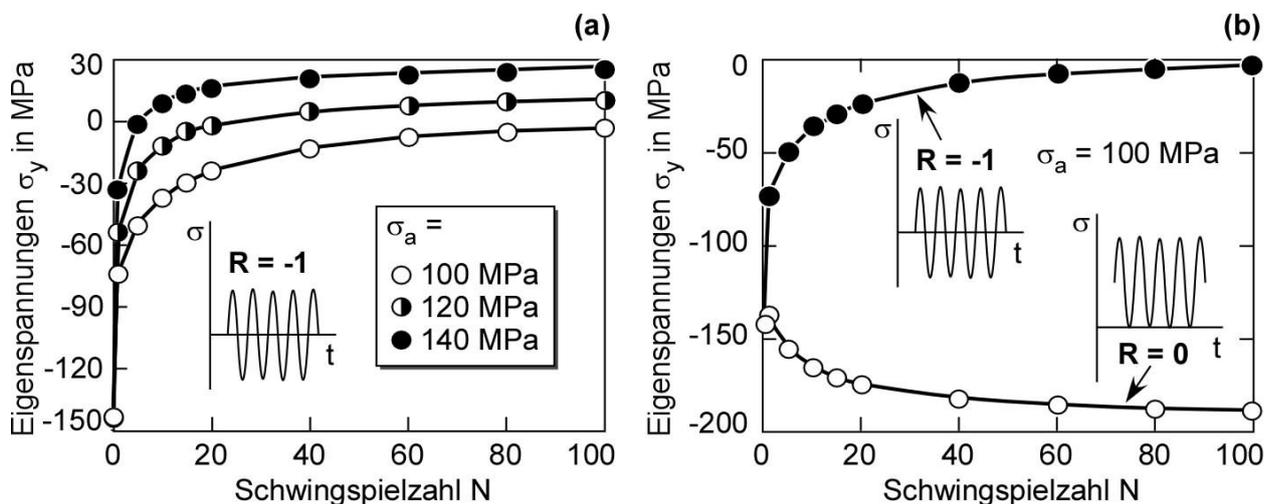


Bild 69: Simulierte Veränderung der transversalen Eigenstressungen bei Schwingbelastung; Kreuzstoß; starke Kerbwirkung, S355N; *IBESS-Teilprojekt G3*; (a) R-Verhältnis = -1; (b) R-Verhältnis = 0; Ermittlung der Eigenstressungen im Kerbgrund; Finite-Elemente-Modellierung (Materialmodell nach Chaboche).

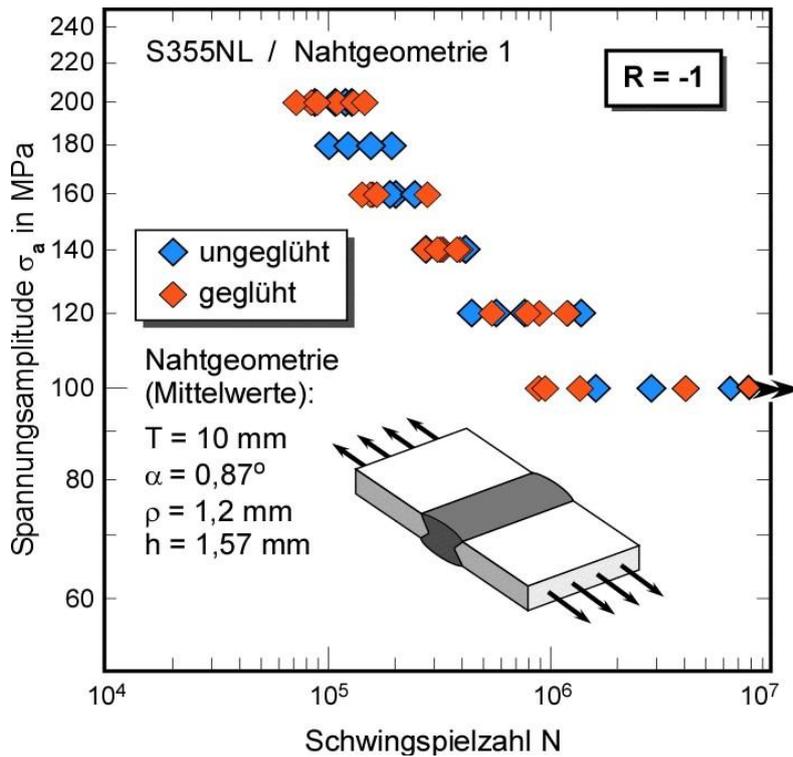


Bild 70: Beispiel für den nicht vorhandenen Einfluss von Schweißseigen-
spannungen auf die Schwingfestigkeit.
Stumpfstoß,
S355NL.

Experimentelle Daten
aus den *IBESS-Teilprojekten G4 und A1*

Es soll noch einmal betont werden, dass die oben getroffenen Aussagen hinsichtlich der Validierungsbeispiele für reale, eingeschweißte Strukturen mit substantiellen Reaktionsspannungen nicht zutreffen müssen. Deren Ermittlung ist aber generell nicht Bestandteil von IBESS, sondern muss von Fall zu Fall vom Anwender geleistet werden. In der Regel wird dazu eine (elastisch-plastische) Finite-Elemente-Rechnung erforderlich sein. Für einfache Geometrien wie z.B. Stabtragwerke existieren in begrenztem Maße auch analytische Lösungen (z.B. [101]).

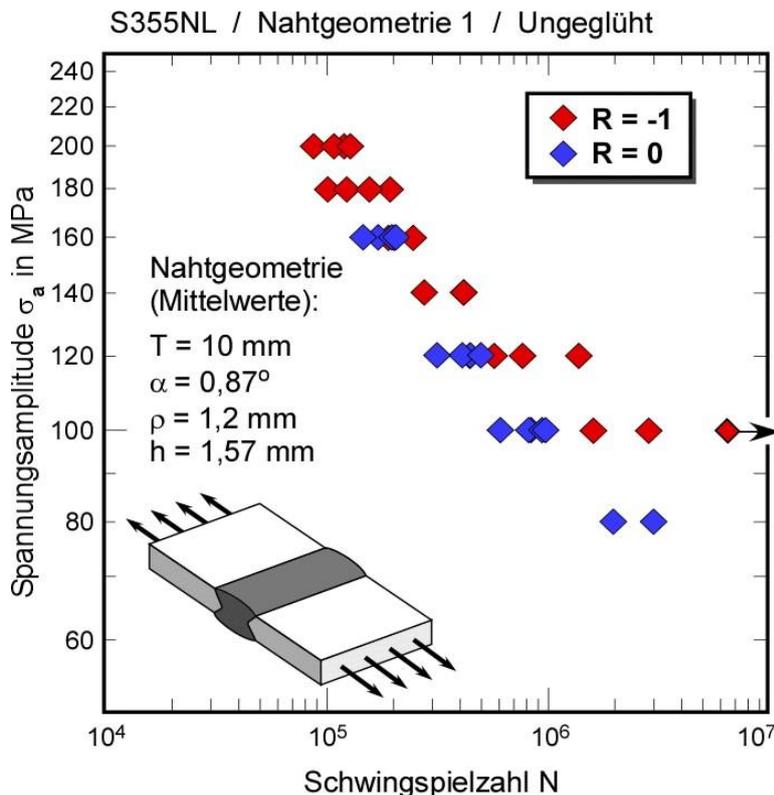


Bild 71: Beispiel für den auf höherem Lastniveau
abnehmenden Einfluss
des Spannungsverhältnisses R mutmaßlich in-
folge des Aufbaus von
Druckeigenstressen
bei zyklischer Belastung
bei nominell $R = 0$.

Stumpfstoß, S355NL.

Experimentelle Daten
aus den *IBESS-Teilprojekten G4 und A1*

4. IBESS-Prozedur – Grundstruktur und Validierung

4.1 Einführung

Die Basis-Elemente der IBESS-Methode wurden in Abschnitt 2 eingeführt. Ziel des vorliegenden Teils des Berichts ist die Anwendung auf experimentelle Datensätze bzw. die Validierung und die Erarbeitung einer prozedurtauglichen Vorgehensweise für die Berechnung der Schwingfestigkeit geschweißter Strukturen. Experimentelle Schwingfestigkeitsdaten wurden in sechs *IBESS-Teilprojekten* erhoben: *G1, G3, G4, A1, A3* und *A4*. Insbesondere bei Verbindungen mit flachen Nahtübergängen bestand das Problem, dass trotz Stahls der nicht für die Untersuchung vorgesehenen Nahtübergänge etliche Proben an Stellen gebrochen waren, für die keine Rechnungen durchgeführt wurden. Diese Datenpunkte wurden entsprechend ausgesondert und sind nicht Teil der Validierungsdatensätze. Sie sind auch in den nachfolgenden Bildern nicht wiedergegeben.

Die Eingangsdaten für die Rechnungen wurden bereits in Abschnitt 3 bereitgestellt, wobei in einigen Fällen erheblicher Aufwand getrieben wurde, der einerseits für die Validierung erforderlich war, andererseits aber die Möglichkeit der praktischen Anwendung in der Regel übersteigt. Als Antwort auf diese Herausforderung soll die IBESS-Prozedur einen hierarchischen Aufbau aus mehreren *Analyse-Ebenen* aufweisen, wobei sich die *Ebenen* sowohl hinsichtlich des zu treibenden Aufwands als auch hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit unterscheiden sollen. Die Abstufung soll grundsätzlich auf zwei Haupt-*Analyse-Ebenen* erfolgen, aber auch innerhalb dieser werden Vereinfachungen diskutiert. In diesem Zusammenhang wird eine kritische Diskussion geführt, in deren Ergebnis auch offene oder noch nicht hinreichend gelöste Fragestellungen benannt werden.

Im Antrag nicht vorgesehen war die in Abschnitt 2.6 eingeführte Methode zur statistischen Abschätzung der Dauerfestigkeit bzw. der Spannungsamplitude, bei der innerhalb von 10^7 Lastspielen kein Versagen der Struktur eintritt. Entsprechend wurden im Projekt auch keine Validierungsdaten erzeugt. Eine vorläufige Bewertung der Methodik erlaubt jedoch der Vergleich mit der umfangreichen Datensammlung zu Schwingfestigkeitsdaten an Baustählen in [102].

Hinsichtlich der Validierungsrechnungen zwei Anmerkungen zum Schluss:

- ♦ Als Versagenskriterium wurde jeweils das Erreichen einer Risttiefe in der Größe der halben Wandstärke angenommen. Tatsächlich weisen die Versuche dieses Kriterium als konservativ aus, d.h., die experimentell nachgewiesenen Risttiefen beim Bruch waren größer (s. Bericht zu *IBESS-Teilprojekt A1*). Das bedeutet, dass die vorhergesagten Lebensdauern und Spannungsamplituden zu gering berechnet werden. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass der Effekt allzu groß ist, da oberhalb $a/T = 0,5$ kein substantieller Beitrag zur Lebensdauer mehr erwartet wird.
- ♦ Bei der Probenfertigung wurde darauf geachtet, die globalen geometrischen Abweichungen (*misalignment*), d.h., Winkelverzug und Kantenversatz so gering wie möglich zu halten, damit sie in der Analyse keine Berücksichtigung finden müssten. Das ist nur bedingt gelungen. Ein Effekt macht sich v.a. beim Vergleich zwischen ungeglühten und spannungsarmgeglühten Schweißverbindungen bemerkbar. Da die Reduzierung der Eigenspannungen (nicht nur im Bereich des Nahtübergangs) mit einer Vergrößerung der globalen geometrischen Abweichungen einhergeht, tendieren die experimentellen Schwingfestigkeits- und Lebensdauerdaten

der geglühten Proben zu einem breiteren Streuband. Eine Berücksichtigung jenseits dieses experimentellen Streubandes sieht sich mit mehreren Problemen konfrontiert. Zum einen wurden die Geometrieabweichungen jeder Probe (Bild 56) jeweils an konkreten Punkten erhoben, d.h. sie geben die realen, entlang der Plattenlänge variierenden Verhältnisse nur näherungsweise wieder, zum anderen ist aufgrund der von Probe zu Probe variierenden zusätzlichen Spannung im Kerbgrund auch ein von Probe zu Probe quantitativ unterschiedlicher Einfluss auf die Umlagerung der Eigenspannungen, wie sie in Abschnitt 3.3.3 andiskutiert wurden, zu erwarten. Die Validierung könnte zudem nicht auf der Ebene ganzer Wöhlerkurven erfolgen, sondern müsste Probe für Probe vorgenommen werden, wobei zu berücksichtigen wäre, dass die Geometrieabweichung nicht nur zusätzliche Randspannungen bzw., auf den Querschnitt bezogen, sekundäre Biegespannungen verursacht, sondern auch das Spannungsverhältnis R der individuellen Probe gegenüber den Nominalwerten verändern würde, wobei sich hinsichtlich der Membran- und Biegespannungen auch noch Unterschiede ergäben.

Diese schwer beherrschbare Komplexität legte es nahe, die globalen Geometrieabweichungen zunächst nicht in die Analyse einzubeziehen. Bei der Diskussion der Ergebnisse ist dann aber zu beachten, dass die lokale Spannung im Nahtübergangskerb bei Proben mit stärker ausgeprägter Geometrieabweichung fehlergeschätzt wird, da in den Diagrammen der experimentellen Werte lediglich die Zugnennspannung wiedergegeben ist.

Das IBESS-Modell wurde im vorliegenden *Teilprojekt* als Computerprogramm umgesetzt und allen anderen *Teilprojekten* zur Verfügung gestellt. Seine Anwendung zu Validierungs- und weiteren Studien erfolgte in jedem Fall in enger Abstimmung mit dem Autor dieses Bericht, weshalb nachfolgend neben den eigenen Simulationen auch Ergebnisse anderer Teilprojekte wiedergegeben werden sollen.

4.2 Rissfortschritt

Bild 72 zeigt ein Beispiel für Mehrfachrissausbreitung entlang des Nahtübergangs einer Stumpfnah aus S355NL. Dabei sind in Bild 72a der mittels Anlassglühen und Rastlinien sichtbar gemachte Rissverlauf und in Bild 72b zusätzlich die entsprechenden Schwingspielzahlen dargestellt. Bild 73c zeigt die zugehörige IBESS-Analyse, wobei, abweichend vom Standardprogramm die durch Anlassglühen sichtbar gemachten Risse exakt modelliert wurden. Die Probe war nach ca. $2,5 \cdot 10^5$ Schwingspielen geglüht worden. Für einen der Risse sind die Ergebnisse der Risswachstumsanalyse in **Bild 73** wiedergegeben. Es zeigt sich, dass sowohl die Risstiefe a als auch die halbe Risstiefe c gut nachgerechnet wurden. Die Ausgangsrissabmessungen der Rechnung (nach dem Glühen) betragen $a = 0,45$ mm und $c = 0,98$ mm. Im Zuge der Rissausbreitungssimulation traten mehrere Risskoaleszenzereignisse ein, die sich in den sprungartigen Verringerungen des a/c -Verhältnisses (Bild 73c) niedergeschlagen haben.

Die Versuche wurden bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ durchgeführt, weshalb zu erwarten war, dass die Eigenspannungen im Wesentlichen relaxiert waren. Warum die Rissausbreitungsrate a oberhalb von $a = 3$ mm etwas zu gering berechnet wird, ist nicht klar. Möglicherweise waren in dieser Tiefe der Wand noch geringfügige Zugeigenspannungen vorhanden. In diesem Werkstoffbereich sollte die Kerbwirkung des Nahtübergangs abgeklungen sein, weshalb ein geringerer Effekt der zyklischen Belastung auf die Eigenspannungen zu erwarten wäre. Entscheidender als diese Ungenauigkeit ist jedoch, dass die Vorhersage bis zu dieser Risstiefe (3 mm), die mutmaßlich den größten Anteil der Lebensdauer einschließt, sehr gut ist. Das belegt die Arbeitsfähigkeit des IBESS-Modells. Anzumerken ist allerdings, dass die Rechnungen mit

da/dN- ΔK -Daten für den Grundwerkstoff durchgeführt wurden, da der Riss überwiegend in diesem Bereich wächst. Die Analyse mit WEZ-Daten würde etwas geringere Risswachstumsraten ergeben.

Anders als bei $R = -1$ ist nach der in Abschnitt 3.3.3 geführten Diskussion zur Entwicklung der Eigenspannungen bei zyklischer Beanspruchung unter $R = 0$ eine konservative Vorhersage der Risserweiterung zu erwarten. Die Ursache liegt darin, dass das tatsächliche R -Verhältnis in der Probe aufgrund der Überlagerung mit Druckeigenspannungen deutlich geringer ist als in der Rechnung angenommen. Dass diese Überlegungen tatsächlich zutreffen, zeigt **Bild 74**, wo die Rissausbreitungsanalyse eines bereits langen Einzelrisses in einem S355NL-Stumpfstoß mit nominell $R = 0$ eine erhebliche Überschätzung der Rissausbreitungsrate sowohl in Tiefen- als auch in Oberflächenrichtung und, als Folge, eine erhebliche Unterschätzung der Lebensdauer bewirkt. Im Vergleich dazu zeigt die Analyse mit einem willkürlich angenommenen $R < 0$, in diesem Fall $R = -1$ bessere Ergebnisse. Selbstverständlich könnte in einer tatsächlichen Anwendung nicht einfach $R = -1$ angenommen werden. Das Beispiel zeigt jedoch, dass das reale R -Verhältnis in diese Richtung tendiert. Interessant ist auch, dass sich die Steigung der a - N -Kurve oberhalb einer bestimmten Risstiefe derjenigen der Vorhersage mit $R = 0$ annähert. Die Ursache dürfte dieselbe wie im vorigen Beispiel sein: In diesem Bereich ist der Kerbeffekt des Nahtübergangs weitgehend angeklungen, weshalb anzunehmen ist, dass die Eigenspannungen in diesem Bereich durch die zyklische Vorbelastung weniger stark verändert wurden.

Ursprünglich sollten die Untersuchungen zum Rissfortschritt einzelner Risse mittels künstlicher Anrisse durchgeführt werden. Dass dies hier nicht wiedergegeben ist, hat zwei Gründe: Zum einen stellte sich heraus, dass die Anlassglühbehandlung nach einem geringen Abschnitt der Gesamtlebensdauer sehr viel hochwertigere Daten für die Validierung erbrachte, als das bei Struktur mit Rissstarterkerb möglich war. Zum anderen wurden die Versuche mit künstlichem Riss ausnahmslos bei $R = 0$ durchgeführt, weshalb aufgrund des erwähnten Einflusses der Druckeigenspannungen eine Verfälschung des Ergebnisses zu erwarten war. Mit anderen Worten: Die Validierung der Basiselemente des IBESS-Modells war sinnvoll nur mit Versuchen bei $R = -1$ möglich.

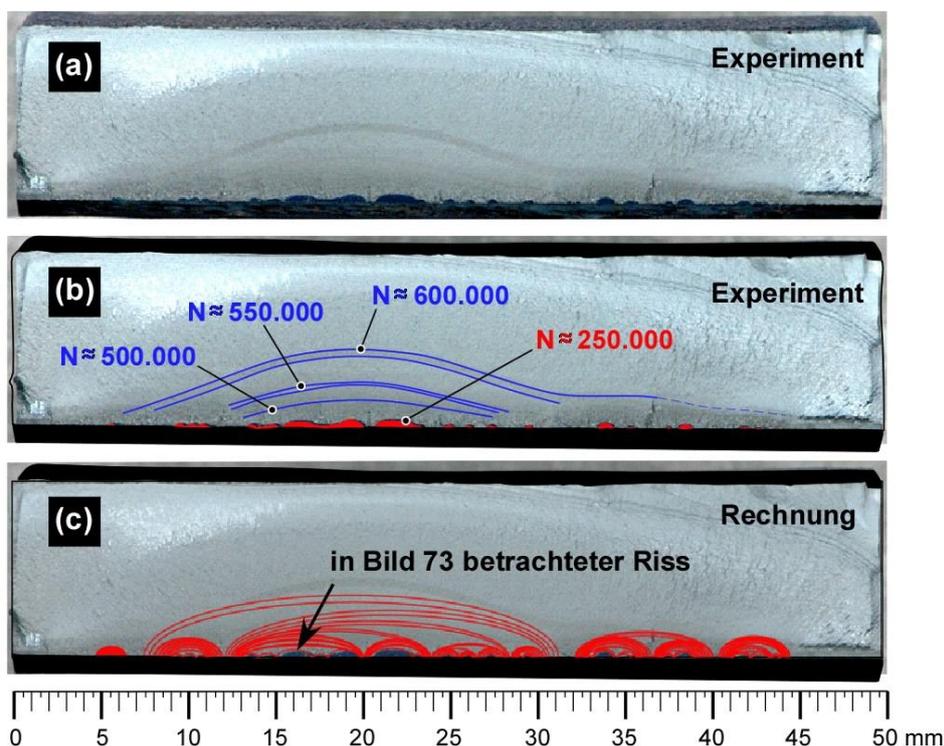


Bild 72: Ausbreitung von Mehrfachrissen unter zyklischer Beanspruchung. (a) Bruchfläche mit markierten Rissen (rot: Anlassglühen; blau: Schwingstreifen); (b) Bruchfläche wie (a) mit zugeordneten Schwingenspielzahlen; (c) IBESS-Rechnungen, die obersten Linien entsprechen wie im Versuch $N \approx 600.000$. $R = -1$; Gerechnet wurde mit Grundwerkstoffdaten

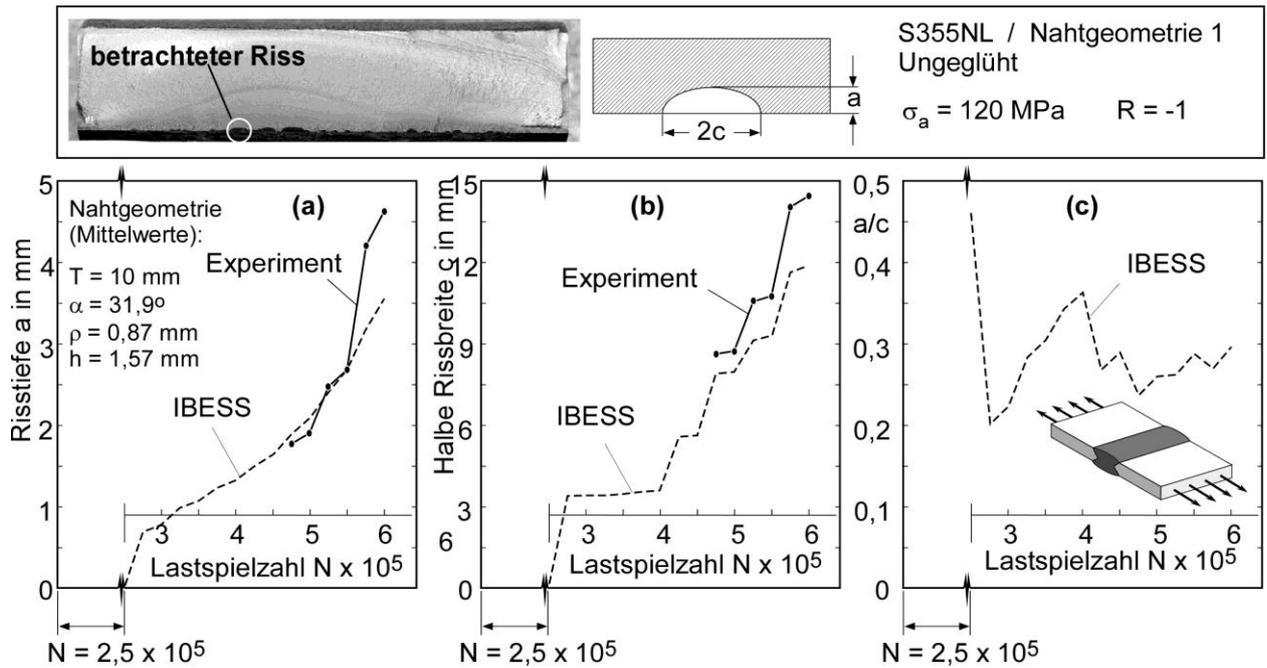


Bild 73: IBESS-Simulation der Rissausbreitung eines der mittels Anlassglühen sichtbar gemachten Risses. Die Analyse wurde mit Grundwerkstoffdaten durchgeführt. Spannungsverhältnis war $R = -1$; (a) Entwicklung der Risstiefe a ; (b) Entwicklung der halben Risslänge an der Oberfläche c ; (c) Entwicklung der Rissgeometrie a/c . Die Sprünge im a/c -Verlauf werden durch Koaleszenzereignisse hervorgerufen.

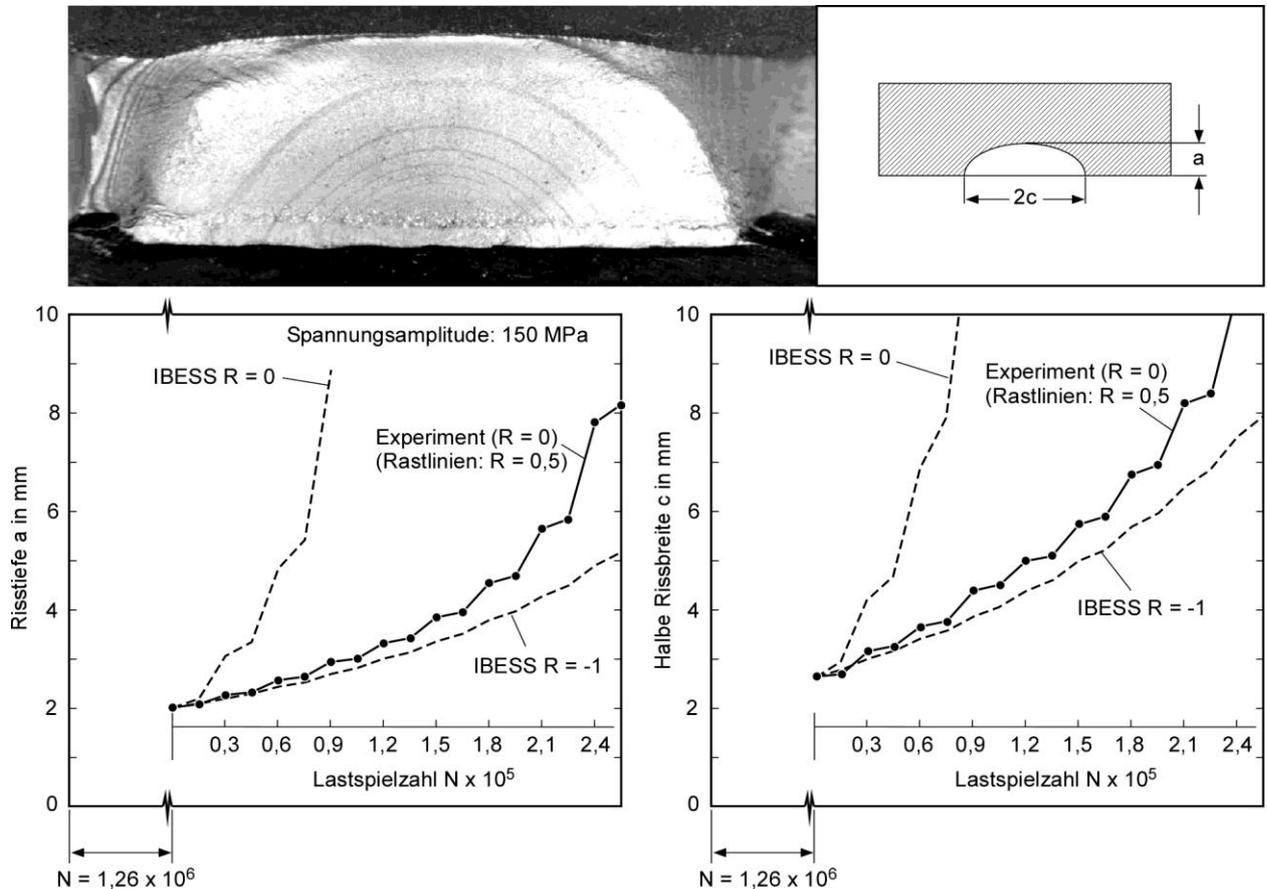


Bild 74: Experimentelles u. simuliertes Risswachstum eines langen Risses bei nominell $R = 0$.

4.3 Schwingfestigkeit

4.3.1 Parameterstudie und Grundstruktur der IBESS-Prozedur

Das Rechenschema des IBESS-Modells ist in Bild 25 wiedergegeben. Hier und bei allen folgenden Anwendungen wurden je Lastniveau jeweils 10 Simulationen durchgeführt. Die in die Diagramme eingezeichneten Symbole geben die sich dabei ergebende Streubreite schematisch wieder.

Die in diesem Abschnitt wiedergegebene Parameterstudie wurde vor dem Hintergrund von Schwingfestigkeitsdaten von Stumpfstößen aus S355NL (Nahtgeometrie 1; Ungeglüht) bei $R = -1$ durchgeführt. Die **Bilder 75** und **76** geben Abschätzungen des Zeitfestigkeitsastes auf der Grundlage der Grundwerkstoff- und WEZ-Daten wieder, wobei die Abschnittsweite ℓ nach Bild 25 (vgl. auch Bild 19) variiert wurde. Letztere ist ein Modellparameter, der mit dem Vorhandensein von Ausgangsrissen entlang des Nahtübergangs korreliert, aufgrund bestimmter Vereinfachungen (z.B. jeder Abschnitt enthält genau mittig einen Riss) jedoch quantitativ nicht auf physikalischer Grundlage bestimmbar ist. Die Abschnittsweite wurde in beiden Fällen zwischen 0,33 mm und 4,17 mm variiert. Da der Nahtübergang in den Bereich der Wärmeeinflusszone fällt (s. die Bilder 27 und 28) ist die Simulation nach Bild 76 die relevante Abschätzung. Es zeigt sich, dass alle Abschnittsweiten verglichen mit den Experimenten zu sinnvollen Ergebnissen führen, weshalb für die weiteren Untersuchungen zunächst ein mittlerer Wert von $\ell = 1$ mm angewendet werden soll. **Bild 77** zeigt (für diese Abschnittsweite) einen Vergleich der Vorhersagen auf der Grundlage des Grundwerkstoff- und WEZ-Gefüges des S355NL. Erwartungsgemäß ist die Analyse mit den WEZ-Eingangsdaten deutlich besser, und zwar sowohl hinsichtlich der vorhergesagten Schwingfestigkeit als auch hinsichtlich des Anstiegs k des Zeitfestigkeitsastes.

$$k = \Delta(\log N) / \Delta(\log \sigma_a), \quad (49)$$

der für Schweißverbindungen in der Größenordnung um $k = 3$ erwartet wird [39]. Zusätzlich wurde, wie in Bild 25 dargestellt, die Dauerfestigkeit ermittelt. Dazu wurde das Spannungsniveau in kleinen Schritten (jeweils 1 oder 2 MPa) verändert. Auf jedem Lastniveau wurden M Rechnungen durchgeführt (in Bild 75 und bei allen nachfolgenden Rechnungen waren es, wie im Fall der Zeitfestigkeit, in der Regel $M = 10$). Die dargestellte Bruchwahrscheinlichkeit ergab sich dann aus der Anzahl der „Versuche“ mit Bauteilversagen bei $N < 10^7$ geteilt durch M . Die Ergebnisse ließen sich statistisch aufarbeiten, indem das so ermittelte Histogramm der Dauerfestigkeit mit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben würde. Darauf wurde in der vorliegenden Arbeit allerdings verzichtet, da der Übergang von 0% zu 100% Versagen bei $N < 10^7$ zumeist mit Unterschieden im Spannungsniveau von wenigen MPa einherging, und es wenig Sinn macht, die Dauerfestigkeit in MPa mit Nachkommastellen anzugeben. Stattdessen wurde als Untergrenze der unterste ganzzahlige Wert der Spannungsamplitude gewählt, bei dem die Wahrscheinlichkeit gerade noch null war.

Hinsichtlich der Unterschiede der Vorhersagen für Grundwerkstoff- und WEZ-Eingangsdaten fällt auf, dass die Abweichungen zwischen beiden Vorhersagen mit abnehmendem Spannungsniveau geringer werden. Auf der Ebene der Untergrenze der Dauerfestigkeit beträgt der Unterschied im vorliegenden Fall gerade einmal 3 – 4 MPa (76 statt 79 oder 80 MPa) oder 4 – 5%. Diese Beobachtung eröffnet die Möglichkeit der Abschätzung der Zeitfestigkeit aufgrund der sehr viel einfacher zu ermittelnden Eingangsdaten für den Grundwerkstoff im Sinne einer

unteren *Analyse-Ebene*. Das Prinzip ist in **Bild 78** skizziert. Durch die Untergrenze der Lebensdauern des für Grundwerkstoffdaten ermittelten Zeitfestigkeitsastes wird (in doppelt-logarithmischer Auftragung) eine Gerade gezeichnet und auf den Wert für $N = 2 \cdot 10^6$ extrapoliert (Bild 78a). Ausgehend von diesem Punkt wird dann ein „korrigierter“ Zeitfestigkeitsast mit dem Anstieg $k = 3$ „konstruiert“ (Bild 78b). Zusätzlich ist die Untergrenze der (ebenfalls mit Grundwerkstoffdaten) nach der oben beschriebenen Methode ermittelten Dauerfestigkeit eingetragen. Der Abknickpunkt ergibt sich als Schnittpunkt aus einer horizontalen Linie durch die Dauerfestigkeitsgrenze und dem bei $N = 2 \cdot 10^6$ fixierten Zeitfestigkeitsast.

Tatsächlich ergibt die IBESS-Analyse, dass der Zeitfestigkeitsast im Bereich um $N = 2 \cdot 10^6$ von der Geradenform in doppelt-logarithmischer Auftragung abweicht, wie in Bild 78a durch die gestrichelte Linie angedeutet, d.h., der Übergang vom Zeit- zum Dauerfestigkeitsast ergibt sich in IBESS nicht als Abknickpunkt, sondern als ausgerundeter Kurvenabschnitt. Prinzipiell könnte die statistische Verteilung der Lebensdauern bei $N = 2 \cdot 10^6$ auch ähnlich wie die der Dauerfestigkeit bei $N = 10^7$ bestimmt werden. Die beschriebene lineare Extrapolation der Daten des oberen Zeitfestigkeitsastes ergibt jedoch eine dazu konservative Lösung, was im Sinne der Abstufung der Analyse-Ebenen durchaus erwünscht ist.

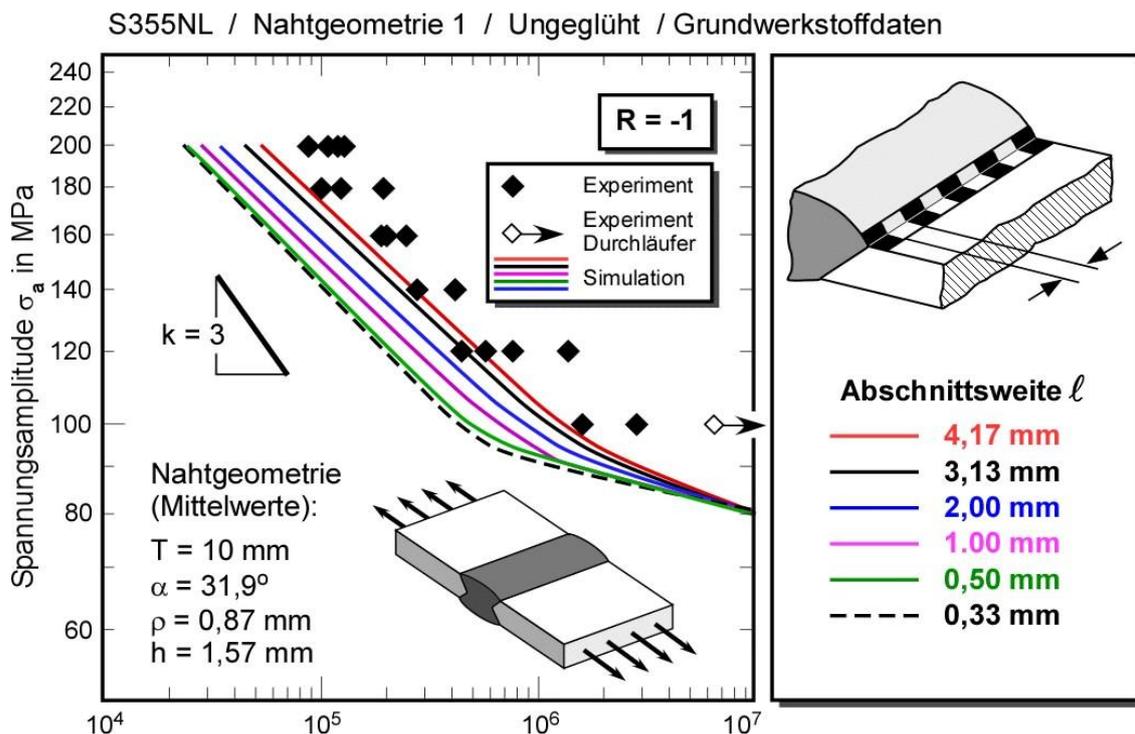


Bild 75: Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve mit IBESS; Variation der Abschnittswerte l ; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = -1$, Grundwerkstoffdaten, Mittelwertkurven.

S355NL / Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht / WEZ-Daten

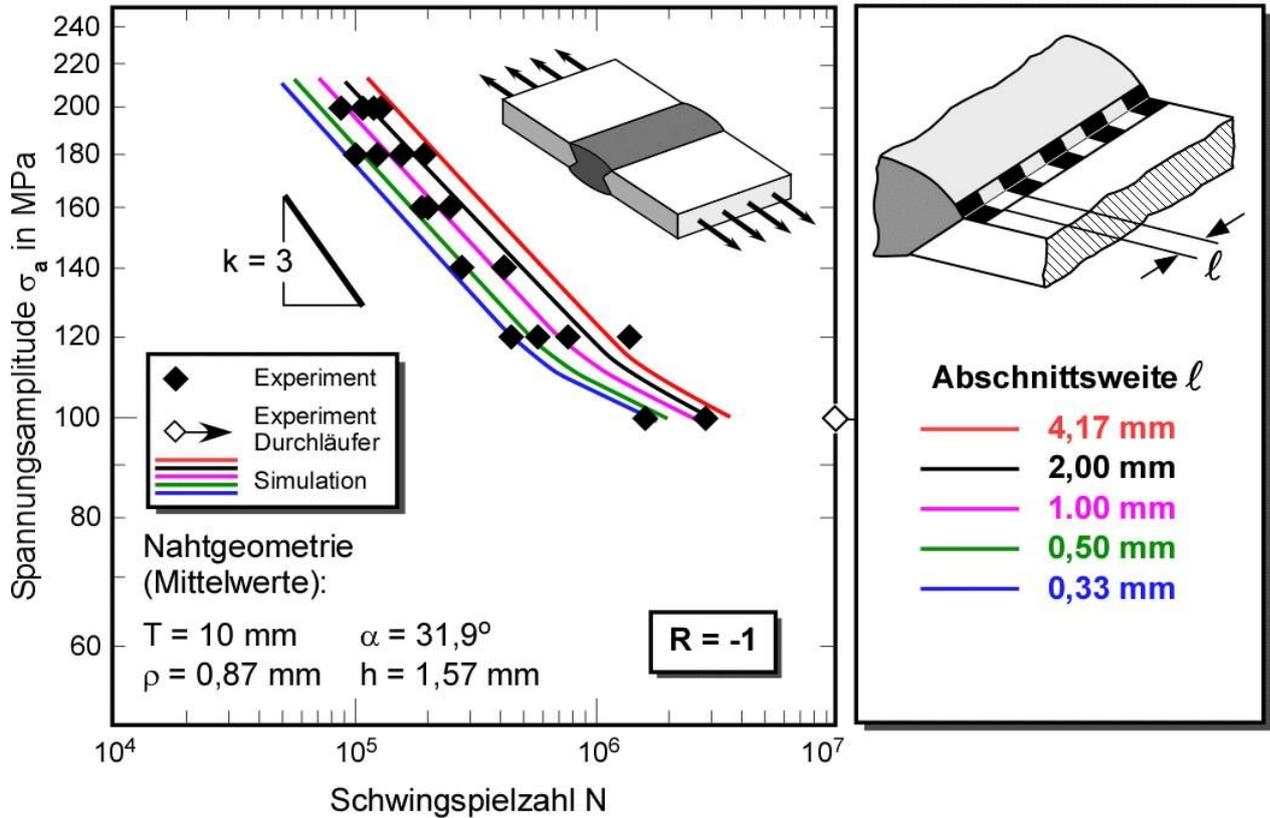


Bild 76: Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve mit IBESS; Variation der Abschnittsweite l ; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = -1$, WEZ-Daten, Mittelwertkurven.

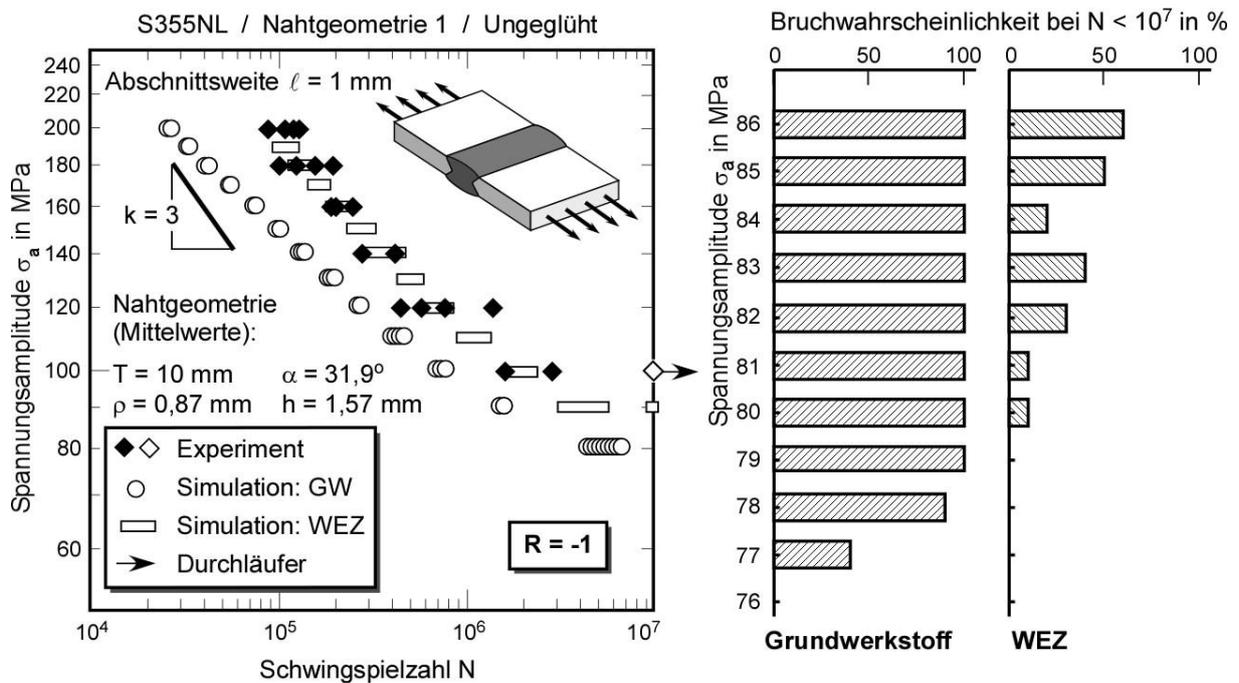


Bild 77: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $l = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = -1$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

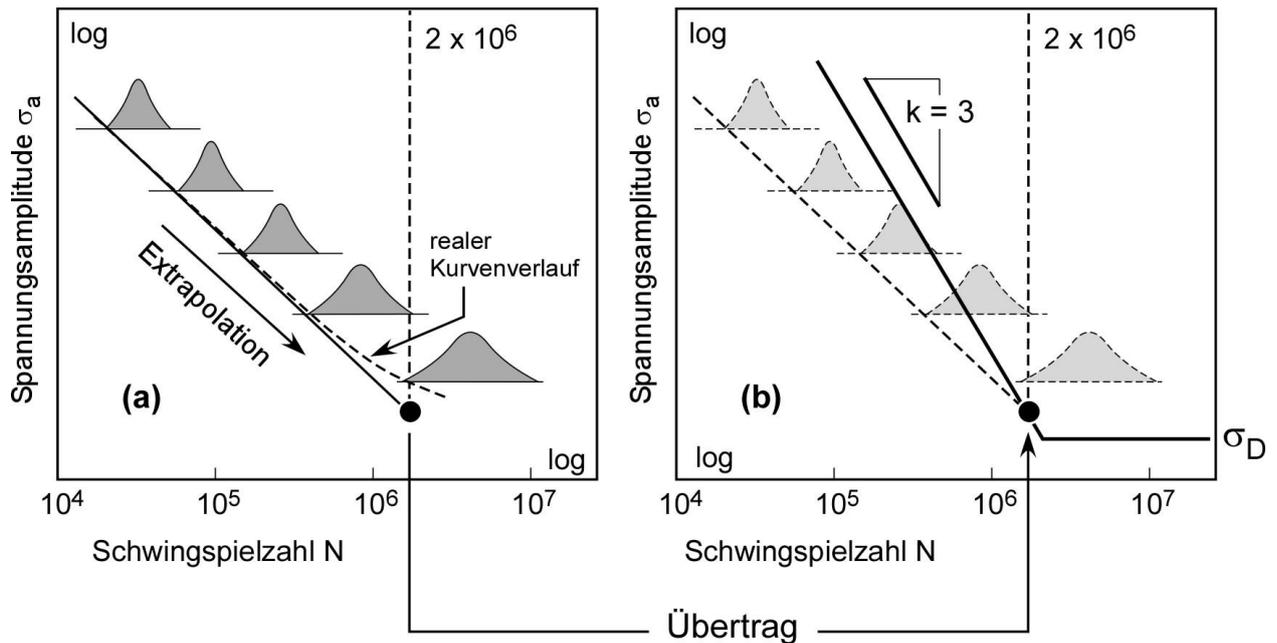


Bild 78: Prinzip der in diesem Abschnitt vorgeschlagenen unteren *Analyse-Ebene* von IBESS auf der Basis von Grundwerkstoffdaten; (a) Abschätzung des Spannungsniveaus bei $N = 2 \cdot 10^6$; (b) „Konstruktion“ des Zeitfestigkeitsastes. Die Dauerfestigkeit wird als Untergrenze bei Annahme von Grundwerkstoffdaten gemäß Bild 25 bestimmt.

Die Anwendung dieses Prinzips wird in **Bild 79** demonstriert, wo neben dem Ergebnis für die Abschnittsweite $\ell = 1$ mm zusätzlich das für $\ell = 3,13$ mm eingetragen ist. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass die erste der beiden Alternativen eine zufriedenstellende Beschreibung des Zeitfestigkeitsastes liefert.

Im Folgenden soll die skizzierte Vorgehensweise als Arbeitshypothese betrachtet und einer eingehenden Diskussion unterzogen werden. Hintergrund bilden insgesamt 33 experimentelle Wöhlerkurven aus den zwei bzw. drei untersuchten Stählen, den drei Schweißverbindungsformen mit jeweils zwei Nahtausführungen bzw. Schweißverfahren im ungeglühten und spannungsarmgeglühten Zustand sowie unterschiedlichen Spannungsverhältnissen R zwischen -1 und $+0,5$.

Die Methode zur Ermittlung der Dauerfestigkeit kann, wie erwähnt, im vorliegenden Projekt nicht validiert werden, da sie ursprünglich nicht vorgesehen war. Eine erste Diskussion bietet jedoch Abschnitt 4.5.

Aufgrund der begrenzten experimentellen Datenbasis der Wöhlerkurven (es werden, wie erwähnt, nur solche Punkte berücksichtigt, bei denen der Riss an den Stellen entstanden ist, für die die Rechnungen durchgeführt werden) erscheint eine mathematisch-statistische Auswertung in vielen Fällen nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird der Vergleich des berechneten und experimentell ermittelten Zeitfestigkeitsastes jeweils per Auge bei einer Schwingspielzahl $N = 5 \cdot 10^5$ durchgeführt. Das Prinzip verdeutlicht **Bild 80**. Es muss betont werden, dass auf diese Weise nur eine sehr grobe quantitative Aussage möglich ist, was aber als hinreichend angesehen wird, um die Trends zu beschreiben.

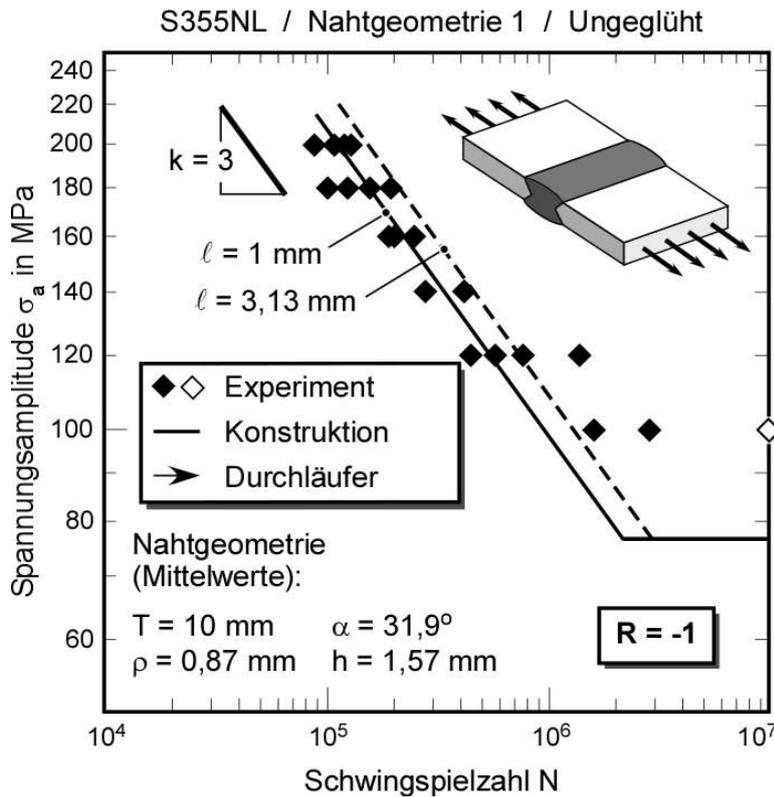


Bild 79:

IBESS-Analyse.
 Vorgeschlagene untere
 Analyse-Ebene nach
 Bild 76.

S355NL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = -1$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$
 und $3,13 \text{ mm}$.

Vergleich mit experi-
 mentellen Daten (aus
 IBESS-Teilprojekt A1).

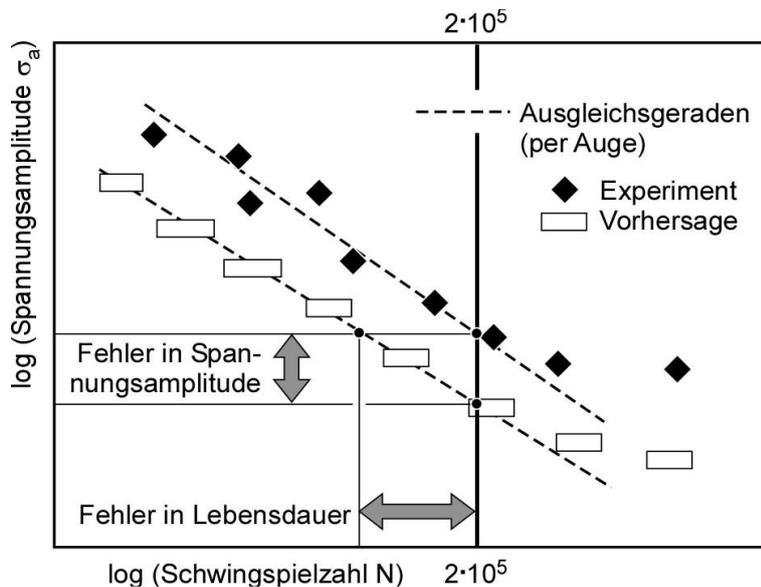


Bild 80: Grobe Abschätzung
 der Fehler der IBESS-Vorher-
 sagen auf den Ebenen der
 Lebensdauer und der Span-
 nungsamplitude, schematisch.

Bevor alle Datensätze nach diesem Schema ausgewertet werden, sollen für das in diesem Abschnitt untersuchte Beispiel noch Parametervariationen hinsichtlich der Eingangsgrößen Nahtübergangsradius ρ (**Bild 81**), Nahtanstiegswinkel α (**Bild 82**), Nahtüberhöhung h (**Bild 83**) und Sekundärkerbtiefe k (**Bild 84**) vorgenommen werden. Sie wurden jeweils für Grundwerkstoff- und WEZ-Daten durchgeführt. Abschnittsweite war jeweils $\ell = 1 \text{ mm}$. Die Rechnungen wurden in Zusammenarbeit mit *IBESS-Teilprojekt A1* ausgeführt. Zwei Trends springen ins Auge:

(a) Die Effekte der jeweiligen Eingangsparameter sind bei geringeren Spannungsamplituden (in Richtung Dauerfestigkeit) ausgeprägter als im oberen Bereich des Zeitfestigkeitsastes. Eine

Ausnahme bildet evtl. die Nahtüberhöhung h , wobei jedoch zu beachten ist, dass sich dieser Geometrieparameter nicht wirklich getrennt vom Nahtanstiegswinkel betrachten lässt.

(b) Eine zweite Beobachtung betrifft den Unterschied zwischen Grundwerkstoff und WEZ-Gefüge. Insbesondere die Sekundärkerbtiefe aber auch der Nahtanstiegswinkel beeinflusst die Schwingfestigkeit bei angenommenem WEZ-Werkstoff stärker als bei angenommenem Grundwerkstoff. Das muss so sein, Stichwort: Kerbempfindlichkeit der Schwingfestigkeit. So lässt sich auf der Grundlage der FKM-Richtlinie [103] der Einfluss der Rauigkeitstiefe (gemäß IBESS-Nomenklatur: der Sekundärkerbtiefe) auf die Dauerfestigkeit von Stahl wie in **Bild 85** (vgl. a. [49]) gezeigt wiedergeben. Erkennbar ist, dass der Effekt mit höherer Zugfestigkeit des Werkstoffs zunimmt, und die war bei der Wärmeeinflusszone des S355NL im für die Rechnung relevanten Abschnitt (Decklage 2) je nach Nahtbereich um 60 bis 90% höher als die des Grundwerkstoffs (Bild 31).

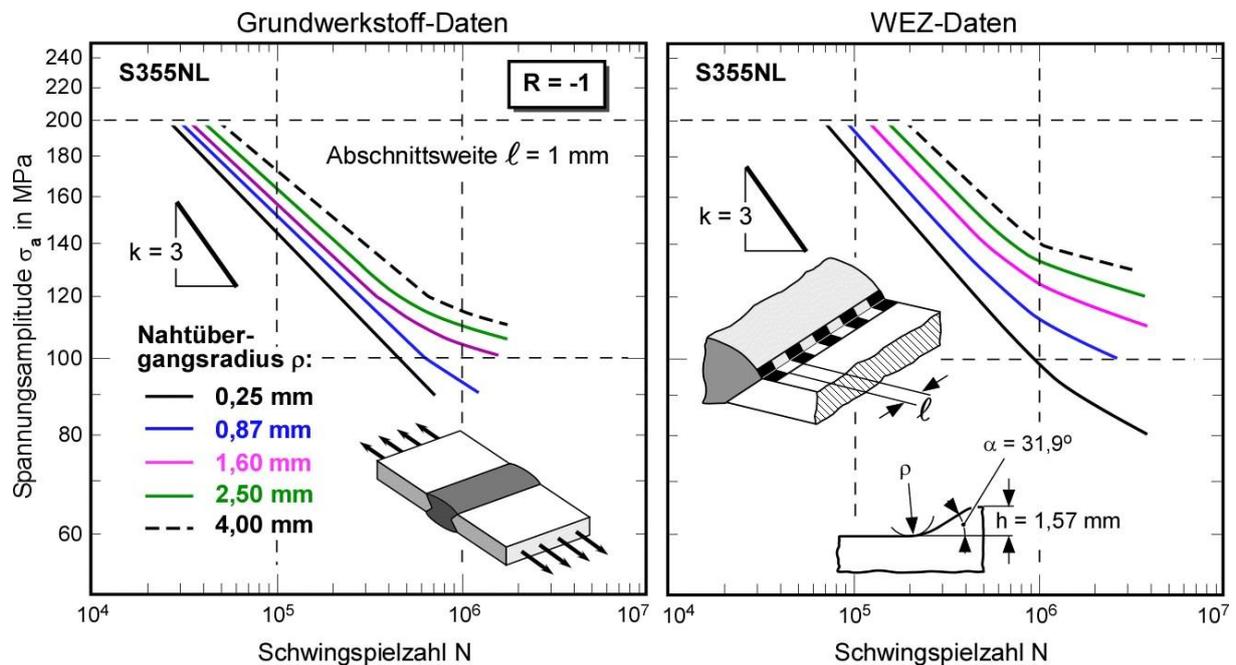


Bild 81: Parameterstudie zum Einfluss des Nahtübergangsradius ρ im IBESS-Modell; S355NL, (links: Grundwerkstoff; rechts: WEZ), Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, Ungeglüht, $R = -1$; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; *IBESS-Teilprojekt A1*.

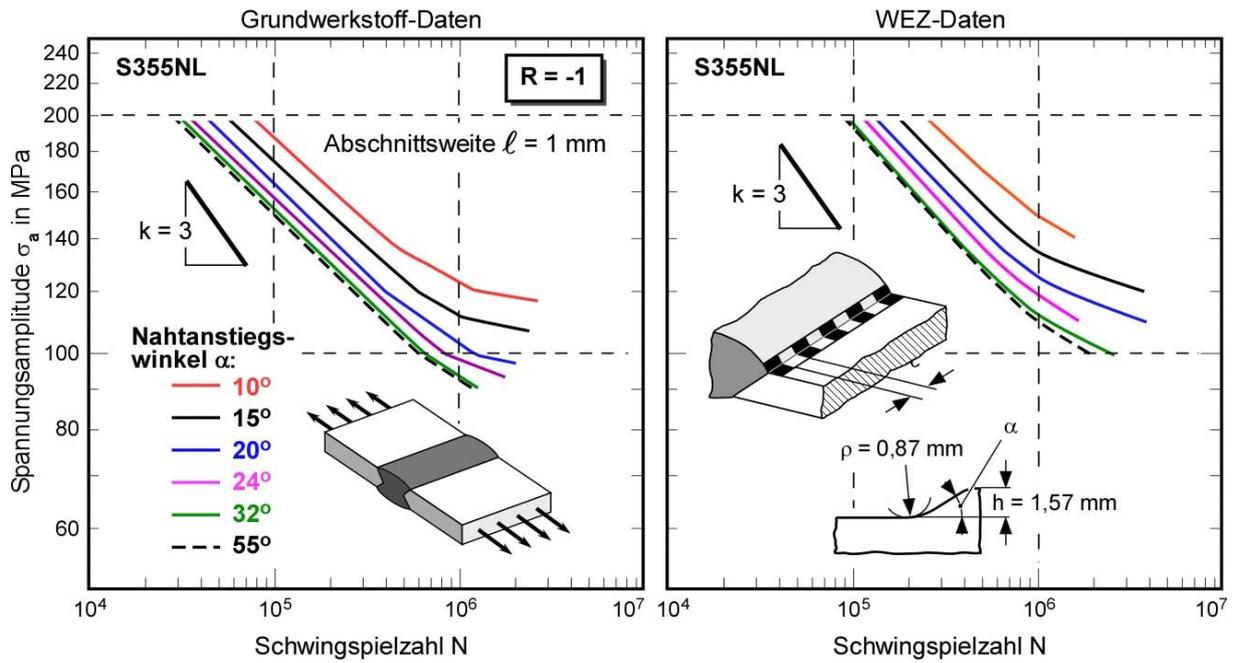


Bild 82: Parameterstudie zum Einfluss des Nahtanstiegs winkels α im IBESS-Modell; S355NL, (links: Grundwerkstoff; rechts: WEZ), Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, Ungeglüht, $R = -1$; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; IBESS-Teilprojekt A1.

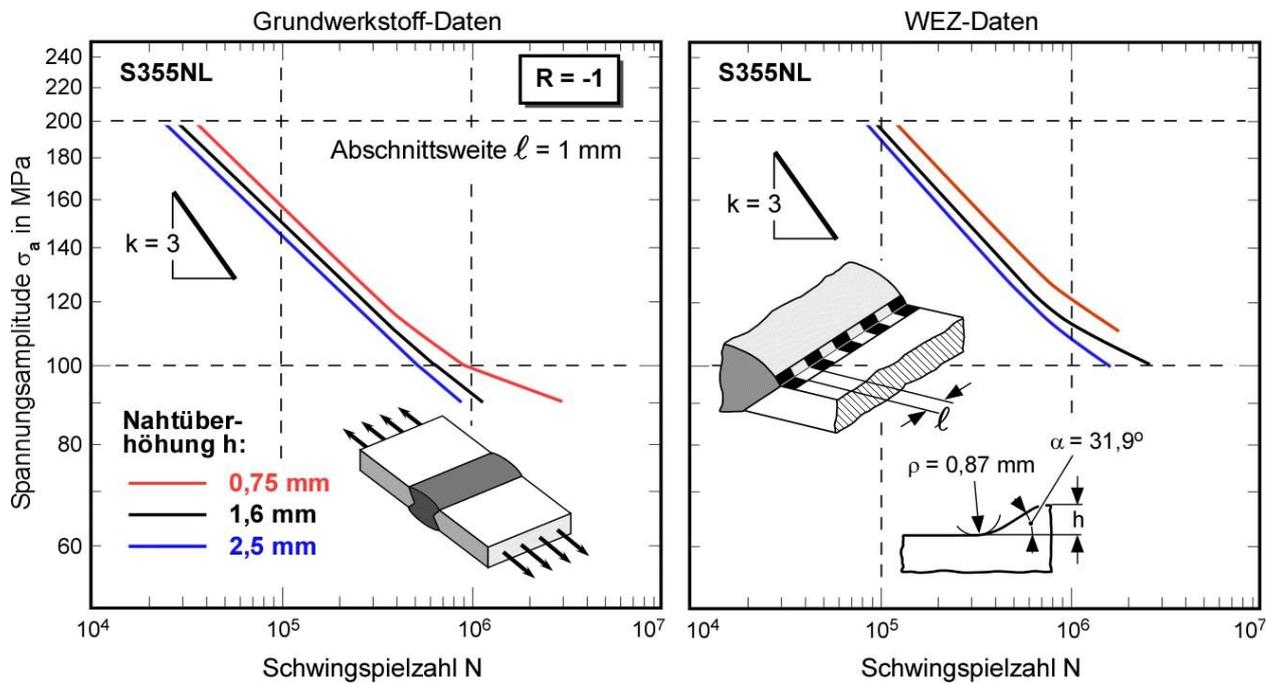


Bild 83: Parameterstudie zum Einfluss der Nahtüberhöhung h im IBESS-Modell; S355NL, (links: Grundwerkstoff; rechts: WEZ), Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, Ungeglüht, $R = -1$; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; IBESS-Teilprojekt A1.

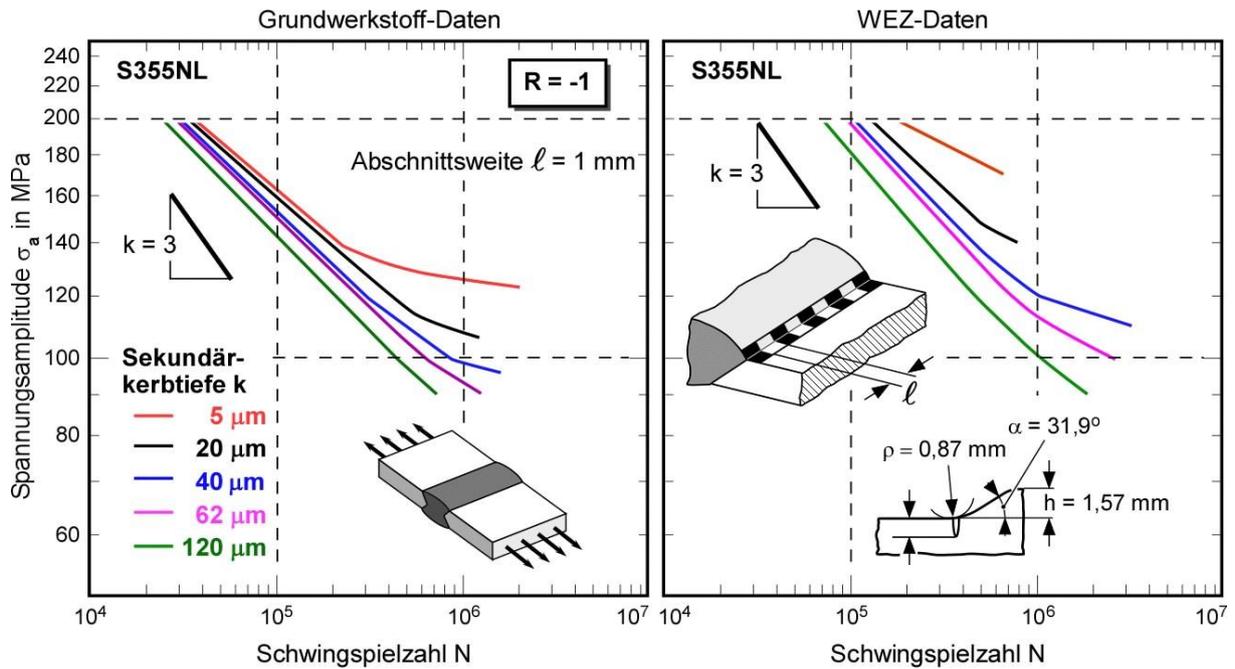


Bild 84: Parameterstudie zum Einfluss der Sekundärkerbtiefe k im IBESS-Modell; S355NL, (links: Grundwerkstoff; rechts: WEZ), Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, Ungeglüht, $R = -1$; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; *IBESS-Teilprojekt A1*.

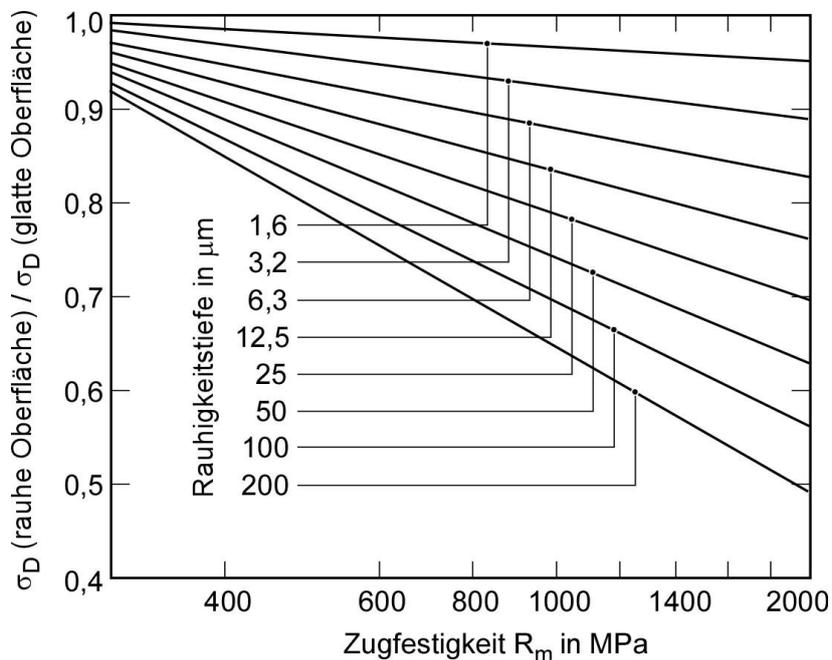


Bild 85: Abschätzung des Einflusses von Rauigkeitstiefe und Zugfestigkeit auf die Dauerfestigkeit von Stahl nach FKM-Richtlinie [103], s.a. [49].

4.3.2 Validierung an Stumpfstößen

4.3.2.1 S355NL-Verbindungen

Nachfolgend wird das IBESS-Verfahren einschließlich der in Abschnitt 4.3.1 eingeführten unteren Analyse-Ebene für Grundwerkstoffdaten auf Stumpfstöße aus S355NL angewendet und sechs experimentellen Datensätzen gegenübergestellt:

♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = -1 (bereits in Abschnitt 4.3.1 eingeführt)
♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht	R = -1
♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 2 / Ungeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 2 / Spannungsarmgeglüht	R = 0

Die Rechnungen wurden ohne Berücksichtigung von Schweißeigenspannungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 77, 86, 88, 90, 92** und **94** für die obere und in den Bildern **78, 87, 89, 91, 93** und **95** für die untere Analyse-Ebene wiedergegeben.

(a) Obere Analyse-Ebene: IBESS-Rechnung auf der Grundlage der WEZ-Daten

Die beiden Analysen bei $R = -1$ erbrachten im Vergleich zu den Experimenten nahezu perfekte Ergebnisse, während die vier Vorhersagen bei $R = 0$ konservative Ergebnisse lieferten, und zwar um einen Faktor von ca. 2,1 - 2,8 auf der Ebene der Lebensdauer und um ca. 18 -28% auf der Ebene der Spannungsamplitude. Hinsichtlich der beiden Nahtgeometrien wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt, ebenso nicht hinsichtlich des ungeglühten und geglühten Zustands.

(b) Untere Analyse-Ebene: IBESS-Abschätzung auf der Grundlage von Grundwerkstoffdaten

Auch auf dieser Analyse-Ebene wurde für die beiden bei $R = -1$ aufgenommenen Datensätze nahezu perfekte Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung festgestellt. Die Konservativität bei $R = 0$ bewegte sich bei Nahtgeometrie 1 in der Größenordnung von Faktor 2,4 – 2,8 auf der Ebene der Lebensdauer und 35 – 38% auf der Ebene der Spannungsamplitude. Geringere Werte wurden für Nahtgeometrie 2 festgestellt, nämlich von Faktor 1,5 – 1,7 auf der Ebene der Lebensdauer und 15 – 19% auf der Ebene der Spannungsamplitude.

