

## **Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten und gelöteten Lamellen, Steifen und Anbauteilen**

**Karl Drebenstedt**

**Mitteilungen**



# **Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten und gelöteten Lamellen, Steifen und Anbauteilen**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
**Karl Drebenstedt**  
aus Werneuchen

Hauptberichter: **Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann**  
Mitberichter: **Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann**

Tag der mündlichen Prüfung: **14.07.2022**

Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart

2022

**Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2022-5**

Karl Drebenstedt      Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten und gelöteten  
Lamellen, Steifen und Anbauteilen

Herausgeber            Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann  
Pfaffenwaldring 7  
70569 Stuttgart  
Telefon: 0711/685-66245

Redaktion                M. Sc. Gloria Hofmann

**D93**

©Institut für Konstruktion und Entwurf, Stuttgart 2022  
Alle Rechte vorbehalten.

ISSN 1439-3751

## Kurzdarstellung

Die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen beeinflusst maßgeblich die Lebensdauer von zyklisch beanspruchten Stahlkonstruktionen. Durch Kerbwirkung und daraus resultierenden Spannungskonzentrationen entstehen im Bereich der Schweißnähte Ermüdungsrisse, die zum Versagen einer Konstruktion führen können und folglich in der Bemessung berücksichtigt werden müssen.

Die Lebensdauer, die als Anzahl der Schwingspiele bis zum Versagen dargestellt werden kann, ist abhängig von der zyklischen Beanspruchung und der ihr gegenüberstehenden detailspezifischen Ermüdungsfestigkeit.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die empirisch gestützte Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Anbauteilen, die auf eine zyklisch beanspruchte Stahlkonstruktion aufgeschweißt oder aufgelötet werden, selbst aber keiner direkten Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt sind. Trotz ihrer im Sinne der Lastabtragung häufig untergeordneten Bedeutung werden diese Schweißdetails für die Ermüdungsbemessung regelmäßig bemessungsmaßgebend und bestimmen damit auch die Dimensionierung der Haupttragstruktur. Konkret werden die Ermüdungsfestigkeiten von Lamellen, Längs- und Quersteifen, Schweißbuchsen, Kopfbolzen, Schweißtellern und von ähnlichen Details untersucht.

Zu den genannten Konstruktionsdetails wurden in einer sehr umfangreichen Datenbank über 8.000 Versuchsergebnisse aus veröffentlichten Studien zur Ermüdungsfestigkeit zusammengetragen.

Das Datenbanksystem gewährleistet das gezielte Bearbeiten und Abfragen unterschiedlicher Informationen zu den Ermüdungsversuchen. Dies sind neben den Versuchsergebnissen und der Anzahl der erreichten Schwingspiele unter einer bestimmten zyklischen Beanspruchung Parameter wie technische Materialeigenschaften und geometrische Spezifikationen.

Zusätzlich zu den in der Datenbank gesammelten Versuchsergebnissen wurden eigene Ermüdungsversuche an Konstruktionsdetails durchgeführt. Konkret untersucht wurde unter anderem die traditionelle deutsche Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende. Die vorzugsweise im Brückenbau verbreitete Form des Gurtlamellenendes mit verstärkter Stirnnaht und kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen zeigt deutlich höhere Ermüdungsfestigkeiten als die einfache Variante mit umlaufender Kehlnaht im Schweißzustand.

Ein Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen liegt auf der Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Anbauteilen, die mit dem Kupferlot CuAl7 in einem Lichtbogenlötverfahren auf zyklisch beanspruchte Stahlkonstruktionen aufgelötet werden. In vielen Ermüdungsversuchen wurden das Verhalten und die Ermüdungsfestigkeit dieses alternativen Verfahrens zum Schweißen untersucht. Es kann gezeigt werden, dass die Ermüdungsfestigkeit von lichtbogengelöteten Anbauteilen eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit bei vergleichbarer Versagenscharakteristik und vergleichbarer statischer Beanspruchbarkeit aufweist.

Sowohl die in der Datenbank dokumentierten Versuche als auch die durchgeführten eigenen experimentellen Untersuchungen weisen infolge von unterschiedlichen Einflüssen auf die Ermüdungsversuche eine erhebliche Streuung auf. Für die Bewertung von Einflüssen auf die Lebensdauer und für die Ermittlung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit, die einen statistisch abgesicherten Bemessungswert darstellt, muss diese Streuung berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Verfahren zur statistischen Bewertung und Auswertung von Ermüdungsversuchen vorgestellt, die auf gemeinsamen statistischen Ansätzen beruhen und konform zu normativen Regelungen und Anforderungen im Bauwesen sind. Es kann gezeigt werden, dass die vorgestellte statistische Auswertemethode geeignet ist, zuverlässig statistisch abgesicherte Ermüdungsfestigkeitswerte für einzelne Serien oder für Metaanalysen mit mehreren 1.000 Versuchsergebnissen abzuleiten.

Die eigenen experimentellen Untersuchungen und die Vielzahl der in der Datenbank aufgearbeiteten Versuchsergebnisse ermöglichen in Kombination mit der einheitlichen statistischen Auswertemethode Metastudien.

Unterschiede können sich sowohl auf technische Aspekte beziehen wie Fertigungseinflüsse, Schweißtechnik, mechanische Materialeigenschaften und Versuchsumsetzung, als auch auf Randbedingungen wie beispielsweise die verwendete Prüf- und Messtechnik. Die Bewertung von Ermüdungsfestigkeitswerten für bestimmte Konstruktionsdetails auf Grundlage der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Versuchsdaten ermöglicht damit die Berücksichtigung eines Spektrums von potenziellen Einflussfaktoren auf die charakteristische Ermüdungsfestigkeit.

Die in den Versuchen ermittelten Ermüdungsfestigkeitswerte werden verglichen mit Ergebnissen aus numerischen Untersuchungen mit dem Kerbspannungsmodell. Dafür wurden einige Konstruktionsdetails mit dem Kerbspannungsmodell dreidimensional nach-

gebildet und validiert. Die Modelle eignen sich für Parameterstudien zu strukturmechanischen Einflussgrößen und geben geometrische Einflüsse tendenziell gut wieder. Die Untersuchungen zeigen auch, dass geometrische Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit bei Verwendung des Kerbspannungsmodells überschätzt werden können. Als ursächlich dafür werden Streuungen aus Fertigungseinflüssen vermutet, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Kerbwirkung haben können.

Es wird anhand von vergleichenden Streuspannen für Konstruktionsdetails und Gruppen von Konstruktionsdetails zudem gezeigt, dass das Kerbspannungskonzept im Vergleich zum Nennspannungskonzept im Sinne der Bemessung nicht das genauere Verfahren zur Ermüdungsbemessung von Anbauteilen darstellt.

Auf Grundlage der Untersuchungen und Erkenntnisse werden am Ende dieser Arbeit konkrete Bemessungsvorschläge für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit mit dem Nennspannungskonzept für geschweißte und gelötete Anbauteile wie Lamellen, Längs- und Quersteifen, Schweißbuchsen, Kopfbolzen und Schweißsteller gegeben.





## Abstract

The fatigue strength of welded structures has a significant influence on the fatigue life of steel structures subjected to repeated loadings. Stress concentrations due to notch effects are leading to fatigue cracks and fatigue failure in the area of the weld and must therefore be taken into account for design of steel structures. The fatigue life, which can be represented as the number of cycles until failure, depends on the repeated loading and the detail-specific fatigue strength.

This work is supposed to give an empirically based evaluation of the fatigue strength of attachments, which are welded or brazed on a fatigue loaded steel structure. Due to the notch effect, welded and brazed attachments are decisive for the design of the steel structure in many cases. In detail, the fatigue strengths of attachments like lamellas, longitudinal and transverse stiffeners, welded studs, headed studs, plates and similar details are examined.

For those details over 8000 test results from published studies on fatigue strength have been compiled in an extensive database. The organized collection of data ensures that information about the fatigue tests can easily be processed and assessed. In addition to tests results like the number of cycles until failure, there is the possibility to capture a wide variety of test parameters such as material properties and geometric specifications.

In addition to the test results in the database, own fatigue tests were carried out on constructional details with insufficient experimental background. A special variant of the construction detail of the transverse end weld of lamellae joint was examined among others. In Germany, the detail is traditionally produced with thick welds and smooth transition at the weld toes. The fatigue tests show that the fatigue strength of this detail is significantly higher than the simpler "as welded" version.

Another focus of the experimental investigations is the evaluation of the fatigue strength of attachments, which are connected by arc brazing with the copper alloy CuAl7 to a steel structure subjected to repeated loadings. The fatigue characteristic and the fatigue strength of this alternative method of welding were examined in a large number of fatigue tests. It can be shown that the fatigue strength of arc-brazed attachments have a significantly higher fatigue strength, with comparable failure characteristics and comparable static load bearing capacities.

Both, the tests results documented in the database and the own experimental investigations show an unavoidable random scatter due to variations in parameters that are

influencing the fatigue life. Even under identical test conditions this scatter is largely unavoidable. This scatter must be taken into account for the evaluation of fatigue test data. Within the scope of this work, methods for the statistical evaluation of fatigue tests data are presented that are based on common statistical approaches and also meet the formal requirements of normative standards for structural design.

It can be shown that the statistical evaluation method is suitable for deriving characteristic fatigue strengths on the basis of single test series and of large amounts of data with several thousand test results from different sources.

The own experimental investigations and the large number of test results documented in the database with the uniform statistical evaluation method in the background enable meta-analysis for evaluation of test results on a specific detail with a wide variety of test conditions.

The variants can relate to technical aspects such as fabrication influences, welding technique, mechanical material properties and test setup, as well as to circumstances such as the testing and measuring technology used. The evaluation of fatigue tests data for certain constructional details on the basis of the large number of available test data enables the consideration of a certain range of potential influencing factors on the characteristic fatigue strength.

The findings based on empirical data are compared with results from numerical investigations with the effective notch stress approach. For this purpose, some construction details were modelled and validated in a three dimensionally notch stress model. The models are suitable for parameter studies on structural mechanical influencing variables tend to reflect geometric influences well. However, the investigations also show that the influence of geometric parameters can be overestimated with the notch stress model. It is assumed that scatter from manufacturing influences, particularly the local geometry of the weld toe and the weld roots have a significant influence on the notch stress but could not always be modeled realistically with the effective notch stress approach.

Using comparative scatters for construction details and groups of construction details, it is also shown that the effective notch stress approach does not represent the more precise method compared to the nominal stress concept in terms of design for welded attachments.

Based on the investigations and findings, recommendations for the fatigue design of welded and brazed attachments such as lamellas, longitudinal and transvers stiffeners, welded studs, headed studs and similar details are made at the end of this thesis.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart entstanden.

Frau Professorin Dr.-Ing Ulrike Kuhlmann vom Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart danke ich sehr herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen sowie für die vollumfängliche Unterstützung während meiner Zeit am Institut und bei der Anfertigung der Arbeit.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing Markus Feldmann, Institutsleiter und Inhaber des Lehrstuhls für Stahlbau an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, für die Zusammenarbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen Projektpartnerinnen und Projektpartnern Frau Helen Bartsch von der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, Herrn Benjamin Seyfried und Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummerhofer vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie Herrn Dr.-Ing Andreas Gericke vom Fraunhofer Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) für die konstruktive und sehr kollegiale Zusammenarbeit.

Meinen persönlichen Dank aussprechen möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Mathias Euler für die Ideen und Anregungen sowie die fachliche Unterstützung während meiner Zeit am Institut für Konstruktion und Entwurf.

Danken möchte ich auch der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), dem Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DAST) sowie der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) für die finanzielle Unterstützung der experimentellen und theoretischen Untersuchungen.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kollegen, den wissenschaftlichen Hilfskräften des Instituts für Konstruktion und Entwurf sowie den Verfassern der von mir betreuten Abschlussarbeiten für die gute Zusammenarbeit.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau und meinen Eltern für die Unterstützung.

Werneuchen, im November 2022



## Inhaltsverzeichnis

<b>KURZDARSTELLUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>VORWORT</b> .....	<b>IX</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>XI</b>
<b>BEZEICHNUNGEN</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1 GEGENSTAND UND AUFBAU DER ARBEIT</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bedeutung der Ermüdungsfestigkeit von Anbauteilen für Tragwerke aus Stahl.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 MATERIALERMÜDUNG</b> .....	<b>5</b>
2.1 Überblick.....	5
2.2 Rissentstehung, Risswachstum und Lebensdauer.....	5
2.3 Ermüdungsbeanspruchung.....	7
2.3.1 Spannungen & Spannungskollektive.....	7
2.3.2 R-Verhältnis, Mittelspannungen und Eigenspannungen.....	8
2.3.3 Weitere potenzielle Einflussfaktoren aus der Beanspruchung.....	10
2.4 Ermüdungsfestigkeit.....	11
2.4.1 Geometrische Kerben.....	11
2.4.2 Metallurgische Kerbe.....	13
2.4.3 Größeneffekte.....	14
2.4.4 Trägerversuche & Kleinversuche.....	19
2.4.5 Streckgrenze und Zugfestigkeit.....	20
2.4.6 Schweißverfahren.....	20
2.5 Empirische Ermittlung von Ermüdungsfestigkeiten.....	20
2.5.1 Übersicht.....	20
2.5.2 Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit.....	21
2.6 Ermüdungsnachweis mit dem Nennspannungskonzept.....	22
2.7 Weitere Konzepte der Ermüdungsfestigkeit für geschweißte Konstruktionen.....	23

2.8	Erreichen verbesserter Ermüdungseigenschaften durch Lichtbogenlötten als Alternative zum Schweißen .....	25
2.8.1	Übersicht.....	25
2.8.2	Prozessbeschreibung .....	26
2.8.3	Normung.....	26
2.8.4	Statische Beanspruchbarkeit.....	27
<b>3</b>	<b>DATENBANK FÜR ERMÜDUNGSVERSUCHE AN GESCHWEIßTEN KONSTRUKTIONSDetails .....</b>	<b>29</b>
3.1	Übersicht.....	29
3.2	Dokumentierte Versuchsparameter.....	29
3.3	Übersicht zu aufgeschweißten Steifen, Lamellen und kleinen Aufschweißteilen .....	30
<b>4</b>	<b>STATISTISCHE AUSWERTEMETHODEN .....</b>	<b>31</b>
4.1	Einleitung .....	31
4.2	Normative Anforderungen des Eurocode .....	31
4.3	Widerstandsmodell .....	32
4.4	Lineare Regression .....	33
4.5	Verteilungsfunktion .....	34
4.6	Ermittlung charakteristischer Wöhlerlinien .....	36
4.7	Ermittlung charakteristischer Wöhlerlinien mit unbekannter Neigung.....	38
4.8	Statistische Methoden zur Untersuchung von Einflüssen auf die Ermüdungsfestigkeit .....	40
4.8.1	Übersicht.....	40
4.8.2	Vergleich von Regressionsgeraden.....	40
4.8.3	Vergleich von normierten Versuchsdaten.....	41
<b>5</b>	<b>SYSTEMATISCHE AUSWERTUNG BESTEHENDER VERSUCHSREIHEN ZU GESCHWEIßTEN KONSTRUKTIONSDetails .....</b>	<b>43</b>
5.1	Übersicht und Herangehensweise.....	43
5.2	Längssteifen .....	44
5.2.1	Übersicht.....	44
5.2.2	Schweißnahtnachbehandlung durch Schleifen der Nahtübergänge .....	45
5.2.3	Steifenendgeometrie.....	46
5.2.4	Steifenlänge.....	47



5.2.5	Blechdicke .....	48
5.2.6	Bauteilversuche und Kleinversuche .....	48
5.2.7	Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit .....	49
5.3	Knotenbleche am Blechrand .....	50
5.3.1	Übersicht.....	50
5.3.2	Steifenendgeometrie.....	50
5.3.3	Schweißnahtnachbehandlung durch Schleifen der Nahtübergänge .....	51
5.3.4	Bauteilversuche und Kleinversuche .....	52
5.3.5	Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit .....	53
5.4	Quersteifen .....	53
5.4.1	Übersicht.....	53
5.4.2	Größeneinflüsse .....	54
5.4.3	Bauteilversuche und Kleinversuche .....	54
5.4.4	Freischnitt in Trägerversuchen .....	56
5.4.5	Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit .....	57
5.5	Lamellen .....	57
5.5.1	Übersicht.....	57
5.5.2	Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit .....	58
5.6	Kleine Aufschweißteile .....	59
5.6.1	Übersicht.....	59
5.6.2	Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit .....	60
5.7	Bewertung der Streuung aufgeschweißter Anbauteile .....	60
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>65</b>
6.1	Übersicht.....	65
6.2	Prüfmaschinen.....	65
6.3	Versuchsdurchführung und Messtechnik .....	65
6.4	Experimentelle Untersuchungen am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende .....	67
6.4.1	Übersicht.....	67
6.4.2	Versuchsserien und Geometrie .....	68
6.4.3	Herstellung der Prüfkörper .....	70
6.4.4	Versuchsergebnisse .....	72
6.4.5	Fertigungseinflüsse durch Nachbearbeitung und Restkerben .....	73

6.4.6	Analyse von Makroschliffen.....	73
6.4.7	Analyse des Blechdickeneinflusses.....	74
6.4.8	Ableitung eines charakteristischen Bemessungswertes .....	75
6.4.9	Bewertung und Schlussfolgerung.....	75
6.5	Experimentelle Untersuchungen an Buchsen und Blechtellern .....	76
6.5.1	Übersicht.....	76
6.5.2	Versuchsserien und Geometrie .....	77
6.5.3	Herstellung der Prüfkörper .....	77
6.5.4	Versuchsergebnisse .....	77
6.5.5	Fertigungseinflüsse.....	80
6.5.6	Versagenscharakteristik .....	81
6.5.7	Untersuchung der Neigung der Wöhlerlinie .....	82
6.5.8	Untersuchung der Länge des aufgelöteten Bauteils in Lastrichtung .....	83
6.5.9	Untersuchung des Blechdickeneinflusses.....	83
6.5.10	Ableitung eines charakteristischen Bemessungswerts für lichtbogengelötete Aufschweißteile .....	83
6.5.11	Bewertung und Schlussfolgerung.....	85
6.6	Zusammenfassung .....	85
<b>7</b>	<b>NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>87</b>
7.1	Modellbildung.....	87
7.2	Kerbmodellierung.....	87
7.3	Vernetzung .....	89
7.4	Validierung.....	90
7.5	Modellauswertung.....	91
7.6	Parameterstudien zu Gurtlamellenenden.....	91
7.6.1	Übersicht.....	91
7.6.2	Einfluss der Endgeometrie .....	92
7.6.3	Einfluss der Schweißnahtdicke und der Anfasung .....	92
7.6.4	Blechdickeneinfluss .....	94
7.6.5	Bauteileinfluss.....	94
7.6.6	Fazit .....	95
7.7	Kerbspannungsfaktoren für geschweißte und gelötete Buchsen und Teller.....	95

<b>8</b>	<b>KERBFALLVORSCHLÄGE FÜR GESCHWEIßTE UND GELÖTETE LAMELLEN, STEIFEN UND ANBAUTEILE .....</b>	<b>97</b>
8.1	Übersicht.....	97
8.2	Kerbfallempfehlungen für Details im Schweißzustand .....	97
8.2.1	Längssteife .....	97
8.2.2	Knotenbleche am Blechrand .....	100
8.2.3	Quersteife .....	101
8.2.4	Lamelle .....	102
8.2.5	Kleine Aufschweißteile.....	103
8.3	Kerbfallbewertung für Details, die durch Schleifen nachbehandelt wurden .....	104
8.3.1	Längssteife, durch Schleifen nachbearbeitet .....	104
8.3.2	Knotenbleche am Blechrand, durch Schleifen nachbearbeitet .....	106
8.3.3	Lamelle, durch Schleifen nachbearbeitet .....	107
8.4	Kerbfallbewertung für gelötete Details .....	108
8.4.1	Aufgelötete Lamellen und Teller .....	108
8.4.2	Aufgelötete Buchsen.....	109
8.5	Bewertung des Nennspannungskonzepts im Vergleich zum Kerbspannungskonzept in Bezug auf aufgeschweißte Lamellen, Steifen und Anbauteile .....	110
8.6	Schlussfolgerung .....	114
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>115</b>
<b>10</b>	<b>AUSBLICK.....</b>	<b>119</b>
<b>11</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>120</b>
11.1	Normen, Regelwerke und Richtlinien .....	120
11.2	Literatur zur Ermüdungsfestigkeit.....	121
11.3	Sonstige Literatur.....	132
	<b>ANHANG A – RECHENBEISPIEL STATISTISCHE AUSWERTUNG .....</b>	<b>134</b>
	<b>ANHANG B - VERSUCHSERGEBNISSE.....</b>	<b>136</b>

## Bezeichnungen

### Lateinische Buchstaben

$A$ .....	Querschnittsfläche
$a$ .....	Kehlnahtdicke
$E$ .....	Elastizitätsmodul
$f_y$ .....	Streckgrenze
$I$ .....	Flächenträgheitsmoment
$\log$ .....	dekadischer Logarithmus
$M_y$ .....	Biegemoment
$m$ .....	Neigung der WÖHLERlinie
$n$ .....	Anzahl der bisher ertragenen Schwingspiele
$N$ .....	Anzahl der ertragbaren Schwingspiele
$R$ .....	Spannungsverhältnis
$S$ .....	Spannungsschwingbreite der Nennspannung
$S_c$ .....	Referenzwert der Spannungsschwingbreite
$r$ .....	fiktiver Kerbkrümmungsradius
$s$ .....	Standardabweichung
$x, y, z$ .....	Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem

### Griechische Buchstaben

$\gamma_{Fi}, \gamma_{Mf}$ .....	Teilsicherheitsbeiwerte
$\Delta\sigma$ .....	Spannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_c$ .....	Referenzwert der charakteristischen Ermüdungsfestigkeit bei $N = 2 \cdot 10^6$
$\rho$ .....	fiktiver Kerbausrundungsradius nach NEUBER
$\sigma, \tau$ .....	Normalspannung, Schubspannung
$\sigma_a$ .....	Spannungsamplitude
$\sigma_u$ .....	Unterspannung
$\sigma_o$ .....	Oberspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ .....	Koordinatennormalspannungen

**Abkürzungen**

DMS.....Dehnmessstreifen

FE.....Finite Elemente

IIW.....International Institute of Welding



# 1 Gegenstand und Aufbau der Arbeit

## 1.1 Bedeutung der Ermüdungsfestigkeit von Anbauteilen für Tragwerke aus Stahl

Stahlkonstruktionen im Bauwesen wie Brücken, Türme für Windenergieanlagen, Maste, Krane und Kranbahnen sind einer schwingenden Beanspruchung (Ermüdungsbeanspruchung) ausgesetzt. In Abhängigkeit der einwirkenden Ermüdungsbeanspruchung müssen Konstruktionsdetails eines Tragwerkes eine Ermüdungsfestigkeit aufweisen, die eine Nutzung über die geplante Lebensdauer ermöglichen. Maßgebend für die Lebensdauer von Stahlkonstruktionen werden regelmäßig geschweißte Konstruktionsdetails, die aufgrund von geometrischer und metallurgischer Kerbwirkung die schwächste Ermüdungsfestigkeit innerhalb der Tragstruktur aufweisen. Aufgeschweißte Bauteile wie Lamellen, Steifen, Buchsen und Bolzen, die auf zyklisch beanspruchte Strukturen aufgeschweißt werden, jedoch selbst vorwiegend statisch belastet werden, sind für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Bedeutung. Beispielsweise werden für die Bemessung von Türmen für Windenergieanlagen regelmäßig Schweißbuchsen maßgebend, die an die Innenseite des Turms geschweißt werden, um innenliegende Sekundärbauteile wie Leitern oder Kabelstränge zu fixieren. Trotz ihrer bezüglich der Tragwirkung untergeordneten Bedeutung muss die Dimensionierung des Stahlturms in Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit der Schweißbuchsen erfolgen.

Für den Entwurf von ermüdungsbeanspruchten Tragwerken aus Stahl mit aufgeschweißten Konstruktionsdetails sollten möglichst kerbarme Details gewählt werden, die eine hohe Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Für die Bemessung muss dabei die charakteristische, d.h. statistisch abgesicherte Ermüdungsfestigkeit bekannt sein. Für viele Schweißdetails wurden in den letzten Jahrzehnten experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die bisher überwiegend einzeln bewertet wurden.

Für eine Reihe von aufgeschweißten Konstruktionsdetails liegen experimentelle Daten bisher nur lückenhaft vor. Dies betrifft Steifen und Lamellen, die für eine verbesserte Ermüdungsfestigkeit in ihrer Endgeometrie angepasst und nachbearbeitet wurden, beispielsweise abgeflachte und nachbearbeitete Längssteifen und Gurtlamellenenden.

Eine bisher wenig untersuchte Möglichkeit, die Ermüdungsfestigkeit von aufgeschweißten Bauteilen zu verbessern, ist das Lichtbogenlöten. Dabei wird der Schweißzusatzwerkstoff durch ein Lot ersetzt. Durch die günstigere metallurgische Kerbwirkung können deutlich höhere Ermüdungsfestigkeiten erreicht werden.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die empirisch gestützte Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Anbauteilen wie Lamellen, Steifen, Buchsen und Bolzen, die auf eine zyklisch beanspruchte Stahlkonstruktion aufgeschweißt oder aufgelötet werden, selbst aber keiner direkten Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt sind.

Die Bewertung soll auf Grundlage empirischer Daten und mithilfe statistischer Auswertung im Rahmen einer Metastudie erfolgen und durch eigene experimentelle Untersuchungen ergänzt werden.

Zur Bewertung geometrischer Einflussgrößen sollen an relevanten Konstruktionsdetails numerische Untersuchungen mit dem Kerbspannungskonzept durchgeführt werden.

Im Ergebnis sollen konkrete, statistisch abgesicherte Kerbfallempfehlungen für die Bemessung von geschweißten und gelöteten Anbauteile wie Lamellen, Steifen, Buchsen und Bolzen nach dem Nennspannungskonzept gegeben werden.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Ermüdungsfestigkeit von aufgeschweißten und aufgelöteten Bauteilen untersucht. Die Erkenntnisse stützen sich auf empirische Daten. Diese werden durch numerische Untersuchungen am FE Modell ergänzt.

In **Kapitel 2** dieser Arbeit wird ein Überblick zum Kenntnisstand des Ermüdungsverhaltens von geschweißten Bauteilen gegeben. Es werden mögliche Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit aufgezeigt. Unter Berücksichtigung der normativen Situation werden zudem unterschiedliche Konzepte zur Bemessung ermüdungsbeanspruchter Kerbdetails erläutert.

In **Kapitel 3** wird eine Datenbank vorgestellt, die im Rahmen des IGF-DASt-FOSTA Projekts 19178 „Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3“ [40] entstanden ist. Insgesamt wurden in der Datenbank etwa 22.000 Ermüdungs-



versuche von den Projektbeteiligten dokumentiert. Davon entfallen etwa 8000 Wöhlerversuche auf aufgeschweißte Bauteile wie Lamellen, Steifen, Buchsen und Bolzen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Neben den eigentlichen Versuchsbedingungen sind zusätzlich viele Randbedingungen dokumentiert, die das Ermüdungsverhalten beeinflussen können.

In **Kapitel 4** werden statistische Ansätze vorgestellt, die zur Bewertung und Auswertung von streuenden Ermüdungsversuchen notwendig sind.

**Kapitel 5** umfasst eine Metastudie zu geschweißten Anbauteilen auf Grundlage der in Kapitel 3 vorgestellten Datenbank und den in Kapitel 4 beschriebenen statistischen Methoden.

In **Kapitel 6** werden eigene Ermüdungsversuche an Konstruktionsdetails beschrieben, zu denen eine empirische Datenbasis bisher nur lückenhaft vorhanden ist. Konkret untersucht wird die traditionelle deutsche Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende, einer im Brückenbau verbreiteten Variante von Lamellenenden mit dicken Endnähten und nachbearbeiteten Nahtübergängen.

Zudem werden Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von gelöteten Anbauteilen vorgestellt.

**Kapitel 7** umfasst Ergebnisse von numerischen Parameterstudien mit dem Kerbspannungskonzept an Lamellenenden. Es wird eine Variante vorgestellt, die es ermöglicht, aufgelötete Details im Kerbspannungsmodell zu untersuchen.

In **Kapitel 8** werden bestehende Nachweisverfahren für die Bemessung von geschweißten Anbauteilen nach dem Nennspannungskonzept diskutiert und unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse überprüft. Das Kapitel umfasst konkrete Kerbfallvorschläge für die Bemessung von geschweißten und gelöteten Anbauteilen wie Lamellen, Steifen und kleinen Aufschweißteilen. Zudem wird das Nennspannungskonzept im Vergleich zum Kerbspannungskonzept bewertet.

In **Kapitel 9** werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und bewertet.

Abschließend wird in **Kapitel 10** ein Ausblick gegeben, in dem ein Weg beschrieben wird, um Kerbspannungsmodelle zu verbessern.



## 2 Materialermüdung

### 2.1 Überblick

Materialermüdung bei Stahlkonstruktionen zeigt sich in der Regel in Form von Ermüdungsbrüchen, die durch eine zyklische Beanspruchung (Ermüdungsbeanspruchung) ausgelöst werden. Die Lebensdauer bezeichnet dabei die bis zum Bruch ertragene Einwirkungszeit ausgedrückt als Zahl der ertragenen Schwingspiele. [69]

Ein Ermüdungsbruch infolge zyklischer Beanspruchung wird ausgelöst durch einen Ermüdungsriss, der sich üblicherweise an Stellen mit hoher Spannungskonzentration ausbildet. Diese Spannungskonzentration entsteht durch geometrische- und im Fall von geschweißten und gelöteten Konstruktionen auch metallurgischer Kerbwirkung.

### 2.2 Rissentstehung, Risswachstum und Lebensdauer

Der Ermüdungsriss entsteht bei geschweißten Konstruktionen üblicherweise am Schweißnahtübergang oder an der Schweißnahtwurzel. Abb. 2-1 zeigt beide Risspositionen am Beispiel einer Kehlnaht.

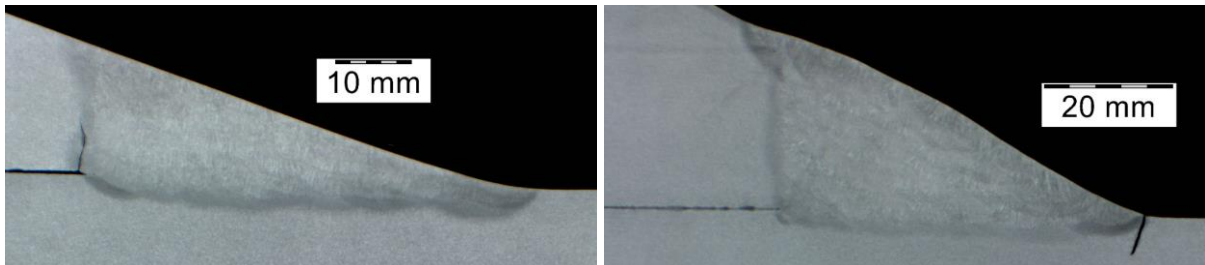


Abb. 2-1: Wurzelriss (links) und Riss am Schweißnahtübergang (rechts) dargestellt an einem Makroschliff

In beiden Fällen führt der im Laufe der Ermüdungsbeanspruchung wachsende Riss schließlich zum Bruch. Die Ermüdungsschädigung lässt sich grob in zwei Phasen unterteilen: Rissbildung und Rissausbreitung [120].

Die **Rissbildung** geht auf lokal begrenzte Abgleitvorgänge in Gleitebenen in der Kristallstruktur des Werkstoffes zurück, die durch lokales Überschreiten der Elastizitätsgrenze ausgelöst werden. Bleibt die zyklische Beanspruchung unter einem kritischen Wert, der nicht ausreichend für eine Aktivierung des Gleitvorgangs ist, so bildet sich kein Ermüdungsriss [120] S. 786. Der Beanspruchungsbereich, in dem kein Risswachstum stattfindet, wird auch als Dauerfestigkeitsbereich bezeichnet, vgl. Kapitel 2.5.2.

Neben der lokalen Spannungskonzentration spielt die Oberflächenrauigkeit eine zentrale Rolle. Durch Abpolieren bzw. Schleifen der Oberfläche kann die Lebensdauer bis zur Rissentstehung stark erhöht werden [120] S. 787. Dieser Einfluss lässt sich auch in experimentellen Untersuchungen an geschweißten Prüfkörpern belegen, beispielsweise an Gurtlamellenenden mit geschliffenen Kerbübergängen, vgl. Kapitel 6.4.

Die **Risswachstumsphase** ist geprägt durch die fortschreitende Bildung von Gleitvorgängen an der Rissspitze. Durch klare Randbedingungen, die durch die Spannung in der Rissumgebung, die Bauteilgeometrie sowie die Größe und die Geometrie des Ermüdungsrisses beschrieben werden können, ist die Risswachstumsphase durch bruchmechanische Modelle (Rissfortschrittskonzept) gut abzubilden. Die Modelle können zur Abschätzung der Restlebensdauer bestehender Konstruktionen angewendet werden [49] und finden Anwendung zur Festlegung von zulässigen Bedingungen zur Vermeidung von Spröbruch [100], S. 1-6.

Der durch Risswachstum immer kleiner werdende Restquerschnitt muss eine immer größer werdende Spannung aufnehmen. Überschreitet die Spannung im Restquerschnitt die Zugfestigkeit des Werkstoffes kommt es zum Gewaltbruch.

In vielen Veröffentlichungen zu Ermüdungsversuchen an geschweißten Konstruktionsdetails werden Ermüdungsrisse in der Regel erst entdeckt und dokumentiert, wenn sie (wie in Abb. 2-1, rechts) makroskopische Ausmaße angenommen haben und auf der Bauteiloberfläche sichtbar sind.

In einigen wenigen Veröffentlichungen werden messtechnische Verfahren angewendet, um bestimmte Kennpunkte der Rissausbreitung definieren zu können. Diese orientieren sich nicht am werkstofflichen Modellen zur Rissentstehung und Rissausbreitung sondern an praktischen und konstruktionsspezifischen Kennpunkten wie dem Wanddurchriss bei Hohlprofilen [97], S. 108.

Ausgehend von Beobachtungen an Versuchskörpern mit aufgeschweißten und aufgelöteten Blechen zeigt sich, dass die Risswachstumsphase abhängig vom Rissentstehungsort und den geometrischen Bedingungen (insbesondere der Blechdicke) einen großen Teil der Lebenszeit eines Bauteils ausmachen kann [38].

Um ein vergleichbares Kriterium für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit aus unterschiedlichen Publikationen heranzuziehen, ist es für Steifen, Lamellen und Aufschweißteile auf Grundlage der bekannten und zugänglichen Veröffentlichungen nur möglich, den Bruch des Prüfkörpers als einheitliches Versagenskriterium zu bewerten. Diesem Ansatz folgend, wird im Rahmen dieser Arbeit die Lebensdauer als Spanne

zwischen der ersten Belastung und dem vollständigen Bruch des Prüfkörpers definiert und umfasst somit die komplette Rissbildungs- und Risswachstumsphase.

Die nicht differenzierte Betrachtung von Rissentstehung und Rissausbreitung ist eine Vereinfachung. So haben beispielsweise Schweißnahtnachbehandlungen wie Schleifen und Hämmern zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit einen zentralen Einfluss auf die Rissentstehung, jedoch eine zu vernachlässigende Bedeutung für die Risswachstumsphase.

## 2.3 Ermüdungsbeanspruchung

### 2.3.1 Spannungen & Spannungskollektive

Die wesentlichen Kenngrößen zur Beschreibung einer zyklischen Beanspruchung sind in Abb. 2-2 dargestellt.

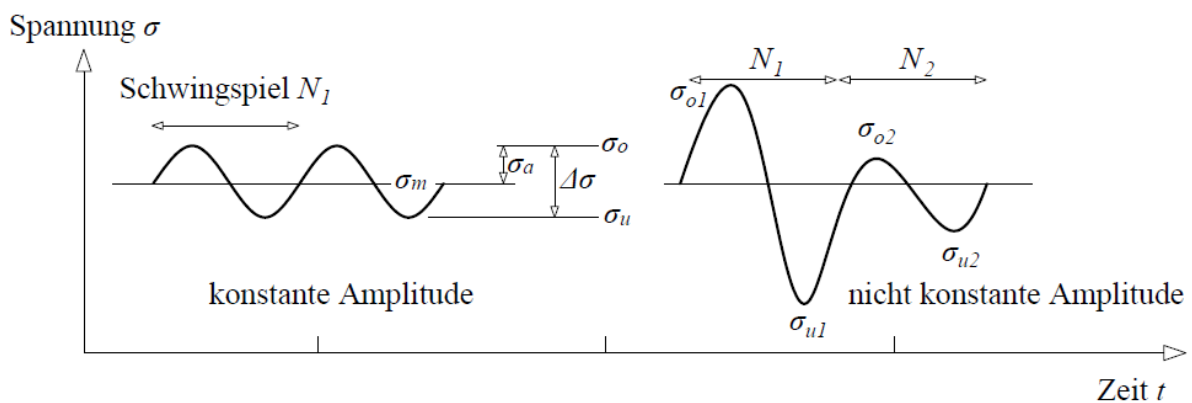


Abb. 2-2: Beanspruchungs-Zeit-Funktion mit einer konstanten (links) und nicht konstanten Amplitude (rechts)

Ein Schwingspiel  $N$  wird charakterisiert durch die Oberspannung  $\sigma_o$ , die Unterspannung  $\sigma_u$  und die Mittelspannung  $\sigma_m$ . Bei einer Ermüdungsbeanspruchung durch eine **konstante Amplitude** bleiben die beschriebenen Spannungen für alle Schwingspiele gleich. Die Beanspruchung kann als Einstufenkollektiv dargestellt werden. Der Großteil der bekannten Versuche zur Bestimmung von Ermüdungsfestigkeiten geschweißter Konstruktionen (Wöhlerversuche) wurde mit konstanter Amplituden durchgeführt.

Betriebsbeanspruchungen unter realen Bedingungen sind gekennzeichnet durch variable Schwingbreiten mit **nicht konstanter Amplitude**. Dafür wird die Beanspruchung als Mehrstufenkollektiv dargestellt, das angibt wie oft Spannungsschwingbreiten wiederholt wurden. Um die Lebensdauer eines Konstruktionsdetails zu ermitteln, das einer Betriebsbeanspruchung ausgesetzt ist, dessen Ermüdungsfestigkeit jedoch auf

Grundlage von Versuchen mit Einstufenkollektiven ermittelt wurde, ist ein Schadensakkumulationsmodell notwendig, beispielsweise das Modell der linearen Schadensakkumulation nach PALMGREN-MINER.

Das Modell vernachlässigt Reihenfolgeeffekte wie die Form des **Spannungskollektives**. Hohe Spannungsschwingbreiten in einer frühen Phase haben einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer, da sie die Rissentstehung (vgl. Kapitel 2.2) beschleunigen. Im Modell wird die Lebensdauer aber unabhängig vom Zeitpunkt des Auftretens unterschiedlicher Spannungsamplituden behandelt.

Dass die Form des Beanspruchungskollektives einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer von geschweißten Konstruktionen hat, wurde in unterschiedlichen, voneinander unabhängigen experimentellen Untersuchungen nachgewiesen. In [48] S. 11 wurde ein ausgeprägter Einfluss der Form des Beanspruchungskollektivs auf die Ermüdungsfestigkeit an Querstreifen ähnlichen Prüfkörpern festgestellt.

Experimentelle Untersuchungen an geschweißten Trägern in [45] S. 29 zeigen, dass Risswachstum infolge einer Ermüdungsbeanspruchung zu erwarten ist, auch wenn nur ein kleiner Teil des Lastkollektivs oberhalb der Dauerfestigkeit liegt.

Die beschriebenen Reihenfolgeeffekte sind Anlass für zahlreiche Modifikationen und Anpassungen der PALMGREN-MINER Regel (siehe beispielsweise [69] & [140]).

### 2.3.2 R-Verhältnis, Mittelspannungen und Eigenspannungen

Die Mittelspannung  $\sigma_m$  bezeichnet den Mittelwert zwischen der Oberspannung  $\sigma_o$  und der Unterspannung  $\sigma_u$ . Als Bewertungskriterium der Mittelspannung wird meist das **R-Verhältnis** als Quotient aus  $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  herangezogen.