Die Ergebnisse bestätigen insgesamt die oben im Zusammenhang mit den Eigenspannungen erwarteten Trends. Danach sollte die Analyse bei $R = -1$ aufgrund der vorausgegangenen Eigenspannungsrelaxation im Bereich des Nahtübergangs befriedigende Ergebnisse liefern, während die Analysen für nominell $R = 0$ für dieselbe Annahme konservativ sein sollten. Beides ist der Fall. Gehen wir aufgrund der Information über den Aufbau von Druckeigenspannungen (Bilder 69 und 69) davon aus, dass das reale R-Verhältnis in diesen Proben deutlich geringer ist als 0 und dass Mittelspannungskorrekturen etwa nach IIW [39] eine untere Kappungsgrenze bei $R = -1$ aufweisen, so sollte eine Berechnung für real $R = -1$ anstelle nominell $R = 0$ in die richtige Richtung weisen. Das ist in den **Bildern 96** und **97** für den ungeglühten und den spannungsarmgeglühten Zustand von Proben der Nahtgeometrie 1 dargestellt. Bedenkt man die Unsicherheiten hinsichtlich der Wahl der Abschnittsweite ℓ (Bild 76), so erscheinen die Ergebnisse ungeachtet der groben Annahme in beiden Fällen bei den höheren Lastniveaus (oberhalb einer

Spannungsamplitude von ca. 150 MPa) akzeptabel. Allerdings deutet sich bei den niedrigeren Lastniveaus eine Überschätzung der Lebensdauer an. Für diesem Bereich kann vermutet werden, dass ist der Betrag der Transformation der Eigenspannungen aufgrund der geringeren plastischen Deformation im Kerbgrund geringer ausfällt, so dass die Annahme von $R = -1$ nicht-konservativ wird.

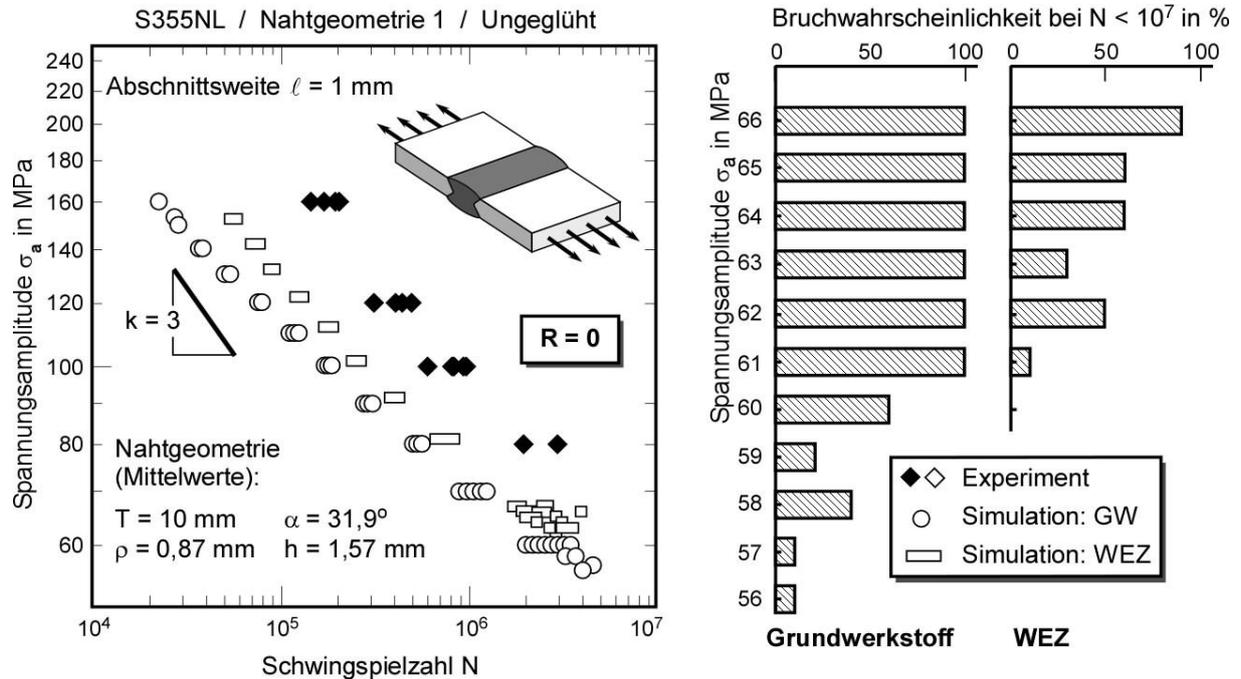


Bild 86: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

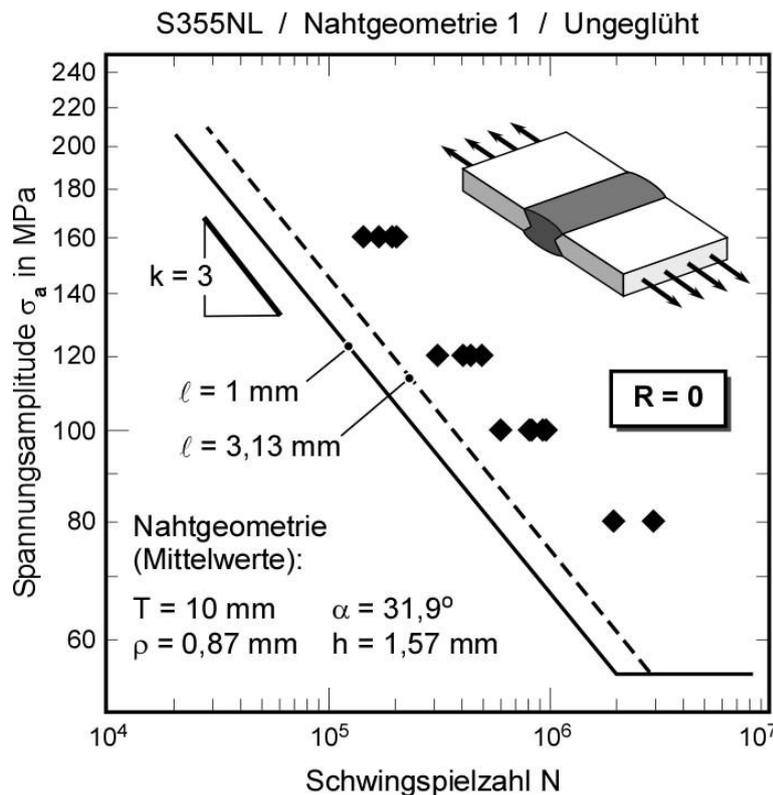


Bild 87:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$
 und $3,13 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*).

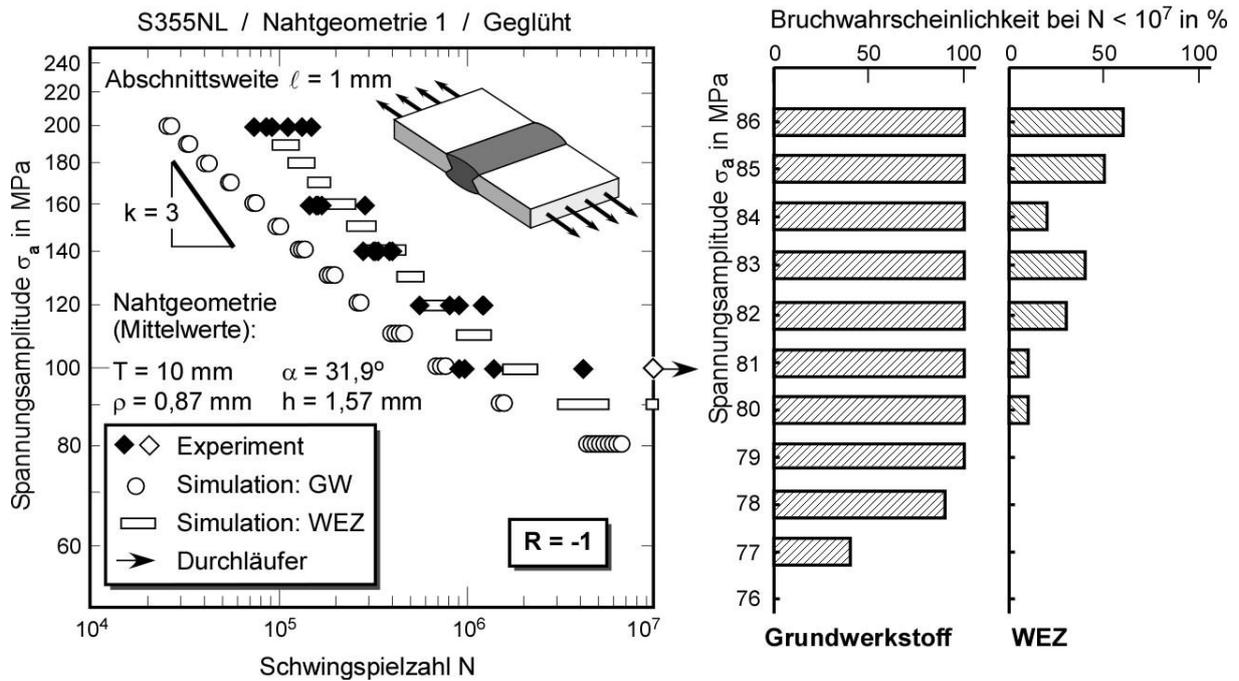


Bild 88: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, geglüht, $R = -1$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

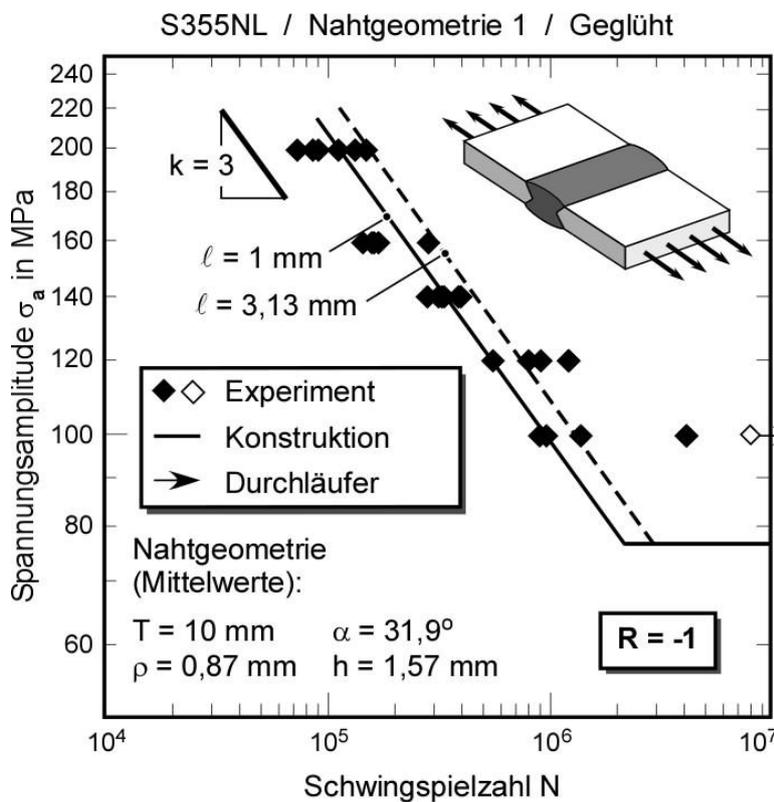


Bild 89:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Geglüht
 $R = -1$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$
 und $3,13 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*).

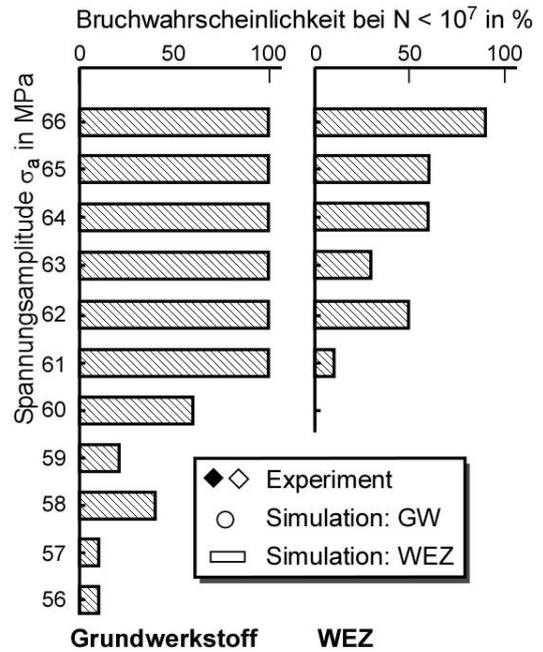
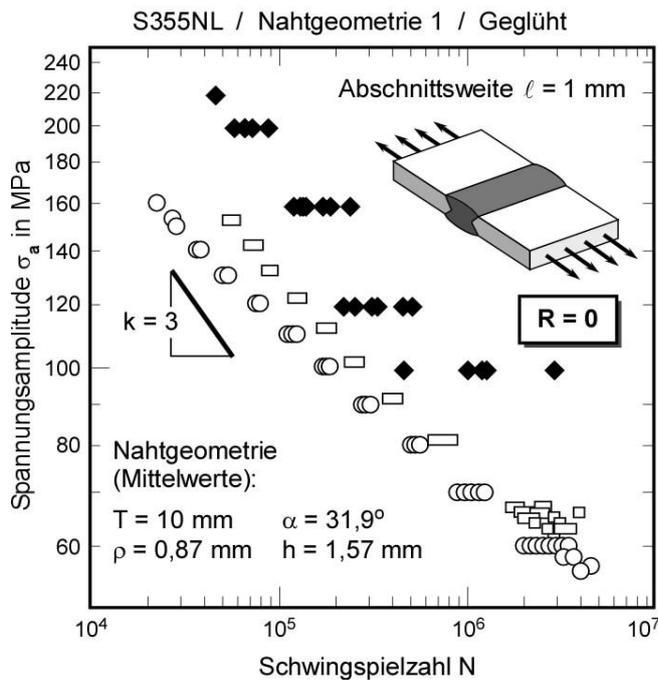


Bild 90: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, geglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

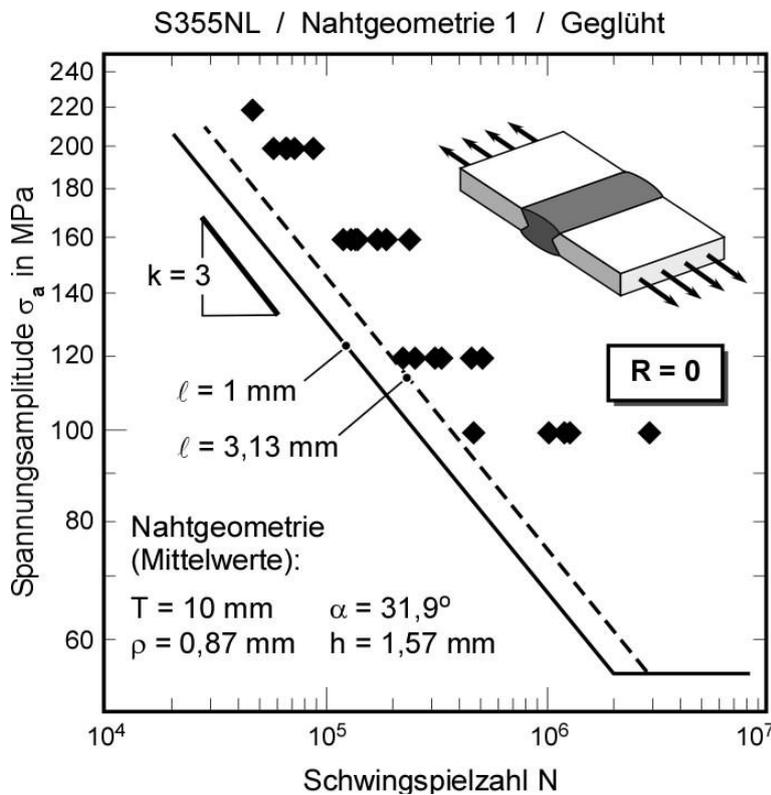


Bild 91:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
Stumpfstoß,
Nahtgeometrie 1,
Geglüht
 $R = 0$
Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$
und $3,13 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*).

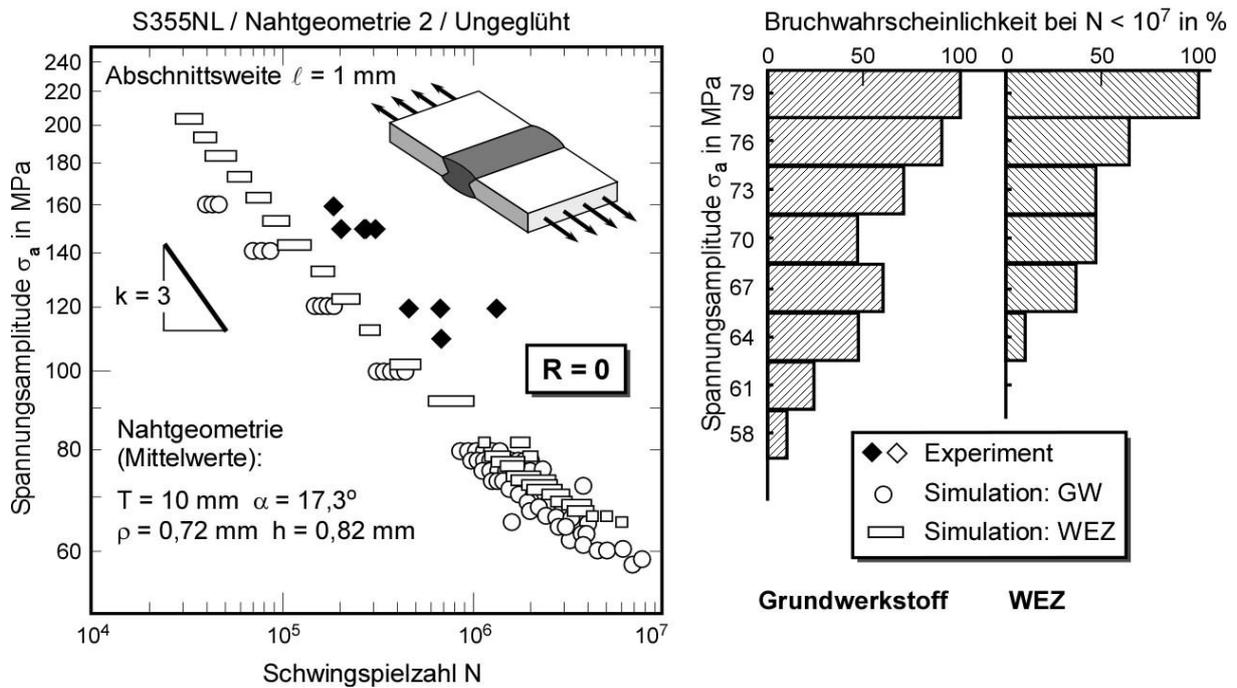


Bild 92: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A3*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 2, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

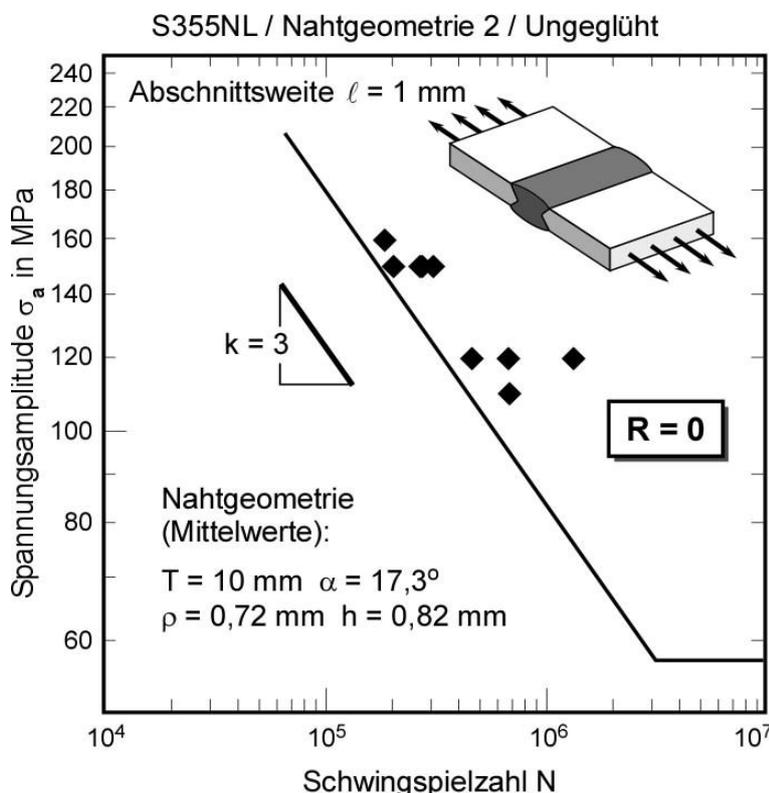


Bild 93:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 2,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A3*).

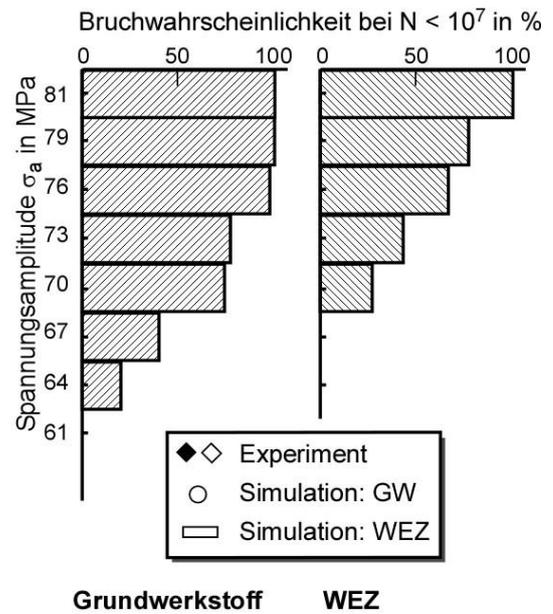
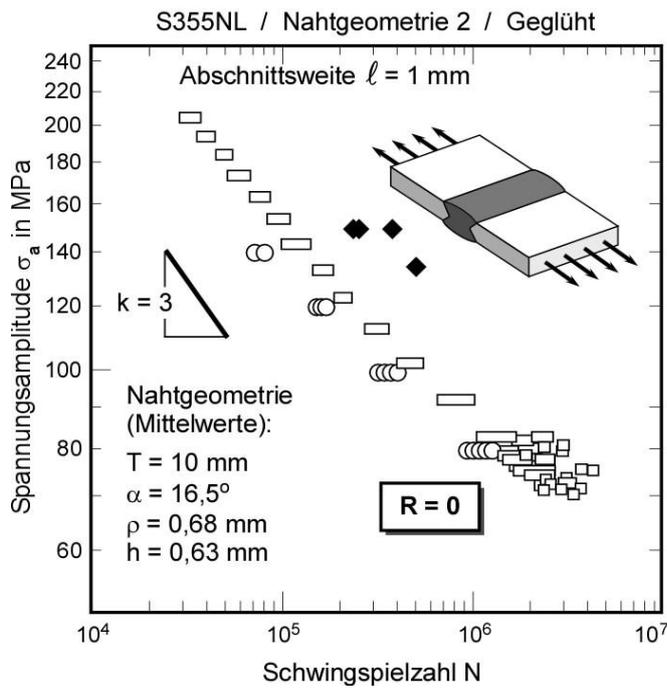


Bild 94: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A3*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 2, geglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

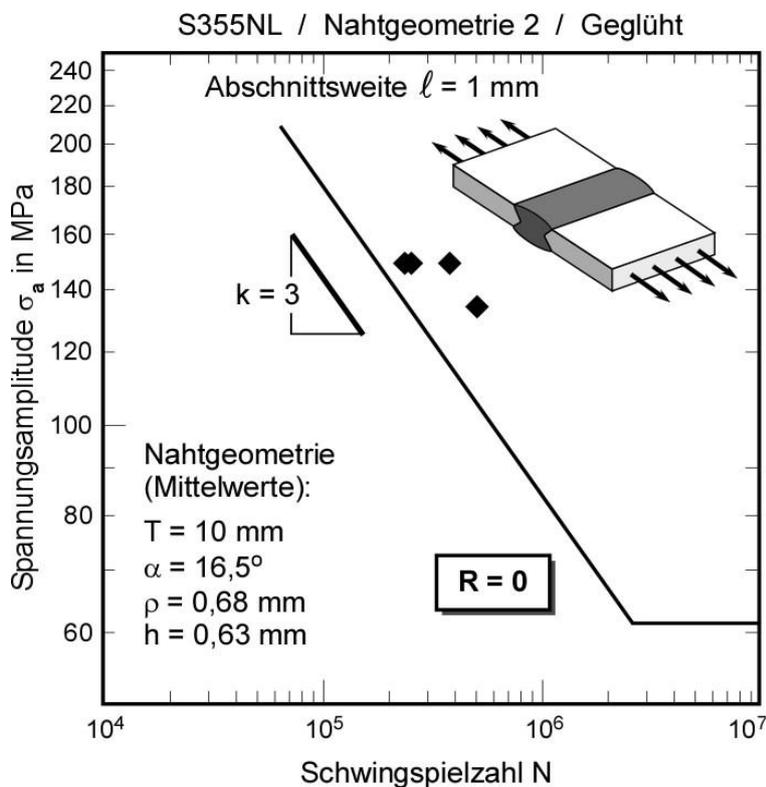


Bild 95:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 2,
 Geglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A3*).

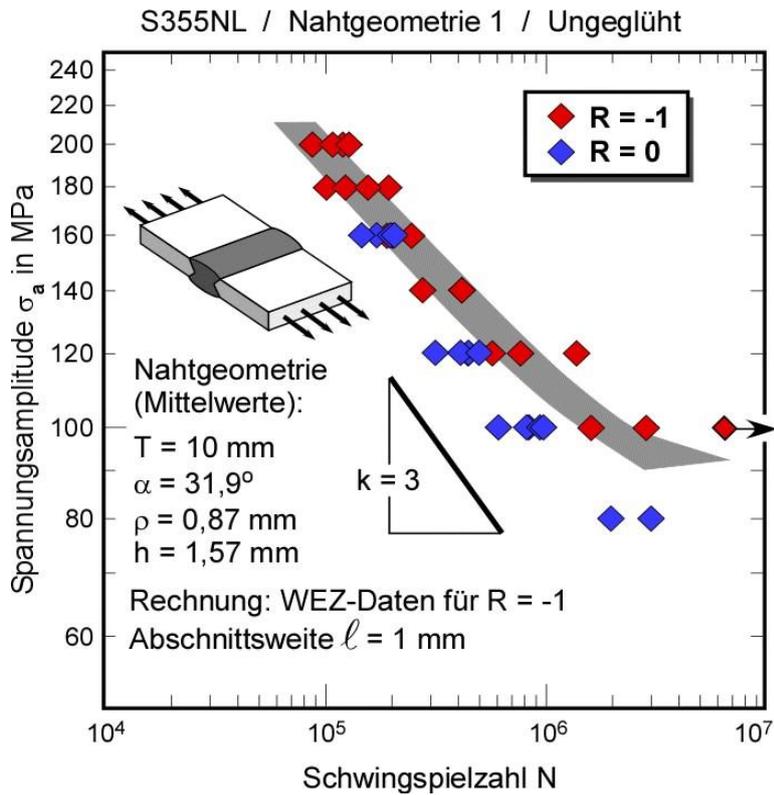


Bild 96: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus den *IBESS-Teilprojekten G1* und *A3*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0$ und 1 , WEZ-Daten.

Die Analyse wurde für $R = -1$ durchgeführt, da das nominelle R -Verhältnis des $R = 0$ -Datensatzes aufgrund von Druckeigenstress gegenüber dem realen R zu hoch ist.

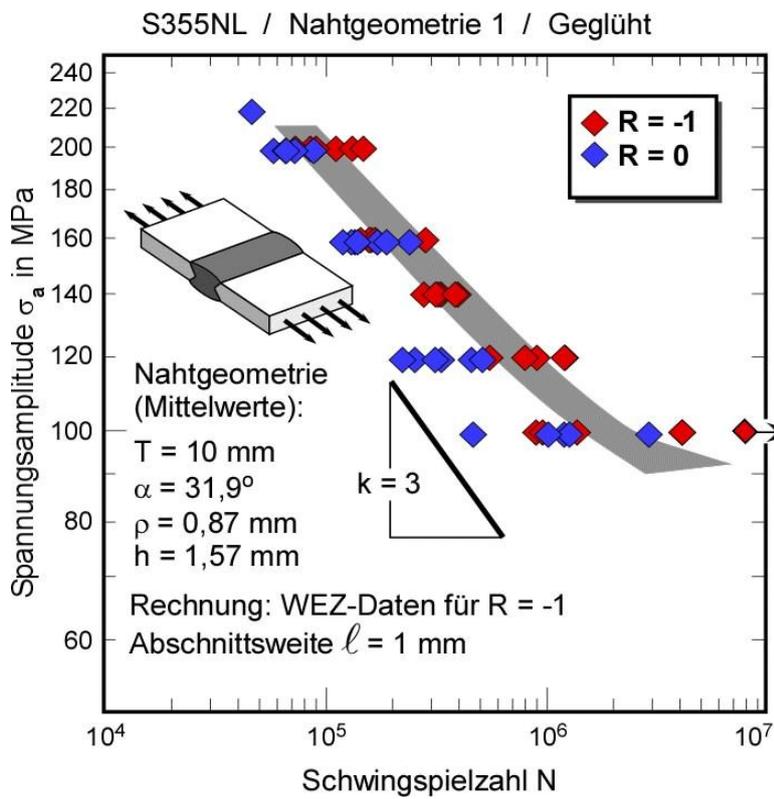


Bild 97: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus den *IBESS-Teilprojekten G1* und *A3*); S355NL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, Geglüht, $R = 0$ und 1 , WEZ-Daten.

Die Analyse wurde für $R = -1$ durchgeführt, da das nominelle R -Verhältnis des $R = 0$ -Datensatzes aufgrund von Druckeigenstress gegenüber dem realen R zu hoch ist.

4.3.2.2 S355J2+N-Verbindungen

Zwei Datensätze wurden ausgewertet, und zwar

- ◆ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht R = 0
- ◆ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht R = 0,5

Auch in diesen Fällen wurden die Rechnungen ohne Berücksichtigung von Schweißspannungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 98** und **100** für die obere und in den Bildern **99** und **101** für die untere Analyse-Ebene wiedergegeben. Beide erbrachten befriedigende Beschreibungen der experimentellen Kurven, wobei die Rechnungen für den R = 0 - Datensatz geringfügig konservativ sein könnten. „Könnten“ deshalb, weil die Wahl der Abschnittsweite ℓ gemäß der Erkenntnisse von Bild 76 eine gewisse Unsicherheit mit sich bringt, und weil die Datensätze jeweils aus nur wenigen „gültigen“ Datenpunkten mit einer vergleichsweise großen Streuung bestehen. **Bild 102** zeigt, dass die experimentellen Daten für R = 0 und R = 0,5 in ein gemeinsames Streuband fallen. Die Rechnungen wurden mit Grundwerkstoff- und WEZ-Daten durchgeführt. Im Unterschied zu den übrigen Datensätzen weisen die Schweißnähte der hier betrachteten 3-mm-Bleche aufgrund des geringeren Wärmeeintrags vergleichsweise schmale Wärmeeinflusszonen auf (Bild 51), weshalb der Riss schon frühzeitig in den Grundwerkstoff hineinwächst. Die Konsequenz ist, dass bei Anwendung von Grundwerkstoffdaten verlässlichere Ergebnisse zu erwarten sind als bei den übrigen Konfigurationen aus S355. Das wird durch die Bilder bestätigt.

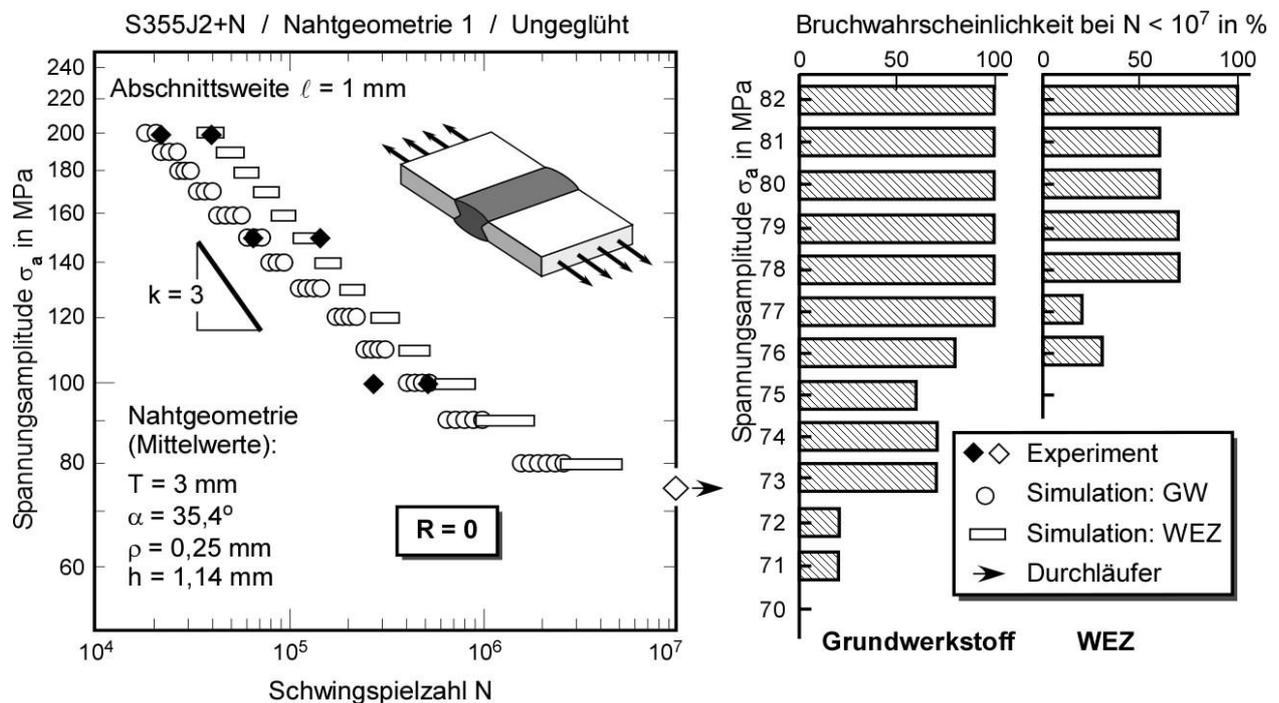


Bild 98: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A3*); S355J2+N, Stumpfstoß (3mm-Blech), Nahtgeometrie 1, ungeglüht, R = 0, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

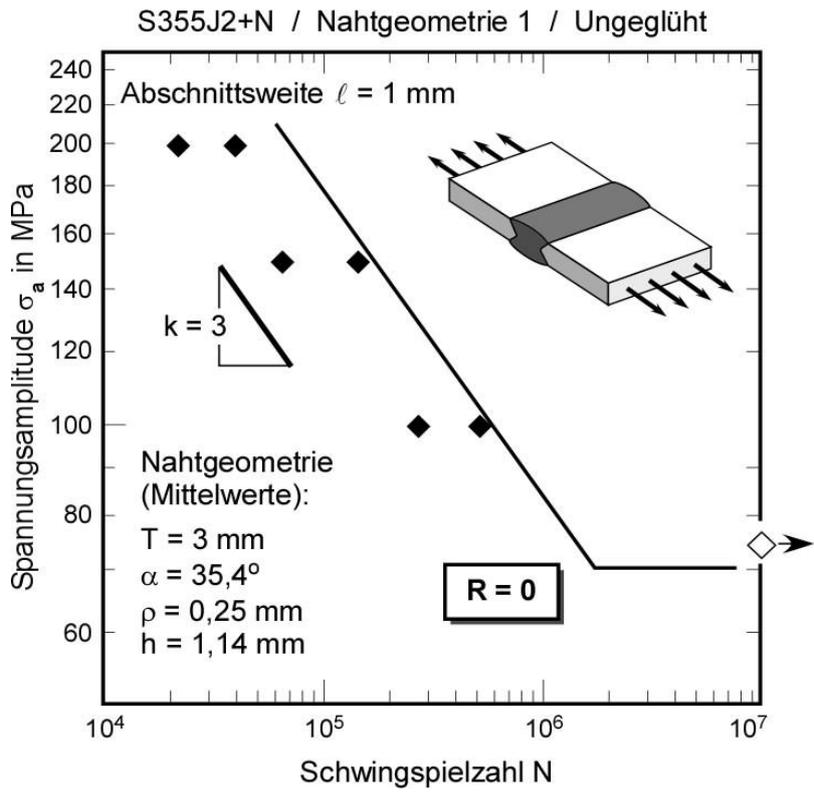


Bild 99:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355J2+N,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus IBESS-Teilprojekt A3).

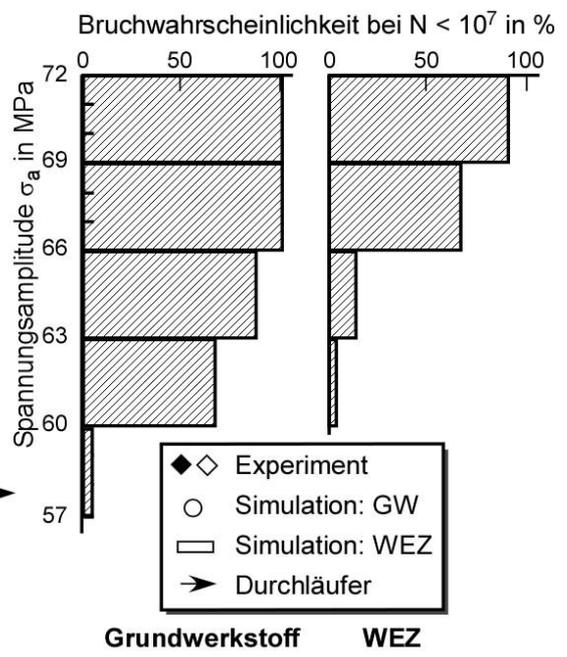
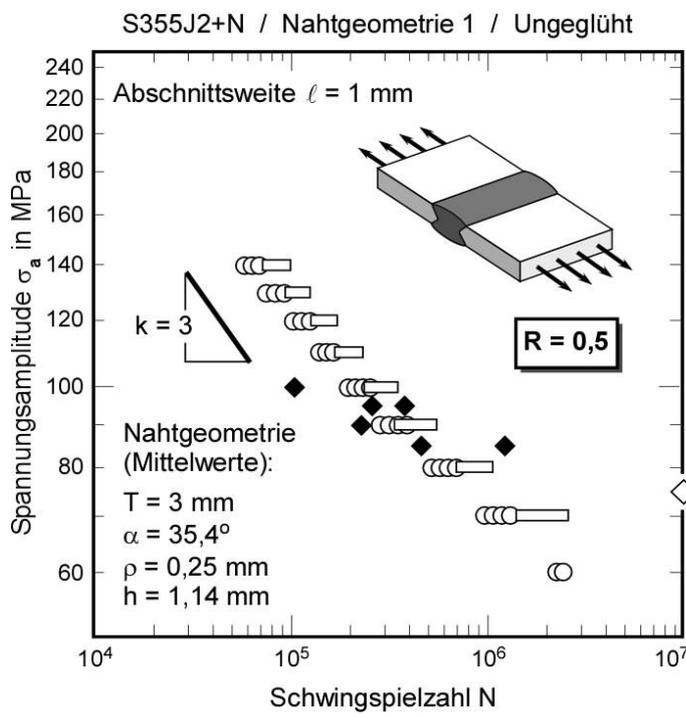


Bild 100: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus IBESS-Teilprojekt A3); S355J2+N, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0,5$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

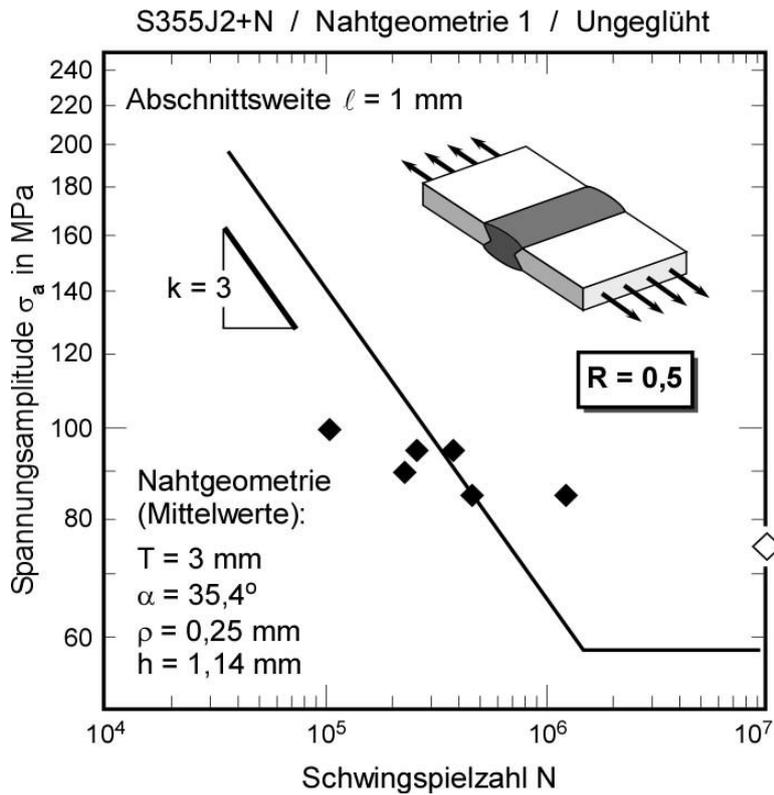


Bild 101:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355J2+N,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0,5$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A3*).

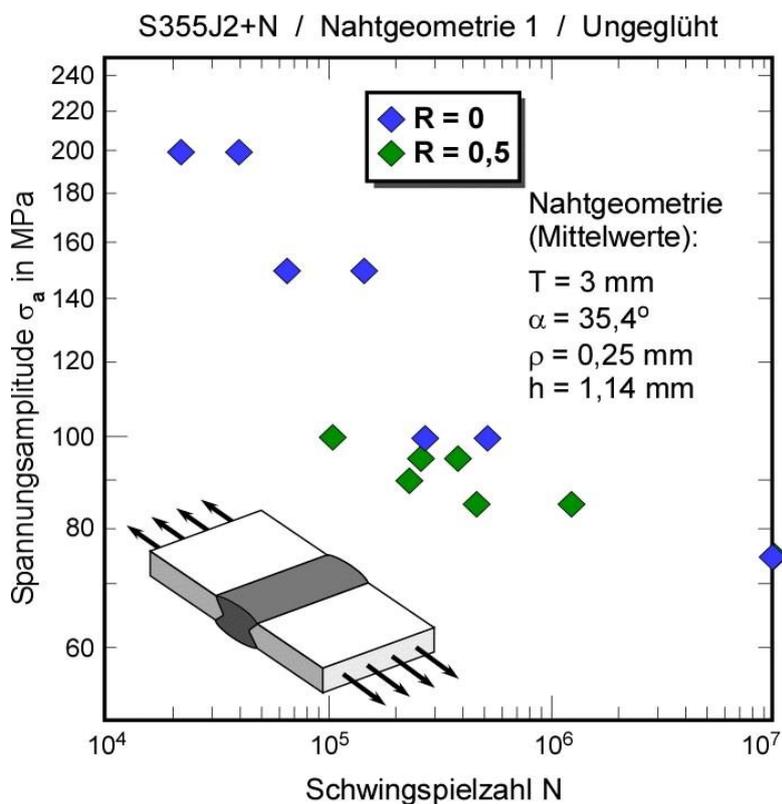


Bild 102:

Schwingfestigkeitsdaten des S355J2+N; Stumpfstoße; Plattendicke: 10mm. Ungeglüht
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich der Ergebnisse bei $R = 0$ und $0,5$.

IBESS-Teilprojekt A3.

4.3.2.3 S960QL-Verbindungen

Insgesamt wurden 7 Wöhlerkurven nachgerechnet:

♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = -1
♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = 0,5
♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht	R = -1
♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 2 / Ungeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 2 / Spannungsarmgeglüht	R = 0

Die Ergebnisse sind in den **Bildern 103, 105, 107, 109, 111, 113** und **115** für die obere und in den **Bildern 104, 106, 108, 110, 112, 114** und **116** für die untere Analyse-Ebene wiedergegeben. Anders als im Fall des S355 lagen für den S960 keine vollständigen WEZ-Daten vor, so dass die Analysen durchweg mit Grundwerkstoffdaten durchgeführt wurden. Da der Stahl hochfest ist (zyklische 0,2-Dehngrenze des Grundwerkstoffs ca. 800 MPa; vgl. Bild 35), ist jedoch zu erwarten, dass Plastifizierungseffekte im Kerbgrund keine oder nur eine geringe Rolle spielen, weshalb auch kein signifikanter Effekt der zyklischen Belastung auf die Schweißseigenstressungen zu erwarten ist. Eigenstressungen wurden nicht berücksichtigt.

Ähnlich wie bei den Stumpfstoßen aus S355NL erbrachten die Analysen bei $R = -1$ im Vergleich zu den Experimenten eine gute Übereinstimmung. Das trifft auch auf den Datensatz bei $R = 0,5$ zu, während die Rechnungen bei $R = 0$ geringfügig zu konservativen Ergebnissen neigen. Die Abweichungen sind jedoch moderat und sehr viel geringer als bei den S355-Stumpfstoßen bei höheren R -Verhältnissen. Zudem sind sie vor dem Hintergrund der sehr großen Streuungen der experimentellen Kurven zu sehen. Die oben getroffenen Annahmen werden dadurch bestätigt. Dass, anders als beim S355NL offensichtlich auch keine signifikante Transformation der Eigenstressungen zu Druckeigenstressungen erfolgt ist, belegen die **Bilder 117** und **118**, die deutlich unterschiedliche Zeitfestigkeitsäste bei $R = -1$ und $R = 0$ aufweisen, wobei die $R = -1$ Kurven mit den höheren Schwingfestigkeiten korrespondieren. Dass schließlich die Eigenstressungen auch im Fall der Stumpfstoße aus S960QL keine dominierende Rolle spielen, belegen die **Bilder 119** und **120**, wo sich die Streubänder der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Proben überlappen. Allerdings grenzen die großen Streubänder die Aussagefähigkeit der empirischen Daten stark ein.

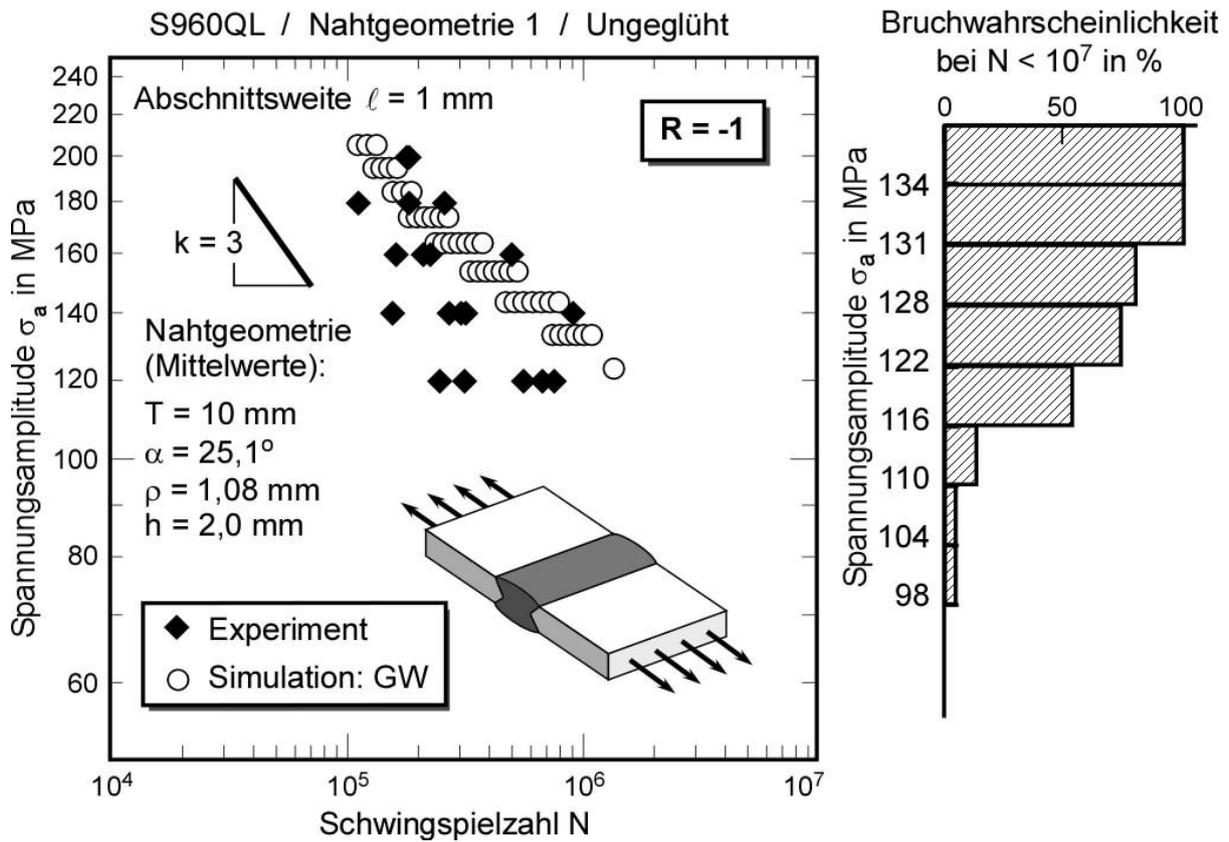


Bild 103: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = -1$, Grundwerkstoff -Daten.

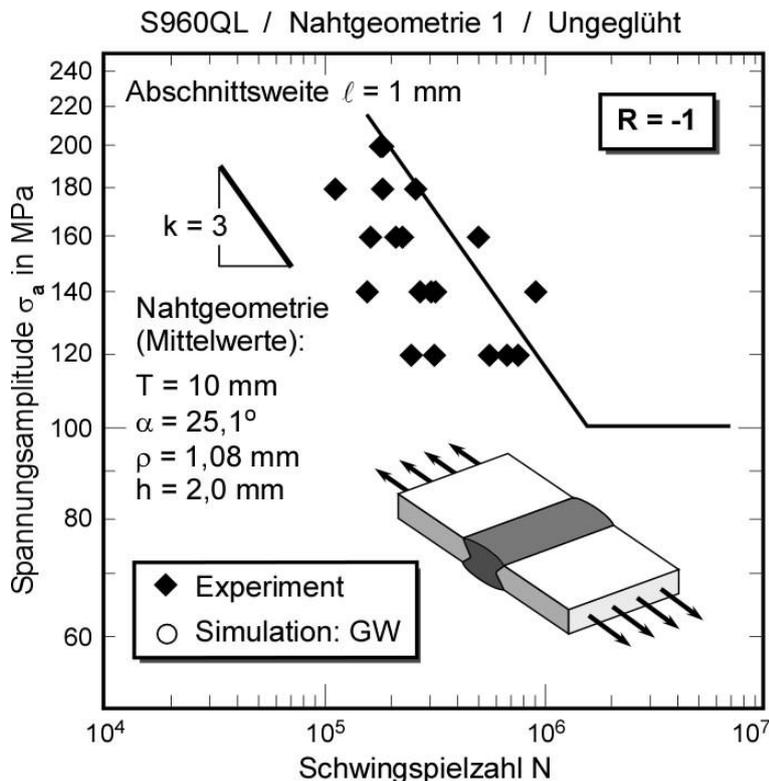


Bild 104:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
Stumpfstoß,
Nahtgeometrie 1,
Ungeglüht
 $R = -1$
Abschnittsweite $\ell = 1$ mm.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

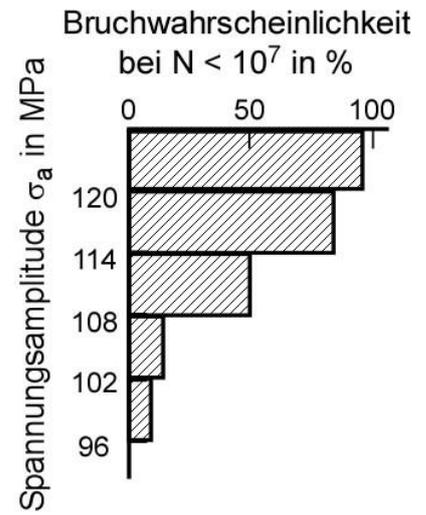
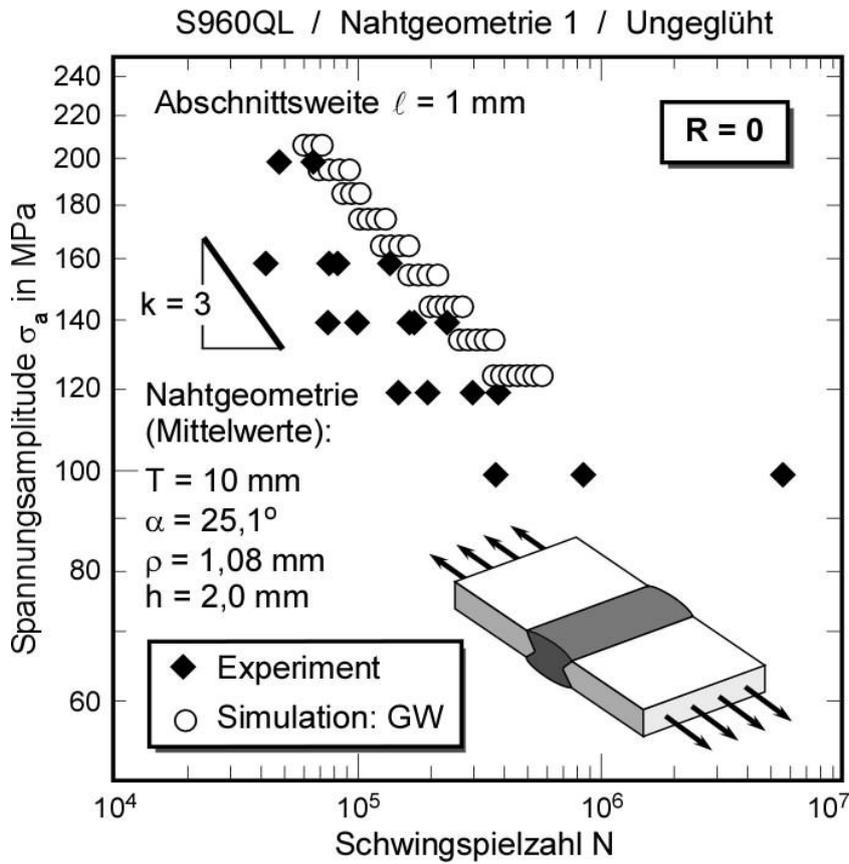


Bild 105: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff-Daten.

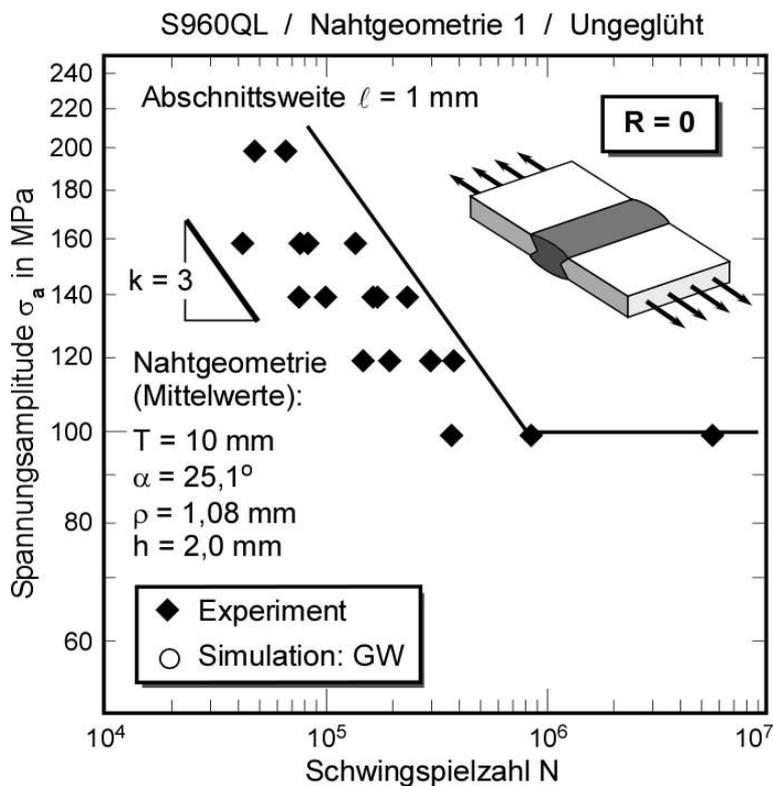


Bild 106:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

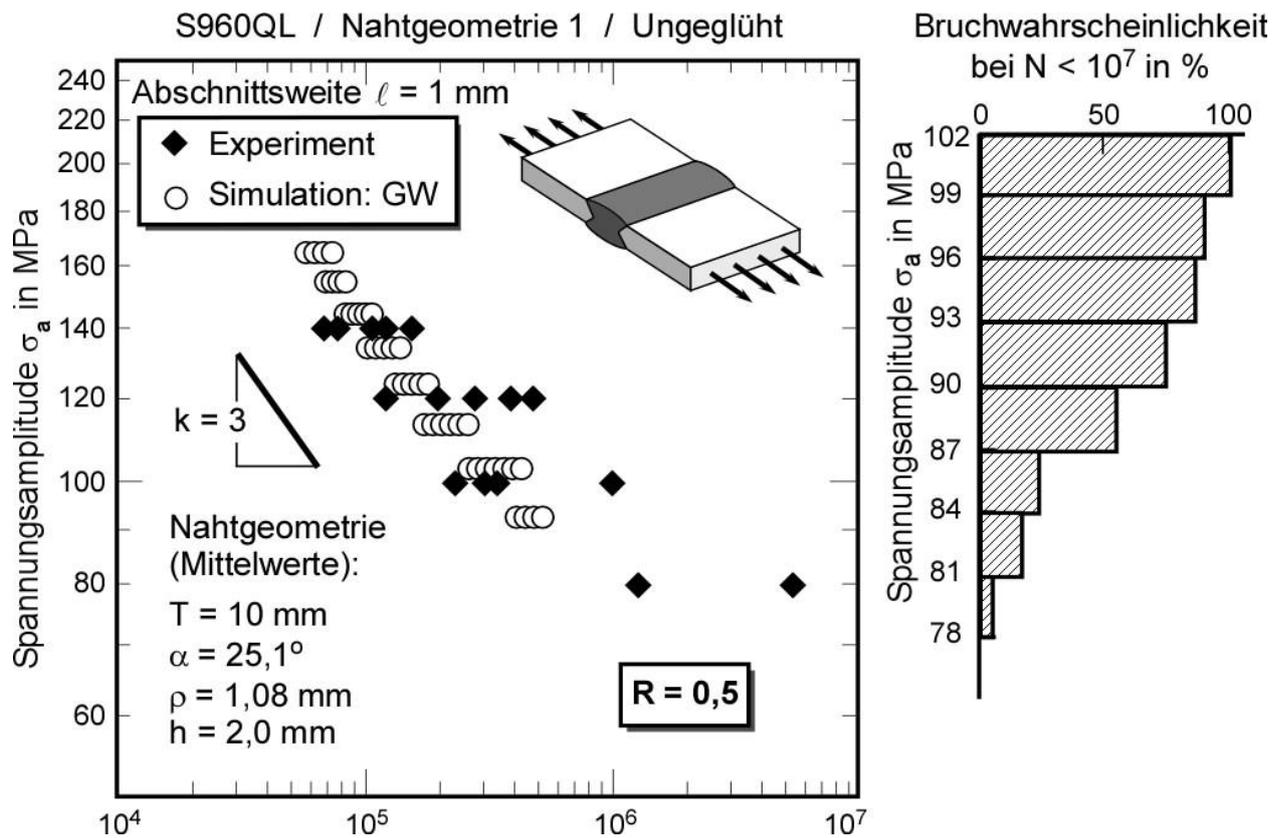


Bild 107: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, R = 0,5, Grundwerkstoff-Daten.

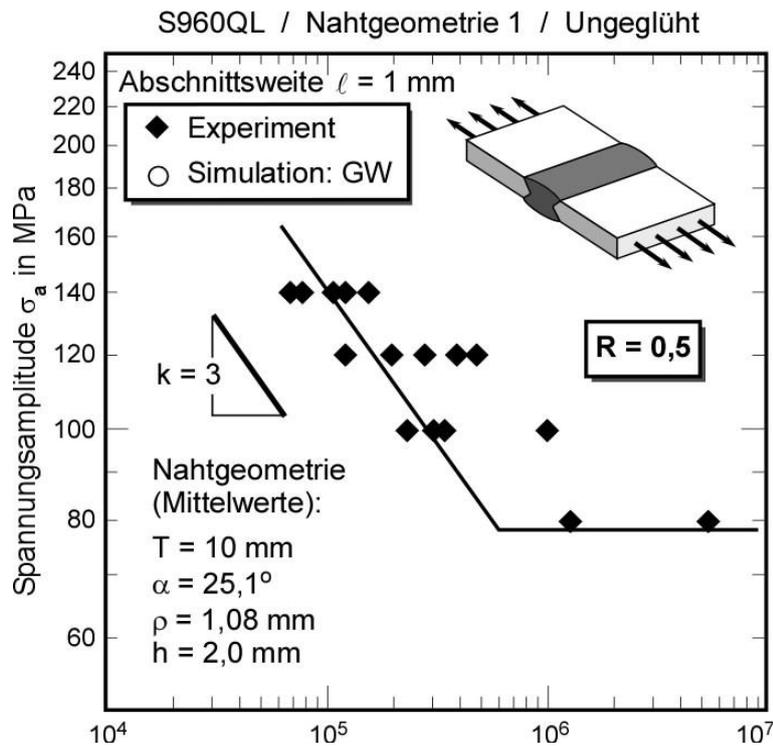


Bild 108:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
Stumpfstoß,
Nahtgeometrie 1,
Ungeglüht
R = 0,5
Abschnittsweite $\ell = 1$ mm.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

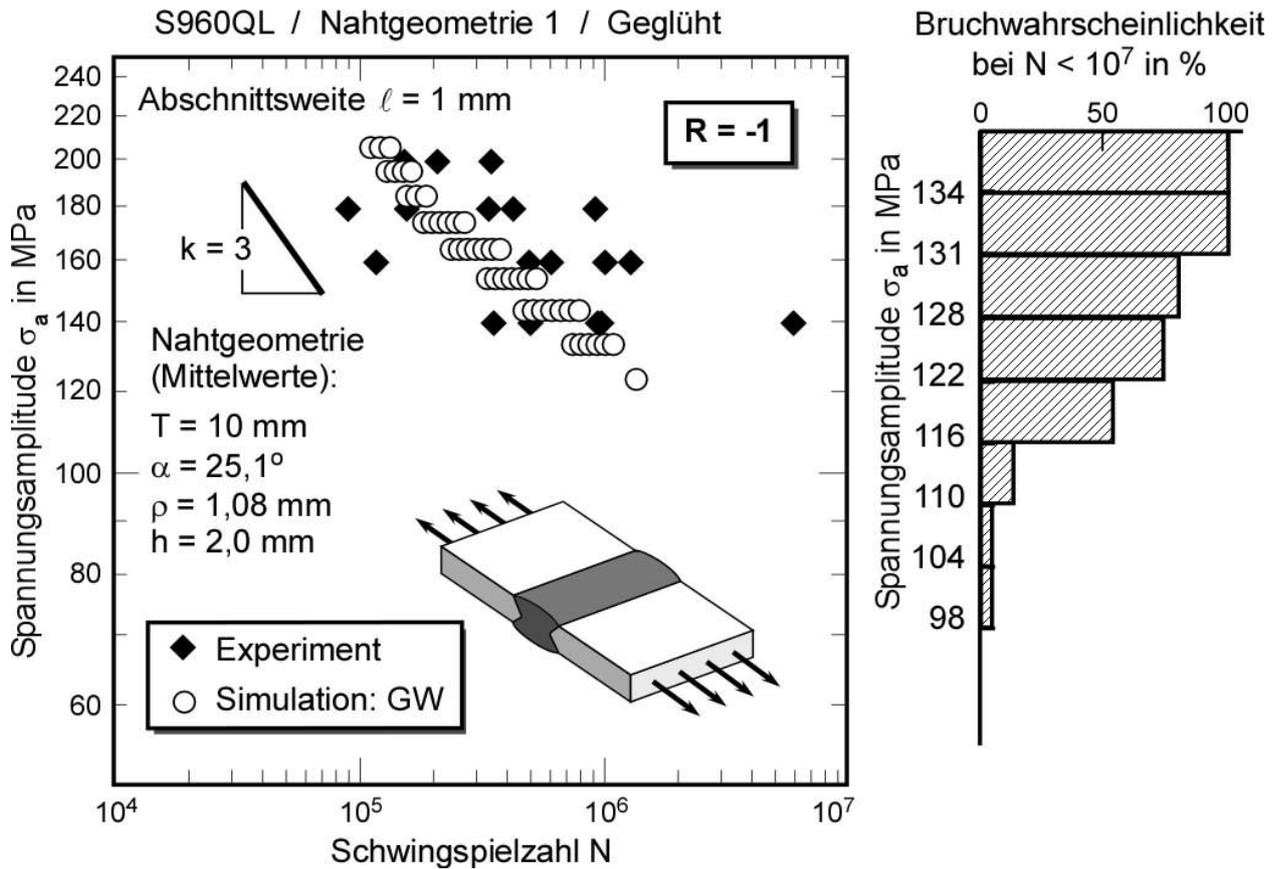


Bild 109: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, gegläht, $R = -1$, Grundwerkstoff-Daten.

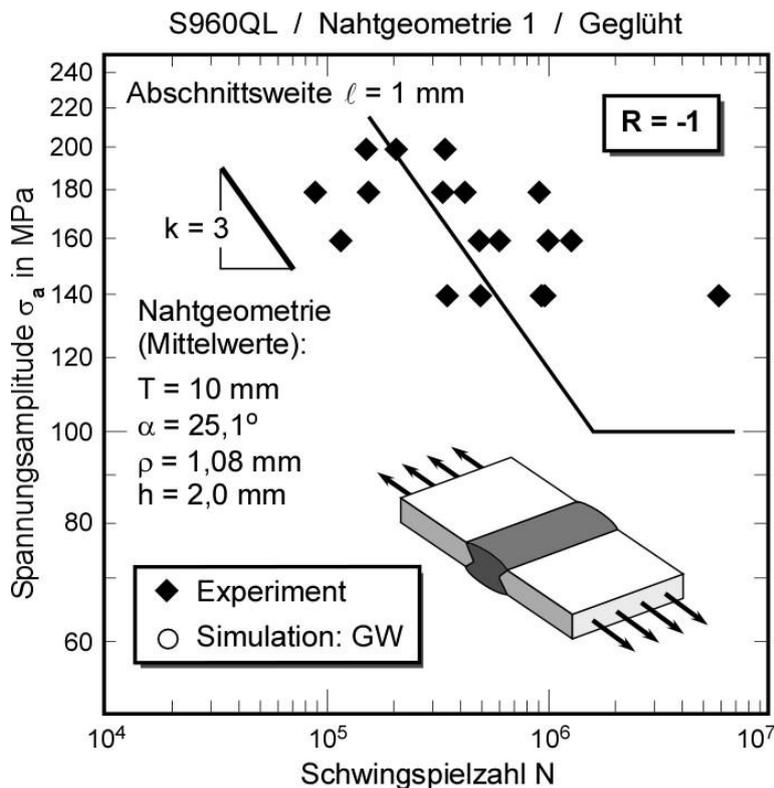


Bild 110:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Gegläht
 $R = -1$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

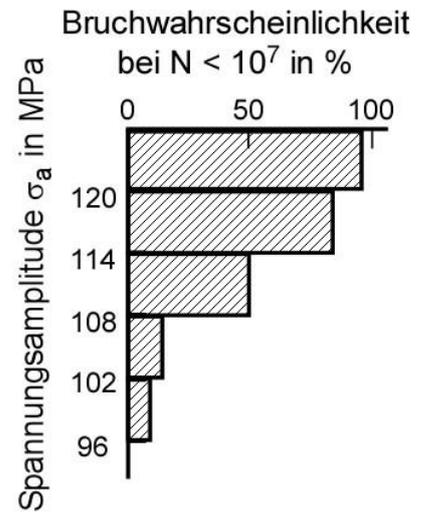
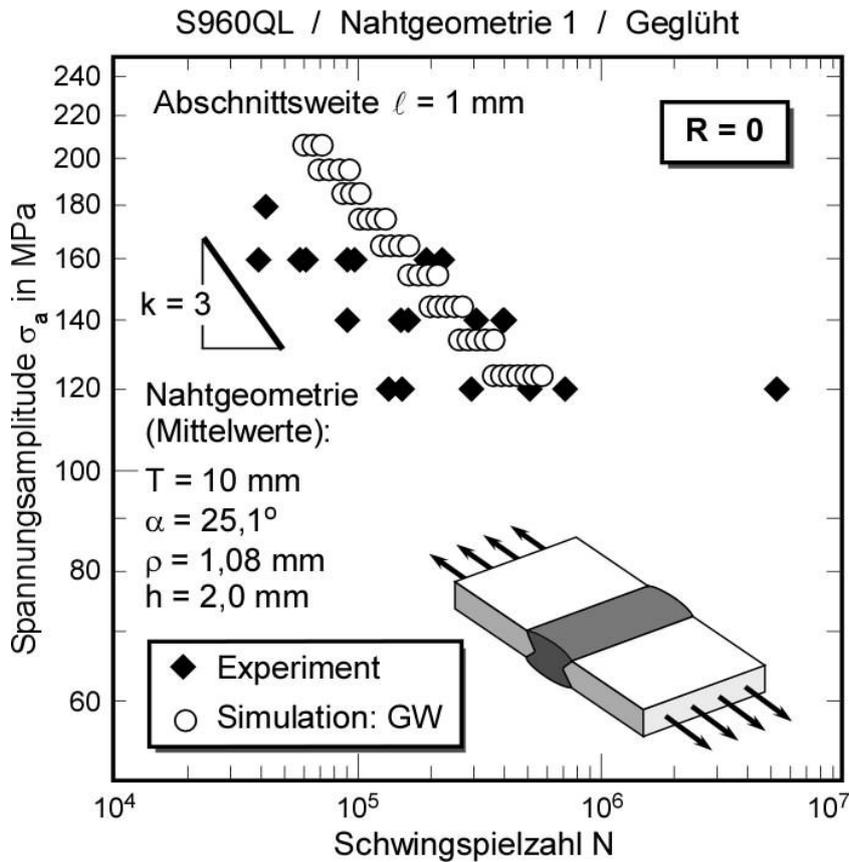


Bild 111: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 1, geglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff-Daten.