Die **Mittelspannung** bzw. das R-Verhältnis nimmt in der Risswachstumsphase Einfluss auf die Rissöffnung und damit auf die Schädigung und Lebensdauer eines Bauteils. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass Druckspannungen infolge ihrer riss-schließenden Wirkung und der damit verbundenen Reduzierung der Spannungsintensität an der Rissspitze weitestgehend als schädigungsunwirksam zu bewerten sind [57], S. 238 und [128] S. 132 – S. 133.

Die Mittelspannung wird neben der äußeren Belastung auch durch **Eigenspannungen** charakterisiert. Die Bewertung des Mittelspannungseinflusses auf die Ermüdungsfestigkeit ist daher nur auf Grundlage eines bekannten Eigenspannungszustands möglich, siehe auch Abb. 2-3.

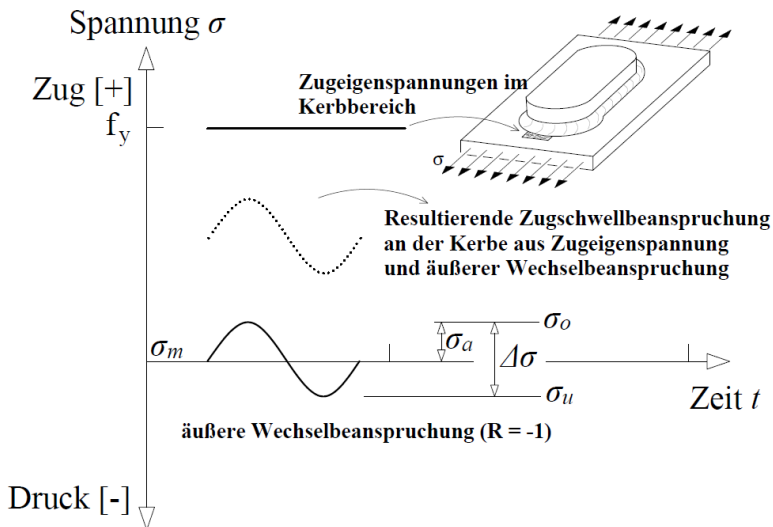


Abb. 2-3: Überlagerung von äußerer Wechselbeanspruchung und innerem Eigenspannungszustand

Eigenspannungen weisen über den Querschnitt immer einen Gradienten auf, sind also entlang des Risspfades nicht konstant. Zusätzlich kommt es zu Umlagerung von Zugeigenspannungen während des Risswachstums [80] S. 167. Eine Bewertung des Mittelspannungseinflusses ist daher praktisch nur möglich, wenn die inneren Eigenspannungen durch

geeignete Verfahren beeinflusst werden können. Ein übliches Verfahren dafür ist das Spannungsarmglühen. In [80] wird ein versuchsgestütztes Modell vorgestellt, das die Bewertung des Mittelspannungseinflusses für spannungsarmgeglühte und vorge-streckte Längssteifen ermöglicht. Es wird verdeutlicht, dass das Zusammenwirken von Lastspannungen und Eigenspannungen als weitestgehend unabhängig von der Streckgrenze des Werkstoffes zu bewerten ist, [80] S. 166.

Eine Mittelspannungsabhängigkeit wird in [95] auch für nachbehandelte, gehämmerte Schweißdetails nachgewiesen. Auch hier wird der Eigenspannungszustand durch die Nachbehandlung an der Schweißnahtoberfläche gezielt beeinflusst. Dabei wird für Quersteifen [95] S. 145 und Längssteifen [95] S. 173 im nachbehandelten Zustand eine ausgeprägte Mittelspannungsabhängigkeit auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen aufgezeigt.

Bei einer Vielzahl von Konstruktionen im Bauwesen ist es üblich, die Konstruktionen im Schweißzustand zu belassen. Dies führt zu unplanmäßigen Eigenspannungszuständen im risskritischen Bereich.

An vielen voneinander unabhängigen Versuchsprogrammen mit Längssteifen an Prüfkörpern, die im Schweißzustand belassen wurden, zeigte sich eine ausgeprägte Mittelspannungsunabhängigkeit. Längssteifen sind für Untersuchungen hinsichtlich der Wechselwirkung von Eigenspannungen und Mittelspannungen gut geeignet, da auch Kleinversuche realistische Eigenspannungszustände aufweisen [80] S. 164.

In [43], S. 91 wird anhand von zahlreichen Trägerversuchen dargelegt, dass nicht die Maximalspannung und das Spannungsverhältnis sondern nur die Differenz der Maximal- und Minimalspannung, also die Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$ , maßgebend für die Lebensdauer ermüdungsbeanspruchter Schweißverbindungen ist. Diese Erkenntnisse führten zu den heutigen weitgehend mittelspannungsunabhängigen Bemessungskonzepten.

Experimentelle Untersuchungen an aufgeschweißten Längssteifen in [128] S. 57 zeigen, dass das R- Verhältnis nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausübt.

In [80] S. 148 wird auf Grundlage eines umfangreichen Versuchsprogrammes deutlich, dass Längssteifen im Schweißzustand bei einer Vielzahl von untersuchten Spannungsverhältnissen bzw. Mittelspannungen immer die gleiche Schwingfestigkeit aufweisen.

In [128], S. 1 wird auf Grundlage einer sehr breiten Datengrundlage geschlossen, dass für Bauteile mit hohen Schweißeigenspannungen kein Einfluss der Mittelspannung zu erwarten ist.

Die Mittelspannungsunabhängigkeit für eigenspannungsbehaftete Konstruktionen im Schweißzustand führt damit letztlich zu einer deutlichen Vereinfachung der Bemessung, da für die Einwirkung nur die Spannungsamplitude  $\Delta\sigma$  aus der Lastspannung berücksichtigt werden muss.

### 2.3.3 Weitere potenzielle Einflussfaktoren aus der Beanspruchung

Umgebungsfaktoren wie Radioaktivität, korrosive Umgebungen und Temperatur können Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit nehmen. Beispielsweise sind im Offshore Bereich Stahlkonstruktionen im Seewasser von einem korrosiven Medium umgeben. Ergebnisse in [128], S. 2 zeigen, dass bereits rissbehaftete Bauteile in Seewasser eine Risswachstumsgeschwindigkeit aufweisen können, die bis zu sechs Mal schneller ist als an Luft.

Experimentelle Untersuchungen belegen zudem den Einfluss von Extremtemperaturen auf die Ermüdungsfestigkeit. So zeigen Untersuchungen an Kreuzstößen und Quersteifen eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit bei arktischen Temperaturen [30].

Derartige Einflüsse können für Stahlkonstruktionen in entsprechend exponierten Lagen Einfluss auf die Lebensdauer nehmen, werden aber im Rahmen dieser Arbeit nicht speziell berücksichtigt.



## 2.4 Ermüdungsfestigkeit

### 2.4.1 Geometrische Kerben

Die geometrische Kerbschärfe ist maßgeblich verantwortlich für die Ermüdungsfestigkeit geschweißter Konstruktionen. Sie erzeugen lokale Spannungsspitzen. Diese sind für die Entstehung von Ermüdungsrissen verantwortlich, vgl. Kapitel 2.2.

Bei geschweißten Konstruktionen ist es sinnvoll, die geometrische Kerbe auf unterschiedlichen Ebenen zu betrachten. RADAJ [132] S. 150 unterscheidet zwischen Makro- und Mikrokerbwirkung. Dabei definiert die Grobstruktur durch messbare Parameter wie Blechdicke und Nahtdicke die Makrokerbe. Die Feinstruktur bezeichnet die genaue geometrische Darstellung der Schweißstoßlinie an Schweißnahtübergang und Schweißnahtwurzel.

Die geometrische Feinstruktur ist dabei sehr komplex, sie ist entlang der Schweißlinie erheblichen Streuungen unterworfen. Messtechnische Untersuchungen mit ausgemittelten Übergangsradien an Makroschliffen in [133] zeigen erhebliche Abweichungen zwischen 0,01 mm und 3 mm für geschweißte Proben. Zusätzlich muss im mikroskopischen Bereich eine sogenannte Mikrostützwirkung erfasst werden.

Nach NEUBER kann diese Mikrostützwirkung ersatzweise durch einen fiktiven Kerbkümmungsradius ersetzt werden, siehe auch [118]. Feinstruktur, Mikrostützwirkung und ggf. differenziert zu betrachtende Oberflächenrauigkeiten werden generell als Mikrokerbe bezeichnet [132].

HAIBACH führt in [70] S. 150 ebenfalls Begrifflichkeiten zur Beschreibung der unterschiedlichen Ebenen für die Betrachtung geometrischer Kerben ein. HAIBACH unterscheidet zwischen Primärkerben und Sekundärkerben.

Dabei wird die konstruktiv bedingte Primärkerbe vorgegeben durch die Konstruktionsgeometrie des betrachteten Details. Die Sekundärkerbe charakterisiert die Abweichung des tatsächlichen Oberflächenprofils von der idealisierten Gestalt. Die Sekundärkerbe beschreibt beispielsweise schweißtechnisch bedingte Geometrieinflüsse wie Einbrandkerben, konvexe bzw. konkave Kehlnahtgeometrien oder zufällig entstehende Schweißnahtunregelmäßigkeiten, vgl. Abb. 2-4.

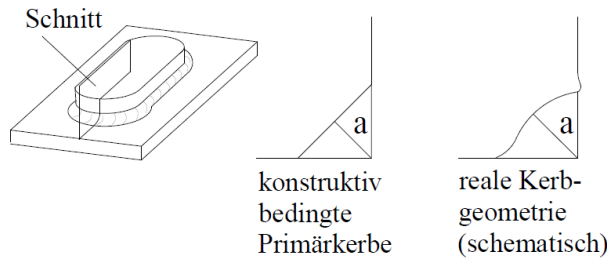
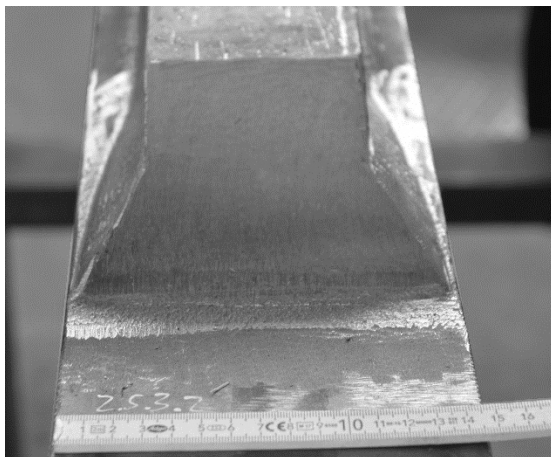


Abb. 2-4: Schematische Darstellung der konstruktiv bedingten Primärkerbe und der realen Kerbgeometrie

Während die konstruktive Gestalt der Primärkerbe durch geometrische Angaben definiert werden kann, ist die Gestalt der Sekundärkerbe in einem gewissen Rahmen zufällig.

Bestimmte Merkmale der Sekundärkerbe können klassifiziert werden,

beispielsweise durch Vorgaben zur Bewertung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten in DIN EN ISO 5817 [2], trotzdem ist davon auszugehen, dass bei handgeschweißten und handbearbeiteten Konstruktionsdetails ein erheblicher Teil der Streuung in Ermüdungsversuchen auf die Gestalt der Sekundärkerbe zurückzuführen ist. Wie deutlich der Einfluss sein kann, ist in Abb. 2-5 dargestellt. Dargestellt sind Prüfkörper des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende mit geschliffenen Nahtübergängen. Die Details wurden von unterschiedlichen Schweißern auf Grundlage der gleichen Anforderung geschweißt und nachbearbeitet. Obwohl die konstruktiv bedingten Primärkerben am Nahtübergang gleich sind, zeigen die Sekundärkerben im direkten Vergleich deutliche Abweichungen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit, siehe auch Kapitel 6.4.5.



(a)



(b)

Abb. 2-5: Kerbschärfe am Konstruktionsdetail Gurtlamelle: (a) Fertiger A, (b) Fertiger B

Die geometrische Kerbschärfe ist somit nicht nur abhängig vom Konstruktionsdetail, sondern kann auch durch Schweißverfahren und Schweißposition beeinflusst werden, [101], S. 340.

Aktuelle Forschungsaktivitäten beschäftigen sich mit der Ermittlung der Ermüdungsfestigkeiten an realen Geometrien, dessen Oberflächen mithilfe eines Scanners erfasst werden. Durch digitale Nachbearbeitung der Geometrie können sogenannte tangenstetige Oberflächen ohne Kanten und Ecken erzeugt werden, die geeignet sind, die geometrische Kerbe in einem FE Modell mit hoher Auflösung zu modellieren [102], S. 400.

Dieser Ansatz erlaubt eine geometrische Beschreibung der Sekundärkerbe, allerdings unter hohem technischen (Labor-) Aufwand für bereits geschweißte und vorliegende Details.

Für die Bemessung kann die Kerbschärfe aufgrund der Streuung aus den Fertigungseinflüssen nicht genau voraus gesagt werden und muss als Streuung akzeptiert werden. Die Schärfe der geometrischen Kerbe beeinflusst auch die Streuung der Ermüdungsfestigkeit. Schwach gekerbte Bauteile wie kerbfrei bearbeitete Stumpfstöße streuen erheblich stärker als kerbscharfe Längssteifen, siehe auch Kapitel 5.7.

Zahlreiche Nachbearbeitungsverfahren zur Verbesserung der Schwingfestigkeit, wie WIG Aufschmelzen sowie Schleifen und Hämmern von Nahtübergängen zielen auf eine Verbesserung der Sekundärkerbe.

#### 2.4.2 Metallurgische Kerbe

Metallurgische Kerben entstehen an Werkstoffgrenzen. In Schweißkonstruktionen beschreibt die metallurgische Kerbe den Übergang zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut. Änderungen im Materialgefüge bezüglich Korngrößen, Festigkeiten und Härtewerten sowie winzige mikroskopische Gas- und Schlackeeinschlüsse und Bindemängel, die sich durch die thermische Beanspruchung während des Schweißens bilden, können Einfluss auf die Entstehung von mikroskopisch kleinen Rissen nehmen und damit die Rissentstehung (vgl. Kapitel 2.2) begünstigen [132] S. 9, [158] S. 37.

Der Übergang zwischen (geometrischen) Sekundärkerben und metallurgischen Kerben ist fließend, weil für Schweißkonstruktionen die metallurgische Kerbe häufig mit der geometrischen Kerbe zusammenfällt.

Experimentelle Untersuchungen an Kleinzugproben (ohne Einfluss einer geometrischen Kerbe) zeigen, dass metallurgische Kerben zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut eine kürzere Lebensdauer aufweisen als Vergleichsproben ohne metallurgische Kerbe, [28] S 34 und S. 151.

Für eine praxisnahe Untersuchung über den Einfluss der metallurgischen Kerbe bietet sich ein Vergleich zwischen der Ermüdungsfestigkeit von kerbfrei bearbeiteten Stumpfstößen und ungeschweißtem Grundwerkstoff an. Derartige Untersuchungen sind in [122], [121] und [161] dokumentiert.

Alle experimentellen Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Ermüdungsfestigkeit der kerbfrei bearbeiteten Stumpfstöße unter der von ungeschweißtem Grundmaterial, aber über der Ermüdungsfestigkeit von Stumpfstößen im Schweißzustand liegt.

### 2.4.3 Größeneffekte

Der **Größeneffekt** ist ein Überbegriff für geometrische Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit. Die Effekte können grob unterteilt werden in spannungsmechanische, statistische sowie technologische Einflüsse.

Letzterer beschreibt potenzielle Einflüsse aus mechanischen und thermischen Herstellungsverfahren. Beispielsweise ist für das Schweißen bestimmter Stahlsorten und Blechdicken ein Vorwärmen notwendig. Ein Vernachlässigen des Vorwärmens bei großen Blechdicken kann zu Schweißnaht0n oder Schweißnahtimperfektionen führen, die einen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben können.

Der **technologische Größeneinfluss** kann in dem beschriebenen Zusammenhang also indirekt ursächlich für geometrische und metallurgische Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit sein.

Der **statistische Größeneinfluss** beschreibt den Zusammenhang zwischen der Geometrie einer Konstruktion und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer zum Ermüdungsriss führenden Unregelmäßigkeit. Das von WEIBULL [155] S. 293 beschriebene „weakest link concept“ geht davon aus, dass eine zur Rissinitiierung führende Fehlstelle die Ermüdungsfestigkeit eines Stahlwerkstoffes bestimmt. Grundlage seines Konzepts sind experimentelle Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Biegeträgern aus St-37 [115].

Experimentelle Untersuchungen an ungeschweißten Prüfkörpern zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen Volumen und Ermüdungsfestigkeit besteht. Für geschweißte Konstruktionen bleibt der statistische Größeneinfluss für die Bemessung in der Regel unberücksichtigt [69] S. 545.

In [126] S. 3 wird ein statistischer Größeneinfluss, orientiert an der Blechdicke, vorgeschlagen. Die empfohlene Gleichung für die Abminderung hat die gleiche Form wie die Gleichung zur Berücksichtigung des spannungsmechanischen Einflusses. Grundlage

für die Abminderung sind Empfehlungen in einem US amerikanischen „Fatigue Design Handbook“ der Society of Automotive von 1964. Die experimentellen Hintergründe sind nicht bekannt.

Die in [126] gegebenen Empfehlungen sind Grundlage für die Berücksichtigung von Blechdickeneinflüssen in den IIW Empfehlungen zur Ermüdungsbemessung [83] S. 82. Den statistischen Größeneinfluss an der Blechdicke (anstelle des Volumens) von geschweißten Konstruktionen zu orientieren, ist unschlüssig. In [69] S. 545 wird vorgeschlagen, einen gegebenenfalls auftretenden statistischen Größeneinfluss an der Nahtlänge zu orientieren.

Der **spannungsmechanische Größeneinfluss** basiert auf der Stützwirkung bei inhomogener Spannungsverteilung. Er führt bei großen Blechdicken zu einer erhöhten Spannungskonzentration und hat damit einen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.

Experimentelle Untersuchungsergebnisse, die den spannungsmechanischen Größeneinfluss untersuchen, sind (im Gegensatz zu FE basierten Untersuchungen) eher selten. Das ist auf die Limitierung der Prüfkräfte gängiger Prüfmaschinen zurückzuführen. In experimentellen Untersuchungen von HAIBACH, OLIVIER & RITTER [74] zeigten sich an quer geschweißten Winkelproben Geometrieinflüsse für Schweißnaht- und Blechdicken. Der Einfluss wurde mithilfe von Dehnungsmessungen als spannungsmechanischer Größeneinfluss identifiziert. In [75] S. 200 wird dabei später in Bezug auf die gleichen Untersuchungen hervorgehoben, dass Versuchsergebnisse zum Größeneinfluss nur aussagefähig sind, wenn gleichzeitig der Einfluss von Eigenspannungen und Mittelspannungen betrachtet wird, da diese (potenziell ebenfalls signifikanten) Einflussgrößen einen geometrieabhängigen Einfluss überdecken können.

GURNEY veröffentlichte 1979 einen Beitrag, in dem er auf Grundlage von bruchmechanischen Modellen einen Blechdickeneinfluss für geschweißte Konstruktionen prognostiziert [66] S. 523. GURNEY [65] und MADDOX [107] bestätigten durch experimentelle Untersuchungen an **Quersteifen** einen Blechdickeneinfluss. Sie schließen aus den Ergebnissen, dass bruchmechanische Ansätze für die Bewertung von spannungsmechanischen Größeneinflüssen geeignet sind. Die experimentellen Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass „kleine Aufschweißteile“ (13 mm dicke Quersteifen) keinen signifikanten Blechdickeneinfluss haben [107] S. 16.

GURNEY schlägt in [65] auf Grundlage der Untersuchungen ein Modell vor, das neben dem Blechdickeneinfluss auch den Abstand der Schweißnahtübergänge in Beanspruchungsrichtung berücksichtigt. Das Modell ist Grundlage für die Kerbfallempfehlung in DIN EN 1993-1-9 [7], siehe auch [98], S. 55 – 58.

Das Modell von GURNEY in [65] S. 30 beinhaltet zudem die Erkenntnis, dass der Blechdickeneinfluss und der Abstand der Schweißnahtübergänge in einem zueinander abhängigen Verhältnis stehen.

Weitere experimentelle Untersuchungen legen nahe, dass quer geschweißte Konstruktionen im Gegensatz zu längs geschweißten Bauteilen eher einen Blechdickeneinfluss aufweisen. Untersuchungen von BOOTH [27] konnten einen gewissen Blechdickeneinfluss für Kreuzstöße mit 25 mm und 38 mm dicken Blechen nachweisen. Untersuchungen an Längssteifen mit den gleichen Grundblechdicken zeigten dagegen keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit (siehe auch Kapitel 5.2.5). In [35] wird für quer geschweißte Stumpfstöße ein Blechdickeneinfluss zwischen 25 mm und 75 mm dicken Blechen festgestellt. **Längssteifen** zeigten unter gleichen Randbedingungen dagegen keinen Blechdickeneinfluss. Der fehlende Einfluss wird auf das Verhältnis zwischen Grundblechdicke und Steifendicke zurückgeführt.

Im Gegensatz zu DIN EN 1993-1-9 [7] berücksichtigen die IIW Empfehlungen [83] auch eine Blechdickenkorrektur für Längssteifen. Die Empfehlungen basieren auf bruchmechanischen Untersuchungen in [126], wobei auf Untersuchungen an bruchmechanischen Modellen von SMITH und GURNEY aus 1986 [141] verwiesen wird. In [141] S. 249 wird darauf hingewiesen, dass ein Blechdickeneinfluss bei Längssteifen weiterer Untersuchungen bedarf.

Ein für Längssteifen ebenfalls angenommener spannungsmechanischer Größeneinfluss betrifft die **Länge der Längssteife**, vgl. Abb. 2-6. In DIN EN 1993-1-9 [7] ist eine sehr deutliche Abstufung des Kerbfalls in Abhängigkeit der Länge vorgesehen.

Experimentelle Untersuchungen an längs aufgeschweißten Lamellen wurden von FISHER 1972 in [43] (siehe Seite S. 260-262) durchgeführt. An den untersuchten Längen von 2 Inch, 4 Inch und 8 Inch (ca. 50 mm, 100 mm und 200 mm) wurde dabei deutlich, dass die Ermüdungsfestigkeit bis 100 mm auch von der Länge der Längsnaht abhängt. 1977 empfiehlt FISHER in [42], S. 49 mit dem „Bridge Fatigue Guide“ die Längenabhängigkeit bis 100 mm in das amerikanische Regelwerk für die Ermüdungsbemessung von Brücken zu übernehmen. Die Längenabhängigkeit wird hier für alle Aufschweißteile definiert, die mit einer Kehlnaht längs zur Krafrichtung an ein Tragwerk angeschlossen sind, dazu gehört auch die Längssteife. Später wurde die Längenabhängigkeit für Längssteifen auch in das IIW Regelwerk [83] und in die Empfehlungen für die

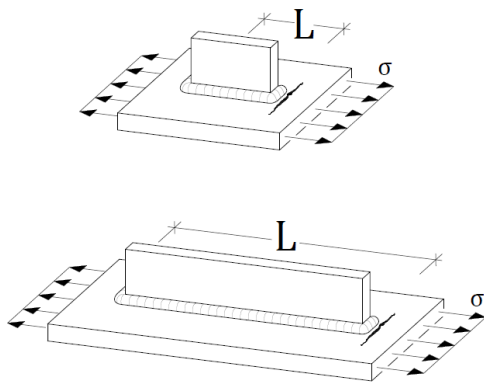


Abb. 2-6: Schematische Darstellung von Längssteifen mit unterschiedlichen Längen L

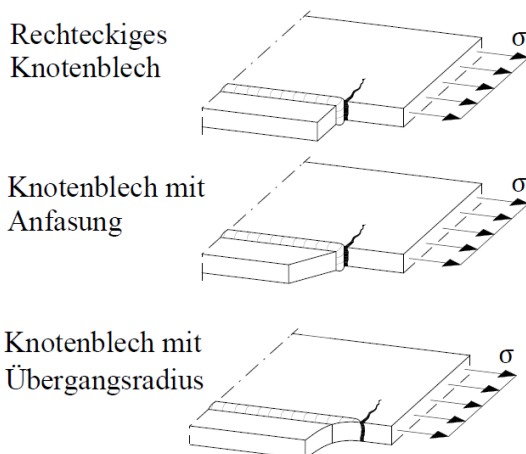


Abb. 2-7: Schematische Darstellung von Knotenblechen am Blechrand mit unterschiedlichen Endgeometrien

Bemessung und Konstruktion von ermüdungsbeanspruchten Stahlbauten [15], einem Vorläuferdokument des Eurocode 3, übernommen.

Dass die derzeit gültige Unterteilung der Ermüdungsfestigkeit für Längssteifen in DIN EN 1993-1-9 [7] auf die FISHER Versuche an längs aufgeschweißten Lamellen zurück geht, wird in [82] S. 257 deutlich.

Eine Metaanalyse anhand der in Kapitel 3 vorgestellten Datenbank zeigt, dass die Länge der Längssteife in einem Bereich von 50 – 200mm keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausübt, siehe auch Kapitel 5.2.4.

In den Kerbfallempfehlungen von DIN EN 1993-1-9 [7] ist eine Kerbfallunterscheidung in Abhängigkeit der **Endgeometrie von Längssteifen** vorgesehen. Für angefastete Bleche mit einem gewissen Anstiegswinkel ist ein verbesserter Kerbfall vorgesehen. Der Ursprung dieser Kerbfallbewertung ist unklar. In einem Vorläuferdokument zur DIN EN 1993-1-9 [15] wird das Konstruktionsdetail nicht gelistet.

In [27] (S. III/P4-6) wird anhand umfangreicher experimenteller Untersuchungen gezeigt, dass die angefasste Endgeometrie der Längssteife im Schweißzustand keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit besitzt. Der fehlende Einfluss wird auch durch experimentelle Untersuchungen von BERGER [23] bestätigt.

Für kerbfrei bearbeitete **Knotenbleche am Blechrand** wird in DIN EN 1993-1-9 [7] eine ausgeprägte Ermüdungsabhängigkeit in Bezug auf den **Endradius** der Längssteife berücksichtigt. Hintergrund für die Bewertung sind (modellbasierte) bruchmechanische Untersuchungen, [53] S. 48 – 54.

Für aufgeschweißte **Gurtlamellen** im Schweißzustand ist in DIN EN 1993-1-9 [7] eine ausgeprägte Blechdickenabhängigkeit sowohl für das Grundblech als auch für das Deckblech angegeben. In [44] wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu dem Konstruktionsdetail durchgeführt, bei denen in einer Serie auch die Dicke der Lamelle variiert wurde.

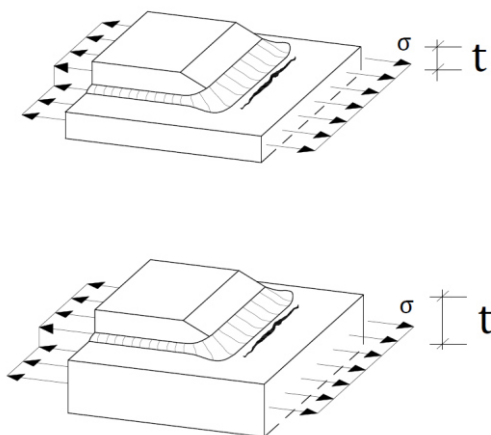


Abb. 2-8: Schematische Darstellung von Gurtlamellenenden mit unterschiedlichen Dicken  $t$

Konkret wurden 14 mm und 19 mm dicke Lamellen untersucht. Eine klare Blechdickenabhängigkeit wird dabei nicht deutlich. In aktuellen Untersuchungen an der besonders in Deutschland üblichen Variante der kerbfrei bearbeiteten Gurtlamellenenden wird deutlich, dass ein Blechdickeneinfluss für diese Variante nicht zu erwarten ist, vgl. Kapitel 6.4.7.

Strukturmechanische Einflussgrößen lassen sich mit modellbasierten Ansätzen wie der Bruchmechanik und dem Kerbspannungskonzept abbilden. Beruhend auf der Modellvorstellung eines axial beanspruchten Grundbleches lässt sich die Ermüdungsfestigkeit mithilfe dieser Methoden auch allein in Abhängigkeit der Geometrie der Schweißnaht und des Aufschweißteils darstellen. Dabei sollten numerische Untersuchungen immer ergänzend zu experimentellen Untersuchungen vorgenommen werden. Tendenziell ist eine Überschätzung von spannungsmechanischen Größeneinflüssen auf Grundlage modellbasierter Ansätze möglich, siehe auch Kapitel 8.5.



#### 2.4.4 Trägerversuche & Kleinversuche

Für die experimentelle Ermittlung von Ermüdungsfestigkeit werden anstelle von Trägerversuchen häufig Kleinversuche genutzt, um den Aufwand für die Prüfung begrenzen zu können. Lamellen, Steifen und Aufschweißteilen werden dafür häufig auf Bleche geschweißt, die in Prüfmaschinen axial beansprucht werden können.

Trägerversuche spiegeln reale Gegebenheiten wie beispielsweise realitätsnahe Eigenspannungszustände oder schwierige Schweißnahtzugänglichkeit besser wider. Dafür ist der Versuchsaufbau komplexer und aufwendiger, da in der Regel ganze Träger- oder Brückenquerschnitte untersucht werden. Die Mehrheit der vorhandenen experimentellen Versuchsdaten wurde an Kleinproben durchgeführt. Dabei wird das zu untersuchende Konstruktionsdetail soweit wie möglich vereinfacht.

Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der Beanspruchung (Trägerversuche werden in der Regel biegebeansprucht) und in Bezug auf den Einfluss von Eigenspannungen, der in Kleinversuchen möglicherweise nicht repräsentativ ist.

GURNEY und MADDOX beobachteten bei der statistischen Auswertung der Ermüdungsfestigkeit von Stumpfstoßen, dass bei quer geschweißten Kleinproben (wie Quersteifen) die Ermüdungsfestigkeit zu vorteilhaft wiedergegeben wird und empfehlen eine Korrektur, die sich auch auf die Neigung der Wöhlerlinie auswirkt, siehe [55] S. 4-5, S.18 und [57] S.105-106.

In [80] S. 164 wird auf Grundlage von Ermüdungsversuchen mit Eigenspannungsmessungen festgestellt, dass quer geschweißte Konstruktionsdetails wie Quersteife oder Kreuzstoß in Kleinversuchen kaum nennenswerte Schweißeigenspannungen aufweisen. Sie sind in Bezug auf Eigenspannungen daher nicht mit Trägerversuchen vergleichbar. Längssteifen haben dagegen in Bezug auf die entstehenden Eigenspannungen auch im Kleinversuch Praxisrelevanz, da hier ausreichend hohe Zugeigenspannungen erzeugt werden können.

Der Einfluss aus Eigenspannungen kann für quer geschweißte Konstruktionsdetails minimiert werden, wenn für die Auswertung von Ermüdungsversuchen nur Zugschwellversuche mit  $R > 0$  herangezogen werden. In Kapitel 5.4.3 ist ein Vergleich zwischen Kleinversuchen und Trägerversuchen für das Konstruktionsdetail Quersteife dargestellt. Es wird deutlich, dass Ermüdungsfestigkeit und Streuung der Versuchsergebnisse vergleichbar ist.

### 2.4.5 Streckgrenze und Zugfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten, scharf gekerbten Konstruktionen wie Lamellen, Steifen und Aufschweißteilen korreliert nicht mit der Streckgrenze oder Zugfestigkeit eines Stahlwerkstoffes. Zahlreiche voneinander unabhängige experimentelle Versuchsprogramme konnten das belegen, siehe beispielsweise [114] S. 22, [161] S. 23 und [131] S.137.

### 2.4.6 Schweißverfahren

Schweißverfahren können die Nahtgüte beeinflussen und bestimmen so indirekt die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen mit. Die Gestalt der Sekundärkerbe (vgl. Kapitel 2.4.1) kann vom Schweißverfahren abhängen.

Experimentelle Untersuchungen in [29] S. 27 zeigen, dass WIG geschweißte Konstruktionsdetails aufgrund besserer Nahtgüten höhere Ermüdungsfestigkeiten erreichen können als MSG geschweißte vergleichbare Details.

Aus umfangreichen experimentellen Untersuchungen an Stumpfstößen in [117] S. 81-82 wird geschlussfolgert, dass eine Unterscheidung hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit von Lichtbogenhandschweißungen gegenüber denen der Schutzgasschweißungen nicht sinnvoll ist.

Lamellen, Steifen und Aufschweißteile sollten immer vollständig umschweißt werden, siehe [106] S. 55. Ansatzstellen im ermüdungskritischen Bereich sollten zudem vermieden werden, da sich diese tendenziell negativ auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken können, siehe auch [131] S. 37 – 43.

## 2.5 Empirische Ermittlung von Ermüdungsfestigkeiten

### 2.5.1 Übersicht

Die empirische Ermittlung von Ermüdungsfestigkeiten erfolgt über klassische Wöhlerversuche. WÖHLER zeigt 1870 in Dauerschwingversuchen einen Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und den Schwingspielen bis zum Bauteilversagen, [160] S. 95.

Um einen Zusammenhang zwischen der Beanspruchung (Einwirkung) und den Schwingspielen bis zum Versagen (Widerstand) herzustellen, wird ein Modell von BASQUIN [20] herangezogen, siehe auch Abb. 2-9.

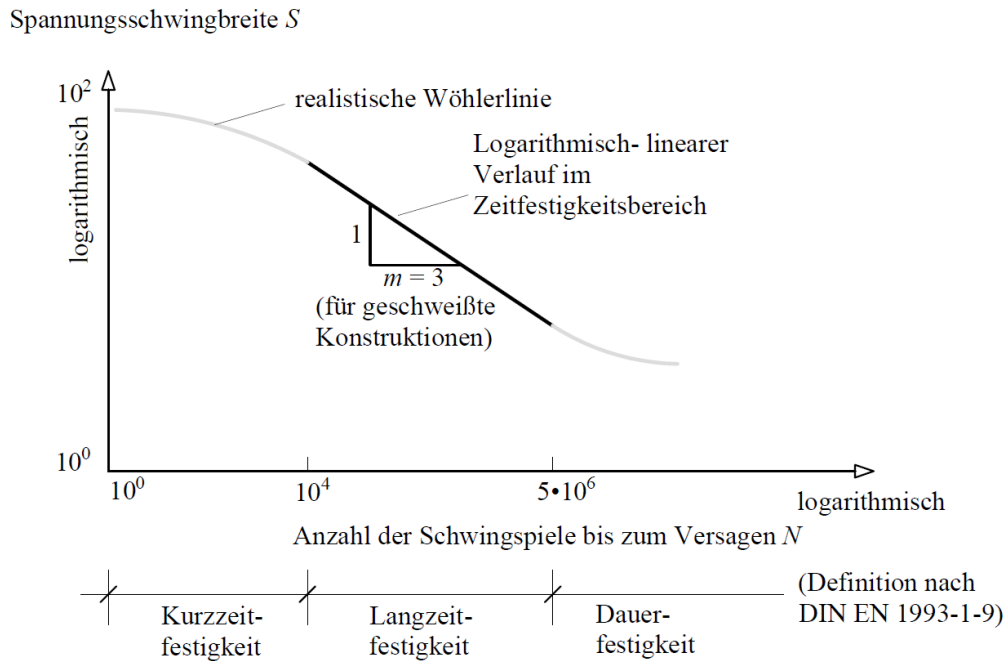


Abb. 2-9: Wöhlerlinie mit Modell nach BASQUIN [20] und Definition nach DIN EN 1993-1-9 [7]

Das Modell impliziert einen logarithmisch linearen Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und den Schwingspielen bis zum Versagen. Das Modell ist in Abb. 2-9 dargestellt, wobei die Beanspruchung als Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  dargestellt ist. Das Modell ist geeignet für die Darstellung der Ermüdungsfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich. Kurzzeit- und Dauerfestigkeitsbereiche können damit nicht abgebildet werden.

### 2.5.2 Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit

In Abb. 2-9 sind Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereiche definiert. Schwingbeanspruchungen mit sehr hohen Spannungsschwingbreiten, die zu plastischen Dehnungen im Nennquerschnitt führen, liegen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit. Dieser spielt für die Bemessung ermüdungsbeanspruchter Tragwerke in der Regel eine untergeordnete Rolle, da plastische Reserven hier planmäßig nicht ausgenutzt werden. Der Dauerfestigkeitsbereich wird durch eine Spannungsschwingbreite definiert für die keine Schädigung mehr zu erwarten ist. Es ist ungeklärt, ob und für welchen Bereich Dauerfestigkeiten von geschweißten Konstruktionen angenommen werden können, siehe auch [21]. Für reale Beanspruchungsszenarien mit variabler Amplitude ist die Definition von Dauerfestigkeiten nicht ohne weiteres möglich.

In DIN EN 1993-1-9 [7] (Bild 7.1) wird dieser Umstand durch erweiterte Ermüdungsfestigkeitskurven mit flacherer Neigung und verschobenem Dauerfestigkeitsbereich berücksichtigt. Weiterführende Ansätze sind beispielsweise in [33] gegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich klassische Wöhlerlinien ausgewertet, bei denen Konstruktionsdetails im Versuch durch eine Beanspruchungs- Zeit- Funktion mit konstanter Amplitude beansprucht wurden, vgl. Kapitel 2.3.1.

Auf Grundlage des Konzepts der normierten Wöhlerlinien [70] und in Anlehnung an die festgelegten Grenzen in DIN EN 1993-1-9 [7] wird der Zeitfestigkeitsbereich im Rahmen dieser Arbeit auf den Bereich zwischen 10.000 Schwingspielen und 5.000.000 Schwingspielen festgelegt. Alle Wöhlerversuche, die für nachfolgende Auswertungen herangezogen werden, sind durch ein Versagen im Zeitfestigkeitsbereich gekennzeichnet. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist dementsprechend auch auf diesen Bereich beschränkt.

## **2.6 Ermüdungsnachweis mit dem Nennspannungskonzept**

Im Bauwesen greift der bemessende Ingenieur auf rechnerische Modelle zur Erbringung des Ermüdungsnachweises zurück. Dabei müssen sowohl für die Beanspruchung als auch für den Widerstand Modelle herangezogen werden. Diese können nicht frei erstellt werden. Sie folgen technischen Regeln, die normativ in DIN EN 1993-1-9 [7] festgelegt sind.

Der Eurocode folgt in der Tragwerksbemessung dem Grundsatz, dass Einwirkungen über die Lebenszeit eines Tragwerks kleiner sein müssen als der Widerstand. In Bezug auf Materialermüdung kann dabei zwischen Ermüdungsbeanspruchung (vgl. Kapitel 2.3) und Ermüdungsfestigkeit (vgl. Kapitel 2.4) unterschieden werden.

Bei dem verbreiteten Nennspannungskonzept wird die einwirkende Spannung auf Grundlage von Schnittkräften ermittelt. Allerdings können dabei geometrische Eigenschaften der Primärkerbe nur teilweise und die der Sekundärkerbe gar nicht erfasst werden. Auf Grundlage von Nennspannungen können demnach die für die Ermüdung bedeutsamen Spannungskonzentrationen an Kerben auf der Einwirkungsseite nicht erfasst werden.

Um trotzdem einen Nachweis auf Nennspannungsebene führen zu können, wird die Kerbwirkung auf der Widerstandsseite erfasst. Konstruktionsdetails mit gleichartiger

Kerbwirkung wie Lamellen oder Steifen werden zusammengefasst und in Kerbfalltabellen mit ihrer spezifischen, in der Regel empirisch ermittelten Ermüdungsfestigkeit wiedergegeben.

Die Kerbfallzuordnung folgt dabei einer gewissen Systematik, die sowohl Wöhlerlinienneigung als auch Kurz-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereiche vorgibt, siehe auch Kapitel 2.5. Dieses Konzept der normierten Wöhlerlinien geht auf HAIBACH [70] zurück und berücksichtigt, dass sich die meisten Konstruktionsdetails in Hinsicht auf die Ermüdung ähnlich verhalten und Unterschiede nur in Hinsicht auf das Festigkeitsniveau zu erwarten sind.

Das Verfahren ist konzeptionell nicht geeignet, potenzielle spannungsmechanische Größeneinflüsse (vgl. Kapitel 2.4.3) implizit zu berücksichtigen. Wenn solche Einflüsse die Ermüdungsfestigkeit signifikant beeinflussen, müssen sie im Nennspannungskonzept über Korrekturfaktoren oder geometrischer Unterteilung der Kerbfälle berücksichtigt werden.

Eine sinnvolle Zuordnung von Nennspannungkerbfällen für Steifen, Lamellen und Anbauteile auf Grundlage einer breiten Datenbasis (vgl. Kapitel 3) zu finden, ist ein Hauptziel dieser Arbeit.

## 2.7 Weitere Konzepte der Ermüdungsfestigkeit für geschweißte Konstruktionen

Weitere verbreitete Konzepte zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit sind das Struktur- und das Kerbspannungskonzept, siehe Abb. 2-10. Das **Strukturspannungskonzept** ist ein speziell für Schweißkonstruktionen entwickeltes Verfahren, bei der eine fiktive Spannung an der Bauteiloberfläche direkt an der Kerbe ermittelt wird.

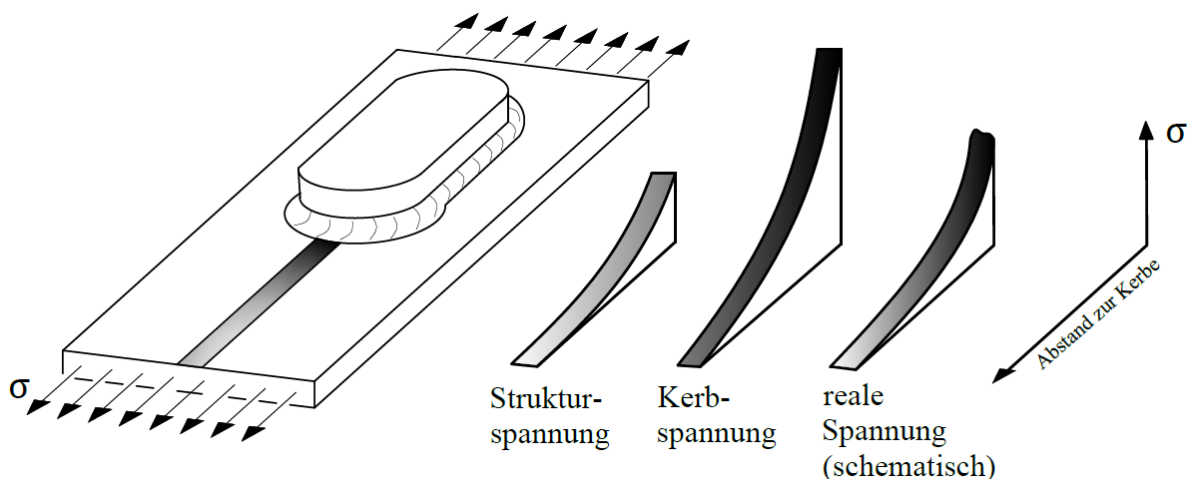


Abb. 2-10: Schematische Darstellung von Struktur-, Kerb- und realer Spannung am Lamellenende

Für die Ermittlung von Strukturspannungen sind in der Regel FE Modelle notwendig. Das Verfahren geht auf HAIBACH [70] zurück.

Das Verfahren kann strukturmechanische Einflüsse teilweise besser abbilden, da auf der Einwirkungsseite die geometrische Primärkerbe vollständig abgebildet werden kann und Kerbfälle auf der Widerstandsseite allgemeiner gehalten werden können. Die empirisch ermittelten (charakteristischen) Kerbfälle beinhalten dann das Niveau der Ermüdungsfestigkeit und Streuungen, die in erster Linie aus der streuenden Gestalt der Sekundärkerbe resultieren.

Ein großer Vorteil des Verfahrens gegenüber dem Kerbspannungskonzept ist die Möglichkeit, die Spannungskonzentrationen vor dem Schweißnahtübergang (aus denen die theoretische Strukturspannung ermittelt wird) im Experiment zu messen. So ist eine Validierung von entsprechenden Modellen direkt möglich.

Das Verfahren kann allerdings nur Einflüsse auf der Bauteiloberfläche abbilden. Dickenabhängige Größeneinflüsse, wie den Blechdickeneinfluss sowie Ermüdungsercheinungen, die von der Nahtwurzel ausgehen, können nicht erfasst werden.

Das **Kerbspannungskonzept** ist ein Verfahren, bei dem die Beanspruchung in der Kerbe noch genauer erfasst wird. Das Konzept kann strukturmechanische Einflüsse theoretisch genau erfassen, da die (linear elastische) Kerbspannung einer werkstoffabhängigen Ermüdungsfestigkeit gegenübergestellt werden kann.

Unterschiedliche Kerbfälle, die eine Kerbwirkung auf der Widerstandsseite berücksichtigen sind demnach nicht notwendig. Anstelle der Kerbfälle wird ein einzelner Kerbspannungskerbfall für beliebige Geometrien angegeben. Neben Kerben an der Bauteiloberfläche können potenzielle Rissstellen im Inneren (Wurzelkerben) abgebildet werden.

Da die Sekundärkerbe bei geschweißten Konstruktionen von einer zufälligen Gestalt ist, ist eine Modellierung in der Bemessung kaum möglich, siehe auch Kapitel 2.4.1.

Die Sekundärkerbe und die (auf metallurgischer Ebene wirkende) Mikrostützwirkung wird daher durch ein Modell ersetzt, das auf NEUBER [118], S. 246 und RADAJ [132] S. 152-153 zurückgeht. Die Kerbe wird dabei unter Berücksichtigung des tatsächlichen Krümmungsradius (der bei geschweißte Konstruktionen üblicherweise zu 0 mm, also unendlich scharf angenommen wird) und einer sogenannten Ersatzstrukturlänge, die eine günstig wirkende Mikrostützwirkung des Materials berücksichtigt, modelliert. Üblicherweise werden die Kerben für die Modellierung von geschweißten Geometrien mit einem Ausrundungsradius von 1mm ausgeführt, siehe auch [16].

Man kann davon ausgehen, dass die Kerbspannungen aufgrund der theoretisch unendlich scharfen Kerbe auf der sicheren Seite etwas überschätzt werden. Das wird auf der Widerstandsseite relativiert, da entsprechende Kerbspannungskerbfälle ebenfalls empirisch ermittelt werden (siehe [139] S. 58) und davon auszugehen ist, dass die Sekundärkerbe in den zugrundeliegenden Versuchen nicht unendlich scharf war.

Dieser Zusammenhang ist von Bedeutung, wenn Blechdickeneinflüsse mit dem Kerbspannungskonzept untersucht werden. Eine Bewertung mit dem Kerbspannungsmodell ist grundsätzlich möglich, allerdings ist die Ausprägung von Blechdickeneinflüssen ebenfalls abhängig von der Kerbschärfe und kann bei entsprechend scharfer Kerbmodellierung zu einer Überschätzung des Einflusses führen.

Kerbspannungsmodelle können nicht direkt validiert werden, da wie oben beschrieben die Sekundärkerbe als unendlich scharf angenommen wird. (Ausgenommen davon sind Ansätze, bei denen die Sekundärkerbe nach dem Schweißen exakt modelliert werden kann, siehe auch [102], S. 400.) Die Validierung für Nahtübergänge muss über Strukturspannungen erfolgen. Die Validierung von Wurzelkerben ist nicht möglich. Obwohl das Kerbspannungskonzept zu den genauesten Methoden gehört, um eine Ermüdungsbeanspruchung zu beschreiben, zeigen Untersuchungen, bei denen berechnete Kerbspannungen mit experimentell ermittelten Schwingspiellebensdauern ausgewertet wurden, dass bei den ermittelten Ermüdungsfestigkeiten trotzdem mit großen Streubreiten zu rechnen ist [129] S. 1625; [47] S. 163; [47] S. 173 - 174.

## **2.8 Erreichen verbesserter Ermüdungseigenschaften durch Lichtbogenlöten als Alternative zum Schweißen**

### **2.8.1 Übersicht**

Das Kapitel umfasst eine kurze Zusammenfassung des Lichtbogenlötens mit dem Werkstoff CuAl7 und bezieht sich dabei auf die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Einsatz des Lichtbogenlötens zum Fügen von Anbauteilen an schwingend hoch beanspruchten Stahlkonstruktionen“ [79]. Im Projekt wurde zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) das Lichtbogenlöten in zahlreichen experimentellen und begleitenden numerischen Untersuchungen erforscht.

Zielsetzung war die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Aufschweißteilen, die als Befestigung für Sekundärtragstrukturen genutzt werden. Als Lotwerkstoff wurde die

Kupfer Aluminium Legierung CuAl7 untersucht, die durch ihren relativ niedrigen E-Modul verbesserte Ermüdungseigenschaften bietet.

### 2.8.2 Prozessbeschreibung

Lichtbogenlöten ist ein Schmelzfügeprozess, der im Gegensatz zum Schweißen mit einem artfremden Zusatzwerkstoff durchgeführt wird. Der Fügeprozess findet bei niedrigeren Temperaturen als das Schweißen statt. Das führt zu einer weniger ausgeprägten Wärmeeinflusszone. Der eigentliche Verbindungsmechanismus basiert hauptsächlich auf Kohäsionskräften. Die statische Beanspruchbarkeit der Verbindung ist vergleichbar mit geschweißten Konstruktionen, vgl. Kapitel 2.8.4. Eine gelötete Kehlnaht ist geometrisch vergleichbar mit einer geschweißten Kehlnaht, vgl. Abb. 2-11. Untersuchungen in [79] S. 50 zeigen, dass trotz der im Vergleich zum Schweißen niedrigeren Löttemperatur nur sehr geringe Vorteile in Hinsicht auf Eigenspannungen zu erwarten sind. Ursächlich dafür ist hauptsächlich der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient von CuAl7. Messungen von Eigenspannungen und Reaktionskräften zeigen, dass Lötverbindungen mit CuAl7 ein ähnliches Eigenspannungsprofil aufweisen wie vergleichbare Schweißverbindungen.

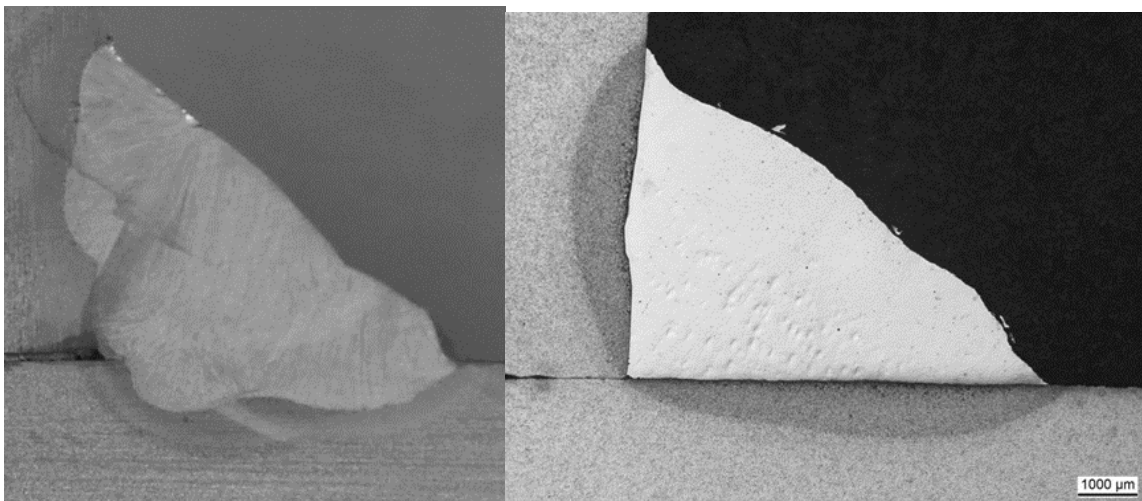


Abb. 2-11: Schweißnaht (links) und Lotnaht (rechts) [79]

### 2.8.3 Normung

In Bezug auf das Lichtbogenlöten existieren im bauaufsichtlichen Bereich derzeit keine Regelungen bezüglich Personalqualifizierung und Verfahrenstechnik. Allerdings ist



das Lichtbogenlöten hinsichtlich der Verfahrenstechnik sehr ähnlich dem Lichtbogenschweißen. Die in DIN EN ISO 9606-1 [3] genormten Anforderungen an die Personalqualifizierung entsprechen in großen Teilen den Anforderungen an das Lichtbogenlöten.

Außerhalb des bauaufsichtlichen Bereichs bieten die technischen Regeln des DVS Anwendungshinweise zum Lichtbogenlöten im Feinblechbereich, in denen technische Anforderungen an die Anlagentechnik und den Lötprozess beschrieben sind [11], [12], [13].

#### 2.8.4 Statische Beanspruchbarkeit

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einsatz des Lichtbogenlöten zum Fügen von Anbauteilen an schwingend hoch beanspruchten Stahlkonstruktionen“ [79] wurde auch die statische Beanspruchbarkeit von Lötverbindungen mit CuAl7 untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass Lötverbindungen hinsichtlich ihrer Versagenscharakteristik unter statischer Beanspruchung ähnlich zu Schweißverbindungen sind. Da der Bruch unter statischer Beanspruchung immer im Lotwerkstoff stattfindet (vgl. Abb. 2-12), ist eine Bemessung gegen die Zugfestigkeit des Lotwerkstoffes sinnvoll.

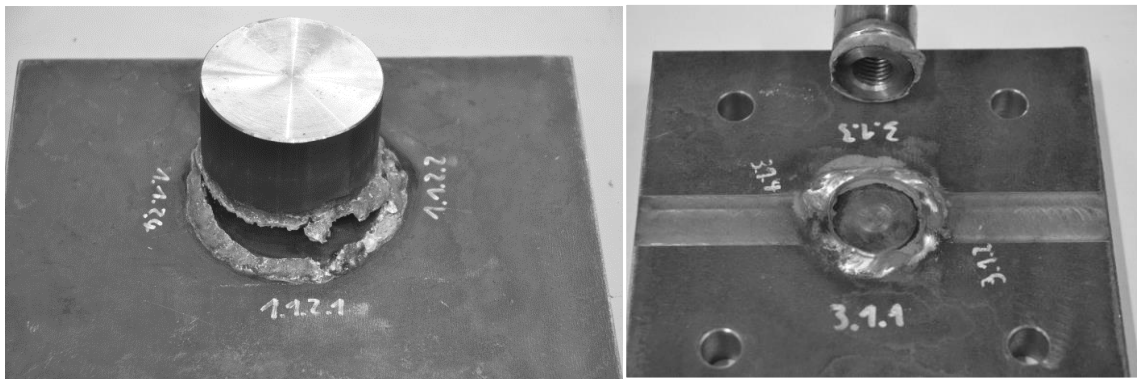


Abb. 2-12: Lotnahtversagen nach statischer Beanspruchung: aufgelötete Teller (links), aufgelötete Buchse (rechts)

Die empfohlene Bemessungsgleichung für statische Beanspruchung ist in Gleichung (2-1) dargestellt. Die charakteristische Festigkeit des Lotwerkstoffes wurde aus Kleinzugproben ermittelt, siehe auch [79], S.127.

Die statische Beanspruchbarkeit ist vergleichbar mit einer Schweißverbindung in S 235. Weitere Informationen der zugrundeliegenden Versuche und der Ableitung charakteristischer Tragfähigkeiten sind in [79] gegeben.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_{u.CuAl7}}{\beta_a \cdot \gamma_{M2}} \quad (2-1)$$

mit:

$$f_{u.CuAl7} = 400 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{Zugfestigkeit des reinen Lotwerkstoffes})$$

$$\beta_a = 1,1 \quad (\text{Korrelationsbeiwert nach [79]})$$

$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad (\text{Teilsicherheitsbeiwert})$$

### **3 Datenbank für Ermüdungsversuche an geschweißten Konstruktionsdetails**

#### **3.1 Übersicht**

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3“ [40] wurde vom Institut für Stahlbau der RWTH Aachen zusammen mit der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des KIT in Karlsruhe sowie dem Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart eine Datenbank für Ermüdungsversuche aufgebaut.

Grundlage für die Datenbank war ein unveröffentlichtes Hintergrunddokument [138], das durch zahlreiche zusätzliche Untersuchungen ergänzt wurde.

Die Datenstruktur wurde in der Datenbanksprache SQL angelegt, die ein einfaches Bearbeiten und Abfragen der Daten ermöglicht. Die Rechte an der Datenbank liegen beim bauforumstahl e.V.

Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit beinhaltete die Datenbank etwa 380 Quellen mit 1900 Versuchsserien und 23.000 Einzelversuchen.

Für die Auswertungen wurden ausschließlich Originaldaten und experimentelle Versuchsdaten aus Primärquellen genutzt.

#### **3.2 Dokumentierte Versuchsparameter**

Die Datenbankstruktur ist so angelegt, dass Einflussgrößen, die die Ermüdungsfestigkeit potenziell beeinflussen, mehreren Kategorien zugeordnet werden können. Neben der Kategorie „Versuchsergebnisse“ mit Spannungsverhältnis, Nennspannungsschwingbreite, Anzahl der Zyklen bis zum Versagen, dem Versagenskriterium und dem Versagensbereich können auch Informationen zur Belastung, dem Material, zu den Schweißnähten, den Prüfbedingungen sowie den geometrischen Eigenschaften jedes einzelnen Prüfkörpers abgefragt werden. Wie detailliert die Einträge in der Datenbank sind, hängt von der Dokumentation in der Primärquelle ab. In der Regel orientieren sich die Primärquellen in der Dokumentation an den jeweiligen Untersuchungszielen. Das führt dazu, dass wichtige geometrische Eigenschaften nicht immer dokumentiert sind.

### 3.3 Übersicht zu aufgeschweißten Steifen, Lamellen und kleinen Aufschweißteilen

Zu den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Details sind etwa 8000 Versuchsergebnisse aus 572 Versuchsserien in 101 Quellen in der Datenbank dokumentiert, vgl. Abb. 3-1. Viele Daten stammen aus den 60er und 70er Jahren hauptsächlich aus England, den USA, Frankreich und Deutschland. Direkte Vergleiche mit aktuellen Untersuchungen zeigen, dass neuere Untersuchungsergebnisse trotz verbesserter Schweißtechnik nicht durch bessere oder schlechtere Ermüdungsfestigkeiten auffallen.

In Eurocode 3 Teil 1-9 [7] sind insbesondere die experimentellen Untersuchungen von GURNEY [54] - [66], FISHER [41] - [45] und HAIBACH [68] - [75] prägend für das heutige Konzept der Ermüdungsbemessung mit dem Nennspannungskonzept.

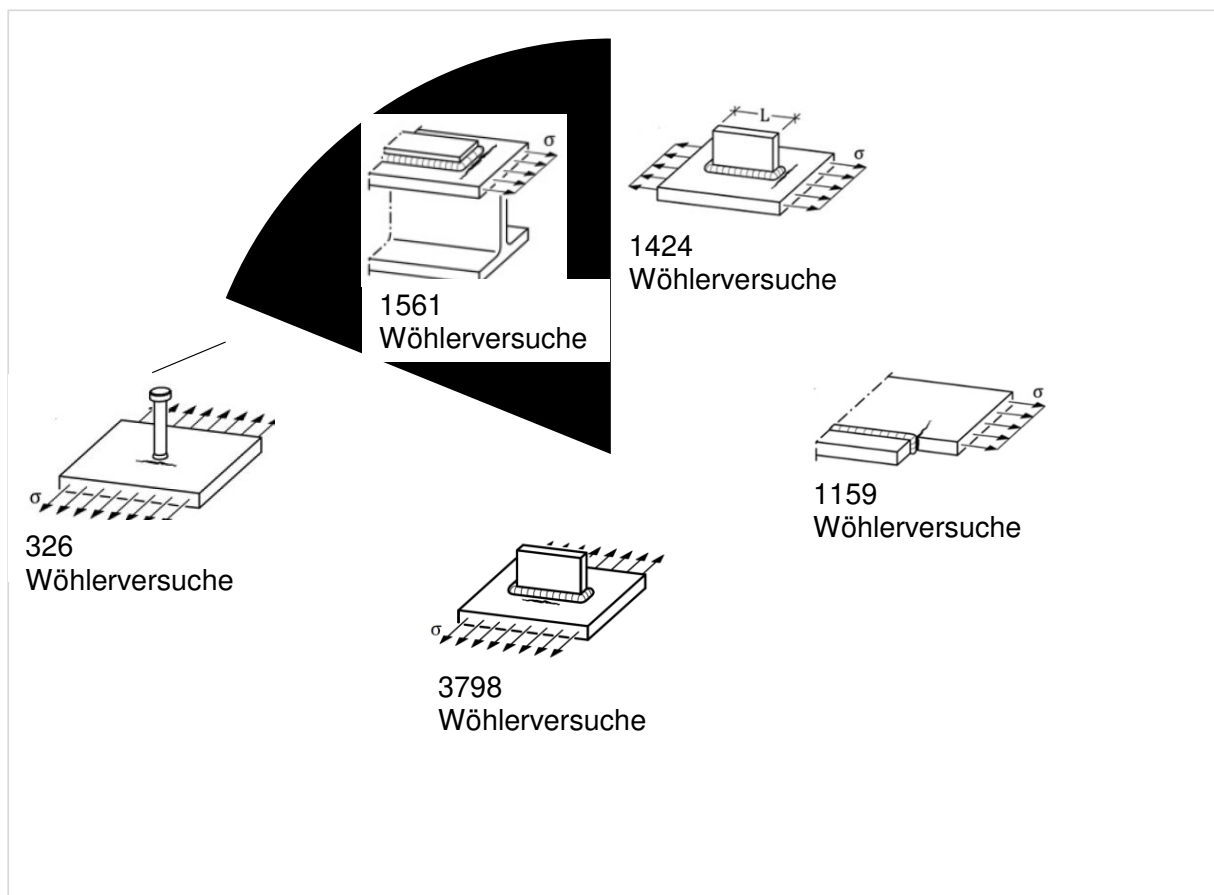


Abb. 3-1: Anzahl der Wöhlerversuche zu aufgeschweißten Steifen, Lamellen und kleinen Aufschweißteilen in der Datenbank

## 4 Statistische Auswertemethoden

### 4.1 Einleitung

Ermüdungsversuche an geschweißten Stahlkonstruktionen können zum Teil erhebliche Streuungen aufweisen. Infolge von mehreren voneinander unabhängigen Einflüssen wie metallurgischen Unterschieden, geometrischen Toleranzen, unterschiedlichen Bauteilmaßstäben, Eigenspannungen, verschiedenen Schweißverfahren, kleinen Schweißnahtunregelmäßigkeiten oder unterschiedlichen Versagensarten weisen entsprechende Versuchsdaten eine zufällige Streuung auf. Für die Herleitung eines charakteristischen Bemessungswerts sowie für die Bewertung von Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit muss diese Streuung berücksichtigt werden. In diesem Kapitel werden die für die Auswertung der experimentellen Daten genutzten statistischen Methoden erläutert.

### 4.2 Normative Anforderungen des Eurocode

Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten statistischen Auswertemethode ist die direkte Bestimmung von Tragfähigkeiten für bestimmte Konstruktionsdetails unter Ermüdungsbeanspruchung. Dafür sind in DIN EN 1990 Anhang D [4] informative Festlegungen für die versuchsgestützte Bemessung gegeben. Die Ableitung von Bemessungswerten erfolgt dabei durch charakteristische Werte, hier repräsentiert durch eine charakteristische Wöhlerkurve, die den 95 % Fraktilwert für die Überlebenswahrscheinlichkeit darstellt.

Für die Herleitung der charakteristischen Wöhlerlinien müssen die Streuungen der Versuchsergebnisse, die statistische Unsicherheit infolge begrenzter Versuchsanzahl und statistische Vorinformationen berücksichtigt werden. Die statistische Unsicherheit infolge begrenzter Versuchsanzahl spielt in den folgenden Auswertungen aufgrund der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Versuche nur eine untergeordnete Rolle, wird aber durch die Anwendung der t-Verteilung implizit berücksichtigt, siehe auch Kapitel 4.6.

In den folgenden Auswertungen wird als statistische Vorinformation die Neigung  $m$  der Wöhlerlinien als bekannt vorausgesetzt. Für die hier untersuchten geschweißten und kerbscharfen Details ist die Annahme  $m = 3$  durch eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen belegt [73].

Abweichend zu den in DIN EN 1993-1-9 [7] S.19 angedeuteten Toleranzintervallen (definiert durch das 95 % Quantil für Überleben mit 75 % Vertrauenswahrscheinlichkeit) wird in DIN EN 1990 Anhang D [4] das Prognoseintervall (auch Vorhersagenintervall, engl.: prediction interval [67], S. 27 oder predictive method of fractile estimation [84], S. A-22 ) für Fraktilschätzungen herangezogen. Untersuchungen in [37] zeigen, dass der Unterschied zwischen Toleranzintervall und Prognoseintervall für statistische Auswertungen mit bekannter Wöhlerlinienneigung vernachlässigbar ist.

### 4.3 Widerstandsmodell

Das Widerstandsmodell (siehe auch Abb. 2-9) bezieht sich auf den Zeitfestigkeitsbereich der Ermüdungsfestigkeit.

Nach einem Modell von Basquin [20] kann ein Zusammenhang zwischen der Spannungsschwingbreite  $S$  und der Anzahl der Schwingspiele bis zum Versagen  $N$  für den Zeitfestigkeitsbereich mithilfe einer Exponentialfunktion angenähert werden, vgl. Gleichung (4-1):

$$N = a \cdot S^{-m} \quad (4-1)$$

Die sogenannte Wöhlerlinie kann auch als logarithmisch linearer Zusammenhang dargestellt werden, siehe Gleichung (4-2):

$$\log N = \log a - m \cdot \log S \quad (4-2)$$

Der Parameter  $a$  beschreibt dabei den Schnittpunkt der Wöhlerlinie mit der Abszisse bei  $S = 10^0 = 1$ , siehe Abb. 4-1. Der Parameter  $m$  beschreibt die inverse Neigung der Wöhlerlinie.

Um den log-linearen Zusammenhang zwischen der Spannungsschwingbreite  $S$  und der Anzahl der Schwingspiele bis zum Versagen  $N$  zu bestimmen, müssen die unbekannt Parameter  $\hat{a}$  und  $\hat{m}$  aus der Stichprobe geschätzt werden.

#### 4.4 Lineare Regression

Eine Möglichkeit, die unbekannt Parameter aus der Stichprobe zu schätzen, ist die lineare Regression. Kann für die Stichprobe eine logarithmische Normalverteilung angenommen werden (vgl. Kapitel 4.5), ist eine Schätzung mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate möglich [36]. Die Parameter  $\hat{m}$  und  $\hat{a}$  können mit den Gleichungen (4-3) und (4-4) ermittelt werden. Der Zirkumflex über der Parameterbezeichnung zeigt an, dass der entsprechende Wert aus der Stichprobe geschätzt wird.

$$\hat{m} = - \frac{n \cdot \sum(\log S_i \cdot \log N_i) - \sum \log S_i \cdot \sum \log N_i}{n \cdot \sum(\log S_i)^2 - (\sum \log S_i)^2} \quad (4-3)$$

$$\log \hat{a} = \frac{1}{n} \cdot \left( \sum \log N_i + m \cdot \sum \log S_i \right) \quad (4-4)$$

Dabei ist  $n$  die Anzahl der Versuche und der Index  $i$  die Laufvariable des einzelnen Wöhlerversuches.

Mithilfe der aus der Stichprobe geschätzten Parameter kann die Funktion der Wöhlerlinie, Gleichung (4-2) aufgestellt werden.

Die aus der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Ausgleichsgerade kann als Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit bzw. als Wöhlerlinie mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit betrachtet werden. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abb. 4-1 gegeben.

Für alle statistischen Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wurde die inverse Neigung  $m = 3$  der Wöhlerlinie als bekannt vorausgesetzt.

Statistische Auswertungen unter Berücksichtigung vom  $m$  als Parameter mit statistischer Unsicherheit werden in Kapitel 4.7 diskutiert.

Die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate setzt voraus, dass die Population normalverteilt ist (vgl. Kapitel 4.5). Sie ist nicht geeignet zur Berücksichtigung von Durchläufern, also Versuchen, die das Abbruchkriterium nicht erreicht haben.

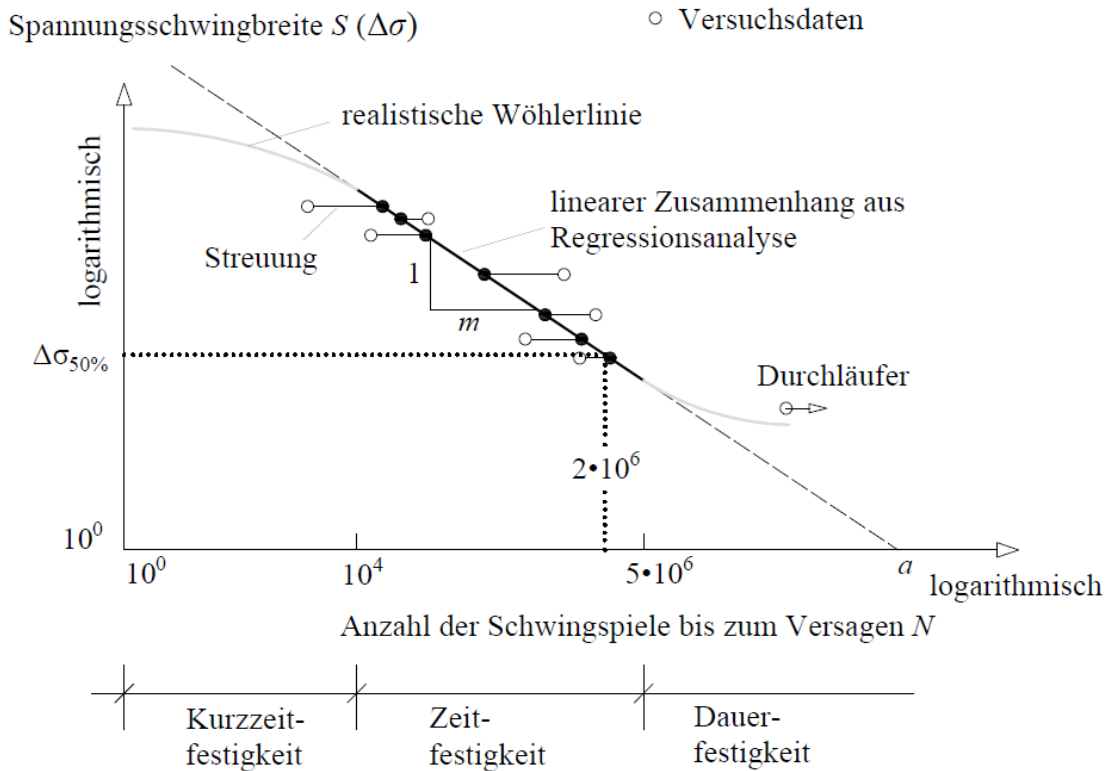


Abb. 4-1: Lineare Regression von Ermüdungsversuchen zur Herleitung einer Regressionsgeraden

Durchläufer werden in der Statistik als zensierte Daten behandelt. Grundsätzlich ist eine statistische Auswertung unter Berücksichtigung dieser Daten möglich. Die Maximum-Likelihood-Methode ermöglicht die Schätzung von Parametern für beliebige Verteilungsfunktionen auch in Zusammenhang mit zensierten Daten. Entsprechende Ansätze sind in [31], [103] und [127] gegeben.

#### 4.5 Verteilungsfunktion

Eine statistische Auswertung nach DIN EN 1990 Anhang D [4] setzt eine normalverteilte oder eine logarithmisch normalverteilte Population voraus.

Eine entsprechende Verteilungsfunktion lässt sich mithilfe der Standardabweichung  $s$  sowie eines Mittelwerts beschreiben. Als Mittelwert wird die mithilfe der linearen Regression geschätzte mittlere Wöhlerlinie angesetzt.

Die resultierende Standardabweichung  $s$  kann mit Gleichung (4-5) berechnet werden. Die Neigung  $m$  wird dabei als bekannt vorausgesetzt.



$$s = \sqrt{\frac{\sum[\log N_i - (\log \hat{a} - m \cdot \log S_i)]^2}{n - 1}} \tag{4-5}$$

Dabei ist  $n-1$  der Freiheitsgrad für den Fall, dass der Parameter  $m$  aus Vorversuchen bekannt ist.

Der Freiheitsgrad ermittelt sich aus der Anzahl der zur Verfügung stehenden Versuche  $n$  abzüglich der Anzahl der Parameter, die aus der Stichprobe geschätzt werden sollen.

Die Annahme, dass die Grundgesamtheit einzelner Konstruktionsdetails einer logarithmischen Normalverteilung folgt, lässt sich an Konstruktionsdetails, zu denen eine große Datenbasis vorhanden ist, bestätigen.

In Abb. 4-2 sind die für die Ableitung eines charakteristischen Kerbfalls genutzten experimentellen Daten am Konstruktionsdetail Längssteife (unter Vernachlässigung der Längssteifenlänge) dargestellt. Ergänzt ist ein Histogramm der Messwerte bezogen auf den Parameter  $\log a$ . Die Darstellung veranschaulicht, dass die Werte nahezu logarithmisch normalverteilt streuen.

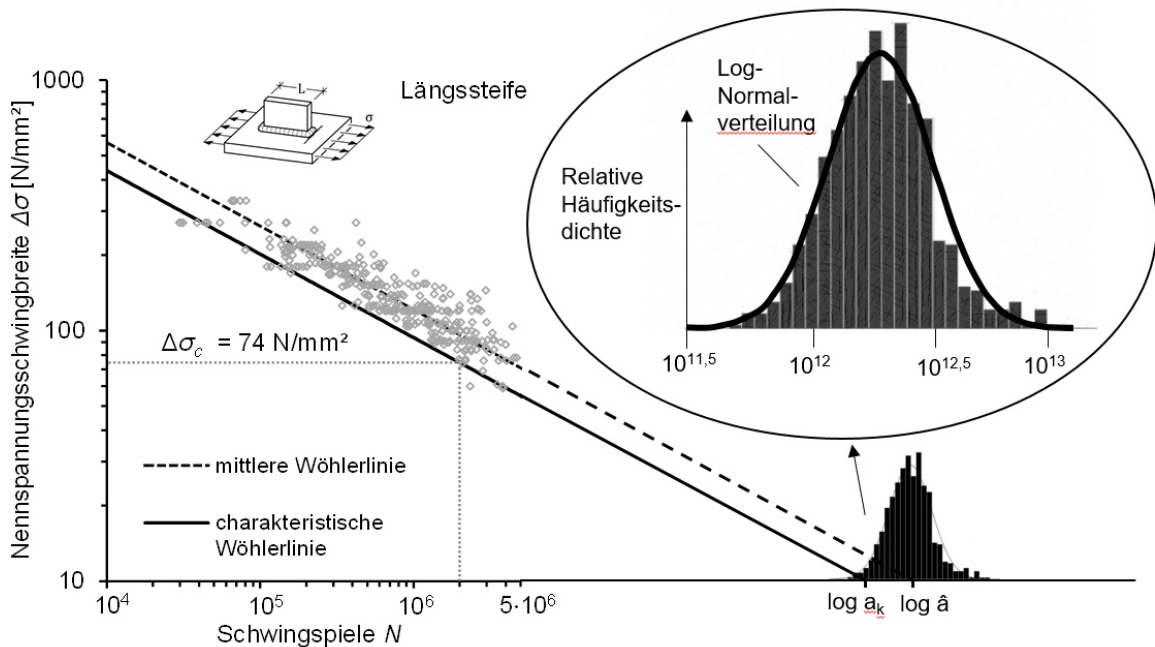


Abb. 4-2: Versuche am Konstruktionsdetail Längssteife und Verteilung der Ergebnisse als Histogramm bezogen auf  $\log a$

Neben der Standardabweichung  $s$  kann als Kennzahl für die Breite einer Verteilung auch die Streuspanne  $T_N$  herangezogen werden. Sie ist allgemein definiert als Quotient aus der 90% und der 10% Überlebenswahrscheinlichkeit einer Stichprobe. Für logarithmische Normalverteilungen gilt näherungsweise der in Gleichung (4-6) gegebene Zusammenhang.

$$1 : T_N \approx 1 : 10^{2,56 \cdot s} \quad (4-6)$$

Um die Breite einer logarithmischen Normalverteilung zu beurteilen, ist die Streuspanne  $T_N$  aussagekräftiger als die Standardabweichung  $s$ , da der Wert durch die logarithmische Betrachtung des Mittelwertes der Stichprobe nicht verzerrt wird. In der Fachliteratur zur Ermüdungsfestigkeit wird die Streuspanne vorzugsweise zum Vergleich von Streubreiten herangezogen, vgl. auch [69], S. 32 – 33.

#### 4.6 Ermittlung charakteristischer Wöhlerlinien

Für die Ermittlung charakteristischer Ermüdungsfestigkeiten mit 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit wird nach DIN EN 1990 Anhang D [4] ein sogenanntes Prognoseintervall genutzt.

Das Prognoseintervall berücksichtigt mithilfe der Student  $t$  Verteilung die Unsicherheit, die aus der Größe der Stichprobe resultiert. Die  $t$  Verteilung berücksichtigt, dass die Schätzfunktion für den Mittelwert einer Stichprobe bei einer normalverteilten Population  $t$ -verteilt ist. Die  $t$  Verteilung ist ursprünglich kein Werkzeug für die Fraktilschätzung, wird aber im Rahmen des Prognoseintervalls dafür herangezogen.

Die  $t$  Werte hängen vom Signifikanzniveau  $\alpha$  und der Stichprobengröße  $n$  ab. Die tabellierten  $t$  Werte können z.B. aus [67] entnommen werden. Mithilfe des Prognoseintervalls kann der Wert  $k_n$  ermittelt werden, vgl. Gleichung (4-7):

$$k_n = t_{1-\alpha, n-1} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (4-7)$$

Entsprechende  $k_n$  Werte können auch direkt aus Tabelle D.1 in DIN EN 1990 Anhang D [4] entnommen werden, vgl. Tab. 4-1.

Mit zunehmender Anzahl an Versuchen nähert sich die  $t$  Verteilung der logarithmischen Normalverteilung der zugrunde liegenden Population.

Wenn die Standardabweichung aus der Stichprobe geschätzt wird, sollte die Zeile mit „s unbekannt“ gewählt werden. Obwohl nach DIN EN 1990 Anhang D [4] eine statistische Auswertung mit unbekannter Standardabweichung bereits ab drei Versuchskörpern möglich ist, wird empfohlen, dass die Stichprobe aus mindestens zehn Versuchsergebnissen bestehen sollte. Um für ein Konstruktionsdetail einen Bemessungswert für die Ermüdungsfestigkeit abzuleiten, der möglichst alle zur Streuung beitragenden Einflussgrößen in der Stichprobe beinhaltet, sind in der Regel aber noch mehr Versuche erforderlich.

Tab. 4-1:  $k_n$  Faktor für charakteristische Werte mit 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit (Faktoren nach DIN EN 1990 [4])

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
s bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
s unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Mithilfe des aus der Stichprobe geschätzten Parameters  $\log \hat{a}$ , vgl. Gleichung (4-4), der Standardabweichung  $s$ , vgl. Gleichung (4-5) und dem  $k_n$  Faktor aus Gleichung (4-7) oder Tab. 4-1 kann ein charakteristischer Wert  $\log a_k$  für die Wöhlerlinie abgeleitet werden, vgl. Gleichung (4-8).

$$\log a_k = \log \hat{a} - k_n \cdot s \tag{4-8}$$

Der Parameter  $\log a_k$  beschreibt den Schnittpunkt der charakteristischen Wöhlerlinie mit der Abszisse bei  $S = 10^0 = 1$ . Das Vorgehen ist schematisch in Abb. 4-3 dargestellt, (vgl. auch Abb. 4-2).

Der Referenzwert für die Ermüdungsfestigkeit bei 2 Millionen Schwingspielen lässt sich berechnen, indem mithilfe der umgestellten Gleichung (4-2) die Spannungsschwingbreite der charakteristischen Wöhlerlinie bei 2 Millionen Schwingspielen bestimmt wird, vgl. Gleichungen (4-9) und (4-10).