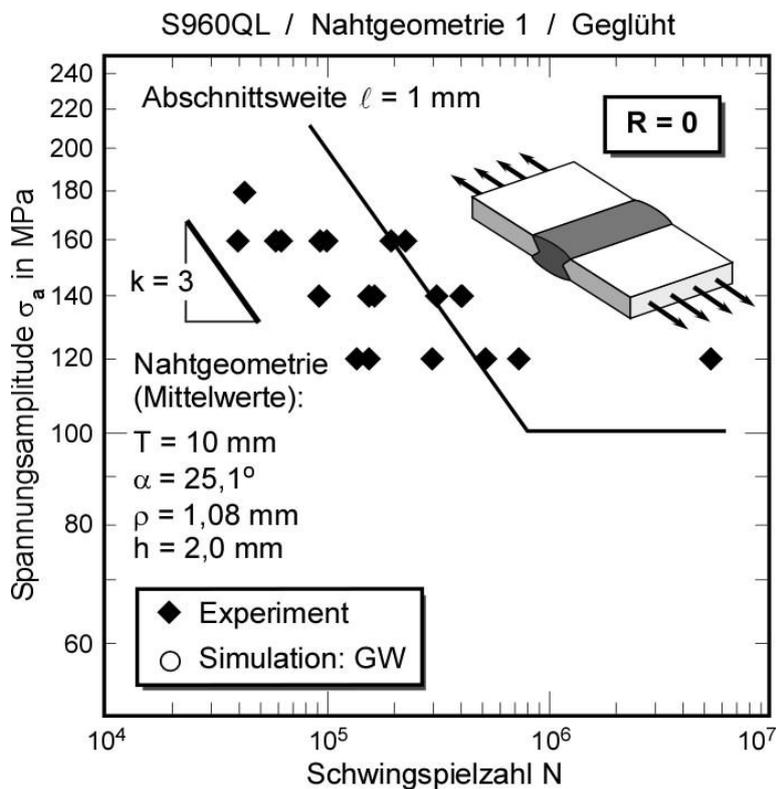


Bild 112:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
Stumpfstoß,
Nahtgeometrie 1,
Geglüht
 $R = 0$
Abschnittsweite $\ell = 1$ mm.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

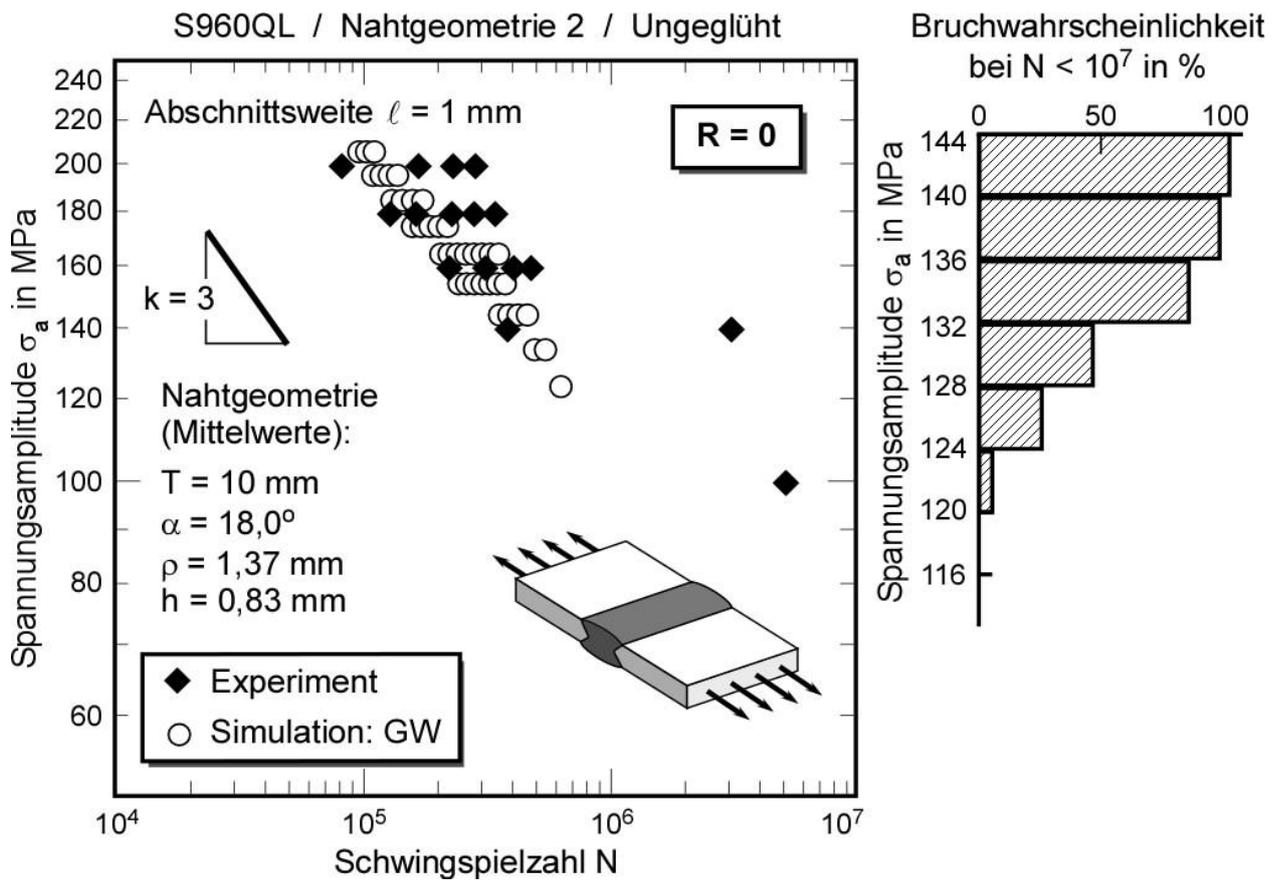


Bild 113: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 2, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff-Daten.

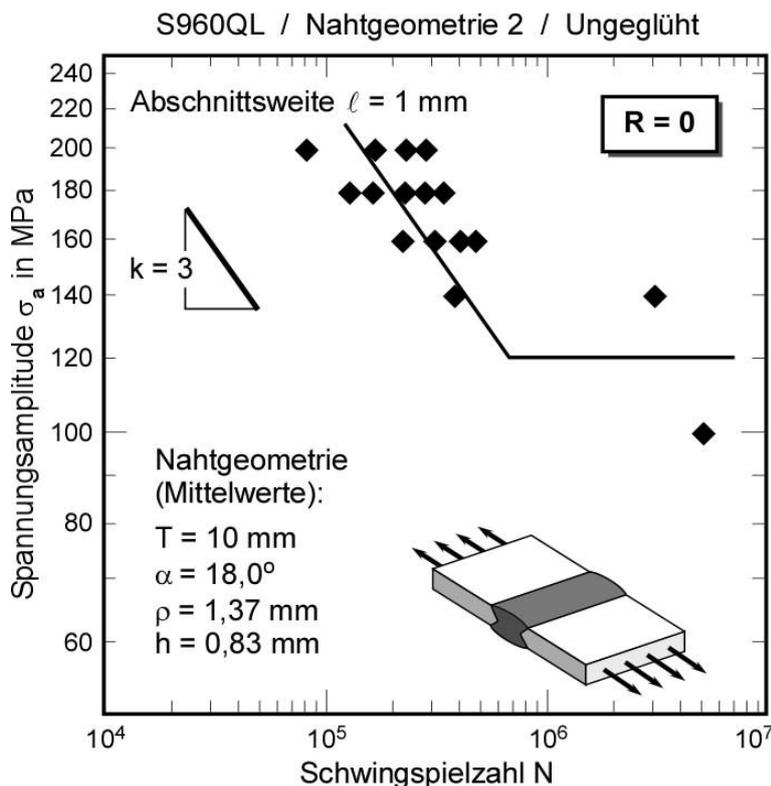


Bild 114:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 2,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

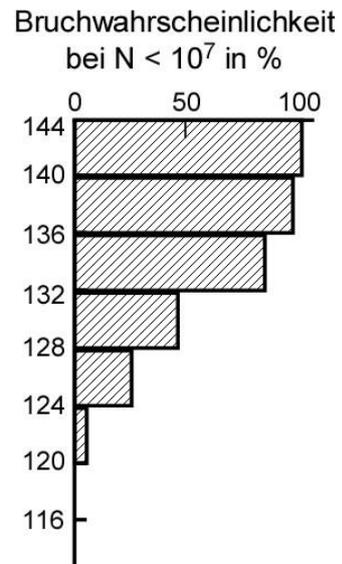
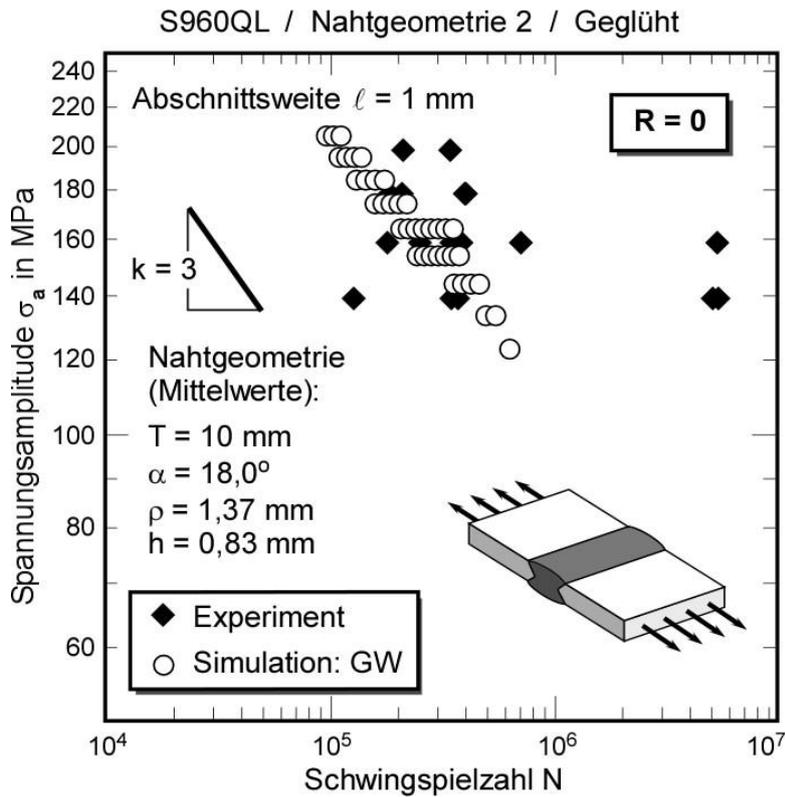


Bild 115: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*); S960QL, Stumpfstoß, Nahtgeometrie 2, geglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff-Daten.

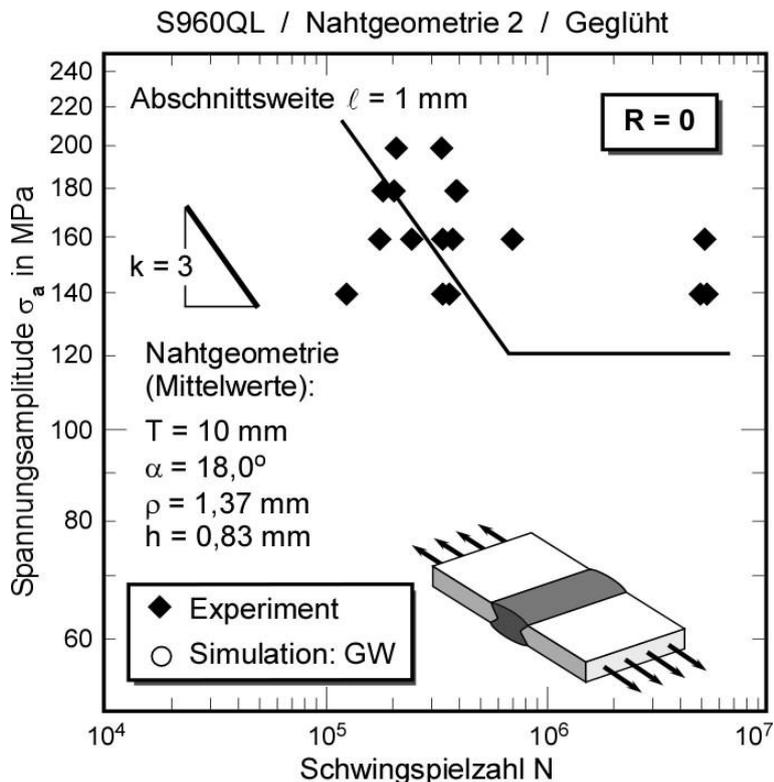


Bild 116:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Stumpfstoß,
 Nahtgeometrie 2,
 Geglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G1*).

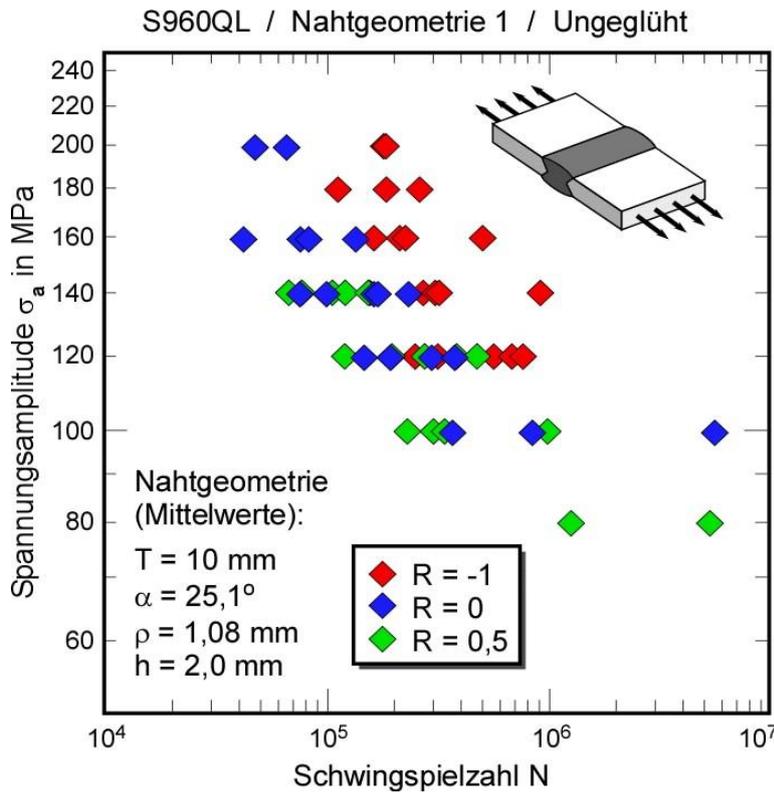


Bild 117:
 Schwingfestigkeitsdaten der Stumpfstöße aus S960QL, Ungeglüht, Nahtgeometrie 1;

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Daten bei $R = -1$ und $R = 0$, weshalb anders als im Fall des S355NL (Bilder 96 und 97) nicht vom Aufbau signifikanter Druckeigenstressungen bei $R = 0$ und $0,5$ auszugehen ist. Ursache dürfte die sehr viel höhere Festigkeit des S960QL sein, da die Modifizierung des Eigenspannungszustands von der plastischen Deformation im Kerbgrund abhängt.

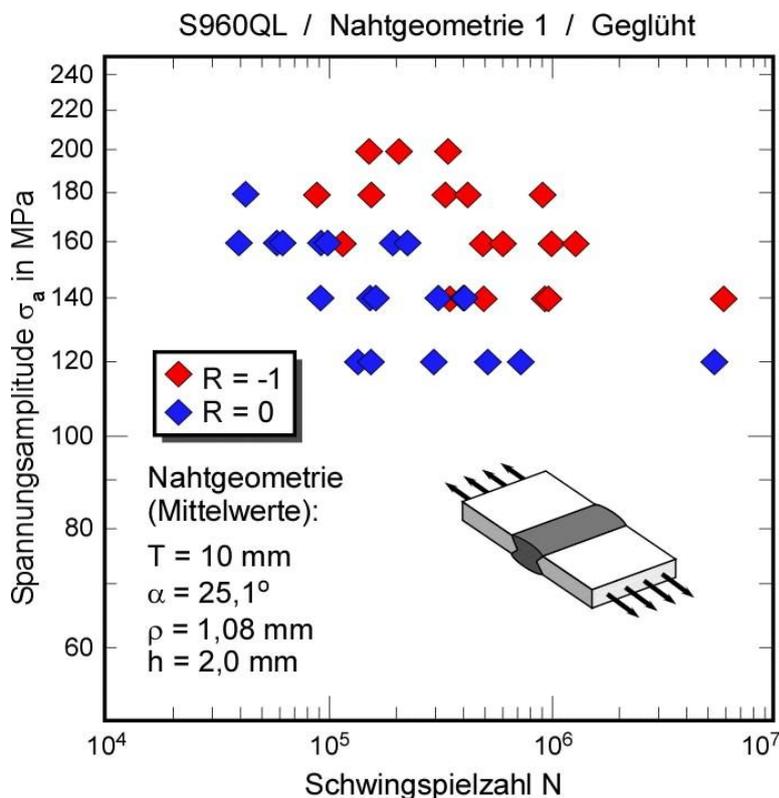


Bild 118:
 Schwingfestigkeitsdaten der Stumpfstöße aus S960QL, Ungeglüht, Nahtgeometrie 1;

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Daten bei $R = -1$ und $R = 0$, weshalb anders als im Fall des S355NL (Bilder 96 und 97) nicht vom Aufbau signifikanter Druckeigenstressungen bei $R = 0$ auszugehen ist. Ursache dürfte die sehr viel höhere Festigkeit des S960QL sein, da die Modifizierung des Eigenspannungszustands von der plastischen Deformation im Kerbgrund abhängt.

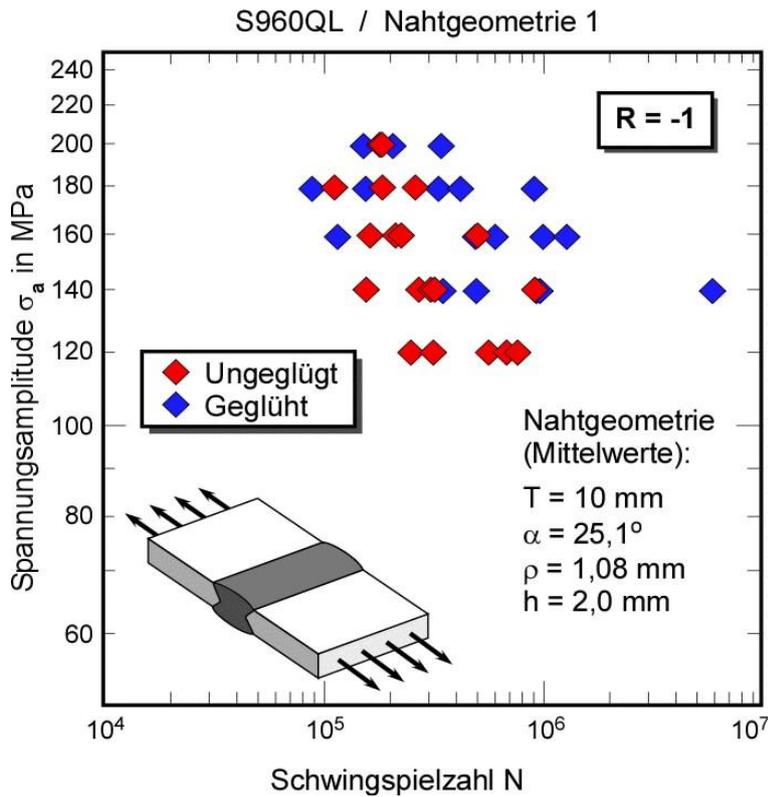


Bild 119:

Schwingfestigkeitsdaten der Stumpfstoße aus S960QL, Spannungsverhältnis $R = -1$; Nahtgeometrie 1;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

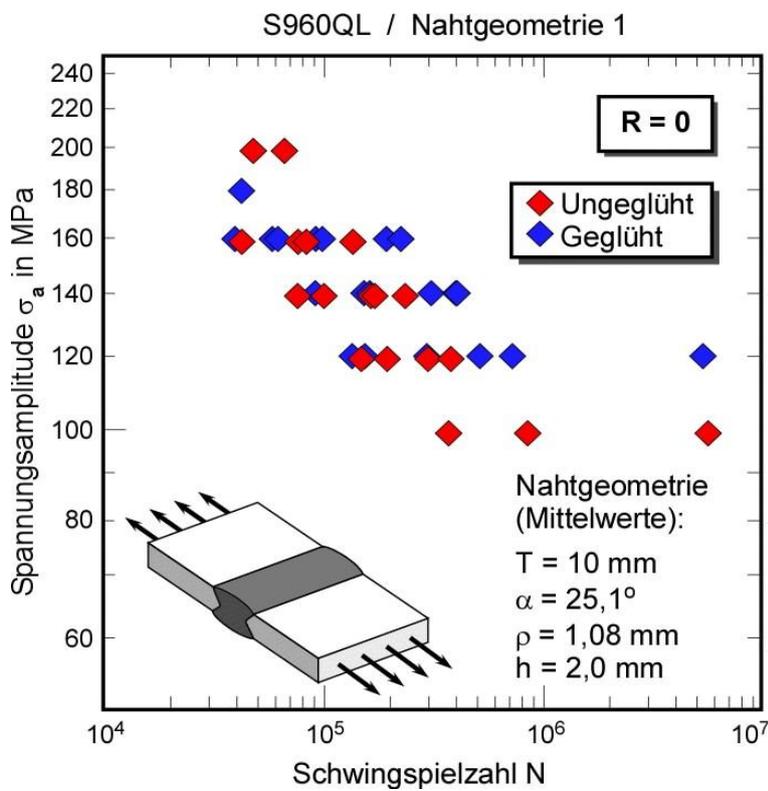


Bild 120:

Schwingfestigkeitsdaten der Stumpfstoße aus S960QL, Spannungsverhältnis $R = 0$; Nahtgeometrie 1;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

4.3.3 Validierung an Kreuzstößen

4.3.3.1 S355NL-Verbindungen

Für folgende Konfigurationen wurden Wöhlerkurven von Kreuzstößen aus S355NL nachgerechnet:

♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = -1
♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht	R = 0,5
♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht	R = -1
♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 2 / Ungeglüht	R = 0
♦ Nahtgeometrie 2 / Spannungsarmgeglüht	R = 0

Die Ergebnisse sind in den **Bildern 121, 123, 125, 127, 129, 131 und 133** für die obere und in den **Bildern 122, 124, 126, 128, 130, 132 und 134** für die untere Analyse-Ebene wiedergegeben. Die Rechnungen wurden ohne Berücksichtigung von Schweißeigenstressungen durchgeführt. Auffällig ist die im Vergleich zu den Stumpfstoßen deutlich höhere Konservativität der Vorhersagen von etwa Faktor 2,5 bis 6,3 auf der Ebene der Lebensdauer und 23 bis 55 % auf der Ebene der Spannungsamplitude. Allerdings deutet das im Vergleich zu den S355NL-Stumpfstoßen etwas breitere Streuband auf einen stärkeren Effekt globaler Geometrieabweichungen (Kantenversatz, Winkelverzug) hin.

Die **Bilder 135 und 136** veranschaulichen einen signifikanten Effekt des Spannungsverhältnisses ($R = -1$ und 0) auf den Zeitfestigkeitsast. Bei den Stumpfstoßen aus S960QL (Bilder 117 und 118) wurde ein vergleichbarer Effekt so gedeutet, dass die Ausbildung von Druckeigenstressungen bei dem hochfesten Werkstoff weniger ausgeprägt erwartet wird als beim weniger festen S355NL. Diese Erklärung ist in diesem Fall jedoch nicht plausibel. Auch zwischen den beiden deutlich unterschiedlichen Nahtgeometrien ist hinsichtlich der Konservativität der Vorhersagen kein signifikanter Einfluss auszumachen. Die Eigenstressungen aus der Fertigung haben allenfalls einen geringen Einfluss, wie der Vergleich zwischen ungeglühtem und spannungsarmgeglühtem Zustand in den **Bildern 137 bis 139** zeigt, wobei sich allerdings bei der schärfer gekerbten Nahtgeometrie 2 ein Trend der geglühten Proben zu etwas geringeren Lebensdauern andeutet, was wiederum für Eigenstressumlagerung spricht. Eine mögliche Erklärung für die Konservativität der Vorhersage könnte die in Bild 4 festgestellte Überschätzung des ΔJ bzw. ΔK_p der IBESS-Methode bei steilem Nahtanstieg und höherem Spannungsniveau sein. Dafür spricht der im Vergleich zu den Experimenten flachere Kurvenanstieg des Zeitfestigkeitsastes bei den Proben mit sehr steilem Nahtanstieg (Bilder 131 und 132; Nahtgeometrie 2) insbesondere im oberen Spannungsbereich.

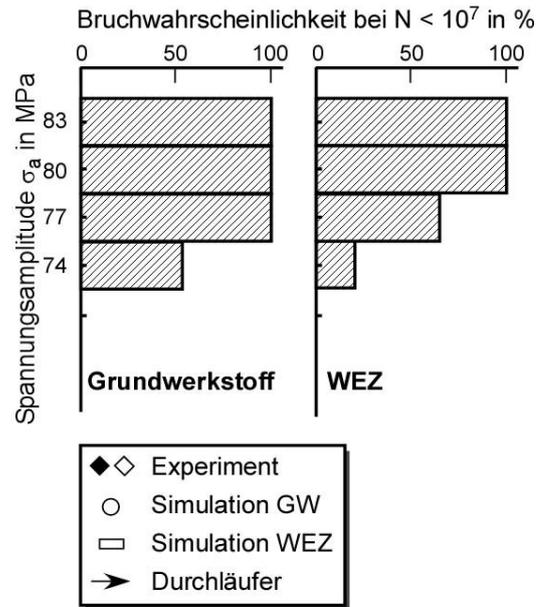
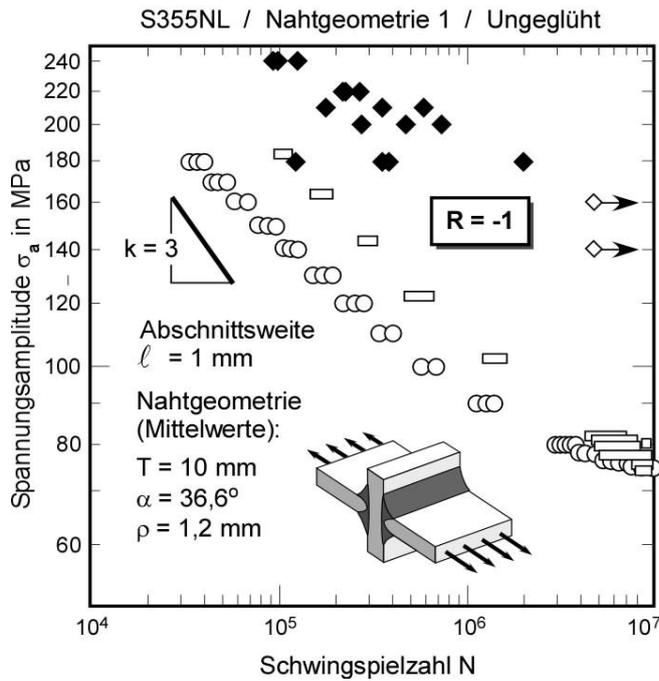


Bild 121: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = -1$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

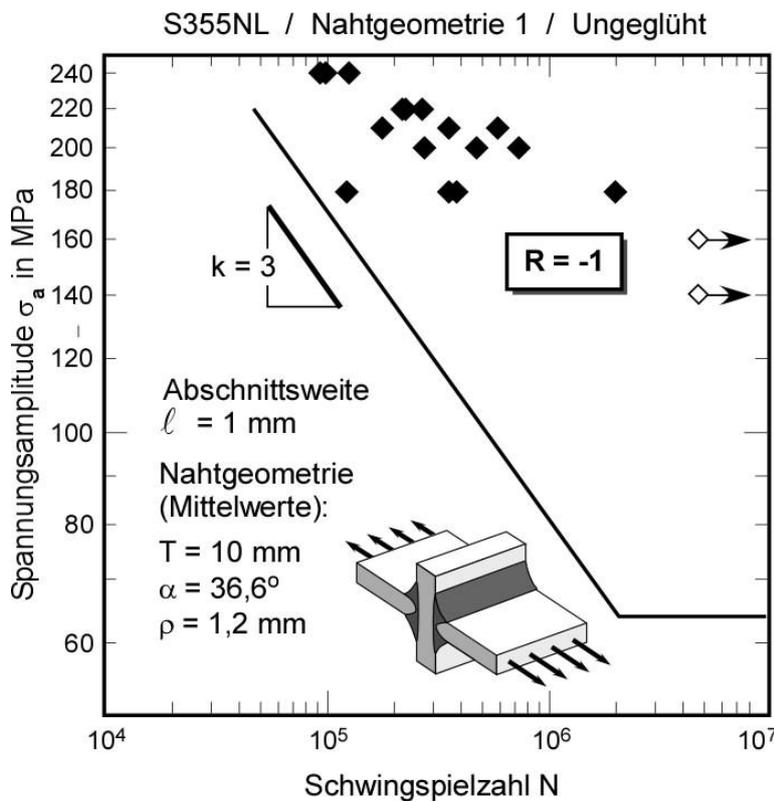


Bild 122:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
Kreuzstoß,
Nahtgeometrie 1,
Ungeglüht
 $R = -1$
Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*).

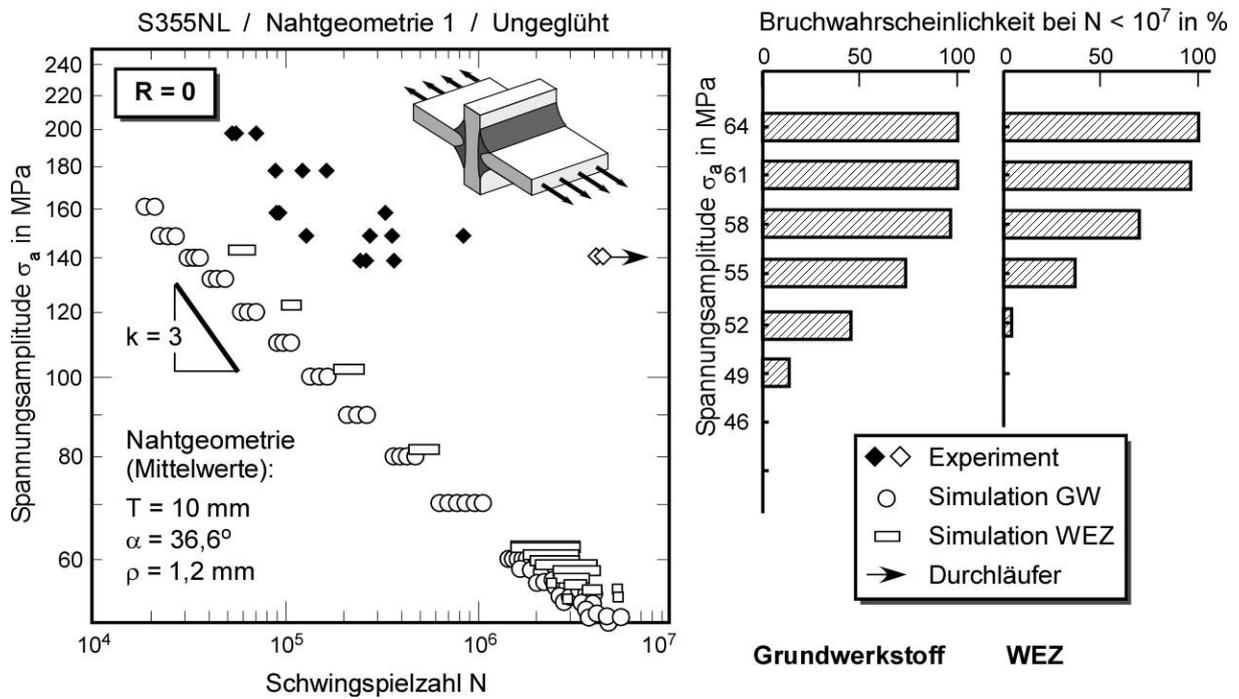


Bild 123: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

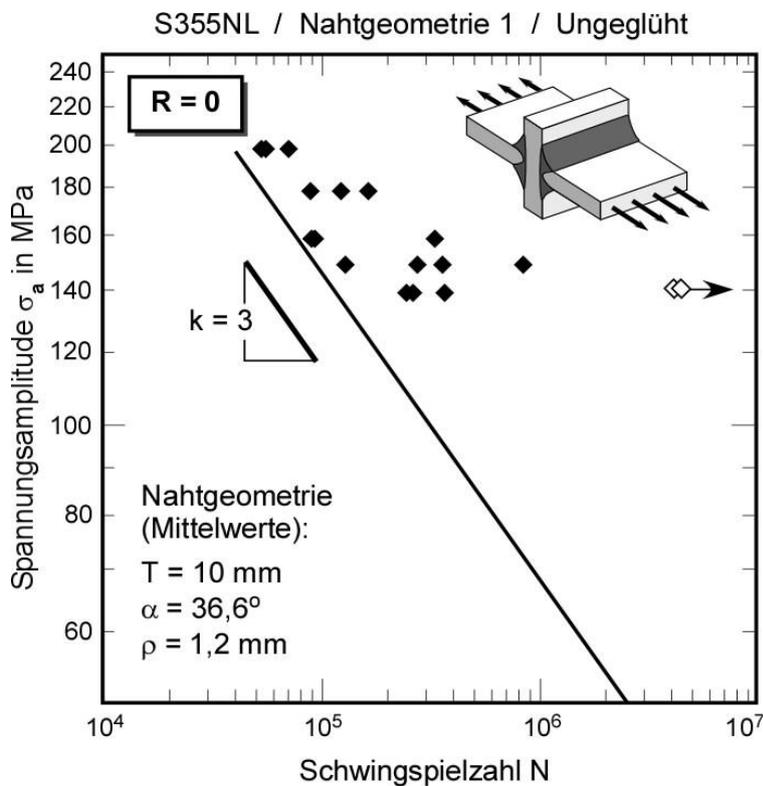


Bild 124:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Kreuzstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*).

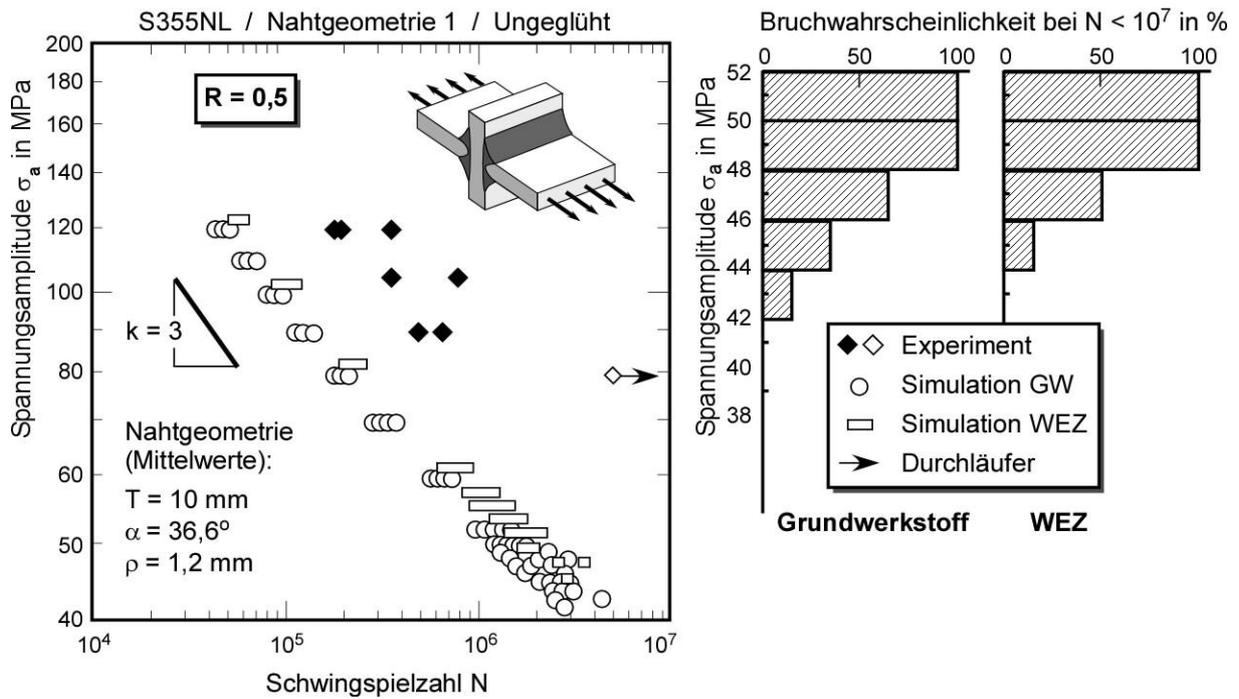


Bild 125: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0,5$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

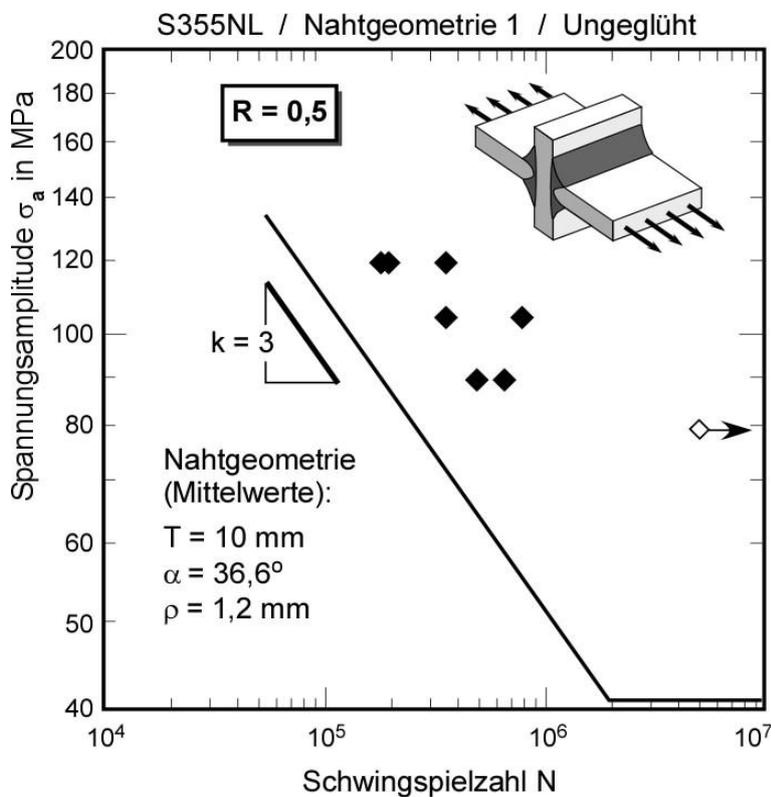


Bild 126:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Kreuzstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0,5$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*).

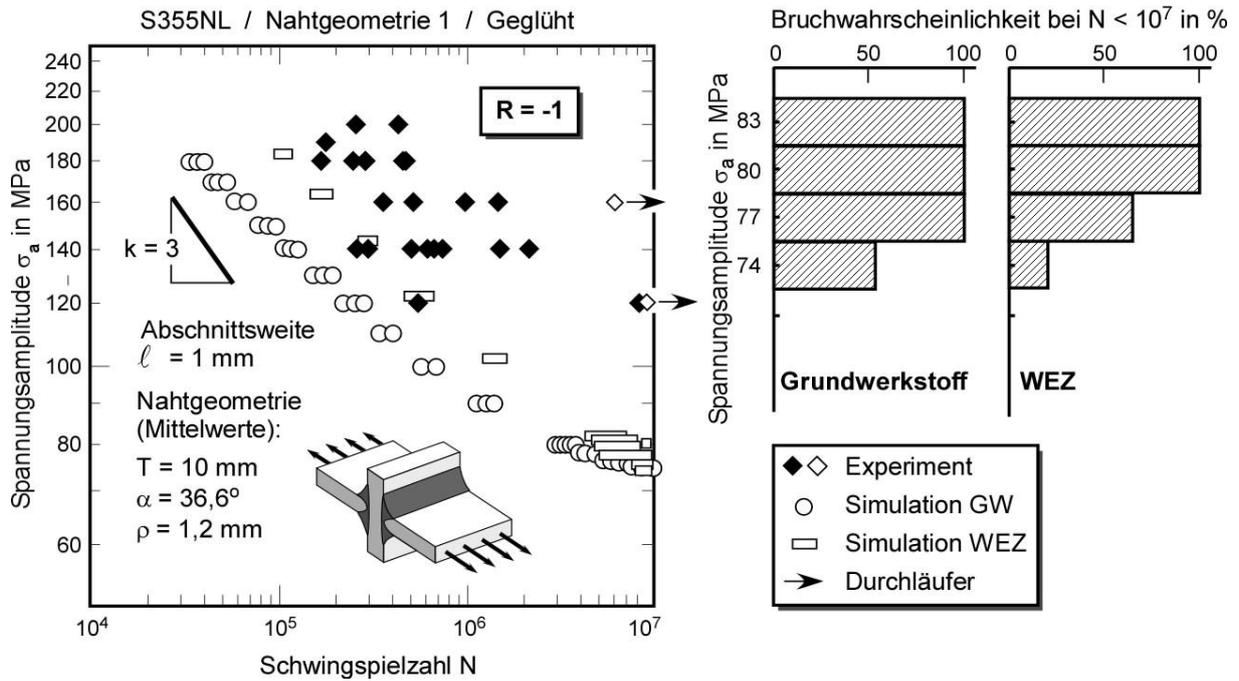


Bild 127: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, geglüht, $R = -1$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

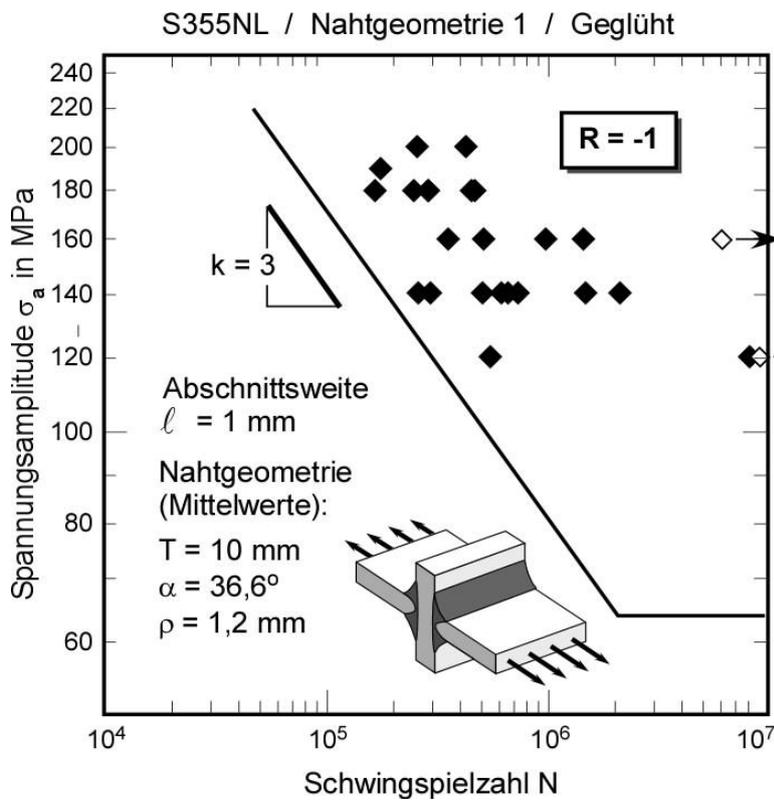


Bild 128:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
Kreuzstoß,
Nahtgeometrie 1,
Geglüht
 $R = -1$
Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*).

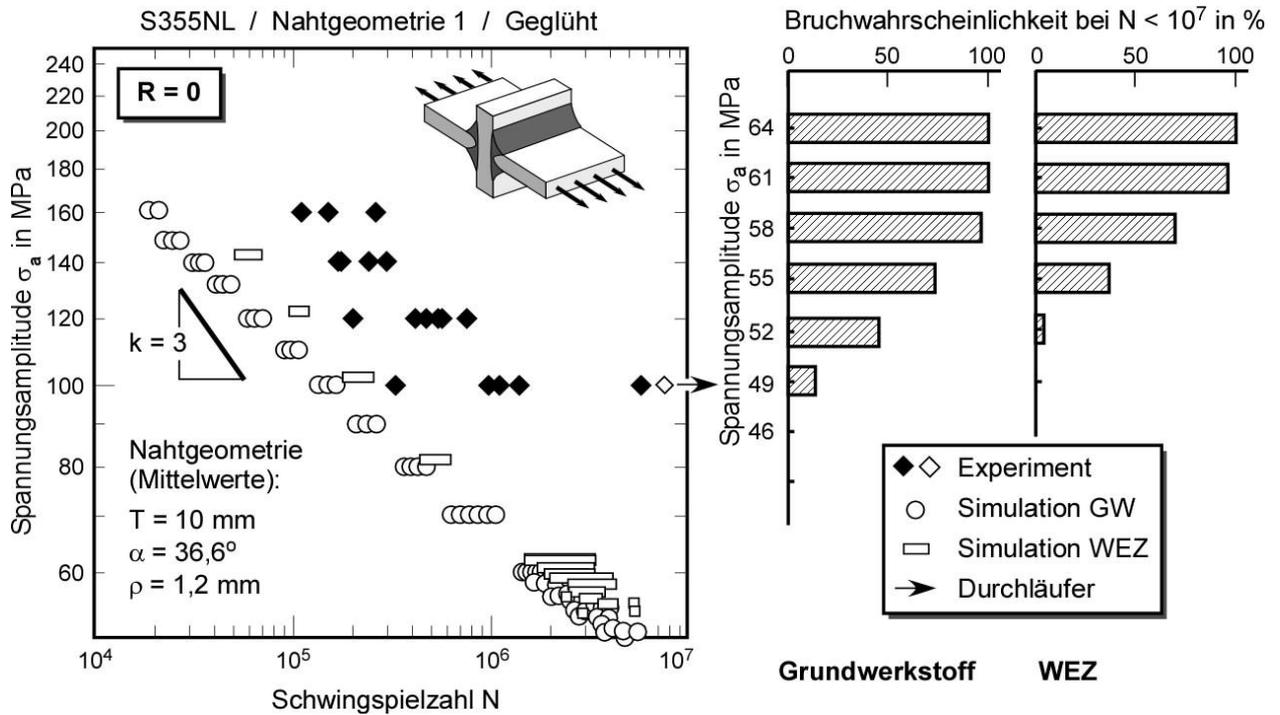


Bild 129: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, geblüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

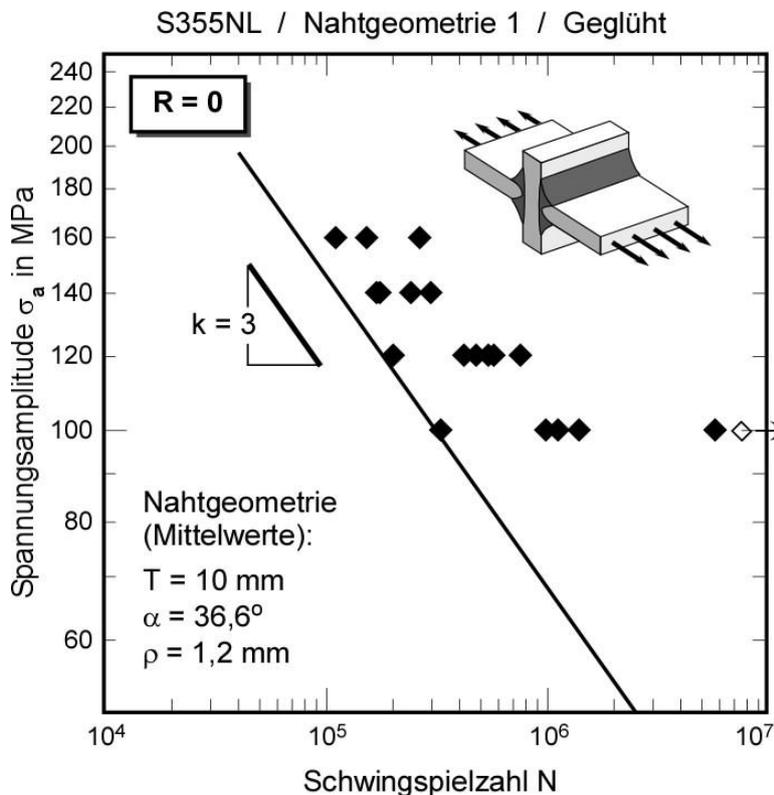


Bild 130:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Kreuzstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Geglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*).

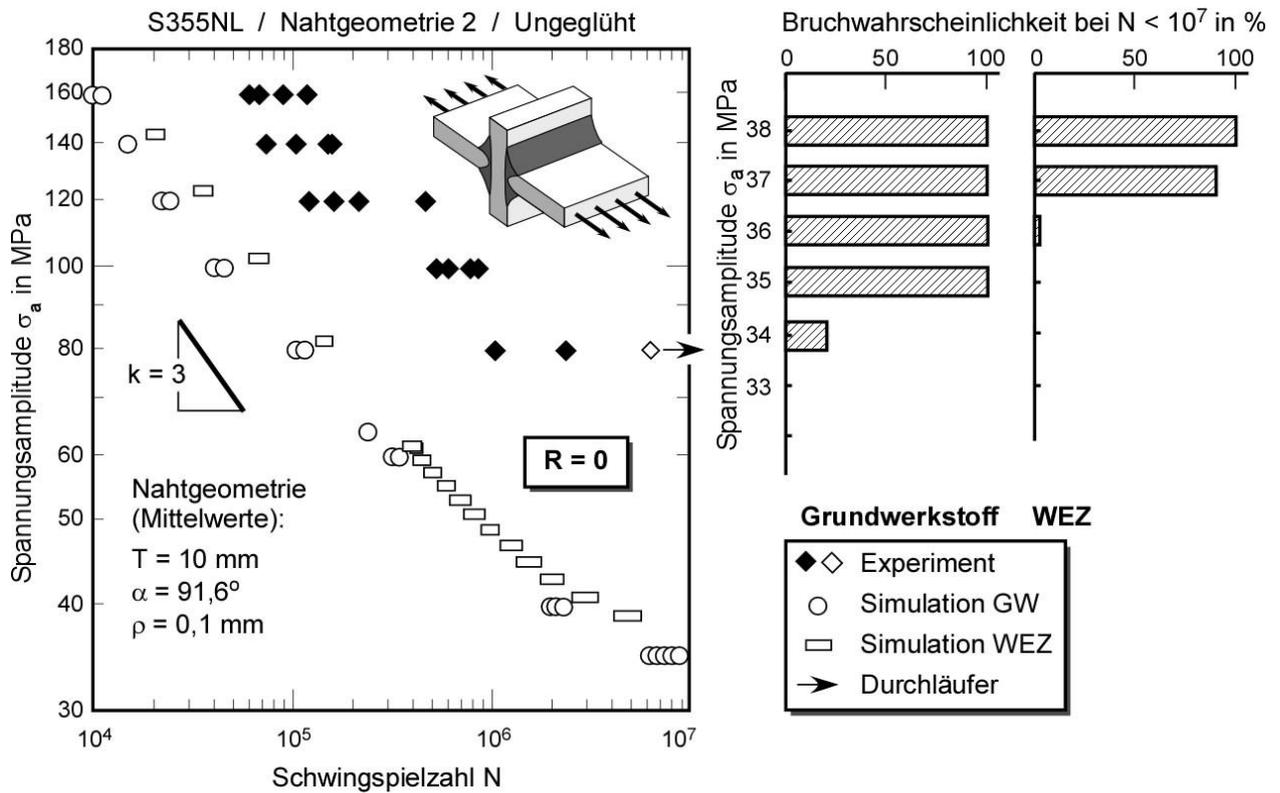


Bild 131: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G4*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 2, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten. Nahtanstiegswinkel α außerhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (28ff); Rechnung mit 60° .

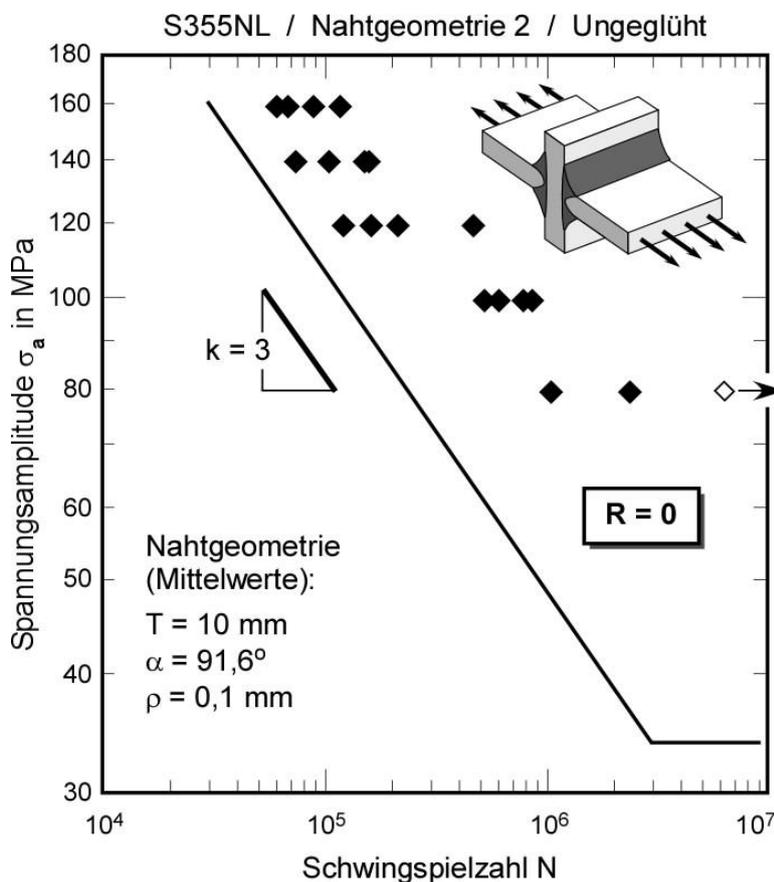


Bild 132:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Kreuzstoß,
 Nahtgeometrie 2,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*).

Nahtanstiegswinkel α außerhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (28ff); Rechnung mit 60° .

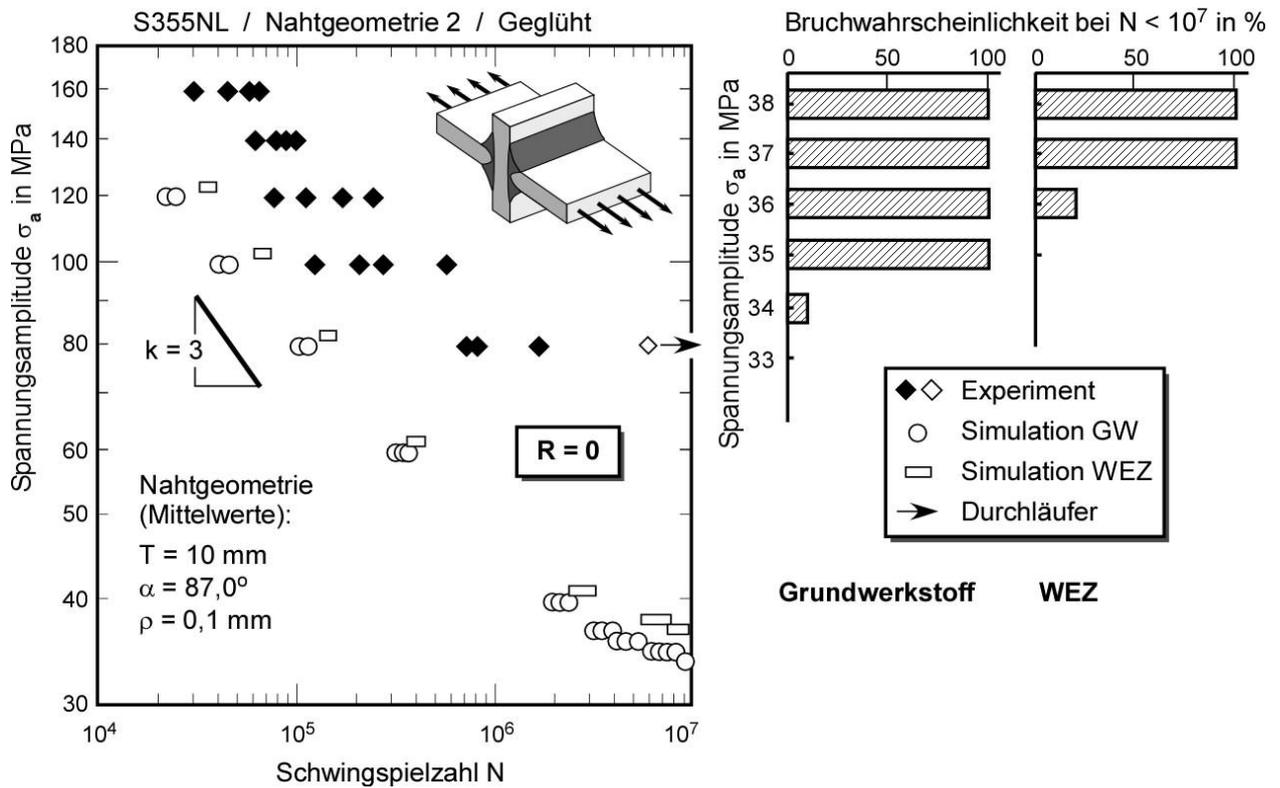


Bild 133: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*); S355NL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 2, geglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten. Nahtanstiegswinkel α außerhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (28ff); Rechnung mit 60° .

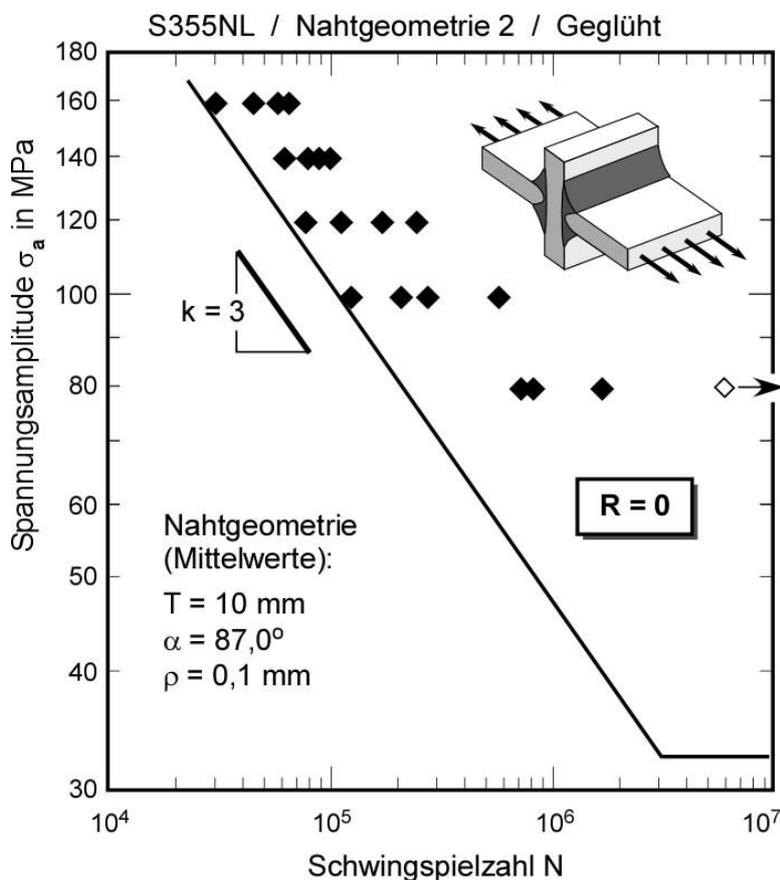


Bild 134:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Kreuzstoß,
 Nahtgeometrie 2,
 Geglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A1*).

Nahtanstiegswinkel α außerhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (28ff); Rechnung mit 60° .

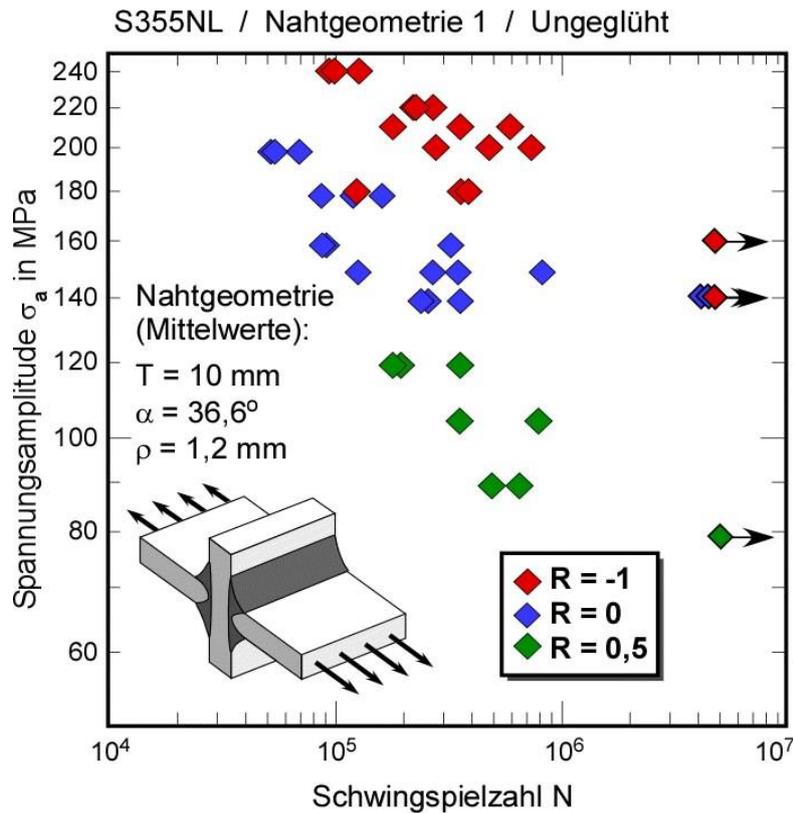


Bild 135:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S355NL, Ungeglüht, Nahtgeometrie 1; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$;

Vergleich der Datensätze für $R = -1$, $R = 0$ und $R = 0,5$.

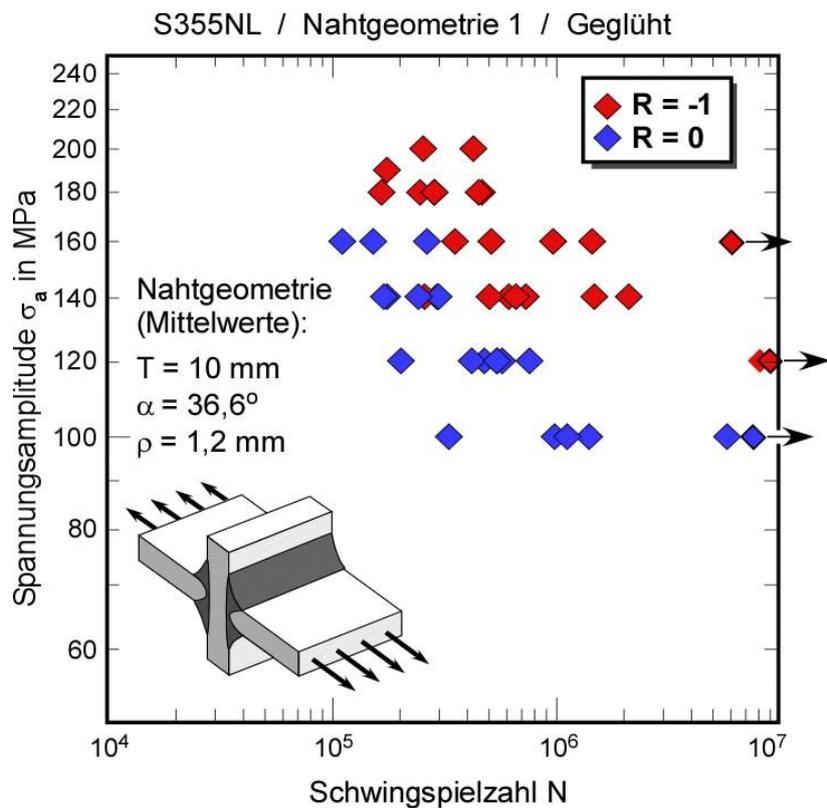


Bild 136:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S355NL, Geglüht, Nahtgeometrie 1; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$;

Vergleich der Datensätze für $R = -1$ und $R = 0$.

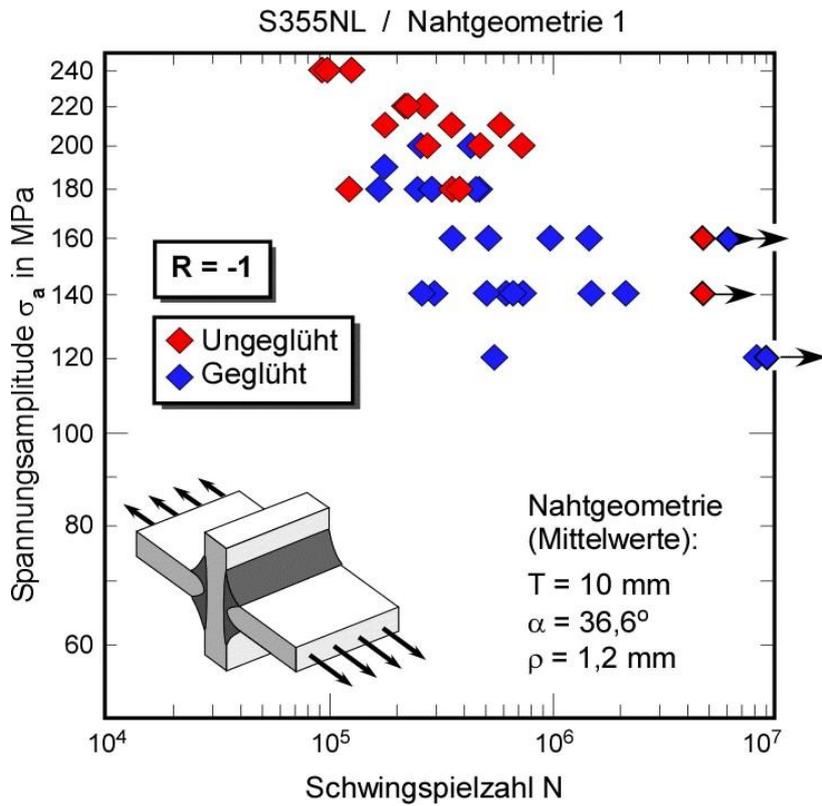


Bild 137:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S355NL, Spannungsverhältnis $R = -1$; Nahtgeometrie 1;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

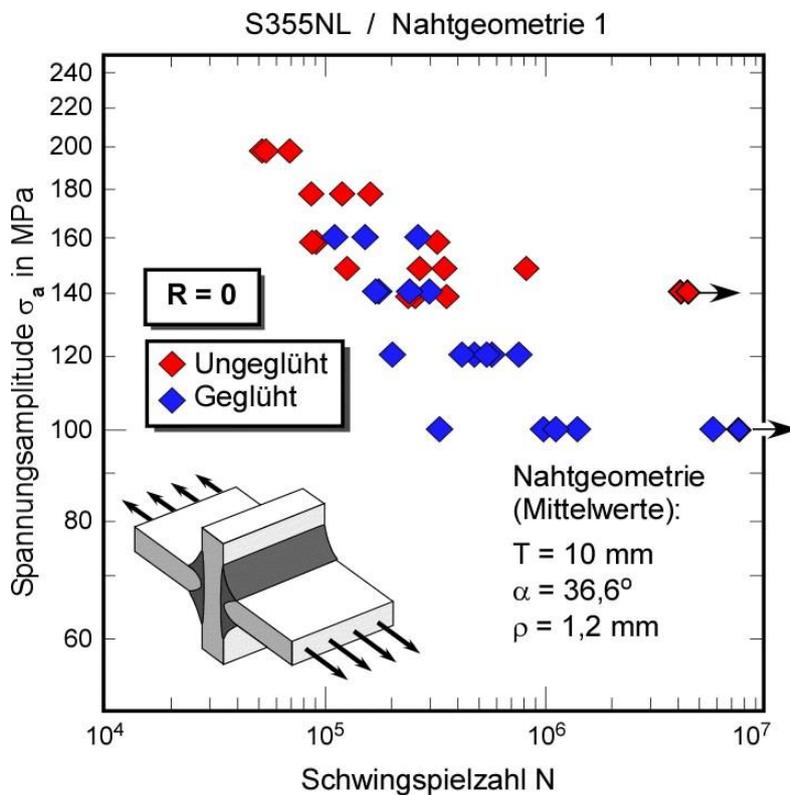


Bild 138:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S355NL, Spannungsverhältnis $R = 0$; Nahtgeometrie 1;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

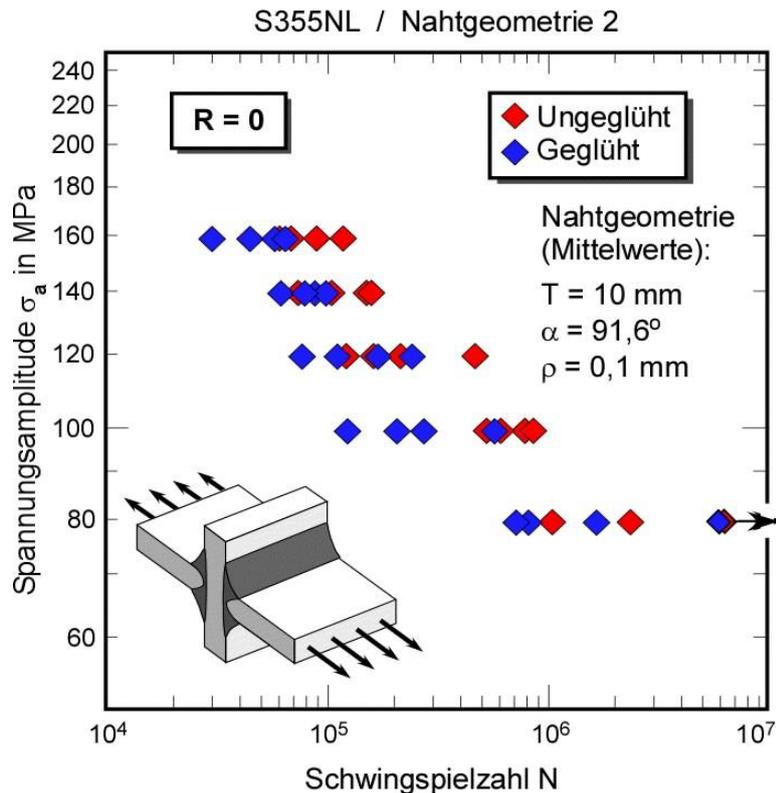


Bild 139:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S355NL, Spannungsverhältnis $R = 0$; Nahtgeometrie 2;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

4.3.3.2 S960QL-Verbindungen

Für folgende Konfigurationen wurden Wöhlerkurven von Kreuzstößen aus S355NL nachgerechnet:

- ◆ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht R = -1
- ◆ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht R = 0
- ◆ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht R = 0,5
- ◆ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht R = -1
- ◆ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht R = 0

Anders als bei den übrigen Datensätzen wurde in diesem Fall nur eine Nahtgeometrie untersucht. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 140, 142, 144, 146, und 148** für die obere und in den **Bildern 141, 143, 143, 147 und 149** für die untere Analyse-Ebene wiedergegeben. Ein Datensatz (Ungeglüht, $R = -1$; Bilder 140 und 141) enthält nur vier gültige Datenpunkte, weshalb Schlussfolgerungen nur unter Vorbehalt möglich sind. Die vier übrigen Datensätze werden durch das IBESS-Modell gut getroffen. Die Datensätze „Ungeglüht, $R = 0$ “ und „Geglüht, $R = -1$ “ weisen eine geringfügige Konservativität (Lebensdauer: Faktor 2,5 bis 3,5; Spannungsamplitude: 29 bis 34%), der Datensatz „Geglüht, $R = 0$ “ evtl. eine geringfügige Nichtkonservativität bei höheren Spannungsniveaus auf. Ähnlich wie bei den Stumpfstoßen aus S396QL dürfte der Aufbau von Druckeigenspannungen bei $R = 0$ und 0,5 aufgrund der hohen Fließgrenze und der damit verbundenen Plastifizierung im Kerbgrund erst bei hohen Spannungsniveaus erfolgen und damit kaum eine Rolle spielen. Das bestätigen die **Bilder 150 und 151**, die einen deutlichen Einfluss des Spannungsverhältnisses auf den Zeitfestigkeitsast widerspiegeln. Der Einfluss der Eigenspannungen ist gering mit einem Trend in Richtung Verbesserung der Zeitfestigkeit (**Bilder 152 und 153**).

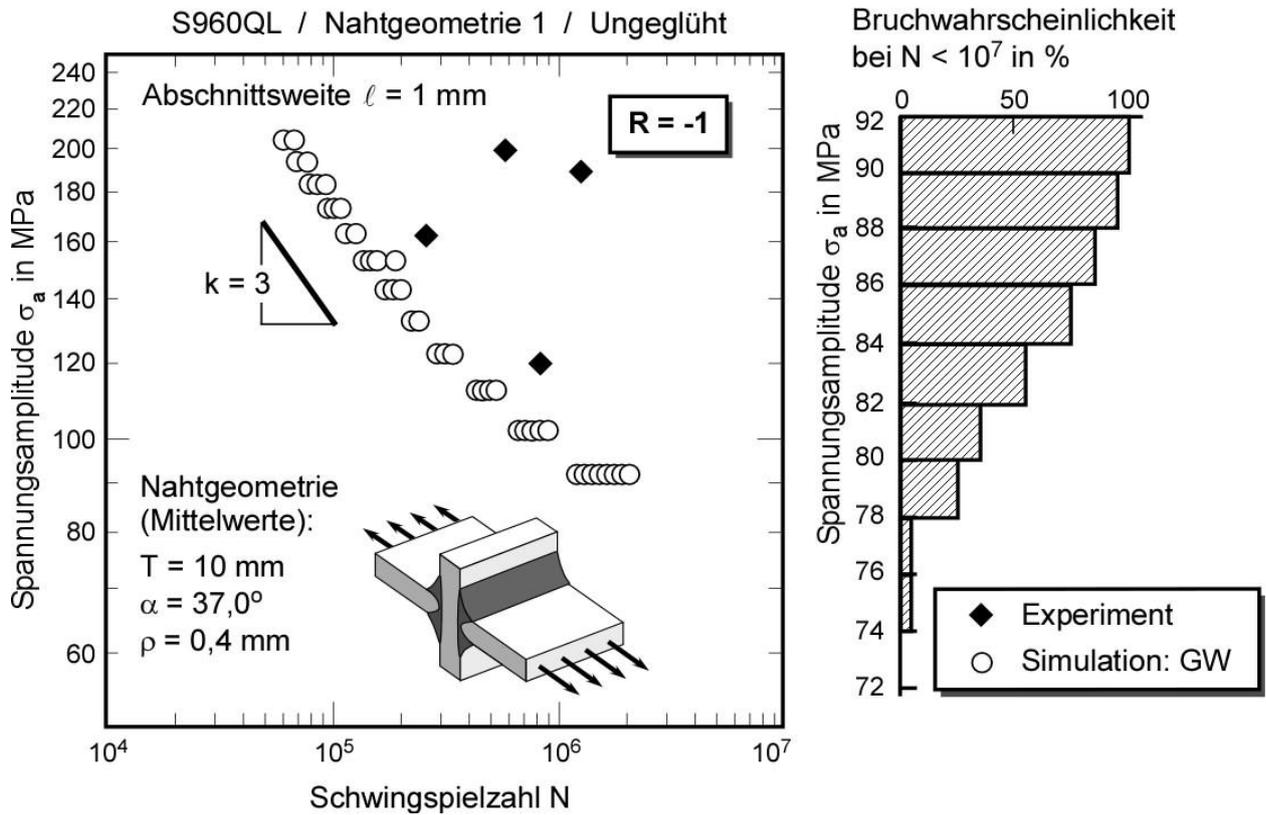


Bild 140: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*); S960QL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = -1$, Grundwerkstoff-Daten.

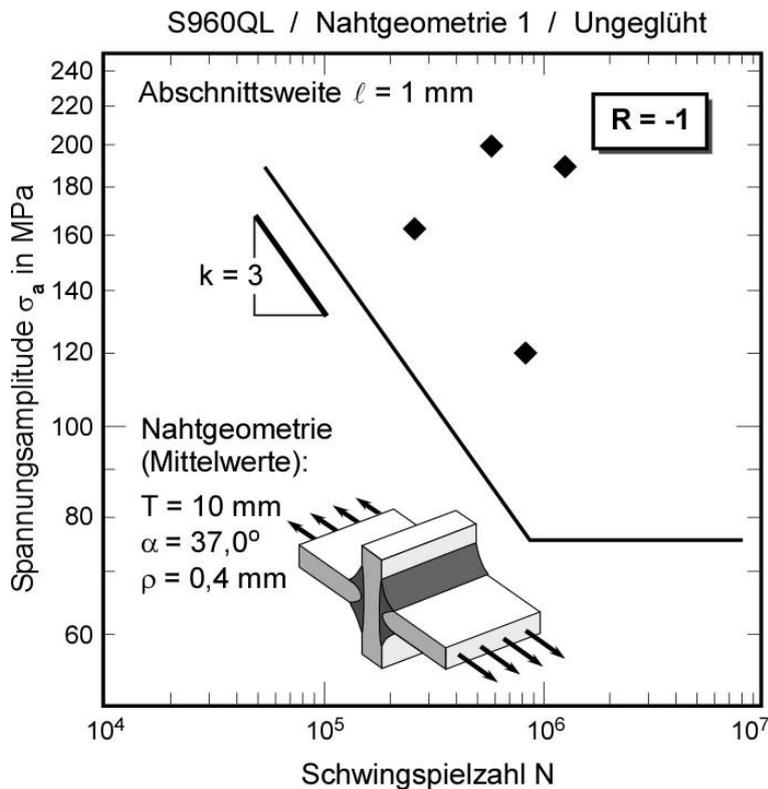


Bild 141:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Kreuzstoß,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = -1$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*).

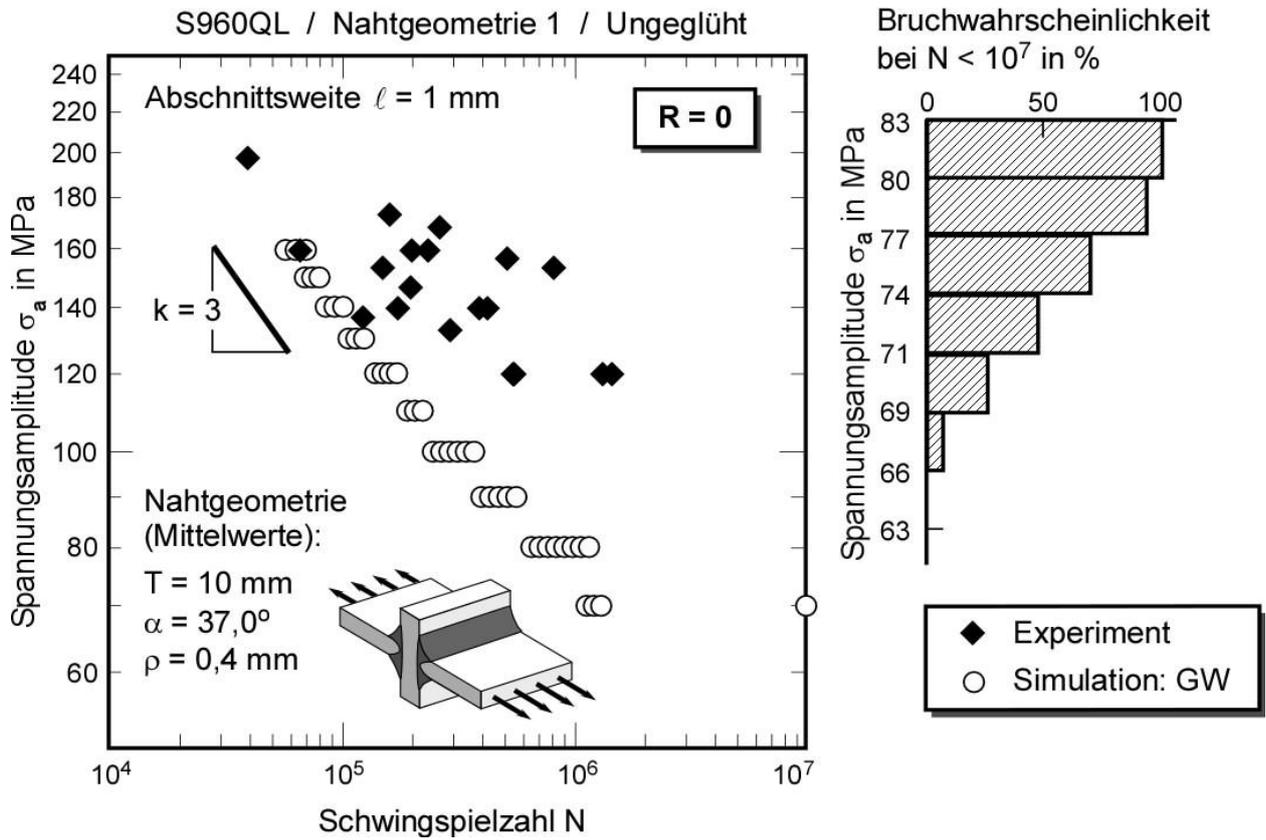


Bild 142: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*); S960QL, Kreuzstoß, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff-Daten.

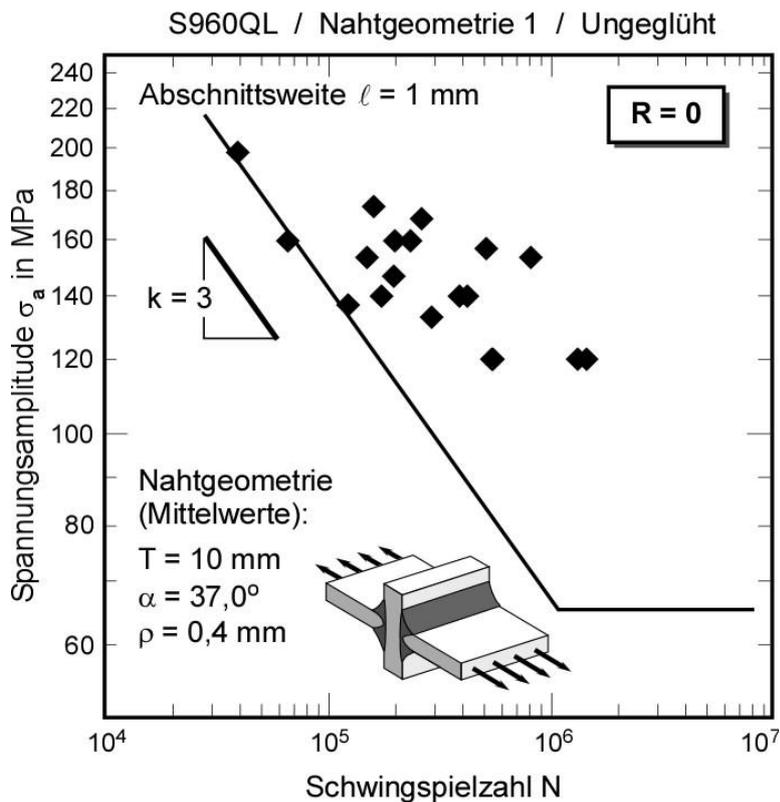


Bild 143:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Kreuzstoß,
 Ungeglüht
 $R = 0$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*).

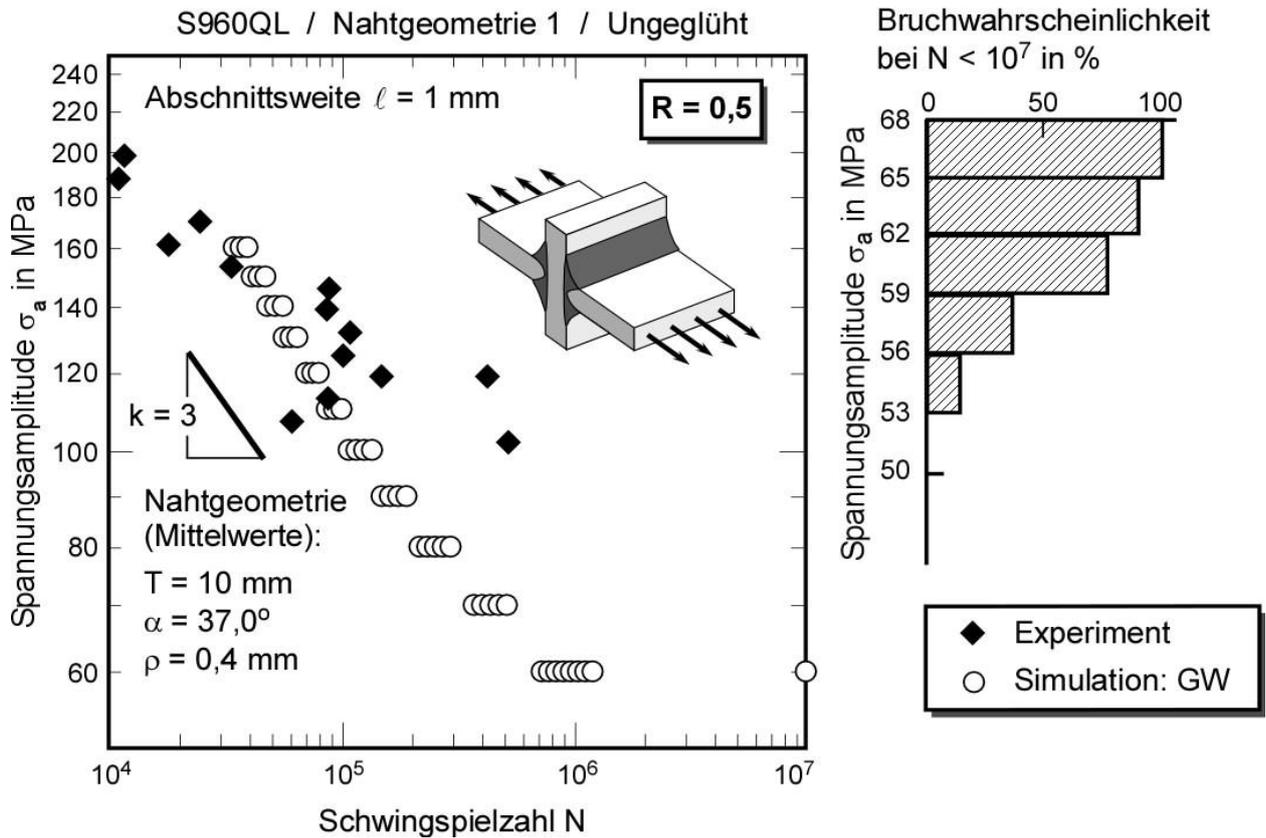


Bild 144: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*); S960QL, Kreuzstoß, ungeglüht, $R = 0,5$, Grundwerkstoff-Daten.

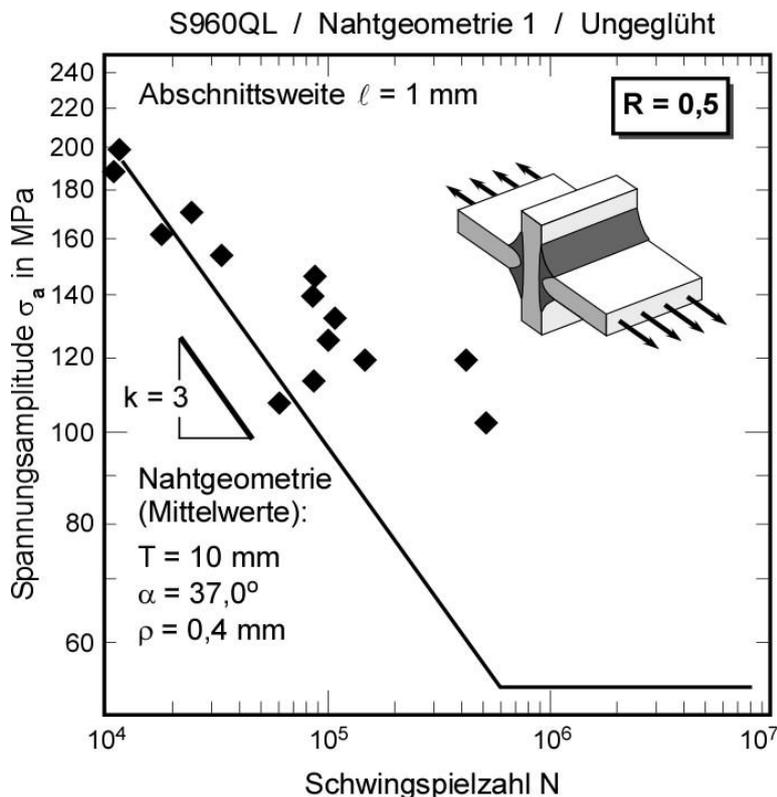


Bild 145:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
 Kreuzstoß,
 Ungeglüht
 $R = 0,5$
 Abschnittsweite $\ell = 1 \text{ mm}$.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*).

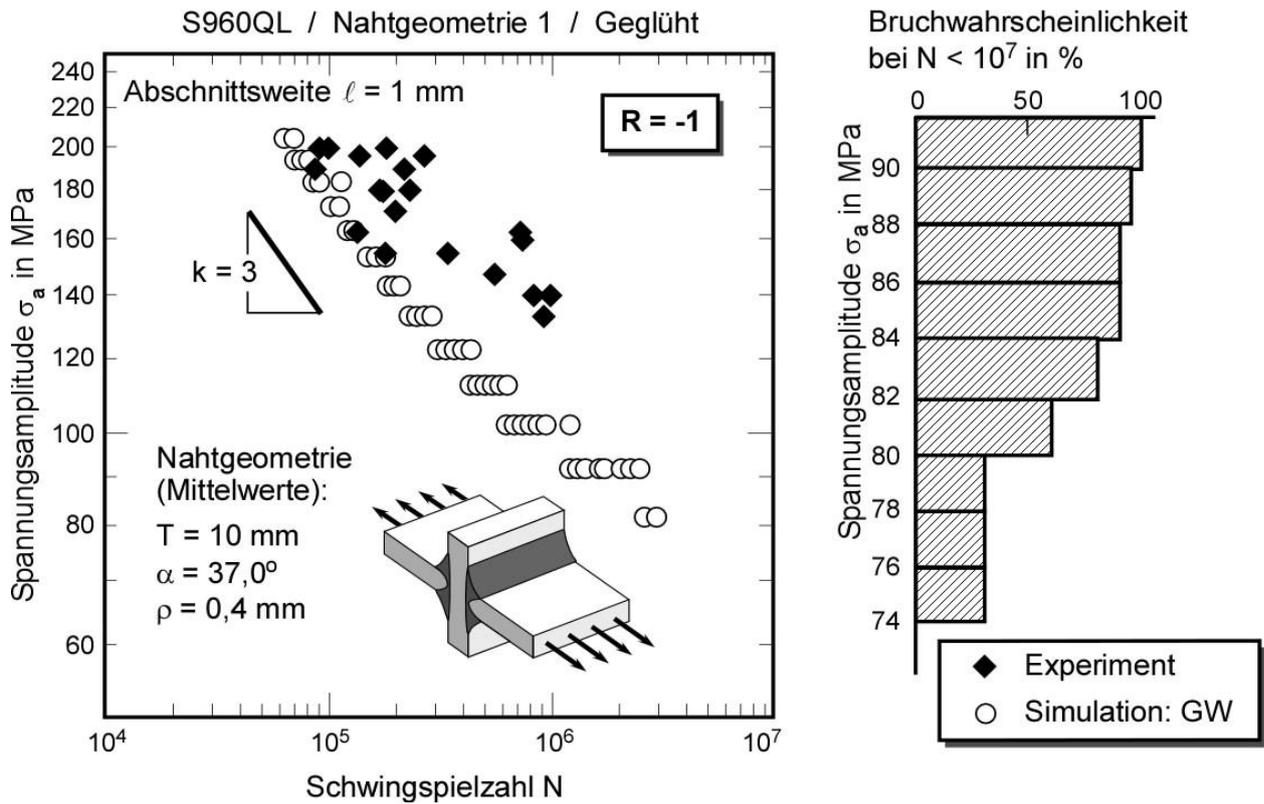


Bild 146: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*); S960QL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, gegläht, $R = -1$, Grundwerkstoff-Daten.

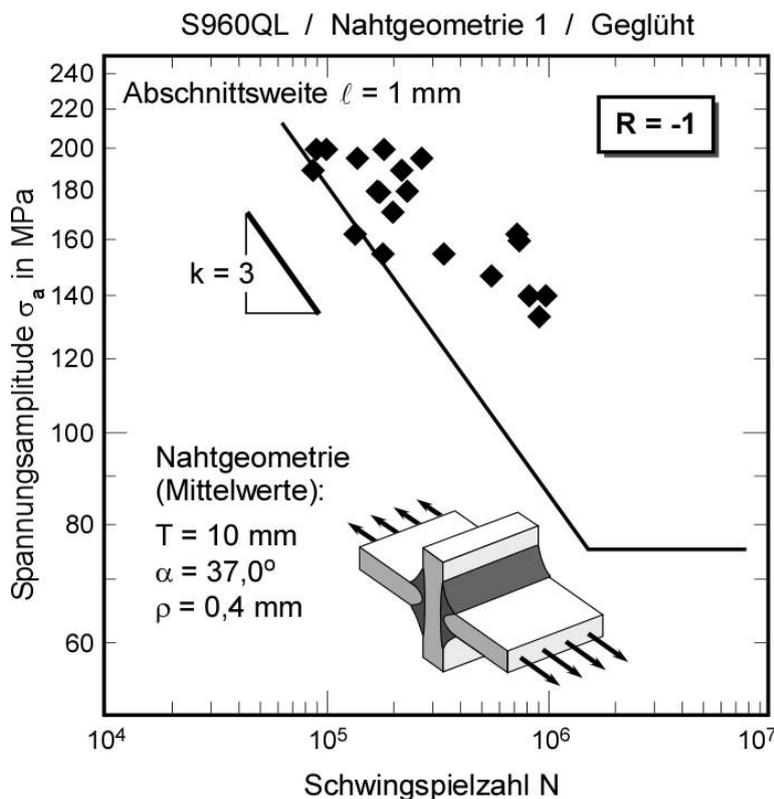


Bild 147:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
Kreuzstoß,
Nahtgeometrie 1,
Gegläht
 $R = -1$
Abschnittsweite $\ell = 1$ mm.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*).

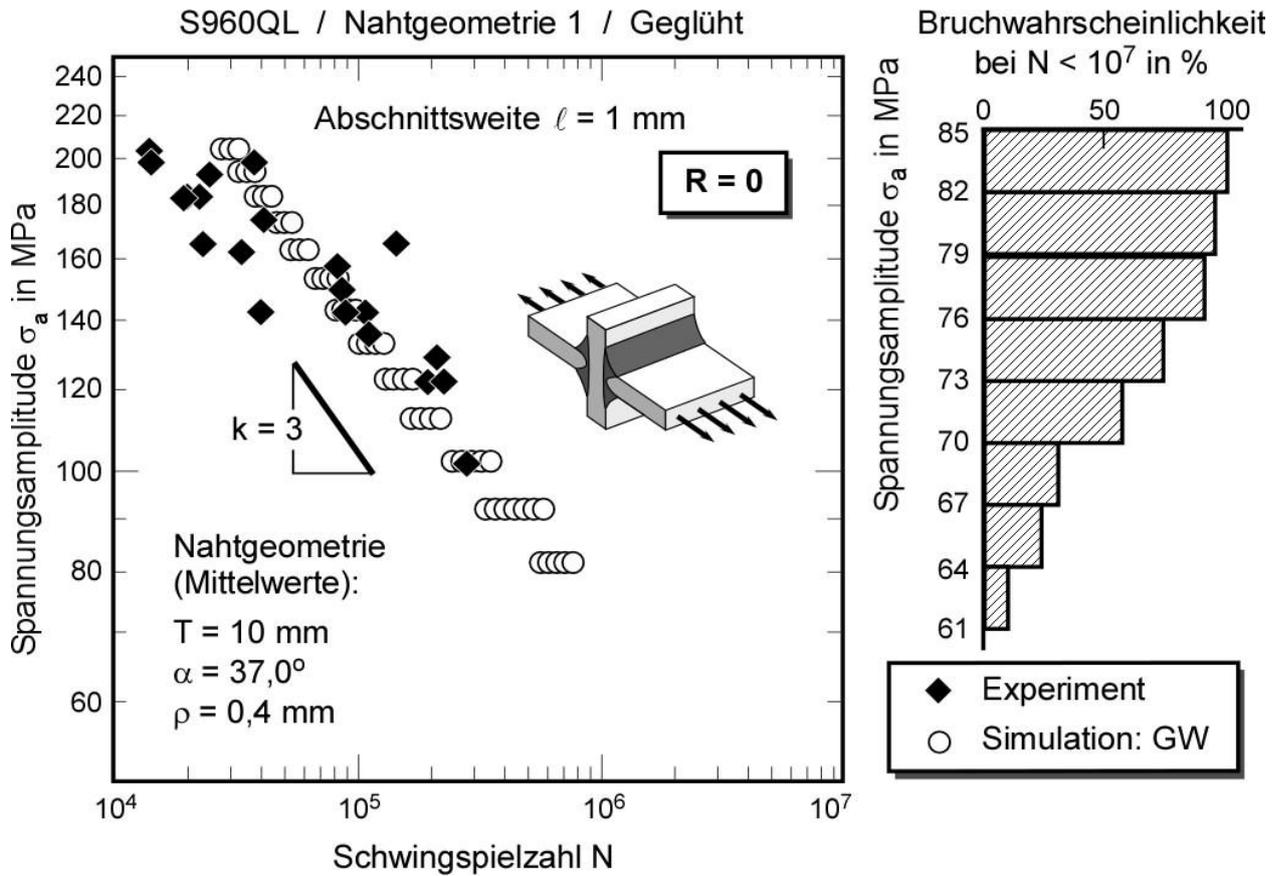


Bild 148: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Abschnittsweite $\ell = 1$ mm; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*); S960QL, Kreuzstoß, Nahtgeometrie 1, geglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff-Daten.

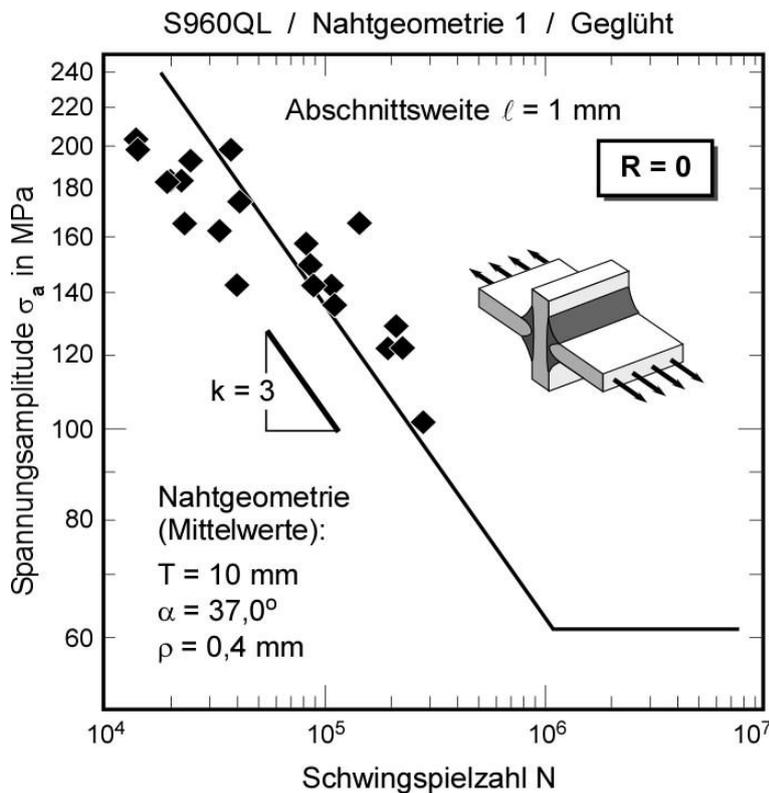


Bild 149:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S960QL,
Kreuzstoß,
Nahtgeometrie 1,
Geglüht
 $R = 0$
Abschnittsweite $\ell = 1$ mm.

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt G3*).

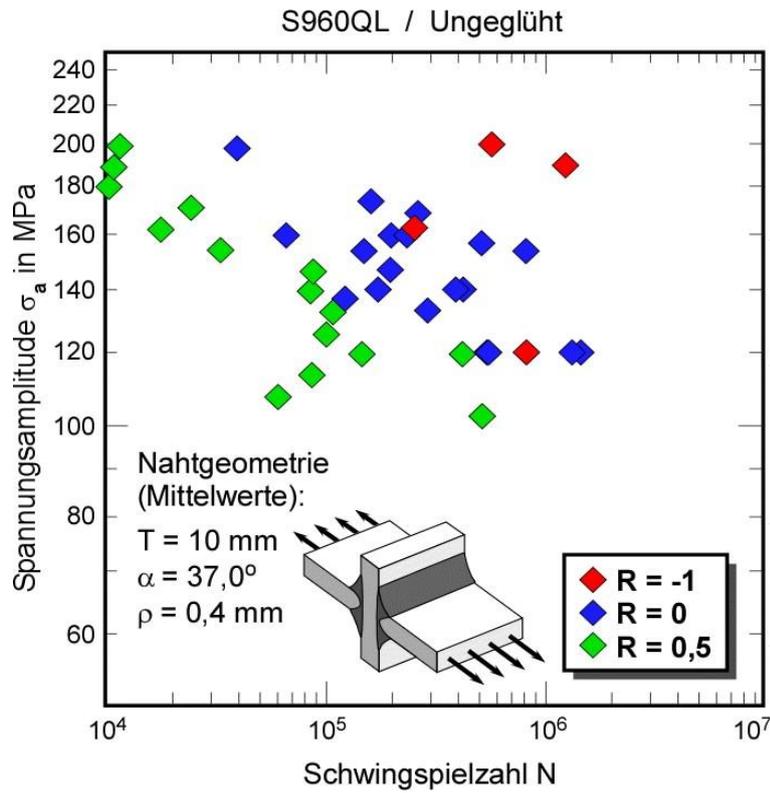


Bild 150:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S960QL, Ungeglüht,

Vergleich der Datensätze für R = -1, R = 0 und R = 0,5.

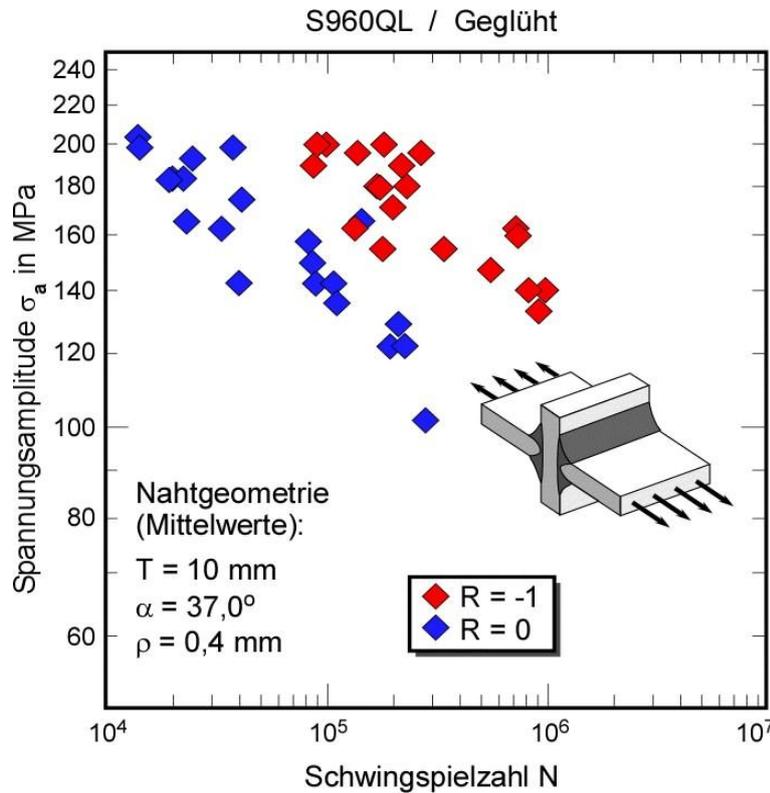


Bild 151:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S960QL, Geglüht,

Vergleich der Datensätze für R = -1 und R = 0.

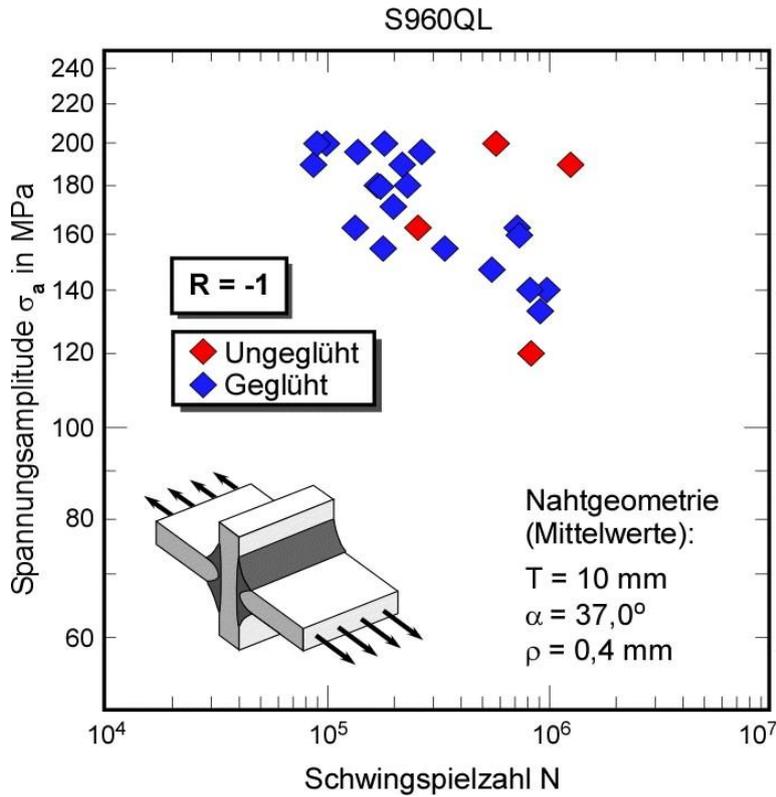


Bild 152:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S960QL, Spannungsverhältnis $R = -1$;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

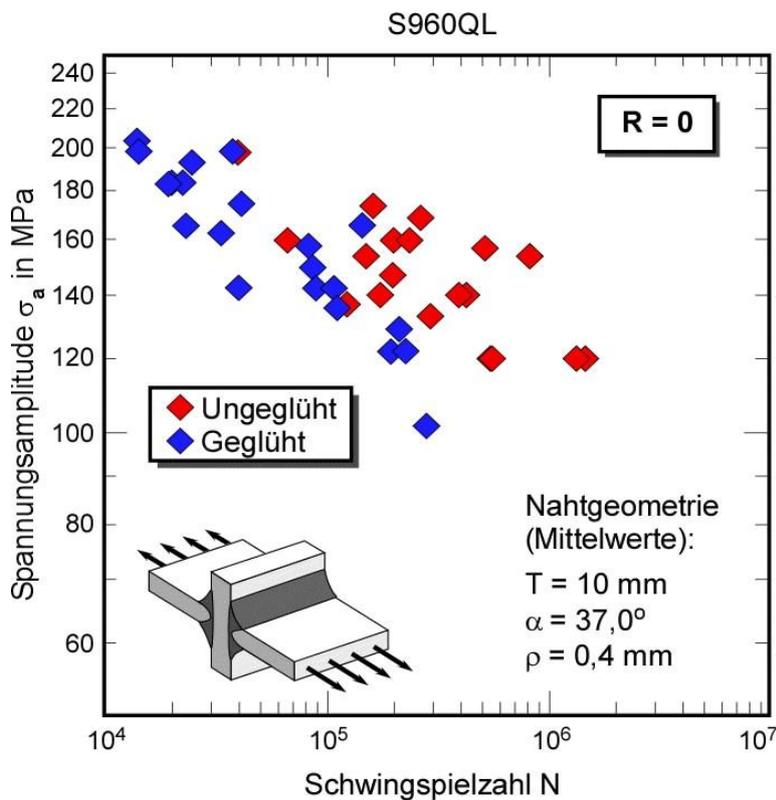


Bild 153:

Schwingfestigkeitsdaten der Kreuzstöße aus S960QL, Spannungsverhältnis $R = 0$;

Vergleich der ungeglühten und spannungsarmgeglühten Datensätze.

4.3.4 Validierung an Längssteifen

4.3.4.1 Vorbemerkung

Anders als bei den bisher betrachteten Stumpf- und Kreuzstößen wurden für Längssteifen in IBESS keine Parametergleichungen für Spannungs-Tiefen-Profile bereitgestellt. Aus diesem Grund wurde auf Finite-Elemente-Daten zurückgegriffen, die in *IBESS-Teilprojekt A4* auf der Basis der gescannten Geometrien der Nähte generiert wurden. Die Abschnittsweite der Segmente, ℓ , die sich aus den Winkeln zur axialen Richtung, für die die Spannungsprofile berechnet wurden ergeben, beträgt ca. 2,1 mm. Die Spannungsprofile sind in **Bild 154** für die beiden betrachteten Nahtgeometrien wiedergegeben. Bei 0° ergaben sich Spannungskonzentrationsfaktoren von 6,5 (Nahtgeometrie 1) und 4,4 (Nahtgeometrie 2).

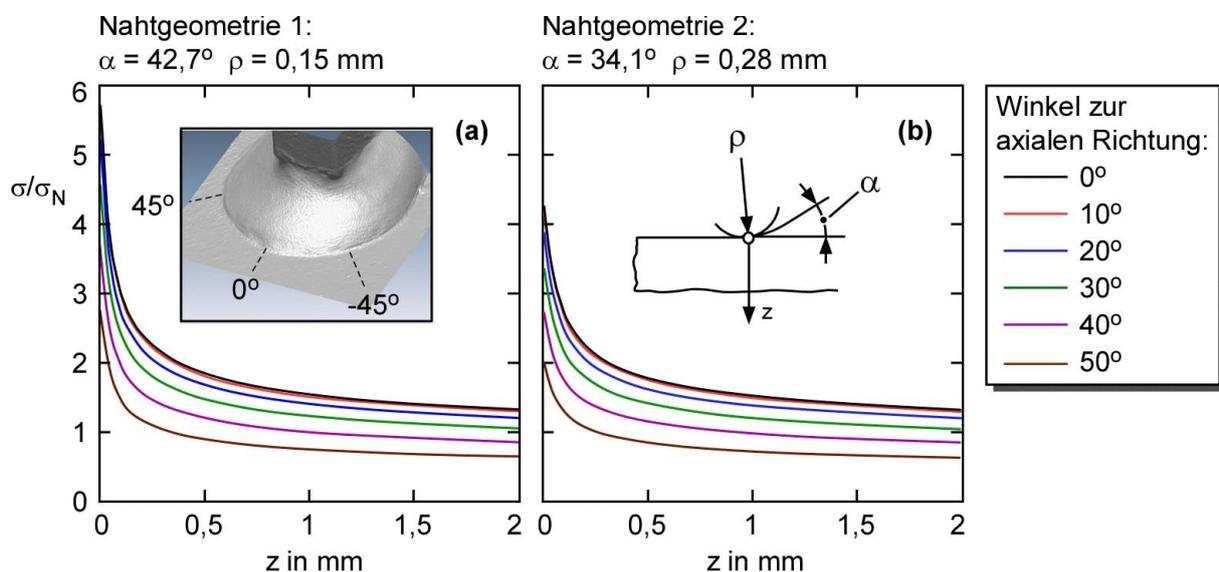


Bild 154: Längssteifen; Spannungs-Tiefen-Profile für die beiden untersuchten Nahtgeometrien in Abhängigkeit vom Winkel zur axialen Richtung; Rechnungen: *IBESS-Teilprojekt A4*.

4.3.4.2 S355NL-Verbindungen

Es wurden sechs Konfigurationen untersucht, und zwar:

- ♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht / $R = 0$
- ♦ Nahtgeometrie 1 / Ungeglüht / $R = 0,5$
- ♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht / $R = 0$
- ♦ Nahtgeometrie 1 / Spannungsarmgeglüht / $R = 0,5$
- ♦ Nahtgeometrie 2 / Ungeglüht / $R = 0$
- ♦ Nahtgeometrie 2 / Spannungsarmgeglüht / $R = 0$

Wie in den übrigen Fällen wurden die Rechnungen zunächst ohne Berücksichtigung von Eigenstressungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 155, 157, 159, 161, 163** und **164** für die obere und in den **Bildern 156, 158, 160, 162, 164** und **166** für die untere Analyse-Ebene wiedergegeben. In allen Fällen lieferten die Analysen konservative Ergebnisse, die aber im Fall von Nahtgeometrie 1 für die geglühten Proben weniger ausgeprägt waren. Die Konservativität

betrug in diesen Fällen etwa Faktor 3,3 bis 6,1 (Lebensdauer) bzw. 40 bis 70% (Spannungsamplitude) für die nichtgeglühten, was grob auch den Verhältnissen für Nahtgeometrie 2 entsprach, und etwa Faktor 2,5 bis 3,3 (Lebensdauer) bzw. 29 bis 43% (Spannungsamplitude) für die spannungsarmgeglühten Proben. Da vermutet werden konnte (was in FEM-Simulationen in *IBESS-Teilprojekt A4* auch bestätigt wurde), dass sich bei der zyklischen Belastung bei jeweils nominal $R = 0$ bzw. 0,5 Druckeigenspannungen im Kerbgrund aufgebaut haben, in deren Gefolge das reale Spannungsverhältnis niedriger war als das nominale, wurden die Rechnungen zusätzlich für $R = -1$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 167** und **168** dargestellt. Tatsächlich lieferten sie für Nahtgeometrie 2 Ergebnisse, die mit den Experimenten praktisch zusammenfielen, während für Nahtgeometrie 1 tendentiell nichtkonservative Ergebnisse erreicht wurden. Allerdings sollten die Ergebnisse nicht überinterpretiert werden, da die Abschnittsweite ℓ im vorliegenden Fall durch die Verfügbarkeit der FEM-Spannungsprofile vorgegeben war. Sie betrug als Bogenabschnitt entlang des Nahtübergangs, wie erwähnt, etwa 2,1 mm. Die Untersuchungen in Abschnitt 4.3.1 hatten ergeben, dass der vorhergesagte Zeitfestigkeitsast auch von der Abschnittsweite abhing, wobei sich $\ell = 2$ mm eher nicht-konservativ auswirkte.

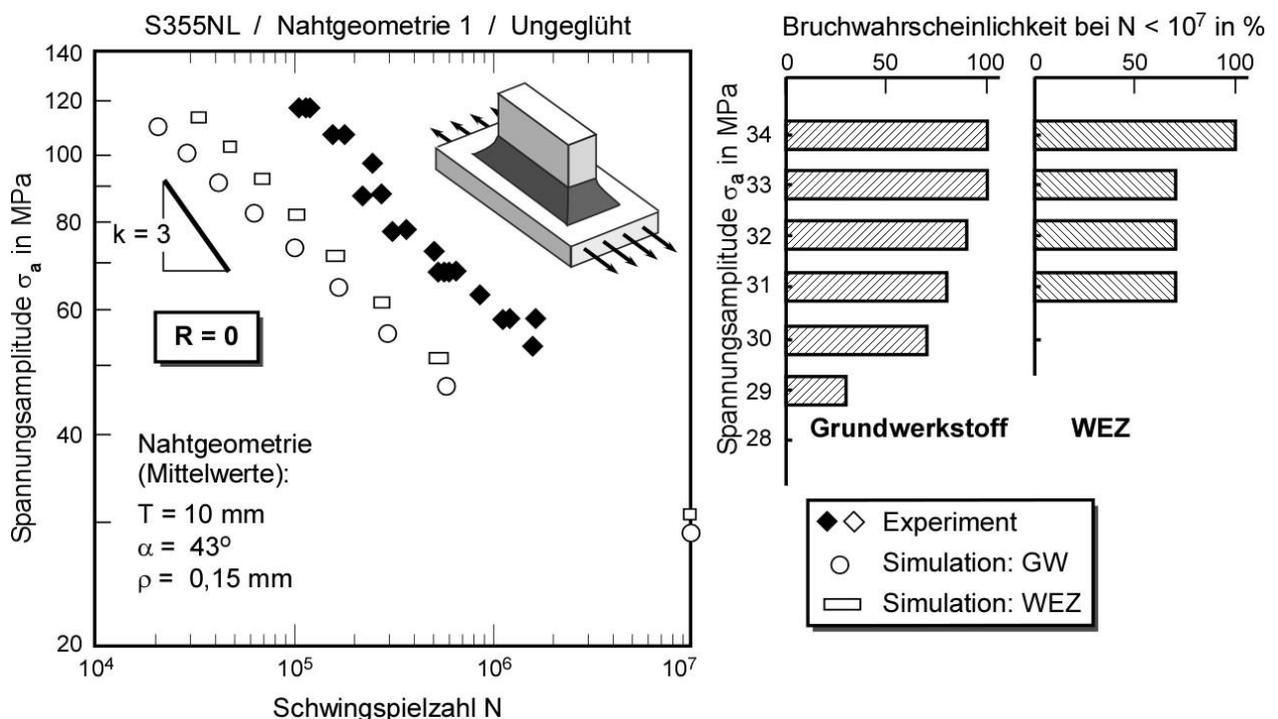


Bild 155: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

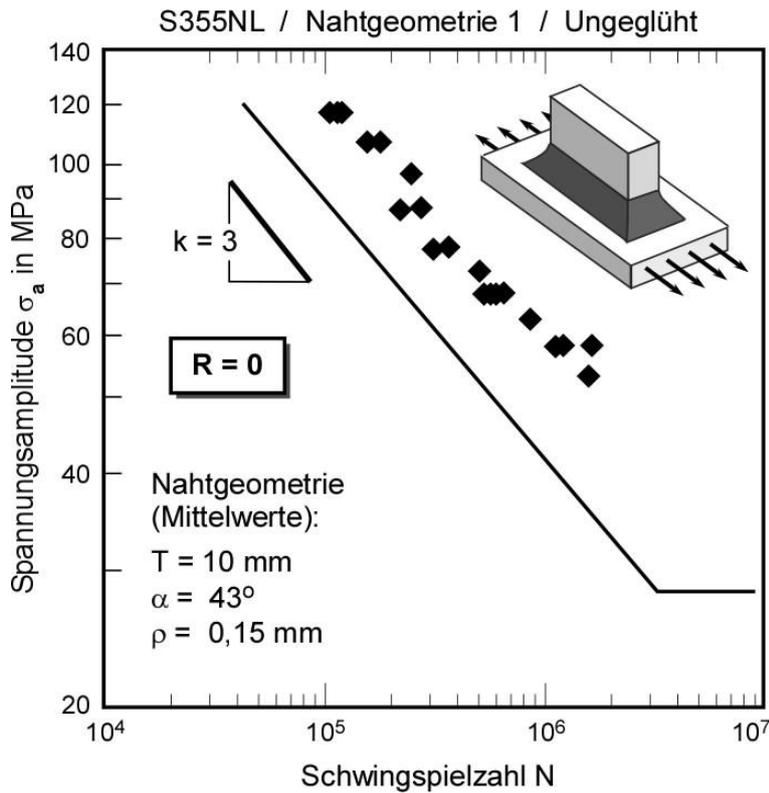


Bild 156:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Längssteife,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 R = 0

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*).

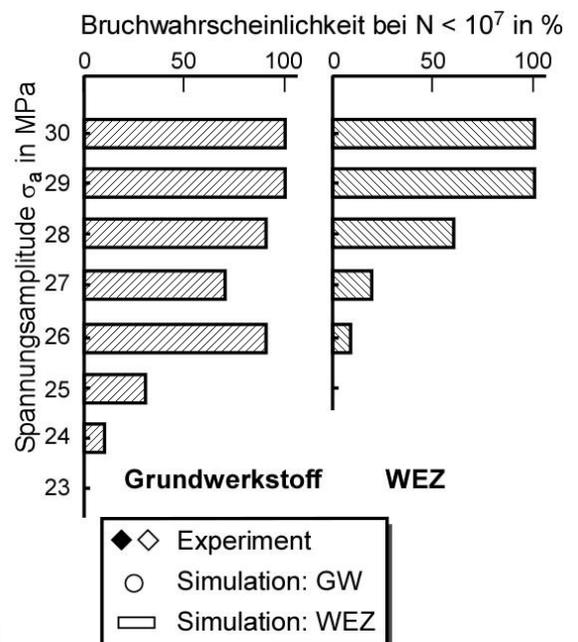
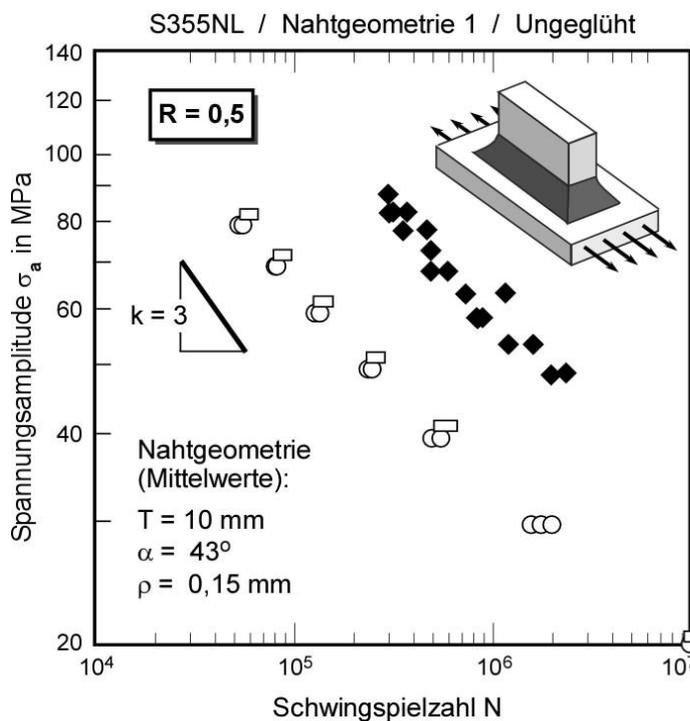


Bild 157: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 1, ungeglüht, R = 0,5, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

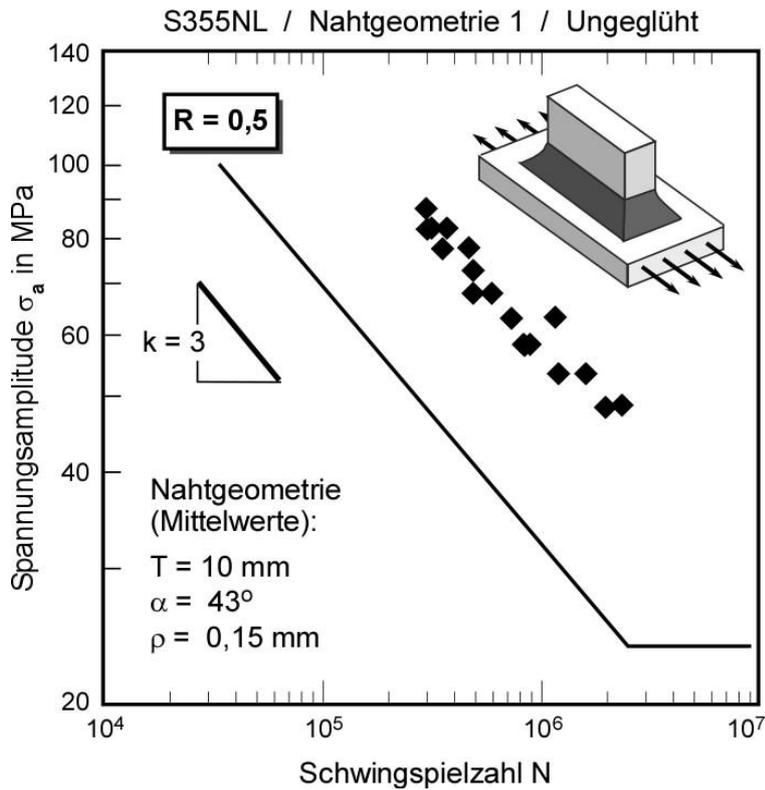
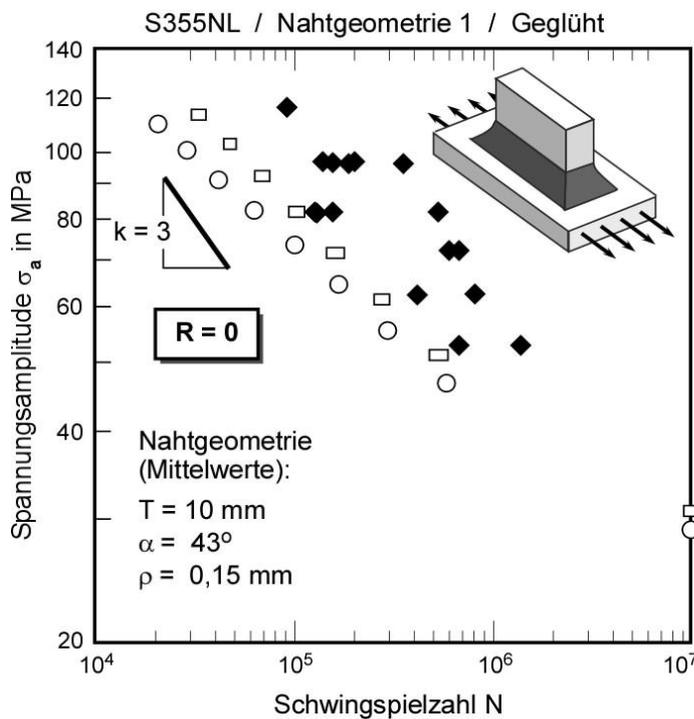


Bild 158:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Längssteife,
 Nahtgeometrie 1,
 Ungeglüht
 $R = 0,5$

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*).



Bruchwahrscheinlichkeit bei $N < 10^7$ in %

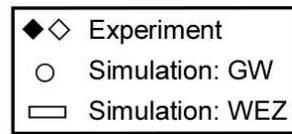
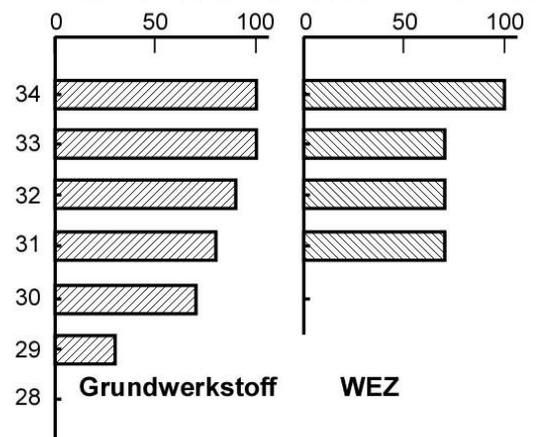


Bild 159: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 1, geblüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

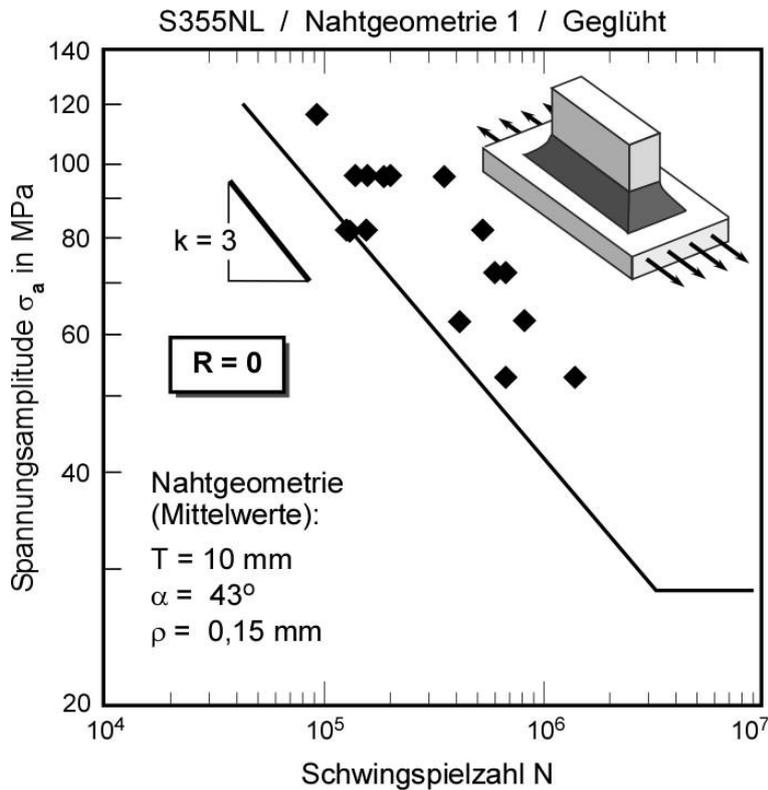


Bild 160:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Längssteife,
 Nahtgeometrie 1,
 Geglüht
 R = 0

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*).

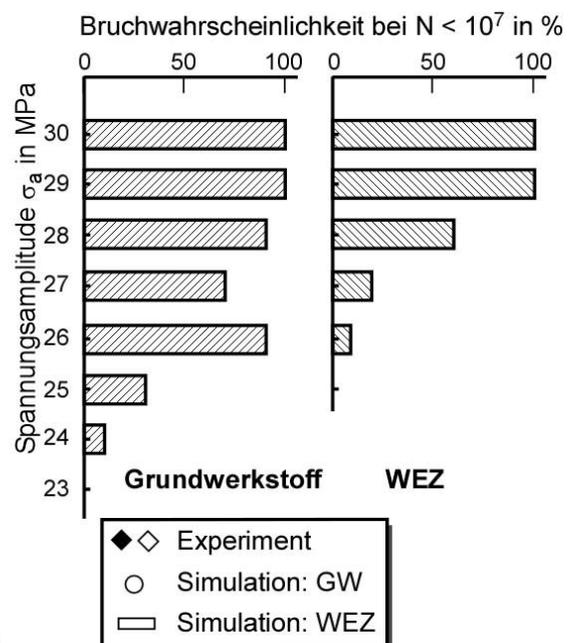
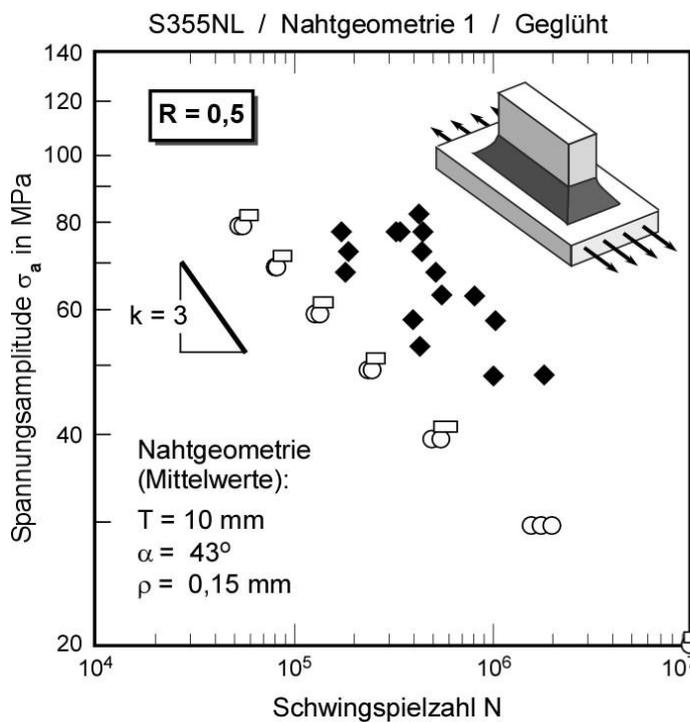


Bild 161: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 1, geglüht, R = 0,5, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

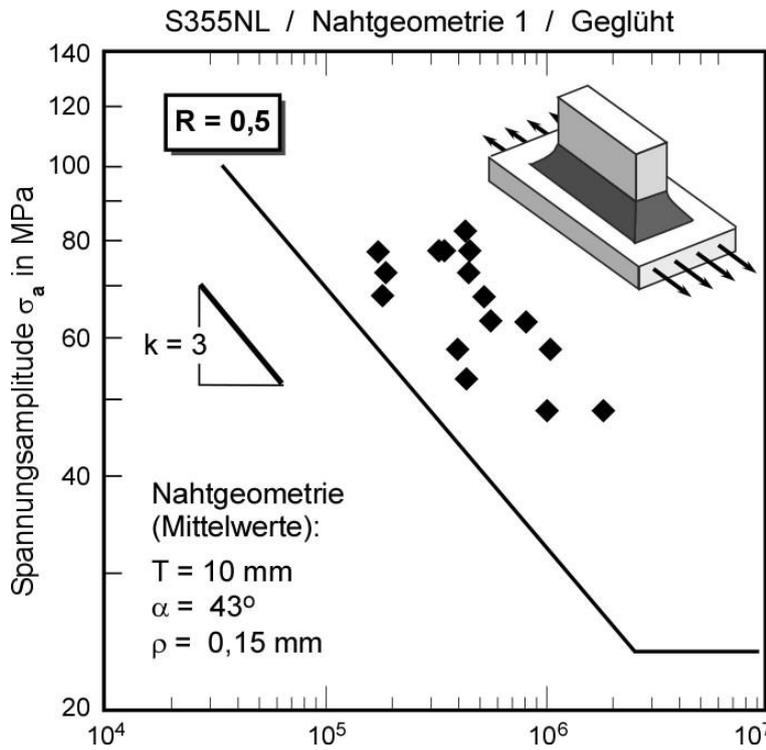


Bild 162:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Längssteife,
 Nahtgeometrie 1,
 Geglüht
 $R = 0,5$

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*).

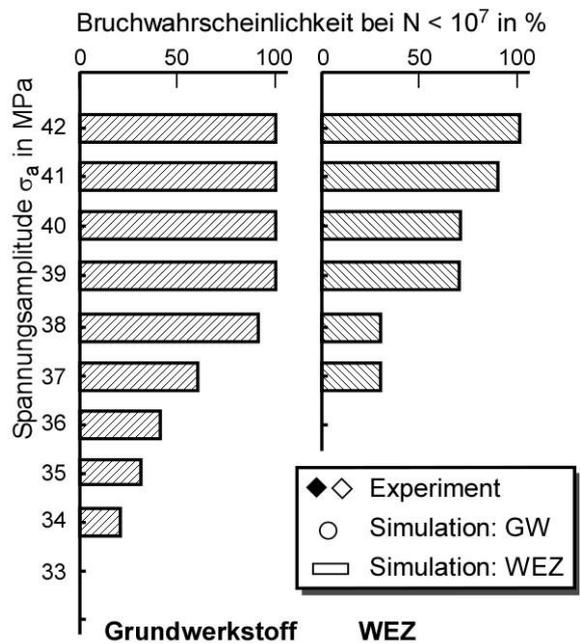
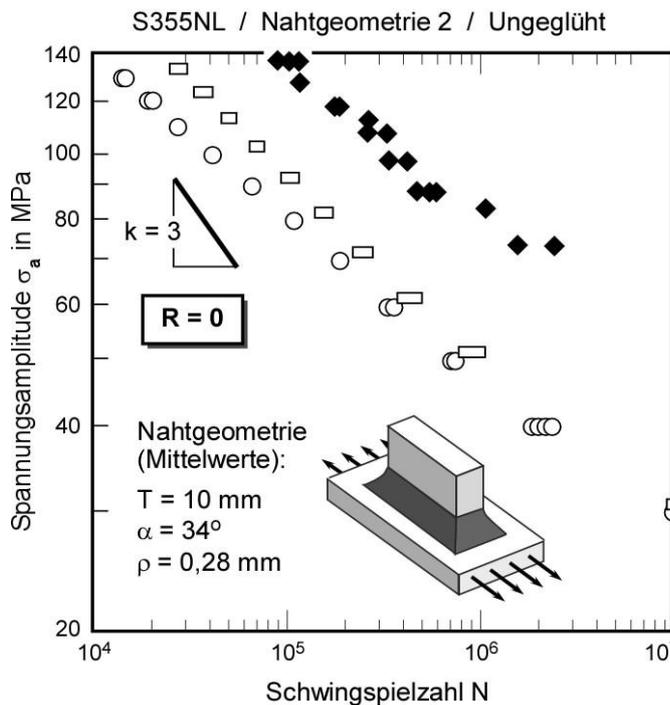


Bild 163: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 2, ungeglüht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

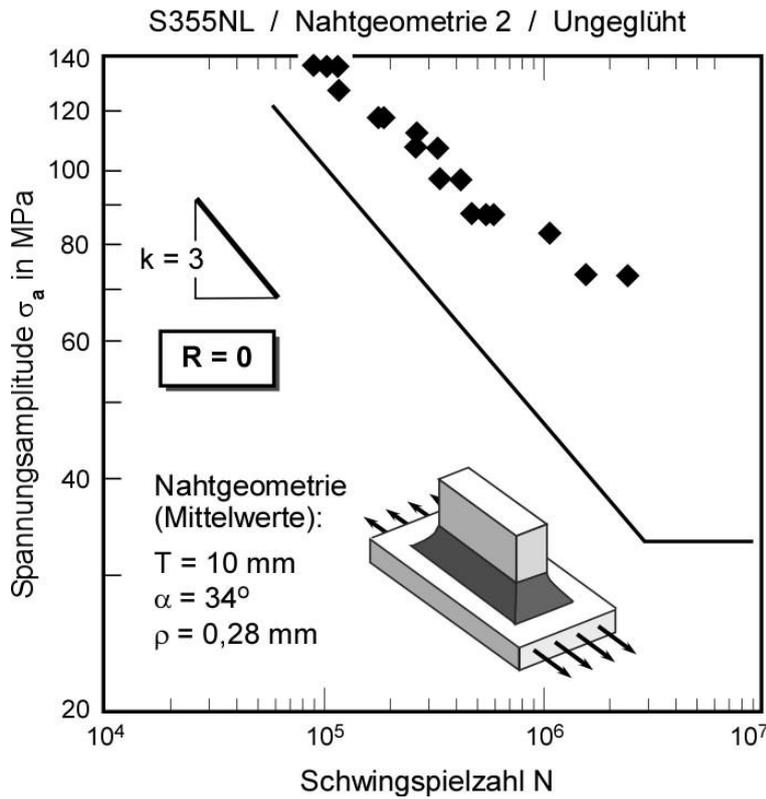
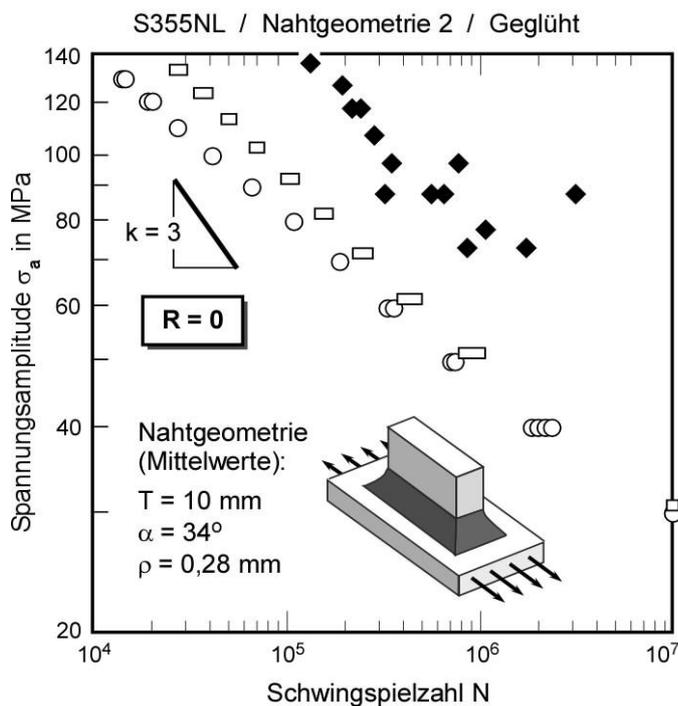


Bild 164:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Längssteife,
 Nahtgeometrie 2,
 Ungeglüht
 $R = 0$

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*).



Bruchwahrscheinlichkeit bei $N < 10^7$ in %

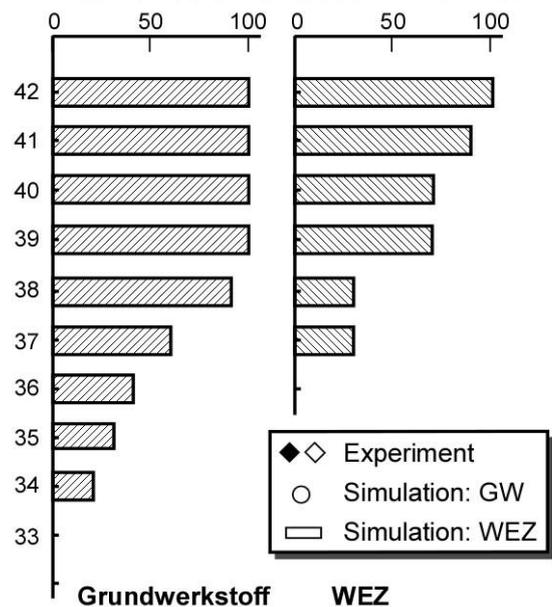


Bild 165: IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve und der Dauerfestigkeit; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 2, gegläht, $R = 0$, Grundwerkstoff- und WEZ-Daten.