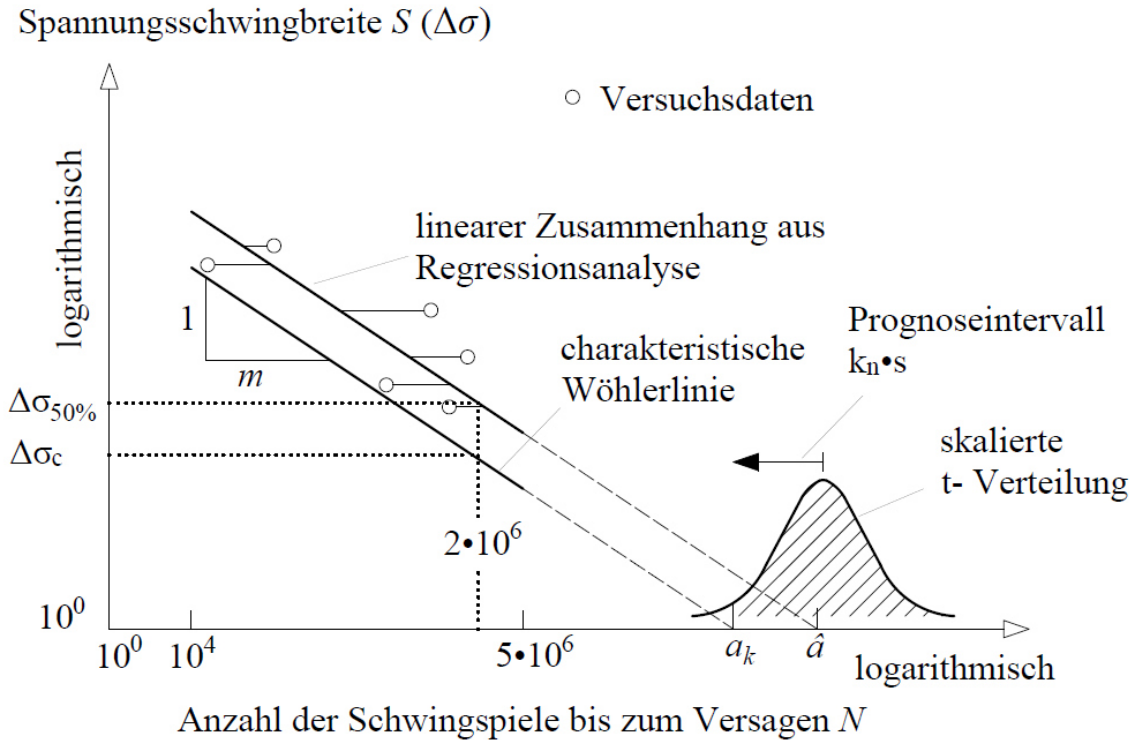


Abb. 4-3: Schematisches Vorgehen zur statistischen Auswertung einer Datenmenge für die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit

$$\log S_c = \frac{\log(2 \cdot 10^6) - \log a_k}{m} \quad (4-9)$$

$$\Delta\sigma_c = 10^{\log S_c} \quad (4-10)$$

Das dargestellte Verfahren hat sich für die Auswertung großer Datenmengen bewährt. Die abgeleiteten charakteristischen Wöhlerlinien in Kapitel 5 grenzen Streufelder zuverlässig nach unten ab.

#### 4.7 Ermittlung charakteristischer Wöhlerlinien mit unbekannter Neigung

Für bestimmte Anwendungsfälle kann die Neigung der Wöhlerlinie nicht als bekannt vorausgesetzt werden.

Aufgrund des zusätzlichen Parameters mit statistischer Unsicherheit ändert sich der Wert von  $k_n$  aus Gleichung (4-7) zu dem Ausdruck in (4-11):

$$k_n = t_{1-\alpha, n-2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log S - \overline{\log S})^2}{\sum (\log S_i - \overline{\log S})^2}} \quad (4-11)$$

Dabei ist  $\overline{\log S}$  der Mittelwert der getesteten Spannungsschwingbreiten und kann auch als „Schwerpunkt“ der Versuchspunkte interpretiert werden.

Der zusätzliche Term unter der Wurzeln in (4-11) führt letztlich zu einer hyperbolischen Funktion des Prognoseintervalls und damit auch der charakteristischen Wöhlerlinie, vgl. Abb. 4-4.

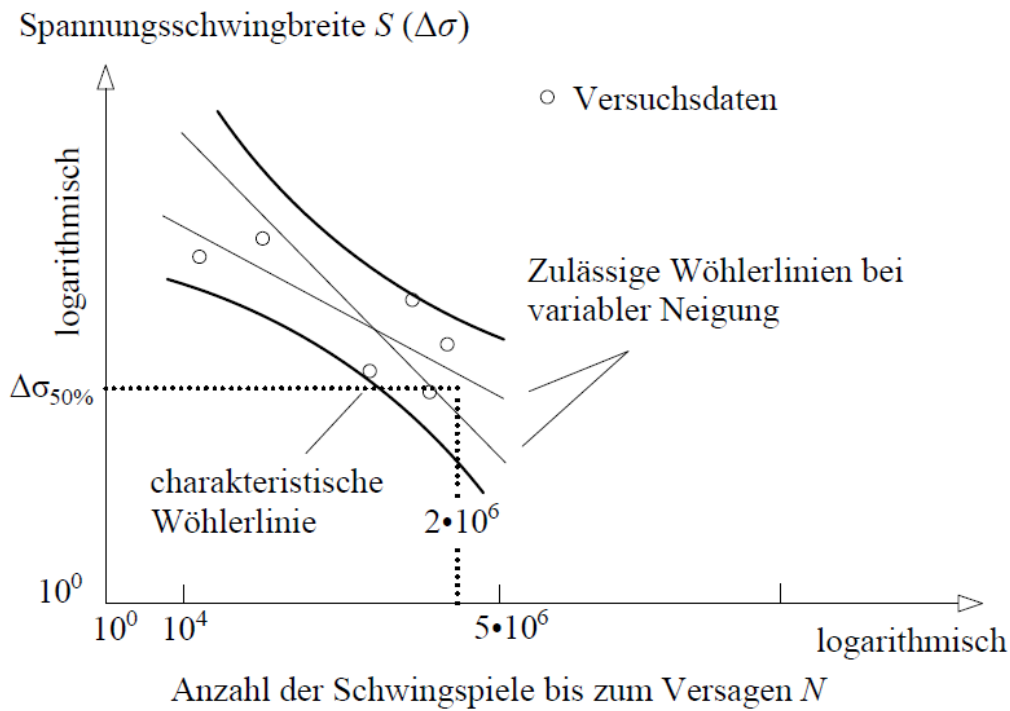


Abb. 4-4: Schematische Darstellung von Intervallgrenzen für das Prognoseintervall

Dabei nähert sich das Intervall im Schwerpunkt  $\overline{\log S}$  der Versuche am nächsten der Regressionsgerade.

Die Berücksichtigung der Neigung  $m$  als Parameter mit statistischer Unsicherheit ist aus mathematischer Sicht sinnvoll, da  $m$  unterschiedliche Werte annehmen kann, ohne die Intervallgrenzen zu schneiden. Aus praktischer Sicht ist es dagegen problematisch, da charakteristische Kerbfälle in DIN EN 1993-1-9 [7] logarithmisch lineare Funktionen beschreiben und  $m$  nicht als „auf der sicheren Seite liegend“ berücksichtigt werden kann. Für die Ableitung praxistauglicher Kerbfälle ist das Verfahren aus diesem Grund weniger empfehlenswert.

Eine alternative Möglichkeit bietet DIN EN 1990 Anhang D 8 [4], in dem ein standardisiertes Auswerteverfahren zur Bestimmung eines Widerstandsmodells mit mehreren statistisch unsicheren Parametern beschrieben wird.

## 4.8 Statistische Methoden zur Untersuchung von Einflüssen auf die Ermüdungsfestigkeit

### 4.8.1 Übersicht

Eine im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Fragestellung ist der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Ermüdungsfestigkeit. In Abhängigkeit der Fragestellung müssen dabei Mittelwerte und möglicherweise Streuungen von Versuchswerten berücksichtigt werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei immer auf Untersuchungen, bei denen die Abhängigkeit einer einzelnen Variablen auf die Ermüdungsfestigkeit analysiert wird.

Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen Versuchen, deren Konzeption darauf angelegt war, einen entsprechenden Einfluss zu untersuchen, und Metavergleichen, bei denen Untersuchungen aus unterschiedlichen Publikationen zusammengefasst werden.

Erstere Variante ist vorzuziehen, um einen Ermüdungseinfluss grundsätzlich zu bewerten, da der zu untersuchende Parameter und dessen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit in der Regel „isoliert“ betrachtet werden kann.

Bei Metavergleichen ist davon auszugehen, dass sich auch weitere Parameter ändern und damit keine isolierte Betrachtung der untersuchten Einflussgröße möglich ist. Bei einem Vergleich von wenigen Serien besteht die Gefahr einer Fehlinterpretation, wenn sich eine Abhängigkeit abzeichnet, für die der untersuchte Parameter nicht ursächlich ist.

Für die explizite Berücksichtigung einer Einflussgröße für einen Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit sollte ein Parameter vor dem Hintergrund weiterer streuender Parameter einen signifikanten Einfluss zeigen.

Die Berücksichtigung einer Einflussgröße für die Ermüdungsbemessung ist empirisch begründet, wenn ein Parameter im Metavergleich einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausübt, der auch bei einer isolierten Untersuchung des Parameters deutlich wird.

### 4.8.2 Vergleich von Regressionsgeraden

Ein Vergleich von Regressionsgeraden ist eine einfache Variante der Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen. Hierbei werden unter Vernachlässigung der Streuung Versuchsserien oder Gruppen von Versuchsserien gegenübergestellt. Das Verfahren

ist geeignet, um Einflüsse auszuschließen, beispielsweise wenn eine vermeintlich positive Einflussgröße die gleiche oder eine schlechtere Ermüdungsfestigkeit aufweist als die entsprechende Referenz.

### 4.8.3 Vergleich von normierten Versuchsdaten

Spannungsschwingbreite  $S (\Delta\sigma)$

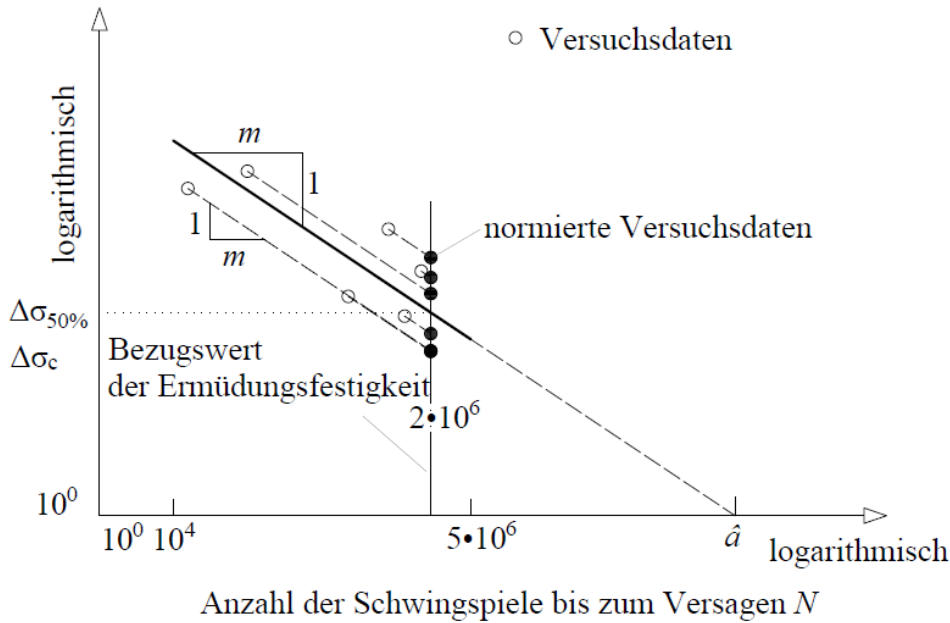


Abb. 4-5: Schematische Darstellung zur Ermittlung von Streubändern, bezogen auf den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Millionen Schwingspielen

Eine weitere Möglichkeit signifikante Einflussgrößen zu untersuchen, ist der Vergleich bezogener Versuchswerte. Dabei wird die Neigung der Wöhlerlinie als bekannt vorausgesetzt und Versuchsergebnisse werden entlang der bekannten Wöhlerlinienneigung auf den Bezugswert bei 2 Millionen Schwingspielen projiziert. Die normierten Versuchsdaten können dann vereinfacht als Streuband dargestellt werden. Dieses Vorgehen ist schematisch in Abb. 4-5 dargestellt.





## 5 Systematische Auswertung bestehender Versuchsreihen zu geschweißten Konstruktionsdetails

### 5.1 Übersicht und Herangehensweise

Im Rahmen dieses Kapitels werden Ermüdungsversuche aus der in Kapitel 3 vorgestellten Datenbank mit den in Kapitel 4 beschriebenen statistischen Methoden ausgewertet.

Die Auswertungen erfolgen mithilfe der in den Versuchen gemessenen und dokumentierten Nennspannung und den Schwingspielen bis zum Versagen. Die Auswertung erfolgt an diesen Versuchsdaten ohne weitere Korrektur zur Berücksichtigung eventueller Einflussgrößen wie Mittelspannung oder Geometrie.

Für die direkte Untersuchung einer Einflussgröße, (beispielsweise den Einfluss der Endgeometrie bei Längssteifen in Kapitel 5.2.3) werden immer zwei Serien gegenübergestellt, die bis auf den untersuchten Parameter (und zufällig streuenden Fertigungseinflüssen) gleich sind. Die Vergleiche stammen aus Experimenten, die gezielt zur Untersuchung der entsprechenden Einflussgröße angelegt waren. Dieser direkte Vergleich fällt für die in dieser Arbeit ausgewählten Untersuchungen immer eindeutig aus, weshalb auf die Dokumentation eines Signifikanztests (beispielsweise eines Zwei Stichproben t Tests) verzichtet wird.

Für Metaanalysen, also für die Ableitung charakteristischer Ermüdungsfestigkeiten spezieller Konstruktionsdetails und für den Vergleich von Versuchsserien aus unterschiedlichen Primärquellen, werden Ermüdungsversuche zusammen ausgewertet. Dabei werden nur Versuche mit konstanter Amplitude im Zugschwellbereich berücksichtigt. Eine weitere Unterteilung wird nicht vorgenommen. Potenzielle Einflüsse aus Geometrie, Material oder anderen Bedingungen werden nicht explizit berücksichtigt, wenn sie keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Sie werden in den Auswertungen indirekt über die Streuung der Versuchsergebnisse berücksichtigt.

Dieser Ansatz wurde aus mehreren Gründen gewählt. Aus statistischer Sicht zeigen die für die Kerbfallableitung herangezogenen Datensätze durchgehend eine logarithmisch normalverteilte Streuung, siehe auch Kapitel 4.5. Entsprechend dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitstheorie ist die Normalverteilung das Resultat einer großen Anzahl von unabhängigen Einflüssen, die jeweils einen unbedeutenden

Beitrag zur Streuung liefern, [143], S. 23, also im Rahmen der statistischen Auswertung nicht unbedingt explizit berücksichtigt werden müssen.

Es ist davon auszugehen, dass trotz der umfangreichen und vielfältigen experimentellen Datenbasis die bekannten Versuche, die fast ausschließlich aus Laboruntersuchungen stammen, nur einen Teil der tatsächlichen Vielfalt von Varianten entsprechender Konstruktionsdetails in der Praxis ausmachen. Für die Empfehlung von konkreten Bemessungswerten (siehe Kapitel 8) ist die Berücksichtigung einer möglichst großen Vielfalt von detailspezifischen Varianten in Bezug auf Geometrie, Material und anderen Randbedingungen in der wissenschaftlichen Herleitung sinnvoll.

## 5.2 Längssteifen

### 5.2.1 Übersicht

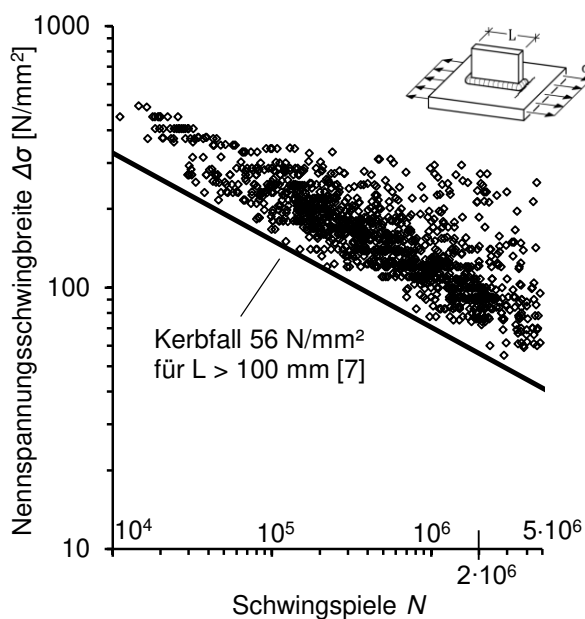


Abb. 5-1: Ergebnisse von Wöhlerversuchen zum Konstruktionsdetail Längssteife, Daten aus [145], [128], [108], [29], [81], [56], [32], [60], [59], [64], [58], [54], [62], [144], [89], [131], [153], [150], [151], [78], [50], [119], [123], [147], [22], [61], [39]

Die bekannten experimentellen Untersuchungen zum Konstruktionsdetail Längssteife berücksichtigen grundsätzlich nur die zyklische Beanspruchung des Grundbleches bzw. des Flansches. Sie führt (für die Variante im Schweißzustand) zu einem Versagen im Schweißnahtübergang des Steifenendes.

Zu dem Konstruktionsdetail sind umfassende Ermüdungsversuche bekannt. In Abb. 5-1 sind über 1400 Wöhlerversuche zum Detail Längssteife zusammengefasst, anhand derer einzelne Einflüsse genauer untersucht wurden.

Der Datensatz erlaubt die Auswertung von Einflüssen aus Schweißnahtnachbehandlungen durch Schleifen der Nahtenden sowie Einflüsse aus der Steifenendgeometrie und der Steifenlänge. Alle genannten Einflüsse sind in DIN EN 1993-1-9 [7] über unterschiedliche Kerbfälle berücksichtigt.

## 5.2.2 Schweißnahtnachbehandlung durch Schleifen der Nahtübergänge

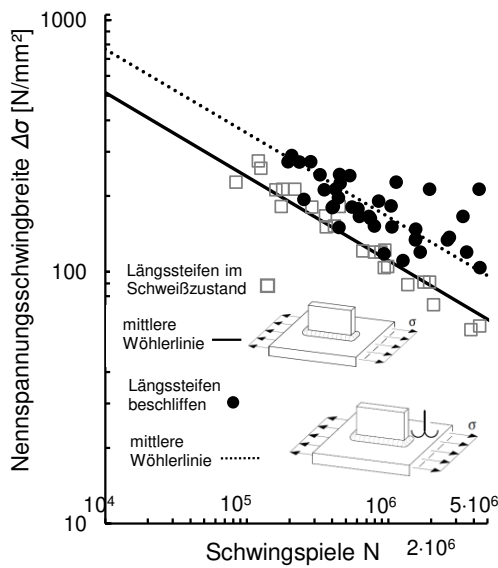


Abb. 5-2: Vergleich von Ergebnissen für Längssteifen im Schweißzustand und mit geschliffenen Kerbübergängen an den Endnähten, Daten aus [58]

Im Brückenbau wird häufig eine Variante der Längssteife verwendet, bei dem die Enden angefast oder mit einem Radius von 150mm ausgeführt werden und ein gleichmäßiger Übergang durch Schleifen der Nahtübergänge hergestellt wird. Das Detail wird in DIN EN 1993-1-9 [7] mit Kerbfall 80 bewertet. Zu dem Detail sind in der Form kaum experimentelle Untersuchungen bekannt.

Ein reines Nachbehandeln der Schweißnahtübergänge an rechteckigen Steifen wurde von GURNEY in [58] untersucht, vgl. Abb. 5-2. Die Untersuchungen zeigen eine deutliche Verbesserung der Ermüdungs-

festigkeit durch das Bearbeiten der Nahtübergänge. Die in Abb. 5-2 dargestellten geschliffenen Längssteifen unterteilen sich in kerbarm und kerbfrei bearbeitete Übergänge. Zudem wurden einige Versuchskörper nicht mit der üblichen umlaufenden Kehlnaht ausgeführt, sondern voll durchgeschweißt. Bei der Variante der kerbfrei bearbeiteten Übergänge mit umlaufender Kehlnaht war Schweißnahtwurzelsversagen das maßgebende Kriterium. Die Varianten mit voll durchgeschweißter Naht und kerbfrei bearbeiteten Schweißnahtübergängen zeigten im Versuch folglich die besten Ermüdungsfestigkeiten. GURNEY empfiehlt daher das Durchschweißen der Naht, vgl. [58], S. 609. Um ein Schweißnahtwurzelsversagen zu verhindern, ist es auch ausreichend, nur die kritischen Nahtenden durchzuschweißen. Einige wenige weitere Untersuchungen an Bauteilversuchen mit kerbfrei bearbeiteten Kerbübergängen und angefasten Enden sind in [23] gegeben. Die Untersuchungen zeigen ebenfalls eine verbesserte Ermüdungsfestigkeit des Details gegenüber der Variante im Schweißzustand.

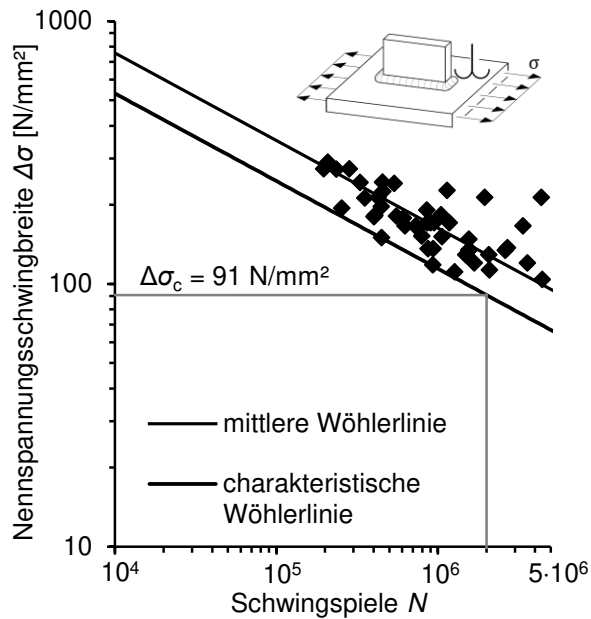


Abb. 5-3: Ermittlung Bemessungswert für kerbfrei bearbeitete Längssteifen, Daten aus [23], [58]

In Abb. 5-3 ist eine Darstellung aller bekannten Untersuchungen zu Längssteifen mit kerbfrei bearbeiteten Schweißnahtübergängen gegeben. Auf Grund der wenigen Daten werden auch Bauteilversuche mit Schwellbeanspruchung ( $R = -1$ ) herangezogen, die in [23] vergleichbare Ermüdungsfestigkeiten wie die Zugschwellvariante mit  $R = 0,5$  aufweisen.

Der errechnete Wert der charakteristischen Ermüdungsfestigkeit für kerbfrei bearbeitete Schweißnahtübergänge an Längssteifen ergibt  $\Delta\sigma_c = 91$ .

### 5.2.3 Steifenendgeometrie

Übliche Längssteifengeometrien im Brückenbau sind Ausführungen mit Fasung oder Endradius. Die Ausführungen ermöglichen einen ebenen Übergang zwischen dem Trägerflansch und der Steife. Die Fasung kann auch die Zugänglichkeit beim Schleifen der Kerbübergänge verbessern. Voneinander unabhängige experimentelle Untersuchungen zeigen allerdings deutlich, dass eine Endgeometrie mit Endfasung im Schweißzustand keine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit bewirkt. In Abb. 5-4 sind entsprechend Untersuchungen an Kleinversuchskörpern von BOOTH [27] dargestellt. Das gleiche Verhalten zeigen auch Bauteilversuche von BERGER [23], siehe Abb. 5-5. In beiden Untersuchungen schneidet die Variante mit Endfasung im Schweißzustand sogar schlechter ab als die einfache rechteckige Variante.

Ein vergleichbares Verhalten zeigt sich auch an Knotenblechen am Blechrand, vgl. Kapitel 5.3.2. In Kapitel 8.2.1 ist ein Erklärungsansatz für den fehlenden Einfluss gegeben.

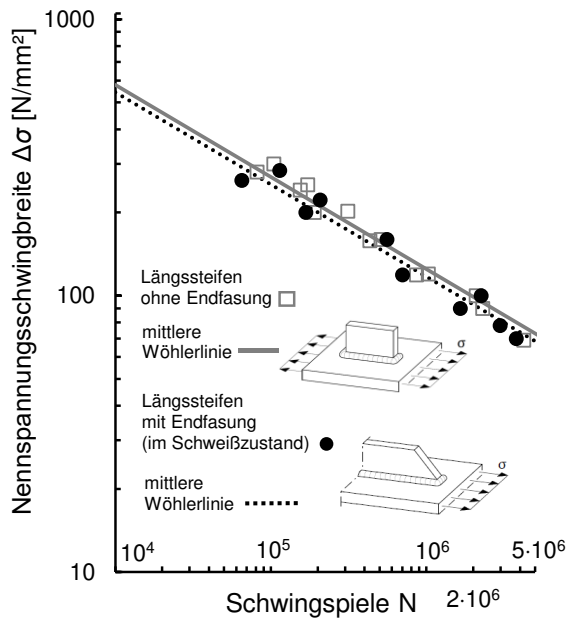


Abb. 5-4: Vergleich von Ergebnissen für Längssteifen mit und ohne Endfasung, Daten aus [27]

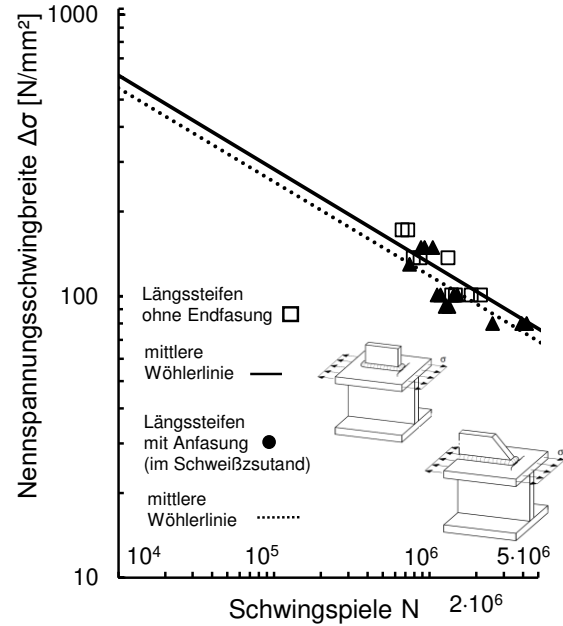


Abb. 5-5: Vergleich von Ergebnissen für Längssteifen mit und ohne Endfasung (Bauteilversuche), Daten aus [23]

#### 5.2.4 Steifenlänge

Untersuchungen an längs aufgeschweißten Lamellen von FISHER [43] S. 260-262 zeigten in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit eine gewisse Längenabhängigkeit, die in DIN EN 1993-1-9 auch für Längssteifen berücksichtigt wird, siehe auch Kapitel 2.4.3. [125]. Die Auswertung der vorliegenden Daten aus der in Kapitel 3 vorgestellten Datenbank lässt dagegen keinen Längeneinfluss erkennen, vgl. Abb. 5-6.

Die untere Begrenzung der Streubänder für 200 mm lange Längssteifen liegt bei einer relativ niedrigen Ermüdungsfestigkeit. Das ist auf generell große Streuungen in den zugrundeliegenden Versuchen zurückzuführen. Alle dargestellten Versuche in Abb. 5-6 mit 200 mm langen Längssteifen kommen aus einer Quelle [131], die möglicherweise dem gleichen ungünstig wirkenden Einfluss unterliegen.

Ein geometrischer Einfluss lässt sich nur für sehr kleine Aufschweißteile < 50 mm beobachten (vgl. Kapitel 5.6), wobei entsprechende Bauteile üblicherweise nicht mehr als Längssteife bezeichnet werden. In einer anderen aktuellen Metastudie [125] wird die Länge der Längssteife abweichend zu den hier präsentierten Ergebnissen als signifikanter Parameter eingeschätzt. Zudem liegen momentan nur sehr wenige Versuchsdaten zu Längssteifen vor, die länger als 200 mm sind.

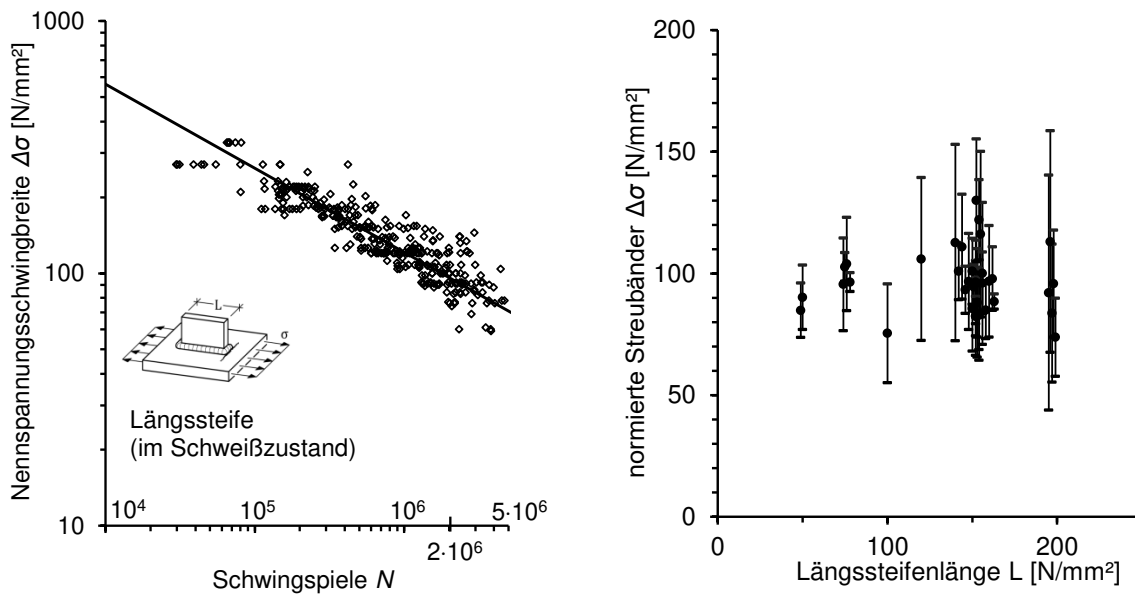


Abb. 5-6: Versuchsergebnisse mit dokumentierten Längssteifenlängen (links) und Darstellung von normierten Streubändern der einzelnen Versuchsserien mit verschiedenen Längssteifenlängen  $L$  (rechts),

Daten aus [29], [54], [58], [64], [60], [59], [62], [56], [89], [108], [145], [144]

### 5.2.5 Blechdicke

Abb. 5-7 zeigt die Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an 25 mm und 38 mm dicken Grundblechen mit aufgeschweißten Längssteifen. Im Gegensatz zu Empfehlungen in [83], in denen für dickere Grundblechdicken eine niedrigere Ermüdungsfestigkeit definiert ist, zeigen die Versuche an dicken Blechen in Abb. 5-7 sogar etwas bessere Ergebnisse. Ähnliche Ergebnisse zeigen auch Untersuchungen in [35].

### 5.2.6 Bauteilversuche und Kleinversuche

Für Längssteifen wird in der Regel angenommen, dass sich Kleinversuche und Bauteilversuche in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeiten nicht unterscheiden. Das ist auf vergleichbare Eigenspannungszustände zurückzuführen ist, siehe auch Kapitel 2.4.4. In Abb. 5-8 sind experimentelle Untersuchungen an Kleinversuchen und Bauteilversuchen aus [56] unter gleichbleibenden Randbedingungen dargestellt. Der Vergleich zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen Bauteil und Kleinversuchen.

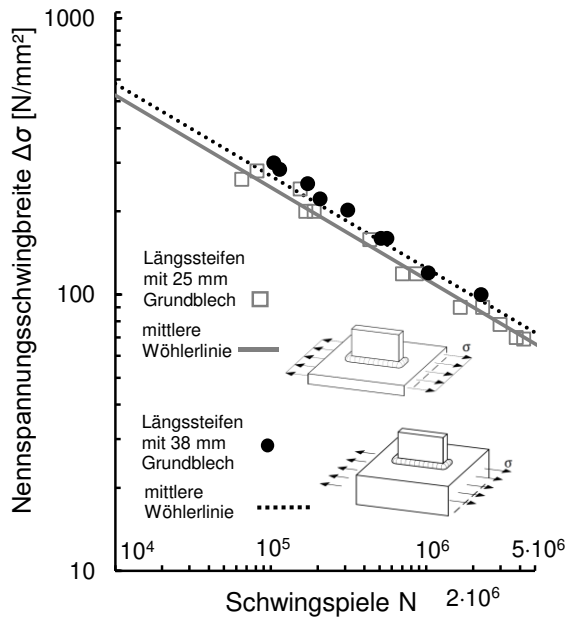


Abb. 5-7: Vergleich von Versuchsergebnissen für Längssteifen mit 25 mm und mit 38 mm dickem Grundblech, Daten aus [27]

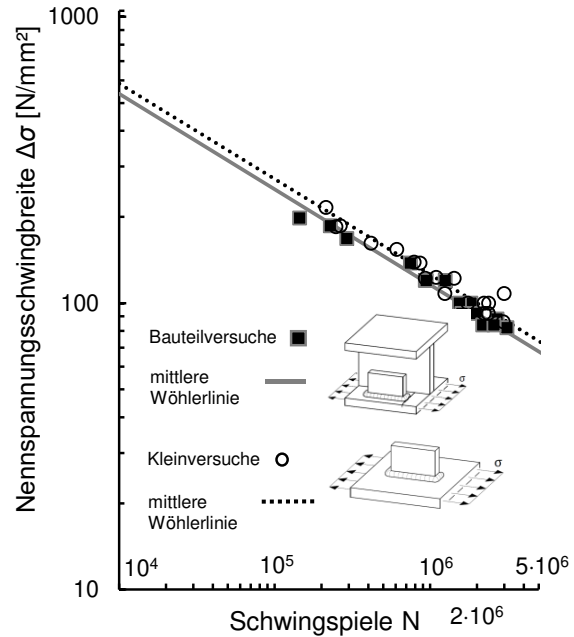


Abb. 5-8: Vergleich von Ergebnissen für Kleinversuche und Bauteilversuche, Daten aus [56]

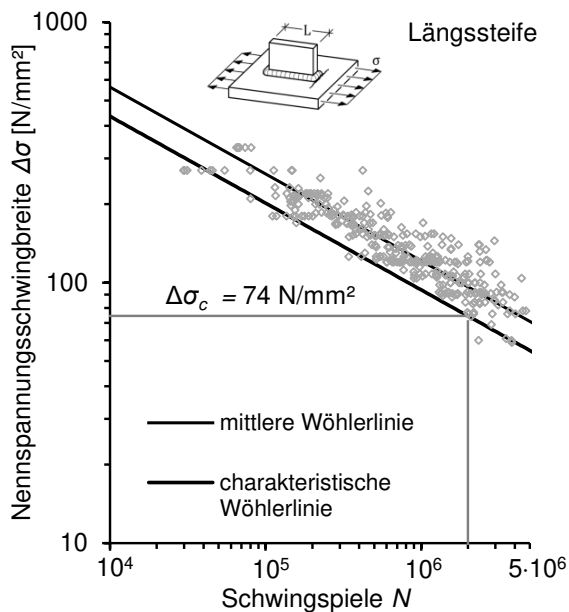


Abb. 5-9: Ermittlung Bemessungswert für das Detail der Längssteife, Daten aus [145], [128], [108], [29], [81], [56], [32], [60], [59], [64], [58], [54], [62], [144], [123], [131], [153], [150], [151]

### 5.2.7 Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit

Die Kerbfallableitung basiert auf den in Kapitel 5.1 beschriebenen Kriterien. Berücksichtigt werden nur Versuche mit Längen  $> 50$  mm. Auf eine weitere Unterteilung nach Längen wird auf Grundlage der in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Längenunabhängigkeit verzichtet. Zudem erfolgt die Auswertung unabhängig von der Steifenendgeometrie für alle Versuche „im Schweißzustand“ aber ohne kerbfreie Bearbeitung.

Nach der statistischen Auswertung errechnet sich die charakteristische Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_c$  zu  $74 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Abbildung Abb. 5-9.

## 5.3 Knotenbleche am Blechrand

### 5.3.1 Übersicht

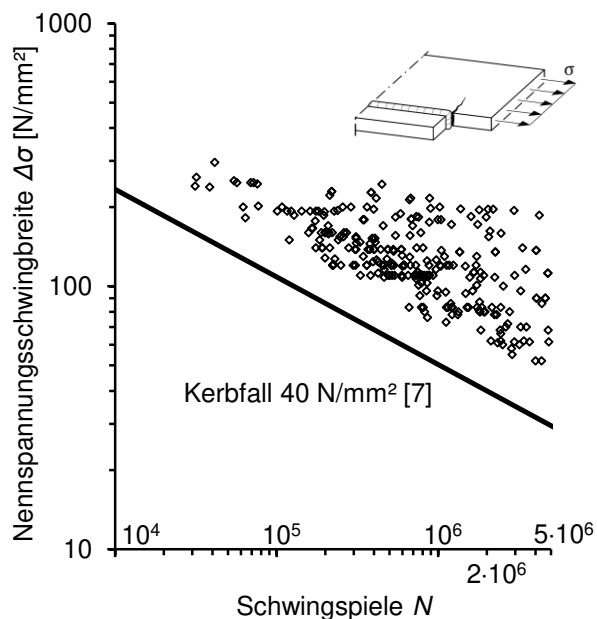


Abb. 5-10: Ergebnisse von Wöhlerversuchen zum Konstruktionsdetail Knotenblech am Blechrand, Daten aus [55], [72], [29], [81], [130], [61], [60], [25]

Das Detail wird in der Regel als Knoten- und Anschlussblech für Tragwerksteile genutzt, die an das Haupttragwerk anschließen.

Die in diesem Kapitel zusammengefassten experimentellen Untersuchungen behandeln ausschließlich das Ermüdungsversagen infolge einer Schwingbeanspruchung des Hauptbleches bzw. des Trägerflansches. Das Konstruktionsdetail ist für die Variante im Schweißzustand experimentell gut belegt.

Der vorliegende Datensatz erlaubt Untersuchungen hinsichtlich der Steifenendgeometrie und eingeschränkt auch hinsichtlich

des Einflusses der Nachbehandlung durch Schleifen. In Abb. 5-10 sind die bekannten Ermüdungsversuche zu dem Detail im Wöhlerdiagramm dargestellt.

### 5.3.2 Steifenendgeometrie

Experimentelle Untersuchungen zur Steifenendgeometrie sind in [72] dokumentiert. Ein Vergleich der rechteckigen und angefasten Variante in Abb. 5-11 zeigt, dass die angefastete Steifenendgeometrie sogar eine etwas geringere Ermüdungsfestigkeit aufweist als die rechteckige Variante. Wie bei dem ähnlichen Konstruktionsdetail der Längssteife (vgl. Kapitel 5.2.3) kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit allein durch die Anpassung der Endgeometrie erreicht werden kann. Ein Anfasen oder Ausrunden der Endlamelle ist eher sinnvoll um die Bearbeitung der Schweißnahtübergänge zu vereinfachen.



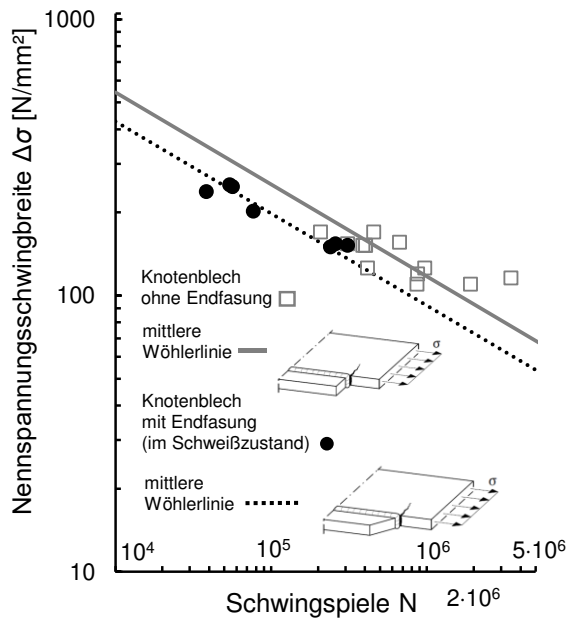


Abb. 5-11: Vergleich von Versuchsergebnissen von Knotenblechen mit und ohne Endfasung, Daten aus [72]

(trapezförmige) Knotenbleche. Alle Versuchskörper mit Knotenblechen weisen ein Ende mit bearbeiteten und ein anderes Ende mit unbearbeiteten Nahtübergängen auf. Ermüdungsrisse traten dabei ausschließlich auf der unbearbeiteten Seite auf. Ermüdungsfestigkeiten für die bearbeiteten Enden können nicht abgeleitet werden.

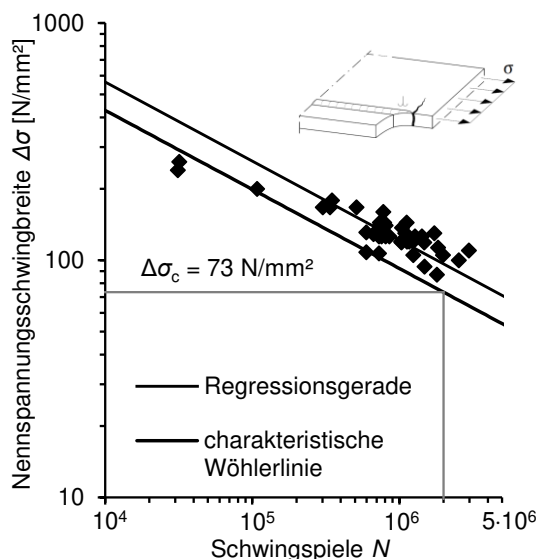


Abb. 5-12: Ermittlung Bemessungswert für kerbfrei bearbeitete Knotenbleche am Blechrand, Daten aus [23], [71]

### 5.3.3 Schweißnahtnachbehandlung durch Schleifen der Nahtübergänge

Obwohl die kerbfrei geschliffene Variante im Brückenbau eine große Rolle spielt, ist die experimentelle Grundlage vergleichsweise schwach. Versuche dazu sind von PUCHNER [130], BERGER [23] und HAIBACH [71] bekannt.

PUCHNER untersuchte das Konstruktionsdetail in mehreren Varianten, in Kleinversuchen als auch in Trägerversuchen sowie mit und ohne Schweißnahtnachbehandlung durch Schleifen der Nahtübergänge. Untersucht wurden auch rechteckige und angefaste

Deutlich wird, dass die durch Schleifen nachbearbeiteten Schweißnahtübergänge in allen Fällen eine bessere Ermüdungsfestigkeit aufwiesen als die gegenüberliegenden Seiten im Schweißzustand. Ein Einfluss der Endgeometrie wurde dabei nicht festgestellt. Alle PUCHNER Versuche wurden mit durchgeschweißten Nähten ausgeführt, so dass Nahtwurzelversagen keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte. BERGER [23] untersuchte Knotenbleche am Blechrand mit angefasten Enden und kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen in Bauteilversuchen mit einem R-Verhältnis von 0,5.

Untersuchungen von HAIBACH [71] beziehen sich auf rechteckige und angefaste Knotenbleche am Blechrand, bei denen die Schweißnähte jeweils mit einem kleinen Radius von 20 mm ausgerundet wurden. Die Anfasung übte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit aus.

Die bekannten Untersuchungen lassen keine Rückschlüsse auf einen Einfluss des Radius (bzw. dem Verhältnis von Radius zu Flanschdicke) auf die Ermüdungsfestigkeit zu. In Abb. 5-12 sind Versuche zu Knotenblechen am Blechrand mit kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen zusammengetragen. Der charakteristische Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit für kerbfrei bearbeitete Knotenbleche am Blechrand beträgt  $\Delta\sigma_c = 73 \text{ N/mm}^2$ .

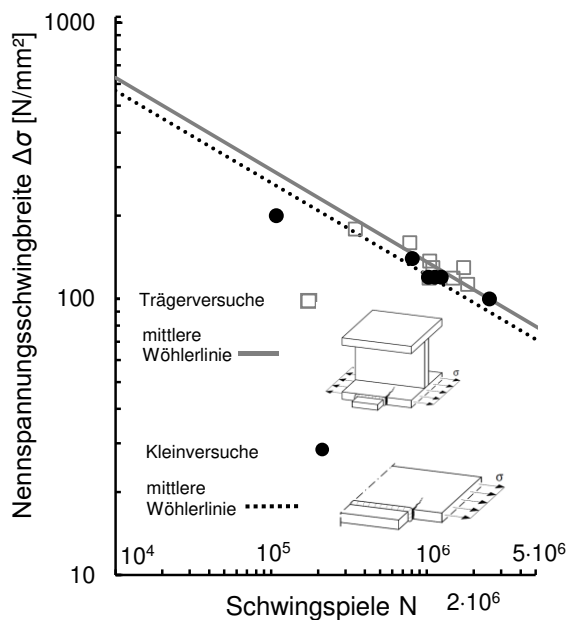


Abb. 5-13: Vergleich der Ergebnisse von Trägerversuchen und Kleinversuchen anhand vergleichbarer Knotenblechgeometrien (im Schweißzustand), Daten aus PUCHNER [130]

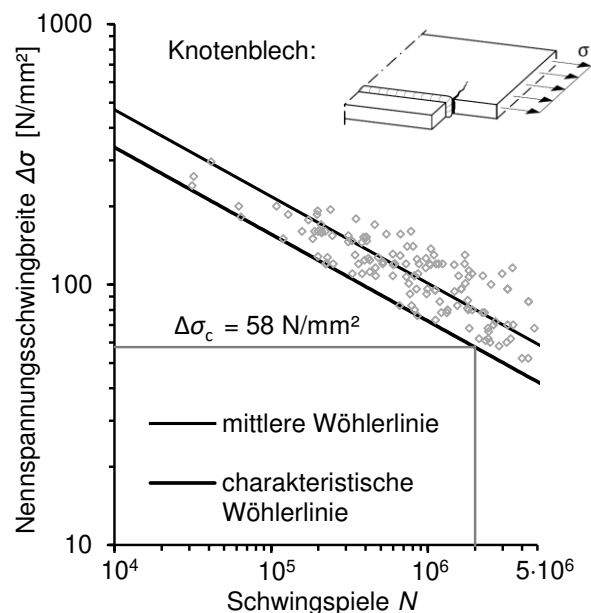


Abb. 5-14: Ermittlung Bemessungswert Längssteife am Blechrand, Daten aus [55] [72] [29] [81] [130] [61] [60] [25]

### 5.3.4 Bauteilversuche und Kleinversuche

Die experimentellen Untersuchungen von PUCHNER [130] lassen für das Knotenblech am Blechrand im Schweißzustand einen Vergleich von Bauteil- und Kleinversuchen zu. Die Geometrie des Knotenbleches ist dabei gleich. Die Untersuchungen zeigen,

dass die Trägerversuche leicht bessere Ermüdungsfestigkeiten aufweisen. Die Versuche geben damit keinen Hinweis auf einen negativ wirkenden Bauteileinfluss für das Konstruktionsdetail.

### 5.3.5 Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit

Die Datenauswahl erfolgt nach den in Kapitel 5.1 festgelegten Kriterien. Die statistische Auswertung ergibt einen charakteristischen Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit von  $\Delta\sigma_c = 58$ , siehe Abb. 5-14.

Da durch die Endgeometrie des Knotenbleches keine Verbesserung des Kerbfalls erreicht wird, wird empfohlen, die Ermüdungsfestigkeit im Schweißzustand unabhängig von der Endgeometrie zu betrachten.

## 5.4 Quersteifen

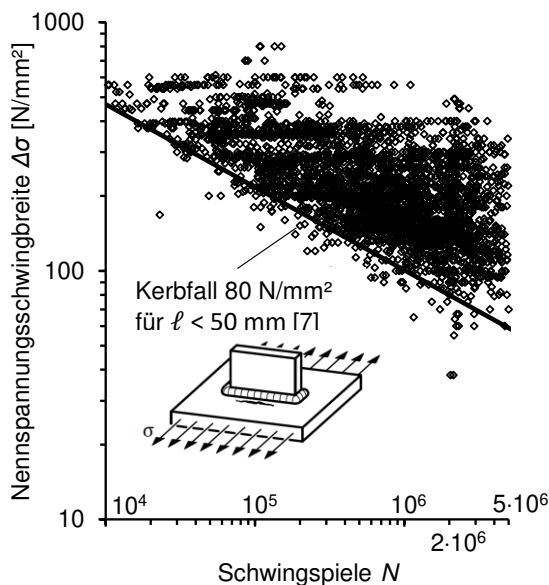


Abb. 5-15: Ergebnisse von Wöhlerversuchen zum Konstruktionsdetail Quersteife, Daten aus [107], [152], [111], [65], [93], [99], [94], [85], [87], [86], [105], [76], [72], [116], [159], [148], [90], [91], [108], [88], [17], [154], [56], [68], [46], [110], [41], [119], [56], [63], [134], [92], [104], [113], [34], [124], [112], [145], [55], [51], [68], [149]

### 5.4.1 Übersicht

Das Konstruktionsdetail wird häufig in Trägerquerschnitten zur Aussteifung des Querschnittes eingesetzt. So können Quersteifen in gewalzten und geschweißten Trägern dazu beitragen, die Querschnittskontur aufrechtzuerhalten.

Die in den folgenden Untersuchungen berücksichtigte Spannungsschwingbreite basiert auf den Nennspannungen des Trägers in Hauptlastrichtung an der Stelle des maßgebenden Schweißnahtübergangs, an dem der Riss initiiert wird. Eine Ausnahme bilden die halbhohen Quersteifen deren ermüdungskritischen Stellen im Stegbereich liegen. Hier wird zur Ermittlung der Spannungsschwingbreite

die maximale Hauptspannung herangezogen. Eine Darstellung aller bekannten Untersuchungen an Kleinversuchen und Bauteilversuchen zu dem Detail ist in Abb. 5-15 gegeben.

#### 5.4.2 Größeneinflüsse

GURNEY untersuchte in [65] strukturmechanische Größeneinflüsse für Quersteifen mittels experimenteller und bruchmechanischer Untersuchungen. Die Untersuchungen zeigten, dass es einen Zusammenhang zwischen der Blechdicke und dem Abstand der Schweißnahtübergänge gibt.

Abb. 5-16 zeigt einen Vergleich von Quersteifen mit unterschiedlichen Abständen  $\ell$  der Schweißnahtübergänge. Es wird deutlich, dass der Einfluss mit abnehmender Länge  $\ell$  zunimmt. Die schmalen Quersteifen mit  $\ell = 13$  mm zeigen deutlich höhere Ermüdungsfestigkeiten als Quersteifen mit  $\ell = 50$  mm. Auch die Ermüdungsfestigkeiten zwischen  $\ell = 50$  mm und  $\ell = 200$  mm unterscheiden sich noch signifikant, sind aber deutlich weniger ausgeprägt. Dabei ist anzumerken, dass die in [65] untersuchten Prüfkörper mit  $\ell = 200$  mm eher mit dem Konstruktionsdetail einer aufgeschweißten Lamelle zu vergleichen sind.

Für sehr schmale Quersteifen mit einem Abstand der Schweißnahtübergänge von  $\ell = 13$  mm konnte kein Blechdickeneinfluss festgestellt werden, vgl. Abb. 5-17. Für größer werdende Abstände der Schweißnahtübergänge  $\ell$  sind in [65] signifikante Blechdickeneinflüsse dokumentiert.

#### 5.4.3 Bauteilversuche und Kleinversuche

Dem Vergleich kommt aufgrund des in Kapitel 2.4.4 beschriebenen Zusammenhangs von Schweißzugspannungen bei quer geschweißten Details besondere Bedeutung zu. In Abb. 5-18 ist ein Vergleich von Kleinversuchen und Bauteilversuchen gegeben. Für die zugrunde gelegten Versuche wurden nur Zugschwellversuche mit konstanter Amplitude im Schweißzustand ausgewählt. Die einzelnen Versuche unterscheiden sich in der Geometrie sowie in der Art der Ausführung bei Trägerversuchen (siehe Tab. 5-1). Die Darstellung verdeutlicht, dass sowohl die mittleren Wöhlerlinien als auch die Streufelder vergleichbar sind.

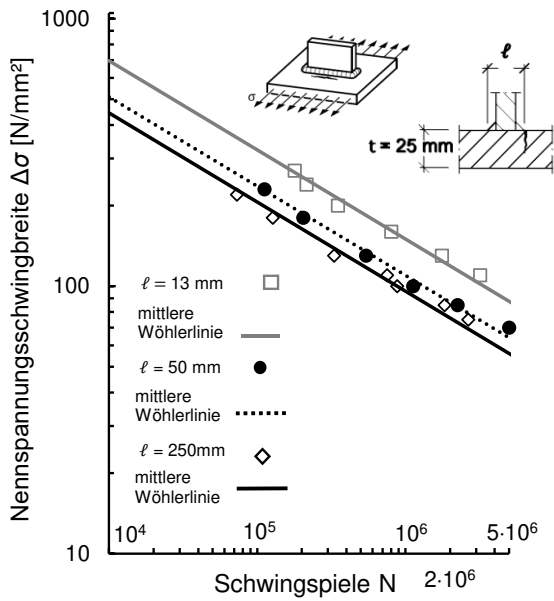


Abb. 5-16: Einfluss des Abstands der Schweißnahtübergänge bei 25 mm dicken Grundblechen [45]

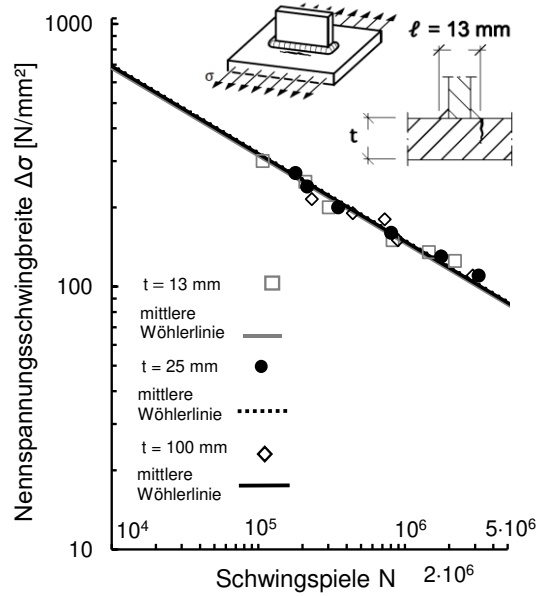


Abb. 5-17: Einfluss der Blechdicke bei einem Abstand der Schweißnahtübergänge von 13 mm [45]

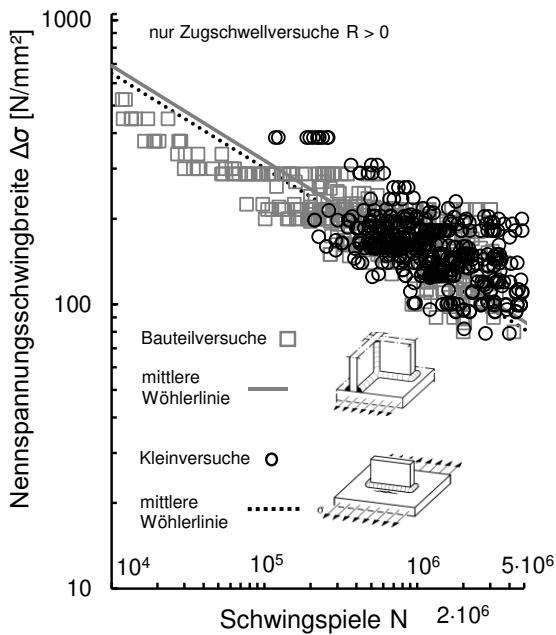


Abb. 5-18: Ergebnisse von Kleinversuchen und Bauteilversuchen zum Konstruktionsdetail Quersteife, Daten aus [107], [152], [111], [65], [93], [99], [94], [85], [87], [86], [105], [76], [72], [116], [159], [148], [90], [91], [108], [88], [17], [154], [56], [68], [46] (Kleinversuche) & [110], [41], [119], [56], [63], [134], [92], [104], [113] (Bauteilversuche)

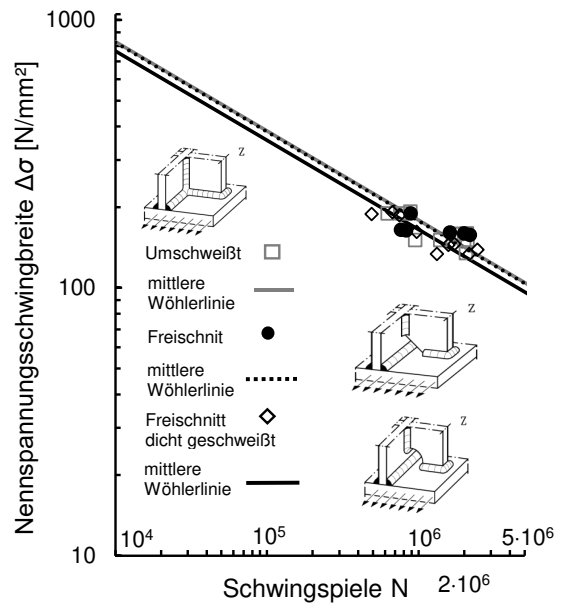
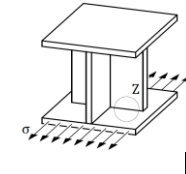
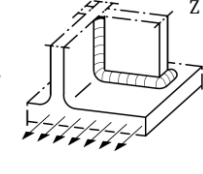
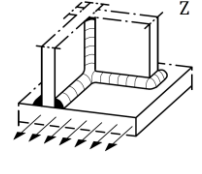
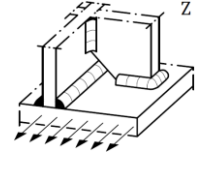
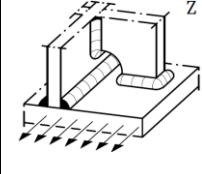
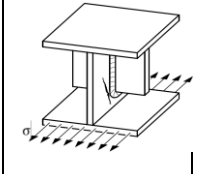


Abb. 5-19: Ergebnisse von Trägerversuchen am Konstruktionsdetail Quersteife mit und ohne Freischnitt [134]

Tab. 5-1: Ausführungsvarianten für Quersteifen in Trägern

Quersteife in Träger	Quersteife in gewalztem Träger mit umlaufender Kehlnaht	Quersteife in geschweißtem Träger mit umlaufender Kehlnaht	Quersteife mit Aussparung im Bereich der Längsnaht	Quersteife mit umschweißter Aussparung im Bereich der Längsnaht	Halbhohe Quersteife
					

Im direkten Vergleich liegt die mittlere Wöhlerlinie aus den Bauteilversuchen sogar etwas über der Regressionsgeraden der Quersteifen aus Kleinversuchen. Der Vergleich deutet darauf hin, dass eine Korrektur von Kleinversuchen auch bei quer geschweißten Details nicht notwendig ist, wenn Zugschwellversuche zugrunde gelegt werden.

#### 5.4.4 Freischnitt in Trägerversuchen

Für die Ausführung von Quersteifen in Trägern existieren unterschiedliche Möglichkeiten der Ausführung, vgl. Tab. 5-1. Die Varianten unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf die Ausführung der Kontaktstelle zwischen Quersteife und der Längsnaht bei geschweißten Trägern bzw. dem Ausrundungsradius bei gewalzten Trägern. Mit einem Freischnitt kann die Quersteife an der entsprechenden Stelle ausgespart werden. Der Freischnitt kann mit und ohne Umschweißung ausgeführt werden vgl. Tab. 5-1. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass eine Ausführung der Quersteifen mit Freischnitt keinen Vorteil für die Ermüdungsfestigkeit bringt [110], S. 40 und [134], S. 61. Bei einem Vergleich der Ermüdungsfestigkeiten zeigt keine Variante signifikante Abweichungen, vgl. Abb. 5-19.

### 5.4.5 Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit

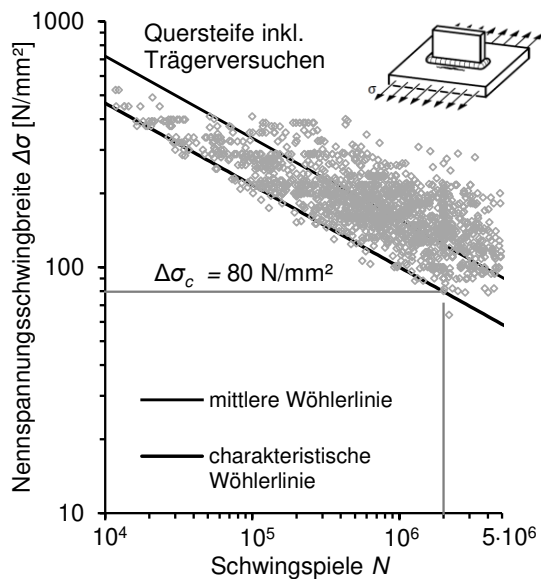


Abb. 5-20: Ermittlung Bemessungswert Quersteife, Daten aus [107], [152], [111], [65], [93], [99], [94], [85], [87], [86], [105], [76], [72], [116], [159], [148], [90], [91], [108], [88], [17], [154], [56], [68], [46] (Kleinversuche) und [110], [41], [119], [56], [63], [134], [92], [104], [113] (Trägerversuche)

Die statistische Auswertung umfasst alle geometrischen Varianten der Quersteife sowohl in Klein- als auch in Trägerversuchen. Es wurden nur experimentelle Untersuchungen mit einem Abstand der Schweißnahtübergänge von  $l < 50$  mm berücksichtigt. Untersuchungen an größeren Abständen sind nur in [45] und [107] bekannt. Blechdickeneinflüsse wurden vernachlässigt. Für die Herleitung der charakteristischen Ermüdungsfestigkeit werden nur Zugschwellversuche mit konstanter Amplitude im Schweißzustand herangezogen. Der charakteristische Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Millionen Schwingspielen errechnet sich zu  $80 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Abb. 5-20. Eine Unterscheidung der einzelnen Varianten von Quersteifen erfolgt nicht, da der Vergleich von Kleinversuchen und Bauteilversuchen im Zugschwellbereich ähnliche Streufelder aufgewiesen hat (vgl. Kapitel 5.4.3) und ein Vergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten von Quersteifen in Trägern zeigte, dass keine signifikanten Einflüsse in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit zu erwarten sind, vgl. Kapitel 5.4.4

Die statistische Auswertung umfasst alle geometrischen Varianten der Quersteife sowohl in Klein- als auch in Trägerversuchen. Es wurden nur experimentelle Untersuchungen mit einem Abstand der Schweißnahtübergänge von  $l < 50$  mm berücksichtigt. Untersuchungen an größeren Abständen sind nur in [45] und [107] bekannt. Blechdickeneinflüsse wurden vernachlässigt. Für die Herleitung der charakteristischen Ermüdungsfestigkeit werden nur Zugschwellversuche mit konstanter Amplitude im Schweißzustand herangezogen. Der charakteristische Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Millionen Schwingspielen errechnet sich zu  $80 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Abb. 5-20. Eine Unterscheidung der einzelnen Varianten von Quersteifen erfolgt nicht, da der Vergleich von Kleinversuchen und Bauteilversuchen im Zugschwellbereich ähnliche Streufelder aufgewiesen hat (vgl. Kapitel 5.4.3) und ein Vergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten von Quersteifen in Trägern zeigte, dass keine signifikanten Einflüsse in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit zu erwarten sind, vgl. Kapitel 5.4.4

## 5.5 Lamellen

### 5.5.1 Übersicht

Lamellen werden zur Verstärkung von Trägern eingesetzt, um die Momententragfähigkeit in hoch beanspruchten Bereichen an den tatsächlichen Momentenverlauf anzupassen. Im deutschen Brückenbau wird das Detail fast ausschließlich als Variante mit

kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen und dicken, querlaufenden Endnähten eingesetzt [96]. Experimentelle Untersuchungen und eine Kerbfallableitung für dieses „traditionell deutsche Variante“ sind in Kapitel 6.4 dokumentiert.

Die Untersuchungen im Folgenden beziehen sich auf das Konstruktionsdetail im Schweißzustand. Dabei wird der Ermüdungsriss in der Regel am Schweißnahtübergang im Bereich der Lamellenenden initiiert. Einige Untersuchungen von FISHER wurden auch an Prüfkörpern durchgeführt, deren Lamellen nur mit Längsnähten ohne quer laufende Endnaht aufgeschweißt wurde. Hier wurde der Riss an den Enden der Längsnähte initiiert.

In Abb. 5-15 ist eine Übersicht der bekannten Versuche im Schweißzustand dargestellt. Die zugrundeliegenden Versuche sind überwiegend Bauteilversuche. Es sind keine experimentellen Untersuchungen in Bezug auf den Blechdickeneinfluss bekannt.

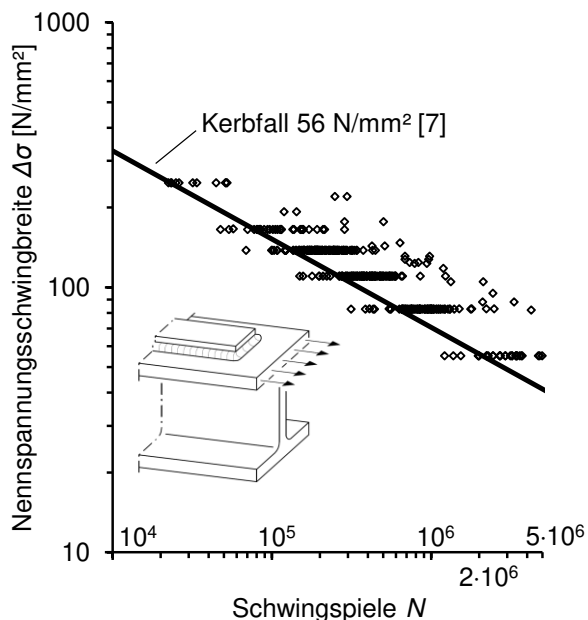


Abb. 5-21: Ergebnisse von Wöhlerversuchen zum Konstruktionsdetail Lamellenenden, Daten aus [52], [25], [159], [44], [26]

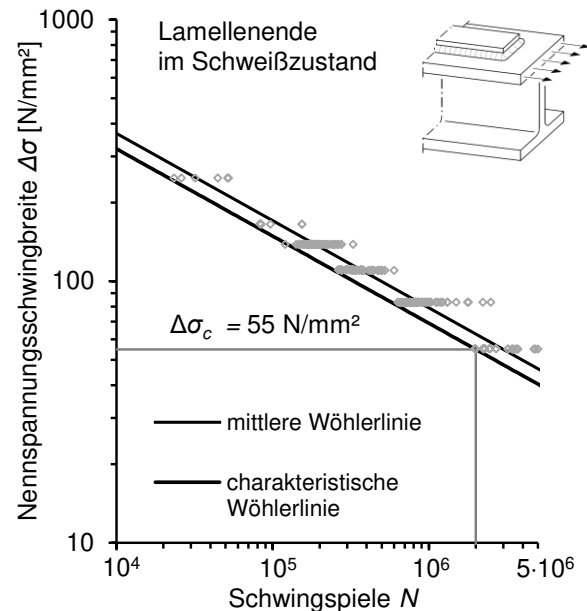


Abb. 5-22: Ermittlung Bemessungswert Lamelle, Daten aus [26], [44]

### 5.5.2 Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit

Die statistische Auswertung zu dem Konstruktionsdetail basiert hauptsächlich auf experimentellen Daten von FISHER [44]. Die in Abb. 5-22 zugrunde gelegten Versuche



wurden überwiegend an etwa 15 mm dicken Lamellen mit Versuchskörpern durchgeführt, bei denen das Maß der Schweißnaht dem 0,4 bis 0,5 fachen der Lamellendicke entspricht.

Die in den Versuchen verwendeten Blechdicken waren kleiner als 20 mm, für einen Blechdickeneinfluss wie in DIN EN 1993-1-9 [7] gibt es keine experimentelle Grundlage. Eigene experimentelle Untersuchungen an der „traditionell deutschen“ Variante zeigen, dass im Bereich zwischen 20 mm und 50 mm kein Blechdickeneinfluss vorhanden ist, siehe Kapitel 6.4.7.

Für die in Abb. 5-22 dargestellte Variante für Lamellenenden im Schweißzustand ergibt die statistische Auswertung einen charakteristischen Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit von  $55 \text{ N/mm}^2$ .

## 5.6 Kleine Aufschweißteile

### 5.6.1 Übersicht

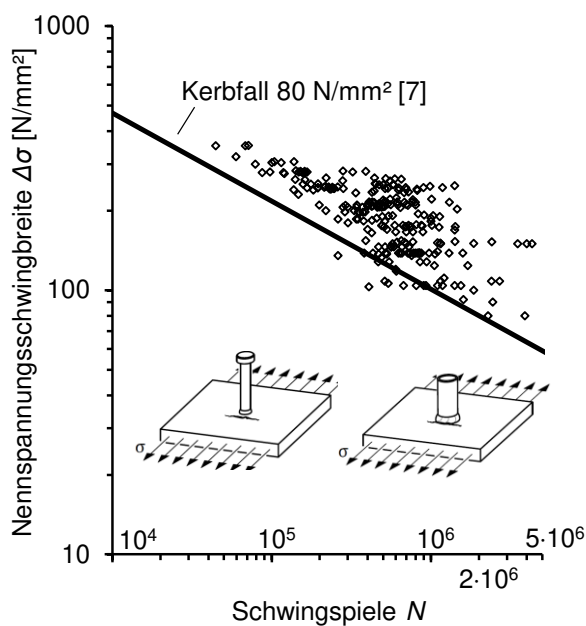


Abb. 5-23: Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen zu „kleinen Aufschweißteilen“, Daten aus [77], [157], [156], [146], [79]

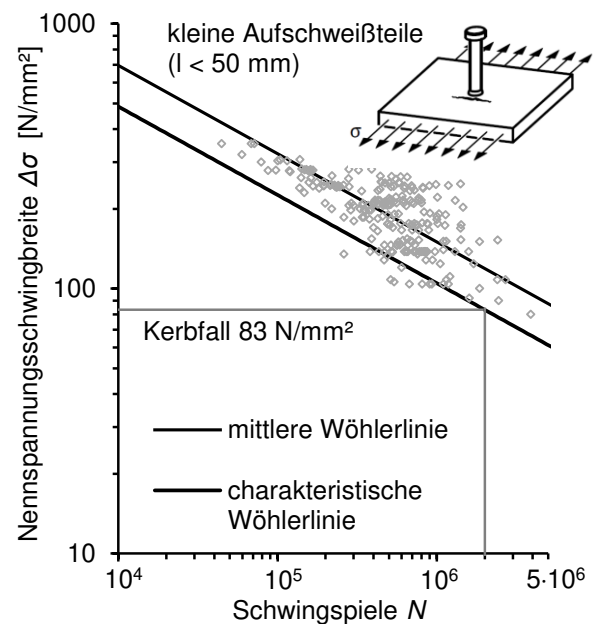


Abb. 5-24: Ermittlung Bemessungswert für kleine Aufschweißteile, Daten aus [77], [157], [156], [146], [79]

Konstruktionsdetails, deren Abstand der Schweißnahtübergänge in Belastungsrichtung kleiner als 50 mm ist, werden im Folgenden als „kleine Aufschweißteile“ bezeichnet. Dazu gehören beispielsweise aufgeschweißte Dübel, Kopfbolzen und Buchsen.

Die bekannten experimentellen Untersuchungen zu „kleinen Aufschweißteilen“ sind in Abb. 5-23 dargestellt.

### 5.6.2 Statistische Auswertung zur Herleitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit

Die statistische Auswertung der Versuchsdaten beruht auf Untersuchungen an umschweißten und hubgeschweißten Bauteilen. Der Abstand der Schweißnahtübergänge an der umschweißten Kehlnaht bzw. der Schweißnahtwulst sollte dabei kleiner als 50 mm sein.

Die ermittelten Ermüdungsfestigkeiten beziehen sich auf eine zyklische Beanspruchung des Grundblechs. Ermüdungsversuche, bei denen Kopfbolzen selbst einer Ermüdungsbeanspruchung infolge Schub ausgesetzt waren, beispielsweise in einem zyklisch beanspruchten Verbundträger, wurden nicht berücksichtigt. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit kann dementsprechend nicht auf derartige Fälle übertragen werden.

## 5.7 Bewertung der Streuung aufgeschweißter Anbauteile

Die Untersuchung der Streubreite von Versuchsergebnissen gibt Aufschluss über die Genauigkeit, mit der in der Bemessung ein Ermüdungsversagen beschrieben werden kann.

In Tab. 5-2 sind detailspezifische Streuungen gegenübergestellt. Dargestellt sind die mittleren und charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten auf Grundlage der in Kapitel 5 vorgestellten Kerbfallableitungen für Konstruktionsdetails im Schweißzustand. Ergänzt sind die dazugehörigen Standardabweichungen  $s$ , vgl. Gleichung (4-5) sowie die zum Vergleich von Streubreiten geeigneten Streuspannen  $T_N$ , vgl. Gleichung (4-6) in Kapitel 4.5. Die statistischen Kennwerte sind auf Grundlage der logarithmischen Normalverteilung der Daten ermittelt worden. Alle Streuungen wurden unter Berücksichtigung einer konstanten Wöhlerlinienneigung von  $m = 3$  ermittelt.

HAIBACH gibt in [69] S. 527 für fachgerechte Schweißverbindungen aus Baustahl unter betriebsüblichen Bedingungen eine Standardabweichung  $s$  von 0,186 bzw. eine Streuspanne  $T_N$  von 1:3.0 an.

Tab. 5-2: Vergleich der Streuung von Konstruktionsdetails im Schweißzustand.

Konstruktionsdetail	Charakteristische Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen [ N/mm <sup>2</sup> ]	Mittlere Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{50\%}$ bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen [ N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung s [ N/mm <sup>2</sup> ]	Streuspanne $T_N$
Längssteife (339 Versuche)	74	96	0,20	1:3,25
Knotenblech am Blechrand (136 Versuche)	58	80	0,26	1:4,63
Quersteife (1564 Versuche)	80	123	0,35	1:7,87
Lamellen (224 Versuche)	51	65	0,20	1:3,25
Kleine Aufschweißteile (237 Versuche)	84	120	0,28	1:5,21

Die auf Grundlage der Metastudie gewonnenen Daten zu Streubreiten sind deutlich größer, vgl. Tab. 5-2. Gleichzeitig sind die berechneten charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten gleich oder höher als aktuelle Kerbfalleinstufungen in DIN EN 1993-1-9 [7].

Tendenziell sind Details mit höheren Ermüdungsfestigkeiten wie der Quersteife und „kleinen Aufschweißteilen“ auch höheren Streuungen unterworfen. Die Ermüdungsfestigkeit und Streuung in Tab. 5-2 verhält sich dabei etwa proportional. Details mit einer niedrigeren Ermüdungsfestigkeit zeigen auch eine geringere Streuung. Die Streuung nimmt also ab, je schärfer das Detail gekerbt ist.

In Tab. 5-3 sind vergleichend Ergebnisse zu Streubreiten aus Wöhlerversuchen dargestellt, die mit dem Kerbspannungsverfahren nachgerechnet wurden.

Dabei werden bei der Ermittlung der Spannungskonzentration an der Kerbe theoretisch alle makrogeometrischen Einflussgrößen berücksichtigt.

Die Streuung auf der Widerstandsseite, die bei der Ermittlung einer Kerbspannungswöhlerlinie berücksichtigt wird, resultiert demnach aus mikrogeometrischen Einflüssen (bzw. der Gestalt der Sekundärkerbe, vgl. Kapitel 2.4.1), Modellfehlern (im Sinne eines

unvermeidbaren Fehlers durch die notwendige Idealisierung im FE Modell) und sonstigen Einflüssen, die mit dem Kerbspannungskonzept nach dem heutigen Erkenntnisstand nicht oder nicht realitätsgetreu modelliert werden können.

Tab. 5-3: Statistische Auswertung der Streuung von Versuchen auf Grundlage des Kerbspannungskonzeptes nach [47].

Konstruktionsdetail	Charakteristische Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen [ N/mm <sup>2</sup> ]	Mittlere Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{50\%}$ bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen [ N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung $s$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	Streuweite $T_N$
Details unter einachsiger Normalspannung im Schweißzustand (123 Versuche) [47]	202	370	0,45	1:14,19

In [47], S. 163 wurde bei der Nachrechnung unterschiedlicher Schweißdetails unter axialer Beanspruchung eine Standardabweichung  $s = 0,45$  bei Nutzung von Hauptspannungen im Kerbspannungskonzept ermittelt, vgl. Tab. 5-3. Bei zusätzlicher Berücksichtigung von experimentellen Untersuchungen unter multiaxialer Beanspruchung liegt die Standardabweichung zwischen  $s = 0,43$  und  $s = 0,54$  in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Spannungshypothese an der Kerbe. Das Streufeld auf der Widerstandsseite des Kerbspannungskonzeptes ist hier trotz der theoretischen Unabhängigkeit von makrogeometrischen Einflussgrößen deutlich größer als die in Tab. 5-2 dargestellten Details nach dem Nennspannungskonzept.

Untersuchungen in [18] zeigen ebenfalls anhand von Nachrechnungen bestehender Untersuchungen mit dem Kerbspannungskonzept, dass die Streuung bei der Bewertung mit dem Nennspannungskonzept nicht größer ist als bei der Bewertung mit dem Kerbspannungskonzept.

Die Streuungen im Nennspannungskonzept (vgl. Tab. 5-2) und Kerbspannungskonzept (vgl. Tab. 5-3) sind nur indirekt vergleichbar, da sich die zugrunde gelegten Versuche, die Versagenskriterien und das Niveau der Ermüdungsfestigkeit zwischen den Konzepten unterscheiden können.

Die in den Daten aus Tab. 5-3 ermittelte Streubreite der Daten wurde nicht im Rahmen dieser Arbeit ermittelt. Der oben gezogene Vergleich zwischen dem Nennspannungskonzept und dem Kerbspannungskonzept setzt voraus, dass die Modellierung der zugrunde gelegten Kerbdetails in [47] einheitlich und repräsentativ ist.

Hierzu ist anzumerken, dass im Rahmen des Kerbspannungskonzeptes grundsätzlich ein größerer Modellfehler zu erwarten ist, da die numerische Modellierung Variationen hinsichtlich Geometrie, Materialverhalten und Vernetzung zulässt. Auch innerhalb anerkannter Regelwerke wie dem DVS Merkblatt 0905 [16] sind Variationen der Modellierung zulässig, die zu deutlichen Abweichungen der berechneten Kerbspannung führen können. Beispielhaft dafür ist die Modellierung einer Kerbe mit und ohne Hinterschnitt (vgl. [16], S. 15).

Trotz der notwendigen Relativierung des Vergleiches von Nennspannungskonzept und Kerbspannungskonzept macht die Gegenüberstellung der Streubreiten deutlich, dass für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Details Längssteifen, Knotenbleche am Blechrand, Quersteifen, Lamellen und kleine Aufschweißteile das Nennspannungskonzept das genauere, einfachere und wirtschaftlichere Verfahren zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit ist. Konkrete Ermüdungsfestigkeiten für die genannten Details, auf Grundlage des Nennspannungskonzeptes, sind in Kapitel 8 gegeben.



## 6 Experimentelle Untersuchungen

### 6.1 Übersicht

In den Forschungsprojekten „Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen“ [40] und „Einsatz des Lichtbogenlötens zum Fügen von Anbauteilen an schwingend hoch beanspruchten Stahlkonstruktionen“ [79] wurden insgesamt etwa 200 Wöhlerversuche durchgeführt. Die Versuche zu den geschweißten Gurtlamellenenden wurden vollständig an der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Versuche zu geschweißten und gelöteten Buchsen und Schweißtellern wurden je zur Hälfte von der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer IGP in Rostock durchgeführt, siehe auch Tab. 6-2.

### 6.2 Prüfmaschinen

Zur Durchführung der Versuche an der Universität Stuttgart standen drei Prüfmaschinen mit unterschiedlichen Oberlasten zur Verfügung. Die Prüfmaschine der Fa. Schenk hat eine maximale statische Oberlast von 1 MN und eine dynamische Oberlast von 0,8 MN. Des Weiteren wurde eine Prüfmaschine der Fa. Losenhausen mit einer statischen Oberlast von rund 2 MN und einer dynamischen Oberlast von rund 1,1 MN eingesetzt, außerdem wurde eine Prüfmaschine der Fa. Amsler mit einer statischen Oberlast von 5 MN und einer dynamischen Oberlast von 2,5 MN verwendet. Alle Prüfkörper wurden senkrecht stehend in die Maschine eingespannt. Bei der Schenk Prüfmaschine wurden die Prüfkörper automatisch von runden Klemmbacken hydraulisch eingeklemmt. Bei den Maschinen Losenhausen und Amsler hingegen mussten die Prüfkörper mechanisch von Hand eingespannt werden, da die Prüfmaschinen über mechanische Keilspannbacken verfügen. Eine Übersicht der Prüfmaschinen ist in Abb. 6-1 gegeben.