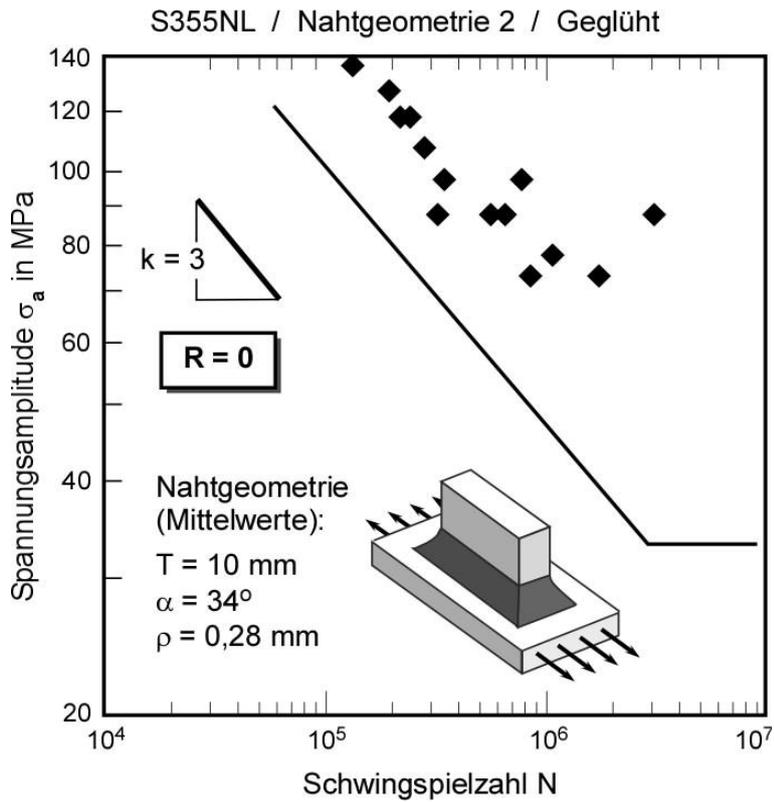


Bild 166:

IBESS-Analyse vorgeschlagene untere Analyse-Ebene nach Bild 76.

S355NL,
 Längssteife,
 Nahtgeometrie 2,
 Geglüht
 R = 0

Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*).

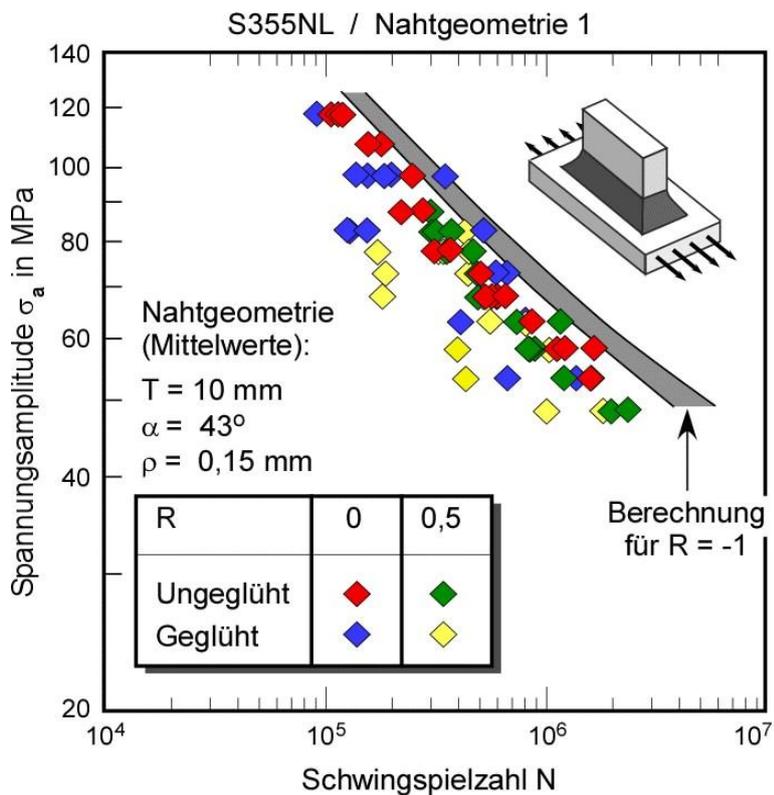


Bild 167:

IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve auf der Basis von R = -1; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 1, WEZ-Daten.

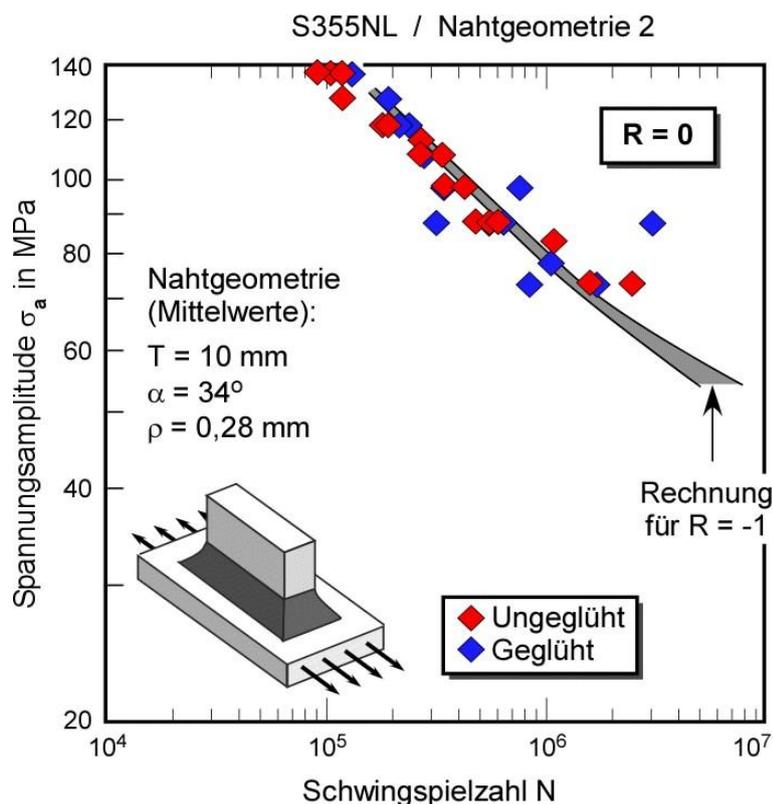


Bild 168:

IBESS-Berechnung des Zeitfestigkeitsastes der Wöhlerkurve auf der Basis von $R = -1$; Vergleich mit experimentellen Daten (aus *IBESS-Teilprojekt A4*); S355NL, Längssteife, Nahtgeometrie 2, WEZ-Daten.

4.4 Anbindung an Schweißnahtgüten

Ähnlich wie die Werkstoffdaten für die WEZ sind auch gemessene und statistisch aufbereitete Daten der lokalen Nahtgeometrie in aller Regel nicht verfügbar. Da sie gleichwohl im Hinblick auf die Berechnung der Schwingfestigkeit essentiell sind, muss nach einer Möglichkeit gesucht werden, derartige Informationen auf einfacherem Wege zu erhalten. In Abschnitt 3.2.5 wurde bereits auf Bestrebungen verwiesen, Schweißnahtgüten und Anforderungen an FAT-Klassen zusammenzubringen. **Bild 169** zeigt eine Anwendung. Unter Heranziehung der Maße für den Nahtübergangsradius, den Nahtanstiegswinkel, die Nahtüberhöhung, den Kantenversatz und den Winkelverzug lässt sich der Stumpfstoß aus S355NL, der in Abschnitt 4.3.1 bereits intensiv diskutiert wurde, Gütegruppe C63 nach ISO 5817, Anhang C [93] zuordnen. Im Bild ist erkennbar, dass die mit diesen Maßen mittels IBESS berechnete Wöhlerkurve eine untere Hüllkurve zu den Experimenten bildet, während die höherwertigeren Bewertungsgrößen B90 und v.a. B125 mit höheren Schwingfestigkeiten korrespondieren. Die in *IBESS-Teilprojekt A1* durchgeführte Simulation ist als eine erste Demonstration zu verstehen. Sie soll zeigen, dass es möglich sein sollte, mit Hilfe der IBESS-Prozedur Informationen zu generieren, die rückbezüglich bei der Diskussion künftiger Neufassungen der Schweißnahtgüte unter Einbeziehung ermüdungsrelevanter Aspekte angewendet werden können.

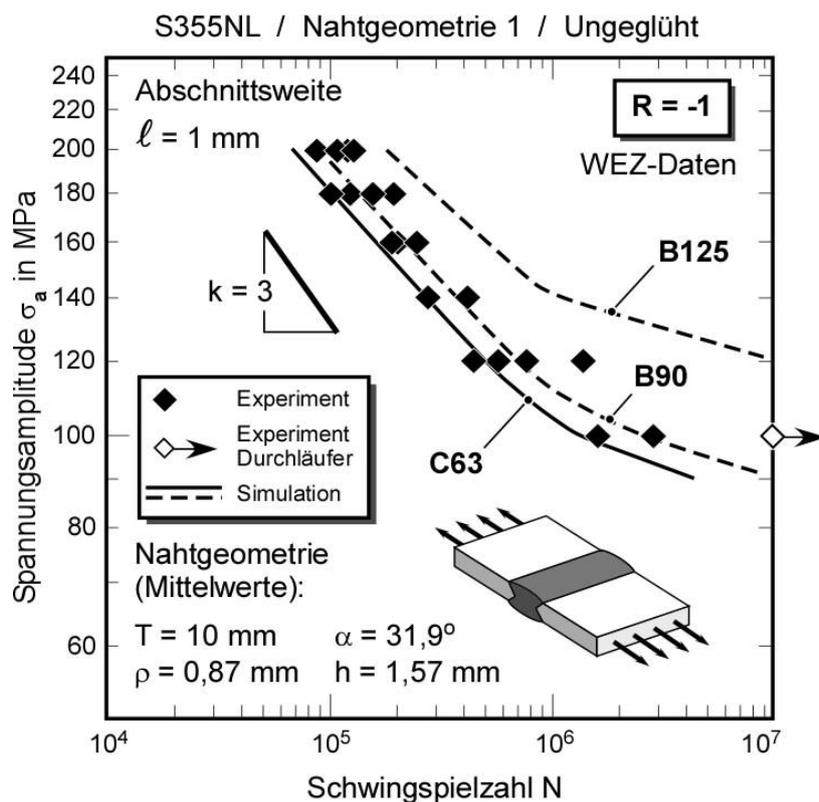


Bild 169: Bestimmung der Schwingfestigkeit für die Gütegruppen C63, B90 und B 125 nach ISO 5817, Anhang C [93];

Vergleich mit experimentellen Daten an Schweißnahtproben, die Gütegruppe C63 entsprechen.

IBESS-Teilprojekt A1

4.5 Dauerfestigkeit

Hinsichtlich der ebenfalls ermittelten Dauerfestigkeit konnte, wie gesagt, keine Validierung vorgenommen werden. Da diese Option ursprünglich nicht eingeplant war, wurden mit Ausnahme einzelner Durchläufer keine Dauerfestigkeitsdaten generiert. Um wenigstens eine grobe Einschätzung der IBESS-Analysen zu ermöglichen, wurden die Untergrenzen der Dauerfestigkeit (wo vorhanden auf der Basis von WEZ-Daten) mit den Angaben in [102] verglichen. Dort hat der Autor für eine sehr große Datenbasis von ca. tausend Versuchsreihen an Baustählen Spannungsamplituden bei $N = 2 \cdot 10^6$ für verschiedene Verbindungsformen und R-Verhältnisse statistisch ausgewertet. Die Werte werden in **Tabelle 10** den berechneten Ergebnissen dieser Studie gegenübergestellt, wobei die jeweiligen Untergrenzen der für $N = 10^7$ definierten Dauerfestigkeit aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit durch die ebenfalls ermittelten Untergrenzen der Spannungsamplitude bei $N = 2 \cdot 10^6$ ergänzt werden.

Sämtliche Daten für Stumpfstoße passen sich gut in die statistisch aufbereiteten Daten von [112] ein. Das gilt mit geringer Einschränkung (Datensatz S355 NG1 U bei $R = 0$, der jedoch unsicher ist) auch für die Längssteifen bei $R = 0$. Abweichungen ergeben sich bei den Längssteifen evtl. bei $R = 0,5$, wo die Datenbasis aber ebenfalls unsicher ist, und bei den für $R = -1$ berechneten Kreuzstößen, wo die für $N = 2 \cdot 10^6$ ermittelten Spannungsamplituden oberhalb der 90%-Obergrenze nach [112] liegen und bei zwei Kreuzstößen für $R = 0$, die geringere Werte als die 10%-Untergrenze nach [112] aufweisen. Die übrigen Kreuzstöße für $R = 0$ liegen im erwarteten Bereich. Im Falle der in Klammern gesetzten „unsicheren“ Ergebnisse, lagen im Bereich um $N = 2 \cdot 10^6$ keine Datenpunkte vor, eine Extrapolation war jedoch anders als bei den durch „-“ gekennzeichneten Datensätzen sinnvoll möglich.

An dieser Stelle soll noch einmal erwähnt werden, dass es sich bei dem Vergleich nicht um eine Validierung handelt, die mit Hilfe experimenteller Daten durchgeführt werden müsste. Es kann aber festgehalten werden, dass sich die berechneten Dauerfestigkeitswerte hinreichend gut in das konventionell vorhandene Wissen einfügen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Dauerfestigkeitswerte für Baustähle nach [102] und der mittels IBESS ermittelten Untergrenzen dafür

Geometrie	R	Katalog Ritter [102] σ_a in MPa bei $N = 2 \times 10^6$			IBESS σ_a in MPa ¹⁾ bei $N =$		Konfiguration
		10%	50%	90%	$2 \cdot 10^6$	10^7	
Stumpfstoß	-1	89	109	129	95	79	S355 NG1 U
					95	79	S355 NG1 G
					117	97	S960 NG1 U
					117	97	S960 NG1 G
	0	53	69	85	64	60	S355 NG1 U
					64	60	S355 NG1 G
					70	62	S355 NG2 U
					73	68	S355 NG2 G
					80	75	S355J2+N U
					-	95	S960 NG1 U
-					95	S960 NG1 G	
>0,2 ₂₎	52	64	76	67	60	S355J2+N U	
				-	77	S9650 NG1 U	
Kreuzstoß ³⁾	-1	54	64	74	93	72	S355 NG1 U
					93	72	S355 NG1 G
					83	73	S960 NG1 U
					83	73	S960 NG1 G
	0	52	62	72	58	50	S355 NG1 U
					58	50	S355 NG1 G
					42	35	S355 NG2 U
					42	35	S355 NG2 G
					-	65	S960 NG1 U
					-	60	S960 NG1 G
Längssteife	0	37	45	53	(34) ⁴⁾	30	S355 NG1 U
					(40)	30	S355 NG1 G
					(43)	36	S355 NG2 U
					(42)	36	S355 NG2 G
	>0,2 ₂₎	35	39	43	(28)	25	S355 NG1 U
					-	25	S355 NG1 G

¹⁾ jeweils untere Grenzwerte ²⁾ IBESS: R = 0,5 ³⁾ Kreuzstoß mit K-Naht (Nomenklatur in [112])

⁴⁾ „()“ = Ermittlung unsicher; „-“ = es liegen keine Werte vor.

5. Zusammenfassung und offene Fragen

Es wurde eine Methodik erarbeitet, die die Ermittlung von Wöhlerkurven an Schweißverbindungen erlaubt, und durch folgende Aspekte charakterisiert ist:

- ♦ Die Rissausbreitung unter zyklischer Beanspruchung wird sowohl für mechanisch/physikalisch kurze als auch für lange Risse simuliert.
- ♦ Hinsichtlich der mechanisch kurzen Risse wird die Rissspitzenbelastung durch einen elastisch-plastischen Parameter ΔK_p beschrieben, der den lokalen Plastifizierungsbedingungen an der Rissspitze Rechnung trägt. Die Ermittlung lehnt sich an etablierte Methoden wie R6, BS7910 und SINTAP an, modifiziert diese jedoch für zyklische Belastung. Vergleiche mit dem Ansatz nach Dowling und mit Finite-Elemente-Simulationen ergaben zufriedenstellende Übereinstimmung. Lediglich bei steilerem Nahtanstieg und einem höheren Spannungsniveau wurden nichtkonservative Abschätzungen erhalten. Diese sind mutmaßlich neben Eigenspannungsumlagerungen für die konservativ vorhergesagten Zeitfestigkeitsäste bei den Kreuzstößen aus S355NL verantwortlich.
- ♦ Die für ΔK_p benötigte Plastizitätskorrekturfunktion basiert auf einem Ausdruck ΔL_r , der an die oben genannten Verfahren angelehnt ist, die üblicherweise angewendete Grenzlast bzw. Referenzspannung jedoch durch eine genauere und parallel zum vorliegenden *Teilprojekt* ermittelte Referenzfließspannung σ_0 ersetzt. Für letztere wurden auf der Basis von FE-Rechnungen parametrisierte analytische Gleichungen für Platten unter Zug-, Biege- und kombinierter Zug-Biege-Belastung bereitgestellt.
- ♦ Der graduelle Aufbau der Rissschließeffekte der physikalisch kurzen Risse wird durch die Verknüpfung der Rissschließfunktion $U(a)$, $U = \Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$, mit der sogenannten zyklischen R-Kurve modelliert. Letztere wurde sowohl experimentell ermittelt, als auch auf der Basis eines i Rahmen von IBESS modifizierten Kitagawa-Takahashi-Modells abgeschätzt.
- ♦ Es wurde eine Methode zur (statistischen) Abschätzung der für $N = 10^7$ definierten Dauerfestigkeit entwickelt. Diese nutzt die zyklische R-Kurve und beruht auf Rissarrestbetrachtungen (die Dauerfestigkeit ist dadurch gegeben, dass sie die Grenze zwischen Arrest und Nichtarrest des größten einer größeren Anzahl an zuvor wachstumsfähigen mikrostrukturell kurzen Rissen markiert). Dass geringfügig oberhalb des Dauerfestigkeitsniveaus gerade ein ausbreitungsfähiger Riss existiert, wurde experimentell nachgewiesen.
- ♦ Die Methodik wird zweifach genutzt: Zum einen wird auf ihrer Grundlage eine Untergrenze für die in der Bruchmechanikanalyse benötigte Ausgangsrisstiefe bestimmt. Diese ergibt sich als diejenige Risstiefe, die bei einem Spannungsniveau auf der Höhe der Werkstoffdauerfestigkeit gerade noch arretiert. Als Ausgangsrisssgeometrie wird ein Halbkreis angenommen. Im weiteren wird diese Information angewendet, um die Dauerfestigkeit, sprich: die Spannungsamplitude bei 10^7 Schwingspielen der geschweißten Verbindung zu berechnen.
- ♦ Bei Spannungsamplituden oberhalb der Dauerfestigkeit werden Mehrfachrisse entlang des Nahtübergangs angenommen. Die Existenz solcher Mehrfachrisse wurde im Projekt experimentell nachgewiesen.

- ◆ Um Mehrfachrissausbreitung zu simulieren, wird der Nahtübergang in äquidistante Abschnitte eingeteilt. Jeder dieser Abschnitte enthält genau einen Ausgangsriss und ist durch eine lokale Nahtgeometrie charakterisiert, die durch die Parameter Nahtübergangsradius, Nahtanstiegswinkel, Nahtüberhöhung und Sekundärkerbtiefe beschrieben wird. Letztere kann durch einen Einbrandkerb gegeben sein oder (wenn ein solcher nicht vorhanden ist) durch andere Unregelmäßigkeiten wie die Rauigkeit der verschweißten Bleche in der Nähe des Nahtübergangs oder auch die Schweißnahtraupen.
- ◆ Das Risswachstum wird zunächst für die Einzelrisse simuliert. Berühren sich zwei solche Risse, wird Risskoaleszenz angenommen, und die Rechnung wird mit dem daraus resultierenden Gesamtriss fortgesetzt.
- ◆ Das Abbruchkriterium ist flexibel wählbar. Die Validierungsbeispiele nehmen konservativ Bauteilversagen an, wenn die Tiefe des durch mehrfache Koaleszenz entstandenen Risses die halbe Plattendicke beträgt. Denkbar ist auch eine kritische Risstiefe bei Erreichen des statischen Bruchwiderstands. Auch dafür wurden die Eingangsdaten der Werkstoffe bereitgestellt, und zwar für die Grundwerkstoffe statische R-Kurven auf der Grundlage des J-Integrals und für die Wärmeeinflusszonen (WEZ) statistische Verteilungen des kritischen Risswiderstands auf der Basis der sog. Master-Curve-Methode.
- ◆ Sowohl die statische als auch die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde für die Grundwerkstoffe und ausgewählte Bereiche der Wärmeeinflusszonen ermittelt, davon die Daten für die 3mm-Bleche aus S355J2+N im vorliegenden *Teilprojekt*. Ebenfalls im vorliegenden *Teilprojekt* bereitgestellt wurden die Langriss- da/dN - ΔK -Kurven und die entsprechenden Schwellenwerte für die Grundwerkstoffe und Wärmeeinflusszonen, wobei sämtliche WEZ-Versuche an Proben aus gefügesimuliertem Werkstoff durchgeführt wurden, die in *IBESS-Teilprojekt G1* in Zusammenarbeit mit *G2* erzeugt wurden.
- ◆ Alle oben erwähnten Geometrieparameter wurden für die untersuchten Schweißverbindungsformen und deren unterschiedliche Varianten entlang des Nahtübergangs in *IBESS-Teilprojekt A1* (sowie *A4* für die Längssteifen) mit Laserscans und anderen Methoden vermessen und statistisch aufbereitet. In dieser Form standen sie für die weitere Analyse im vorliegenden *Teilprojekt* zur Verfügung.
- ◆ Die Eingangsgröße für die von Abschnitt zu Abschnitt variierende Rissspitzenbeanspruchung ΔK_p ist das Wandtiefenprofil der ersten Hauptspannung. Für die Längssteifen wurde dieses Profil entlang des Nahtübergangs in *Teilprojekt A4* mittels FEM bestimmt, für alle anderen untersuchten Geometrien werden im vorliegenden *Teilprojekt* an FEM-Simulationen angepasste Parametergleichungen zur Verfügung gestellt. Diese basieren auf in der Literatur vorhandenen Ausdrücken, erweitern diese jedoch hinsichtlich ihres Anwendungsbereiches im Blick auf die Geometrieparameter (v.a. Nahtübergangsradius und Nahtanstiegswinkel), und sie verbessern sie hinsichtlich ihrer Genauigkeit, d.h. der Übereinstimmung der approximierten Daten mit den zugrundeliegenden FEM-Werten.
- ◆ Die bereitgestellten Parametergleichungen für die Spannungsprofile, die auch Gleichungen für die Spannungskonzentrationsfaktoren im Kerbgrund des Nahtübergangs einbeziehen, sind anwendbar auf Stumpfstöße mit X- und V-Naht, Quersteifen und Kreuzstöße sowie Zug- und Biegebelastung.

- ◆ Die Anwendung der parametrisierten Spannungsprofile ermöglicht eine hohe Flexibilität der Analysen, beispielsweise konnten auf diese Weise die Abschnittsweiten entlang des Nahtübergangs beliebig variiert werden.
- ◆ Ein weiterer wesentlicher Vorteil der analytischen Methode besteht in einer erheblichen Aufwandsreduzierung hinsichtlich der statistischen Analyse. Eingangsparmeter, die statistisch in das IBESS-Modell einbezogen sind, sind die Ausgangsrissgröße, der Nahtübergangsradius, der Nahtanstiegswinkel, die Nahtüberhöhung und die Sekundärkerbtiefe. Wird Versagen durch Bruch angenommen, kommt noch die Streuung des Bruchwiderstands hinzu. In den vorliegenden Validierungsbeispielen wurde letzteres aber zunächst nicht einbezogen, zumal der Effekt auf die Lebensdauer eher gering ausfallen dürfte.
- ◆ Der Zeitfestigkeitsast wird statistisch ermittelt. Dies geschieht auf der Grundlage der den einzelnen Abschnitten entlang des Nahtübergangs zugewiesenen lokalen Nahtgeometrien oder Spannungstiefenprofile. Für die vorliegenden Validierungen wurden dabei für jedes Lastniveau jeweils 10 Schweißverbindungen „gewürfelt“ und für diese die Lebensdauer berechnet.
- ◆ Ebenfalls statistisch wird die für $N = 10^7$ definierte Dauerfestigkeit berechnet. Die Wahrscheinlichkeitswerte der Dauerfestigkeit ergeben sich dabei bei jedem Spannungsniveau als Quotient der Anzahl der Analysen mit Versagen bei $N < 10^7$ und der Gesamtzahl der Simulationen auf diesem Lastniveau. Im vorliegenden Fall wurden für die Validierung je Spannungsniveau wie im Fall der Zeitfestigkeitsäste 10 Rechnungen durchgeführt.
- ◆ In *Teilprojekt G2* wurden durch kombinierte Messungen mittels mehrerer Verfahren und FE-Analysen Oberflächen- und Tiefenprofile der (potentiell rissöffnenden oder -schließenden) Transversaleigenstressungen ermittelt. Es stellte sich heraus, dass die Eigenstressungen infolge des Fertigungsprozesses an der Oberfläche des Nahtübergangs entweder null betragen oder leicht im Druckbereich waren, während in Wandtiefenrichtung moderate Zugeigenstressungen ermittelt wurden. Ausnahmen bildeten die Längssteifen, bei denen moderate Zugeigenstressungen auch an der Oberfläche gemessen wurden. Ursache ist, dass diese Probenform „in sich verspannt“ und somit mit Reaktionsspannungen beaufschlagt ist.
- ◆ Bei der zyklischen Belastung kommt es zu Eigenstressumlagerungen. FEM-Analysen in *Teilprojekt G3* ergaben dabei einen signifikanten Unterschied zwischen der Belastung mit Spannungsverhältnissen von $R = -1$ und $R = 0$. Während für $R = -1$ die Eigenstressungen für simulierte Kreuzstöße aus S355NL unabhängig davon, ob infolge des Fertigungsvorgangs Zug- oder Druckeigenstressungen vorlagen, Spannungsrelaxation eintrat, bildeten sich bei Beaufschlagung mit $R = 0$ Druckeigenstressungen, wobei es keine Rolle spielte, ob der Ursprungszustand Zug- oder Druckeigenstressungen umfasste. Im letztgenannten Fall nahmen die ursprünglichen Druckeigenstressungen noch zu.
- ◆ Diese Beobachtung lieferte ungeachtet der begrenzten Informationsbreite (nur Kreuzstöße aus S355NL, nur Eigenstressungen im Kerbgrund) eine Begründung für die bei der Validierung gemachte Beobachtung, dass mit $R = -1$ belastete Schweißverbindungen überwiegend sehr gute Vorhersagen lieferten, wenn die Eigenstressungen außer Acht gelassen wurden, während die Vorhersagen bei $R = 0$ und $R = 0,5$ konservativ waren. Das reale R -Verhältnis bei Einbeziehung der Druckeigenstressungen war einfach geringer als das nominale R -Verhältnis. Die Kombination aus Experimenten und Rechnungen ergab ebenfalls, dass der Effekt, wie zu erwarten, auf höheren Spannungsniveaus größer war als auf niedrigen.

- ◆ Es wird diskutiert und begründet, warum Eigenspannungen im Rahmen des IBESS-Modells generell als Primärspannungen behandelt werden sollten, was von den Vorgaben konventioneller Bruchanalysen abweicht.
- ◆ Hinsichtlich der Eigenspannungen aus dem Fertigungsprozess (vor ihrer Umlagerung bei Schwingbelastung) ergab der Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenspannungstiefen-Profile, dass eine Übertragung von Profilen aus Kompendien (etwa BS7910) auf andere Konfigurationen nicht sinnvoll möglich ist. Das betraf insbesondere die in IBESS untersuchten Schweißverbindungen mit dem Rissausgang im Nahtübergang.
- ◆ Das IBESS-Modell wurde im vorliegenden *Teilprojekt* als Computerprogramm umgesetzt, das in der Folge für die durchgeführten Validierungen benutzt sowie allen IBESS-Teilprojekten zur Verfügung gestellt wurde.
- ◆ Die Validierung erfolgte mehrstufig und umfasste die Nachrechnung des Wachstums von Einzelrissen und von Wöhlerkurven. Erstere ergaben erwartungsgemäß gute Übereinstimmung mit den Experimente für $R = -1$, jedoch konservative Ergebnisse für $R = 0$. Ursache dürfte der in den Rechnungen nicht berücksichtigte Aufbau von Druckeigenspannungen im Nahtübergang sein.
- ◆ Die weitere Validierung der IBESS-Prozedur erfolgte an 3 Schweißverbindungsformen (Stumpf- und Kreuzstoß sowie Längssteife) mit jeweils zwei Realisierungen, d.h. Fertigungsverfahren bzw. Nahtgeometrien aus 2+1 Werkstoffen (S355NL, S960QL, S355J2+N) im nicht-geglühten und spannungsarmgeglühten Zustand und für R-Verhältnisse zwischen $R = -1$ und $R = 0,5$. Insgesamt wurden in verschiedenen *IBESS-Teilprojekten* (einschließlich dem vorliegenden) 33 Wöhlerkurven, genauer: deren Zeitfestigkeitsäste generiert. Mit Ausnahme der S355J2+N-Verbindungen, die aus 3 mm dicken Blechen bestanden, waren alle Platten 10 mm dick. Berücksichtigt wurden nur Wöhlerkurvenpunkte, bei denen das Versagen am in der Rechnung betrachteten Nahtübergang stattfand. Das hatte trotz des Vorabstrahlens der nicht-erwünschten Nahtübergänge zur Folge, dass insbesondere bei flachem Nahtübergang etliche Versuchspunkte verworfen werden mussten, weil die Risse den „falschen“ Ausgangsort hatten. Diese Daten sind in den vorliegenden Bericht nicht mit aufgenommen.
- ◆ Die Ergebnisse der Validierung lassen sich verschiedenen Gruppen zuordnen. Die Nachrechnung der Versuche bei $R = -1$ lieferte, wie erwähnt, überwiegend gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Das trifft auch auf die Versuche an den 3-mm-Blechen aus S355J2+N und auf die Verbindungen aus S960 zu, die allerdings eine erhebliche Streuung aufwiesen.
- ◆ Übereinstimmung zwischen Experiment und IBESS-Rechnung bei $R = -1$ wurde bei den S355-Proben erwartungsgemäß dann erzielt, wenn die Rechnungen mit den Eingangsdaten der Wärmeeinflusszone durchgeführt werden. Das entspricht der Beobachtung, dass sich das frühe, lebensdauerbestimmende Risswachstum in diesem Werkstoffbereich abspielt.
- ◆ Konservative Ergebnisse wurden, auch das wurde bereits erwähnt, für $R = 0$ oder $0,5$ erhalten. Ursache dürften die Druckeigenspannungen, die das reale R gegenüber dem Nominalwert herabsetzen, und bei Nähten mit steilem Nahtanstieg eine Überschätzung des ΔK_p im Kurzrissbereich bei höheren Spannungsamplituden sein.

- ◆ In nahezu allen Fällen bei denen keine Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung erzielt wurde, waren die Ergebnisse der Simulationen konservativ. Die wenigen Fälle geringer Nichtkonservativität treten im Zusammenhang mit großen Streubändern der experimentellen Daten auf.
- ◆ Die im Projekt entwickelte Methode zur statistischen Bestimmung der für $N = 10^7$ definierten Dauerfestigkeit konnte im Rahmen des Projekts nicht validiert werden konnte. Sie war im Antrag nicht vorgesehen, weshalb auch keine entsprechenden experimentellen Daten generiert wurden. Der Vergleich mit Literaturdaten weist die Ergebnisse jedoch als plausibel aus.
- ◆ Ausgehend von der IBESS-Methode wurde eine Grundstruktur für eine IBESS-Prozedur vorgeschlagen, die aus zwei Haupt-Analyse-Ebenen besteht. Die Basis-Option nutzt die Werkstoffdaten für die Wärmeeinflusszone, die insofern maßgeblich ist, als der Rissursprung am Nahtübergang in diesen Bereich fällt. Im vorliegenden Fall initiierte der Riss im Feinkornbereich der WEZ, um dann über die Grobkorn-WEZ in den Grundwerkstoff zu wachsen. Die Eingangsdaten sind die statistisch aufbereitete lokale Nahtgeometrie, die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve, die $da/dN-\Delta K$ -Kurve einschließlich der Langrisssschwellenwerte für die relevanten R-Verhältnisse, die zyklische R-Kurve, die Dauerfestigkeit σ_w der glatten Probe bei $R = -1$ oder ersatzweise Zugfestigkeits- oder Härtewerte, die eine Abschätzung von σ_w ermöglichen.
- ◆ Die vereinfachte Option beruht auf der Beobachtung, dass sich die für Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone berechneten Schwingfestigkeiten oberhalb $N = 10^6$ anders als im oberen Zeitfestigkeitsast nur geringfügig unterscheiden. Zuerst wird der Zeitfestigkeitsast (in doppelt-logarithmischer Auftragung linear) auf $N = 2 \cdot 10^6$ extrapoliert. Ausgehend von der sich für diese Schwingspielzahl ergebenden Spannungsamplitude wird ein „synthetischer“ Zeitfestigkeitsast mit einem Anstieg von $k = 3$ „konstruiert“. Die Dauerfestigkeit (d.h., die Spannungsamplitude bei $N = 10^7$) wird wie oben beschrieben ermittelt, nur diesmal unter Zugrundelegung von Grundwerkstoffdaten. Der Abknickpunkt ergibt sich dann als Schnittpunkt der durch die Untergrenze der Dauerfestigkeit definierten Horizontale und dem synthetischen Zeitfestigkeitsast. Auch die vereinfachte Option wurde für alle 33 experimentellen Wöhlerkurven validiert.
- ◆ Tatsächlich ergibt sich als Ergebnis einer IBESS-Rechnung jedoch kein Abknickpunkt, sondern ein ausgerundeter Kurvenbereich
- ◆ Obwohl demonstriert werden konnte, dass IBESS in der Lage ist, Schwingfestigkeiten von Schweißverbindungen zu bestimmen, traten bei der Validierung auch Defizite und offene Fragen zu Tage. Diese betrafen die nachfolgend aufgelisteten Punkte.
- ◆ Bislang existiert keine Prüfvorschrift für die zyklische R-Kurve. Probleme haben sich insbesondere durch das Auftreten von Korrosionseffekten auf den Rissflanken beim S960QL sowie bei den WEZ-Proben für S3555NL und S960QI ergeben. Als Konsequenz wurde im Rahmen von IBESS neben der Einprobenmethode erstmalig ein Mehrprobenverfahren angewendet, das größere Effekte zumindest bei den Grundwerkstoffproben des S355 ausschließen konnte.

- ◆ Neben Korrosionseffekten könnten sich auch Probleme bei hochfesten Werkstoffen (wie dem S960QL) ergeben, bei denen der Risswachstumsbetrag im Druckbereich sehr klein ist ($< 0,1$ mm). In solchen Fällen müsste sichergestellt sein, dass vom Dehnungsfeld des durch den Rasierklingschnitt verschärften Rissausgangskerbts kein Einfluss auf die zyklische R-Kurve ausgeht. Im Rahmen des IBESS-Projekts war es nicht möglich, diesen Problemen in der gebotenen inhaltlichen Breite nachzugehen.
- ◆ Für die im Rahmen des Teilprojekts vorgeschlagene Näherungsmethode für die zyklische R-Kurve liegen nur begrenzt Validierungsuntersuchungen vor. Diese waren für die vorliegenden Untersuchungen ausreichend, Probleme könnten sich jedoch bei der Erweiterung auf andere Werkstoffe ergeben. Auch hier sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich.
- ◆ Für die beiden *Analyse-Ebenen* wurden eine Reihe von Vereinfachungen angesprochen und teilweise auch bereits erprobt. Das betrifft die erwähnte Abschätzung der zyklischen R-Kurve, die gittertypabhängige Abschätzung des intrinsischen Schwellenwerts aus dem E-Modul und die Abschätzung der Werkstoffdauerfestigkeit aus der Zugfestigkeit und der Vickershärte. Die Ermittlung weiterer Parameter war auf der *Basis-Analyse-Ebene* nur unter erheblichem Aufwand möglich. Das betrifft insbesondere die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und die Langrisschwellenwerte $\Delta K_{th,LC}$ für den Wärmeeinflusszonenwerkstoff, die an gefügesimulierten Proben ermittelt wurden. Hier würden noch zu entwickelnde vereinfachte Methoden die Anwendungsfähigkeit der Prozedur erheblich verbessern.
- ◆ Auch die ansatzweise Anbindung der IBESS-Rechnungen an die Schweißnahtgüte müsste noch weit umfangreicher untersucht werden, wobei auch denkbar ist, dass die Methode einen Beitrag zur Weiterentwicklung der ermüdungsrelevanten Schweißnahtgütekriterien leisten kann.
- ◆ Der Validierung der IBESS-Methode zur Ermittlung der für $N = 10^7$ (oder einen beliebigen anderen Wert für die Schwingspielzahl) anhand von experimentellen Daten über den vorgenommenen Literaturvergleich hinaus steht ebenfalls noch aus. Da dies im Projekt ursprünglich nicht vorgesehen war, wurden keine entsprechenden experimentellen Daten generiert.
- ◆ Ebenfalls erforderlich ist eine sehr viel gründlichere und systematischere Untersuchung des Effekts der zyklischen Belastung auf die Umbildung des Eigenspannungszustands an den Nahtübergängen. Ziel wäre die Aufklärung der Wechselwirkung der Faktoren Spannungsverhältnis R, Nahtgeometrie und Werkstoff.
- ◆ Bei steilerem Nahtanstieg und hoher Spannungsamplitude wurde die Rissspitzenbelastung ΔK_p zu hoch vorhergesagt. Prinzipiell liegt der daraus resultierende Fehler auf der „sicheren Seite“ d.h. die Rissausbreitungsgeschwindigkeit wird überschätzt. Dennoch ist es wünschenswert, die Anwendungsgrenze des Verfahrens zu spezifizieren bzw. es für die genannten Randbedingungen zu verbessern. Das Problem sollte v.a. für scharfe Kerben und im LCF-Bereich relevant sein.
- ◆ Wünschenswert wäre schließlich auch eine zusätzliche, alternative Möglichkeit zur Abschätzung der Untergrenze der Ausgangsrisstiefe, die an den Ergebnissen des IBESS-Verfahrens für Rissarrest validiert werden könnte.

6. Literatur

- [1] Maddox, S.J. (1970): Calculating the fatigue strength of a welded joint using fracture mechanics. *Metal Construction* 2, 327-331.
- [2] Radaj, D., C.M. and Fricke, W. (2006) *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*. Woodhead Publ. Limited; 2. Aufl.
- [3] Nykänen, T., Li, X., Björk, T. und Marquis, G. (2005): A parametric fracture mechanics study of welded joints with toe cracks and lack of penetration. *Engng. Fracture Mech.* 72, 1580-1609.
- [4] Polak, J. (2003): Cyclic deformation, crack initiation, and low-cycle fatigue. In: Ritchie, R.O. and Murakami, Y. (Eds.): *Comprehensive Structural Integrity; Volume 4: Cyclic loading and Fracture*; Elsevier, 1-39.
- [5] Murakami, Y. (2003): High and ultrahigh cycle fatigue. In: Ritchie, R.O. and Murakami, Y. (Eds.): *Comprehensive Structural Integrity; Volume 4: Cyclic loading and Fracture*; Elsevier, 41-76.
- [6] Miller, K.J. and O'Donnel, W.J. (1999): The fatigue limit and its elimination. *Fatigue & Fracture of Engng. Mater. & Struct.* 22, 545-557.
- [7] Suresh, S. (1998): *Fatigue of materials. Retardation of constant amplitude fatigue crack growth*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] Zerbst, U., Madia, M. und Hellmann, D. (2012): An analytical fracture mechanics model for estimation of S-N curves of metallic alloys containing large second particles. *Engng. Fracture Mech.* 82, S. 115-134.
- [9] McClung, R.C., Chell, G.G., Lee, Y.-D., Russel, D.A. und Orient, G.E. (1997): A practical methodology for elastic-plastic fatigue crack growth. *ASTM STP 1296*, 317-337.
- [10] McClung, R.C., Chell, G.G., Lee, Y.-D., Russell, D.A. and Orient, G.E. (1999): Development of a practical methodology for elastic-plastic and fully plastic fatigue crack growth. *NASA Report NASA/CR-1999-209428*.
- [11] Madia, M., Arafah, D. und Zerbst, U. (2014): Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to biaxial tensile loading. *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 119, 19-28.
- [12] Zerbst, U., Kiyak, Y., Madia, M., Burgold, A. und Riedel, G. (2013): Reference loads for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to tension and bending for application within R6 type flaw assessment. *Engng. Fracture Mech.* 99, 132-140.
- [13] R6, Revision 4, 2009. *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*. British Energy Generation Ltd (BEGL), Barnwood, Gloucester.
- [14] BS 7910 (2005): *Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*. British Standard Institution (BSI), London.
- [15] Zerbst, U., Schödel, M., Webster, S. und Ainsworth, R.A. (2007): *Fitness-for-Service Fracture Assessment of Structures Containing Cracks. A Workbook based on the European SINTAP/FITNET Procedure*, Elsevier.

- [16] Zerbst, U., Vormwald, M., Pippan, R., Gänser, H.-P., Sarrazin-Baudoux, C. und Madia, M. (2016): About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion – a review. *Engng. Fracture Mech.* 153, 190-243.
- [17] Newman, J.C. Jr. (1984): A crack opening stress equation for fatigue crack growth. *Int. J. Fracture.* 24, R131-R135.
- [18] Fatigue crack growth computer program “NASGRO” Version 3, NASA, Houston, Texas, 2000.
- [19] McClung, R.C (1994): Finite element analysis of specimen geometry effects on fatigue crack closure. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 17, 861-872.
- [20] Dowling, N.E. (1987): J integral estimates for cracks in infinite bodies. *Engng. Fracture Mech.* 26, 333-348.
- [21] Zhang, Y.-H. Und Maddox, S.J. (2009): Fatigue life prediction for toe ground welded joints. *Int. J. Fatigue* 31, 1124-1136.
- [22] Grover, J.L. (1987): Initial flaw size estimating procedures for fatigue crack growth calculations. In: Maddox, S.J. (Hrsg.): *Proc. Int. Conf. on Fatigue of Welded Construction*, Brighton, Paper 23, 275–285.
- [23] Straub, D. (2004): Generic approaches to risk based inspection planning to steel structures. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- [24] Walbridge, S. (2005): A probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures. PhD Thesis Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- [25] Josi, G. (2010): Reliability-based management of fatigue failures. PhD thesis, Univ. of Alberta.
- [26] Smith, I.F.C. and Smith, R.A. (1982): Defects and crack shape development in fillet welded joints. *Fatigue of Engng. Materials and Structures*, 5, 151-165.
- [27] Smith, I.F. and Smith, R.A. (1983): Fatigue crack growth in a fillet welded joint', *Engng Fracture Mech.* 18, 861–869.
- [28] Signes, E.G., Baker, R.G., Harrison, J.D. and Burdekin, F.M. (1967): Factors affecting the fatigue strength of welded high strength steels. *British Welding Journal*, March 1967, 108-116.
- [29] Watkinson, F., Bodger, P.H. and Harrison, J.D. (1971): The fatigue strength of welded joints in high strength steels and methods for its improvement. *Proc. Conf. Fatigue of Welded Structures*, Brighton, July 1970, 79-113.
- [30] Engesvik, K.M. and Moan, T. (1983): Probabilistic analysis of the uncertainty in the fatigue capacity of welded joints. *Engng. Fracture Mech.* 18, 743-762.
- [31] Bokalrud, T. and Karlsen, A. (1981): Probabilistic fracture mechanics evaluation of fatigue failures from weld defects in butt welded joints. *Proc. Conf. On Fitness for Purpose Validation of Welded Constructions*, Paper #28, London.

- [32] Moan, T., Vardal, O.T., Hellevig, N.C. and Skjoldili, K. (2000): Initial crack depth and POD values inferred from in-service observations of cracks in North Sea jackets. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engng.* 122, 157-162.
- [33] Berge, S., Eide, O.I. and Moe, E.T. (1978): Fatigue crack initiation of a C-Mn steel. *European Offshore Steels Research Seminar, The Welding Institute (TWI), Cambridge, U.K., Nov. 27-29.*
- [34] Chattopadhyay, A., Glinka, G., El-Zein, M. und Qian, J. (2011): Stress analysis and fatigue of welded structures. *Welding in the World* 55, 2-21.
- [35] Nykänen, T., Marquis, G. und Björk, T. (2009): A simplified fatigue assessment method for high quality welded cruciform joints. *Int. J. Fatigue* 31, 79-87.
- [36] Lawrence, F.V., Ho, N.J. und Mazumdar, P.K. (1981): Predicting the fatigue resistance of welds. *Annual Review of Materials Science*, 11, 401-425.
- [37] Otegui, J.L., Kerr, W., Burns, D.J. und Mohaupt, U.H. (1989): Fatigue crack initiation from defects at weld toes in steel T joints', *Int J Pres. Ves. Piping*, 38, 385–417.
- [38] Bell, R. und Vosikovsky, O. (1992): A fatigue life prediction model for multiple cracks in welded joints for offshore structures', *Proceedings 11th International Conference OMAE, Houston Tex, ASME International Technical Institute*, 501–507.
- [39] Hobbacher, A. (2016): *Recommendations for fatigue design of welded joints and components (vormals IIW Empfehlung IIW 1823)*, Springer-Verl.
- [40] Zerst, U., Ainsworth, R.A., Beier, H.Zh., Pisarski, H., Zhang, Z.L., Nikbin, T., Nitschke-Pagel, T., Münstermann, S. Kucharczyk, P. und Klingbeil, D. (2014): Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective. *Engng. Fracture Mech.* 132, 200-276.
- [41] Signes, E.G., Baker, R.G., Harrison, J.D. und Burdekin, F.M. (1967): Factors affecting the fatigue strength of welded high strength steels. *British Welding Journal*, März 1967, 108-116.
- [42] Murakami, Y. (2002): Effects of nonmetallic inclusions on fatigue strength. In: Murakami, Y.: *Metal Fatigue: Effects of small defects and non-metallic inclusions*. Elsevier, Amsterdam et al.
- [43] Lecsek, R. L., Yee, R., Lambert, S. B. und Burns, D. J. (1995): A probabilistic model for initiation and propagation of surface cracks in welded joints. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Strut.* 18, 821-831.
- [44] Wirsching, P.H and Ortiz, K. (1996): Reliability methods in mechanical and structural design. Notes for the 18th annual seminar and workshop (short course), Univ. of Arizona, Tucson, AZ, cit in: Dowling, N.E. (1999): *Mechanical Behaviour of Materials*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, Appendix B4; zit in: Dowling, N.E. (1999): *Mechanical Behaviour of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*. Prentice Hall, Inc, S. 803.

- [45] Breßler, S. (2014): Ermittlung von Spannungstiefenprofilen von auf Zug- und Biegung belasteten Stumpfschweißnähten in Stahl mittels FEM und Parametergleichungen. Master-Arbeit, Beuth-Hochschule für Technik, Berlin.
- [46] Anderson, T.L. (2003): Flaw characterization. In: Ainsworth, R.A. and Schwalbe, K.-H. (eds.): *Comprehensive Structural Integrity*, Vol. 7: Practical Failure Assessment Methods. Elsevier, Amsterdam et al., 227-243.
- [47] Tan, J.T. und Chen, B.K. (2013): Coalescence and growth of two coplanar short cracks in AA7050-T7451 aluminium alloys. *Engng. Fracture Mech.* 102, 324-333.
- [48] Pang, H.L.J. und Gray, T.G.F. (1993): Fatigue analysis of surface cracks at fillet welded toes. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 16, 151-164.
- [49] Radaj, D. and Vormwald, M. (2007): Ermüdungsfestigkeit. Springer, Abschn. 3.1.
- [50] Hück, M., Thrainer, L., Schütz, W. (1981): Berechnung von Wöhler-Linien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss, synthetische Wöhlerlinien. VDEh-Bericht ABF 11.
- [51] Bignonnet A. und Buthod-Cuan H. (1985): Strength of metals and alloys. In: *Proc. 7th Int-Conf. on the Strength of Metals and Alloys*, Pergamon Press Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt, Montreal, Canada, 12. - 16. August 1985. 5. 268-310; zit. in: <http://www.wm.tu-darmstadt.de/mat-db/ref.php>
- [52] Pusch, G. und Hübner, P. (1998): Bruchverhalten des Stahls StE960 und seiner Schweißverbindung bei statischer und zyklischer Belastung. *Technische Forschung Stahl*, Bericht EUR 17880 DE.
- [53] Ohta, A., Suzuki, N. und Maeda, Y. (1997): Unique fatigue threshold and growth properties of welded joints in a tensile residual stress field. *Int. J. Fatigue* 19, S303-S310.
- [54] ASTM E 647-13 (2013): Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia.
- [55] ISO 12108 (2012): Metallic materials – Fatigue testing – Fatigue crack growth method. International Organization for Standardization (ISO), Geneva.
- [56] Tabernig, B. and Pippan, R. (2002): Determination of the length dependence of the threshold for fatigue crack propagation. *Engng. Fracture Mech.* 69, 899-907.
- [57] Tesch, A., Pippan, R. and Döker, H. (2007): New testing procedure to determine $da/dN-\Delta K$ curves at different, constant R-values using one single specimen. *Int. J. Fatigue* 29, 1220-1228.
- [58] Pippan, R. (1987): The growth of short cracks under cyclic compression. *Fract. Engng. Mat. Struct.* 9, 319-328.
- [59] Forth, S.C., Newman, C.J. and Forman, R.G. (2003): On generating fatigue crack growth thresholds. *Int. J. Fatigue* 25, 9-15.
- [60] Newman, J.C., Jr. and Yamada, Y. (2010): Compression precracking methods to generate near-threshold fatigue-crack-growth-rate data. *Int. J. Fatigue* 32, 879-885.
- [61] Carboni, M. and Regazzi, D. (2011): Effect of the experimental technique onto R dependence of ΔK_{th} . *Procedia Engng.* 10, 2937–2942.

- [62] Zerbst, U. und Madia, M. (2015): Fracture mechanics based assessment of the fatigue strength: Approach for the determination of the initial crack size. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 38, 1066-1975.
- [63] Kitagawa, H. und Takahashi, S. (1976): Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage. In: *Proc. 2nd Inter. Conf. Mech. Behav. Mater.*, Boston, ASM, Cleveland, Ohio, 627–631.
- [64] El Haddad, M. H., Topper, T. H. und Smith, K. N. (1979): Prediction of non-propagating cracks. *Engng. Fracture Mech.* 11, 573–584.
- [65] Atzori, B., Meneghetti, G. und Susmel, L. (2005): Material fatigue properties for assessing mechanical components weakened by notches and defects. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 28, 83-97.
- [66] Tanaka, K. und Akinawa, Y. (2003): Modeling of fatigue crack growth: mechanistic model. In *CSI*, Vol. 4, Chapter 6, pp. 165 – 189.
- [67] Goodman, I. (1899): *Mechanics Applied in Engineering*, Longmanns, Green & Co., New York, Reprint of 9. Aufl. 1954.
- [68] McEvily, A.J., Endo, M. and Murakami, Y. (2003): On the $\sqrt{\text{area}}$ relationship and the short fatigue crack threshold. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 26, 269-278.
- [69] Pippan, R. und Riemelmoser, F.O. (2003): Modelling of fatigue growth: Dislocation models. In: Ritchie, R.O. and Murakami, Y. (eds.): *Comprehensive Structural Integrity; Volume 4: Cyclic loading and Fracture*; Elsevier, 191-207.
- [70] Hertzberg, R. W. (1995): On the calculation of closure-free fatigue crack propagation data in monolithic metal alloys. *Mat. Sci. Engng.*, A190, 25-32.
- [71] Pokluda, J., Pippan, R., Vojtek, T. and Hohenwarter, A. (2014): Near-threshold behavior of shear-mode fatigue cracks in metallic materials. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 37, 232-254.
- [72] ISO 12135 (2002): *Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness*. International Organization for Standardization, Genf, 2002.
- [73] ASTM E 1921-10 (2010): *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [74] ASTM E 1820-11 (2011): *Measurement of Fracture Toughness*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [75] Landes, J.D. und Shaffer, G.H. (1980): Statistical characterisation of fracture in the transition regime. *ASTM STP 700*, 368-383.
- [76] Toyoda, M. (1989): Significance of procedure/evaluation of CTOD test of weldments. International Institute of Welding (IIW), Document X-1192-89.
- [77] Wallin, K., Nevasmaa, P., Laukkanen, A. und Planman, T. (2004): Master curve analysis of inhomogeneous ferritic steels. *Engng. Fracture Mech.* 71, 2329-2346.

- [78] Toyoda, M. (1989): Significance of procedure/evaluation of CTOD test of weldments. InternationalM; Document X-1192-89, Institute of Welding (IIW).
- [79] Lindgren, E. und Stenberg, T. (2011): Quality inspection and fatigue assessment of welded structures, Master Thesis, Stockholm, Sweden: KTH Enging. Sci.
- [80] Alam, M.M., Barsoum, Z., Jonsén, P., Kaplan, A.F.H. und Häggblad, H. Å. (2010): The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behaviour of laser hybrid welded eccentric fillet joints. *Appl. Surface Sci.* 256, 1936-1945.
- [81] DIN EN ISO 4287 (2010): Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.
- [82] Pang, H.L.J. (1993): Analysis of weld toe profiles and weld toe cracks. *Int. J. Fatigue* 15, 31-36.
- [83] Barsoum, Z. und Jonsson, B. (2011): Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds. *Engng. Failure Analysis* 18, 971-979.
- [84] Lee, C.-H., Chang, K.-H., Jang, G.-C. und Lee, C.-Y. (2009): Effect of weld geometry on the fatigue life of non-load carrying fillet welded cruciform joints. *Engng. Failure Analysis* 16, 849-855.
- [85] Lieurade, H.P., Huther, I. and Lefebvre, F. (2008): Effect of weld quality and postweld improvement techniques on the fatigue resistance of extra high strength steels. *Welding in the World* 52, 106-115.
- [86] Lassen, T. (1990): The effect of welding on the fatigue crack growth. *Welding J.*, 75S-81S.
- [87] Engesvik, K. und Lassen, T. (1988): The effect of weld geometry on fatigue life. *Proc. 3rd Int. OMAE Conf.*, Houston, Texas, 440-446.
- [88] Remes, H. (2008): Strain-based approach to fatigue strength assessment in laser-welded joints, Diss. Helsinki University of Technology.
- [89] Vural, M. (2006): The differences between the strengths of quality levels of weld imperfections given in ISO 5817. *J. of the Achievements in Materials and Manufacturing Engng.* 15, 193-198.
- [90] VOLVO Standard STD 181-0004 (2008), Volvo Group Weld Quality Standard, Abschnitt 4.1: Imperfections affecting the static strength but no/little effect on the fatigue strength.
- [91] Johnsson, B. und Samuelsson, J. (2008): A new weld class system, IIW-Dokument XIII-2235-08.
- [92] Jonsson, B., Dobmann, G., Hobbacher, A.F., Kassner, M. und Marquis, G. (2016): IIW guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength. Springer-Verl., Serie IIW Collection.
- [93] DIN EN ISO 5817 (2014): Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten. Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS) in DIN, Berlin.

- [94] Budden, P.J. und Sharples, J.K. (2003): Treatment of secondary stresses. In: Ainsworth, R.A. and Schwalbe, K.-H. (eds.): *Comprehensive Structural Integrity*, Vol. 7: Practical Failure Assessment Methods. Elsevier, Amsterdam et al., 227-243.
- [95] Bouchard, P.J. (2008): Combined use of FE-simulations and neutron/x-ray experiments. VDI-Expert Forum 10th April 2008, <http://ebookbrowse.com/vdi-08-06-bouchard-pdf-d299890187>
- [96] Bate, S.K. und Green, D. (1997): A review of residual stress distributions in welded joints for the defect assessment of offshore structures. Health and Safety Executive (HSE), Report OHT 482.
- [97] McClung, R.C. (2007): A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct.* 30, 173-205.
- [98] Nitschke-Pagel, T. und Wohlfahrt, H. (2001): Eigenspannungsabbau in zügig und zyklisch beanspruchten Schweißverbindungen. *Ztschr. f. Metallkunde* 92, 860-866.
- [99] Farajian, M., Nitschke-Pagel, T. und Dilger, K. (2010): Mechanisms of residual stress relaxation and redistribution in welded high-strength steels under mechanical loading. *Welding in the World* 54, R366-R374.
- [100] Nitschke-Pagel, T. (1995): Eigenspannungen und Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Feinkornbaustähle. Dissertation TU Braunschweig.
- [101] Hänsch, H. (1984): Schweiß eigenspannungen und Formänderungen an stabartige Bauteilen. Berechnung und Bewertung. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, Bd. 81.
- [102] Ritter, W. (1994): Kenngrößen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Stählen. Veröffentlichungen des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TH Darmstadt, Heft 53.
- [103] FKM Richtlinie. Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. VDMA Verlag; 2002.

7. Anhänge

Anhang A: Übersicht über das DFG/AiF-Forschungscluster IBESS

IBESS-Teilprojekt		Forschungsstelle	DFG/AiF	Mitglieds-Vereinigung
A3	Analytische bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit ¹⁾ Projektkoordination	BAM Berlin, Fachbereich 9.1	AiF	FAT
G1	Quantifizierung des lokalen Verfestigungsverhaltens in zyklisch beanspruchten Schweißverbindungen	Inst. f. Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen	DFG	
G2	Integrale Bestimmung des Eigenspannungsfeldes in Mehrlagenschweißverbindungen	Inst. f. Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig	DFG	
G3	Modellierung des Ermüdungsrisswachstums in Nahtschweißverbindungen unter Einbeziehung des transienten plastischen Verformungsverhaltens	FG Werkstoffmechanik, TU Darmstadt	DFG	
G4	Analyse und bruchmechanische Beschreibung des Wachstums kurzer Mehrfachrisse im Bereich der Nahtübergangskerbe von Schweißnähten	FG Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik, TU Darmstadt	DFG	
A1	Untersuchung von Ausgangsdefekten und Unregelmäßigkeiten und deren Schädigungsrelevanz in zyklisch beanspruchten Schweißverbindungen	MPA sowie FG und Inst. f. Werkstoffkunde, TU Darmstadt	AiF	FOSTA
A2	Mikrostrukturbasierte Beschreibung der Entstehung von Rissen an Defekten in Schweißverbindungen	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) Freiburg	AiF	DVS
A4	Rissfortschrittsuntersuchungen an Längssteifen zur Validierung der IBESS-Prozedur	Inst. f. Konstruktion u. Festigkeit von Schiffen, TU Hamburg-Harburg	AiF	CMT

¹⁾ Vorliegendes IBESS-Teilprojekt, für das dieser Bericht verfasst wurde

Anhang B: Spannungs-Tiefen-Profile (tabelliert; IBESS-Option A)

Schweißverbindungsform: Stumpfstöße, T = 10 mm

Nahtausführung: X- und V-Naht

Belastung: Zug und Biegung

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 10° , Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	1,908		1,780		1,710		1,625		1,516		1,321	
0,0001	1,859		1,757		1,695		1,616		1,512		1,320	
0,0002	1,815		1,734		1,680		1,607		1,508		1,319	
0,0003	1,778		1,714		1,666		1,599		1,504		1,318	
0,0004	1,744		1,694		1,652		1,591		1,500		1,317	
0,0005	1,715		1,676		1,639		1,583		1,496		1,316	
0,0006	1,690		1,659		1,627		1,575		1,492		1,315	
0,0008	1,647		1,628		1,604		1,560		1,484		1,313	
0,0010	1,612		1,601		1,583		1,546		1,477		1,312	
0,0012	1,584		1,577		1,563		1,532		1,470		1,310	
0,0015	1,549		1,546		1,537		1,514		1,459		1,307	
0,0020	1,505		1,504		1,500		1,485		1,442		1,303	
0,0030	1,445		1,446		1,445		1,439		1,412		1,295	
0,0040	1,404		1,405		1,405		1,402		1,386		1,286	
0,0060	1,348	/,	1,348	/,	1,349	/,	1,349	/,	1,343	/,	1,271	/,
0,0080	1,310		1,310		1,311		1,311		1,309		1,257	
0,0100	1,281		1,281		1,282		1,282		1,282		1,243	
0,0130	1,248		1,248		1,248		1,249		1,249		1,225	
0,0160	1,222		1,223		1,223		1,223		1,224		1,208	
0,0200	1,196		1,196		1,196		1,197		1,197		1,188	
0,0300	1,149		1,149		1,150		1,150		1,150		1,149	
0,0400	1,118		1,118		1,118		1,118		1,119		1,119	
0,0600	1,076		1,076		1,076		1,076		1,077		1,078	
0,1000	1,029		1,029		1,029		1,029		1,029		1,030	
0,1500	0,997		0,997		0,997		0,997		0,997		0,998	
0,2000	0,978		0,978		0,978		0,978		0,979		0,979	
0,3000	0,960		0,960		0,960		0,960		0,960		0,961	
0,4000	0,953		0,953		0,953		0,953		0,953		0,953	
0,5000	0,951		0,951		0,951		0,951		0,951		0,951	

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 20° , Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	2,670	2,867	2,355	2,527	2,188	2,348	1,996	2,140	1,763	1,886	1,393	
0,0001	2,604	2,797	2,326	2,496	2,170	2,329	1,986	2,129	1,758	1,882	1,392	
0,0002	2,543	2,731	2,297	2,465	2,152	2,309	1,976	2,118	1,754	1,877	1,391	
0,0003	2,487	2,671	2,269	2,436	2,134	2,290	1,966	2,108	1,749	1,872	1,390	
0,0004	2,435	2,615	2,243	2,407	2,117	2,272	1,956	2,098	1,745	1,867	1,389	
0,0005	2,387	2,563	2,217	2,380	2,100	2,254	1,947	2,087	1,740	1,863	1,388	
0,0006	2,342	2,514	2,193	2,354	2,084	2,237	1,937	2,077	1,736	1,858	1,387	
0,0008	2,262	2,428	2,147	2,304	2,053	2,203	1,919	2,057	1,727	1,849	1,385	
0,0010	2,193	2,354	2,104	2,259	2,023	2,171	1,901	2,038	1,719	1,840	1,384	
0,0012	2,133	2,289	2,064	2,216	1,995	2,141	1,884	2,020	1,711	1,831	1,382	
0,0015	2,056	2,207	2,010	2,158	1,955	2,098	1,859	1,993	1,698	1,818	1,379	
0,0020	1,956	2,100	1,933	2,075	1,895	2,034	1,819	1,951	1,678	1,797	1,375	
0,0030	1,818	1,951	1,813	1,946	1,796	1,928	1,750	1,876	1,641	1,757	1,366	
0,0040	1,725	1,851	1,726	1,851	1,718	1,844	1,690	1,812	1,606	1,720	1,357	
0,0060	1,601	1,718	1,605	1,720	1,604	1,721	1,594	1,709	1,545	1,654	1,341	/,
0,0080	1,520	1,630	1,523	1,632	1,524	1,635	1,522	1,631	1,493	1,598	1,325	
0,0100	1,459	1,565	1,462	1,567	1,464	1,570	1,464	1,569	1,448	1,549	1,310	
0,0130	1,392	1,493	1,395	1,493	1,397	1,497	1,398	1,497	1,392	1,489	1,289	
0,0160	1,342	1,438	1,344	1,438	1,346	1,441	1,348	1,443	1,347	1,439	1,269	
0,0200	1,290	1,381	1,292	1,381	1,294	1,384	1,296	1,386	1,298	1,385	1,245	
0,0300	1,204	1,286	1,205	1,285	1,206	1,287	1,208	1,288	1,212	1,290	1,194	
0,0400	1,149	1,223	1,150	1,222	1,151	1,224	1,152	1,225	1,156	1,226	1,154	
0,0600	1,081	1,142	1,082	1,140	1,082	1,142	1,083	1,143	1,086	1,144	1,095	
0,1000	1,015	1,053	1,015	1,051	1,015	1,053	1,016	1,053	1,017	1,054	1,027	
0,1500	0,979	0,994	0,979	0,993	0,979	0,995	0,979	0,994	0,980	0,995	0,987	
0,2000	0,962	0,961	0,962	0,959	0,962	0,961	0,962	0,961	0,962	0,961	0,967	
0,3000	0,948	0,927	0,948	0,926	0,948	0,927	0,948	0,927	0,948	0,928	0,951	
0,4000	0,944	0,913	0,944	0,912	0,944	0,914	0,944	0,914	0,944	0,914	0,945	
0,5000	0,943	0,909	0,943	0,908	0,943	0,910	0,943	0,910	0,943	0,911	0,944	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,218	3,734	2,713	3,143	2,457	2,843	2,172	2,505	1,848	2,111	1,398	1,516
0,0001	3,144	3,649	2,681	3,107	2,437	2,821	2,162	2,493	1,843	2,106	1,398	1,516
0,0002	3,074	3,568	2,650	3,071	2,418	2,799	2,151	2,481	1,838	2,101	1,397	1,515
0,0003	3,007	3,491	2,620	3,036	2,399	2,777	2,141	2,470	1,834	2,096	1,396	1,514
0,0004	2,944	3,418	2,590	3,002	2,381	2,756	2,131	2,458	1,830	2,091	1,395	1,513
0,0005	2,885	3,350	2,562	2,969	2,362	2,736	2,121	2,447	1,825	2,086	1,394	1,512
0,0006	2,829	3,285	2,534	2,937	2,345	2,715	2,111	2,435	1,821	2,081	1,393	1,511
0,0008	2,726	3,166	2,481	2,876	2,310	2,676	2,091	2,413	1,812	2,071	1,391	1,509
0,0010	2,635	3,059	2,431	2,818	2,277	2,638	2,072	2,392	1,803	2,061	1,389	1,507
0,0012	2,553	2,964	2,384	2,763	2,245	2,601	2,054	2,371	1,795	2,052	1,388	1,505
0,0015	2,445	2,838	2,318	2,687	2,200	2,549	2,027	2,340	1,782	2,038	1,385	1,502
0,0020	2,299	2,667	2,220	2,573	2,130	2,468	1,984	2,291	1,762	2,015	1,380	1,498
0,0030	2,090	2,423	2,061	2,387	2,009	2,328	1,906	2,201	1,723	1,971	1,372	1,489
0,0040	1,948	2,256	1,939	2,244	1,909	2,211	1,837	2,121	1,686	1,929	1,363	1,480
0,0060	1,761	2,038	1,765	2,040	1,757	2,031	1,722	1,986	1,620	1,853	1,347	1,462
0,0080	1,641	1,896	1,647	1,901	1,647	1,900	1,630	1,878	1,562	1,786	1,331	1,445
0,0100	1,554	1,793	1,560	1,798	1,563	1,800	1,557	1,790	1,512	1,726	1,316	1,429
0,0130	1,459	1,680	1,465	1,685	1,469	1,688	1,470	1,686	1,447	1,649	1,294	1,406
0,0160	1,389	1,596	1,395	1,600	1,399	1,603	1,403	1,605	1,393	1,584	1,275	1,384
0,0200	1,320	1,511	1,325	1,515	1,329	1,518	1,334	1,521	1,334	1,511	1,250	1,356
0,0300	1,210	1,371	1,213	1,373	1,216	1,375	1,221	1,379	1,229	1,380	1,199	1,295
0,0400	1,144	1,282	1,146	1,283	1,148	1,285	1,152	1,288	1,161	1,291	1,157	1,245
0,0600	1,068	1,170	1,069	1,171	1,070	1,172	1,073	1,174	1,080	1,178	1,097	1,166
0,1000	1,001	1,054	1,002	1,055	1,003	1,055	1,004	1,056	1,008	1,059	1,028	1,067
0,1500	0,970	0,983	0,970	0,983	0,970	0,984	0,971	0,984	0,973	0,986	0,986	0,997
0,2000	0,956	0,945	0,956	0,945	0,956	0,945	0,957	0,946	0,958	0,947	0,966	0,958
0,3000	0,946	0,907	0,946	0,909	0,946	0,909	0,946	0,909	0,946	0,910	0,950	0,921
0,4000	0,942	0,895	0,942	0,895	0,942	0,895	0,942	0,895	0,942	0,897	0,945	0,907
0,5000	0,941	0,891	0,941	0,891	0,941	0,891	0,941	0,892	0,942	0,893	0,944	0,904

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,665	4,657	2,949	3,718	2,607	3,265	2,248	2,776	1,869	2,240		1,528
0,0001	3,587	4,560	2,916	3,679	2,587	3,241	2,237	2,763	1,865	2,235		1,527
0,0002	3,512	4,464	2,884	3,640	2,569	3,217	2,227	2,751	1,860	2,230		1,526
0,0003	3,440	4,374	2,853	3,601	2,549	3,194	2,217	2,739	1,856	2,225		1,525
0,0004	3,372	4,287	2,822	3,564	2,531	3,172	2,207	2,727	1,851	2,220		1,524
0,0005	3,306	4,204	2,792	3,527	2,512	3,149	2,197	2,715	1,847	2,215		1,523
0,0006	3,244	4,124	2,763	3,491	2,494	3,127	2,186	2,703	1,842	2,210		1,522
0,0008	3,127	3,975	2,706	3,422	2,459	3,084	2,167	2,680	1,834	2,200		1,520
0,0010	3,020	3,839	2,653	3,356	2,425	3,042	2,148	2,657	1,825	2,190		1,518
0,0012	2,922	3,713	2,602	3,292	2,392	3,002	2,129	2,635	1,816	2,180		1,516
0,0015	2,790	3,545	2,530	3,202	2,344	2,943	2,102	2,602	1,804	2,166		1,514
0,0020	2,605	3,306	2,421	3,065	2,270	2,851	2,058	2,549	1,783	2,142		1,509
0,0030	2,330	2,952	2,238	2,831	2,139	2,687	1,977	2,451	1,744	2,097		1,500
0,0040	2,138	2,702	2,092	2,642	2,028	2,545	1,905	2,361	1,707	2,053		1,491
0,0060	1,886	2,374	1,880	2,361	1,853	2,317	1,782	2,206	1,640	1,973	/,	1,473
0,0080	1,726	2,163	1,732	2,164	1,722	2,145	1,683	2,077	1,581	1,901		1,456
0,0100	1,612	2,012	1,624	2,018	1,622	2,010	1,601	1,969	1,529	1,836		1,440
0,0130	1,492	1,849	1,505	1,857	1,509	1,857	1,504	1,838	1,462	1,750		1,417
0,0160	1,407	1,731	1,419	1,739	1,425	1,742	1,429	1,735	1,406	1,676		1,394
0,0200	1,324	1,614	1,335	1,621	1,342	1,626	1,351	1,626	1,345	1,592		1,367
0,0300	1,199	1,426	1,207	1,431	1,213	1,437	1,224	1,442	1,235	1,437		1,305
0,0400	1,129	1,311	1,134	1,315	1,139	1,320	1,148	1,326	1,163	1,331		1,254
0,0600	1,054	1,175	1,057	1,177	1,059	1,181	1,065	1,186	1,078	1,195		1,174
0,1000	0,993	1,043	0,995	1,045	0,995	1,046	0,998	1,049	1,005	1,057		1,071
0,1500	0,966	0,969	0,966	0,970	0,967	0,971	0,968	0,972	0,971	0,977		0,998
0,2000	0,954	0,932	0,954	0,932	0,954	0,933	0,955	0,934	0,956	0,937		0,957
0,3000	0,945	0,898	0,945	0,898	0,945	0,899	0,945	0,899	0,946	0,908		0,919
0,4000	0,942	0,886	0,942	0,886	0,942	0,886	0,942	0,887	0,942	0,889		0,905
0,5000	0,941	0,883	0,941	0,883	0,941	0,883	0,941	0,884	0,941	0,886		0,901