### 6.3 Versuchsdurchführung und Messtechnik

Grundsätzlich wurden alle untersuchten aufgeschweißten und aufgelöteten Anbauteile symmetrisch (beidseitig) angebracht. Numerische und experimentelle Untersuchungen zeigen, dass eine beidseitige Ausführung zu konservativeren Ermüdungsfestigkeiten führt, siehe RADAJ [132], S. 25.



Abb. 6-1: Prüfmaschinen der MPA Stuttgart: 1MN Schenk (links), 1MN Losenhause (mitte), 5MN Amsler (rechts)

Zur Bestimmung der Nennspannungen und von eventueller Biegung in den Prüfkörpern wurden in den an der Universität Stuttgart durchgeführten Versuchen Dehnmessstreifen (DMS) auf die Prüfkörper geklebt. Bei einer Verformung im Bauteil verlängern oder verkürzen sich die einzelnen Drähte des Messgitters ebenfalls. Dadurch ändert sich der elektrische Widerstand der DMS. Diese Änderung wurde vom angeschlossenen Messrechner erfasst und in Dehnungen umgerechnet.

An jedem Prüfkörper wurden mindestens vier Dehnmessstreifen angebracht. Die Positionierung erfolgte jeweils gegenüber auf den Oberflächen der Prüfkörper, um gegebenenfalls Biegeeinflüsse berücksichtigen zu können. Neben den direkt auf den Prüfkörper applizierten DMS wurden während der Versuche die Kraft und der Weg des Prüfzylinders aufgezeichnet.

Für die spätere Validierung der numerischen Berechnungen wurden bei je einem Prüfkörper jeder Serie Dehnmessstreifen zur Messung der Strukturspannungen platziert. Die Platzierung und Anzahl der Dehnmessstreifen orientierte sich an den Empfehlungen des IIW [83].

Beispielhaft sind in Abb. 6-2 die applizierten DMS zur Ermittlung von Strukturspannungen an einem Prüfkörper mit Lamelle und einem Prüfkörper mit aufgelöteter Buchse dargestellt.



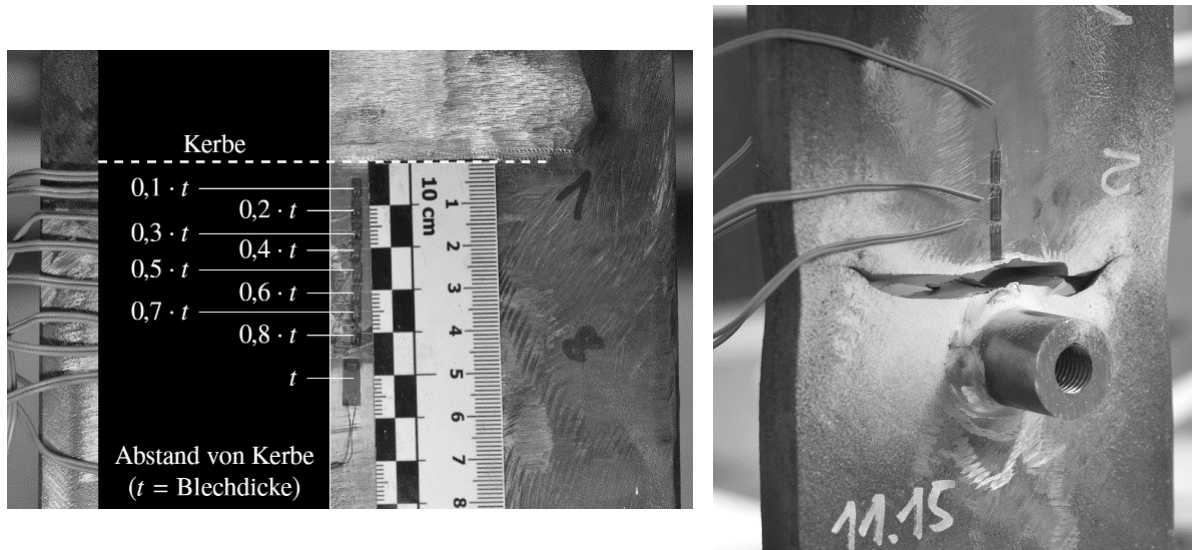


Abb. 6-2: Messung der Strukturspannungen bei PK 2.10 (Prüfkörper Gurtlamellenende) [40] und PK 11.15 (aufgelötete Buchse) [79]

Vor dem Versuchsbeginn und vor dem Schließen der Klemmbacken zur Einspannung des Prüfkörpers wurden die Dehnmessstreifen kalibriert. Somit wurde die gegebenenfalls vorhandene Biegung durch Vorkrümmung im Prüfkörper aufgezeichnet, bevor die eigentliche Last aufgebracht wurde. Alle Prüfkörper wurden zunächst statisch vorbelastet und anschließend zyklisch beansprucht.

Für den statischen Versuch wurden die Prüfkörper schrittweise auf die maximale Oberlast gefahren und wieder entlastet. Vor Beginn des Schwingversuchs wurde der Prüfkörper bis zur Mittellast beansprucht. Von diesem Lastniveau ausgehend startete der Schwingversuch mit einer Frequenz zwischen 0,5 Hz und 8 Hz. Die Frequenz war abhängig von der jeweiligen Prüfmaschine und der getesteten Oberlast. Alle Prüfkörper wurden bis zum vollständigen Bruch geprüft.

## 6.4 Experimentelle Untersuchungen am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende

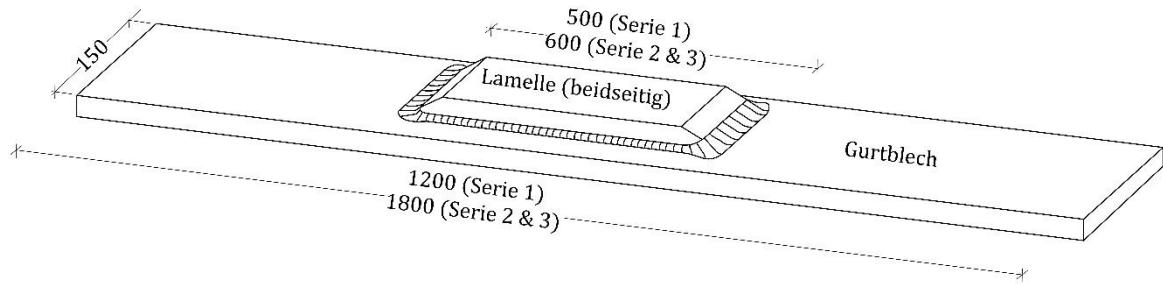
### 6.4.1 Übersicht

Im Rahmen von [40] wurden Ermüdungsversuche an der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende durchgeführt. Ziel der Versuche und des Forschungsvorhaben war es, das bereits im deutschen Nationalen Anhang [10] von Eurocode 3 Teil 2 [9] beschriebene Konstruktionsdetail in den Hauptteil des Eurocode für Ermüdung prEN 1993-1-9 [8] zu überführen. Um eine ausreichende Datenbasis für die Bestimmung des charakteristischen Kerbfalls zu erhalten, wurden an der

Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart (MPA) insgesamt 36 Ermüdungsversuche durchgeführt. Mithilfe der Versuche kann eine konkrete Kerbfalleinordnung vorgenommen werden. In diesem Kapitel werden die Versuchskörper sowie das Versuchsprogramm beschrieben.

#### 6.4.2 Versuchsserien und Geometrie

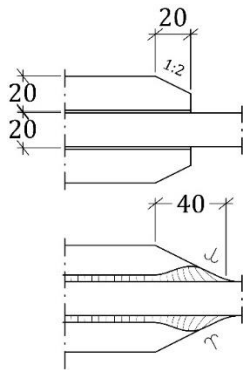
Die 36 Prüfkörper wurden in drei Serien mit jeweils zwölf Prüfkörpern aufgeteilt. Jede Serie zeichnet sich durch eine andere Prüfkörpergeometrie aus. Die Konstruktionsgeometrien der einzelnen Serien sind in Abb. 6-3 dargestellt. Die Prüfkörper der Serie 1 wurden aus einem Trägerblech, das 1200 mm lang, 150 mm breit und 20 mm dick war, gefertigt. Mittig wurde auf beiden Seiten des Trägers je eine 460 mm lange, 90 mm breite und 20 mm dicke Lamelle aufgeschweißt. Die Lamelle wurde an den Stirnseiten mit einer Steigung von 1:2 bis zur halben Lamellenhöhe (10 mm) gefast. Die Schweißung der Lamellen an das Gurtblech erfolgte an den Längsseiten mit einer Kehlnaht mit einem a-Maß von 4 mm. An den Stirnseiten wurde die Lamelle mit einer verstärkten Kehlnaht am Träger befestigt. Die Kehlnaht wurde ebenfalls mit einer Steigung von 1:2 ausgeführt. Zwischen Stirnnaht und Längsnaht wurden die Ecken der Schweißnaht mit einem Radius von 10 mm ausgerundet. Bei den Prüfkörpern von Serie 2 hatten die Lamellen und das Trägerblech jeweils eine Dicke von 50 mm. Das Gurtblech war 1800 mm lang und 150 mm breit, während die Lamellen 500 mm lang und 90 mm breit waren. Die Längsnaht wurde bei Serie 2 mit einem a-Maß von 5 mm ausgeführt. Die Stirnnaht und die Lamellenfase hatten wie bei Serie 1 eine Steigung von 1:2, wobei die Ecken wieder mit einem Radius von 10 mm ausgerundet waren. Die Ecknaht wurde an der Außenseite der Lamelle ab Lamellenende in einer Länge von 50 mm bis zur Längsnaht hin verjüngt. Die Außenabmessungen von Serie 3 entsprachen denen von Serie 2. Jedoch wurde die Stirnnaht im Gegensatz zu den anderen beiden Serien nicht mit einer Steigung von 1:2, sondern mit einer Steigung von 1:3 ausgeführt. Die Höhe der Stirnnaht betrug ein Drittel der Lamellenhöhe (17 mm). Entsprechend wurde die Lamelle 33 mm ab Oberkante Lamelle gefast. Die Fertigungspläne und Schweißanweisungen sind in [38] dokumentiert.



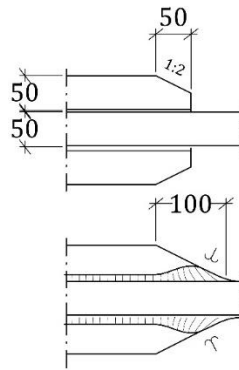
Serie 1 (12 Versuchskörper)

Serie 2 (12 Versuchskörper)

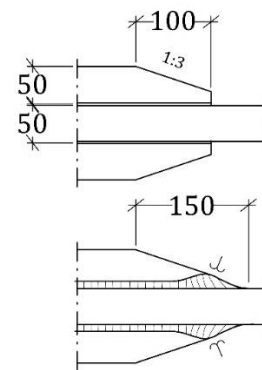
Serie 3 (12 Versuchskörper)



Stahlbaubetrieb A & B



Stahlbaubetrieb A & B



Stahlbaubetrieb C

Abb. 6-3: Prüfkörpergeometrien von Gurtlamellenenden [40]

Alle Versuchskörper wurden symmetrisch gestaltet, um planmäßige Biegeeinflüsse zu vermeiden. Serie 1 und 2 entsprechen den geometrischen Definitionen des traditionellen deutschen Details mit unterschiedlichen Blechdicken. Lediglich der seitliche Übergang von Stirnnaht zu Flankennaht wurde gegenüber dem bisherigen Standarddetail verkürzt.

Als Material wurde S 355 J2+N verwendet, die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper sind in Tabelle Tab. 6-1 dargestellt.

Tab. 6-1: Mechanische Eigenschaften der Gurtlamellenenden Prüfkörper [40]

Prüfkörper Nr.[-]	Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Kerbschlagarbeit bei -20C°[J]
1.1 – 1.6 1.7 – 1.12*	407 369-392	562 523-541	90 107-201
2.1 – 2.6 2.7 – 2.12	387 433	541 547	180 268
3.1 – 3.12	369	513	213

(Mittelwerte aus mindestens 3 Versuchen)

\* mehrere Chargen

### 6.4.3 Herstellung der Prüfkörper

Um Auswirkungen aus unterschiedlichen Herstellungseinflüssen praxisnah abbilden zu können, wurden die Versuchskörper von verschiedenen Stahlbaubetrieben mit Erfahrungen im Stahlbrückenbau gefertigt. Die Gurtbleche sowie die Lamellen wurden zuerst automatisch mit einem Brennschneider aus großen Blechen zugeschnitten. Im Anschluss wurden die Lamellen zur Fixierung der Position mit Heftnähten auf den Gurten befestigt, Abb. 6-4. Alle Prüfkörper wurden auch im Bereich der späteren Wurzel-lage mit Heftnähten fixiert. Vor dem eigentlichen Schweißprozess wurden die Bleche vorgewärmt, vgl. Abb. 6-4 unten links.

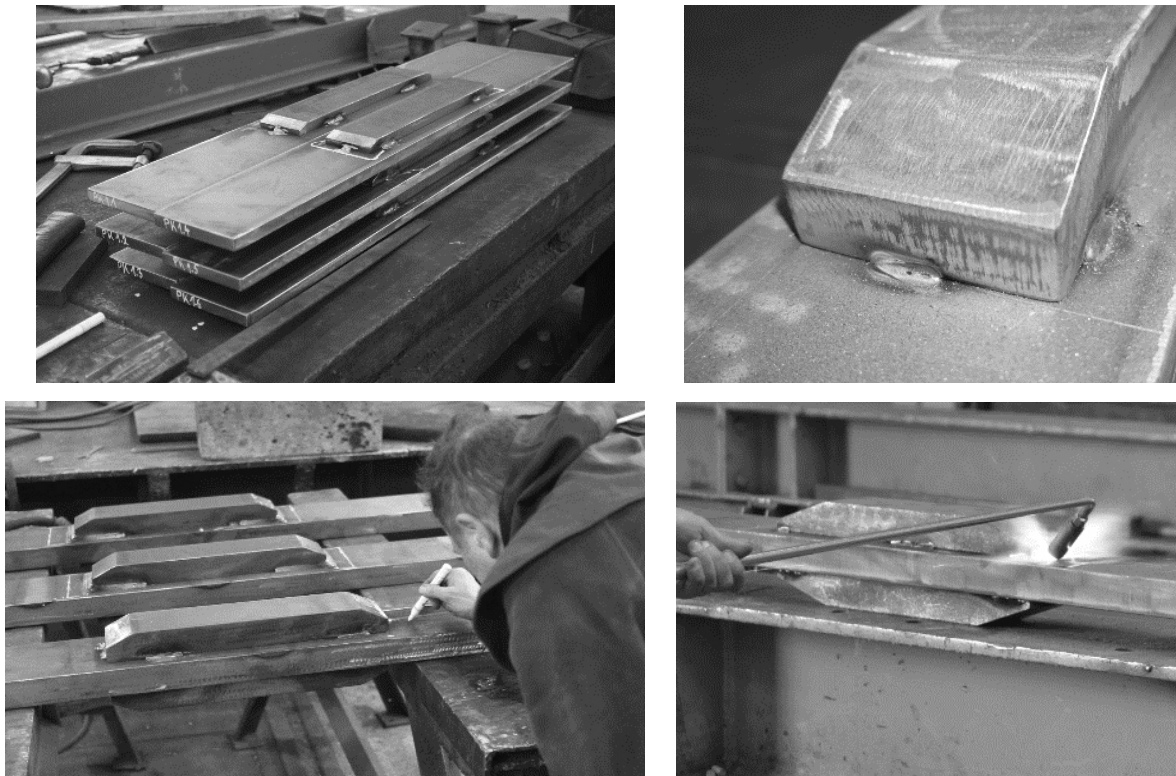


Abb. 6-4: Schweißvorbereitungen: angeheftete Gurtlamellen (o.l) und (o.r.), Skizzieren der Schweißnahtgeometrie (u.l) und Vorwärmen (u.r.)

Zur Herstellung der Längs- und Stirnnähte wurde das Metall-Aktivgasschweißverfahren angewendet. Bei einigen Versuchskörpern wurden Massivdrahtelektroden und bei anderen metallpulvergefüllte Drahtelektroden verwendet. Die Stirnnähte wurden aufwändig in mehreren Lagen hergestellt. In Abb. 6-5 ist der Fortschritt der Lagenschweißung dokumentiert. Während des Herstellungsprozesses wurde die Zwischenlagentemperatur unter 260°C gehalten, um unerwünschte Effekte aus zu hoher Wärmeeinwirkung zu verhindern. Die Temperatur wurde in regelmäßigen Abständen gemessen.



Abb. 6-5: Schweißen der Prüfkörper: Messen von Zwischenlagentemperaturen (o.l.), Schweißen der Flankennaht (o.r.) und (m.r.), Stirnnaht wie geschweißt und ungereinigt (m.r.), Entfernen von Schlackereesten mit Nadelpistole (u.l.), Stirnnaht im Schweißzustand belassen (u.r.)

Um die Biegung und den Verzug infolge der Lagerung und der Bearbeitung möglichst gering zu halten, wurden die Prüfkörper mehrfach gewendet und die beiden Lamellen abwechselnd bearbeitet.

Für Serie 2 mit 50 mm dicken Blechen waren 50 Schweißraupen notwendig. Serie 3 mit 50 mm dicken Blechen und angepasster Endgeometrie benötigte etwa 30 Raupen.

Nach Beendigung der Schweißarbeiten wurden die Stirnnahte blecheben geschliffen, die Übergänge durch Schleifen bearbeitet sowie die Ecken der Stirnnaht abgerundet. Dazu wurden herstellerabhängig Fächerschleifer oder Rollschleifer verwendet, siehe Abb. 6-6 oben links bzw. unten links.

#### 6.4.4 Versuchsergebnisse

Eine Übersicht der Versuchsergebnisse ist in Tab. B-1 in Anhang B gegeben. Für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeiten auf Nennspannungsniveau wurde die Spannung im Nennquerschnitt des Gurtes ermittelt und mithilfe von Dehnungsmessungen überprüft. Eine Korrektur durch Biegeeinflüsse erfolgte nicht. Bei einer Ausführung nach der traditionell deutschen Variante (Serie 1 und 2) ging der zum Versagen führende Ermüdungsanriss immer vom Schweißnahtübergang aus. Ein Großteil der Versuchskörper der Serie 3 hingegen versagte infolge eines Risswachstums ausgehend von der Schweißnahtwurzel.

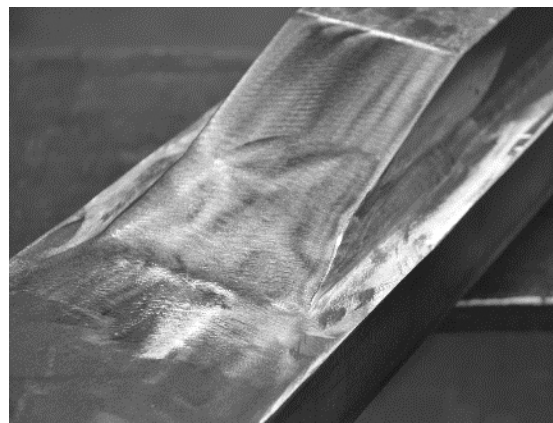
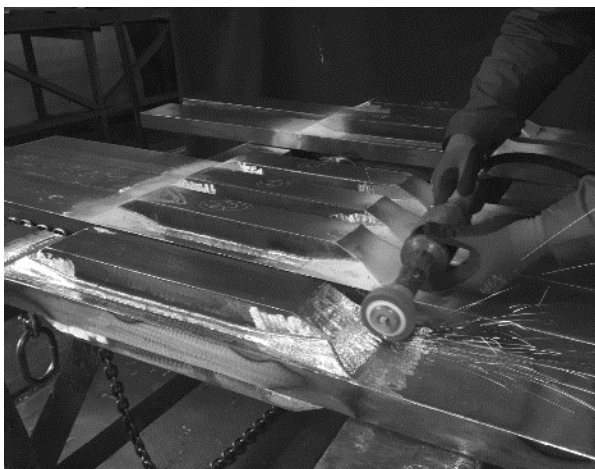
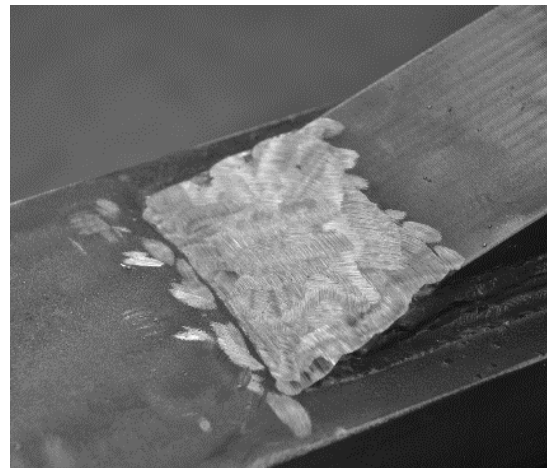


Abb. 6-6: Bearbeitung der Oberfläche mit Winkelschleifer und Fächerscheibe (o.l.), Oberfläche nach grober Bearbeitung (o.r.), Nachbearbeitung mit Rollschleifer (u.l.), kerbfrei bearbeitetes Gurtlamellenende (u.r.)

#### 6.4.5 Fertigungseinflüsse durch Nachbearbeitung und Restkerben

Zwischen den einzelnen Prüfkörpern gab es im Endzustand deutliche optische Unterschiede. Bei allen Versuchskörpern war nach dem Schleifen der ursprüngliche Nahtübergang sichtbar. Diese Restkerbe variierte zwischen den einzelnen Versuchskörpern deutlich. Bei Versuchskörpern mit maßgebenden Ermüdungsriss am Nahtübergang war die Restkerbe in allen Fällen verantwortlich für die Rissinitiierung im Ermüdungsversuch. Wie ausgeprägt die Restkerbe war, hing von unterschiedlichen Faktoren z.B. dem Werkzeug, der Zugänglichkeit und der Handfertigkeit des Schweißers ab. In Abb. 6-7 sind beispielhaft unterschiedliche Nahtübergänge dargestellt.

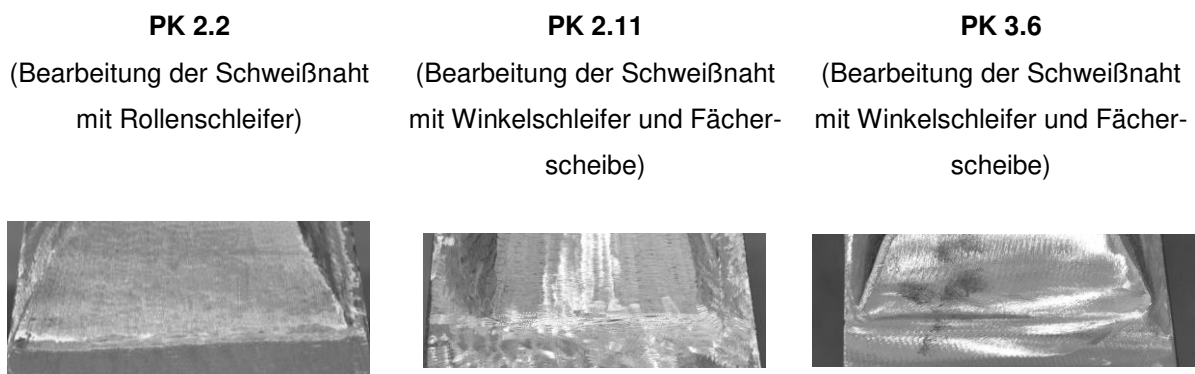


Abb. 6-7: Variationen von Fertigungseinflüssen am Nahtübergang

Für die Ableitung einer charakteristischen Ermüdungsfestigkeit werden alle Versuche berücksichtigt. Die Fertigungseinflüsse tragen damit auch zu einer gewissen Streuung der Ergebnisse bei, die durch den charakteristischen Kerbfall abgebildet werden. Die Streuung ist dabei im Vergleich zu anderen Versuchsserien oder Auswertungen an vergleichbaren Details nicht auffällig, vgl. z.B. Kapitel 5.3.3. Es ist davon auszugehen, dass die Variation der Restschärfe am Nahtübergang einen Fertigungseinfluss darstellt, der in dieser Vielfalt repräsentativ und in der Praxis zu erwarten ist.

#### 6.4.6 Analyse von Makroschliffen

In Abb. 6-8 sind Makroschliffe mit typischen Ermüdungsrissen dargestellt. In Serie 1 und 2 gingen alle Ermüdungsrisse vom Schweißnahtübergang aus, vgl. Abb. 6-8 (a) und (b). Ein großer Teil der Versuchskörper von Serie 3 versagte ausgehend von der Schweißnahtwurzel vgl. Abb. 6-8 (c). Die Tendenz, dass bei flacher werdendem Nahtübergang und kleiner werdender Schweißnaht die maßgebende Kerbe zur

Schweißnahtwurzel wandert, lässt sich auch in numerischen Berechnungen darstellen, Kapitel vgl. 7.6.2.

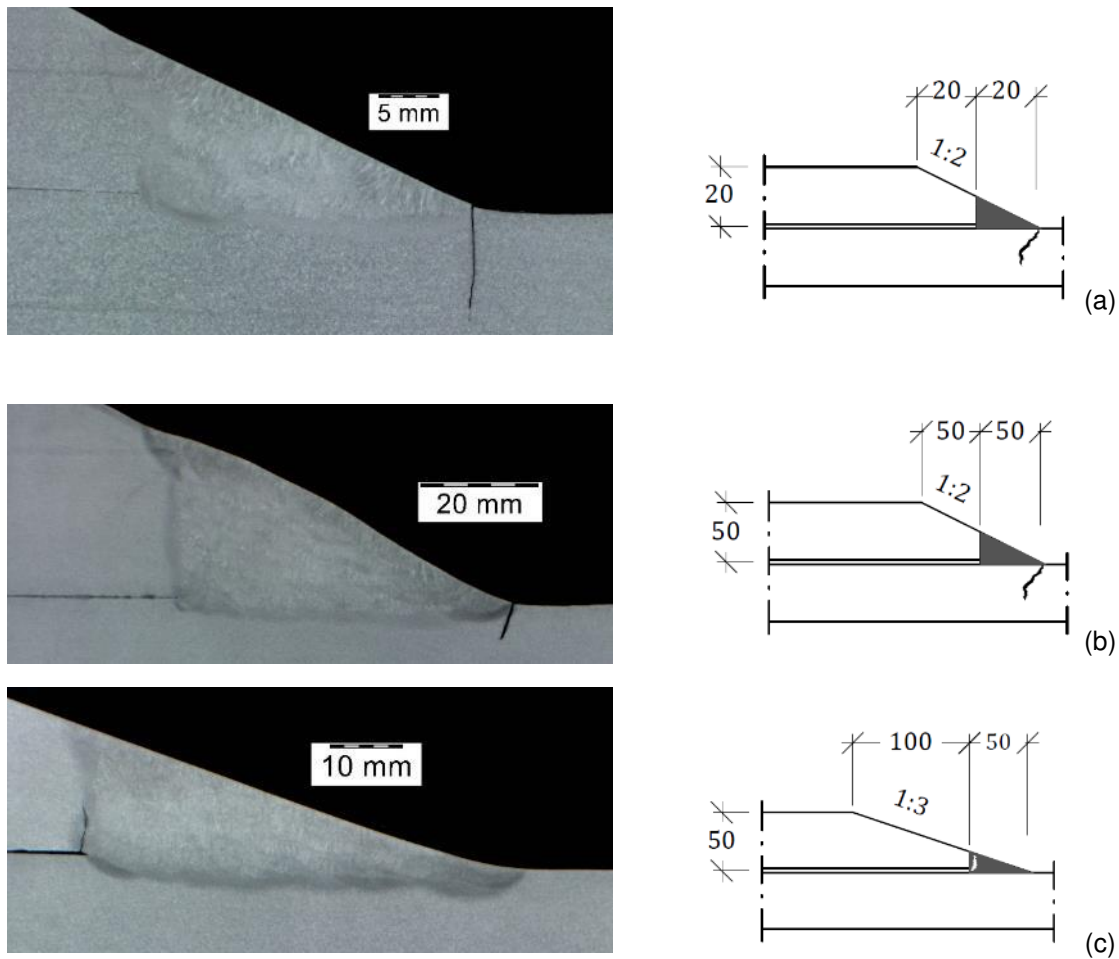


Abb. 6-8: Makroschliffe mit Ermüdungsrissen am Gurtlamellenende:  
Serie 1 (a), Serie 2 (b), Serie 3 (c) [40]

#### 6.4.7 Analyse des Blechdickeneinflusses

Serie 1 und Serie 2 wurden für die Ermittlung eines Blechdickeneinflusses gestaltet. Beide Serien orientieren sich an der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails und unterscheiden sich nur hinsichtlich der Blechdicke.

Um hier den Fertigungseinfluss auszuschließen, wurden ausschließlich Prüfkörper eines Herstellers ausgewertet.

Die sich aus den Versuchsergebnissen ergebenden Regressionsgeraden sind in Abb. 6-9 dargestellt. Die beiden Serien zeigen keinen signifikanten Unterschied in Hinsicht auf die Ermüdungsfestigkeit.



Die Datenreihe ist aufgrund der begrenzten Versuchsanzahl und der gewählten Geometrie der Versuchskörper nicht geeignet um einen statistischen Größeneinfluss (vgl. Kapitel 2.4.3) aufzuzeigen.

Ein Blechdickeneinfluss kann auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht nachgewiesen werden.

#### 6.4.8 Ableitung eines charakteristischen Bemessungswertes

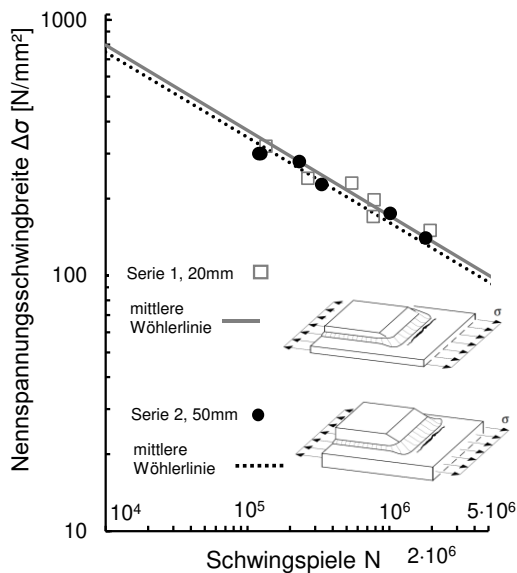


Abb. 6-9: Vergleich von Knotenblechen mit und ohne Endfasung, Daten aus [72]

Für die Herleitung eines Bemessungswertes wurden alle Versuchsergebnisse (vgl. Tab. B-1) gemeinsam ausgewertet. Zusätzlich wurden acht Trägerversuche von Berger [22] berücksichtigt, die bei höherer Mittelspannung ( $R = 0,5$ ) getestet wurden. Insgesamt stehen damit 44 Versuche für die Herleitung eines charakteristischen Bemessungswertes zur Verfügung. Die Versuche entsprechen alle der traditionellen deutschen Variante des Konstruktionsdetails, berücksichtigen aber unterschiedliche Hersteller, Blechdick-

cken, Bauteilformen und Mittelspannungen im Zugschwellbereich. Aus der statistischen Auswertung berechnet sich ein charakteristischer Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit von  $86 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Abb. 6-10.

#### 6.4.9 Bewertung und Schlussfolgerung

Alle berücksichtigten Versuche liefern Ermüdungsfestigkeiten, die deutlich über dem derzeitigen Kerbfall 71 aus Eurocode 3 Teil 2/NA [10] liegen. Generell bestätigen die experimentellen Untersuchungen, dass die dicken Stirnnahte in Kombination mit der kerbfreien Bearbeitung der Nahtübergänge sehr vorteilhaft für die Ermüdungsfestigkeit sind. Insbesondere im Vergleich mit aufgeschweißten Lamellen, die mit einer umlaufenden Kehlnaht und ohne verstärkende Stirnnaht ausgeführt sind (vgl. Kapitel 5.5), kann eine Vervielfachung der Lebensdauer erreicht werden.

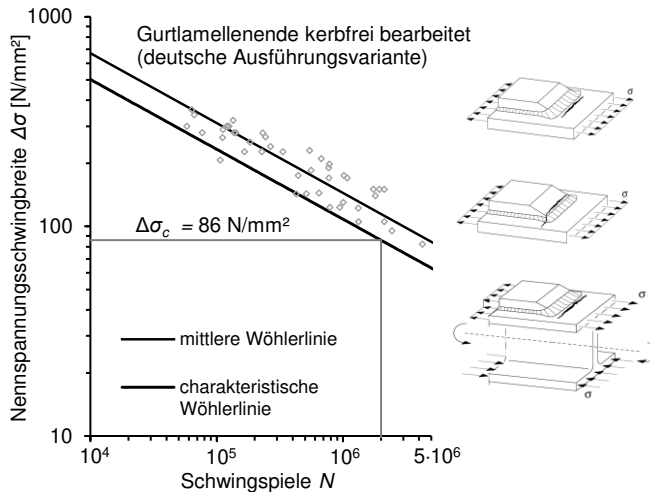


Abb. 6-10: Ermittlung Bemessungswert Gurtlamellenenden, kerbfrei bearbeitet

Dem sehr guten Ermüdungsverhalten der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende steht ein verhältnismäßig großer Fertigungsaufwand gegenüber, vgl. Kapitel 6.4.3.

Das Schweißnahtvolumen kann dabei um 1/3 reduziert werden, wenn das Detail entsprechend der Serie 3 mit einem Nahtübergang von 1:3 und einer Schweißnahtdicke die 1/3 der Lamellendicke entspricht, ausgeführt wird. Die Ermüdungsfestigkeit bleibt dabei gleich, es muss allerdings mit Nahtwurzelsversagen gerechnet werden, vgl. Kapitel 6.4.6. In Kapitel 8.3 wird ein konkreter Kerbfallvorschlag für das Detail gegeben.

## 6.5 Experimentelle Untersuchungen an Buchsen und Blechtellern

### 6.5.1 Übersicht

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einsatz des Lichtbogenlötens zum Fügen von Anbauteilen an schwingend hoch beanspruchten Stahlkonstruktionen“ [79] wurden insgesamt 165 Ermüdungsversuche an Bauteilen unterschiedlicher Geometrien mit verschiedenen gelöteten Konstruktionsdetails sowie Untersuchungen an vergleichenden geschweißten Bauteilen durchgeführt.

Im Fokus der Untersuchung stand der Einfluss der Kerbwirkung, die aufgelötete Anbauteile auf ein ermüdungsbeanspruchtes Stahlblech ausüben. Ziel der Ermüdungsversuche war es, die erhöhte Ermüdungsfestigkeit von mit CuAl7 gelöteten Bauteilen infolge der reduzierten metallurgischen Kerbwirkung zu ermitteln.

### 6.5.2 Versuchsserien und Geometrie

In Tab. 6-2 ist eine Gesamtübersicht der Wöhlerversuchsserien gegeben. Jede der 11 Versuchsserien umfasst bis zu 15 Versuchskörper. Untersucht wurden unterschiedliche Konfigurationen von aufgelöteten Dopplungen und Buchsen und jeweils eine geschweißte Referenzserie. Die Versuche fanden sowohl in Rostock als auch in Stuttgart statt, siehe Tab. 6-2.

Um gezielt Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit untersuchen zu können, sind alle Prüfkörper an einer Grundkonfiguration (Serie 6 für Dopplungen und Serie 11 für Buchsen) orientiert. In den Serien wurde jeweils nur eine Geometrie-, Last-, und Materialeigenschaft verändert und so dessen Einfluss untersucht. Alle Lot- bzw. Schweißnähte sind mit einer Nenndicke von  $a = 4$  mm ausgeführt.

Für einige Serien musste die Grundform der Versuchskörper aus versuchstechnischen Gründen leicht angepasst werden. So sind die Grundbleche der Serie 10 etwas länger, um ausreichend Klemmlänge zu ermöglichen. Die Versuchskörper der Serie 12 wurden nachträglich tailliert, um höhere Nennspannungen zu erreichen.

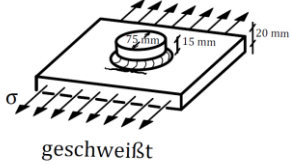
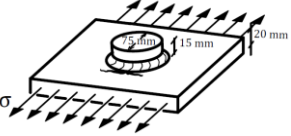
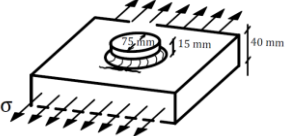
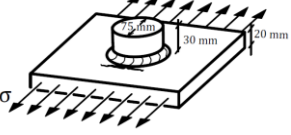
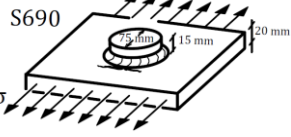
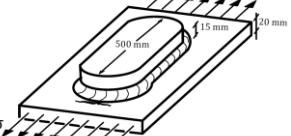
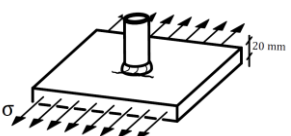
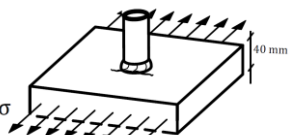
### 6.5.3 Herstellung der Prüfkörper

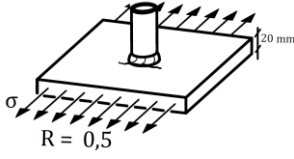
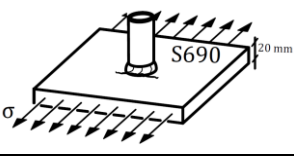
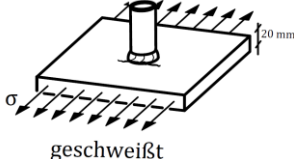
Alle Versuchskörper wurden in der Werkstatt des Fraunhofer IGP in Rostock gefertigt. Die aufgeschweißten und aufgelöteten Teller wurden dafür mit einlagigen Schweiß- bzw. Lotnähten gefügt. Die geschweißten Proben wurden automatisiert mit einem Roboter geschweißt. Die gelöteten Proben sind dagegen handgeschweißt. Konkrete Parameter und Schweiß- bzw. Lötanweisungen sind in [79] dokumentiert.

### 6.5.4 Versuchsergebnisse

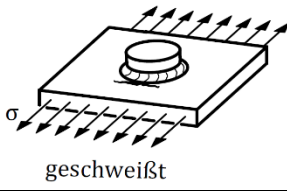

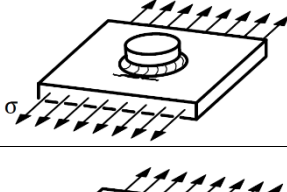

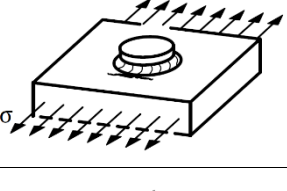

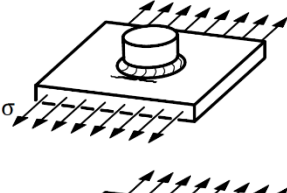

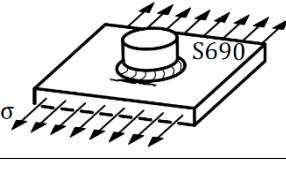

In Tab. B-2 in Anhang B ist eine Übersicht der Versuchsergebnisse aller durchgeführten Wöhlerversuche gegeben. Eine tabellierte Übersicht der ermittelten Kerbfälle aus den einzelnen Serien ist in Tab. 6-3 gegeben. Es wird deutlich, dass die gelöteten Details eine signifikant höhere Ermüdungsfestigkeit zeigen als vergleichbare geschweißte Details. Ein detaillierter Vergleich der Serien und weitere Untersuchungen zum Einfluss der einzelnen Parameter sind in [79] gegeben.

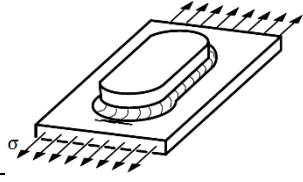

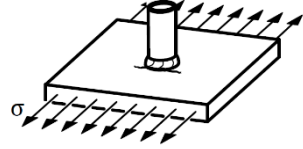

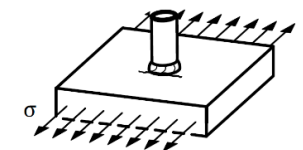

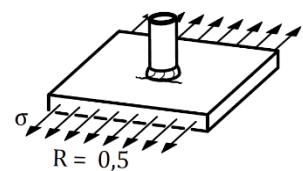

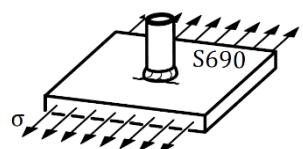

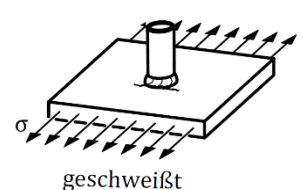

Tab. 6-2: Übersicht Versuchsserien Buchsen und Blechteller [79]

Versuchs- serie	Beschreibung	Schematische Darstellung
5 (Rostock)	Aufgeschweißte Dopplung, $\varnothing = 75$ mm (Referenz geschweißt)	
6	Aufgelötete Dopplung, $\varnothing = 75$ mm (Grundkonfiguration Lichtbo- genlöten)	
7	Aufgelötete Dopplung, auf 40 mm dicken Grundblech (Blechkeneinfluss Grundblech)	
8	Aufgelötete Dopplung, mit 30 mm dicker Dopplung (Blechkeneinfluss Dopplung)	
9 (Rostock)	Aufgelötete Dopplung, auf S690 (Einfluss der Stahlgüte)	
10	Aufgelötete Dopplung, $\varnothing = 500$ mm (Größeneinfluss)	
11	Aufgelötete Buchse (Grundkonfiguration)	
12 (Rostock)	Aufgelötete Buchse auf 40 mm dicken Grundblech (Blechkeneinfluss)	

Versuchs- serie	Beschreibung	Schematische Darstellung
13 (Rostock)	Aufgelötete Buchse mit R- Verhältnis 0,5 (Mittelspannungs- einfluss)	
14 (Rostock)	Aufgelötete Buchse auf S690 (Einfluss der Stahlgüte)	
15	Aufgeschweißte Buchse (Referenz geschweißt)	

Tab. 6-3: Übersicht der statistisch ermittelten Referenzwerte bei 2 Millionen Schwingspielen

Serie	$\Delta\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung
5	74		 einlagig	Aufgeschweißte Dopplung, Ø = 75 mm <b>(Referenz geschweißt)</b>
6	83		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Dopplung, , Ø = 75 mm <b>(Grundkonfiguration Licht- bogenlöten)</b>
7	88		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Dopplung, auf 40 mm dicken Grundblech <b>(Blechkickeneinfluss Grundblech)</b>
8	84		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Dopplung, mit 30 mm dicker Dopplung <b>(Blechkickeneinfluss Dopplung)</b>
9	97		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Dopplung, auf S690 <b>(Einfluss der Stahlgüte)</b>

Serie	$\Delta\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung
10	84		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Dopplung, Ø = 500 mm <b>(Größeneinfluss)</b>
11	107		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Buchse <b>(Grundkonfiguration)</b>
12	108		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Buchse auf 40 mm dicken Grundblech <b>(Blechkickeneinfluss)</b>
13	97		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Buchse mit R Verhältnis 0,5 <b>(Mittelspannungseinfluss)</b>
14	112		 CuAl7 einlagig	Aufgelötete Buchse auf S690 <b>(Einfluss der Stahlgüte)</b>
15	94		 einlagig	Aufgeschweißte Buchse <b>(Referenz geschweißt)</b>

### 6.5.5 Fertigungseinflüsse

Auffällig ist die Streuung in der Ermüdungsfestigkeit der robotergeschweißten Buchsen (Serie 15), die als Referenzserie dient. In Abb. 6-11 ist beispielhaft die Schweißnaht einer entsprechenden Buchse zusammen mit den Ergebnissen aus den Wöhlerversuchen dargestellt. Die resultierende Streuung ist mit einer Standardabweichung  $s$  von 0,03 für geschweißte Konstruktionen minimal, vgl. auch Kapitel 5.6.2. Ursächlich für die geringe Streuung sind die konstanten Fertigungsbedingungen aus der automatisierten Schweißung.

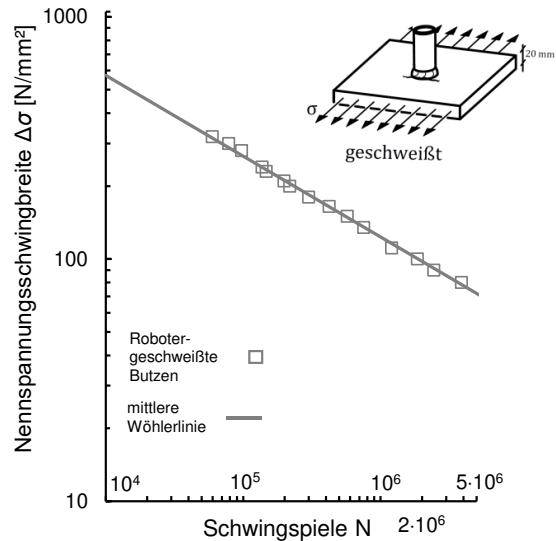


Abb. 6-11: Darstellung der robotergeschweißten Kehlnaht (links) und der Versuchsergebnisse von Serie 15

### 6.5.6 Versagenscharakteristik

Die maßgebende Kerbe für die Rissinitiierung war in allen geschweißten und gelöteten Versuchskörpern der Nahtübergang zwischen Grundmaterial und Kehlnaht. In vielen Fällen konnte ein beidseitiges Risswachstum beobachtet werden. Die Risse vereinigten sich teilweise kurz vor dem Versagen der Prüfkörper.

Bei einigen Prüfkörpern der Serie 10 (500mm lange Dopplung) konnte neben dem maßgebenden Riss am Nahtübergang auch ein Wurzelriss festgestellt werden.

Abb. 6-12 zeigt die für das Versagen maßgebende Kerbe eines Prüfkörpers der Serie 11 vor der Belastung und kurz vor dem Versagen. Der Riss ist im rechten Bild bereits durch den Querschnitt in Dickenrichtung gewandert.

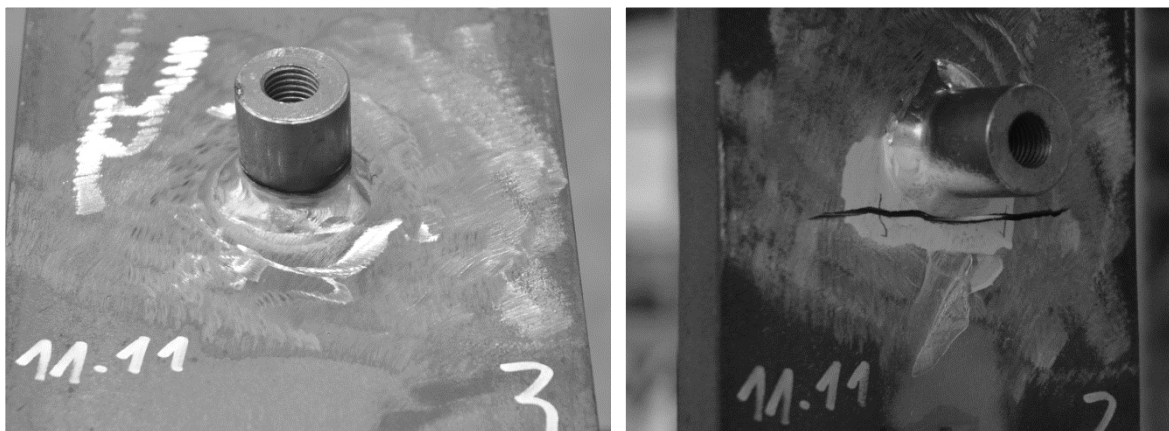


Abb. 6-12: Versuchskörper der Serie 11 vor der Ermüdungsbeanspruchung (links) und kurz vor dem Versagen (rechts) durch Ermüdungsriss am Nahtübergang

### 6.5.7 Untersuchung der Neigung der Wöhlerlinie

Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen zeigt, dass die für geschweißte Konstruktionen als bekannt vorausgesetzte Wöhlerlinienneigung  $m = 3$  auch für gelöteten Konstruktionen sehr gut passt. Eine mögliche Ursache für das vergleichbare Verhalten ist die gleichartige Versagenscharakteristik. Das Risswachstum findet ausschließlich im Stahlwerkstoff statt, lediglich die Kerbwirkung ist bei den gelöteten Konstruktionen infolge des geringeren E-Moduls der Lotnaht geringer. In Tab. 6-4 sind die aus der linearen Regression geschätzten Neigungen  $\hat{m}$  nach Gleichung (4-3) für jede Serie angegeben.

Tab. 6-4: Übersicht der aus der linearen Regression geschätzten Neigungen  $\hat{m}$  für die verschiedenen Versuchsserien mit gelöteten und geschweißten Anbauteilen.

Serie	Beschreibung	Neigung $m$ nach Formel (4-3)	Serie	Beschreibung	Neigung $m$ nach Formel (4-3)
5	Aufgeschweißte Dopplung, $\varnothing = 75$ mm	3,05	11	Aufgelötete Buchse	3,19
6	Aufgelötete Dopplung, $\varnothing = 75$ mm	2,81	12	Aufgelötete Buchse auf 40 mm dicken Grundblech	3,05
7	Aufgelötete Dopplung, auf 40 mm dicken Grundblech	2,69	13	Aufgelötete Buchse mit R Verhältnis 0,5	2,74
8	Aufgelötete Dopplung, mit 40 mm dicker Dopplung	3,21	14	Aufgelötete Buchse auf S690	2,66
9	Aufgelötete Dopplung, auf S690	2,92	15	Aufgeschweißte Buchse	2,93
10	Aufgelötete Dopplung, $\varnothing = 500$ mm	2,93			

Für die Auswertung der gelöteten Details wird auf Grundlage der in Tab. 6-4 ermittelten Werte eine feste Wöhlerlinienneigung von  $m = 3$  definiert. Die statistische Auswertung der gelöteten Konstruktionsdetails kann daher identisch zu den geschweißten Details erfolgen, siehe Kapitel 4.



### 6.5.8 Untersuchung der Länge des aufgelöteten Bauteils in Lastrichtung

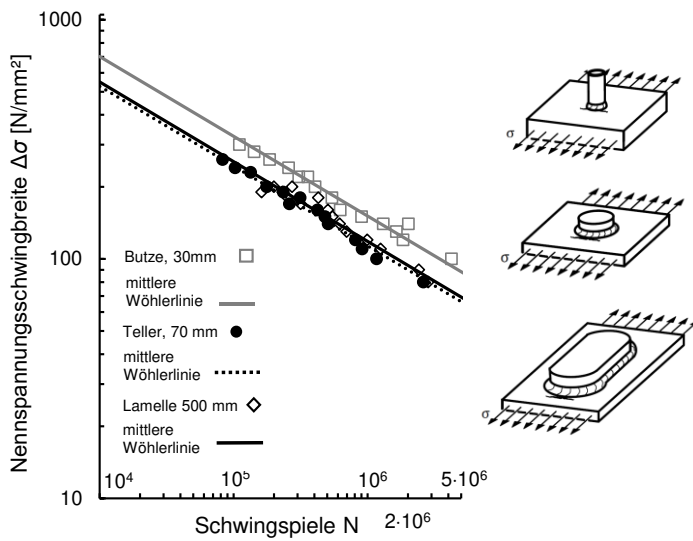


Abb. 6-13: Untersuchung des Längeneinflusses bei aufgelöteten Bauteilen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden drei Größen von Aufschweißteilen hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit untersucht: die Schweißbuchse mit einem Durchmesser von 30 mm, die Schweißteller mit einem Durchmesser von 75 mm und die aufgeschweißten Lamellen mit einem Durchmesser von 500 mm in Belastungsrichtung. Der Unterschied zwischen Buchse und Teller zeigt sich in

der Ermüdungsfestigkeit relativ deutlich. Dagegen ist zwischen Teller und Lamelle kein signifikanter Einfluss hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit festzustellen, vgl. Abb. 6-13.

### 6.5.9 Untersuchung des Blechdickeneinflusses

In Abb. 6-14 sind vergleichende Wöhlerlinien für Dopplungen und Buchsen jeweils für 20 mm und 40 mm dicke Grundbleche dargestellt. Für beide Fälle kann für die dickeren Bleche kein negativer Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Für die Dopplung auf dicken Grundblechen (Serie 7) ist die Ermüdungsfestigkeit mit  $\Delta\sigma_c = 88 \text{ N/mm}^2$  sogar deutlich höher als für die Referenzserie. Ursächlich werden dafür lokale Einflüsse am Schweißnahtübergang angenommen. Die Versuchskörper der Serie 7 zeigen teilweise etwas weichere Schweißnahtübergänge.

Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse kann ein Blechdickeneinfluss für gelötete Anbauteile im Blechdickenbereich zwischen 20 und 40 mm und für größere Blechdicken nicht nachgewiesen werden.

### 6.5.10 Ableitung eines charakteristischen Bemessungswerts für lichtbogengelötete Aufschweißteile

Für die Herleitung eines Bemessungswerts für die Ermüdungsfestigkeit wurden in Abb. 6-15 alle Buchsen und alle Teller gemeinsam ausgewertet. Die gelöteten Buchsen zeigen einen charakteristischen Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit von  $102 \text{ N/mm}^2$ .

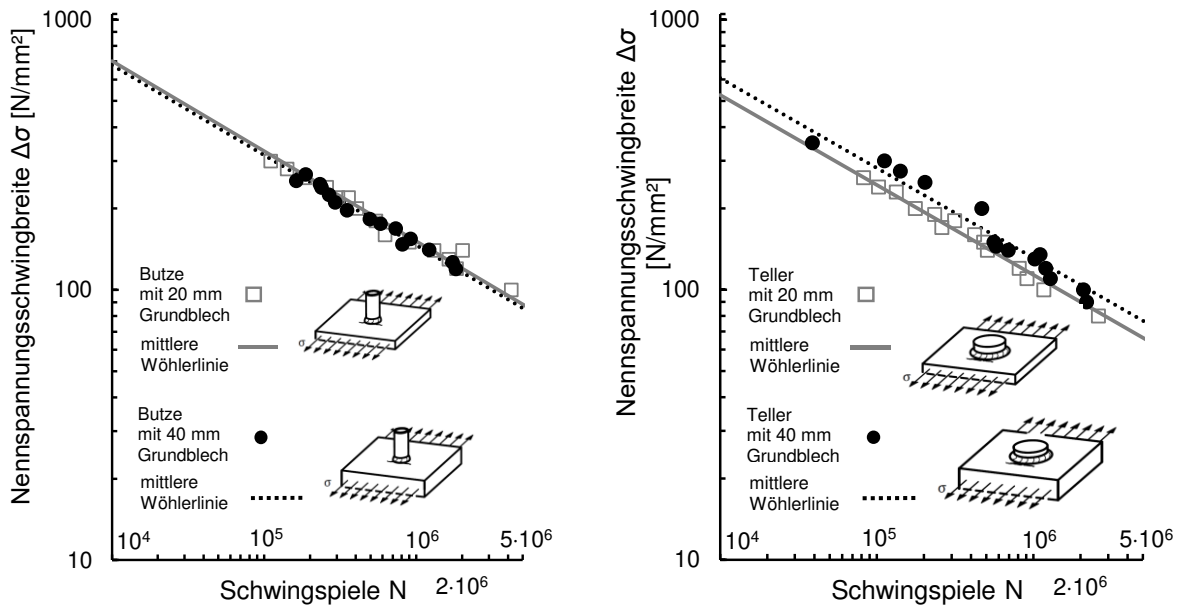


Abb. 6-14: Vergleich von Blechdickeneinflüssen an Buchsen (links) und Tellern (rechts)

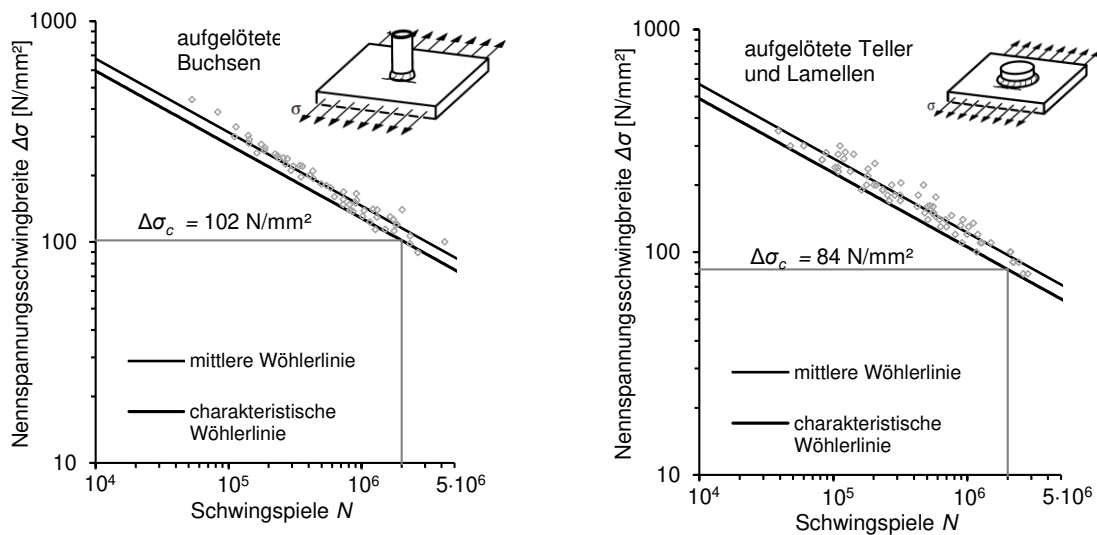


Abb. 6-15: Ermittlung Bemessungswert gelöteter Anbauteile links: Buchsen, rechts: Schweißsteller und Lamellen

Für die gelöteten Teller und Lamellen liegt  $\Delta\sigma_c$  bei 84 N/mm<sup>2</sup>. Die ermittelten Ermüdungsfestigkeiten für die gelöteten Anbauteile liegen damit deutlich über den Ermüdungsfestigkeiten die für die geschweißten Referenzserien ermittelt wurden. Diese liegen bei  $\Delta\sigma_c = 94$  N/mm<sup>2</sup> für geschweißte Buchsen und  $\Delta\sigma_c = 74$  N/mm<sup>2</sup> für aufgeschweißte Teller.

### 6.5.11 Bewertung und Schlussfolgerung

Gelötete Anbauteile zeigen im Vergleich zu geschweißten Anbauteilen eine höhere Ermüdungsfestigkeit bei vergleichbarer statischer Beanspruchbarkeit (vgl. Kapitel 2.8.4). Die Versagenscharakteristik sowie die Neigung der Wöhlerlinie für gelötete Anbauteile sind vergleichbar mit geschweißten Anbauteilen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit für gelötete Anbauteile unabhängig von der Blechdicke des Grundbleches und des Aufschweißteils ist. Auch die Länge des Bauteils in Lastrichtung hat nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit und kann für Längen  $> 50$  mm vernachlässigt werden, vgl. Kapitel 6.5.8.

## 6.6 Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen an der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende und an gelöteten Anbauteilen zeigen zwei grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten, mit der die Ermüdungsfestigkeit für entsprechende Konstruktionsdetails deutlich verbessert werden kann.

Die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Lamellen durch dicke Stirnnähte und kerbfreie Bearbeitung der Nahtübergänge basiert grundsätzlich auf der Anpassung von geometrischen Eigenschaften im Bereich der kritischen Kerbe. Die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von gelöteten Anbauteilen ist dagegen auf einen Materialeinfluss zurückzuführen.

Beide Ansätze führen schließlich zu einer deutlichen Verringerung der Spannungskonzentration im Kerbbereich und damit zu potenziell längeren Lebenszeiten von schwingend beanspruchten Konstruktionen.

Die Verringerung der Spannungskonzentration an der Kerbe lässt sich auch mit numerischen Modellen zeigen, siehe Kapitel 7.

Eine Besonderheit ist, dass durch die Untersuchungen großer Blechdicken bis 50 mm gezeigt werden konnte, dass für die hier untersuchten Details kein Blechdickeneinfluss zu erwarten ist.

In Kapitel 8 werden auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen Empfehlungen für Bemessungswerte gegeben.



## 7 Numerische Untersuchungen

### 7.1 Modellbildung

Für die Bewertung weiterer strukturmechanischer Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit unterschiedlicher Details wurden mithilfe des Kerbspannungskonzepts parametrisierte Finite-Element Modelle (FE-Modelle) in Ansys erstellt. Die Randbedingungen der Modelle, wie beispielsweise die Kerbmodellierung, entsprechen den Vorgaben im DVS Merkblatt 0905 [16]. Alle Modelle sind dreidimensional aufgestellt.

Um die Kerbspannungen in den für die Ermüdung kritischen Bereichen des Schweißnahtübergangs in der erforderlichen Genauigkeit ermitteln zu können, ist eine sehr feine Vernetzung erforderlich. Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde das Modell mithilfe der Submodelltechnik berechnet, in der die Verschiebungen an einem relativ groben Netz am Gesamtmodell ermittelt werden und die Berechnung der lokalen Spannungen anschließend an einem fein vernetzten Submodell erfolgt. Das Globalmodell nutzt alle drei Symmetrieebenen aus, um die Berechnungszeit zu minimieren.

Für die Modelle der kerbfrei bearbeiteten Gurtlamellenenden wurde grundsätzlich die Wurzelkerbe als Schlüsselochkerbe modelliert.

Für die Modellierung gelöteter Verbindungen wurde das Material des Lotzusatzwerkstoffes mit einem E-Modul von  $140.000 \text{ N/mm}^2$  simuliert. Der Ansatz ist in [79], Kapitel 9 beschrieben. Die Ermüdungsversuche an lichtbogengelöteten Verbindungen zeigten, dass der Riss in das Grundmaterial (Baustahl) hineinwächst. Die hier ausgeführten Berechnungen gehen davon aus, dass die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit aus günstigeren Steifigkeitsverhältnissen resultiert und dementsprechend mit einem niedrigeren E-Modul des Lotzusatzwerkstoffes simuliert werden können.

### 7.2 Kerbmodellierung

Das Kerbspannungsmodell nach NEUBER [118] und RADAJ [132] setzt für Schweißnahtübergänge und Schweißnahtwurzel einen fiktiven Kerbkrümmungsradius von  $r = 1 \text{ mm}$  an. Dieser fiktive Kerbkrümmungsradius berücksichtigt die Mikrostützwirkung von geschweißten Kerben, wobei der tatsächliche Kerbkrümmungsradius als unendlich klein angenommen wird. Für die Modellierung der Lotnähte wurde dieser Ansatz übernommen.

Nach dem DVS Merkblatt 0905 [16] können Nahtübergänge sowohl mit als auch ohne Hinterschnitt modelliert werden. Die Kerbmodellierungen der Nahtübergänge an den

Gurtlamellenenden sind mit Hinterschnitt modelliert. Der Hinterschnitt führt zu etwas höheren und damit konservativeren Kerbspannungen. Buchsen und Blechteller sind dagegen ohne Hinterschnitt modelliert. Untersuchungen zeigen, dass diese Variante der Modellierung bei Modellen mit gelöteter Verbindung besser geeignet ist. Ursächlich dafür ist die abrupte Werkstoffgrenze im Modell, die abhängig von der Vernetzung bei Modellen mit Hinterschnitt zu einem unstetigen Verlauf der Kerbspannung entlang der Werkstoffgrenze führen kann.

Abb. 7-1 verdeutlicht die Modellierung der Kerbe ohne Hinterschnitt am Beispiel einer Buchse. Der Nahtübergang wird mit einem Kreisausschnitt modelliert, der durch den Radius (1 mm), die beiden Tangentenpunkte an der Grundblechkante und der Nahtflanke definiert wird.

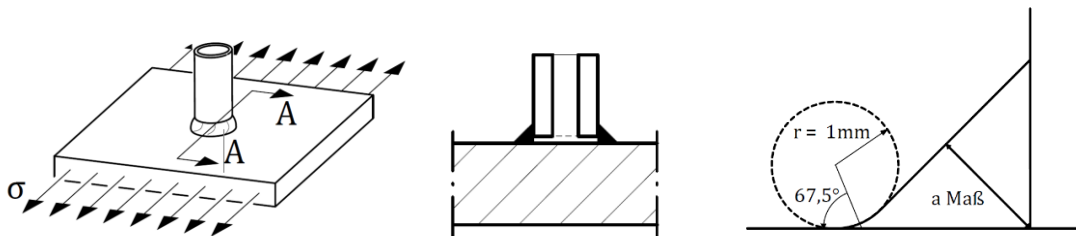


Abb. 7-1: Modellierung der Schweißnahtübergänge an einer Buchse

Die Bewertung der kerbfrei bearbeiteten Gurtlamellenenden ist mit diesem Verfahren nur eingeschränkt möglich, da der Schweißnahtübergang kerbfrei bearbeitet wird und keine scharfe geometrische Kerbe darstellt. Die Festlegung eines Ersatzradius für den nachbearbeiteten Schweißnahtübergang ist nur bedingt möglich. Untersucht wurde der Übergangsradius anhand von Makroschliffen, wobei der geometrisch bestimmte Radius stark von der bildlichen Auflösung und der Vergrößerung des Kerbbereiches abhängt. Zudem unterschieden sich die Prüfkörper hinsichtlich der nach dem Schweißen verbleibenden Restkerbe deutlich. Um die Nachbearbeitung vereinfacht darzustellen, wurde ein tatsächlicher Kerbkrümmungsradius von 1 mm angenommen. Unter Berücksichtigung der Mikrostützwirkung nach NEUBER [118] und RADAJ [132] S. 153 wurde somit ein fiktiver Kerbkrümmungsradius von 2 mm angenommen.

Für alle Gurtlamellenenden wurde die Wurzelkerbe als Schlüsselochkerbe mit 1 mm Radius modelliert, vgl. Abb. 7-2.

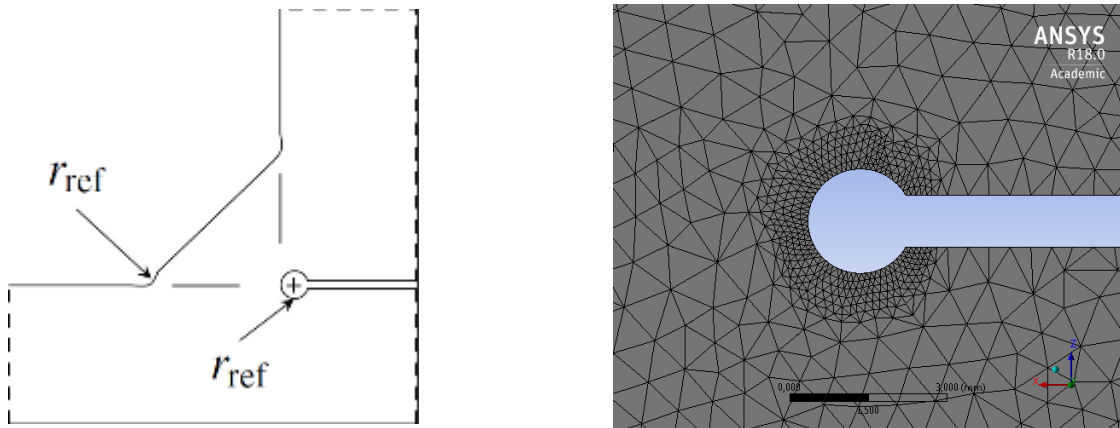


Abb. 7-2: Modellierung der Wurzelkerbe als „Schlüsselbockkerbe“ [136]

### 7.3 Vernetzung

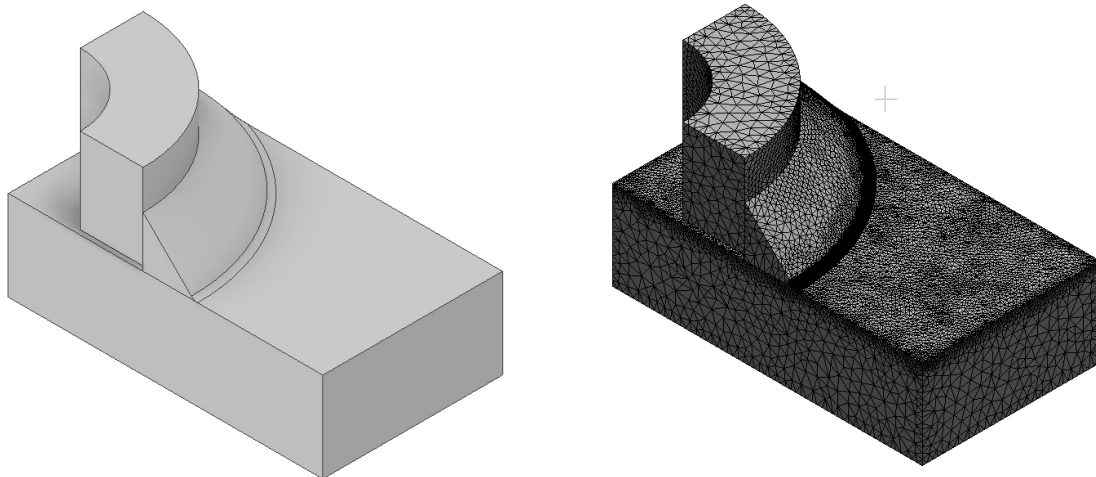


Abb. 7-3: Modellierung des Submodells in Inventor (links) und Vernetzung in Ansys (rechts)

Für die Vernetzung wurden Volumenelemente mit quadratischem Verschiebungsansatz gewählt (SOLID 186 und SOLID 187 Elemente nach [162]). Die maximalen Kantenlängen wurden anhand von Sensitivitätsanalysen festgelegt. Sie betragen 3 mm für Volumenelemente im Globalmodell. Die maximale Kantenlänge im Submodell wurde mit 0,4 mm festgelegt. Im Bereich der Schweißnahtübergänge sowie der Schweißnahtwurzel wurden die Elemente bis auf eine Kantenlänge von 0,1 mm verfeinert.

## 7.4 Validierung

Die Validierung erfolgt anhand eines Vergleiches der berechneten Dehnungen im Modell mit den im Versuch ermittelten Dehnungen, die mithilfe von Dehnmessstreifen aufgezeichnet wurden. Die Möglichkeiten zur direkten messtechnischen Erfassung von Kerbspannungen sind sehr begrenzt. Die Dehnungserfassung ist nur an der Bauteiloberfläche möglich und aufgrund der im Modell vereinfachten Geometrie am Nahtübergang (vgl. Abb. 7-1) in diesem Bereich nur eingeschränkt aussagefähig. Für die Validierung wird daher die Spannung vor dem Nahtübergang herangezogen. An den Prüfkörpern wurden für jede Versuchsserie Dehnmessstreifen in einem definierten Abstand vor dem Schweißnahtübergang appliziert. Die gemessenen Dehnungen wurden anschließend mit den im FE Modell berechneten Dehnungen verglichen.

Für einen Prüfkörper mit Gurtlamellenende wurde mehrere DMS vor dem Schweißnahtübergang appliziert, um einen Spannungsanstieg messen zu können. Der Vergleich für einen Versuchskörper der Serie 2 ist in Abb. 7-4 dargestellt.

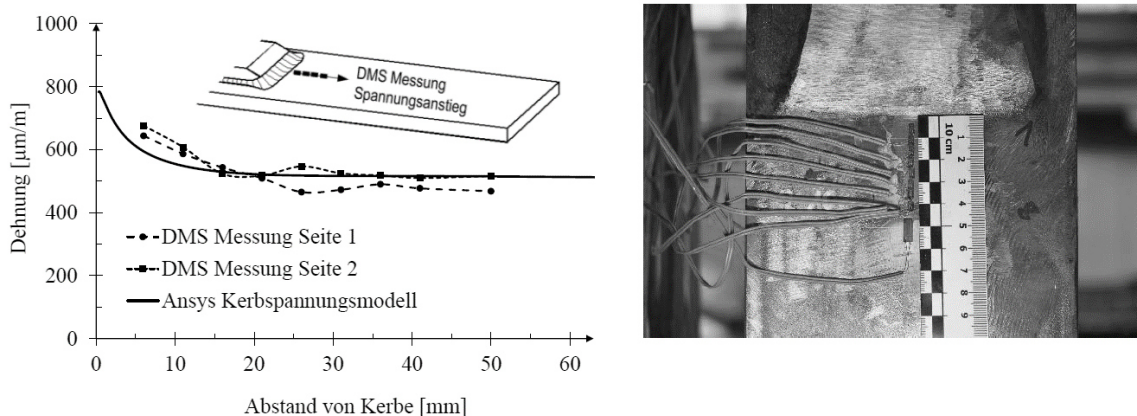


Abb. 7-4: Validierung des FE Modells: Vergleich des berechneten Dehnungsanstiegs vor der Kerbe mit gemessenen Dehnungen (links) und Aufnahme eines Prüfkörpers mit applizierten Dehnmessstreifen (rechts) [96]

Neben der Validierung am Prüfkörper erfolgte auch ein Abgleich der berechneten Spannungskonzentrationen mit Beispielrechnungen von RADAJ [132] S. 156. Der Abgleich erfolgte an ähnlichen, zweidimensionalen Konstruktionsdetails. Bei einer Anpassung der Blech- und Schweißnahtdicken an die Beispielrechnungen von RADAJ zeigten die dreidimensionalen Modelle ähnliche Kerbspannungsfaktoren an Nahtwurzel und Schweißnahtübergang. Wenn das Modell zusätzlich auf den maßgebenden zweidimensionalen Schnitt reduziert wird, können die Spannungskonzentrationen



nach RADAJ [132] S. 156 sehr genau nachgerechnet werden. In Abb. 7-5 sind beispielhaft die Kerbspannungsfaktoren  $\beta_{kz}$  nach RADAJ [132] und dem hier verwendeten FE Modell gegenübergestellt. Zum Vergleich ist zusätzlich eine Berechnung am FE Modell mit einer Lotnaht aus CuAl7 dargestellt.

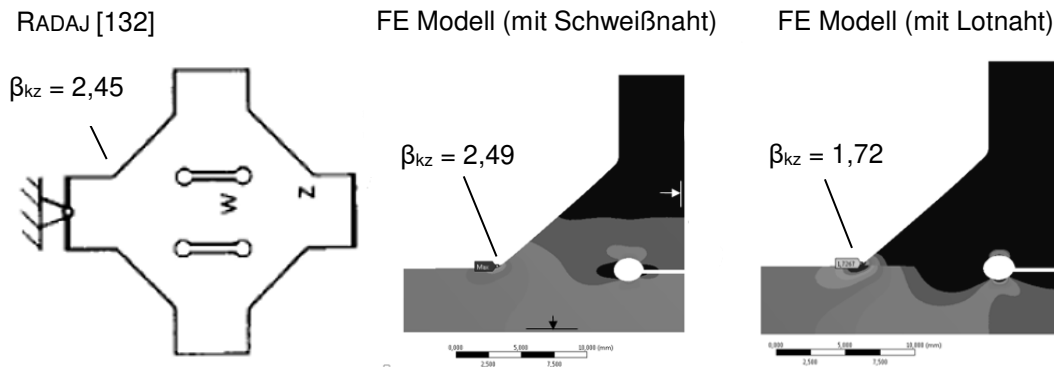


Abb. 7-5: Vergleich der berechneten Kerbspannungen am FE Modell mit Schweißnaht und mit Lotnaht zum Referenzmodell von RADAJ [132]

## 7.5 Modellauswertung

Für die hier vorgestellten numerischen Untersuchungen werden die maximalen linear elastischen Kerbspannungsfaktoren an Nahtwurzel und Nahtübergang bewertet. Der Kerbspannungsfaktor gibt dabei das Verhältnis der maximalen Hauptspannung in der Kerbe zur (Nenn-) Spannung im ungestörten Nennquerschnitt an. Für eine bessere Interpretation der Kerbspannungsfaktoren kann der Wert mit einem Kerbspannungskerbfall ins Verhältnis gesetzt werden. Nach den IIW Empfehlungen [83] kann beispielsweise der charakteristische Kerbspannungskerbfall mit  $\Delta\sigma_c = 225 \text{ N/mm}^2$  herangezogen werden. Ein zum Kerbspannungsfaktor 3 äquivalenter Nennspannungskerbfall wäre demnach  $225 \text{ N/mm}^2 / 3 = 75 \text{ N/mm}^2$ .

## 7.6 Parameterstudien zu Gurtlamellenenden

### 7.6.1 Übersicht

Auf Grundlage der validierten Modelle wurden Parameterstudien durchgeführt, um den potenziellen Einfluss unterschiedlicher geometrischer Parameter aufzuzeigen. Die Untersuchungen eignen sich, um die Aussagekraft der ermittelten Kerbspannungen mit den jeweiligen Versuchsergebnissen der einzelnen Serien zu vergleichen.

### 7.6.2 Einfluss der Endgeometrie

Ein Vergleich der berechneten Kerbspannungen für Serie 2 und Serie 3 zeigt deutlich die Verlagerung der maßgebenden Kerbe vom Schweißnahtübergang hin zur Schweißnahtwurzel, vgl. Tab. 7-1. Im Vergleich zu Serie 2 steigen die Kerbspannungen an der Nahtwurzel infolge des reduzierten Nahtquerschnittes deutlich. Der Effekt wird beim Nahtübergang (im Kerbspannungsmodell) durch einen flacheren Nahtanstiegswinkel kompensiert. Das hier untersuchte Kerbspannungsmodell sagt die Versagenscharakteristik der Versuche tendenziell gut voraus. In Serie 2 versagten alle Prüfkörper am Nahtübergang. In Serie 3 versagten mehr als die Hälfte der Prüfkörper ausgehend von einem Ermüdungsriss an der Nahtwurzel. Die Aussagekraft der Berechnungen ist etwas begrenzt. Zum einen zeigten Serie 2 und Serie 3 im Versuch vergleichbare Ermüdungsfestigkeiten und zum anderen ist die Dominanz der Wurzelkerbe in Serie 3 nicht so ausgeprägt, wie die Berechnungen zeigen. Bei einigen Prüfkörpern konnte ein gleichzeitiges Risswachstum von Nahtübergang und Nahtwurzel beobachtet werden.

Tab. 7-1: Einfluss der Endgeometrie

Schematische Darstellung	Steigung	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	1:2 (wie Serie 2)	3,0	3,0
	1:3 (wie Serie 3)	2,4	3,8

### 7.6.3 Einfluss der Schweißnahtdicke und der Anfasung

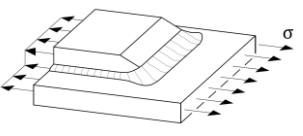
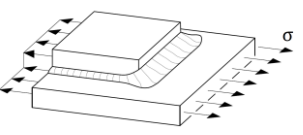
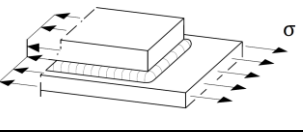
In Tab. 7-2 sind Berechnungen zum Einfluss der kerbfreien Bearbeitung und der Dicke der Kehlnaht gegenübergestellt. Ausgehend von der Geometrie der Serie 2 wurde eine Variante ohne Anfasung der Lamelle und ohne kerbfreie Bearbeitung modelliert sowie eine Variante ohne verstärkte Kehlnaht und ohne kerbfreie Bearbeitung der Nahtübergänge.

Generell hat die Anfasung der Lamelle keinen direkten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit an Nahtwurzel und Nahtübergang. Ihr Zweck ist primär die Entfernung der beim Schleifen der Nahtübergänge störenden Blechkante der Lamelle, siehe auch Abb. 6-6. Die Variante im Schweißzustand zeigt erhöhte Spannungskonzentrationen am Nahtübergang. Die modelltechnische Unterscheidung zwischen Schweißzustand und der kerbfreien Bearbeitung erfolgte über eine Anpassung des Ausrundungsradius (vgl. Kapitel 7.2).

Die in Tab. 7-2 dargestellten numerischen Untersuchungen verdeutlichen, dass die Nahtdicke einen deutlichen Einfluss auf die Kerbspannung ausübt. Das Verhältnis von Lamellendicke zu Schweißnahtdicke korreliert mit den Spannungskonzentrationen an Nahtwurzel und Nahtübergang. Je dicker die Endnaht im Verhältnis zur Lamelle, desto günstiger sind die Kerbspannungen.