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 60° , Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,815	5,113	3,005	3,953	2,635	3,413	2,257	2,856	1,870	2,264		1,529
0,0001	3,738	5,015	2,972	3,914	2,615	3,389	2,246	2,843	1,866	2,259		1,528
0,0002	3,662	4,916	2,942	3,873	2,595	3,366	2,236	2,831	1,861	2,254		1,527
0,0003	3,590	4,823	2,910	3,835	2,576	3,343	2,225	2,819	1,856	2,249		1,526
0,0004	3,520	4,733	2,880	3,797	2,557	3,320	2,215	2,807	1,851	2,244		1,525
0,0005	3,453	4,647	2,850	3,759	2,539	3,297	2,205	2,795	1,847	2,239		1,524
0,0006	3,389	4,563	2,821	3,723	2,520	3,275	2,195	2,784	1,844	2,234		1,523
0,0008	3,269	4,405	2,764	3,652	2,485	3,232	2,176	2,760	1,835	2,224		1,521
0,0010	3,158	4,258	2,711	3,584	2,450	3,189	2,156	2,737	1,826	2,214		1,519
0,0012	3,056	4,122	2,659	3,518	2,417	3,148	2,138	2,715	1,818	2,205		1,517
0,0015	2,917	3,935	2,586	3,424	2,369	3,089	2,110	2,682	1,805	2,190		1,514
0,0020	2,719	3,665	2,475	3,280	2,294	2,994	2,066	2,629	1,785	2,167		1,510
0,0030	2,422	3,250	2,287	3,030	2,161	2,824	1,986	2,530	1,746	2,121		1,500
0,0040	2,211	2,951	2,136	2,823	2,049	2,675	1,913	2,439	1,709	2,078		1,491
0,0060	1,932	2,554	1,912	2,508	1,870	2,432	1,790	2,279	1,642	1,998	,/,	1,474
0,0080	1,755	2,299	1,756	2,283	1,736	2,243	1,690	2,144	1,583	1,925		1,457
0,0100	1,630	2,119	1,640	2,116	1,633	2,095	1,608	2,031	1,531	1,859		1,441
0,0130	1,499	1,926	1,514	1,931	1,516	1,925	1,510	1,891	1,465	1,772		1,417
0,0160	1,408	1,787	1,424	1,796	1,429	1,796	1,433	1,780	1,409	1,696		1,395
0,0200	1,321	1,651	1,336	1,662	1,343	1,666	1,354	1,662	1,347	1,610		1,367
0,0300	1,193	1,439	1,203	1,449	1,209	1,456	1,225	1,463	1,237	1,449		1,305
0,0400	1,123	1,314	1,130	1,321	1,134	1,328	1,149	1,338	1,166	1,339		1,254
0,0600	1,050	1,169	1,054	1,174	1,055	1,179	1,065	1,188	1,081	1,198		1,173
0,1000	0,992	1,036	0,993	1,038	0,993	1,041	0,998	1,046	1,007	1,055		1,069
0,1500	0,965	0,963	0,965	0,964	0,965	0,966	0,968	0,968	0,972	0,975		0,996
0,2000	0,954	0,927	0,954	0,928	0,954	0,929	0,955	0,930	0,958	0,935		0,955
0,3000	0,945	0,895	0,945	0,896	0,944	0,896	0,945	0,897	0,946	0,900		0,916
0,4000	0,942	0,884	0,942	0,884	0,941	0,884	0,942	0,885	0,943	0,888		0,902
0,5000	0,941	0,881	0,941	0,881	0,941	0,881	0,941	0,882	0,942	0,885		0,899

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 10° , Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	1,831		1,709		1,641		1,560		1,455		1,269	
0,0001	1,784		1,686		1,626		1,551		1,451		1,268	
0,0002	1,743		1,665		1,612		1,543		1,447		1,267	
0,0003	1,706		1,645		1,599		1,535		1,444		1,266	
0,0004	1,675		1,626		1,586		1,527		1,440		1,265	
0,0005	1,647		1,608		1,573		1,519		1,436		1,264	
0,0006	1,622		1,592		1,561		1,512		1,432		1,263	
0,0008	1,581		1,562		1,539		1,497		1,425		1,262	
0,0010	1,548		1,536		1,519		1,484		1,418		1,260	
0,0012	1,520		1,513		1,500		1,471		1,411		1,258	
0,0015	1,487		1,484		1,475		1,453		1,401		1,256	
0,0020	1,445		1,444		1,440		1,426		1,385		1,252	
0,0030	1,387		1,388		1,387		1,381		1,356		1,244	
0,0040	1,348		1,349		1,349		1,347		1,331		1,236	
0,0060	1,294	,/,	1,295	,/,	1,296	,/,	1,296	,/,	1,290	,/,	1,222	,/,
0,0080	1,258		1,259		1,259		1,259		1,257		1,208	
0,0100	1,230		1,231		1,231		1,232		1,231		1,195	
0,0130	1,199		1,200		1,200		1,200		1,201		1,178	
0,0160	1,175		1,176		1,176		1,176		1,177		1,162	
0,0200	1,150		1,150		1,151		1,151		1,152		1,144	
0,0300	1,107		1,107		1,107		1,107		1,108		1,107	
0,0400	1,078		1,078		1,078		1,078		1,079		1,080	
0,0600	1,040		1,04		1,040		1,041		1,041		1,043	
0,1000	1,000		1,000		1,000		1,000		1,00		1,003	
0,1500	0,976		0,976		0,976		0,976		0,976		0,978	
0,2000	0,966		0,966		0,966		0,966		0,966		0,967	
0,3000	0,962		0,962		0,962		0,962		0,962		0,962	
0,4000	0,968		0,968		0,968		0,968		0,968		0,968	
0,5000	0,978		0,978		0,978		0,978		0,978		0,978	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	2,525	2,621	2,226	2,312	2,070	2,148	1,887	1,958	1,668	1,728	1,323	
0,0001	2,462	2,556	2,199	2,283	2,052	2,130	1,878	1,948	1,663	1,724	1,323	
0,0002	2,404	2,499	2,172	2,256	2,035	2,112	1,868	1,939	1,659	1,719	1,322	
0,0003	2,351	2,442	2,146	2,228	2,018	2,095	1,859	1,929	1,655	1,715	1,321	
0,0004	2,301	2,391	2,121	2,203	2,002	2,078	1,850	1,919	1,651	1,711	1,320	
0,0005	2,254	2,343	2,097	2,178	1,986	2,062	1,841	1,910	1,647	1,707	1,319	
0,0006	2,212	2,300	2,074	2,154	1,971	2,046	1,832	1,901	1,642	1,702	1,318	
0,0008	2,136	2,220	2,030	2,109	1,942	2,016	1,814	1,883	1,634	1,694	1,317	
0,0010	2,071	2,152	1,990	2,067	1,914	1,987	1,797	1,865	1,626	1,686	1,315	
0,0012	2,015	2,093	1,953	2,028	1,887	1,959	1,781	1,848	1,619	1,678	1,313	
0,0015	1,943	2,019	1,902	1,975	1,849	1,920	1,758	1,824	1,607	1,666	1,311	
0,0020	1,850	1,921	1,828	1,899	1,793	1,862	1,721	1,785	1,588	1,647	1,306	
0,0030	1,720	1,785	1,715	1,781	1,700	1,765	1,655	1,717	1,553	1,610	1,298	
0,0040	1,632	1,694	1,633	1,695	1,626	1,688	1,599	1,659	1,521	1,577	1,290	
0,0060	1,516	1,573	1,519	1,576	1,518	1,576	1,509	1,566	1,463	1,517	1,275	./,
0,0080	1,439	1,493	1,442	1,496	1,443	1,498	1,441	1,495	1,414	1,466	1,260	
0,0100	1,382	1,435	1,385	1,437	1,387	1,439	1,387	1,439	1,372	1,423	1,247	
0,0130	1,320	1,369	1,322	1,371	1,323	1,373	1,326	1,375	1,320	1,368	1,227	
0,0160	1,273	1,320	1,274	1,322	1,276	1,323	1,279	1,325	1,278	1,323	1,209	
0,0200	1,225	1,270	1,226	1,271	1,228	1,272	1,230	1,275	1,232	1,275	1,187	
0,0300	1,146	1,185	1,146	1,186	1,147	1,187	1,149	1,189	1,153	1,191	1,141	
0,0400	1,096	1,131	1,096	1,131	1,097	1,132	1,098	1,134	1,102	1,136	1,105	
0,0600	1,035	1,063	1,036	1,063	1,036	1,064	1,037	1,065	1,040	1,066	1,053	
0,1000	0,980	0,994	0,980	0,994	0,980	0,994	0,981	0,995	0,982	0,996	0,996	
0,1500	0,955	0,956	0,955	0,956	0,955	0,956	0,955	0,956	0,956	0,957	0,965	
0,2000	0,947	0,939	0,947	0,939	0,947	0,939	0,947	0,940	0,948	0,940	0,954	
0,3000	0,950	0,935	0,950	0,935	0,950	0,935	0,950	0,935	0,950	0,936	0,953	
0,4000	0,961	0,947	0,961	0,947	0,961	0,947	0,961	0,947	0,961	0,947	0,963	
0,5000	0,975	0,964	0,975	0,964	0,975	0,964	0,975	0,964	0,975	0,965	0,975	

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,025	3,294	2,550	2,776	2,310	2,512	2,043	2,216	1,740	1,874	1,328	1,380
0,0001	2,956	3,215	2,520	2,743	2,291	2,491	2,033	2,205	1,736	1,870	1,327	1,380
0,0002	2,889	3,146	2,491	2,712	2,273	2,473	2,023	2,195	1,732	1,865	1,326	1,379
0,0003	2,826	3,078	2,462	2,681	2,256	2,454	2,013	2,184	1,727	1,861	1,325	1,378
0,0004	2,767	3,012	2,434	2,651	2,238	2,434	2,004	2,174	1,723	1,856	1,324	1,377
0,0005	2,711	2,951	2,407	2,622	2,221	2,416	1,994	2,164	1,719	1,852	1,323	1,376
0,0006	2,658	2,894	2,381	2,593	2,205	2,398	1,985	2,154	1,715	1,848	1,322	1,375
0,0008	2,561	2,787	2,331	2,539	2,172	2,363	1,967	2,134	1,707	1,839	1,321	1,374
0,0010	2,475	2,693	2,284	2,488	2,141	2,329	1,949	2,115	1,698	1,830	1,319	1,372
0,0012	2,398	2,609	2,240	2,440	2,111	2,297	1,932	2,096	1,690	1,822	1,317	1,370
0,0015	2,297	2,499	2,178	2,372	2,069	2,250	1,907	2,069	1,679	1,809	1,315	1,368
0,0020	2,160	2,350	2,087	2,272	2,003	2,179	1,867	2,026	1,659	1,789	1,311	1,364
0,0030	1,965	2,138	1,938	2,109	1,890	2,055	1,794	1,947	1,623	1,750	1,302	1,355
0,0040	1,832	1,993	1,824	1,984	1,797	1,953	1,730	1,876	1,589	1,713	1,294	1,347
0,0060	1,658	1,803	1,661	1,806	1,654	1,797	1,621	1,759	1,527	1,647	1,279	1,332
0,0080	1,545	1,679	1,551	1,684	1,551	1,683	1,536	1,665	1,473	1,588	1,264	1,317
0,0100	1,464	1,590	1,471	1,595	1,473	1,597	1,467	1,589	1,426	1,537	1,250	1,303
0,0130	1,376	1,491	1,382	1,496	1,386	1,500	1,387	1,499	1,366	1,470	1,231	1,282
0,0160	1,312	1,419	1,317	1,423	1,321	1,427	1,325	1,429	1,317	1,414	1,213	1,263
0,0200	1,248	1,346	1,252	1,350	1,256	1,353	1,261	1,357	1,262	1,352	1,191	1,239
0,0300	1,147	1,228	1,150	1,230	1,153	1,233	1,157	1,237	1,167	1,241	1,144	1,188
0,0400	1,087	1,154	1,089	1,156	1,091	1,158	1,095	1,161	1,105	1,168	1,108	1,147
0,0600	1,020	1,065	1,021	1,066	1,023	1,068	1,025	1,070	1,033	1,076	1,055	1,084
0,1000	0,966	0,981	0,967	0,981	0,967	0,982	0,968	0,984	0,936	0,987	0,996	1,009
0,1500	0,946	0,938	0,946	0,938	0,946	0,939	0,946	0,940	0,949	0,942	0,964	0,962
0,2000	0,941	0,922	0,941	0,923	0,941	0,923	0,942	0,923	0,943	0,925	0,953	0,941
0,3000	0,948	0,922	0,948	0,922	0,948	0,922	0,948	0,923	0,948	0,923	0,953	0,933
0,4000	0,960	0,938	0,960	0,938	0,960	0,938	0,960	0,938	0,960	0,939	0,962	0,945
0,5000	0,974	0,960	0,974	0,960	0,974	0,960	0,974	0,960	0,974	0,960	0,975	0,963

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,
 Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 45° , Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,427	3,980	2,762	3,186	2,444	2,802	2,109	2,392	1,759	1,949		1,385
0,0001	3,353	3,895	2,731	3,151	2,425	2,781	2,099	2,381	1,754	1,945		1,384
0,0002	3,281	3,814	2,702	3,117	2,407	2,761	2,090	2,370	1,750	1,940		1,383
0,0003	3,213	3,738	2,672	3,085	2,389	2,741	2,080	2,360	1,746	1,936		1,382
0,0004	3,147	3,662	2,643	3,052	2,371	2,721	2,070	2,349	1,742	1,931		1,381
0,0005	3,085	3,589	2,615	3,020	2,354	2,702	2,061	2,339	1,737	1,927		1,380
0,0006	3,027	3,523	2,588	2,989	2,337	2,683	2,052	2,329	1,733	1,923		1,379
0,0008	2,921	3,397	2,535	2,930	2,303	2,646	2,033	2,309	1,725	1,914		1,378
0,0010	2,818	3,280	2,485	2,873	2,271	2,609	2,015	2,289	1,717	1,905		1,376
0,0012	2,723	3,175	2,437	2,818	2,240	2,574	1,998	2,270	1,709	1,897		1,374
0,0015	2,602	3,030	2,370	2,741	2,196	2,524	1,972	2,241	1,697	1,884		1,372
0,0020	2,433	2,828	2,268	2,623	2,126	2,445	1,932	2,196	1,678	1,863		1,368
0,0030	2,176	2,527	2,098	2,425	2,004	2,305	1,857	2,112	1,641	1,824		1,360
0,0040	2,000	2,316	1,962	2,265	1,901	2,184	1,789	2,035	1,607	1,787		1,352
0,0060	1,767	2,039	1,764	2,028	1,738	1,992	1,675	1,903	1,545	1,718	./,	1,336
0,0080	1,618	1,860	1,627	1,863	1,618	1,847	1,582	1,794	1,490	1,656		1,321
0,0100	1,513	1,733	1,526	1,740	1,525	1,735	1,507	1,704	1,442	1,601		1,307
0,0130	1,401	1,597	1,415	1,606	1,421	1,608	1,416	1,595	1,380	1,529		1,286
0,0160	1,322	1,498	1,336	1,508	1,344	1,512	1,346	1,509	1,328	1,467		1,267
0,0200	1,247	1,402	1,259	1,410	1,267	1,416	1,275	1,419	1,271	1,398		1,243
0,0300	1,133	1,249	1,142	1,256	1,149	1,261	1,158	1,269	1,171	1,271		1,192
0,0400	1,071	1,159	1,077	1,164	1,082	1,168	1,090	1,176	1,106	1,186		1,150
0,0600	1,006	1,056	1,010	1,059	1,012	1,062	1,018	1,067	1,031	1,080		1,086
0,1000	0,958	0,965	0,959	0,966	0,960	0,968	0,963	0,971	0,969	0,980		1,009
0,1500	0,941	0,924	0,942	0,925	0,942	0,925	0,943	0,927	0,947	0,932		0,961
0,2000	0,939	0,911	0,939	0,911	0,939	0,912	0,940	0,913	0,942	0,916		0,939
0,3000	0,946	0,915	0,947	0,915	0,947	0,916	0,947	0,916	0,948	0,918		0,931
0,4000	0,960	0,934	0,960	0,934	0,960	0,934	0,960	0,935	0,960	0,935		0,943
0,5000	0,974	0,958	0,974	0,958	0,974	0,958	0,974	0,958	0,974	0,958		0,962

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 60° , Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,564	4,299	2,811	3,334	2,467	2,891	2,117	2,434	1,759	1,961		1,384
0,0001	3,490	4,215	2,781	3,299	2,449	2,870	2,107	2,423	1,755	1,956		1,384
0,0002	3,419	4,129	2,751	3,265	2,431	2,850	2,097	2,413	1,751	1,952		1,383
0,0003	3,350	4,047	2,721	3,232	2,413	2,831	2,088	2,402	1,747	1,947		1,382
0,0004	3,285	3,971	2,693	3,199	2,395	2,811	2,078	2,392	1,742	1,943		1,381
0,0005	3,222	3,897	2,665	3,167	2,378	2,792	2,069	2,381	1,738	1,939		1,380
0,0006	3,162	3,825	2,638	3,135	2,361	2,773	2,059	2,371	1,734	1,934		1,379
0,0008	3,050	3,691	2,585	3,074	2,328	2,736	2,041	2,351	1,726	1,926		1,378
0,0010	2,947	3,567	2,535	3,014	2,296	2,699	2,023	2,331	1,718	1,917		1,376
0,0012	2,848	3,453	2,487	2,958	2,265	2,662	2,005	2,311	1,710	1,908		1,374
0,0015	2,726	3,297	2,418	2,877	2,220	2,605	1,980	2,283	1,698	1,896		1,372
0,0020	2,539	3,074	2,317	2,755	2,150	2,526	1,939	2,237	1,678	1,875		1,367
0,0030	2,263	2,729	2,140	2,546	2,028	2,394	1,863	2,152	1,641	1,835		1,359
0,0040	2,068	2,483	2,001	2,361	1,922	2,264	1,796	2,075	1,607	1,798		1,351
0,0060	1,810	2,156	1,792	2,119	1,756	2,063	1,681	1,940	1,545	1,729	./,	1,336
0,0080	1,645	1,947	1,647	1,936	1,632	1,909	1,588	1,829	1,490	1,667		1,321
0,0100	1,530	1,799	1,540	1,800	1,536	1,786	1,512	1,735	1,442	1,612		1,306
0,0130	1,409	1,641	1,424	1,649	1,428	1,646	1,421	1,621	1,38	1,539		1,286
0,0160	1,325	1,529	1,340	1,540	1,348	1,542	1,350	1,531	1,329	1,476		1,267
0,0200	1,246	1,419	1,260	1,431	1,269	1,437	1,277	1,437	1,272	1,406		1,243
0,0300	1,129	1,251	1,139	1,262	1,147	1,269	1,159	1,278	1,172	1,277		1,191
0,0400	1,067	1,155	1,073	1,163	1,080	1,169	1,090	1,180	1,107	1,190		1,149
0,0600	1,003	1,048	1,006	1,053	1,010	1,057	1,017	1,066	1,031	1,081		1,085
0,1000	0,957	0,958	0,958	0,960	0,959	0,962	0,962	0,968	0,970	0,979		1,007
0,1500	0,941	0,919	0,941	0,920	0,942	0,921	0,943	0,924	0,947	0,931		0,957
0,2000	0,939	0,908	0,939	0,908	0,939	0,909	0,940	0,911	0,942	0,915		0,936
0,3000	0,947	0,914	0,947	0,914	0,947	0,914	0,947	0,915	0,948	0,917		0,929
0,4000	0,960	0,933	0,960	0,934	0,960	0,934	0,960	0,934	0,960	0,935		0,941
0,5000	0,974	0,958	0,974	0,958	0,974	0,958	0,974	0,958	0,974	0,958		0,961

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R & Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	1,776		1,658		1,592		1,513		1,412		1,233	
0,0001	1,730		1,636		1,578		1,504		1,408		1,232	
0,0002	1,689		1,615		1,564		1,496		1,404		1,231	
0,0003	1,654		1,595		1,551		1,488		1,400		1,230	
0,0004	1,623		1,576		1,538		1,48		1,396		1,229	
0,0005	1,596		1,559		1,525		1,473		1,392		1,228	
0,0006	1,572		1,543		1,514		1,465		1,388		1,227	
0,0008	1,532		1,514		1,492		1,451		1,381		1,225	
0,0010	1,499		1,488		1,472		1,437		1,374		1,223	
0,0012	1,473		1,466		1,453		1,424		1,366		1,221	
0,0015	1,440		1,436		1,429		1,406		1,356		1,218	
0,0020	1,398		1,397		1,393		1,379		1,340		1,213	
0,0030	1,340		1,341		1,340		1,334		1,310		1,203	
0,0040	1,300		1,301		1,301		1,298		1,283		1,194	
0,0060	1,244	/,	1,245	/,	1,245	/,	1,245	/,	1,239	/,	1,176	/,
0,0080	1,205		1,205		1,206		1,206		1,204		1,158	
0,0100	1,174		1,175		1,175		1,176		1,175		1,142	
0,0130	1,138		1,138		1,139		1,139		1,140		1,119	
0,0160	1,109		1,109		1,110		1,110		1,111		1,098	
0,0200	1,077		1,077		1,077		1,078		1,078		1,073	
0,0300	1,015		1,015		1,016		1,016		1,017		1,018	
0,0400	0,968		0,968		0,968		0,968		0,969		0,972	
0,0600	0,893		0,893		0,893		0,893		0,894		0,897	
0,1000	0,777		0,777		0,777		0,777		0,777		0,781	
0,1500	0,658		0,659		0,659		0,659		0,659		0,661	
0,2000	0,554		0,554		0,554		0,554		0,554		0,556	
0,3000	0,363		0,362		0,363		0,363		0,362		0,364	
0,4000	0,185		0,183		0,184		0,185		0,186		0,185	
0,5000	0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5
0	2,442	2,505	2,154	2,209	2,003	2,053	1,826	1,872	1,614	1,653	1,282	
0,0001	2,382	2,443	2,127	2,181	1,985	2,035	1,817	1,862	1,610	1,649	1,281	
0,0002	2,326	2,386	2,101	2,154	1,969	2,018	1,807	1,853	1,605	1,644	1,280	
0,0003	2,274	2,333	2,075	2,128	1,953	2,002	1,798	1,843	1,601	1,640	1,279	
0,0004	2,226	2,284	2,051	2,103	1,937	1,985	1,789	1,834	1,597	1,636	1,278	
0,0005	2,182	2,238	2,027	2,079	1,921	1,970	1,780	1,825	1,593	1,631	1,277	
0,0006	2,141	2,196	2,005	2,056	1,906	1,954	1,772	1,816	1,589	1,627	1,276	
0,0008	2,067	2,120	1,962	2,013	1,877	1,925	1,754	1,798	1,580	1,619	1,274	
0,0010	2,004	2,055	1,923	1,972	1,850	1,896	1,738	1,781	1,572	1,610	1,272	
0,0012	1,948	1,998	1,886	1,935	1,823	1,870	1,721	1,765	1,564	1,602	1,270	
0,0015	1,878	1,926	1,836	1,883	1,787	1,832	1,698	1,741	1,552	1,590	1,267	
0,0020	1,786	1,831	1,764	1,810	1,731	1,775	1,661	1,703	1,533	1,571	1,262	
0,0030	1,658	1,700	1,653	1,696	1,638	1,680	1,596	1,636	1,497	1,534	1,252	
0,0040	1,571	1,611	1,571	1,617	1,565	1,605	1,539	1,579	1,464	1,500	1,243	
0,0060	1,454	1,491	1,457	1,495	1,457	1,495	1,448	1,485	1,404	1,439	1,224	/,
0,0080	1,375	1,411	1,379	1,414	1,380	1,415	1,378	1,413	1,353	1,387	1,206	
0,0100	1,316	1,351	1,320	1,354	1,322	1,355	1,322	1,356	1,308	1,341	1,189	
0,0130	1,250	1,282	1,253	1,285	1,254	1,287	1,256	1,288	1,252	1,283	1,164	
0,0160	1,199	1,229	1,201	1,231	1,202	1,233	1,204	1,235	1,205	1,234	1,141	
0,0200	1,144	1,173	1,146	1,175	1,147	1,176	1,150	1,179	1,153	1,181	1,111	
0,0300	1,047	1,073	1,049	1,074	1,050	1,075	1,051	1,077	1,056	1,081	1,047	
0,0400	0,979	1,001	0,980	1,002	0,981	1,003	0,982	1,005	0,987	1,008	0,992	
0,0600	0,881	0,897	0,882	0,898	0,883	0,899	0,884	0,900	0,887	0,903	0,903	
0,1000	0,751	0,755	0,751	0,756	0,752	0,756	0,752	0,757	0,754	0,759	0,770	
0,1500	0,632	0,626	0,632	0,626	0,633	0,626	0,633	0,627	0,635	0,628	0,645	
0,2000	0,532	0,519	0,532	0,520	0,532	0,520	0,533	0,520	0,534	0,521	0,541	
0,3000	0,352	0,339	0,352	0,339	0,351	0,339	0,353	0,340	0,353	0,340	0,355	
0,4000	0,184	0,184	0,185	0,184	0,183	0,184	0,182	0,184	0,183	0,184	0,184	
0,5000	0,000	0,000	0,000	-0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R & Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	z/T	h=0,75	h=2,5	h=0,75								
0	2,938	3,154	2,476	2,657	2,242	2,404	1,984	2,121	1,688	1,794	1,287	1,322
0,0001	2,869	3,081	2,447	2,626	2,225	2,385	1,974	2,110	1,683	1,789	1,286	1,321
0,0002	2,805	3,012	2,418	2,596	2,207	2,366	1,964	2,100	1,679	1,785	1,285	1,320
0,0003	2,744	2,946	2,391	2,566	2,190	2,348	1,955	2,090	1,675	1,780	1,284	1,319
0,0004	2,686	2,885	2,363	2,537	2,173	2,330	1,945	2,080	1,671	1,776	1,283	1,318
0,0005	2,632	2,827	2,337	2,509	2,156	2,312	1,936	2,070	1,666	1,771	1,282	1,317
0,0006	2,580	2,772	2,312	2,482	2,139	2,295	1,927	2,061	1,662	1,767	1,281	1,316
0,0008	2,486	2,671	2,263	2,429	2,108	2,261	1,909	2,042	1,654	1,758	1,279	1,314
0,0010	2,402	2,580	2,217	2,380	2,077	2,228	1,891	2,023	1,646	1,750	1,277	1,312
0,0012	2,327	2,499	2,173	2,333	2,047	2,197	1,874	2,005	1,638	1,741	1,275	1,310
0,0015	2,228	2,393	2,112	2,268	2,006	2,152	1,849	1,978	1,625	1,727	1,272	1,307
0,0020	2,094	2,249	2,022	2,171	1,941	2,083	1,809	1,936	1,606	1,708	1,267	1,302
0,0030	1,902	2,042	1,875	2,013	1,829	1,963	1,736	1,858	1,569	1,669	1,257	1,293
0,0040	1,770	1,900	1,762	1,891	1,736	1,863	1,671	1,789	1,534	1,632	1,247	1,283
0,0060	1,597	1,712	1,599	1,716	1,593	1,708	1,562	1,672	1,470	1,565	1,228	1,265
0,0080	1,483	1,589	1,488	1,595	1,488	1,595	1,475	1,577	1,413	1,505	1,210	1,247
0,0100	1,399	1,499	1,405	1,505	1,408	1,507	1,403	1,500	1,363	1,451	1,193	1,229
0,0130	1,307	1,399	1,313	1,404	1,317	1,408	1,318	1,408	1,299	1,381	1,168	1,204
0,0160	1,238	1,323	1,243	1,328	1,247	1,331	1,252	1,334	1,244	1,321	1,145	1,180
0,0200	1,167	1,245	1,172	1,249	1,176	1,252	1,181	1,257	1,182	1,254	1,115	1,149
0,0300	1,048	1,110	1,051	1,114	1,054	1,116	1,060	1,121	1,068	1,127	1,050	1,081
0,0400	0,969	1,019	0,972	1,022	0,974	1,024	0,978	1,028	0,988	1,036	0,995	1,021
0,0600	0,865	0,894	0,866	0,896	0,868	0,897	0,871	0,900	0,879	0,908	0,904	0,922
0,1000	0,735	0,735	0,736	0,736	0,737	0,737	0,739	0,739	0,743	0,745	0,770	0,772
0,1500	0,622	0,602	0,622	0,602	0,623	0,603	0,624	0,604	0,626	0,608	0,644	0,633
0,2000	0,526	0,498	0,526	0,498	0,526	0,499	0,527	0,500	0,529	0,502	0,540	0,521
0,3000	0,350	0,329	0,350	0,329	0,350	0,329	0,350	0,330	0,351	0,331	0,355	0,338
0,4000	0,183	0,189	0,184	0,189	0,185	0,189	0,184	0,189	0,185	0,188	0,184	0,185
0,5000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	z/T	h=0,75	h=2,5	h=0,75								
0	3,354	3,870	2,697	3,094	2,383	2,718	2,053	2,315	1,708	1,878		1,326
0,0001	3,281	3,790	2,667	3,060	2,365	2,698	2,043	2,304	1,704	1,874		1,325
0,0002	3,212	3,712	2,638	3,027	2,347	2,678	2,033	2,294	1,700	1,869		1,324
0,0003	3,145	3,638	2,609	2,995	2,330	2,659	2,023	2,283	1,695	1,865		1,323
0,0004	3,082	3,566	2,581	2,964	2,313	2,640	2,014	2,273	1,691	1,860		1,322
0,0005	3,022	3,497	2,553	2,934	2,296	2,621	2,004	2,263	1,687	1,856		1,321
0,0006	2,964	3,431	2,527	2,904	2,279	2,603	1,995	2,253	1,683	1,852		1,320
0,0008	2,856	3,308	2,475	2,846	2,246	2,567	1,977	2,233	1,674	1,843		1,318
0,0010	2,757	3,195	2,426	2,790	2,214	2,532	1,960	2,207	1,666	1,834		1,316
0,0012	2,667	3,091	2,379	2,737	2,184	2,498	1,942	2,195	1,658	1,826		1,314
0,0015	2,546	2,950	2,312	2,662	2,140	2,449	1,911	2,170	1,646	1,813		1,311
0,0020	2,376	2,752	2,212	2,547	2,071	2,371	1,877	2,122	1,626	1,793		1,306
0,0030	2,124	2,453	2,042	2,351	1,949	2,233	1,802	2,039	1,589	1,753		1,296
0,0040	1,947	2,243	1,907	2,193	1,846	2,114	1,734	1,963	1,553	1,716		1,287
0,0060	1,713	1,966	1,707	1,956	1,682	1,922	1,618	1,830	1,489	1,645	/,	1,268
0,0080	1,562	1,786	1,568	1,789	1,559	1,775	1,523	1,720	1,431	1,582		1,250
0,0100	1,454	1,657	1,464	1,664	1,463	1,660	1,444	1,627	1,380	1,525		1,233
0,0130	1,338	1,517	1,349	1,526	1,354	1,527	1,349	1,514	1,313	1,448		1,208
0,0160	1,253	1,413	1,264	1,422	1,272	1,427	1,273	1,423	1,256	1,382		1,184
0,0200	1,170	1,309	1,180	1,318	1,188	1,323	1,194	1,326	1,192	1,306		1,153
0,0300	1,037	1,137	1,043	1,144	1,050	1,149	1,059	1,157	1,073	1,160		1,085
0,0400	0,954	1,026	0,959	1,031	0,964	1,036	0,972	1,045	0,989	1,055		1,025
0,0600	0,850	0,882	0,853	0,886	0,856	0,889	0,861	0,896	0,876	0,910		0,925
0,1000	0,727	0,714	0,728	0,716	0,730	0,718	0,732	0,723	0,740	0,733		0,773
0,1500	0,618	0,583	0,618	0,584	0,619	0,585	0,620	0,587	0,624	0,594		0,632
0,2000	0,523	0,484	0,524	0,485	0,524	0,485	0,525	0,487	0,527	0,491		0,519
0,3000	0,349	0,325	0,349	0,326	0,350	0,326	0,350	0,326	0,350	0,327		0,337
0,4000	0,185	0,194	0,184	0,194	0,185	0,194	0,185	0,193	0,185	0,193		0,186
0,5000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000		-0,001

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R & Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,500	4,251	2,753	3,286	2,411	2,838	2,063	2,374	1,709	1,895		1,326
0,0001	3,427	4,171	2,723	3,252	2,393	2,819	2,053	2,364	1,705	1,890		1,325
0,0002	3,358	4,092	2,694	3,218	2,376	2,799	2,043	2,354	1,701	1,886		1,324
0,0003	3,29	4,015	2,666	3,185	2,358	2,780	2,034	2,344	1,696	1,882		1,323
0,0004	3,226	3,939	2,638	3,154	2,341	2,761	2,025	2,334	1,692	1,877		1,322
0,0005	3,164	3,866	2,610	3,123	2,325	2,742	2,015	2,324	1,688	1,873		1,321
0,0006	3,105	3,795	2,584	3,093	2,308	2,723	2,006	2,314	1,684	1,868		1,320
0,0008	2,994	3,663	2,532	3,034	2,276	2,686	1,988	2,294	1,676	1,860		1,318
0,0010	2,891	3,539	2,482	2,978	2,244	2,651	1,970	2,275	1,667	1,852		1,316
0,0012	2,797	3,425	2,435	2,923	2,213	2,616	1,953	2,256	1,659	1,843		1,314
0,0015	2,669	3,268	2,368	2,846	2,169	2,566	1,928	2,228	1,647	1,831		1,311
0,0020	2,487	3,042	2,265	2,725	2,098	2,487	1,888	2,183	1,628	1,810		1,306
0,0030	2,203	2,695	2,091	2,517	1,979	2,347	1,812	2,099	1,590	1,771		1,297
0,0040	2,024	2,445	1,950	2,344	1,872	2,218	1,744	2,022	1,555	1,733		1,287
0,0060	1,758	2,113	1,740	2,079	1,704	2,013	1,627	1,886	1,490	1,663	/,	1,269
0,0080	1,591	1,898	1,592	1,888	1,576	1,853	1,531	1,771	1,433	1,599		1,251
0,0100	1,472	1,745	1,481	1,745	1,477	1,727	1,452	1,674	1,381	1,541		1,233
0,0130	1,345	1,579	1,359	1,586	1,363	1,581	1,355	1,553	1,314	1,464		1,208
0,0160	1,255	1,458	1,270	1,467	1,277	1,469	1,278	1,456	1,257	1,396		1,184
0,0200	1,167	1,338	1,181	1,349	1,190	1,354	1,198	1,352	1,192	1,318		1,154
0,0300	1,030	1,144	1,040	1,154	1,048	1,162	1,060	1,171	1,072	1,169		1,085
0,0400	0,948	1,024	0,955	1,032	0,961	1,040	0,972	1,050	0,988	1,061		1,025
0,0600	0,846	0,873	0,850	0,879	0,853	0,884	0,861	0,894	0,875	0,911		0,924
0,1000	0,725	0,705	0,726	0,707	0,728	0,711	0,732	0,717	0,739	0,731		0,772
0,1500	0,617	0,576	0,618	0,578	0,619	0,579	0,620	0,583	0,624	0,591		0,631
0,2000	0,523	0,480	0,524	0,481	0,524	0,482	0,525	0,484	0,527	0,489		0,518
0,3000	0,349	0,325	0,350	0,325	0,350	0,326	0,350	0,326	0,346	0,327		0,337
0,4000	0,185	0,196	0,183	0,196	0,185	0,196	0,185	0,195	0,185	0,194		0,186
0,5000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		-0,001

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	1,844		1,721		1,653		1,571		1,466		1,279	
0,0001	1,796		1,698		1,638		1,562		1,462		1,278	
0,0002	1,754		1,677		1,624		1,554		1,458		1,277	
0,0003	1,717		1,656		1,610		1,545		1,454		1,276	
0,0004	1,685		1,637		1,597		1,537		1,450		1,275	
0,0005	1,657		1,619		1,584		1,529		1,446		1,274	
0,0006	1,632		1,602		1,572		1,522		1,442		1,273	
0,0008	1,590		1,572		1,549		1,507		1,434		1,271	
0,0010	1,557		1,545		1,528		1,493		1,427		1,269	
0,0012	1,529		1,522		1,509		1,479		1,419		1,267	
0,0015	1,495		1,492		1,483		1,460		1,408		1,264	
0,0020	1,451		1,451		1,447		1,432		1,391		1,258	
0,0030	1,391		1,392		1,391		1,385		1,360		1,248	
0,0040	1,349		1,350		1,350		1,348		1,333		1,239	
0,0060	1,291	/,	1,292	/,	1,293	/,	1,293	/,	1,287	/,	1,220	/,
0,0080	1,250		1,251		1,252		1,252		1,250		1,202	
0,0100	1,219		1,219		1,220		1,220		1,220		1,185	
0,0130	1,181		1,181		1,182		1,182		1,183		1,161	
0,0160	1,151		1,151		1,151		1,152		1,153		1,139	
0,0200	1,117		1,117		1,118		1,118		1,119		1,113	
0,0300	1,053		1,053		1,053		1,054		1,055		1,055	
0,0400	1,003		1,003		1,003		1,004		1,005		1,007	
0,0600	0,924		0,924		0,924		0,925		0,925		0,929	
0,1000	0,802		0,802		0,802		0,802		0,803		0,806	
0,1500	0,676		0,677		0,676		0,677		0,677		0,680	
0,2000	0,564		0,565		0,565		0,565		0,565		0,567	
0,3000	0,360		0,360		0,360		0,360		0,360		0,362	
0,4000	0,167		0,167		0,167		0,167		0,167		0,169	
0,5000	0,024		0,024		0,024		0,024		0,024		0,023	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R & Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	2,570	2,697	2,267	2,379	2,107	2,210	1,922	2,015	1,698	1,778	1,344	
0,0001	2,507	2,629	2,238	2,349	2,089	2,192	1,912	2,005	1,693	1,774	1,343	
0,0002	2,448	2,571	2,211	2,32	2,072	2,173	1,902	1,995	1,689	1,769	1,342	
0,0003	2,394	2,513	2,184	2,293	2,054	2,156	1,892	1,985	1,684	1,764	1,341	
0,0004	2,343	2,459	2,159	2,266	2,038	2,138	1,883	1,975	1,680	1,760	1,340	
0,0005	2,296	2,410	2,134	2,240	2,022	2,121	1,873	1,965	1,676	1,755	1,339	
0,0006	2,253	2,365	2,110	2,215	2,006	2,104	1,864	1,955	1,671	1,751	1,338	
0,0008	2,175	2,283	2,065	2,168	1,975	2,072	1,846	1,936	1,663	1,742	1,336	
0,0010	2,108	2,212	2,024	2,125	1,946	2,042	1,828	1,918	1,654	1,733	1,333	
0,0012	2,050	2,151	1,985	2,084	1,919	2,013	1,811	1,900	1,646	1,724	1,331	
0,0015	1,976	2,074	1,933	2,029	1,880	1,973	1,787	1,875	1,633	1,711	1,328	
0,0020	1,879	1,972	1,857	1,950	1,822	1,911	1,748	1,834	1,613	1,690	1,323	
0,0030	1,744	1,830	1,740	1,827	1,724	1,809	1,679	1,762	1,576	1,651	1,313	
0,0040	1,652	1,734	1,653	1,736	1,647	1,728	1,620	1,700	1,540	1,614	1,303	
0,0060	1,529	1,605	1,533	1,609	1,533	1,609	1,523	1,599	1,478	1,548	1,283	./,
0,0080	1,446	1,518	1,450	1,522	1,451	1,523	1,449	1,521	1,423	1,491	1,264	
0,0100	1,384	1,454	1,388	1,456	1,390	1,458	1,390	1,459	1,376	1,442	1,246	
0,0130	1,314	1,379	1,316	1,382	1,318	1,384	1,321	1,386	1,316	1,379	1,220	
0,0160	1,259	1,322	1,261	1,324	1,263	1,326	1,266	1,328	1,266	1,327	1,195	
0,0200	1,202	1,261	1,203	1,263	1,205	1,264	1,208	1,267	1,210	1,268	1,164	
0,0300	1,099	1,152	1,100	1,153	1,101	1,154	1,104	1,156	1,108	1,160	1,095	
0,0400	1,026	1,074	1,027	1,075	1,028	1,076	1,030	1,077	1,034	1,081	1,037	
0,0600	0,922	0,960	0,922	0,960	0,923	0,961	0,924	0,962	0,928	0,965	0,941	
0,1000	0,781	0,802	0,782	0,802	0,782	0,802	0,783	0,803	0,785	0,806	0,800	
0,1500	0,653	0,656	0,653	0,656	0,653	0,656	0,654	0,657	0,656	0,659	0,666	
0,2000	0,544	0,535	0,544	0,535	0,544	0,535	0,545	0,536	0,546	0,537	0,554	
0,3000	0,347	0,327	0,347	0,327	0,348	0,327	0,348	0,328	0,349	0,329	0,353	
0,4000	0,161	0,145	0,162	0,145	0,162	0,145	0,162	0,146	0,163	0,147	0,165	
0,5000	0,027	0,049	0,027	0,049	0,027	0,049	0,027	0,049	0,027	0,049	0,027	

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,107	3,485	2,619	2,935	2,372	2,655	2,097	2,341	1,783	1,976	1,349	1,432
0,0001	3,034	3,404	2,588	2,900	2,353	2,634	2,086	2,329	1,778	1,971	1,348	1,431
0,0002	2,965	3,327	2,558	2,867	2,334	2,613	2,076	2,318	1,774	1,966	1,347	1,430
0,0003	2,901	3,254	2,529	2,834	2,316	2,593	2,066	2,307	1,769	1,961	1,346	1,429
0,0004	2,839	3,186	2,500	2,802	2,298	2,573	2,056	2,296	1,765	1,956	1,345	1,428
0,0005	2,782	3,121	2,473	2,771	2,280	2,554	2,046	2,286	1,760	1,951	1,344	1,427
0,0006	2,727	3,06	2,446	2,741	2,263	2,535	2,037	2,275	1,756	1,947	1,343	1,426
0,0008	2,627	2,948	2,394	2,684	2,230	2,497	2,018	2,254	1,747	1,937	1,341	1,424
0,0010	2,538	2,848	2,346	2,629	2,197	2,462	1,999	2,233	1,738	1,928	1,339	1,422
0,0012	2,458	2,759	2,300	2,578	2,166	2,427	1,981	2,213	1,730	1,918	1,337	1,420
0,0015	2,354	2,641	2,235	2,506	2,122	2,378	1,954	2,184	1,717	1,905	1,334	1,416
0,0020	2,213	2,482	2,140	2,399	2,054	2,301	1,912	2,137	1,696	1,882	1,328	1,411
0,0030	2,010	2,254	1,984	2,224	1,935	2,169	1,835	2,052	1,657	1,840	1,318	1,401
0,0040	1,871	2,097	1,864	2,088	1,836	2,058	1,767	1,975	1,620	1,799	1,308	1,391
0,0060	1,687	1,890	1,691	1,894	1,684	1,886	1,651	1,845	1,552	1,725	1,288	1,371
0,0080	1,567	1,754	1,573	1,760	1,573	1,759	1,558	1,740	1,492	1,658	1,269	1,351
0,0100	1,478	1,654	1,484	1,660	1,487	1,662	1,482	1,654	1,439	1,599	1,251	1,332
0,0130	1,380	1,542	1,386	1,547	1,39	1,551	1,392	1,551	1,370	1,520	1,225	1,305
0,0160	1,307	1,458	1,312	1,462	1,316	1,466	1,320	1,469	1,312	1,453	1,200	1,279
0,0200	1,231	1,371	1,236	1,375	1,240	1,378	1,245	1,382	1,246	1,377	1,169	1,245
0,0300	1,104	1,220	1,107	1,222	1,110	1,225	1,115	1,230	1,125	1,235	1,099	1,170
0,0400	1,019	1,117	1,021	1,119	1,024	1,121	1,029	1,125	1,039	1,132	1,040	1,103
0,0600	0,906	0,975	0,908	0,976	0,909	0,977	0,913	0,981	0,921	0,987	0,943	0,991
0,1000	0,766	0,792	0,767	0,793	0,768	0,794	0,770	0,796	0,775	0,801	0,799	0,821
0,1500	0,643	0,636	0,643	0,636	0,644	0,637	0,645	0,639	0,648	0,642	0,665	0,664
0,2000	0,538	0,512	0,538	0,513	0,538	0,513	0,539	0,515	0,541	0,518	0,552	0,537
0,3000	0,345	0,309	0,345	0,309	0,345	0,310	0,346	0,311	0,347	0,313	0,352	0,326
0,4000	0,161	0,141	0,161	0,141	0,161	0,142	0,162	0,142	0,163	0,143	0,165	0,147
0,5000	0,027	0,062	0,027	0,062	0,027	0,062	0,027	0,061	0,027	0,061	0,027	0,054

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R & Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	3,558	4,370	2,861	3,491	2,527	3,063	2,176	2,604	1,806	2,101		1,442
0,0001	3,480	4,278	2,829	3,453	2,508	3,041	2,165	2,592	1,801	2,096		1,441
0,0002	3,405	4,190	2,797	3,416	2,489	3,019	2,155	2,580	1,796	2,091		1,440
0,0003	3,334	4,104	2,767	3,380	2,471	2,997	2,145	2,569	1,792	2,086		1,439
0,0004	3,266	4,022	2,737	3,344	2,452	2,976	2,135	2,558	1,787	2,082		1,438
0,0005	3,201	3,944	2,708	3,310	2,434	2,954	2,125	2,546	1,783	2,077		1,436
0,0006	3,141	3,869	2,680	3,276	2,417	2,934	2,115	2,535	1,778	2,072		1,435
0,0008	3,023	3,728	2,625	3,210	2,382	2,893	2,096	2,513	1,770	2,062		1,433
0,0010	2,919	3,599	2,573	3,148	2,349	2,853	2,077	2,492	1,761	2,053		1,431
0,0012	2,825	3,481	2,524	3,088	2,317	2,815	2,059	2,470	1,752	2,044		1,429
0,0015	2,697	3,322	2,453	3,003	2,270	2,759	2,032	2,439	1,740	2,030		1,426
0,0020	2,517	3,098	2,346	2,872	2,198	2,672	1,989	2,389	1,719	2,007		1,421
0,0030	2,250	2,762	2,166	2,651	2,069	2,516	1,909	2,296	1,679	1,963		1,411
0,0040	2,064	2,527	2,022	2,471	1,959	2,381	1,837	2,211	1,642	1,921		1,400
0,0060	1,816	2,215	1,810	2,203	1,784	2,163	1,714	2,061	1,573	1,843	/,	1,380
0,0080	1,656	2,012	1,661	2,013	1,652	1,996	1,613	1,936	1,512	1,772		1,361
0,0100	1,541	1,865	1,551	1,872	1,549	1,866	1,529	1,830	1,458	1,707		1,342
0,0130	1,416	1,705	1,428	1,714	1,433	1,715	1,428	1,700	1,387	1,621		1,315
0,0160	1,326	1,588	1,337	1,596	1,344	1,600	1,348	1,596	1,326	1,545		1,289
0,0200	1,237	1,468	1,247	1,477	1,254	1,482	1,263	1,484	1,258	1,457		1,255
0,0300	1,093	1,270	1,101	1,277	1,107	1,283	1,118	1,290	1,130	1,290		1,179
0,0400	1,004	1,141	1,010	1,147	1,015	1,152	1,025	1,160	1,041	1,169		1,111
0,0600	0,892	0,973	0,895	0,977	0,898	0,981	0,905	0,988	0,919	1,000		0,997
0,1000	0,757	0,774	0,759	0,776	0,760	0,779	0,764	0,784	0,772	0,794		0,823
0,1500	0,638	0,615	0,639	0,617	0,640	0,619	0,642	0,622	0,646	0,629		0,663
0,2000	0,535	0,495	0,536	0,496	0,537	0,497	0,538	0,500	0,540	0,505		0,534
0,3000	0,344	0,300	0,345	0,301	0,345	0,301	0,346	0,303	0,347	0,306		0,323
0,4000	0,161	0,143	0,161	0,144	0,162	0,144	0,162	0,144	0,163	0,145		0,147
0,5000	0,027	0,069	0,027	0,068	0,027	0,068	0,027	0,068	0,027	0,067		0,057

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5
0	3,721	4,857	2,922	3,746	2,558	3,228	2,185	2,690	1,807	2,128		1,442
0,0001	3,644	4,763	2,890	3,708	2,539	3,205	2,175	2,678	1,802	2,124		1,441
0,0002	3,569	4,673	2,859	3,671	2,520	3,184	2,165	2,667	1,798	2,119		1,440
0,0003	3,498	4,585	2,828	3,634	2,501	3,162	2,155	2,655	1,793	2,114		1,439
0,0004	3,429	4,500	2,798	3,599	2,483	3,141	2,145	2,644	1,788	2,109		1,438
0,0005	3,363	4,418	2,769	3,564	2,465	3,120	2,135	2,633	1,784	2,104		1,437
0,0006	3,300	4,340	2,741	3,529	2,447	3,099	2,125	2,622	1,780	2,099		1,436
0,0008	3,181	4,190	2,685	3,463	2,412	3,059	2,106	2,600	1,771	2,090		1,434
0,0010	3,072	4,051	2,632	3,399	2,379	3,019	2,087	2,578	1,762	2,080		1,432
0,0012	2,972	3,921	2,582	3,338	2,346	2,981	2,069	2,557	1,753	2,071		1,430
0,0015	2,837	3,743	2,511	3,248	2,299	2,925	2,042	2,526	1,741	2,057		1,426
0,0020	2,645	3,485	2,402	3,111	2,226	2,837	1,999	2,476	1,720	2,035		1,421
0,0030	2,351	3,086	2,217	2,872	2,096	2,675	1,919	2,382	1,680	1,991		1,411
0,0040	2,143	2,796	2,067	2,674	1,984	2,534	1,847	2,295	1,643	1,949		1,401
0,0060	1,866	2,410	1,845	2,369	1,805	2,298	1,723	2,141	1,574	1,871	/,	1,381
0,0080	1,687	2,161	1,687	2,148	1,670	2,112	1,621	2,010	1,513	1,799		1,362
0,0100	1,560	1,984	1,570	1,983	1,564	1,965	1,536	1,898	1,459	1,733		1,343
0,0130	1,425	1,792	1,440	1,798	1,443	1,793	1,433	1,758	1,388	1,645		1,315
0,0160	1,328	1,652	1,344	1,662	1,351	1,663	1,352	1,645	1,327	1,567		1,289
0,0200	1,234	1,513	1,249	1,524	1,258	1,529	1,266	1,524	1,259	1,478		1,255
0,0300	1,086	1,287	1,098	1,298	1,106	1,305	1,119	1,312	1,131	1,304		1,179
0,0400	0,998	1,146	1,005	1,154	1,012	1,161	1,024	1,172	1,041	1,179		1,111
0,0600	0,887	0,967	0,891	0,973	0,896	0,978	0,904	0,989	0,919	1,004		0,997
0,1000	0,755	0,764	0,757	0,768	0,759	0,771	0,763	0,778	0,771	0,793		0,824
0,1500	0,638	0,607	0,639	0,610	0,640	0,612	0,641	0,616	0,646	0,626		0,663
0,2000	0,535	0,489	0,536	0,491	0,536	0,493	0,538	0,496	0,540	0,502		0,534
0,3000	0,344	0,298	0,345	0,299	0,345	0,300	0,346	0,302	0,347	0,305		0,323
0,4000	0,161	0,145	0,161	0,146	0,162	0,146	0,162	0,146	0,163	0,146		0,147
0,5000	0,027	0,071	0,027	0,071	0,027	0,070	0,027	0,0700	0,027	0,068		0,057

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,122		5,111		5,095		5,070		5,008		4,732	
0,0001	4,918		4,908		4,892		4,868		4,808		4,542	
0,0002	4,730		4,719		4,705		4,682		4,624		4,365	
0,0003	4,555		4,545		4,532		4,510		4,454		4,202	
0,0004	4,393		4,383		4,369		4,348		4,293		4,053	
0,0005	4,243		4,233		4,219		4,198		4,146		3,913	
0,0006	4,104		4,094		4,080		4,060		4,010		3,784	
0,0008	3,851		3,842		3,830		3,811		3,763		3,551	
0,0010	3,631		3,623		3,611		3,594		3,549		3,350	
0,0012	3,438		3,430		3,420		3,403		3,360		3,172	
0,0015	3,189		3,183		3,173		3,157		3,118		2,943	
0,0020	2,860		2,854		2,846		2,832		2,798		2,642	
0,0030	2,411		2,406		2,400		2,389		2,361		2,233	
0,0040	2,124		2,120		2,115		2,106		2,083		1,975	
0,0060	1,789	/,	1,786	/,	1,782	/,	1,776	/,	1,759	/,	1,676	/,
0,0080	1,603		1,601		1,598		1,593		1,581		1,514	
0,0100	1,487		1,486		1,484		1,480		1,470		1,415	
0,0130	1,378		1,378		1,376		1,373		1,366		1,323	
0,0160	1,310		1,309		1,308		1,306		1,301		1,267	
0,0200	1,250		1,249		1,248		1,247		1,244		1,219	
0,0300	1,168		1,168		1,168		1,167		1,166		1,155	
0,0400	1,125		1,125		1,125		1,125		1,125		1,121	
0,0600	1,076		1,077		1,076		1,077		1,078		1,080	
0,1000	1,028		1,028		1,028		1,028		1,029		1,035	
0,1500	0,997		0,997		0,997		0,997		0,998		1,003	
0,2000	0,979		0,979		0,979		0,979		0,980		0,985	
0,3000	0,961		0,961		0,961		0,961		0,962		0,965	
0,4000	0,954		0,954		0,954		0,954		0,954		0,957	
0,5000	0,952		0,952		0,952		0,952		0,952		0,955	

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,834	6,245	5,794	6,194	5,751	6,141	5,664	6,031	5,465	5,787	4,876	
0,0001	5,606	6,000	5,567	5,951	5,525	5,900	5,447	5,794	5,253	5,558	4,680	
0,0002	5,393	5,768	5,355	5,720	5,315	5,671	5,232	5,569	5,046	5,340	4,498	
0,0003	5,195	5,559	5,159	5,513	5,120	5,465	5,034	5,366	4,856	5,145	4,330	
0,0004	5,014	5,363	4,978	5,319	4,940	5,272	4,862	5,177	4,688	4,962	4,176	
0,0005	4,843	5,182	4,809	5,139	4,772	5,094	4,696	5,001	4,523	4,792	4,031	
0,0006	4,686	5,013	4,652	4,971	4,617	4,927	4,542	4,838	4,379	4,634	3,899	
0,0008	4,400	4,707	4,369	4,667	4,335	4,626	4,264	4,542	4,112	4,350	3,659	
0,0010	4,150	4,442	4,121	4,405	4,089	4,366	4,021	4,287	3,874	4,103	3,452	
0,0012	3,930	4,205	3,902	4,170	3,872	4,133	3,808	4,058	3,670	3,885	3,269	
0,0015	3,647	3,901	3,621	3,868	3,593	3,834	3,533	3,765	3,406	3,605	3,032	
0,0020	3,268	3,496	3,244	3,467	3,220	3,437	3,168	3,376	3,055	3,235	2,722	
0,0030	2,748	2,939	2,729	2,916	2,710	2,891	2,668	2,842	2,576	2,728	2,301	
0,0040	2,413	2,582	2,397	2,562	2,381	2,542	2,348	2,501	2,271	2,405	2,035	
0,0060	2,016	2,158	2,005	2,143	1,994	2,129	1,970	2,098	1,914	2,027	1,727	/,
0,0080	1,792	1,919	1,784	1,908	1,776	1,897	1,759	1,873	1,716	1,818	1,560	
0,0100	1,650	1,766	1,643	1,757	1,637	1,749	1,625	1,731	1,591	1,686	1,458	
0,0130	1,511	1,618	1,507	1,611	1,503	1,605	1,495	1,593	1,472	1,560	1,363	
0,0160	1,421	1,520	1,418	1,516	1,416	1,511	1,411	1,502	1,395	1,478	1,305	
0,0200	1,339	1,431	1,338	1,428	1,336	1,426	1,334	1,42	1,325	1,404	1,255	
0,0300	1,222	1,302	1,222	1,301	1,222	1,301	1,223	1,299	1,223	1,294	1,186	
0,0400	1,157	1,229	1,158	1,229	1,158	1,229	1,160	1,229	1,164	1,228	1,148	
0,0600	1,084	1,142	1,085	1,143	1,086	1,143	1,088	1,144	1,093	1,147	1,099	
0,1000	1,016	1,053	1,017	1,054	1,018	1,054	1,020	1,056	1,024	1,059	1,041	
0,1500	0,980	0,995	0,981	0,996	0,981	0,997	0,982	0,998	0,985	1,001	1,001	
0,2000	0,963	0,962	0,964	0,963	0,964	0,963	0,965	0,964	0,967	0,967	0,978	
0,3000	0,949	0,928	0,950	0,928	0,950	0,929	0,950	0,930	0,951	0,932	0,958	
0,4000	0,945	0,914	0,945	0,914	0,945	0,914	0,945	0,915	0,946	0,917	0,950	
0,5000	0,944	0,910	0,944	0,910	0,944	0,910	0,944	0,911	0,945	0,913	0,948	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	z/T	h=0,75	h=2,5	h=0,75								
0	6,209	7,097	6,136	6,981	6,062	6,864	5,903	6,634	5,603	6,192	4,887	5,152
0,0001	5,970	6,821	5,897	6,709	5,826	6,596	5,671	6,375	5,382	5,946	4,690	4,946
0,0002	5,746	6,566	5,674	6,451	5,602	6,341	5,455	6,128	5,171	5,714	4,508	4,754
0,0003	5,539	6,331	5,468	6,219	5,400	6,113	5,255	5,907	4,980	5,505	4,339	4,577
0,0004	5,347	6,113	5,277	6,002	5,211	5,899	5,070	5,700	4,804	5,309	4,185	4,414
0,0005	5,167	5,911	5,099	5,801	5,035	5,701	4,898	5,509	4,640	5,127	4,040	4,262
0,0006	5,002	5,723	4,934	5,612	4,871	5,516	4,738	5,329	4,489	4,959	3,907	4,121
0,0008	4,704	5,376	4,634	5,277	4,576	5,186	4,449	5,011	4,212	4,655	3,667	3,867
0,0010	4,432	5,072	4,371	4,973	4,317	4,887	4,196	4,722	3,973	4,390	3,460	3,646
0,0012	4,199	4,804	4,144	4,709	4,086	4,628	3,974	4,473	3,761	4,157	3,276	3,452
0,0015	3,896	4,459	3,841	4,369	3,791	4,294	3,688	4,150	3,490	3,858	3,039	3,204
0,0020	3,493	3,994	3,442	3,916	3,398	3,850	3,305	3,723	3,131	3,463	2,728	2,876
0,0030	2,930	3,351	2,892	3,290	2,856	3,236	2,783	3,133	2,641	2,920	2,306	2,432
0,0040	2,567	2,936	2,537	2,887	2,507	2,841	2,447	2,754	2,328	2,575	2,040	2,151
0,0060	2,135	2,440	2,114	2,408	2,093	2,374	2,051	2,308	1,961	2,172	1,731	1,826
0,0080	1,889	2,158	1,874	2,135	1,859	2,109	1,828	2,057	1,758	1,948	1,564	1,650
0,0100	1,730	1,975	1,719	1,958	1,708	1,937	1,685	1,897	1,629	1,806	1,461	1,543
0,0130	1,574	1,793	1,566	1,782	1,560	1,768	1,545	1,739	1,506	1,670	1,366	1,444
0,0160	1,469	1,672	1,465	1,664	1,461	1,655	1,453	1,634	1,425	1,580	1,308	1,382
0,0200	1,374	1,559	1,372	1,555	1,371	1,549	1,367	1,535	1,351	1,497	1,257	1,330
0,0300	1,236	1,389	1,236	1,389	1,238	1,388	1,241	1,385	1,240	1,369	1,189	1,257
0,0400	1,160	1,291	1,161	1,292	1,163	1,292	1,168	1,293	1,174	1,290	1,150	1,216
0,0600	1,077	1,174	1,078	1,176	1,080	1,178	1,085	1,181	1,095	1,187	1,100	1,160
0,1000	1,007	1,057	1,008	1,059	1,009	1,061	1,012	1,064	1,020	1,072	1,041	1,084
0,1500	0,974	0,987	0,974	0,988	0,975	0,989	0,976	0,992	0,980	0,998	1,000	1,023
0,2000	0,959	0,948	0,959	0,949	0,959	0,950	0,960	0,952	0,963	0,957	0,978	0,982
0,3000	0,947	0,911	0,947	0,911	0,947	0,912	0,948	0,913	0,949	0,917	0,957	0,937
0,4000	0,944	0,896	0,944	0,897	0,944	0,897	0,944	0,898	0,945	0,901	0,950	0,918
0,5000	0,943	0,892	0,943	0,893	0,943	0,893	0,943	0,894	0,943	0,897	0,948	0,912

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	z/T	h=0,75	h=2,5	h=0,75								
0	6,438	7,835	6,326	7,609	6,207	7,393	5,996	7,019	5,632	6,393		5,155
0,0001	6,192	7,535	6,081	7,317	5,966	7,105	5,761	6,745	5,413	6,140		4,948
0,0002	5,962	7,255	5,853	7,044	5,742	6,838	5,541	6,483	5,200	5,901		4,757
0,0003	5,748	7,005	5,641	6,801	5,533	6,592	5,338	6,249	5,004	5,686		4,580
0,0004	5,551	6,764	5,446	6,566	5,341	6,365	5,150	6,031	4,831	5,485		4,416
0,0005	5,367	6,543	5,263	6,352	5,162	6,153	4,975	5,828	4,661	5,298		4,264
0,0006	5,195	6,343	5,094	6,158	4,995	5,957	4,813	5,638	4,513	5,125		4,123
0,0008	4,882	5,956	4,789	5,782	4,697	5,595	4,519	5,301	4,237	4,812		3,870
0,0010	4,610	5,621	4,512	5,457	4,424	5,279	4,263	4,995	3,992	4,542		3,648
0,0012	4,360	5,327	4,275	5,172	4,193	5,000	4,037	4,732	3,782	4,300		3,454
0,0015	4,050	4,947	3,967	4,804	3,891	4,642	3,746	4,391	3,510	3,991		3,206
0,0020	3,627	4,427	3,556	4,301	3,489	4,161	3,358	3,939	3,149	3,58		2,878
0,0030	3,042	3,712	2,984	3,610	2,930	3,496	2,827	3,316	2,656	3,02		2,433
0,0040	2,661	3,246	2,616	3,161	2,571	3,069	2,486	2,917	2,341	2,664		2,152
0,0060	2,206	2,690	2,176	2,626	2,143	2,561	2,084	2,447	1,973	2,246	/,	1,827
0,0080	1,944	2,369	1,924	2,320	1,901	2,272	1,856	2,181	1,769	2,015		1,651
0,0100	1,774	2,159	1,760	2,121	1,743	2,084	1,710	2,011	1,639	1,869		1,544
0,0130	1,604	1,946	1,598	1,921	1,588	1,895	1,567	1,841	1,515	1,728		1,444
0,0160	1,491	1,801	1,488	1,783	1,483	1,766	1,471	1,726	1,433	1,634		1,383
0,0200	1,386	1,663	1,387	1,653	1,386	1,643	1,382	1,617	1,358	1,548		1,330
0,0300	1,235	1,452	1,239	1,452	1,243	1,451	1,247	1,445	1,245	1,412		1,258
0,0400	1,154	1,329	1,158	1,332	1,162	1,335	1,170	1,337	1,177	1,325		1,216
0,0600	1,069	1,187	1,072	1,191	1,076	1,195	1,083	1,202	1,096	1,209		1,160
0,1000	1,001	1,052	1,003	1,054	1,004	1,058	1,009	1,065	1,018	1,078		1,085
0,1500	0,970	0,975	0,971	0,977	0,972	0,980	0,974	0,984	0,979	0,995		1,022
0,2000	0,957	0,937	0,957	0,938	0,958	0,939	0,959	0,943	0,962	0,951		0,982
0,3000	0,946	0,901	0,947	0,902	0,947	0,903	0,947	0,905	0,949	0,910		0,937
0,4000	0,943	0,888	0,943	0,888	0,943	0,889	0,943	0,891	0,944	0,894		0,918
0,5000	0,942	0,884	0,942	0,885	0,942	0,886	0,943	0,887	0,943	0,890		0,912

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	6,504	8,129	6,367	7,829	6,237	7,551	6,007	7,112	5,637	6,428		5,152
0,0001	6,256	7,824	6,122	7,527	5,996	7,256	5,771	6,833	5,414	6,174		4,944
0,0002	6,026	7,541	5,894	7,248	5,767	6,984	5,551	6,569	5,203	5,933		4,752
0,0003	5,813	7,281	5,682	6,990	5,560	6,732	5,347	6,332	5,010	5,717		4,574
0,0004	5,615	7,040	5,487	6,752	5,367	6,500	5,159	6,110	4,833	5,515		4,411
0,0005	5,430	6,816	5,304	6,532	5,186	6,284	4,984	5,904	4,668	5,327		4,259
0,0006	5,258	6,608	5,134	6,331	5,018	6,084	4,821	5,712	4,516	5,153		4,118
0,0008	4,940	6,207	4,824	5,944	4,718	5,714	4,527	5,371	4,237	4,838		3,864
0,0010	4,663	5,865	4,555	5,609	4,447	5,391	4,270	5,061	3,997	4,566		3,644
0,0012	4,419	5,562	4,308	5,316	4,212	5,107	4,044	4,794	3,784	4,324		3,450
0,0015	4,099	5,160	4,002	4,938	3,908	4,741	3,753	4,449	3,511	4,012		3,203
0,0020	3,671	4,624	3,585	4,421	3,504	4,250	3,364	3,992	3,150	3,600		2,875
0,0030	3,077	3,872	3,009	3,713	2,943	3,573	2,833	3,362	2,657	3,037		2,431
0,0040	2,690	3,385	2,636	3,251	2,582	3,138	2,491	2,958	2,342	2,679		2,150
0,0060	2,226	2,796	2,190	2,703	2,153	2,620	2,088	2,483	1,974	2,260	/,	1,825
0,0080	1,959	2,457	1,935	2,387	1,909	2,326	1,860	2,214	1,769	2,027		1,650
0,0100	1,785	2,234	1,769	2,180	1,750	2,133	1,713	2,041	1,640	1,880		1,542
0,0130	1,611	2,007	1,604	1,971	1,593	1,938	1,569	1,869	1,515	1,739		1,443
0,0160	1,495	1,851	1,493	1,826	1,488	1,805	1,473	1,752	1,433	1,645		1,382
0,0200	1,388	1,701	1,390	1,687	1,389	1,676	1,384	1,640	1,358	1,558		1,329
0,0300	1,234	1,472	1,239	1,471	1,244	1,473	1,248	1,462	1,245	1,421		1,257
0,0400	1,152	1,339	1,157	1,341	1,162	1,349	1,170	1,349	1,178	1,332		1,215
0,0600	1,067	1,187	1,070	1,190	1,075	1,199	1,083	1,208	1,096	1,214		1,159
0,1000	1,000	1,047	1,002	1,049	1,004	1,056	1,008	1,064	1,018	1,079		1,084
0,1500	0,970	0,971	0,970	0,972	0,971	0,976	0,973	0,982	0,979	0,995		1,021
0,2000	0,957	0,933	0,957	0,933	0,957	0,936	0,959	0,940	0,962	0,950		0,980
0,3000	0,946	0,899	0,947	0,899	0,947	0,901	0,947	0,903	0,949	0,908		0,934
0,4000	0,943	0,886	0,943	0,886	0,943	0,887	0,943	0,889	0,944	0,893		0,915
0,5000	0,942	0,883	0,942	0,882	0,942	0,884	0,943	0,885	0,943	0,889		0,909

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	4,876		4,876		4,860		4,843		4,799		4,587	
0,0001	4,679		4,678		4,662		4,646		4,603		4,401	
0,0002	4,498		4,498		4,482		4,467		4,425		4,227	
0,0003	4,330		4,330		4,315		4,300		4,260		4,069	
0,0004	4,175		4,175		4,160		4,146		4,107		3,922	
0,0005	4,030		4,030		4,016		4,002		3,964		3,785	
0,0006	3,897		3,897		3,883		3,869		3,833		3,658	
0,0008	3,656		3,656		3,643		3,630		3,596		3,432	
0,0010	3,445		3,445		3,434		3,421		3,389		3,234	
0,0012	3,261		3,261		3,250		3,238		3,208		3,061	
0,0015	3,025		3,025		3,014		3,003		2,975		2,840	
0,0020	2,712		2,712		2,703		2,693		2,668		2,548	
0,0030	2,285		2,285		2,278		2,270		2,251		2,153	
0,0040	2,014		2,014		2,008		2,002		1,986		1,904	
0,0060	1,698	/,	1,698	/,	1,694	/,	1,689	/,	1,678	/,	1,617	/,
0,0080	1,524		1,524		1,521		1,518		1,509		1,462	
0,0100	1,415		1,415		1,413		1,411		1,405		1,366	
0,0130	1,314		1,314		1,313		1,311		1,307		1,279	
0,0160	1,250		1,250		1,249		1,249		1,246		1,226	
0,0200	1,195		1,195		1,195		1,194		1,193		1,180	
0,0300	1,121		1,121		1,122		1,122		1,122		1,119	
0,0400	1,083		1,083		1,083		1,084		1,085		1,087	
0,0600	1,041		1,041		1,042		1,042		1,043		1,049	
0,1000	1,002		1,002		1,002		1,003		1,004		1,010	
0,1500	0,980		0,980		0,980		0,980		0,981		0,986	
0,2000	0,969		0,969		0,970		0,970		0,970		0,974	
0,3000	0,965		0,965		0,965		0,965		0,966		0,967	
0,4000	0,970		0,970		0,970		0,970		0,971		0,972	
0,5000	0,980		0,980		0,980		0,980		0,980		0,980	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,551	5,742	5,515	5,699	5,477	5,656	5,397	5,566	5,216	5,362	4,694	
0,0001	5,331	5,515	5,296	5,472	5,258	5,429	5,181	5,343	5,007	5,096	4,502	
0,0002	5,128	5,305	5,092	5,262	5,056	5,236	4,982	5,137	4,813	4,854	4,327	
0,0003	4,940	5,109	4,904	5,068	4,869	5,026	4,797	4,946	4,633	4,633	4,165	
0,0004	4,765	4,929	4,730	4,888	4,696	4,847	4,626	4,770	4,468	4,430	4,014	
0,0005	4,602	4,761	4,567	4,720	4,535	4,680	4,467	4,606	4,313	4,245	3,875	
0,0006	4,451	4,604	4,416	4,565	4,385	4,525	4,319	4,454	4,170	4,074	3,745	
0,0008	4,178	4,322	4,145	4,284	4,115	4,246	4,054	4,179	3,913	3,773	3,513	
0,0010	3,939	4,075	3,908	4,038	3,879	4,002	3,821	3,939	3,688	3,516	3,311	
0,0012	3,729	3,857	3,699	3,823	3,672	3,788	3,617	3,729	3,491	3,296	3,134	
0,0015	3,458	3,577	3,430	3,545	3,405	3,512	3,355	3,458	3,238	3,021	2,908	
0,0020	3,098	3,205	3,073	3,176	3,051	3,147	3,007	3,100	2,903	2,669	2,609	
0,0030	2,603	2,693	2,584	2,671	2,566	2,646	2,530	2,609	2,447	2,214	2,205	
0,0040	2,285	2,364	2,270	2,347	2,256	2,325	2,226	2,295	2,158	1,939	1,950	
0,0060	1,909	1,976	1,900	1,965	1,890	1,947	1,869	1,927	1,819	1,629	1,655	/,
0,0080	1,698	1,758	1,692	1,750	1,684	1,734	1,669	1,721	1,631	1,462	1,496	
0,0100	1,564	1,619	1,559	1,613	1,554	1,599	1,543	1,591	1,514	1,361	1,398	
0,0130	1,434	1,484	1,431	1,480	1,428	1,469	1,421	1,465	1,401	1,268	1,309	
0,0160	1,349	1,396	1,348	1,394	1,346	1,384	1,342	1,383	1,329	1,210	1,254	
0,0200	1,273	1,316	1,273	1,315	1,272	1,307	1,270	1,308	1,263	1,160	1,206	
0,0300	1,165	1,202	1,165	1,202	1,166	1,196	1,167	1,200	1,168	1,091	1,142	
0,0400	1,105	1,138	1,106	1,138	1,107	1,134	1,109	1,139	1,114	1,049	1,106	
0,0600	1,040	1,065	1,041	1,066	1,043	1,062	1,045	1,068	1,051	0,998	1,062	
0,1000	0,984	0,996	0,985	0,997	0,986	0,993	0,987	0,998	0,992	0,944	1,011	
0,1500	0,958	0,958	0,959	0,959	0,960	0,956	0,961	0,960	0,964	0,915	0,980	
0,2000	0,951	0,943	0,951	0,943	0,951	0,940	0,952	0,944	0,954	0,905	0,966	
0,3000	0,953	0,938	0,953	0,939	0,953	0,936	0,953	0,939	0,954	0,910	0,961	
0,4000	0,963	0,949	0,963	0,949	0,963	0,947	0,963	0,949	0,964	0,929	0,967	
0,5000	0,976	0,966	0,976	0,966	0,976	0,965	0,976	0,966	0,976	0,952	0,978	

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,884	6,326	5,818	6,237	5,745	6,144	5,605	5,962	5,331	5,612	4,702	4,805
0,0001	5,651	6,078	5,587	5,991	5,517	5,900	5,382	5,725	5,117	5,385	4,509	4,565
0,0002	5,438	5,846	5,376	5,764	5,307	5,676	5,175	5,506	4,918	5,184	4,334	4,347
0,0003	5,240	5,631	5,180	5,553	5,112	5,469	4,983	5,302	4,735	4,983	4,172	4,147
0,0004	5,056	5,433	4,998	5,358	4,931	5,276	4,806	5,115	4,566	4,804	4,021	3,965
0,0005	4,885	5,247	4,828	5,176	4,762	5,096	4,641	4,940	4,408	4,638	3,881	3,798
0,0006	4,725	5,075	4,670	5,006	4,606	4,929	4,487	4,777	4,262	4,484	3,752	3,646
0,0008	4,437	4,765	4,385	4,700	4,323	4,628	4,211	4,484	3,999	4,207	3,519	3,376
0,0010	4,184	4,492	4,135	4,432	4,076	4,364	3,970	4,227	3,769	3,965	3,317	3,146
0,0012	3,961	4,252	3,914	4,196	3,859	4,131	3,758	4,002	3,568	3,753	3,140	2,950
0,0015	3,673	3,943	3,630	3,891	3,578	3,832	3,485	3,712	3,309	3,481	2,913	2,704
0,0020	3,290	3,530	3,252	3,485	3,206	3,432	3,123	3,327	2,967	3,122	2,614	2,392
0,0030	2,760	2,960	2,729	2,927	2,694	2,884	2,628	2,799	2,501	2,632	2,208	1,991
0,0040	2,418	2,592	2,393	2,567	2,365	2,532	2,311	2,462	2,205	2,320	1,953	1,750
0,0060	2,012	2,152	1,994	2,141	1,976	2,115	1,938	2,065	1,859	1,956	1,658	1,483
0,0080	1,781	1,901	1,768	1,899	1,756	1,880	1,728	1,842	1,667	1,754	1,499	1,344
0,0100	1,631	1,739	1,623	1,742	1,614	1,728	1,594	1,699	1,546	1,627	1,401	1,263
0,0130	1,485	1,580	1,480	1,588	1,475	1,578	1,464	1,559	1,429	1,504	1,311	1,193
0,0160	1,388	1,474	1,386	1,485	1,384	1,479	1,377	1,466	1,354	1,424	1,256	1,154
0,0200	1,299	1,377	1,299	1,389	1,299	1,386	1,297	1,379	1,284	1,351	1,208	1,124
0,0300	1,173	1,234	1,174	1,247	1,177	1,248	1,180	1,248	1,182	1,239	1,144	1,087
0,0400	1,104	1,154	1,106	1,166	1,109	1,168	1,114	1,171	1,121	1,170	1,108	1,066
0,0600	1,031	1,062	1,033	1,073	1,035	1,075	1,040	1,080	1,050	1,085	1,063	1,031
0,1000	0,974	0,978	0,975	0,988	0,976	0,989	0,979	0,993	0,987	0,998	1,011	0,979
0,1500	0,951	0,937	0,952	0,945	0,952	0,946	0,954	0,948	0,958	0,951	0,979	0,939
0,2000	0,946	0,922	0,946	0,928	0,946	0,929	0,947	0,931	0,950	0,932	0,965	0,919
0,3000	0,951	0,922	0,951	0,927	0,951	0,927	0,951	0,928	0,952	0,928	0,960	0,914
0,4000	0,962	0,938	0,962	0,942	0,962	0,942	0,962	0,942	0,963	0,942	0,967	0,929
0,5000	0,976	0,960	0,976	0,962	0,976	0,962	0,976	0,962	0,976	0,962	0,978	0,951

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	6,084	6,817	5,985	6,652	5,878	6,486	5,686	6,202	5,358	5,726		4,811
0,0001	5,850	6,553	5,748	6,393	5,645	6,230	5,460	5,955	5,143	5,495		4,617
0,0002	5,633	6,308	5,531	6,155	5,432	5,993	5,251	5,729	4,944	5,284		4,435
0,0003	5,431	6,081	5,330	5,933	5,233	5,774	5,058	5,519	4,759	5,087		4,268
0,0004	5,243	5,869	5,143	5,726	5,049	5,570	4,879	5,324	4,589	4,906		4,115
0,0005	5,068	5,672	4,968	5,534	4,877	5,381	4,711	5,142	4,431	4,737		3,971
0,0006	4,904	5,488	4,806	5,354	4,718	5,204	4,557	4,973	4,284	4,580		3,839
0,0008	4,608	5,155	4,512	5,030	4,429	4,886	4,277	4,669	4,019	4,298		3,601
0,0010	4,347	4,863	4,255	4,745	4,177	4,607	4,032	4,403	3,789	4,052		3,394
0,0012	4,117	4,605	4,029	4,493	3,954	4,362	3,817	4,169	3,586	3,836		3,213
0,0015	3,818	4,270	3,736	4,167	3,668	4,045	3,541	3,867	3,326	3,559		2,981
0,0020	3,418	3,823	3,346	3,732	3,285	3,624	3,174	3,466	2,983	3,192		2,675
0,0030	2,863	3,202	2,808	3,132	2,759	3,044	2,669	2,917	2,515	2,691		2,260
0,0040	2,504	2,799	2,461	2,744	2,421	2,671	2,347	2,565	2,217	2,373		1,999
0,0060	2,075	2,315	2,048	2,282	2,020	2,227	1,966	2,151	1,869	2,002	./,	1,698
0,0080	1,829	2,036	1,813	2,019	1,792	1,974	1,752	1,918	1,676	1,796		1,535
0,0100	1,669	1,854	1,659	1,847	1,645	1,810	1,615	1,768	1,554	1,666		1,436
0,0130	1,511	1,672	1,507	1,674	1,499	1,647	1,481	1,620	1,437	1,541		1,344
0,0160	1,406	1,548	1,406	1,557	1,402	1,536	1,391	1,520	1,360	1,459		1,288
0,0200	1,309	1,433	1,312	1,446	1,312	1,431	1,308	1,426	1,290	1,383		1,239
0,0300	1,171	1,262	1,176	1,279	1,180	1,271	1,185	1,280	1,186	1,265		1,173
0,0400	1,098	1,166	1,103	1,182	1,107	1,177	1,114	1,191	1,124	1,192		1,136
0,0600	1,024	1,059	1,027	1,073	1,030	1,070	1,037	1,085	1,050	1,098		1,087
0,1000	0,968	0,967	0,970	0,977	0,972	0,974	0,975	0,987	0,985	1,001		1,027
0,1500	0,948	0,926	0,949	0,934	0,950	0,931	0,952	0,939	0,957	0,950		0,983
0,2000	0,944	0,913	0,944	0,919	0,945	0,916	0,946	0,923	0,949	0,930		0,960
0,3000	0,950	0,917	0,950	0,921	0,950	0,919	0,951	0,923	0,952	0,926		0,946
0,4000	0,962	0,936	0,962	0,938	0,962	0,937	0,962	0,939	0,963	0,941		0,952
0,5000	0,976	0,959	0,976	0,960	0,976	0,960	0,976	0,961	0,976	0,962		0,967

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R und Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	6,138	7,000	6,020	6,783	5,901	6,580	5,696	6,254	5,359	5,742		4,811
0,0001	5,902	6,732	5,784	6,520	5,667	6,322	5,468	6,004	5,144	5,510		4,615
0,0002	5,684	6,481	5,567	6,276	5,452	6,083	5,260	5,774	4,945	5,296		4,435
0,0003	5,480	6,249	5,364	6,050	5,253	5,862	5,066	5,560	4,760	5,099		4,268
0,0004	5,291	6,033	5,176	5,839	5,069	5,656	4,886	5,364	4,590	4,916		4,115
0,0005	5,114	5,831	5,001	5,643	4,896	5,465	4,719	5,179	4,432	4,747		3,971
0,0006	4,949	5,643	4,838	5,460	4,736	5,287	4,564	5,009	4,285	4,590		3,839
0,0008	4,650	5,301	4,543	5,129	4,446	4,965	4,284	4,702	4,020	4,306		3,601
0,0010	4,387	5,001	4,285	4,839	4,193	4,682	4,039	4,433	3,789	4,059		3,394
0,0012	4,155	4,736	4,057	4,582	3,970	4,434	3,824	4,197	3,587	3,842		3,213
0,0015	3,853	4,392	3,762	4,251	3,682	4,113	3,546	3,893	3,327	3,563		2,981
0,0020	3,450	3,932	3,369	3,807	3,299	3,685	3,179	3,489	2,983	3,197		2,675
0,0030	2,890	3,292	2,826	3,196	2,770	3,097	2,674	2,937	2,515	2,695		2,261
0,0040	2,527	2,875	2,475	2,801	2,431	2,719	2,351	2,583	2,217	2,376		1,999
0,0060	2,092	2,373	2,056	2,331	2,028	2,271	1,970	2,165	1,869	2,004	./,	1,698
0,0080	1,842	2,083	1,817	2,061	1,799	2,015	1,755	1,929	1,676	1,798		1,535
0,0100	1,680	1,892	1,661	1,884	1,651	1,849	1,618	1,778	1,554	1,667		1,436
0,0130	1,518	1,699	1,507	1,705	1,504	1,682	1,483	1,628	1,437	1,542		1,344
0,0160	1,410	1,569	1,404	1,583	1,406	1,568	1,393	1,527	1,361	1,460		1,288
0,0200	1,311	1,446	1,309	1,466	1,314	1,459	1,310	1,431	1,290	1,383		1,239
0,0300	1,170	1,264	1,171	1,289	1,180	1,291	1,186	1,281	1,186	1,265		1,173
0,0400	1,096	1,162	1,097	1,186	1,106	1,191	1,115	1,190	1,124	1,190		1,136
0,0600	1,022	1,052	1,022	1,071	1,029	1,077	1,037	1,080	1,050	1,094		1,087
0,1000	0,967	0,961	0,967	0,974	0,971	0,977	0,975	0,979	0,985	0,995		1,027
0,1500	0,948	0,921	0,947	0,930	0,949	0,933	0,951	0,932	0,957	0,943		0,983
0,2000	0,944	0,910	0,943	0,917	0,945	0,918	0,946	0,917	0,949	0,924		0,960
0,3000	0,950	0,915	0,949	0,920	0,950	0,920	0,951	0,919	0,952	0,922		0,946
0,4000	0,962	0,935	0,961	0,937	0,962	0,938	0,962	0,937	0,963	0,938		0,953
0,5000	0,976	0,959	0,975	0,960	0,976	0,960	0,976	0,960	0,976	0,960		0,967

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,2$		$R=0,3$		$R=0,5$		$R=1$		$R=4$	
	$h=0,75$	$h=2,5$										
0	4,717		4,706		4,696		4,675		4,621		4,390	
0,0001	4,530		4,520		4,509		4,489		4,437		4,214	
0,0002	4,355		4,345		4,335		4,316		4,265		4,049	
0,0003	4,194		4,184		4,175		4,156		4,107		3,898	
0,0004	4,044		4,035		4,026		4,008		3,960		3,758	
0,0005	3,906		3,897		3,888		3,870		3,824		3,628	
0,0006	3,777		3,768		3,759		3,742		3,698		3,507	
0,0008	3,544		3,536		3,528		3,511		3,470		3,291	
0,0010	3,341		3,333		3,326		3,310		3,271		3,102	
0,0012	3,162		3,155		3,148		3,134		3,097		2,937	
0,0015	2,933		2,927		2,920		2,907		2,872		2,725	
0,0020	2,629		2,623		2,617		2,606		2,575		2,446	
0,0030	2,213		2,208		2,203		2,194		2,170		2,063	
0,0040	1,946		1,942		1,938		1,930		1,911		1,820	
0,0060	1,632	/,	1,629	/,	1,627	/,	1,621	/,	1,607	/,	1,539	/,
0,0080	1,456		1,454		1,452		1,448		1,438		1,384	
0,0100	1,346		1,344		1,343		1,339		1,332		1,288	
0,0130	1,239		1,238		1,237		1,235		1,230		1,197	
0,0160	1,170		1,169		1,169		1,167		1,164		1,139	
0,0200	1,107		1,107		1,107		1,106		1,104		1,087	
0,0300	1,014		1,014		1,014		1,014		1,014		1,009	
0,0400	0,956		0,956		0,956		0,956		0,958		0,959	
0,0600	0,875		0,876		0,876		0,876		0,878		0,885	
0,1000	0,760		0,760		0,761		0,761		0,763		0,771	
0,1500	0,644		0,645		0,645		0,645		0,647		0,654	
0,2000	0,542		0,542		0,542		0,543		0,544		0,549	
0,3000	0,355		0,355		0,355		0,355		0,356		0,359	
0,4000	0,181		0,181		0,181		0,181		0,181		0,181	
0,5000	0,034		0,033		0,033		0,033		0,033		0,030	

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,2$		$R=0,3$		$R=0,5$		$R=1$		$R=4$	
	$h=0,75$	$h=2,5$										
0	5,294	5,413	5,258	5,373	5,221	5,332	5,144	5,247	4,970	5,054	4,478	
0,0001	5,087	5,198	5,053	5,163	5,017	5,123	4,943	5,041	4,773	4,854	4,298	
0,0002	4,893	5,007	4,860	4,966	4,825	4,927	4,753	4,848	4,588	4,666	4,130	
0,0003	4,714	4,824	4,682	4,784	4,648	4,747	4,578	4,670	4,418	4,493	3,976	
0,0004	4,548	4,655	4,517	4,615	4,484	4,579	4,416	4,504	4,260	4,333	3,833	
0,0005	4,393	4,499	4,363	4,458	4,331	4,423	4,266	4,351	4,114	4,184	3,700	
0,0006	4,249	4,351	4,220	4,312	4,189	4,278	4,126	4,208	3,978	4,046	3,577	
0,0008	3,989	4,086	3,962	4,048	3,933	4,016	3,873	3,950	3,733	3,796	3,357	
0,0010	3,762	3,854	3,736	3,817	3,708	3,786	3,651	3,724	3,519	3,579	3,164	
0,0012	3,561	3,649	3,536	3,613	3,510	3,585	3,457	3,526	3,331	3,388	2,996	
0,0015	3,302	3,385	3,280	3,351	3,255	3,324	3,206	3,270	3,090	3,143	2,780	
0,0020	2,958	3,031	2,937	3,002	2,916	2,978	2,872	2,930	2,770	2,818	2,495	
0,0030	2,483	2,544	2,467	2,521	2,450	2,502	2,415	2,463	2,333	2,374	2,104	
0,0040	2,177	2,230	2,164	2,212	2,150	2,196	2,121	2,164	2,054	2,090	1,857	
0,0060	1,813	1,855	1,804	1,845	1,794	1,833	1,773	1,810	1,725	1,756	1,570	/,
0,0080	1,606	1,643	1,599	1,636	1,592	1,628	1,577	1,610	1,540	1,568	1,412	
0,0100	1,473	1,506	1,467	1,502	1,462	1,495	1,451	1,482	1,423	1,449	1,314	
0,0130	1,341	1,372	1,338	1,369	1,334	1,365	1,327	1,356	1,309	1,333	1,221	
0,0160	1,253	1,282	1,251	1,280	1,249	1,278	1,245	1,272	1,233	1,256	1,162	
0,0200	1,171	1,198	1,170	1,198	1,170	1,196	1,168	1,193	1,162	1,184	1,109	
0,0300	1,047	1,070	1,047	1,070	1,048	1,070	1,049	1,071	1,051	1,070	1,027	
0,0400	0,970	0,990	0,971	0,991	0,972	0,991	0,974	0,993	0,979	0,996	0,974	
0,0600	0,868	0,882	0,869	0,883	0,870	0,884	0,873	0,887	0,879	0,892	0,893	
0,1000	0,738	0,741	0,739	0,742	0,740	0,743	0,742	0,746	0,747	0,751	0,769	
0,1500	0,621	0,614	0,622	0,615	0,622	0,616	0,623	0,618	0,627	0,622	0,646	
0,2000	0,522	0,510	0,523	0,511	0,523	0,511	0,524	0,512	0,526	0,516	0,540	
0,3000	0,345	0,333	0,345	0,333	0,345	0,333	0,346	0,334	0,346	0,335	0,352	
0,4000	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	
0,5000	0,044	0,060	0,044	0,060	0,044	0,059	0,043	0,059	0,042	0,057	0,036	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,624	5,969	5,559	5,880	5,487	5,788	5,348	5,612	5,079	5,276	4,485	4,537
0,0001	5,402	5,738	5,339	5,652	5,270	5,559	5,139	5,388	4,877	5,069	4,304	4,354
0,0002	5,203	5,526	5,142	5,443	5,075	5,353	4,942	5,189	4,689	4,874	4,136	4,184
0,0003	5,014	5,326	4,955	5,245	4,890	5,157	4,761	4,999	4,515	4,694	3,982	4,028
0,0004	4,839	5,142	4,782	5,063	4,719	4,977	4,593	4,823	4,354	4,528	3,839	3,883
0,0005	4,677	4,970	4,621	4,894	4,560	4,809	4,436	4,661	4,205	4,373	3,706	3,749
0,0006	4,524	4,808	4,470	4,735	4,410	4,651	4,290	4,508	4,066	4,229	3,583	3,624
0,0008	4,249	4,517	4,197	4,448	4,142	4,368	4,027	4,233	3,815	3,970	3,361	3,401
0,0010	4,008	4,262	3,959	4,196	3,906	4,120	3,797	3,993	3,597	3,743	3,169	3,206
0,0012	3,795	4,036	3,748	3,974	3,699	3,901	3,595	3,781	3,405	3,544	3,000	3,035
0,0015	3,519	3,743	3,476	3,686	3,430	3,618	3,334	3,507	3,159	3,288	2,784	2,817
0,0020	3,150	3,352	3,112	3,302	3,072	3,240	2,987	3,142	2,832	2,948	2,499	2,528
0,0030	2,641	2,810	2,611	2,769	2,578	2,721	2,511	2,641	2,385	2,483	2,107	2,133
0,0040	2,312	2,458	2,286	2,425	2,259	2,386	2,205	2,319	2,100	2,185	1,860	1,883
0,0060	1,916	2,037	1,899	2,013	1,880	1,987	1,842	1,937	1,763	1,836	1,572	1,592
0,0080	1,689	1,795	1,676	1,777	1,663	1,759	1,636	1,721	1,575	1,640	1,414	1,433
0,0100	1,541	1,638	1,532	1,624	1,522	1,611	1,502	1,581	1,454	1,515	1,316	1,334
0,0130	1,393	1,480	1,387	1,470	1,382	1,462	1,370	1,442	1,336	1,393	1,223	1,240
0,0160	1,293	1,372	1,290	1,366	1,287	1,361	1,280	1,347	1,257	1,311	1,164	1,181
0,0200	1,198	1,270	1,198	1,267	1,197	1,265	1,195	1,257	1,182	1,233	1,110	1,127
0,0300	1,054	1,111	1,056	1,111	1,058	1,113	1,062	1,113	1,064	1,107	1,029	1,045
0,0400	0,967	1,012	0,970	1,014	0,972	1,016	0,977	1,019	0,986	1,023	0,975	0,991
0,0600	0,857	0,883	0,859	0,885	0,862	0,888	0,867	0,893	0,878	0,903	0,894	0,907
0,1000	0,726	0,725	0,727	0,727	0,729	0,729	0,732	0,734	0,740	0,744	0,769	0,776
0,1500	0,612	0,593	0,613	0,595	0,614	0,596	0,616	0,599	0,621	0,607	0,645	0,642
0,2000	0,517	0,491	0,517	0,491	0,518	0,492	0,519	0,495	0,522	0,500	0,539	0,530
0,3000	0,343	0,324	0,343	0,324	0,343	0,324	0,344	0,325	0,345	0,327	0,352	0,340
0,4000	0,180	0,185	0,180	0,184	0,180	0,184	0,180	0,184	0,180	0,182	0,180	0,179
0,5000	0,047	0,075	0,047	0,074	0,046	0,074	0,046	0,072	0,045	0,069	0,037	0,052

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,838	6,496	5,734	6,321	5,623	6,151	5,430	5,861	5,106	5,390		4,541
0,0001	5,613	6,248	5,511	6,079	5,401	5,911	5,214	5,628	4,904	5,178		4,358
0,0002	5,407	6,020	5,308	5,856	5,202	5,692	5,021	5,419	4,714	4,979		4,188
0,0003	5,212	5,805	5,116	5,646	5,012	5,485	4,838	5,221	4,540	4,796		4,032
0,0004	5,032	5,606	4,939	5,452	4,836	5,294	4,668	5,037	4,378	4,625		3,887
0,0005	4,865	5,419	4,774	5,271	4,674	5,117	4,511	4,867	4,227	4,467		3,752
0,0006	4,707	5,246	4,619	5,102	4,521	4,950	4,363	4,707	4,088	4,320		3,627
0,0008	4,423	4,931	4,340	4,795	4,245	4,651	4,097	4,420	3,836	4,056		3,404
0,0010	4,173	4,654	4,094	4,526	4,004	4,387	3,864	4,170	3,616	3,824		3,209
0,0012	3,952	4,409	3,877	4,288	3,791	4,155	3,659	3,948	3,423	3,621		3,038
0,0015	3,665	4,090	3,596	3,979	3,516	3,855	3,394	3,663	3,176	3,359		2,819
0,0020	3,282	3,664	3,221	3,565	3,149	3,454	3,041	3,282	2,847	3,012		2,530
0,0030	2,748	3,068	2,699	2,988	2,643	2,900	2,555	2,761	2,399	2,538		2,135
0,0040	2,401	2,681	2,361	2,613	2,316	2,542	2,243	2,425	2,112	2,234		1,885
0,0060	1,984	2,216	1,955	2,166	1,926	2,115	1,871	2,028	1,774	1,878	/,	1,594
0,0080	1,742	1,946	1,722	1,908	1,702	1,870	1,660	1,802	1,584	1,679		1,435
0,0100	1,583	1,767	1,569	1,738	1,555	1,710	1,524	1,655	1,462	1,552		1,335
0,0130	1,422	1,585	1,415	1,566	1,408	1,548	1,388	1,508	1,344	1,427		1,242
0,0160	1,313	1,459	1,310	1,447	1,307	1,435	1,295	1,407	1,264	1,343		1,182
0,0200	1,210	1,338	1,210	1,331	1,211	1,325	1,207	1,309	1,188	1,263		1,129
0,0300	1,054	1,146	1,057	1,148	1,062	1,149	1,066	1,148	1,067	1,131		1,047
0,0400	0,961	1,028	0,965	1,032	0,970	1,036	0,978	1,042	0,988	1,041		0,992
0,0600	0,849	0,880	0,852	0,884	0,856	0,889	0,863	0,898	0,878	0,912		0,909
0,1000	0,720	0,709	0,721	0,712	0,723	0,716	0,728	0,724	0,739	0,741		0,776
0,1500	0,609	0,577	0,610	0,579	0,611	0,581	0,613	0,586	0,619	0,599		0,642
0,2000	0,515	0,478	0,515	0,479	0,516	0,480	0,517	0,483	0,520	0,492		0,529
0,3000	0,343	0,320	0,343	0,320	0,343	0,320	0,343	0,321	0,344	0,323		0,339
0,4000	0,181	0,189	0,180	0,189	0,180	0,188	0,180	0,187	0,180	0,185		0,179
0,5000	0,048	0,084	0,048	0,083	0,047	0,083	0,047	0,081	0,045	0,076		0,053

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,2$		$R=0,3$		$R=0,5$		$R=1$		$R=4$	
	$h=0,75$	$h=2,5$										
0	5,898	6,746	5,774	6,489	5,648	6,268	5,440	5,925	5,108	5,409		4,550
0,0001	5,674	6,493	5,550	6,240	5,425	6,024	5,224	5,689	4,905	5,196		4,366
0,0002	5,468	6,256	5,345	6,011	5,224	5,800	5,031	5,478	4,715	4,996		4,197
0,0003	5,274	6,034	5,152	5,796	5,034	5,590	4,847	5,277	4,541	4,812		4,041
0,0004	5,094	5,829	4,974	5,597	4,858	5,396	4,677	5,092	4,379	4,642		3,897
0,0005	4,925	5,636	4,808	5,410	4,694	5,215	4,519	4,920	4,228	4,483		3,763
0,0006	4,768	5,456	4,652	5,237	4,541	5,045	4,371	4,759	4,089	4,336		3,637
0,0008	4,483	5,130	4,371	4,922	4,264	4,740	4,104	4,469	3,836	4,070		3,413
0,0010	4,232	4,842	4,123	4,646	4,022	4,471	3,872	4,215	3,617	3,838		3,218
0,0012	4,009	4,587	3,905	4,401	3,808	4,235	3,666	3,992	3,424	3,634		3,046
0,0015	3,720	4,255	3,622	4,084	3,532	3,929	3,401	3,703	3,176	3,371		2,827
0,0020	3,331	3,810	3,244	3,660	3,163	3,521	3,047	3,319	2,848	3,023		2,536
0,0030	2,787	3,190	2,719	3,069	2,655	2,958	2,560	2,793	2,399	2,547		2,140
0,0040	2,431	2,785	2,378	2,686	2,327	2,595	2,247	2,454	2,112	2,243		1,889
0,0060	2,003	2,297	1,969	2,228	1,935	2,161	1,875	2,054	1,774	1,886	/,	1,598
0,0080	1,756	2,013	1,733	1,963	1,709	1,912	1,664	1,826	1,584	1,686		1,438
0,0100	1,593	1,824	1,578	1,788	1,562	1,748	1,527	1,678	1,463	1,559		1,339
0,0130	1,429	1,629	1,422	1,608	1,413	1,581	1,390	1,529	1,344	1,434		1,245
0,0160	1,316	1,493	1,315	1,483	1,312	1,464	1,297	1,426	1,264	1,349		1,185
0,0200	1,211	1,362	1,214	1,360	1,214	1,350	1,208	1,325	1,189	1,269		1,131
0,0300	1,052	1,155	1,058	1,163	1,063	1,164	1,067	1,160	1,068	1,137		1,049
0,0400	0,959	1,028	0,964	1,039	0,970	1,045	0,978	1,050	0,988	1,046		0,995
0,0600	0,846	0,871	0,850	0,883	0,855	0,889	0,863	0,900	0,878	0,914		0,911
0,1000	0,718	0,699	0,720	0,707	0,722	0,711	0,727	0,721	0,739	0,741		0,778
0,1500	0,608	0,569	0,609	0,574	0,610	0,576	0,612	0,582	0,619	0,597		0,644
0,2000	0,515	0,473	0,515	0,476	0,516	0,477	0,517	0,481	0,520	0,490		0,530
0,3000	0,342	0,320	0,343	0,320	0,343	0,320	0,343	0,320	0,344	0,322		0,340
0,4000	0,181	0,193	0,181	0,191	0,180	0,190	0,180	0,189	0,180	0,186		0,179
0,5000	0,048	0,092	0,048	0,086	0,048	0,085	0,047	0,083	0,045	0,077		0,053

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,2$		$R=0,3$		$R=0,5$		$R=1$		$R=4$	
	$h=0,75$	$h=2,5$										
0	4,896		4,825		4,817		4,800		4,754		4,536	
0,0001	4,698		4,629		4,621		4,604		4,560		4,352	
0,0002	4,516		4,450		4,442		4,426		4,384		4,180	
0,0003	4,348		4,284		4,276		4,261		4,220		4,023	
0,0004	4,192		4,130		4,123		4,108		4,068		3,878	
0,0005	4,046		3,987		3,980		3,965		3,927		3,742	
0,0006	3,912		3,855		3,848		3,834		3,796		3,617	
0,0008	3,670		3,616		3,609		3,596		3,561		3,393	
0,0010	3,458		3,407		3,401		3,389		3,356		3,196	
0,0012	3,273		3,225		3,219		3,207		3,176		3,025	
0,0015	3,034		2,990		2,984		2,973		2,944		2,805	
0,0020	2,718		2,679		2,674		2,664		2,639		2,515	
0,0030	2,287		2,254		2,250		2,242		2,222		2,122	
0,0040	2,011		1,983		1,980		1,973		1,957		1,873	
0,0060	1,687	/,	1,665	/,	1,663	/,	1,658	/,	1,647	/,	1,584	/,
0,0080	1,507		1,488		1,487		1,483		1,475		1,425	
0,0100	1,393		1,377		1,375		1,373		1,367		1,327	
0,0130	1,283		1,270		1,269		1,268		1,264		1,234	
0,0160	1,212		1,201		1,200		1,199		1,197		1,175	
0,0200	1,147		1,138		1,138		1,137		1,136		1,122	
0,0300	1,050		1,044		1,044		1,044		1,045		1,041	
0,0400	0,989		0,986		0,986		0,986		0,987		0,989	
0,0600	0,905		0,903		0,904		0,904		0,905		0,911	
0,1000	0,782		0,783		0,784		0,784		0,785		0,792	
0,1500	0,659		0,661		0,661		0,661		0,662		0,667	
0,2000	0,549		0,551		0,551		0,551		0,552		0,556	
0,3000	0,346		0,348		0,348		0,348		0,349		0,351	
0,4000	0,156		0,157		0,157		0,157		0,157		0,158	
0,5000	0,024		0,023		0,023		0,023		0,023		0,023	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,562	5,814	5,522	5,767	5,481	5,718	5,397	5,619	5,206	5,397	4,655	
0,0001	5,341	5,583	5,303	5,538	5,263	5,490	5,181	5,395	4,997	5,180	4,464	
0,0002	5,138	5,370	5,101	5,327	5,060	5,281	4,982	5,187	4,803	4,979	4,291	
0,0003	4,949	5,173	4,913	5,130	4,873	5,086	4,797	4,994	4,624	4,793	4,129	
0,0004	4,774	4,990	4,739	4,949	4,700	4,906	4,626	4,816	4,458	4,621	3,980	
0,0005	4,610	4,819	4,576	4,779	4,538	4,737	4,467	4,650	4,304	4,461	3,841	
0,0006	4,459	4,660	4,426	4,622	4,388	4,581	4,318	4,496	4,161	4,313	3,713	
0,0008	4,185	4,374	4,154	4,338	4,118	4,300	4,052	4,219	3,903	4,046	3,483	
0,0010	3,945	4,123	3,916	4,089	3,881	4,053	3,819	3,977	3,679	3,814	3,281	
0,0012	3,734	3,902	3,706	3,870	3,673	3,836	3,615	3,764	3,482	3,609	3,106	
0,0015	3,461	3,618	3,436	3,588	3,405	3,557	3,351	3,489	3,228	3,347	2,880	
0,0020	3,099	3,240	3,077	3,213	3,049	3,186	3,002	3,126	2,893	2,999	2,583	
0,0030	2,600	2,718	2,582	2,697	2,560	2,675	2,522	2,627	2,435	2,525	2,179	
0,0040	2,278	2,383	2,263	2,365	2,247	2,347	2,215	2,308	2,143	2,223	1,923	
0,0060	1,897	1,985	1,886	1,972	1,875	1,958	1,853	1,931	1,799	1,868	1,626	/,
0,0080	1,680	1,759	1,672	1,749	1,665	1,739	1,648	1,719	1,608	1,669	1,463	
0,0100	1,540	1,613	1,535	1,606	1,529	1,598	1,517	1,583	1,486	1,543	1,362	
0,0130	1,403	1,470	1,399	1,464	1,396	1,459	1,388	1,449	1,367	1,420	1,267	
0,0160	1,311	1,373	1,309	1,370	1,307	1,366	1,302	1,359	1,288	1,339	1,206	
0,0200	1,226	1,283	1,225	1,281	1,224	1,279	1,222	1,275	1,214	1,262	1,151	
0,0300	1,094	1,145	1,095	1,144	1,096	1,144	1,096	1,143	1,097	1,140	1,066	
0,0400	1,013	1,057	1,014	1,058	1,015	1,058	1,017	1,059	1,021	1,060	1,010	
0,0600	0,905	0,939	0,906	0,940	0,907	0,941	0,910	0,943	0,916	0,947	0,925	
0,1000	0,765	0,783	0,766	0,784	0,767	0,785	0,769	0,787	0,774	0,791	0,794	
0,1500	0,638	0,640	0,638	0,640	0,639	0,641	0,640	0,643	0,643	0,647	0,661	
0,2000	0,530	0,520	0,530	0,521	0,531	0,522	0,531	0,523	0,534	0,526	0,547	
0,3000	0,335	0,315	0,335	0,316	0,335	0,316	0,335	0,317	0,336	0,319	0,343	
0,4000	0,151	0,136	0,151	0,136	0,151	0,136	0,151	0,136	0,151	0,137	0,154	
0,5000	0,027	0,049	0,027	0,048	0,027	0,048	0,027	0,048	0,027	0,047	0,026	

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,2		R=0,3		R=0,5		R=1		R=4	
	h=0,75	h=2,5										
0	5,932	6,551	5,861	6,447	5,782	6,338	5,629	6,127	5,334	5,724	4,664	4,804
0,0001	5,698	6,298	5,628	6,194	5,552	6,085	5,405	5,882	5,120	5,495	4,472	4,607
0,0002	5,483	6,063	5,415	5,961	5,342	5,854	5,198	5,659	4,921	5,282	4,299	4,428
0,0003	5,283	5,844	5,218	5,744	5,146	5,639	5,006	5,451	4,738	5,085	4,137	4,262
0,0004	5,097	5,640	5,034	5,542	4,965	5,440	4,829	5,258	4,568	4,904	3,988	4,108
0,0005	4,924	5,451	4,863	5,354	4,796	5,255	4,663	5,079	4,410	4,735	3,849	3,964
0,0006	4,763	5,274	4,703	5,179	4,638	5,082	4,509	4,912	4,264	4,577	3,720	3,832
0,0008	4,472	4,953	4,415	4,863	4,354	4,771	4,232	4,610	4,000	4,295	3,489	3,594
0,0010	4,216	4,672	4,163	4,586	4,105	4,498	3,989	4,347	3,770	4,049	3,288	3,387
0,0012	3,991	4,424	3,940	4,341	3,886	4,257	3,776	4,115	3,568	3,832	3,112	3,205
0,0015	3,700	4,101	3,653	4,025	3,603	3,948	3,501	3,816	3,308	3,554	2,886	2,973
0,0020	3,311	3,670	3,270	3,602	3,226	3,535	3,136	3,419	2,964	3,185	2,588	2,666
0,0030	2,774	3,074	2,741	3,021	2,706	2,967	2,634	2,872	2,495	2,682	2,183	2,250
0,0040	2,427	2,689	2,400	2,646	2,371	2,602	2,312	2,522	2,196	2,361	1,927	1,986
0,0060	2,012	2,228	1,993	2,198	1,972	2,168	1,931	2,108	1,844	1,985	1,629	1,681
0,0080	1,774	1,964	1,760	1,943	1,745	1,920	1,715	1,873	1,648	1,774	1,466	1,513
0,0100	1,618	1,792	1,608	1,776	1,597	1,759	1,575	1,722	1,522	1,640	1,365	1,410
0,0130	1,463	1,619	1,457	1,609	1,450	1,597	1,437	1,571	1,399	1,509	1,270	1,312
0,0160	1,358	1,501	1,354	1,494	1,351	1,487	1,343	1,468	1,316	1,420	1,208	1,249
0,0200	1,258	1,389	1,257	1,385	1,256	1,381	1,253	1,370	1,238	1,336	1,153	1,193
0,0300	1,106	1,213	1,107	1,213	1,109	1,213	1,112	1,211	1,113	1,200	1,068	1,107
0,0400	1,013	1,103	1,015	1,104	1,018	1,106	1,023	1,108	1,031	1,107	1,012	1,049
0,0600	0,896	0,957	0,898	0,960	0,900	0,962	0,905	0,966	0,916	0,974	0,927	0,959
0,1000	0,753	0,776	0,755	0,778	0,756	0,780	0,759	0,784	0,768	0,795	0,794	0,816
0,1500	0,629	0,622	0,630	0,623	0,631	0,625	0,633	0,628	0,638	0,637	0,661	0,668
0,2000	0,524	0,500	0,525	0,501	0,525	0,502	0,526	0,505	0,529	0,511	0,546	0,542
0,3000	0,332	0,299	0,333	0,299	0,333	0,300	0,333	0,301	0,334	0,304	0,342	0,325
0,4000	0,150	0,133	0,150	0,133	0,150	0,133	0,150	0,133	0,151	0,133	0,153	0,137
0,5000	0,027	0,061	0,027	0,061	0,027	0,060	0,027	0,060	0,027	0,059	0,026	0,049

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,2$		$R=0,3$		$R=0,5$		$R=1$		$R=4$	
	$h=0,75$	$h=2,5$										
0	6,168	7,254	6,054	7,035	5,935	6,826	5,724	6,476	5,366	5,897		4,815
0,0001	5,931	6,978	5,817	6,766	5,699	6,561	5,495	6,217	5,150	5,660		4,619
0,0002	5,711	6,721	5,599	6,514	5,483	6,315	5,285	5,980	4,951	5,441		4,439
0,0003	5,506	6,481	5,396	6,280	5,283	6,086	5,091	5,761	4,766	5,239		4,272
0,0004	5,315	6,259	5,207	6,062	5,097	5,873	4,910	5,557	4,596	5,052		4,118
0,0005	5,137	6,052	5,031	5,860	4,923	5,675	4,741	5,367	4,436	4,877		3,974
0,0006	4,970	5,857	4,867	5,670	4,762	5,490	4,585	5,190	4,289	4,715		3,841
0,0008	4,669	5,505	4,570	5,327	4,470	5,156	4,303	4,872	4,024	4,425		3,603
0,0010	4,404	5,195	4,310	5,026	4,215	4,863	4,057	4,594	3,792	4,171		3,395
0,0012	4,171	4,920	4,080	4,759	3,989	4,605	3,840	4,349	3,589	3,948		3,213
0,0015	3,866	4,562	3,783	4,413	3,699	4,271	3,560	4,033	3,328	3,662		2,980
0,0020	3,459	4,083	3,385	3,951	3,312	3,824	3,189	3,614	2,982	3,282		2,673
0,0030	2,894	3,416	2,836	3,312	2,778	3,209	2,679	3,038	2,511	2,765		2,255
0,0040	2,527	2,984	2,481	2,897	2,434	2,813	2,352	2,670	2,210	2,435		1,991
0,0060	2,087	2,466	2,056	2,403	2,023	2,342	1,964	2,234	1,856	2,049	./,	1,685
0,0080	1,832	2,166	1,811	2,119	1,788	2,072	1,744	1,987	1,658	1,833		1,518
0,0100	1,664	1,968	1,651	1,932	1,635	1,895	1,601	1,826	1,531	1,695		1,414
0,0130	1,496	1,765	1,489	1,741	1,480	1,716	1,458	1,665	1,407	1,560		1,316
0,0160	1,381	1,624	1,378	1,608	1,374	1,591	1,361	1,553	1,324	1,469		1,253
0,0200	1,272	1,488	1,273	1,479	1,273	1,469	1,268	1,445	1,245	1,381		1,197
0,0300	1,106	1,272	1,110	1,272	1,114	1,271	1,119	1,265	1,118	1,237		1,110
0,0400	1,008	1,137	1,012	1,140	1,017	1,143	1,025	1,146	1,033	1,137		1,052
0,0600	0,887	0,965	0,891	0,969	0,894	0,974	0,902	0,982	0,916	0,992		0,962
0,1000	0,747	0,764	0,749	0,768	0,751	0,772	0,755	0,780	0,766	0,796		0,818
0,1500	0,626	0,605	0,627	0,608	0,628	0,610	0,630	0,616	0,636	0,630		0,669
0,2000	0,522	0,485	0,523	0,486	0,523	0,488	0,525	0,492	0,528	0,502		0,541
0,3000	0,332	0,290	0,332	0,291	0,332	0,291	0,333	0,293	0,334	0,297		0,323
0,4000	0,150	0,136	0,150	0,135	0,150	0,135	0,150	0,134	0,151	0,133		0,136
0,5000	0,027	0,067	0,027	0,067	0,027	0,067	0,027	0,066	0,027	0,064		0,052

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,1 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,2$		$R=0,3$		$R=0,5$		$R=1$		$R=4$	
	$h=0,75$	$h=2,5$										
0	6,234	7,571	6,096	7,264	5,963	6,989	5,735	6,568	5,367	5,927		4,816
0,0001	5,995	7,282	5,861	6,987	5,726	6,718	5,506	6,305	5,152	5,690		4,621
0,0002	5,773	7,018	5,642	6,729	5,509	6,465	5,296	6,065	4,952	5,469		4,441
0,0003	5,566	6,770	5,439	6,488	5,308	6,231	5,101	5,842	4,767	5,266		4,274
0,0004	5,373	6,540	5,250	6,265	5,121	6,013	4,920	5,636	4,597	5,078		4,117
0,0005	5,193	6,325	5,074	6,057	4,946	5,810	4,751	5,443	4,438	4,903		3,974
0,0006	5,025	6,123	4,909	5,862	4,784	5,621	4,594	5,264	4,290	4,740		3,843
0,0008	4,721	5,757	4,611	5,510	4,491	5,279	4,312	4,941	4,025	4,448		3,603
0,0010	4,453	5,435	4,350	5,200	4,234	4,979	4,065	4,659	3,793	4,193		3,396
0,0012	4,217	5,147	4,119	4,925	4,008	4,716	3,847	4,411	3,590	3,969		3,215
0,0015	3,910	4,774	3,819	4,567	3,717	4,373	3,567	4,091	3,329	3,681		2,981
0,0020	3,498	4,273	3,418	4,090	3,328	3,917	3,196	3,667	2,983	3,300		2,673
0,0030	2,927	3,576	2,862	3,428	2,791	3,288	2,684	3,084	2,511	2,78		2,256
0,0040	2,556	3,123	2,503	2,999	2,446	2,885	2,357	2,711	2,210	2,449		1,991
0,0060	2,109	2,579	2,072	2,488	2,034	2,404	1,968	2,270	1,857	2,061	./,	1,685
0,0080	1,850	2,263	1,823	2,193	1,797	2,129	1,747	2,020	1,659	1,845		1,518
0,0100	1,679	2,053	1,660	1,998	1,642	1,947	1,604	1,858	1,532	1,706		1,414
0,0130	1,506	1,835	1,496	1,798	1,486	1,762	1,461	1,694	1,408	1,571		1,316
0,0160	1,387	1,683	1,383	1,658	1,379	1,632	1,363	1,580	1,324	1,479		1,253
0,0200	1,275	1,534	1,276	1,520	1,276	1,504	1,270	1,469	1,245	1,391		1,197
0,0300	1,105	1,296	1,110	1,296	1,115	1,295	1,120	1,284	1,118	1,246		1,111
0,0400	1,006	1,149	1,011	1,154	1,017	1,158	1,025	1,159	1,033	1,145		1,053
0,0600	0,885	0,965	0,889	0,971	0,893	0,978	0,902	0,988	0,916	0,997		0,963
0,1000	0,746	0,757	0,747	0,762	0,750	0,768	0,755	0,778	0,766	0,797		0,818
0,1500	0,625	0,599	0,626	0,602	0,627	0,605	0,630	0,612	0,636	0,628		0,669
0,2000	0,522	0,480	0,523	0,482	0,523	0,484	0,524	0,488	0,528	0,500		0,541
0,3000	0,332	0,288	0,332	0,289	0,332	0,289	0,332	0,291	0,334	0,295		0,323
0,4000	0,150	0,138	0,150	0,137	0,150	0,136	0,150	0,135	0,151	0,134		0,136
0,5000	0,027	0,069	0,027	0,069	0,027	0,069	0,027	0,068	0,027	0,065		0,052

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,481		7,471		7,434		7,270		8,986	
0,0001	7,210		7,200		7,163		7,004		8,678	
0,0002	6,956		6,947		6,910		6,757		8,390	
0,0003	6,720		6,711		6,674		6,522		8,115	
0,0004	6,499		6,489		6,453		6,308		7,863	
0,0005	6,291		6,282		6,247		6,106		7,625	
0,0006	6,097		6,088		6,054		5,918		7,401	
0,0008	5,744		5,736		5,703		5,574		6,991	
0,0010	5,432		5,424		5,393		5,270		6,626	
0,0012	5,154		5,147		5,117		5,000		6,299	
0,0015	4,791		4,784		4,758		4,650		5,872	
0,0020	4,299		4,292		4,268		4,171		5,281	
0,0030	3,600		3,595		3,574		3,492		4,431	
0,0040	3,134		3,129		3,111		3,041		3,854	
0,0060	2,557	,/,	2,554	,/,	2,542	,/,	2,487	,/,	3,131	,/,
0,0080	2,219		2,217		2,207		2,162		2,698	
0,0100	1,998		1,995		1,988		1,949		2,410	
0,0130	1,779		1,777		1,771		1,740		2,121	
0,0160	1,634		1,633		1,628		1,602		1,927	
0,0200	1,503		1,502		1,498		1,478		1,749	
0,0300	1,320		1,319		1,317		1,306		1,492	
0,0400	1,224		1,224		1,223		1,216		1,354	
0,0600	1,126		1,126		1,126		1,125		1,208	
0,1000	1,046		1,046		1,047		1,049		1,088	
0,1500	1,005		1,005		1,006		1,009		1,028	
0,2000	0,984		0,984		0,985		0,988		1,000	
0,3000	0,964		0,965		0,965		0,968		0,974	
0,4000	0,957		0,957		0,957		0,960		0,965	
0,5000	0,955		0,955		0,955		0,957		0,962	

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,989	8,506	7,966	8,466	7,874	8,317	7,469		9,312	9,792
0,0001	7,701	8,205	7,680	8,166	7,589	8,017	7,197		8,994	9,459
0,0002	7,435	7,913	7,414	7,876	7,326	7,738	6,943		8,697	9,149
0,0003	7,183	7,649	7,163	7,614	7,078	7,476	6,701		8,418	8,856
0,0004	6,949	7,401	6,929	7,366	6,847	7,231	6,481		8,156	8,582
0,0005	6,730	7,169	6,710	7,135	6,630	7,002	6,274		7,908	8,324
0,0006	6,524	6,952	6,505	6,919	6,427	6,787	6,080		7,677	8,081
0,0008	6,148	6,551	6,130	6,520	6,056	6,396	5,727		7,253	7,636
0,0010	5,814	6,199	5,797	6,169	5,727	6,048	5,416		6,875	7,237
0,0012	5,518	5,881	5,501	5,853	5,434	5,739	5,138		6,537	6,881
0,0015	5,130	5,468	5,114	5,442	5,052	5,335	4,778		6,091	6,413
0,0020	4,603	4,908	4,589	4,884	4,533	4,787	4,286		5,481	5,770
0,0030	3,853	4,108	3,841	4,088	3,794	4,008	3,589		4,600	4,842
0,0040	3,351	3,573	3,341	3,556	3,301	3,487	3,125		4,002	4,211
0,0060	2,731	2,911	2,723	2,897	2,691	2,845	2,555	,/,	3,248	3,419
0,0080	2,365	2,521	2,359	2,510	2,333	2,467	2,221		2,796	2,945
0,0100	2,124	2,264	2,119	2,254	2,097	2,218	2,002		2,496	2,628
0,0130	1,884	2,008	1,880	2,000	1,862	1,971	1,786		2,194	2,310
0,0160	1,723	1,836	1,720	1,829	1,706	1,805	1,644		1,990	2,095
0,0200	1,576	1,678	1,574	1,672	1,564	1,653	1,515		1,801	1,895
0,0300	1,366	1,450	1,365	1,446	1,361	1,435	1,334		1,527	1,603
0,0400	1,254	1,325	1,253	1,323	1,252	1,317	1,239		1,378	1,442
0,0600	1,136	1,191	1,136	1,190	1,138	1,189	1,139		1,218	1,267
0,1000	1,040	1,072	1,040	1,072	1,043	1,073	1,053		1,085	1,113
0,1500	0,993	1,005	0,994	1,006	0,996	1,008	1,006		1,021	1,031
0,2000	0,972	0,969	0,973	0,970	0,974	0,972	0,982		0,991	0,988
0,3000	0,955	0,934	0,955	0,934	0,956	0,937	0,961		0,967	0,948
0,4000	0,949	0,919	0,949	0,920	0,950	0,922	0,953		0,958	0,931
0,5000	0,948	0,915	0,948	0,916	0,948	0,918	0,951		0,956	0,927

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	8,155	9,157	8,131	9,091	8,001	8,803	7,485	7,864	9,388	10,217
0,0001	7,867	8,838	7,844	8,770	7,712	8,491	7,211	7,577	9,069	9,876
0,0002	7,589	8,532	7,566	8,464	7,445	8,189	6,957	7,311	8,773	9,544
0,0003	7,337	8,248	7,315	8,181	7,193	7,915	6,715	7,063	8,492	9,243
0,0004	7,099	7,986	7,077	7,917	6,958	7,657	6,495	6,825	8,229	8,958
0,0005	6,877	7,737	6,856	7,670	6,738	7,417	6,287	6,609	7,982	8,691
0,0006	6,670	7,504	6,649	7,437	6,531	7,192	6,093	6,405	7,749	8,441
0,0008	6,286	7,078	6,266	7,013	6,155	6,776	5,739	6,034	7,323	7,975
0,0010	5,949	6,699	5,930	6,636	5,821	6,412	5,427	5,705	6,941	7,564
0,0012	5,645	6,361	5,627	6,299	5,523	6,083	5,149	5,413	6,600	7,191
0,0015	5,249	5,917	5,232	5,857	5,135	5,656	4,788	5,031	6,151	6,703
0,0020	4,711	5,311	4,696	5,257	4,607	5,076	4,295	4,514	5,535	6,032
0,0030	3,943	4,444	3,930	4,400	3,856	4,249	3,596	3,782	4,644	5,063
0,0040	3,428	3,863	3,417	3,827	3,355	3,697	3,132	3,294	4,038	4,403
0,0060	2,790	3,143	2,782	3,118	2,735	3,015	2,560	2,692	3,276	3,574
0,0080	2,414	2,719	2,406	2,699	2,370	2,614	2,225	2,340	2,819	3,078
0,0100	2,165	2,438	2,159	2,422	2,129	2,349	2,006	2,110	2,515	2,747
0,0130	1,916	2,157	1,912	2,144	1,889	2,085	1,790	1,883	2,209	2,414
0,0160	1,750	1,967	1,746	1,956	1,729	1,907	1,647	1,733	2,003	2,187
0,0200	1,596	1,789	1,594	1,781	1,582	1,743	1,518	1,597	1,811	1,976
0,0300	1,375	1,529	1,375	1,524	1,372	1,503	1,337	1,406	1,533	1,663
0,0400	1,257	1,383	1,257	1,381	1,258	1,369	1,241	1,303	1,381	1,489
0,0600	1,134	1,223	1,134	1,223	1,138	1,221	1,141	1,193	1,218	1,296
0,1000	1,035	1,079	1,036	1,080	1,039	1,084	1,053	1,088	1,083	1,123
0,1500	0,989	0,999	0,990	1,001	0,992	1,005	1,006	1,022	1,019	1,029
0,2000	0,969	0,958	0,970	0,959	0,971	0,963	0,982	0,983	0,989	0,981
0,3000	0,954	0,919	0,954	0,919	0,954	0,923	0,960	0,941	0,966	0,936
0,4000	0,948	0,903	0,949	0,904	0,949	0,907	0,953	0,923	0,958	0,915
0,5000	0,947	0,899	0,947	0,900	0,948	0,903	0,951	0,918	0,956	0,914

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	8,209	9,598	8,192	9,507	8,033	9,058		7,893	9,406	10,435
0,0001	7,920	9,266	7,903	9,178	7,743	8,737		7,605	9,087	10,09
0,0002	7,640	8,947	7,624	8,861	7,475	8,431		7,338	8,789	9,755
0,0003	7,387	8,656	7,371	8,573	7,222	8,149		7,089	8,508	9,446
0,0004	7,148	8,381	7,132	8,301	6,986	7,885		6,851	8,245	9,157
0,0005	6,925	8,123	6,909	8,045	6,765	7,638		6,634	7,997	8,885
0,0006	6,716	7,880	6,700	7,804	6,558	7,406		6,429	7,764	8,628
0,0008	6,330	7,436	6,315	7,364	6,180	6,982		6,056	7,337	8,157
0,0010	5,991	7,041	5,977	6,972	5,844	6,606		5,726	6,955	7,736
0,0012	5,685	6,688	5,671	6,622	5,546	6,270		5,433	6,613	7,358
0,0015	5,287	6,224	5,274	6,163	5,156	5,830		5,050	6,163	6,859
0,0020	4,745	5,586	4,733	5,530	4,626	5,232		4,531	5,546	6,173
0,0030	3,972	4,675	3,962	4,627	3,872	4,380		3,796	4,653	5,181
0,0040	3,454	4,063	3,444	4,021	3,369	3,810		3,307	4,046	4,505
0,0060	2,811	3,306	2,804	3,271	2,746	3,106	/,	2,703	3,283	3,656
0,0080	2,431	2,859	2,425	2,829	2,379	2,692		2,350	2,825	3,148
0,0100	2,179	2,562	2,175	2,536	2,137	2,419		2,118	2,520	2,809
0,0130	1,928	2,263	1,924	2,241	1,897	2,146		1,891	2,213	2,468
0,0160	1,758	2,059	1,756	2,041	1,735	1,962		1,740	2,006	2,235
0,0200	1,602	1,866	1,601	1,853	1,587	1,792		1,604	1,814	2,018
0,0300	1,377	1,580	1,377	1,573	1,374	1,540		1,411	1,535	1,695
0,0400	1,257	1,418	1,257	1,414	1,260	1,398		1,309	1,382	1,512
0,0600	1,132	1,238	1,133	1,238	1,138	1,238		1,197	1,218	1,309
0,1000	1,033	1,078	1,034	1,080	1,038	1,088		1,091	1,083	1,126
0,1500	0,988	0,993	0,988	0,994	0,991	1,002		1,023	1,018	1,027
0,2000	0,969	0,950	0,969	0,951	0,971	0,958		0,983	0,989	0,977
0,3000	0,953	0,911	0,953	0,912	0,954	0,917		0,939	0,965	0,931
0,4000	0,948	0,897	0,948	0,898	0,949	0,901		0,921	0,958	0,913
0,5000	0,947	0,893	0,947	0,894	0,947	0,897		0,916	0,956	0,909

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	8,214	9,720	8,200	9,627	8,034	9,103		7,893	9,406	10,474
0,0001	7,925	9,388	7,911	9,293	7,745	8,781		7,606	9,087	10,12
0,0002	7,645	9,068	7,632	8,972	7,476	8,473		7,339	8,790	9,789
0,0003	7,391	8,777	7,378	8,681	7,223	8,189		7,090	8,509	9,482
0,0004	7,152	8,503	7,139	8,405	6,987	7,924		6,851	8,246	9,191
0,0005	6,929	8,242	6,916	8,145	6,766	7,676		6,634	7,998	8,917
0,0006	6,720	7,996	6,708	7,902	6,559	7,442		6,429	7,765	8,658
0,0008	6,334	7,550	6,322	7,456	6,181	7,017		6,056	7,338	8,185
0,0010	5,995	7,155	5,983	7,059	5,845	6,639		5,727	6,956	7,762
0,0012	5,689	6,796	5,677	6,705	5,547	6,301		5,433	6,614	7,382
0,0015	5,291	6,324	5,280	6,240	5,157	5,859		5,050	6,164	6,881
0,0020	4,749	5,680	4,739	5,600	4,627	5,258		4,531	5,546	6,193
0,0030	3,975	4,754	3,966	4,686	3,873	4,402		3,796	4,654	5,197
0,0040	3,456	4,129	3,448	4,074	3,369	3,830		3,307	4,047	4,520
0,0060	2,813	3,356	2,807	3,315	2,747	3,123	/,	2,703	3,283	3,667
0,0080	2,433	2,901	2,428	2,868	2,380	2,707		2,350	2,825	3,157
0,0100	2,181	2,599	2,177	2,571	2,138	2,433		2,119	2,520	2,816
0,0130	1,929	2,293	1,926	2,272	1,897	2,158		1,891	2,213	2,473
0,0160	1,759	2,084	1,757	2,068	1,736	1,973		1,740	2,006	2,239
0,0200	1,603	1,887	1,602	1,875	1,587	1,801		1,604	1,814	2,020
0,0300	1,377	1,592	1,377	1,587	1,375	1,548		1,412	1,535	1,696
0,0400	1,257	1,425	1,257	1,423	1,260	1,404		1,309	1,382	1,512
0,0600	1,132	1,240	1,132	1,241	1,138	1,242		1,197	1,218	1,308
0,1000	1,033	1,077	1,033	1,079	1,038	1,089		1,091	1,083	1,124
0,1500	0,988	0,991	0,988	0,992	0,991	1,002		1,023	1,018	1,024
0,2000	0,969	0,948	0,998	0,949	0,971	0,957		0,983	0,989	0,974
0,3000	0,953	0,910	0,953	0,911	0,954	0,915		0,939	0,965	0,929
0,4000	0,948	0,896	0,948	0,896	0,949	0,900		0,921	0,958	0,911
0,5000	0,947	0,892	0,947	0,893	0,947	0,896		0,916	0,956	0,907

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,290		7,281		7,250		6,869		8,910	
0,0001	7,014		7,005		6,975		6,612		8,587	
0,0002	6,761		6,753		6,723		6,372		8,287	
0,0003	6,524		6,516		6,488		6,148		8,007	
0,0004	6,304		6,296		6,268		5,945		7,745	
0,0005	6,097		6,089		6,063		5,746		7,499	
0,0006	5,904		5,897		5,871		5,557		7,270	
0,0008	5,554		5,548		5,523		5,229		6,850	
0,0010	5,246		5,239		5,216		4,941		6,478	
0,0012	4,971		4,965		4,943		4,681		6,147	
0,0015	4,615		4,609		4,588		4,342		5,714	
0,0020	4,133		4,128		4,109		3,890		5,124	
0,0030	3,454		3,450		3,435		3,246		4,284	
0,0040	3,004		3,001		2,988		2,819		3,719	
0,0060	2,452	/,	2,449	/,	2,439	/,	2,296	/,	3,017	/,
0,0080	2,130		2,128		2,119		1,989		2,600	
0,0100	1,919		1,917		1,910		1,786		2,324	
0,0130	1,711		1,709		1,704		1,585		2,048	
0,0160	1,574		1,572		1,568		1,451		1,863	
0,0200	1,450		1,449		1,445		1,328		1,693	
0,0300	1,276		1,276		1,274		1,148		1,450	
0,0400	1,187		1,187		1,186		1,045		1,319	
0,0600	1,096		1,096		1,097		0,922		1,183	
0,1000	1,025		1,025		1,026		0,776		1,072	
0,1500	0,991		0,991		0,992		0,645		1,020	
0,2000	0,977		0,977		0,978		0,532		0,997	
0,3000	0,970		0,970		0,970		0,329		0,981	
0,4000	0,973		0,973		0,974		0,138		0,980	
0,5000	0,981		0,981		0,981		0,028		0,984	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,706	7,950	7,686	7,922	7,606	7,812	7,038		9,167	9,391
0,0001	7,420	7,656	7,401	7,628	7,323	7,522	6,773		8,839	9,055
0,0002	7,154	7,380	7,135	7,354	7,058	7,251	6,528		8,531	8,740
0,0003	6,905	7,124	6,887	7,098	6,812	6,998	6,300		8,244	8,445
0,0004	6,674	6,885	6,657	6,861	6,583	6,764	6,085		7,976	8,171
0,0005	6,458	6,662	6,440	6,638	6,368	6,543	5,890		7,724	7,913
0,0006	6,255	6,452	6,238	6,429	6,168	6,337	5,706		7,488	7,671
0,0008	5,887	6,073	5,871	6,051	5,803	5,964	5,370		7,058	7,230
0,0010	5,561	5,737	5,546	5,716	5,481	5,634	5,072		6,676	6,839
0,0012	5,272	5,438	5,258	5,418	5,195	5,340	4,798		6,335	6,490
0,0015	4,894	5,049	4,881	5,031	4,823	4,958	4,454		5,889	6,034
0,0020	4,384	4,523	4,372	4,506	4,320	4,441	3,986		5,283	5,412
0,0030	3,662	3,779	3,653	3,765	3,609	3,710	3,327		4,416	4,525
0,0040	3,183	3,284	3,174	3,272	3,138	3,225	2,890		3,834	3,929
0,0060	2,593	2,677	2,586	2,667	2,559	2,630	2,353	/	3,107	3,185
0,0080	2,246	2,319	2,241	2,311	2,220	2,280	2,037		2,676	2,743
0,0100	2,019	2,085	2,014	2,078	1,997	2,052	1,830		2,389	2,450
0,0130	1,792	1,851	1,789	1,845	1,776	1,824	1,623		2,102	2,156
0,0160	1,642	1,694	1,639	1,690	1,629	1,673	1,485		1,909	1,957
0,0200	1,504	1,551	1,502	1,548	1,495	1,535	1,358		1,731	1,773
0,0300	1,308	1,346	1,307	1,344	1,305	1,338	1,170		1,473	1,506
0,0400	1,204	1,235	1,204	1,235	1,204	1,232	1,063		1,333	1,360
0,0600	1,097	1,119	1,098	1,119	1,100	1,120	0,932		1,186	1,204
0,1000	1,013	1,022	1,014	1,023	1,016	1,025	0,775		1,065	1,072
0,1500	0,977	0,975	0,977	0,975	0,979	0,978	0,638		1,010	1,008
0,2000	0,964	0,955	0,964	0,956	0,966	0,958	0,524		0,988	0,980
0,3000	0,961	0,947	0,961	0,947	0,962	0,949	0,322		0,975	0,963
0,4000	0,968	0,955	0,969	0,956	0,969	0,957	0,135		0,977	0,965
0,5000	0,979	0,970	0,979	0,970	0,979	0,970	0,031		0,983	0,975

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,847	8,349	7,826	8,303	7,714	8,100	7,271	7,436	9,230	9,629
0,0001	7,557	8,039	7,537	7,995	7,427	7,799	6,995	7,154	8,900	9,286
0,0002	7,288	7,755	7,267	7,712	7,160	7,521	6,742	6,895	8,591	8,963
0,0003	7,037	7,489	7,015	7,448	6,911	7,260	6,505	6,653	8,301	8,663
0,0004	6,803	7,240	6,780	7,200	6,679	7,018	6,285	6,428	8,032	8,382
0,0005	6,583	7,007	6,560	6,968	6,462	6,790	6,079	6,217	7,778	8,118
0,0006	6,378	6,789	6,354	6,752	6,259	6,577	5,886	6,020	7,541	7,871
0,0008	6,004	6,393	5,981	6,357	5,890	6,191	5,537	5,663	7,108	7,420
0,0010	5,673	6,041	5,651	6,007	5,564	5,849	5,229	5,347	6,724	7,020
0,0012	5,379	5,729	5,357	5,696	5,275	5,545	4,955	5,068	6,381	6,663
0,0015	4,995	5,321	4,974	5,290	4,897	5,148	4,599	4,704	5,932	6,195
0,0020	4,475	4,766	4,456	4,739	4,386	4,612	4,119	4,213	5,321	5,557
0,0030	3,737	3,981	3,722	3,958	3,664	3,853	3,443	3,522	4,448	4,646
0,0040	3,246	3,459	3,235	3,439	3,185	3,348	2,996	3,065	3,862	4,033
0,0060	2,642	2,815	2,634	2,799	2,595	2,729	2,448	2,505	3,130	3,270
0,0080	2,286	2,436	2,281	2,423	2,249	2,365	2,129	2,179	2,695	2,815
0,0100	2,052	2,186	2,048	2,175	2,022	2,127	1,921	1,966	2,405	2,514
0,0130	1,818	1,936	1,816	1,927	1,797	1,889	1,716	1,757	2,115	2,210
0,0160	1,662	1,767	1,661	1,760	1,646	1,730	1,581	1,618	1,920	2,004
0,0200	1,519	1,611	1,518	1,605	1,509	1,583	1,459	1,494	1,739	1,813
0,0300	1,314	1,384	1,314	1,381	1,312	1,371	1,289	1,318	1,477	1,534
0,0400	1,205	1,260	1,206	1,259	1,208	1,256	1,199	1,226	1,335	1,379
0,0600	1,094	1,127	1,095	1,128	1,099	1,131	1,107	1,128	1,185	1,212
0,1000	1,008	1,016	1,009	1,017	1,012	1,023	1,029	1,040	1,063	1,070
0,1500	0,973	0,964	0,973	0,965	0,976	0,970	0,990	0,991	1,008	1,001
0,2000	0,961	0,943	0,962	0,944	0,963	0,948	0,973	0,967	0,986	0,972
0,3000	0,960	0,937	0,960	0,938	0,961	0,940	0,966	0,953	0,974	0,955
0,4000	0,968	0,949	0,968	0,949	0,968	0,950	0,971	0,958	0,976	0,960
0,5000	0,979	0,966	0,979	0,966	0,979	0,967	0,980	0,971	0,982	0,972

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,893	8,596	7,879	8,544	7,742	8,242		7,448	9,244	9,745
0,0001	7,602	8,286	7,588	8,233	7,455	7,936		7,166	8,914	9,396
0,0002	7,332	7,998	7,318	7,943	7,186	7,653		6,906	8,604	9,074
0,0003	7,080	7,727	7,066	7,672	6,937	7,388		6,663	8,315	8,771
0,0004	6,844	7,474	6,831	7,419	6,704	7,141		6,438	8,045	8,488
0,0005	6,623	7,236	6,610	7,181	6,486	6,909		6,227	7,791	8,221
0,0006	6,417	7,014	6,404	6,959	6,282	6,693		6,030	7,553	7,972
0,0008	6,041	6,608	6,029	6,554	5,912	6,299		5,671	7,120	7,517
0,0010	5,709	6,248	5,697	6,195	5,585	5,951		5,356	6,735	7,113
0,0012	5,413	5,928	5,401	5,875	5,294	5,642		5,076	6,391	6,751
0,0015	5,027	5,507	5,016	5,458	4,915	5,239		4,712	5,942	6,278
0,0020	4,504	4,934	4,494	4,889	4,403	4,694		4,219	5,330	5,633
0,0030	3,762	4,121	3,753	4,084	3,678	3,921		3,528	4,456	4,709
0,0040	3,268	3,578	3,260	3,548	3,197	3,408		3,070	3,868	4,087
0,0060	2,659	2,909	2,653	2,886	2,605	2,779	/,	2,510	3,135	3,312
0,0080	2,300	2,514	2,296	2,497	2,258	2,409		2,183	2,699	2,851
0,0100	2,064	2,253	2,060	2,240	2,029	2,166		1,969	2,409	2,545
0,0130	1,827	1,992	1,825	1,981	1,803	1,923		1,760	2,119	2,236
0,0160	1,669	1,814	1,667	1,806	1,651	1,760		1,621	1,923	2,028
0,0200	1,523	1,648	1,522	1,643	1,513	1,609		1,496	1,741	1,833
0,0300	1,315	1,406	1,315	1,404	1,314	1,390		1,321	1,478	1,547
0,0400	1,205	1,272	1,205	1,272	1,208	1,269		1,228	1,335	1,388
0,0600	1,092	1,129	1,093	1,130	1,098	1,136		1,129	1,185	1,216
0,1000	1,006	1,010	1,007	1,012	1,011	1,021		1,041	1,063	1,069
0,1500	0,972	0,957	0,972	0,958	0,975	0,965		0,991	1,008	0,997
0,2000	0,961	0,937	0,961	0,938	0,962	0,943		0,967	0,986	0,968
0,3000	0,960	0,933	0,960	0,934	0,960	0,936		0,952	0,974	0,952
0,4000	0,968	0,946	0,968	0,946	0,968	0,948		0,957	0,976	0,958
0,5000	0,979	0,965	0,979	0,965	0,979	0,965		0,970	0,982	0,971

Zug, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,897	8,656	7,886	8,603	7,744	8,269		7,448	9,245	9,763
0,0001	7,605	8,345	7,595	8,293	7,457	7,961		7,166	8,915	9,414
0,0002	7,335	8,054	7,325	8,003	7,188	7,678		6,906	8,605	9,090
0,0003	7,083	7,782	7,073	7,732	6,938	7,414		6,663	8,315	8,787
0,0004	6,848	7,527	6,837	7,478	6,706	7,167		6,438	8,045	8,503
0,0005	6,627	7,288	6,616	7,241	6,488	6,935		6,227	7,791	8,236
0,0006	6,420	7,065	6,410	7,018	6,283	6,720		6,030	7,554	7,987
0,0008	6,045	6,656	6,035	6,612	5,914	6,326		5,671	7,120	7,531
0,0010	5,712	6,294	5,702	6,251	5,586	5,977		5,356	6,735	7,126
0,0012	5,416	5,971	5,407	5,931	5,296	5,668		5,076	6,392	6,764
0,0015	5,030	5,547	5,021	5,509	4,916	5,263		4,712	5,942	6,290
0,0020	4,507	4,971	4,499	4,936	4,404	4,715		4,220	5,330	5,644
0,0030	3,764	4,152	3,757	4,122	3,679	3,939		3,528	4,456	4,718
0,0040	3,270	3,606	3,264	3,579	3,198	3,423		3,070	3,869	4,095
0,0060	2,661	2,932	2,656	2,910	2,606	2,788	/,	2,510	3,135	3,319
0,0080	2,302	2,535	2,298	2,516	2,258	2,417		2,183	2,699	2,857
0,0100	2,065	2,272	2,062	2,256	2,030	2,172		1,970	2,409	2,550
0,0130	1,828	2,007	1,826	1,994	1,803	1,928		1,760	2,119	2,241
0,0160	1,669	1,826	1,668	1,817	1,651	1,764		1,621	1,923	2,032
0,0200	1,524	1,658	1,523	1,652	1,513	1,613		1,496	1,741	1,836
0,0300	1,315	1,410	1,315	1,408	1,314	1,393		1,321	1,478	1,549
0,0400	1,204	1,274	1,205	1,274	1,208	1,271		1,228	1,335	1,390
0,0600	1,092	1,128	1,092	1,130	1,098	1,137		1,129	1,185	1,216
0,1000	1,006	1,009	1,007	1,010	1,011	1,020		1,041	1,063	1,068
0,1500	0,972	0,955	0,972	0,956	0,975	0,964		0,991	1,008	0,997
0,2000	0,961	0,936	0,961	0,937	0,962	0,942		0,967	0,986	0,967
0,3000	0,960	0,933	0,960	0,933	0,960	0,936		0,952	0,974	0,952
0,4000	0,968	0,946	0,968	0,946	0,968	0,948		0,957	0,976	0,958
0,5000	0,979	0,965	0,979	0,965	0,979	0,965		0,970	0,982	0,971

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,044		7,036		7,006		6,874		8,729	
0,0001	6,790		6,782		6,753		6,624		8,433	
0,0002	6,551		6,543		6,515		6,389		8,153	
0,0003	6,327		6,320		6,293		6,170		7,891	
0,0004	6,119		6,112		6,085		5,966		7,645	
0,0005	5,924		5,917		5,891		5,774		7,414	
0,0006	5,742		5,735		5,710		5,595		7,197	
0,0008	5,408		5,402		5,378		5,270		6,798	
0,0010	5,114		5,108		5,085		4,982		6,443	
0,0012	4,851		4,846		4,824		4,727		6,125	
0,0015	4,509		4,503		4,483		4,394		5,707	
0,0020	4,043		4,038		4,021		3,941		5,133	
0,0030	3,382		3,378		3,363		3,295		4,303	
0,0040	2,939		2,935		2,923		2,865		3,737	
0,0060	2,390	,/,	2,387	,/,	2,377	,/,	2,333	,/,	3,023	,/,
0,0080	2,065		2,063		2,055		2,020		2,593	
0,0100	1,850		1,849		1,842		1,813		2,305	
0,0130	1,637		1,635		1,630		1,607		2,014	
0,0160	1,493		1,492		1,488		1,470		1,817	
0,0200	1,361		1,360		1,357		1,344		1,633	
0,0300	1,167		1,167		1,166		1,160		1,360	
0,0400	1,058		1,058		1,057		1,056		1,204	
0,0600	0,928		0,928		0,929		0,932		1,022	
0,1000	0,780		0,781		0,782		0,787		0,829	
0,1500	0,653		0,653		0,655		0,660		0,680	
0,2000	0,547		0,547		0,548		0,552		0,564	
0,3000	0,357		0,357		0,358		0,360		0,365	
0,4000	0,181		0,181		0,182		0,182		0,184	
0,5000	0,033		0,033		0,032		0,030		0,031	

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,445	7,604	7,425	7,577	7,342	7,471	7,001		8,980	9,126
0,0001	7,181	7,334	7,161	7,307	7,080	7,204	6,748		8,677	8,821
0,0002	6,930	7,078	6,910	7,052	6,832	6,952	6,509		8,389	8,530
0,0003	6,696	6,839	6,678	6,814	6,602	6,717	6,287		8,120	8,258
0,0004	6,478	6,616	6,460	6,592	6,386	6,498	6,079		7,868	8,003
0,0005	6,273	6,407	6,256	6,384	6,184	6,292	5,885		7,631	7,763
0,0006	6,082	6,211	6,064	6,188	5,994	6,099	5,704		7,408	7,537
0,0008	5,732	5,854	5,715	5,832	5,649	5,748	5,372		6,999	7,123
0,0010	5,421	5,537	5,406	5,516	5,342	5,436	5,079		6,634	6,753
0,0012	5,144	5,254	5,129	5,234	5,069	5,158	4,818		6,307	6,422
0,0015	4,782	4,884	4,768	4,865	4,712	4,794	4,477		5,877	5,984
0,0020	4,288	4,380	4,276	4,363	4,225	4,299	4,015		5,287	5,382
0,0030	3,585	3,662	3,574	3,648	3,532	3,594	3,359		4,432	4,512
0,0040	3,113	3,181	3,104	3,169	3,068	3,122	2,920		3,850	3,917
0,0060	2,527	2,583	2,520	2,574	2,492	2,537	2,378	,/,	3,114	3,167
0,0080	2,179	2,229	2,173	2,221	2,150	2,190	2,057		2,669	2,715
0,0100	1,948	1,994	1,944	1,987	1,924	1,960	1,846		2,371	2,411
0,0130	1,717	1,757	1,713	1,751	1,698	1,730	1,636		2,070	2,105
0,0160	1,560	1,596	1,557	1,591	1,545	1,575	1,495		1,864	1,895
0,0200	1,414	1,446	1,411	1,442	1,403	1,430	1,366		1,671	1,699
0,0300	1,197	1,222	1,196	1,220	1,193	1,215	1,176		1,383	1,404
0,0400	1,072	1,093	1,072	1,092	1,073	1,090	1,068		1,217	1,234
0,0600	0,925	0,938	0,926	0,939	0,929	0,940	0,937		1,023	1,033
0,1000	0,764	0,766	0,765	0,767	0,768	0,770	0,783		0,820	0,820
0,1500	0,635	0,627	0,636	0,628	0,638	0,632	0,652		0,668	0,660
0,2000	0,531	0,518	0,531	0,519	0,533	0,522	0,543		0,552	0,541
0,3000	0,349	0,337	0,349	0,337	0,349	0,339	0,354		0,358	0,348
0,4000	0,181	0,182	0,181	0,182	0,181	0,181	0,181		0,184	0,185
0,5000	0,043	0,059	0,042	0,058	0,041	0,056	0,036		0,039	0,054

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,3		R=1		R=4		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, R=1	
	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5
0	7,597	7,998	7,573	7,949	7,452	7,738	7,011	7,106	9,051	9,358
0,0001	7,323	7,715	7,299	7,667	7,187	7,457	6,758	6,849	8,748	9,045
0,0002	7,077	7,453	7,054	7,402	6,935	7,205	6,519	6,606	8,460	8,747
0,0003	6,840	7,205	6,817	7,154	6,701	6,963	6,296	6,381	8,191	8,469
0,0004	6,619	6,975	6,597	6,923	6,482	6,737	6,088	6,170	7,938	8,208
0,0005	6,413	6,758	6,391	6,705	6,277	6,526	5,894	5,973	7,700	7,962
0,0006	6,217	6,554	6,197	6,501	6,085	6,327	5,712	5,789	7,476	7,731
0,0008	5,862	6,181	5,842	6,129	5,735	5,964	5,380	5,452	7,066	7,307
0,0010	5,547	5,850	5,528	5,798	5,424	5,642	5,086	5,155	6,699	6,928
0,0012	5,265	5,554	5,247	5,503	5,146	5,355	4,825	4,890	6,370	6,588
0,0015	4,895	5,165	4,878	5,116	4,783	4,978	4,484	4,544	5,936	6,139
0,0020	4,390	4,634	4,375	4,589	4,289	4,465	4,021	4,076	5,339	5,522
0,0030	3,670	3,874	3,657	3,836	3,586	3,733	3,364	3,410	4,476	4,630
0,0040	3,185	3,363	3,174	3,331	3,114	3,242	2,925	2,965	3,886	4,021
0,0060	2,582	2,726	2,573	2,701	2,529	2,632	2,381	2,414	3,140	3,253
0,0080	2,224	2,348	2,217	2,327	2,182	2,271	2,060	2,090	2,691	2,789
0,0100	1,985	2,097	1,980	2,078	1,952	2,032	1,849	1,876	2,389	2,478
0,0130	1,746	1,843	1,741	1,826	1,721	1,792	1,638	1,663	2,084	2,163
0,0160	1,583	1,670	1,579	1,654	1,565	1,628	1,497	1,520	1,875	1,946
0,0200	1,430	1,507	1,428	1,493	1,419	1,476	1,368	1,389	1,680	1,742
0,0300	1,203	1,260	1,203	1,250	1,201	1,246	1,178	1,196	1,387	1,434
0,0400	1,073	1,116	1,074	1,109	1,076	1,112	1,069	1,085	1,219	1,254
0,0600	0,921	0,943	0,922	0,939	0,927	0,948	0,937	0,949	1,022	1,040
0,1000	0,758	0,754	0,759	0,752	0,763	0,764	0,783	0,787	0,816	0,815
0,1500	0,630	0,610	0,630	0,609	0,633	0,618	0,651	0,646	0,665	0,649
0,2000	0,528	0,502	0,528	0,501	0,530	0,508	0,542	0,532	0,550	0,529
0,3000	0,347	0,329	0,348	0,329	0,348	0,331	0,353	0,342	0,357	0,342
0,4000	0,182	0,187	0,181	0,188	0,181	0,185	0,181	0,180	0,185	0,189
0,5000	0,045	0,072	0,044	0,077	0,043	0,068	0,037	0,052	0,041	0,065

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,3		R=1		R=4		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, R=1	
	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5
0	7,655	8,310	7,635	8,239	7,481	7,894		7,114	9,069	9,498
0,0001	7,380	8,020	7,360	7,947	7,215	7,608		6,857	8,766	9,175
0,0002	7,131	7,752	7,113	7,678	6,962	7,350		6,614	8,477	8,883
0,0003	6,893	7,497	6,875	7,422	6,728	7,103		6,388	8,208	8,601
0,0004	6,671	7,260	6,653	7,185	6,508	6,873		6,177	7,954	8,338
0,0005	6,463	7,036	6,445	6,962	6,302	6,658		5,980	7,716	8,091
0,0006	6,267	6,826	6,249	6,751	6,109	6,454		5,796	7,492	7,856
0,0008	5,909	6,442	5,892	6,367	5,758	6,084		5,458	7,081	7,427
0,0010	5,592	6,100	5,576	6,026	5,445	5,756		5,161	6,713	7,044
0,0012	5,308	5,794	5,292	5,721	5,167	5,463		4,896	6,384	6,700
0,0015	4,936	5,391	4,921	5,321	4,803	5,078		4,550	5,949	6,245
0,0020	4,427	4,840	4,413	4,775	4,307	4,555		4,080	5,351	5,618
0,0030	3,701	4,046	3,689	3,993	3,601	3,809		3,414	4,485	4,711
0,0040	3,212	3,510	3,202	3,467	3,127	3,308		2,968	3,894	4,090
0,0060	2,604	2,844	2,596	2,814	2,539	2,687	/,	2,418	3,147	3,306
0,0080	2,242	2,448	2,235	2,425	2,191	2,320		2,092	2,696	2,834
0,0100	2,001	2,185	1,995	2,166	1,960	2,076		1,878	2,394	2,517
0,0130	1,758	1,917	1,754	1,903	1,727	1,830		1,665	2,088	2,196
0,0160	1,592	1,733	1,589	1,722	1,570	1,663		1,522	1,879	1,976
0,0200	1,437	1,559	1,435	1,550	1,423	1,506		1,391	1,683	1,768
0,0300	1,205	1,291	1,205	1,288	1,204	1,268		1,198	1,389	1,452
0,0400	1,072	1,133	1,073	1,133	1,077	1,127		1,087	1,219	1,266
0,0600	0,918	0,945	0,919	0,947	0,926	0,954		0,951	1,021	1,045
0,1000	0,756	0,745	0,756	0,747	0,762	0,759		0,788	0,815	0,811
0,1500	0,629	0,599	0,629	0,600	0,632	0,610		0,646	0,664	0,642
0,2000	0,527	0,493	0,527	0,494	0,529	0,500		0,531	0,549	0,523
0,3000	0,347	0,327	0,347	0,327	0,348	0,328		0,341	0,357	0,339
0,4000	0,182	0,191	0,182	0,190	0,181	0,188		0,180	0,185	0,192
0,5000	0,045	0,081	0,045	0,079	0,044	0,075		0,053	0,041	0,071

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, X-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,662	8,419	7,645	8,335	7,483	7,924		7,113	9,070	9,527
0,0001	7,387	8,126	7,370	8,044	7,216	7,637		6,853	8,767	9,203
0,0002	7,138	7,854	7,122	7,775	6,964	7,379		6,610	8,478	8,910
0,0003	6,900	7,596	6,884	7,519	6,729	7,130		6,384	8,208	8,628
0,0004	6,678	7,356	6,662	7,280	6,509	6,899		6,174	7,955	8,363
0,0005	6,470	7,129	6,454	7,056	6,304	6,683		5,977	7,717	8,116
0,0006	6,273	6,917	6,258	6,845	6,111	6,479		5,793	7,493	7,880
0,0008	5,915	6,528	5,900	6,460	5,759	6,107		5,458	7,081	7,450
0,0010	5,598	6,182	5,583	6,116	5,446	5,778		5,164	6,714	7,066
0,0012	5,314	5,872	5,300	5,809	5,168	5,483		4,896	6,384	6,72
0,0015	4,941	5,464	4,928	5,405	4,804	5,098		4,549	5,950	6,264
0,0020	4,432	4,907	4,420	4,853	4,308	4,572		4,079	5,351	5,636
0,0030	3,705	4,102	3,695	4,056	3,601	3,824		3,413	4,486	4,725
0,0040	3,216	3,560	3,207	3,519	3,128	3,321		2,968	3,895	4,103
0,0060	2,607	2,887	2,599	2,852	2,540	2,699	/,	2,418	3,147	3,317
0,0080	2,245	2,487	2,238	2,457	2,191	2,330		2,094	2,697	2,844
0,0100	2,003	2,220	1,998	2,193	1,960	2,085		1,880	2,394	2,527
0,0130	1,759	1,947	1,756	1,926	1,728	1,839		1,667	2,088	2,204
0,0160	1,593	1,759	1,591	1,741	1,570	1,671		1,525	1,879	1,983
0,0200	1,437	1,579	1,436	1,566	1,423	1,513		1,393	1,683	1,774
0,0300	1,205	1,303	1,205	1,297	1,204	1,273		1,199	1,389	1,456
0,0400	1,072	1,139	1,073	1,138	1,077	1,130		1,088	1,219	1,269
0,0600	0,918	0,945	0,919	0,947	0,926	0,955		0,952	1,021	1,046
0,1000	0,755	0,741	0,756	0,744	0,762	0,759		0,789	0,815	0,810
0,1500	0,628	0,595	0,629	0,597	0,632	0,609		0,647	0,664	0,641
0,2000	0,527	0,491	0,527	0,491	0,529	0,499		0,532	0,549	0,521
0,3000	0,347	0,327	0,347	0,327	0,348	0,328		0,342	0,357	0,339
0,4000	0,182	0,192	0,182	0,192	0,181	0,188		0,180	0,185	0,192
0,5000	0,045	0,083	0,045	0,082	0,044	0,076		0,051	0,041	0,073

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 10°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,071		7,062		7,028		6,875		8,417	
0,0001	6,804		6,795		6,762		6,616		8,113	
0,0002	6,559		6,550		6,518		6,376		7,831	
0,0003	6,329		6,321		6,290		6,152		7,567	
0,0004	6,116		6,108		6,078		5,944		7,319	
0,0005	5,916		5,908		5,879		5,748		7,089	
0,0006	5,729		5,721		5,693		5,566		6,871	
0,0008	5,389		5,382		5,355		5,236		6,476	
0,0010	5,089		5,082		5,057		4,943		6,124	
0,0012	4,823		4,816		4,792		4,684		5,811	
0,0015	4,476		4,470		4,447		4,347		5,401	
0,0020	4,007		4,001		3,981		3,891		4,842	
0,0030	3,344		3,340		3,323		3,248		4,043	
0,0040	2,904		2,900		2,886		2,822		3,505	
0,0060	2,361	/,	2,358	/,	2,347	/,	2,297	/,	2,832	/,
0,0080	2,041		2,039		2,030		1,989		2,431	
0,0100	1,831		1,829		1,821		1,787		2,162	
0,0130	1,621		1,619		1,613		1,586		1,892	
0,0160	1,480		1,478		1,474		1,452		1,709	
0,0200	1,350		1,349		1,345		1,328		1,537	
0,0300	1,159		1,159		1,157		1,148		1,283	
0,0400	1,051		1,051		1,050		1,046		1,137	
0,0600	0,921		0,921		0,922		0,922		0,965	
0,1000	0,771		0,771		0,772		0,776		0,780	
0,1500	0,639		0,639		0,640		0,645		0,632	
0,2000	0,527		0,527		0,528		0,532		0,514	
0,3000	0,325		0,325		0,326		0,329		0,309	
0,4000	0,137		0,137		0,137		0,138		0,120	
0,5000	0,029		0,029		0,029		0,028		0,038	

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 20°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,543	7,872	7,520	7,837	7,428	7,704	7,045		8,717	9,024
0,0001	7,264	7,580	7,242	7,547	7,153	7,418	6,779		8,406	8,703
0,0002	7,003	7,312	6,982	7,278	6,896	7,151	6,534		8,115	8,401
0,0003	6,760	7,061	6,740	7,027	6,656	6,902	6,304		7,842	8,120
0,0004	6,534	6,826	6,514	6,792	6,433	6,671	6,091		7,588	7,858
0,0005	6,322	6,606	6,303	6,572	6,224	6,454	5,891		7,349	7,611
0,0006	6,123	6,401	6,104	6,367	6,028	6,250	5,705		7,125	7,379
0,0008	5,763	6,026	5,745	5,992	5,673	5,882	5,366		6,716	6,957
0,0010	5,444	5,694	5,427	5,661	5,358	5,556	5,067		6,353	6,581
0,0012	5,161	5,398	5,144	5,367	5,079	5,266	4,802		6,029	6,246
0,0015	4,790	5,012	4,775	4,982	4,714	4,888	4,456		5,605	5,806
0,0020	4,289	4,489	4,276	4,462	4,220	4,376	3,989		5,026	5,207
0,0030	3,579	3,744	3,567	3,722	3,521	3,652	3,330		4,197	4,349
0,0040	3,105	3,248	3,095	3,229	3,056	3,170	2,892		3,638	3,770
0,0060	2,520	2,634	2,512	2,622	2,481	2,576	2,354	./,	2,938	3,045
0,0080	2,174	2,273	2,168	2,263	2,142	2,226	2,039		2,520	2,612
0,0100	1,946	2,033	1,940	2,026	1,919	1,994	1,831		2,240	2,323
0,0130	1,715	1,793	1,711	1,787	1,695	1,762	1,624		1,957	2,031
0,0160	1,559	1,630	1,556	1,625	1,543	1,605	1,486		1,764	1,831
0,0200	1,414	1,478	1,412	1,474	1,402	1,458	1,358		1,583	1,643
0,0300	1,198	1,250	1,197	1,248	1,193	1,239	1,171		1,312	1,360
0,0400	1,073	1,117	1,073	1,116	1,072	1,112	1,064		1,155	1,195
0,0600	0,924	0,956	0,925	0,957	0,927	0,957	0,932		0,970	0,998
0,1000	0,759	0,774	0,760	0,774	0,763	0,777	0,776		0,773	0,785
0,1500	0,623	0,623	0,624	0,623	0,626	0,627	0,638		0,622	0,621
0,2000	0,513	0,502	0,513	0,503	0,515	0,506	0,524		0,504	0,494
0,3000	0,316	0,297	0,316	0,298	0,317	0,300	0,322		0,302	0,285
0,4000	0,133	0,122	0,133	0,122	0,133	0,122	0,135		0,118	0,112
0,5000	0,031	0,053	0,031	0,053	0,031	0,052	0,031		0,040	0,060

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 30°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	$R=0,1$		$R=0,3$		$R=1$		$R=4$		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, $R=1$	
	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$	$h=0,75$	$h=2,5$
0	7,717	8,433	7,690	8,367	7,554	8,105	7,059	7,286	8,798	9,384
0,0001	7,431	8,128	7,405	8,065	7,274	7,803	6,792	7,010	8,485	9,049
0,0002	7,169	7,845	7,144	7,783	7,012	7,526	6,546	6,757	8,191	8,740
0,0003	6,924	7,579	6,899	7,519	6,769	7,267	6,317	6,520	7,918	8,451
0,0004	6,695	7,329	6,671	7,271	6,542	7,025	6,103	6,300	7,662	8,179
0,0005	6,479	7,096	6,456	7,040	6,329	6,798	5,903	6,093	7,421	7,924
0,0006	6,278	6,878	6,255	6,823	6,130	6,586	5,716	5,900	7,195	7,685
0,0008	5,911	6,479	5,890	6,427	5,769	6,200	5,377	5,549	6,784	7,248
0,0010	5,586	6,124	5,566	6,076	5,450	5,858	5,077	5,240	6,419	6,859
0,0012	5,297	5,809	5,277	5,763	5,165	5,554	4,811	4,966	6,092	6,511
0,0015	4,919	5,395	4,900	5,352	4,795	5,156	4,464	4,608	5,663	6,055
0,0020	4,404	4,832	4,388	4,793	4,293	4,617	3,996	4,125	5,079	5,432
0,0030	3,674	4,030	3,660	3,998	3,582	3,852	3,336	3,445	4,241	4,535
0,0040	3,185	3,494	3,173	3,466	3,108	3,343	2,898	2,993	3,675	3,930
0,0060	2,581	2,833	2,572	2,810	2,524	2,715	2,359	2,438	2,967	3,174
0,0080	2,224	2,442	2,216	2,422	2,179	2,345	2,043	2,112	2,543	2,722
0,0100	1,986	2,183	1,980	2,165	1,950	2,100	1,834	1,898	2,260	2,421
0,0130	1,748	1,921	1,743	1,906	1,721	1,854	1,627	1,684	1,973	2,115
0,0160	1,585	1,741	1,582	1,730	1,565	1,686	1,489	1,542	1,778	1,906
0,0200	1,433	1,572	1,431	1,563	1,420	1,529	1,361	1,410	1,594	1,708
0,0300	1,206	1,314	1,205	1,309	1,203	1,292	1,173	1,216	1,318	1,407
0,0400	1,075	1,162	1,075	1,159	1,077	1,151	1,065	1,103	1,158	1,230
0,0600	0,920	0,977	0,921	0,977	0,926	0,978	0,933	0,964	0,970	1,018
0,1000	0,753	0,771	0,754	0,772	0,758	0,778	0,776	0,794	0,770	0,787
0,1500	0,618	0,609	0,619	0,611	0,622	0,617	0,638	0,642	0,619	0,613
0,2000	0,509	0,485	0,510	0,486	0,511	0,492	0,523	0,516	0,502	0,483
0,3000	0,315	0,283	0,315	0,283	0,315	0,286	0,321	0,303	0,301	0,274
0,4000	0,133	0,123	0,133	0,123	0,133	0,121	0,135	0,121	0,118	0,118
0,5000	0,032	0,065	0,032	0,064	0,032	0,063	0,031	0,054	0,041	0,070

1. Hauptspannung vom Ort des max. Wertes ($z/T = 0$) bis $z/T = 0,5$. Hauptspannung S_I und Laufvariable z jeweils normiert auf die Nennspannung S_N bzw. Plattendicke T ,

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 45°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,3		R=1		R=4		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, R=1	
	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5
0	7,782	8,875	7,760	8,779	7,587	8,337		7,307	8,818	9,592
0,0001	7,494	8,559	7,473	8,466	7,306	8,026		7,030	8,505	9,250
0,0002	7,230	8,262	7,209	8,171	7,043	7,741		6,776	8,211	8,934
0,0003	6,984	7,984	6,963	7,896	6,799	7,475		6,538	7,936	8,638
0,0004	6,753	7,723	6,732	7,638	6,571	7,226		6,317	7,680	8,361
0,0005	6,536	7,479	6,516	7,397	6,357	6,992		6,110	7,439	8,100
0,0006	6,333	7,250	6,314	7,170	6,157	6,774		5,917	7,212	7,856
0,0008	5,964	6,832	5,945	6,756	5,795	6,377		5,565	6,801	7,409
0,0010	5,636	6,461	5,618	6,388	5,474	6,025		5,255	6,434	7,011
0,0012	5,344	6,129	5,327	6,060	5,189	5,712		4,980	6,106	6,656
0,0015	4,963	5,693	4,947	5,628	4,816	5,303		4,621	5,677	6,190
0,0020	4,444	5,101	4,429	5,042	4,312	4,750		4,137	5,091	5,553
0,0030	3,708	4,257	3,695	4,207	3,598	3,963		3,455	4,252	4,638
0,0040	3,215	3,691	3,204	3,647	3,122	3,441		3,002	3,684	4,021
0,0060	2,605	2,995	2,596	2,958	2,535	2,796	/,	2,445	2,975	3,250
0,0080	2,244	2,583	2,236	2,551	2,189	2,417		2,119	2,549	2,790
0,0100	2,003	2,309	1,997	2,280	1,959	2,166		1,904	2,266	2,482
0,0130	1,761	2,029	1,756	2,005	1,728	1,912		1,690	1,978	2,170
0,0160	1,596	1,836	1,592	1,816	1,572	1,739		1,547	1,782	1,955
0,0200	1,440	1,651	1,438	1,636	1,425	1,576		1,415	1,597	1,751
0,0300	1,208	1,365	1,208	1,358	1,206	1,326		1,220	1,319	1,439
0,0400	1,075	1,195	1,075	1,192	1,079	1,177		1,107	1,158	1,253
0,0600	0,918	0,989	0,919	0,989	0,926	0,992		0,967	0,969	1,030
0,1000	0,751	0,766	0,751	0,768	0,757	0,779		0,796	0,769	0,788
0,1500	0,617	0,598	0,617	0,600	0,621	0,611		0,642	0,618	0,607
0,2000	0,508	0,474	0,509	0,475	0,511	0,483		0,516	0,501	0,476
0,3000	0,314	0,276	0,314	0,277	0,315	0,280		0,302	0,300	0,269
0,4000	0,133	0,128	0,133	0,127	0,133	0,124		0,120	0,118	0,123
0,5000	0,032	0,071	0,032	0,070	0,032	0,068		0,056	0,041	0,075

Biegung, V-Naht, Sekundärkerbkerbtiefe: 0,3 mm, Nahtanstiegswinkel: 60°, Kerbradius R - Schweißnahthöhe h in mm

S_I/S_N	R=0,1		R=0,3		R=1		R=4		Sekundärkerbkerb: 0,5mm, R=1	
	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5	h=0,75	h=2,5
0	7,790	9,035	7,771	8,920	7,588	8,383		7,306	8,819	9,637
0,0001	7,503	8,715	7,484	8,602	7,307	8,071		7,030	8,506	9,297
0,0002	7,238	8,419	7,220	8,306	7,045	7,784		6,775	8,211	8,981
0,0003	6,991	8,140	6,973	8,027	6,800	7,516		6,537	7,937	8,685
0,0004	6,760	7,879	6,742	7,768	6,572	7,266		6,316	7,681	8,408
0,0005	6,543	7,634	6,525	7,524	6,359	7,031		6,110	7,440	8,147
0,0006	6,341	7,404	6,323	7,294	6,159	6,812		5,916	7,213	7,902
0,0008	5,971	6,982	5,954	6,876	5,796	6,412		5,564	6,801	7,454
0,0010	5,643	6,607	5,627	6,504	5,475	6,058		5,254	6,435	7,055
0,0012	5,351	6,270	5,335	6,171	5,190	5,743		4,979	6,107	6,698
0,0015	4,970	5,826	4,955	5,732	4,817	5,333		4,621	5,678	6,230
0,0020	4,450	5,222	4,436	5,135	4,313	4,776		4,137	5,092	5,588
0,0030	3,713	4,355	3,701	4,284	3,599	3,986		3,454	4,252	4,667
0,0040	3,219	3,776	3,209	3,714	3,123	3,461		3,001	3,685	4,046
0,0060	2,609	3,059	2,600	3,011	2,536	2,814	/,	2,445	2,975	3,268
0,0080	2,247	2,636	2,240	2,596	2,189	2,432		2,119	2,550	2,804
0,0100	2,006	2,354	2,000	2,321	1,959	2,180		1,903	2,266	2,495
0,0130	1,763	2,068	1,759	2,040	1,729	1,925		1,690	1,978	2,180
0,0160	1,597	1,869	1,594	1,847	1,572	1,751		1,547	1,782	1,964
0,0200	1,441	1,678	1,440	1,661	1,425	1,586		1,415	1,597	1,759
0,0300	1,208	1,382	1,208	1,374	1,206	1,335		1,220	1,319	1,445
0,0400	1,074	1,205	1,075	1,202	1,079	1,184		1,107	1,159	1,258
0,0600	0,918	0,991	0,919	0,992	0,926	0,996		0,967	0,969	1,032
0,1000	0,750	0,762	0,751	0,765	0,757	0,779		0,796	0,769	0,788
0,1500	0,617	0,594	0,617	0,596	0,621	0,609		0,642	0,618	0,606
0,2000	0,508	0,471	0,509	0,472	0,510	0,482		0,516	0,501	0,474
0,3000	0,314	0,275	0,314	0,276	0,315	0,279		0,301	0,300	0,268
0,4000	0,133	0,130	0,133	0,129	0,133	0,125		0,120	0,118	0,124
0,5000	0,032	0,072	0,032	0,072	0,032	0,069		0,056	0,041	0,076

Anhang C: Spannungs-Tiefen-Profil: Validierung der Parametergleichungen von IBESS-Option B

Die Spannungskonzentrationsfaktoren K_t und Spannungs-Tiefen-Profile für X- und V-Stumpfnähte unter Zug- und Biegebelastung (Bild 23) wurden mittels FEM ermittelt und anschließend durch die Parametergleichungen (32) sowie (28)-(31) approximiert. In diesem Anhang werden die Gleichungen den FEM-Originaldaten gegenübergestellt und mit Literaturlösungen verglichen. Es zeigt sich, dass die IBESS-Gleichungen nicht nur einen weiteren Bereich v.a. hinsichtlich der Parameter Übergangsradius und Nahtanstieg abbilden, sondern darüber hinaus gegenüber den Literaturdaten eine verbesserte Genauigkeit aufweisen. In den Bildern A3.1 bis A3.4 ist dies hinsichtlich des Spannungskonzentrationsfaktors (Gl. 32) und in den Bildern A3.5 und A3.6 hinsichtlich der Spannungs-Tiefen-Profile (Gl. 28-31) gezeigt. Letztere sind zur besseren Beurteilung im oberflächennahen Bereich logarithmisch aufgetragen. Einen Vergleich zwischen linearer und logarithmischer Auftragung gibt Bild A3.7 wieder. Bild A3.8 zeigt die Abhängigkeit von K_t von der Nahtüberhöhung h gemäß der FEM-Analysen und der Parametergleichungen (28-31). Aus dem Vergleich beider wird als untere Anwendungsgrenze der Gleichungen der in Abschnitt 2.6.2 wiedergegebene Wert von $h = 0,75$ mm gewonnen. Obergrenze ist $h = 3$ mm. Von diesem Wert ab verändern sich die FEM-Werte kaum noch, weshalb er als Obergrenze gesetzt wird, d.h. für $h > 3$ mm (z.B. bei Quersteifen und Kreuzsstößen) wird mit $h = 3$ mm gerechnet.

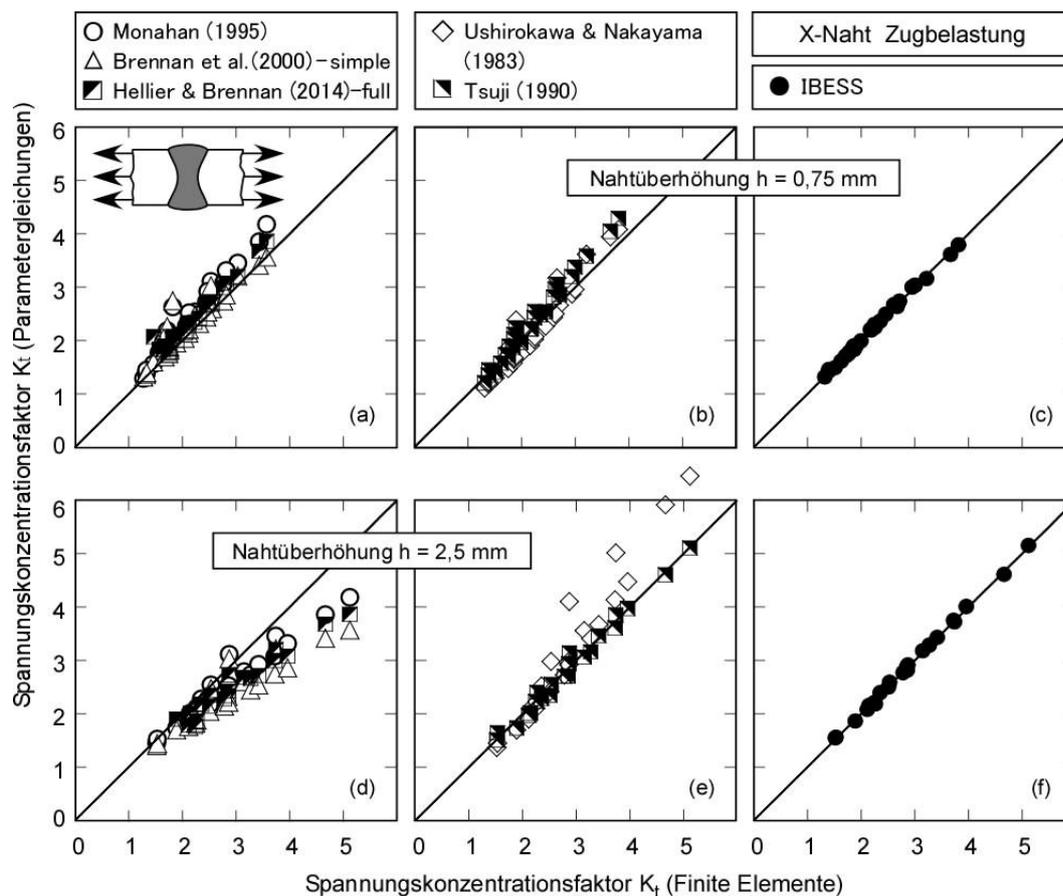


Bild A.3.1: Vergleich des Spannungskonzentrationsfaktors nach Gl. (28ff) mit den zugrundeliegenden FEM-Daten und mit Gleichungen aus der Literatur; X-Naht, Zugbelastung.

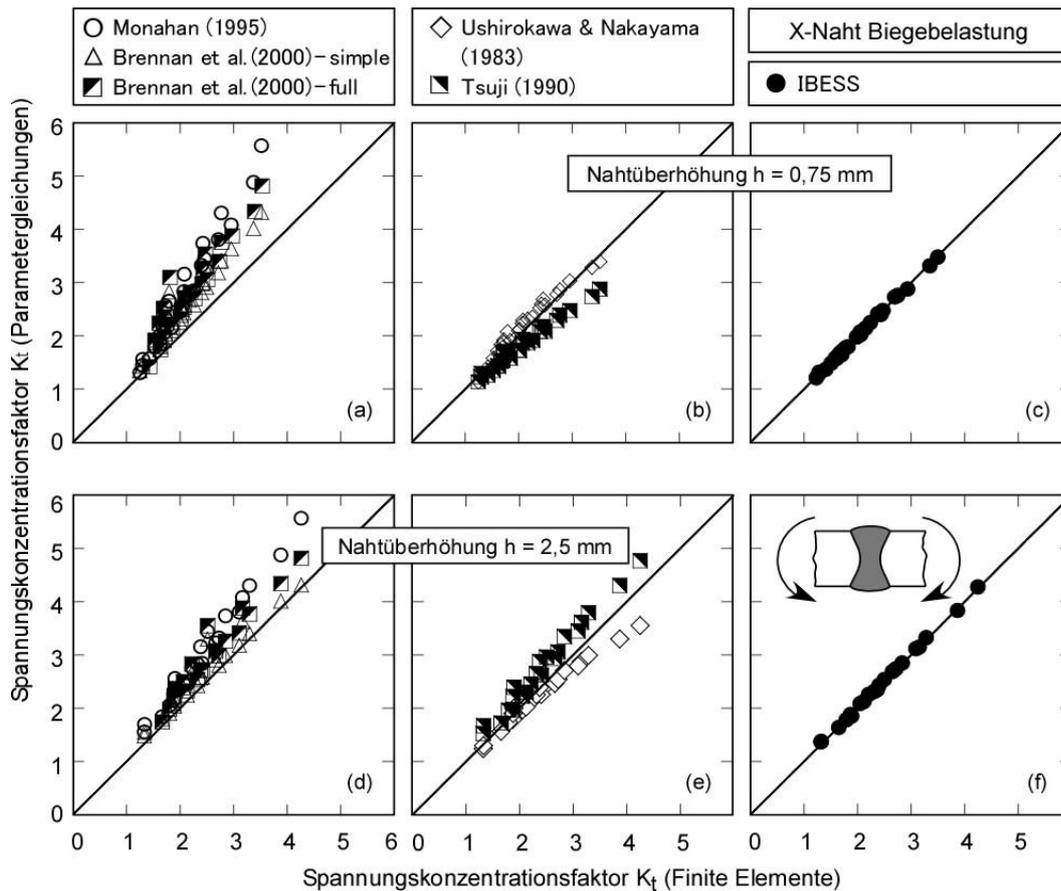


Bild A.3.2: Vergleich des Spannungskonzentrationsfaktors nach Gl. (28ff) mit den zugrundeliegenden FEM-Daten und mit Gleichungen aus der Literatur; X-Naht, Biegebelastung.

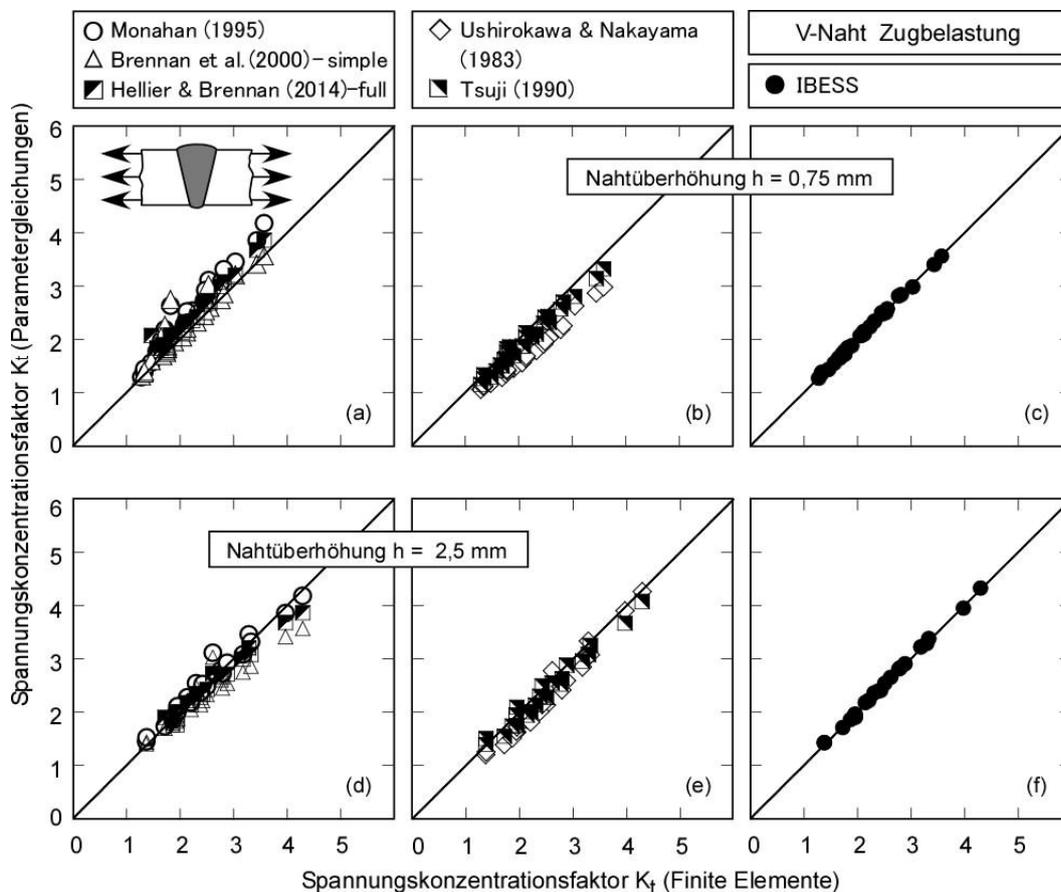


Bild A.3.3: Vergleich des Spannungskonzentrationsfaktors nach Gl. (28ff) mit den zugrundeliegenden FEM-Daten und mit Gleichungen aus der Literatur; V-Naht, Zugbelastung.

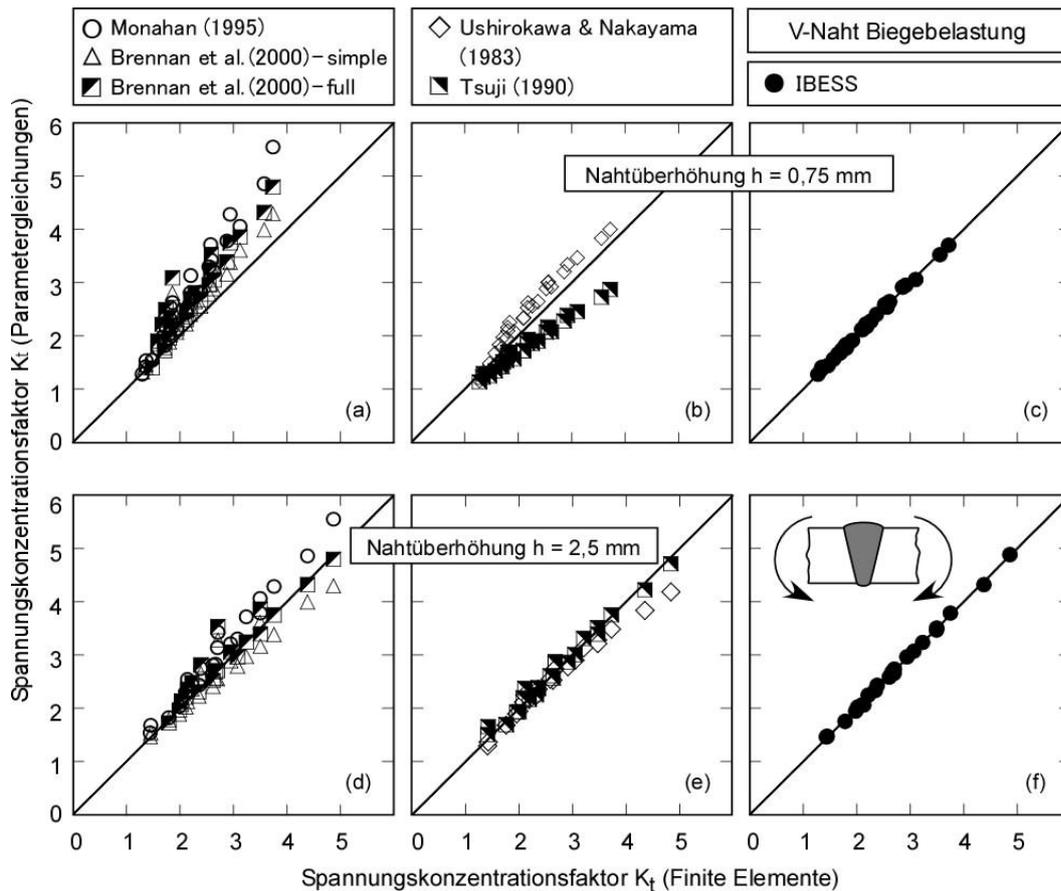


Bild A.3.4: Vergleich des Spannungskonzentrationsfaktors nach Gl. (28ff) mit den zugrundeliegenden FEM-Daten und mit Gleichungen aus der Literatur; V-Naht, Biegebelastung.

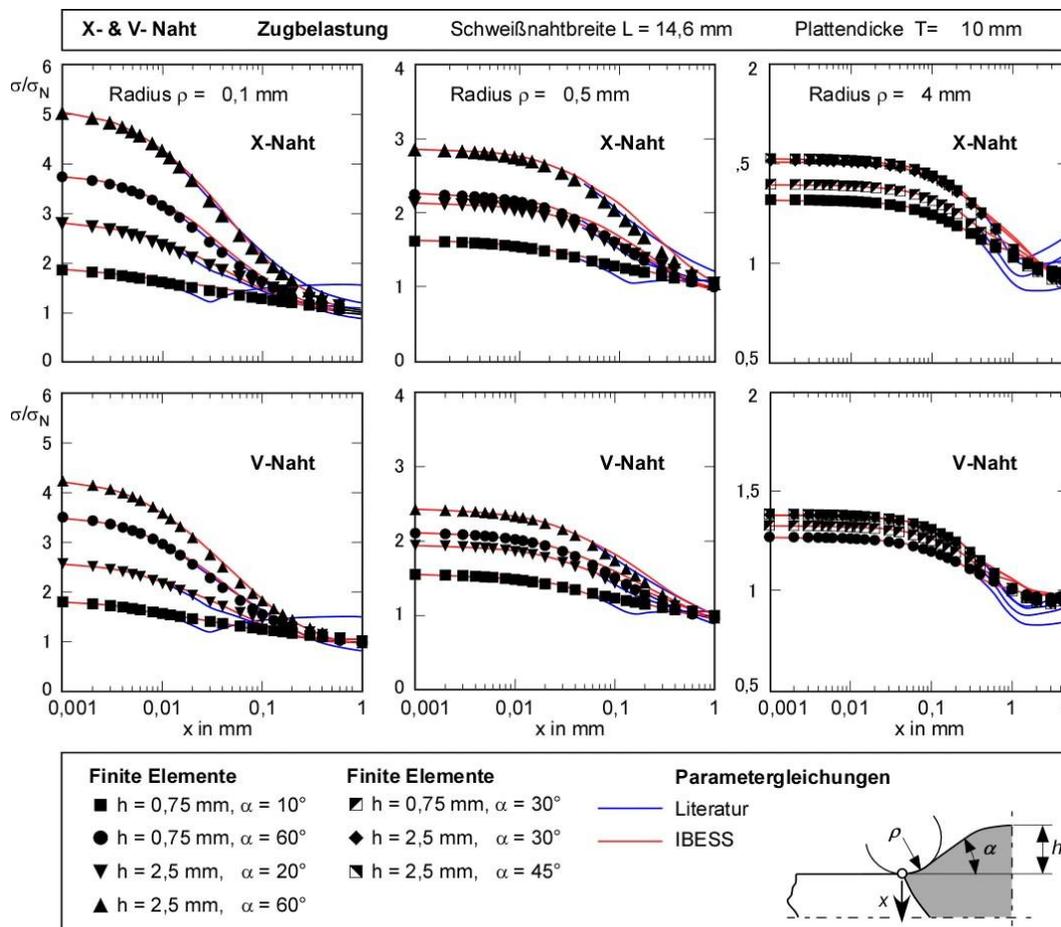


Bild A.3.5: Vergleich des Spannungs-Tiefen-Profiles nach Gl. (32) mit den zugrundeliegenden FEM-Daten und mit dem Literaturansatz nach [A3.1]; X- und V-Naht, Zugbelastung.

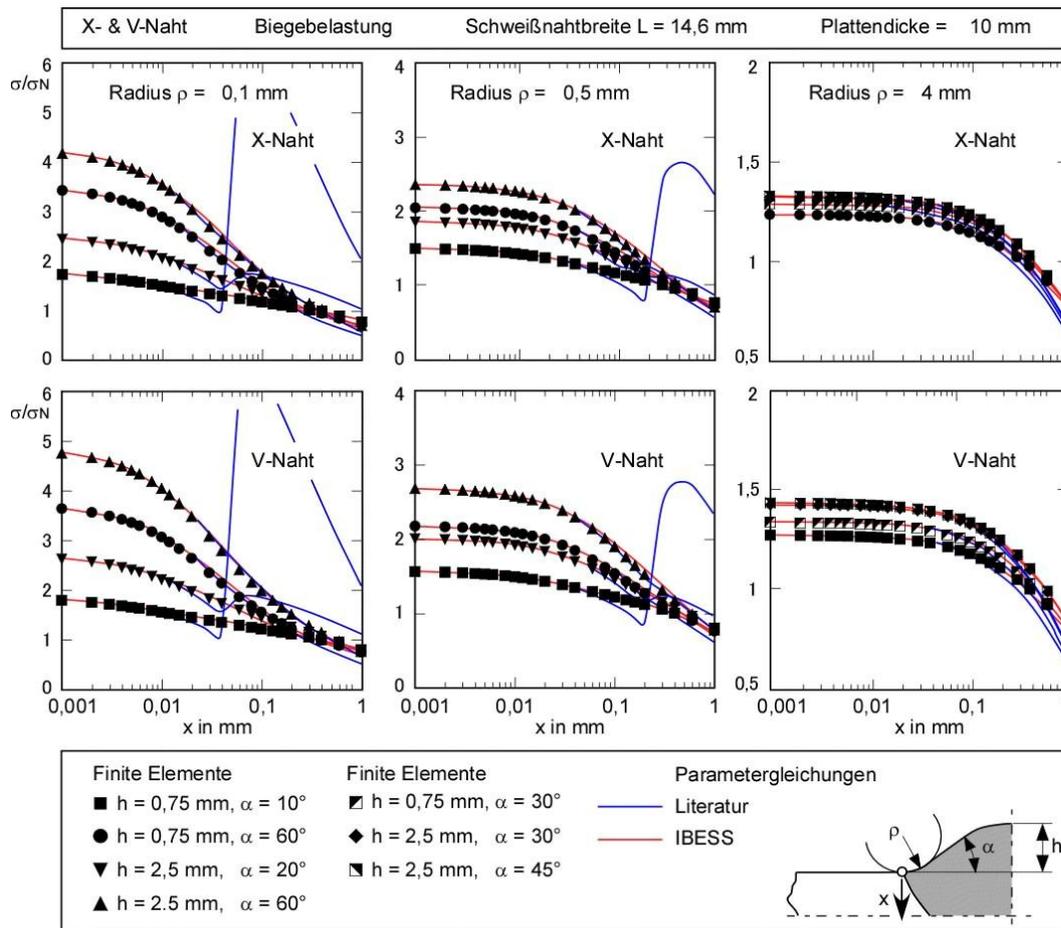


Bild A.3.5: Vergleich des Spannungs-Tiefen-Profils nach Gl. (32) mit den zugrundeliegenden FEM-Daten und mit dem Literaturansatz nach [A3.1]; X- und V-Naht, Biegebelastung.

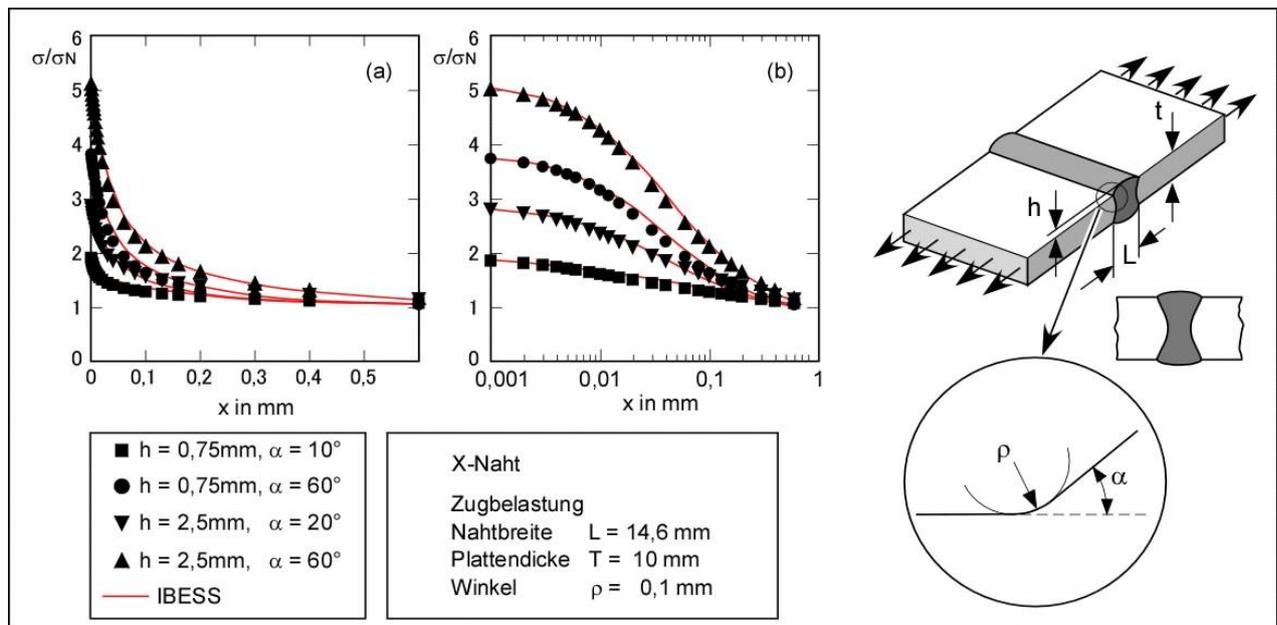


Bild A3. 7: Gegenüberstellung des Spannungs-Tiefenprofils von Bild A.3.5 in linearer und doppelt-logarithmischer Auftragung.

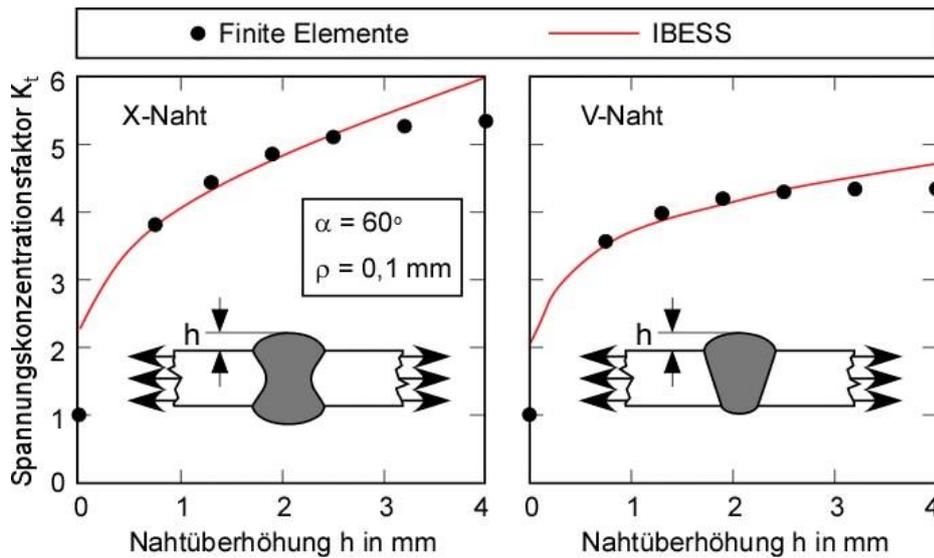


Bild A3.8:

Abgrenzung des Gültigkeitsbereiches von Gl. (32) hinsichtlich der Nahtüberhöhung h .

Die zum Vergleich herangezogenen Literaturgleichungen finden sich in folgenden Quellen:

(a) Spannungskonzentrationsfaktor K_t :

[A3.1] Monahan, C. C. (1995): Early fatigue crack growth at welds. In: Brebbia, C.A. und Connor, J.J. (Hrsg.): Topics in Engineering, Vol. 26, Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 1212-116.

[A3.2] Brennan, F.P., Peleties, P. und Hellier, A.K. (2000): Predicting weld toe stress concentration factors for T and skewed T-joint plate connections. Int. J. Fatigue 22, 573-584.

[A3.3] Hellier, A.K., Brennan, F.P. und Carr, D.G. (2014): Weld toe SCF and stress distribution parametric equations for tension (membrane) loading, in Advanced Materials Research, 1525 – 1530, Trans Tech Publications (Aufsatz auf 11th International Fatigue Congress, March 2-7, 2014, Melbourne, Australia).

[A3.4] Ushirokawa, O. und Nakayama, E. (1983): Stress concentration factor at welded Joints. Ishikawajima-Harima Gihou). 23 (4), auf japanisch, zit in [A3.6].

[A3.5] Tsuji, I. (1990): Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joints. West Japan Society of Naval Architecture 80 (1990), p. 241-251, auf japanisch, zit in [A3.6].

[A3.6] Iida, K. und Uemura, T. (1996): Stress concentration factor formulae widely used in Japan. Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct. 19 (1996), 779-786.

(b) Spannungs-Tiefen-Profil:

[A3.1] basierend auf

[A3.7] Niu, X. and Glinka, G. (1987): The weld profile effect on stress intensity factors in weldments. Int. J. Fracture 35, 3-20.

Anlage: Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis

Für das IBESS-Teilprojekt wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter für 36 Monate und ein technischer Mitarbeiter für 12 Monate finanziert. Die Projektkoordinierung wurde überwiegend durch den Leiter des Clusters selbst wahrgenommen. Die bewilligten Mittel wurden ausschließlich projektgebunden eingesetzt. Aufwendungen für den PBA wurden in Höhe von € 67.250,- erbracht, was die ursprünglich geplante Summe um € 19.250 übersteigt. Das hat seine Ursache in einem überwiegend regen Interesse an den IBESS-Sitzungen, auf denen während der Projektlaufzeit auch neue Mitglieder des PBA gewonnen werden konnten. Dass im Gegenzug der ursprünglich geplante Betrag an Dienstleistungen (Beratertätigkeit) um € 8.080,- unterschritten wurde, hat eine pragmatische Ursache. Aus Gründen der Aufwandsoptimierung für unsere PBA-Partner sind wir gegen Ende des Projekts zunehmend dazu übergegangen, deren Beiträge zeitlich an die Projektsitzungen anzubinden, die in der Regel über den offiziellen Tag mit PBA hinaus auf 2,5 Tage ausgedehnt waren. Da die Partner dazu ohnehin angereizt waren, haben wir ihren Aufwand nicht gesondert in Rechnung gestellt. Geräte mit einem Beschaffungswert über € 2.500,- wurden nicht erworben.

Es ist nicht trivial, die Zuwendungen mit den erzielten Ergebnissen gegenzurechnen. Wir möchten jedoch darauf hinweisen, dass Teilprojekt A3 mit geringfügigen Abstrichen nicht nur die geplanten Leistungen erbracht hat, sondern in Gestalt der ungeplanten Option zur statistischen Ermittlung der für 10^7 Lastspiele oder vorherigen Rissarrest definierten Dauerfestigkeit deutlich darüber hinaus gegangen ist. Die Abstriche betreffen die Versuche mit künstlichen Anrissen. Diese wurden durchgeführt und auch ausgewertet. Es stellte sich dann aber heraus, dass der Nutzen der bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ durchgeführten Versuche für die Validierung aufgrund des unerwarteten Musters der Umlagerung der Eigenspannungen unter zyklischer Belastung bei $R = 0$ nur von sehr begrenztem Wert war. Als sehr viel höherwertige Alternative bot sich die Auswertung von bei $R = -1$ geprüften Schweißverbindungen mit natürlichen, durch Anlassglühen sichtbar gemachten Mehrfachrissen an. Diese Option wurde erfolgreich weiterverfolgt.

Anlage: Ergebnistransfer

Für das IBESS-Cluster war ein gemeinsamer projektbegleitender Ausschuss (PBA) eingerichtet worden, der zweimal jährlich tagte. Termine und Orte waren:

- ◆ 08.05.2012, Braunschweig (Auftaktsitzung)
- ◆ 06.12.2012, Freiburg
(gemeinsam mit dem TC1 der European Structural Integrity Society (ESIS))
- ◆ 13.06.2013, Aachen
- ◆ 26.11.2013, Berlin
(gemeinsam mit der DVS-AG Q1.2 – Bruchmechanik an Schweißverbindungen)
- ◆ 06.05.2014, Hamburg
- ◆ 09.12.2014, Freiburg
- ◆ 19.05.2015, Berlin
- ◆ 02.12.2015, Berlin (Abschlusssitzung)

Hinzu kamen regelmäßige Vorträge auf den Sitzungen des AK 25 der FAT (19.09.2012, 20.02.2013, 25.09.2013, 12.03.2014, 24.09.2014, 23.09.2015 und 24.02.2016) sowie des Betreuerkreises des AK 25 der FAT (23.01.2013, 22.01.2014, 26.08.2015).

Darüber hinaus wurde das Projekt auf verschiedenen Veranstaltungen vorgestellt und diskutiert. Folgende Vorträge wurden unter Beteiligung des vorliegenden Teilprojekts gehalten:

- ◆ Zerbst, U., Eufinger, J., Bruder, T. und Madia, M. (2012): Bruchmechanisches Modell zur Ermittlung der Schwingfestigkeit von geschweißten und nichtgeschweißten Proben. DVM-Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, Paderborn; 10.-11.10. 2012; DVM-Bericht 139, 245-261.
- ◆ Zerbst, U. (2012): Fracture mechanics based determination of fatigue strength of weldments. ESIS-Sitzung Mailand, Italien, 28.03.2012.
- ◆ Zerbst, U. und Madia, M. (2013): IBESS – ein DFG/AiF-Clusterprojekt. DVM-AK Bruchvorgänge, Berlin, 19.-20.02. 2013.
- ◆ Zerbst, U. (2013): DFG/AiF-Cluster IBESS. Fortschrittsbericht. Sitzung des DVS FA9, Braunschweig, 25.04.2013.
- ◆ Madia, M., Zerbst, U. und Beier, H.Th. (2014): Die bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit in technischen Legierungen mit mikroskopischen Ausgangsdefekten. DVM-AK Bruchvorgänge, Kassel, 11.-12.02., DVM-Bericht 246, 113-126.
- ◆ Madia, M. und Zerbst, U. (2014): Application of the cyclic R-curve method in notch fatigue analysis. 20th European Conf. on Fracture (ECF 20), 30.06.-04.07.2014, Trondheim, Norwegen.
- ◆ Zerbst, U., Madia, M. und Beier, H.Th. (2014): Model for fracture mechanics based prediction of the fatigue strength of engineering alloys containing microscopical initial defects. 4th Symp. on Structural Durability (SoSDiD), Darmstadt, 14.-15.05.2014.
- ◆ Zerbst, U., Madia, M. und Beier, H.Th. (2014): Model for fracture mechanics based prediction of the fatigue strength of engineering alloys containing microscopical initial defects. 2nd. Int. Symp. on Fatigue Design and Material Defects. Paris, 11.-13.06.2014.
- ◆ Zerbst, U. (2015): DFG/AiF-Cluster IBESS, Analytisches Modell. Sitzung der DVS AG Q1/Q1.2, Düsseldorf, 08.06.2015
- ◆ Zerbst, U., Beier, H.Th. und Nitschke-Pagel, T. (2015): IBESS: Integrale Bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen - Eine Einführung. DVS-Congress, Nürnberg, 14.-17.09.2015. Tagungsband, 265-270.
- ◆ Schork, B., Zerbst, U., Kucharczyk, P., Bernhard, J., Kaffenberger, M., Baumgartner, J. und Oechsner, M. (2015): Imperfektionen für die schwingbruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen. DVS-Congress, Nürnberg, 14.-17.09.2015. Tagungsband, 271-276.
- ◆ Madia, M., Zerbst, U., Beier, H.Th. und Schöne, D. (2015): Analytische Beschreibung von Rissarrest, Kurz- und Langrisswachstum in Schweißverbindungen. DVS-Congress, Nürnberg, 14.-17.09.2015. Tagungsband, 300-305.
- ◆ Bernhard, J., Madia, M., Schork, B., Kucharczyk, P. Tchoffo Ngoula, D., Baumgartner, J. und Schöne, D. (2015): Integrale bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen: Validierung an Stumpfstoßen und Kreuzstoßen. DVS-Congress, Nürnberg, 14.-17.09.2015. Tagungsband, 306-309.

- ◆ Tchuindjang, D., Madia, M., Fricke, W. und Hensel, J. (2015): Integrale bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen: Validierung an Längssteifen DVS-Congress, Nürnberg, 14.-17.09.2015. Tagungsband, 310-315.
- ◆ Zerbst, U., Madia, M. und Hübner, P. (2015): Fracture mechanics assessment of welded structures. Method for S-N curve determination. Int. Symp. on Recent Trends in Fracture and Damage Mechanics, Freiburg, 24.09.2015.
- ◆ Madia, M. und Zerbst, U. (2015): Bruchmechanische Bestimmung der Schwingfestigkeit basierend auf der zyklischen R-Kurve. DVS-Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, Dresden; 07.-08.10. 2015; DVM-Bericht 142, 285-296.
- ◆ Zerbst, U. und Madia, M. (2016): Fracture mechanics based determination of the fatigue strength of weldments. XV Portugese Conf. on Fracture, Paco de Arcos, 10.-12.02.2016.
- ◆ Madia, M., Schork, B., Kiyak, Y. und Zerbst, U. (2016): Ermittlung der Wöhlerkurve von Schweißverbindungen mittels bruchmechanischer Methoden. DVM-AK Bruchvorgänge, Freiburg, 16.-17.02.2015.

Für 2016 wurden weitere Vorträge angemeldet bzw. sind bereits bestätigt, u.a. zur 69. Jahrestagung des *International Institute of Welding (IIW)* in Melbourne vom 10.-15.06.2016 und zum DVM-AK Betriebsfestigkeit in Steyr vom 12.-13.10.2016.

In zeitlichem Abstand ist für 2016 auch eine zusätzliche mehrtägige IBESS-Sitzung mit PBA und erweitertem Teilnehmerkreis geplant. Voraussichtlicher Termin ist Sommer bis Herbst, voraussichtlicher Ort Berlin.

Zu IBESS oder in seinem unmittelbaren Umfeld wurden verschiedene Aufsätze publiziert:

- ◆ Zerbst, U., Ainsworth, R.A., Beier, H.Th., Pisarski, H., Zhang, Z.L., Nikbin, K., Nitschke-Pagel, T., Münstermann, S. Kucharczyk, P. und Klingbeil, D. (2014): Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective. Engng. Fracture Mech. 132, 200-276.
- ◆ Madia, M., Zerbst, U. und Beier, H.Th. (2014): A model for the determination of the fatigue life in technical alloys containing large and small defects. Proc. Mat. Sci. 3, 493-498.
- ◆ Madia, M. und Zerbst, U. (2014): Application of the cyclic R-curve method to notch fatigue analysis. Int. J. Fatigue 82, 71-79.
- ◆ Zerbst, U. und Madia, M. (2014): Fracture mechanics assessment of the fatigue strength. approach for the determination of the initial crack size. Fatigue Fracture Engng. Mat. Struct. 38, 1066-1075.
- ◆ Zerbst, U., Vormwald, M., Pippan, R., Gänser, H.-P., Sarazin-Baudoux, C. und Madia, M. (2016): About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion – a review. Engng. Fracture Mech. 153, 190-243.
- ◆ Zerbst, U., Madia, M. und Schork, B. (2016): Fracture mechanics based determination of the fatigue strength of weldments. Eingereicht bei Struct. Int. Proc.
- ◆ Kiyak, Y., Madia, M. und Zerbst, U. (2016): Extended parameter equations for weld toe stress concentration factor and stress distribution in butt welded plates subjected to tension and bending loading. Einreichung demnächst.

Für 2016 sind weitere Publikationen in Arbeit bzw. geplant. Vorgesehen ist auch ein umfassender Beitrag über die IBESS-Methode nach Möglichkeit als Sonderheft einer renommierten wissenschaftlichen Zeitschrift.

Perspektivisch ist die Einbringung des erarbeiteten Wissens in Merkblätter und Vorschriften (DVS, FKM) vorgesehen. Das erfordert aber zunächst die Erweiterung des Anwenderkreises und weitere Validierungsaktivitäten, um die allgemeine Akzeptanz der Methodik herzustellen.

Die Einbringung in Lehre und Ausbildung erfolgt im Rahmen von Vorlesungen (FH Flensburg, Univ. Darmstadt, etc.), v.a. aber im Rahmen von Weiterbildungsveranstaltungen für Ingenieure und Wissenschaftler. Einen Rahmen bieten die vom Leiter des IBESS-Clusters organisierten Arbeitsgruppen des Deutschen Verbandes für Schweiß- und Fügetechnik (DVS, AGQ1.2) und der European Structural Integrity Society (ESIS TC1). Eine größere Aktivität wird 2016 die bereits erwähnte mehrtägige IBESS-Sitzung mit PBA und erweitertem Teilnehmerkreis sein. Zu den Mitgliedern des ehemaligen PBA wird der Kontakt weiterhin aufrechterhalten.