Teilweise gibt es Bestrebungen, möglichst dünne Nähte an die Gurtlamellenenden zu setzen, mit der Idee, durch eine geringe Steifigkeit der quer geschweißten Endnaht die Lasten kontinuierlich über die Flankennähte einzuleiten. Dass diese Variante bei ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen zu vermeiden ist, verdeutlichen die berechneten Kerbspannungsfaktoren an dem Detail ohne verstärkte Stirrnaht in Tab. 7-2. Im Vergleich zum Kerbspannungsmodell der getesteten Serie 2 steigen die Kerbspannungsfaktoren stark an.

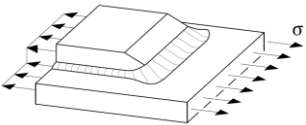
Tab. 7-2: Einfluss Anfasung und Nahtdicke

Schematische Darstellung	Geometrie	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	wie Serie 2	3,0	3,0
	wie Serie 2 aber im Schweißzustand und ohne Anfasung	3,5	3,0
	wie Serie 2 aber im Schweißzustand und ohne verstärkte Stirrnaht (a = 7 mm umlaufend)	8,2	9,4

### 7.6.4 Blechdickeneinfluss

In Tab. 7-3 sind die im FE Modell ermittelten Kerbspannungsfaktoren für Serie 1 mit 20 mm dicken Grundblechen und Lamellen sowie für Serie 2 mit 50 mm dicken Blechen dargestellt.

Tab. 7-3: Blechdickeneinfluss in der FE

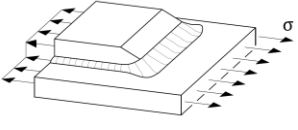
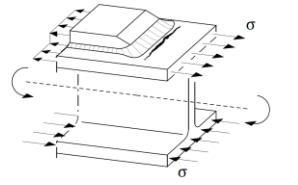
Schematische Darstellung	Blechdicken	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	20 mm (wie Serie 1)	2,5	2,6
	50 mm (wie Serie 2)	3,0	3,0

Die Spannungskonzentrationen am Nahtübergang und an der Nahtwurzel sind für die 50 mm dicken Bleche deutlich erhöht. Das deutet auf einen deutlichen Blechdickeneinfluss hin. Die experimentellen Untersuchungen bestätigen diesen Einfluss jedoch nicht, vgl. 6.5.9.

### 7.6.5 Bauteileinfluss

In Tab. 7-4 ist dargestellt, dass das Beanspruchungsszenario einen relativ deutlichen Einfluss auf die Kerbspannungsfaktoren nehmen kann. Gegenübergestellt sind die Kerbspannungsfaktoren an der rein axial beanspruchten Prüfkörpergeometrie aus Serie 1 und einer sich daran orientierenden Trägergeometrie mit 200 mm hohem und 10 mm dickem Steg bei gleicher Flansch- und Lamellenendgeometrie. Die Trägergeometrie wird durch ein Biegemoment beansprucht, das in der äußeren Faser des Nennquerschnitts die gleiche Beanspruchung erzeugt wie die axiale Beanspruchung in Serie 1. Unter der Momentenbeanspruchung steigen auf der Zugseite des Trägerquerschnitts die Kerbspannungsfaktoren am Nahtübergang, an der Wurzel sinken die Spannungen.

Tab. 7-4: Einfluss der Beanspruchung

Schematische Darstellung	Grundblech-geometrie	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	Serie 1	2,5	2,6
	Serie 1 in Träger-geometrie mit Mo-menten-bean-spruchung	3,2	2,1

### 7.6.6 Fazit

Generell zeigen die hier vorgestellten Parameterstudien auf, dass Kerbspannungsfaktoren sensibel auf geometrische Veränderungen reagieren.

Diese Einflüsse lassen sich in den Versuchen nur teilweise abbilden. Die Verlagerung der kritischen Kerbe vom Schweißnahtübergang zur Wurzelkerbe lässt sich bei flacheren Nahtgeometrien mittels eines Kerbspannungsmodells zeigen.

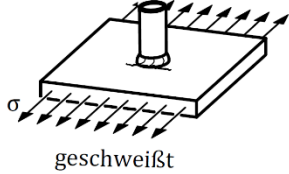
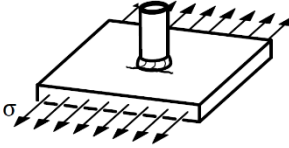
Der im Modell ermittelte Blechdickeneinfluss lässt sich dagegen in den Experimenten nicht beobachten. Eine mögliche Ursache ist der in [126] beschriebene reduzierte Blechdickeneinfluss für geschliffene Nahtübergänge. Ein weiterer Erklärungsansatz ist in Kapitel 8.5 gegeben.

In den experimentellen Untersuchungen stellte sich insbesondere die fertigungstechnische Qualität der Nachbearbeitung durch Schleifen als relevant für die Ermüdungsfestigkeit heraus, siehe auch Kapitel 6.4.3 In den experimentellen Untersuchungen sind diese Variationen als Streuung enthalten. Im Kerbspannungsmodell kann dieser Einfluss nicht ausreichend abgebildet werden.

## 7.7 Kerbspannungsfaktoren für geschweißte und gelötete Buchsen und Teller

In Tab. 7-5 sind die im FE Modell ermittelten Kerbspannungsfaktoren für geschweißte und gelötete Buchsen dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die in den Experimenten ermittelte Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit ansatzweise auch in einer FE Modellierung dargestellt werden kann.

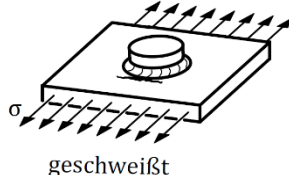
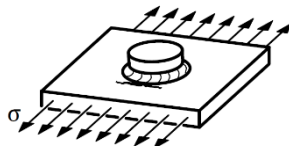
Tab. 7-5: Geschweißte und gelötete Buchsen

Kerbspannungsfaktoren	Konstruktionsdetail	Eigenschaften	Beschreibung
2,3	 geschweißt	wie Serie 15	Aufgeschweißte Buchse <b>(Referenz geschweißt)</b>
1,5	 gelötet	wie Serie 11, 13, 14	Aufgelötete Buchse <b>(Grundkonfiguration Buchse gelötet)</b>

Der geringere Spannungskonzentrationsfaktor für die gelöteten Buchsen deutet auf geringere Kerbwirkung und erhöhte Ermüdungsfestigkeit hin.

Ein ähnliches Verhalten kann auch für geschweißte und gelötete Teller gezeigt werden, vgl. Tab. 7-6.

Tab. 7-6: Geschweißte und gelötete Teller

Kerbspannungsfaktoren	Konstruktionsdetail	Eigenschaften	Beschreibung
4,5	 geschweißt	wie Serie 5	Aufgeschweißte Dopplung, $\varnothing = 75$ mm <b>(Referenz geschweißt)</b>
2,9	 gelötet	wie Serie 6	Aufgelötete Dopplung, $\varnothing = 75$ mm <b>(Grundkonfiguration Dopplung gelötet)</b>

Das Verhältnis der Ermüdungsfestigkeit zwischen geschweißter und gelöteter Konstruktion ist für beliebige Geometrien etwa gleich. Dabei liegen die Spannungskonzentrationsfaktoren für geschweißte Konstruktionen etwa um den Faktor 1,5 über denen der gelöteten Varianten. Das entspricht etwa dem Verhältnis der Elastizitätsmoduln zwischen Stahl und der Kupferlegierung CuAl7.

## 8 Kerbfallvorschläge für geschweißte und gelötete Lamellen, Steifen und Anbauteile

### 8.1 Übersicht

Die große Anzahl der in der Datenbank aufgearbeiteten Versuchsergebnisse ermöglicht in Kombination mit der einheitlichen statistischen Auswertemethode eine Überprüfung der in DIN EN 1993-1-9 [7] angegebenen Kerbfälle für aufgeschweißte Lamellen, Steifen und Anbauteile.

Eigene experimentelle Untersuchungen am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende ermöglichen die Erweiterung der Kerbfalltabelle durch Berücksichtigung dieses zusätzlichen Konstruktionsdetails. Die experimentellen Untersuchungen an aufgelöteten Bauteilen dienen als Empfehlung für eine zukünftige Erweiterung der Kerbfalltabelle in prEN 1993-1-9 [8] für lichtbogengelötete Strukturen.

Alle in diesem Kapitel gegebenen Vorschläge für Kerbfallklassen auf Grundlage des Nennspannungskonzepts beruhen auf der statistischen Auswertung (vgl. Kapitel 4) von experimentellen Untersuchungen, vgl. Kapitel 5 und 6. Dabei wurden nur Zug-schwelluntersuchungen unter konstanter Amplitude berücksichtigt. Die Einstufung der Ermüdungsfestigkeiten orientiert sich an den in prEN 1993-1-9 [8] vorgegebenen Kerbfallklassen.

Alle Empfehlungen gelten grundsätzlich für Details mit umlaufender Schweißnaht im ermüdungskritischen Bereich. Der Nennspannungsquerschnitt, an dem die einwirkende Nennspannung zu berechnen ist, wird grundsätzlich unter Vernachlässigung der aufgeschweißten oder aufgelöteten Anbauteile ermittelt.

Alle Kerbfallempfehlungen gelten zudem für Details mit durchgehenden Schweißnähten ohne Ansatzstellen im ermüdungskritischen Bereich.

### 8.2 Kerbfallempfehlungen für Details im Schweißzustand

#### 8.2.1 Längssteife

Das Konstruktionsdetail wird in DIN EN 1993-1-9 [7] in Abhängigkeit von der Länge mit einer Ermüdungsfestigkeit zwischen  $\Delta\sigma_c = 56 \text{ N/mm}^2$  und  $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$  angegeben. Zu dem Detail ist eine große Anzahl experimenteller Untersuchungen bekannt. Der in DIN EN 1993-1-9 [7] angegebene Längeneinfluss mit deutlichem Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit kann anhand der Daten nicht bestätigt werden,

vgl. Kapitel 5.2.4. Aufgeschweißte Bauteile mit kurzen Längen in Lastrichtung zeigen generell eine bessere Ermüdungsfestigkeit, vgl. Kapitel 5.6, aber der Einfluss ist für den relevanten Längenbereich  $> 50$  mm in Ermüdungsversuchen nicht mehr signifikant. Es wird daher empfohlen, die tiefste Kerbfalleinstufung (Kerbfall 56) in DIN EN 1993-1-9 [7] zu streichen. Die statistische Auswertung der in dieser Arbeit zugrunde gelegten experimentellen Daten zeigt ohne weitere geometrische Unterteilung auf Kerbfall 71, vgl. Kapitel 5.2.7. Es gibt momentan jedoch nur sehr wenige Versuche an Längssteifen mit Längen  $> 200$  mm, so dass eine Herabstufung für größere Längen möglicherweise sinnvoll ist, bis experimentelle Daten für diesen Längenbereich vorliegen. Für Längssteifen mit Längen die  $\leq 50$  mm sind, wird der Kerbfall für „kleine Aufschweißteile“ empfohlen, siehe Kapitel 8.2.5.

Die Auswertung der experimentellen Daten zeigt, dass ein signifikanter Einfluss der Endgeometrie der Längssteifen im Schweißzustand in Untersuchungen nicht bestätigt werden konnte. Eine Anfasung der Steife führt nicht unbedingt zu einer Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit, vgl. Kapitel 5.2.3. Im Wesentlichen können zwei Ursachen für den fehlenden Einfluss identifiziert werden.

Zum einen sind die freien Ecken der Steife auch bei rechteckigen Geometrien ohne Spannung. Der häufig angenommene Steifigkeitssprung (der sich auf die Balkentheorie bezieht) ist ohne direkten Einfluss auf die Spannungskonzentration an der maßgebenden Stelle. Erst bei einem sehr flachen Winkel der Anfasung ist eine deutliche Änderung des Spannungsverlaufes und damit ein Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit zu erwarten.

Zum anderen können umlaufende Nähte in der Praxis nicht um spitz zulaufende Kanten geführt werden. Die Steifen erhalten dementsprechend an den Enden immer eine senkrechte Schweißnahtvorbereitung, um die eine Kehlnaht geschweißt werden kann, vgl. Abb. 8-1 links. Daraus folgt, dass die lokale Geometrie der Schweißnaht für unterschiedliche Varianten der Anfasung konstant bleibt. Der für die Ermüdungsfestigkeit relevante Winkel des Schweißnahtanstiegs  $\beta$  ist demnach unabhängig von der Anfasung  $\alpha$  der Längssteife, vgl. Abb. 8-2 rechts. Dieser Zusammenhang lässt sich bei entsprechender Modellierung auch in einem Kerbspannungsmodell zeigen. Für drei untersuchte Varianten mit rechteckiger bzw. angefaseter Längssteife ergeben sich nur minimale Abweichungen in Bezug auf den Kerbspannungsfaktor, vgl. Abb. 8-1.



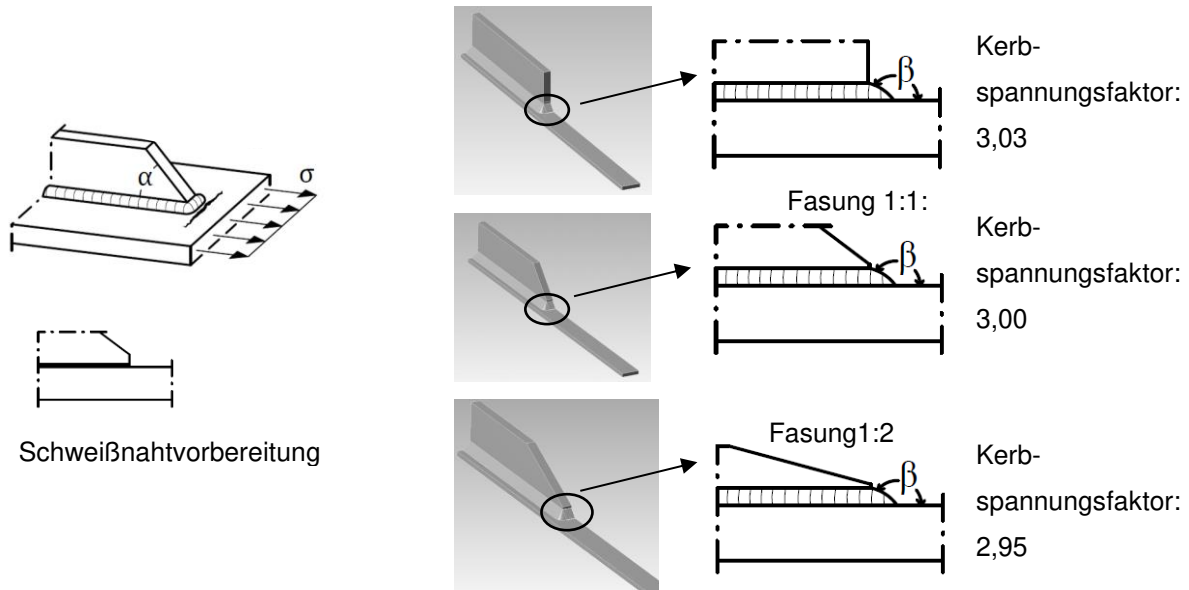


Abb. 8-1: Links: Längssteife mit Anfasungswinkel  $\alpha$ , rechts: Varianten mit unterschiedlichen Winkeln der Anfasung  $\alpha$ , konstantem Schweißnahtanstiegswinkel ( $\beta = 45^\circ$ ) und dazugehörigem Kerbspannungsfaktor

Auf Grundlage der oben beschriebenen Zusammenhänge und der in Kapitel 5.2.3. beschriebenen experimentellen Untersuchungen wird empfohlen, das Konstruktionsdetail der angefasten Längssteife im Schweißzustand wie die klassische (rechteckige) Längssteife zu behandeln.

Tab. 8-1: Kerbfallvorschlag Längssteife (Schweißzustand)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
<p><b>71</b> für <math>\ell \leq 200 \text{ mm}</math></p>			<p>Längssteife auf Trägern oder Blechen.</p>	<p>Umlaufende Schweißnaht. Die Nennspannung wird im Grundblech unter Vernachlässigung der Steife berechnet.</p>
<p><b>63</b> für <math>\ell &gt; 200 \text{ mm}</math></p>			<p>Für <math>\ell \leq 50 \text{ mm}</math> kann der Kerbfall für „kleine Aufschweißsteile“ genutzt werden</p>	

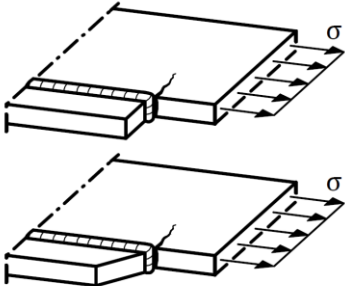
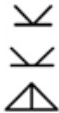
Der Kerbfallvorschlag für das Konstruktionsdetail ist in Tab. 8-1 gegeben. Die Ermüdungsfestigkeit ist in Abhängigkeit der Länge der Längssteife einschließlich der Schweißnähte (Abstand der Schweißnahtübergänge  $\ell$ ) unterteilt. Für Längssteifen, die größer sind als 200 mm wird Kerbfall 63 empfohlen, für kürzere Längssteifen Kerbfall

71. Für sehr kleine Längen  $\ell < 50$  mm kann auch der Kerbfall für kleine Aufschweißteile genutzt werden, vgl. Kapitel Tab. 8-5. Es wird empfohlen, den Kerbfall unabhängig von der Endgeometrie der Steife anzuwenden.

### 8.2.2 Knotenbleche am Blechrand

Für das Konstruktionsdetail sind ebenfalls viele experimentelle Untersuchungen bekannt, vgl. Kapitel 5.3. Die Versuche zeigen insgesamt eine deutlich bessere Ermüdungsfestigkeit als momentan in DIN EN 1993-1-9 [7] angegeben. Auf Grundlage der statistischen Auswertung der Versuche kann für das Detail im Schweißzustand gegenüber dem aktuellen Kerbfall 40 ein verbesserter Kerbfall 56 empfohlen werden, vgl. Tab. 8-2.

Tab. 8-2: Kerbfallvorschlag Knotenblech am Blechrand (Schweißzustand)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
56			Knotenblech am Blechrand	<p>Umlaufende Schweißnaht als Stumpfnah, versenkte Naht oder Kehlnah</p> <p>Die Blechdicke der Steife darf dünner sein als die Dicke des Flansches</p>

Für das Detail des Knotenbleches am Blechrand ist eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit durch eine Anfasung der Enden des Knotenblechs im Schweißzustand nicht zu erwarten (vgl. Kapitel 5.3.2). Die Anfasung dient in erster Linie der Zugänglichkeit für die Bearbeitung der Endnähte. Experimentelle Daten zur kerbfrei bearbeiteten Variante sind dabei nur in geringer Anzahl vorhanden.

Die Einstufung orientiert sich dabei an der Ermüdungsbeanspruchung des Grundblechs bzw. des Trägers, an dem die Steife angeschweißt ist. Wirken zusätzliche Ermüdungsbeanspruchungen auf das Knotenblech selbst, müssen diese gesondert nachgewiesen werden. In dem entsprechenden Fall sollte das Knotenblech mit einer Vollnaht angeschlossen werden. Andernfalls sind auch nicht durchgeschweißte Nähte

möglich. Das in Tab. 8-2 gegebene Detail versagt bei der dargestellten Ermüdungsbeanspruchung in der Regel ausgehend vom Nahtübergang.

### 8.2.3 Quersteife

Für das Konstruktionsdetail ist eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen bekannt, vgl. Kapitel 5.4. Der bestehende Kerbfall 80 in DIN EN 1993-1-9 kann für unterschiedliche Varianten von Quersteifen bestätigt werden. So ist die Ermüdungsfestigkeit für Quersteifen mit und ohne Aussparung im Bereich der Längsnaht bei geschweißten Trägern bzw. mit dem Ausrundungsradius bei gewalzten Trägern vergleichbar.

Tab. 8-3: Kerbfallvorschlag Quersteife (Schweißzustand)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80 für $l \leq 50 \text{ mm}$			<p>Quersteife: Auf Blechen und in Trägern in unterschiedlichen Ausführungen</p>	<p>Die Nennspannung wird im Grundblech oder im Träger unter Vernachlässigung der Steife berechnet.</p> <p>Bei halbhoher Quersteifen, die nicht an den Flansch anschließen, kann die Nennspannung ersatzweise durch die maximale Hauptspannung ermittelt werden</p>
71 für $l > 50 \text{ mm}$				

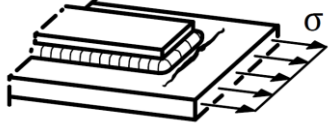

Gegenüberstellungen von Kleinversuchen und Trägerversuchen zeigen, dass Ermüdungsfestigkeit und Streuung dieser Varianten im Zugschwellbereich sehr ähnlich sind, vgl. Kapitel 5.4.3. Eine Korrektur der ebenfalls auf Zugschwellversuchen basierenden Kerbfalleinstufung für Kleinversuche ist demnach nicht notwendig, siehe auch Kapitel 2.4.4. Die geometrische Unterteilung hinsichtlich der Abstände der Schweißnahtübergänge in Lastrichtung ist experimentell begründet [65]. Der Wechsel in die niedrigere Kerbfallklasse, ab einem Abstand des Schweißnahtübergangs von 50 mm, ist vergleichbar mit der Abstufung für „kleine Aufschweißteile“ (siehe Kapitel 8.2.5). Beide Details werden mit der gleichen Kerbfalleinordnung bewertet.

Die Kerbfallempfehlung für das Konstruktionsdetail Quersteife gilt für alle in Tab. 8-3 zusammengetragenen Varianten. Die Ermüdungsfestigkeit ist in Abhängigkeit der Dicke der Quersteife einschließlich der Schweißnähte (Abstand der Schweißnahtübergänge  $\ell$ ) unterteilt.

#### 8.2.4 Lamelle

Das Detail ist in DIN EN 1993-1-9 [7] in Abhängigkeit von der Blechdicke mit Kerbfall  $\Delta\alpha_c = 36 - 56 \text{ N/mm}^2$  bewertet und wird aufgrund der niedrigen Ermüdungsfestigkeit für ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen kaum verwendet. Im deutschen Brückenbau wird ausschließlich die „traditionell deutsche Variante“ mit dicken Endnähten und kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen verwendet, siehe Kapitel 8.3.3. Parameterstudien in Kapitel 7.6 verdeutlichen den großen Einfluss der Dicke der Endnaht, wenn diese im Vergleich zur Lamelle zu klein wird. Auf Grundlage der numerischen Untersuchungen wird empfohlen, das  $a$ -Maß der Endnaht nicht kleiner als das 0,3-fache der Lamelle zu wählen, da die Spannungskonzentration bei kleiner werdenden Nähten sehr stark ansteigt.

Tab. 8-4: Kerbfallvorschlag Lamelle (Schweißzustand)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
56			Gurtlamellen auf Trägern oder Blechen	Umlaufende Schweißnaht als Kehlnaht. Das $a$ -Maß der Schweißnaht an der Stirnseite sollte mindestens $1/3$ der Lamellendicke betragen

In DIN EN 1993-1-9 [7] wird ein Blechdickeneinfluss für das Detail beschrieben. Möglicherweise ist er das Ergebnis einer bruchmechanischen Parameterstudie, da die zugrundeliegenden Versuche [44] nur an ähnlich dicken Blechen durchgeführt wurden. Unklar ist, ob die Dicke der Schweißnaht dabei berücksichtigt wurde.

Für die Variante mit kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen und dicken Endnähten konnte kein Blechdickeneinfluss festgestellt werden, vgl. Kapitel 6.4.7.

Für das Konstruktionsdetail wird, basierend auf dem in Abb. 5-22 ermittelten Bemessungswert, ein blechdickenunabhängiger Kerbfall 56 vorgeschlagen, vgl. Tab. 8-4. Eine höhere Ermüdungsfestigkeit kann mit dicken Endnähten und kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen erreicht werden, vgl. Kapitel Tab. 8-8.

### 8.2.5 Kleine Aufsweißteile

Das Detail umfasst Bauteile, die auf ein ermüdungsbeanspruchtes Blech aufgeschweißt sind und deren Abstand der Schweißnahtübergänge kleiner als 50 mm ist. Die in Kapitel 5.6 zusammengetragenen Versuche beziehen sich auf hubgeschweißte Bolzen und auf Bauteile wie Buchsen, die mit einer Kehlnaht umgeschweißt wurden. Das Schweißverfahren ist dabei ohne Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.

Tab. 8-5: Kerbfallvorschlag für kleine Aufsweißteile (Schweißzustand)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80 für $l \leq 50 \text{ mm}$			Umschweißte oder hubgeschweißte Buchsen, Bolzen und andere kleine Aufsweißteile	Die Nennspannung wird im Grundblech oder im Träger unter Vernachlässigung des Aufsweißteils berechnet. Es wird keine Ermüdungsbeanspruchung durch das Aufsweißteil in das Grundblech eingeleitet.

Der aktuelle Kerbfall 80 in DIN EN 1993-1-9 [7] bezieht sich konkret auf Kopfbolzen, kann aber auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen auch auf vergleichbare umgeschweißte Bauteile erweitert werden.

Für umschweißte und hubgeschweißte kleine Aufschweißteile, bei denen die Bauteildicke einschließlich der Schweißnaht bzw. der Schweißnahtwulst  $l < 50$  mm beträgt, wird Kerbfall 80 empfohlen, vgl. Tab. 8-5. Für größere Abmessungen wird der Kerbfall für Längssteifen oder Lamellen empfohlen.

### **8.3 Kerbfallbewertung für Details, die durch Schleifen nachbehandelt wurden**

#### **8.3.1 Längssteife, durch Schleifen nachbearbeitet**

Längssteifen, die durch Schleifen nachbehandelt wurden, zeigen ein anderes Ermüdungsverhalten als Längssteifen im Schweißzustand. Durch nachträgliches Beschleifen der Nahtgeometrie ergibt sich grundsätzlich die Möglichkeit, den Schweißnahtanstiegswinkel zu bearbeiten und den kerbscharfen Nahtübergang zu verbessern. Der Ablauf ist dabei ähnlich zu der in Kapitel 6.4.3 beschriebenen Fertigung der kerbfrei bearbeiteten Gurtlamellenenden. Für die kerbfreie Bearbeitung der Schweißnähte kann das Anfasen oder Ausrunden der Endgeometrie wichtig sein, da die Kante bei der Bearbeitung mit großen Werkzeugen, wie beispielsweise mit dem üblichen Winkelschleifer, stört. Es ist daher sinnvoll, den Winkel der Anfasung bzw. den Ausrundungsradius so zu wählen, dass eine kerbfreie Bearbeitung ohne Störung möglich ist. Inwieweit der Winkel der Anfasung bzw. der Ausrundungsradius bei kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen selbst einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausüben, ist nicht geklärt. (Für die Längssteife im Schweißzustand ist kein Einfluss zu erwarten, vgl. Kapitel 8.2.1). Die Antwort darauf sollte mithilfe experimenteller Untersuchungen gefunden werden, um Fertigungseinflüsse zu berücksichtigen. Generell ist eine Bewertung auch mit numerischen Methoden wie dem Kerbspannungskonzept möglich. Allerdings kann das Kerbspannungskonzept die von Fertigungseinflüssen geprägte Restkerbe (siehe auch Kapitel 6.4.5) nicht realitätsgetreu abbilden und deshalb deren großen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit nicht erfassen.

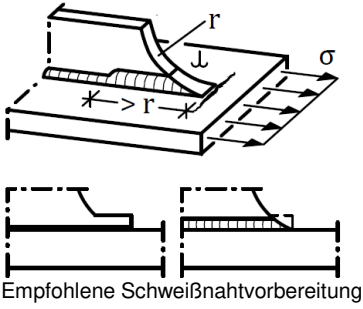


Ein für kerbfrei bearbeitete Längssteifen ebenfalls sehr wichtiger Aspekt ist die maßgebende Versagenskerbe. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit am Schweißnahtübergang dazu führt, dass die Wurzelkerbe maßgebend wird, vgl. Kapitel 5.2.2. Zudem wird bei nicht durchgeschweißten Nähten durch Schleifen die Schweißnahtdicke reduziert, mit ebenfalls negativen Einflüssen auf die Ermüdungsfestigkeit. Um das volle Potential der Verbesserung zu erreichen, müssen die Nahtenden durchgeschweißte werden, so dass keine Nahtwurzel

im ermüdungskritischen Endbereich der Längssteife liegt. Die notwendige Länge der durchgeschweißten Endnaht kann am Ausrundungsradius orientiert werden.

Insgesamt sind nur sehr wenige experimentelle Untersuchungen zum Konstruktionsdetail der Längssteife mit kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen bekannt. Keiner der Versuche entspricht direkt dem in DIN EN 1993-1-9 [7] gegebenen Detail mit einem vorgegebenem Endradius  $> 150 \text{ mm}$ . Die bekannten Versuche deuten darauf hin, dass eine höhere Ermüdungsfestigkeit auch unter abweichenden Endgeometrien erreicht werden kann, vgl. Kapitel 5.2.2. Für eine Hochstufung des Kerbfalls in prEN 1993-1-9 [8] ist die empirische Grundlage momentan nicht ausreichend.

Der in Tab. 8-6 gegebene Kerbfallvorschlag ist aus diesem Grund eine konservative Bewertung auf Grundlage der wenigen bekannten Experimente, vgl. Kapitel 5.2.2. Die Endgeometrie sollte so gewählt werden, dass eine kerbfreie Bearbeitung der Nahtenden durch den Fertiger gewährleistet ist. Eine direkte Berücksichtigung der Endgeometrie für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit wird nicht empfohlen.

Tab. 8-6: Kerbfallvorschlag für Längssteifen (durch Schleifen nachbehandelt)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80	 <p>Empfohlene Schweißnahtvorbereitung</p>	 (Endnaht)	Längssteife mit Ausrundung und verstärkter Endnaht	<p>Die Endgeometrie sollte so gewählt werden, dass sie eine kerbfreie Bearbeitung der Schweißnähte durch Schleifen ermöglicht.</p> <p>Die Länge der verstärkten Endnaht sollte <math>\geq r</math> sein.</p> <p>Nahtübergänge werden kerbfrei bearbeitet</p>
		 (Flanken-naht)		

Die Nahtenden müssen für die Anwendung des Kerbfalls mit einer Vollnaht angeschlossen werden, um Nahtwurzelsversagen auszuschließen. Zur notwendigen Länge der durchgeschweißten Endnaht gibt es keine bekannten Untersuchungen. Bis entsprechende Untersuchungen vorliegen, wird empfohlen, die Länge größer als den Radius  $r$  der Ausrundung zu wählen, vgl. Tab. 8-6. Dargestellt ist auch eine empfohlene Schweißnahtvorbereitung mit einer Nase, die nach dem Schweißen abgeschliffen wird, um einen ebenen Übergang herzustellen.

### 8.3.2 Knotenbleche am Blechrand, durch Schleifen nachbearbeitet

Die aktuelle Einstufung für kerbfrei bearbeitete Knotenbleche am Blechrand in DIN EN 1993-1-9 [7] kann in Abhängigkeit des Endradius und der Bauteilbreite zwischen  $\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$  und  $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$  liegen. Der Hintergrund der Einstufung ist rein modellbasiert. In [53], S. 18 wird deutlich, dass die Einstufung auf Grundlage einer bruchmechanischen Parameterstudie vorgenommen wurde. Es gibt keine bekannten experimentellen Untersuchungen, die diese Einstufung stützen. Es ist davon auszugehen, dass bei der Bearbeitung mit dem Winkelschleifer, ähnlich wie bei der kerbfrei bearbeiteten Längssteife und dem Gurtlamellenenden, Restkerben mit Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit entstehen, vgl. auch Kapitel 6.4.5. Die große Kerbfallspreizung, die in Abhängigkeit des Endradius sowohl die kleinste als auch die größte Ermüdungsfestigkeit der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Details annehmen kann, ist insbesondere unter Berücksichtigung der bei Längssteifen festgestellten Unabhängigkeit von der Steifenendgeometrie nicht schlüssig.

Es wird empfohlen, die Radiusabhängigkeit aufzuheben und auf Grundlage der bekannten experimentellen Daten (vgl. Kapitel 5.3.3) vorerst Kerbfall 71 für das Detail mit kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen zu definieren. Zusätzliche experimentelle Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Endgeometrie und der Ermüdungsfestigkeit sind notwendig.

Insgesamt sind für das Detail nur sehr wenige Versuche bekannt, vgl. Kapitel 5.3.3. Die in Tab. 8-7 empfohlene Kerbfalleinstufung 71 ist eine konservative Einschätzung auf Grundlage der wenigen bekannten Versuche.

Wie für die durch Schleifen nachbearbeitete Längssteife, wird die Vernachlässigung des Einflusses der Endgeometrie empfohlen.

Die Nahtenden müssen für die Anwendung des Kerbfalls durchgeschweißt werden, um Nahtwurzelsversagen zu verhindern. Zur notwendigen Länge der durchgeschweißten Endnaht gibt es keine bekannten Untersuchungen. Bis entsprechende Untersuchungen vorliegen, wird empfohlen, die Länge größer als den Radius  $r$  der Ausrundung zu wählen.



Tab. 8-7: Kerbfallvorschlag Knotenbleche am Blechrand (durch Schleifen nachbehandelt)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71		 (Endnaht)	Längssteife oder Knotenblech am Blechrand	Die Endgeometrie sollte so gewählt werden, dass sie eine kerbfreie Bearbeitung der Schweißnähte durch Schleifen ermöglicht.  Nahtübergänge werden kerbfrei bearbeitet

Im Gegensatz zur Längssteife kann die Kontur der Endgeometrie des Knotenbleches am Blechrand auch durch das Ausschneiden der Enden, zum Beispiel mit einem Brennschnitt erreicht werden. Durch dieses Verfahren können möglicherweise höhere Ermüdungsfestigkeiten erreicht werden. Experimentelle Untersuchungen dazu sind bisher nicht bekannt.

### 8.3.3 Lamelle, durch Schleifen nachbearbeitet

Das Detail stammt ursprünglich aus Konstruktionsregeln der Deutschen Bahn [96] und wird in DIN EN 1993-2 NA [10] mit  $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$  bewertet.

Die in Kapitel 6.4 vorgestellten experimentellen Untersuchungen an der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails Gurtslamellenenden unterstreichen die deutlich verbesserten Ermüdungsfestigkeiten gegenüber der einfachen Variante mit umlaufender Kehlnaht, vgl. Kapitel 5.5.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen zudem, dass zwischen der Variante mit 20 mm dicken Gurten und 50 mm dicken Gurten kein Blechdickeneinfluss beobachtet werden kann. Die Versuchsergebnisse an einer etwas angepassten Variante (Serie 3, vgl. Kapitel 6.4.2) zeigen, dass mit der entsprechend abgeflachten Nahtgeometrie 1/3 des Schweißnahtvolumens bei gleichbleibender Ermüdungsfestigkeit eingespart werden kann, wenn Nahtwurzelsversagen akzeptiert wird, vgl. Kapitel 7.6.3.

Tab. 8-8: Kerbfallvorschlag für Gurtlamellenenden (durch Schleifen nachbehandelt)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80	<p>Schweißnahtvorbereitung</p> <p>Schweißnahtvorbereitung</p>	<p>(Endnaht)</p> <p>(Flanken-naht)</p>	<p>Gurtlamellen auf Trägern oder Blechen,</p> <p>Steigung der Stirnnaht 1:2 oder Steigung der Stirnnaht 1:3</p>	<p>Die Stirnnaht ist blecheben zu bearbeiten, Nahtübergänge sind kerbfrei zu bearbeiten. Heftnähte an den Stirnseiten sind zu vermeiden</p>

Für ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen ist das Detail aufgrund der deutlich verbesserten Ermüdungsfestigkeit dem einfacheren Detail mit umlaufender Kehlnaht im Schweißzustand vorzuziehen. Das Detail kann auf Grundlage der in Kapitel 6.4.8 vorgestellten Versuche und den zusätzlich in der Datenbank dokumentierten Trägerversuchen mit  $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$  bewertet werden.

Im Gegensatz zu den nachbearbeiteten Längssteifen und Knotenblechen können die Nahtenden hier nicht durchgeschweißt werden. Aus diesem Grund müssen für das Detail sehr dicke, fertigungsaufwändige Endnähte hergestellt werden, die sich an der Lamellendicke orientieren. Das Schweißnahtvolumen kann um 1/3 reduziert werden, vgl. Kapitel 6.4.9. Der Kerbfallvorschlag ist in Tab. 8-8 dargestellt.

## 8.4 Kerbfallbewertung für gelötete Details

### 8.4.1 Aufgelötete Lamellen und Teller

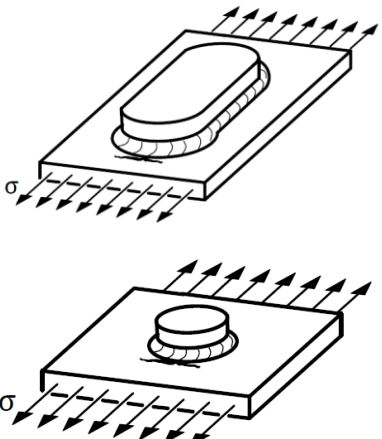

Die experimentellen Untersuchungen an aufgelöteten Bauteilen mit dem Lotwerkstoff CuAl7 konnten zeigen, dass gelötete Anbauteile eine signifikant höhere Ermüdungsfestigkeit aufweisen als geschweißte Anbauteile unter gleichen geometrischen Bedingungen, vgl. 6.5.11.

Numerische Untersuchungen verdeutlichen, dass die verbesserte Ermüdungsfestigkeit in erster Linie auf dem kleineren E-Modul von CuAl7 resultiert, die zu einer geringeren Spannungskonzentration an der kritischen Kerbe am Nahtübergang führt, vgl. Kapitel 7.7

Untersuchungen am FE Modell sagen in Bezug auf strukturmechanische Einflussgrößen ein grundsätzlich ähnliches Verhalten zu aufgeschweißten Bauteilen voraus, wobei das Niveau der Ermüdungsfestigkeit für gelötete Bauteile konstant ein bis zwei Kerbfallklassen über denen der geschweißten Bauteile liegt.

Auf Grundlage der in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Untersuchungen (Kapitel 6.5) wird für auf ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen aufgelötete Teller und Lamellen Kerbfall 80 empfohlen. Die Einstufung erfolgt in Anlehnung an vergleichbare Schweißdetails, also mit der gleichen Wöhlerlinienneigung ( $m = 3$ ). Kerbfall 80 gilt für beliebige Längen der aufgelöteten Teile in Lastrichtung. Die Klassifizierung gilt nur für den Lotwerkstoff CuAl7, vgl. Tab. 8-9.

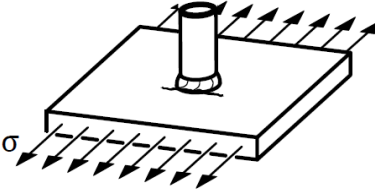

Tab. 8-9: Kerbfallvorschlag für aufgelötete Lamellen und Teller (gelötet mit CuAl7)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80		 CuAl7	Aufgelötete Teller und Lamellen	

#### 8.4.2 Aufgelötete Buchsen

Für aufgelötete Buchsen mit einem Durchmesser von 30 mm (ohne Schweißnaht) wird auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen Kerbfall 100 empfohlen, vgl. Tab. 8-10. Die Einstufung gilt für Buchsen, die umlaufend gelötet wurden. Für ein vergleichbares geschweißtes Detail (vgl. Kapitel 8.2.5) ist mit einer Ermüdungsfestigkeit von  $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$  zu rechnen.

Tab. 8-10: Kerbfallvorschlag für aufgelötete Buchsen (gelötet mit CuAl7)

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Sym- bol	Beschreibung	Anforderung
100			 CuAl7	Aufgelötete Buchse Ø = 30 mm	

### 8.5 Bewertung des Nennspannungskonzepts im Vergleich zum Kerbspannungskonzept in Bezug auf aufgeschweißte Lamellen, Steifen und Anbauteile

Eine grundsätzliche Frage bei der Bewertung der Ermüdungsfestigkeit mit dem Nennspannungskonzept ist die Berücksichtigung geometrischer Einflussgrößen. Jedes Kerbdetail ist eine Beschreibung gleichartiger Details, die sich aber in Hinsicht ihrer geometrischen Ausprägungen deutlich unterscheiden können. Solche Unterschiede können beispielsweise die genauen Blech- oder Schweißnahtdicken betreffen. Numerische Modelle wie das Kerbspannungskonzept sind grundsätzlich in der Lage, diese Einflussgrößen auf der Einwirkungsseite zu berücksichtigen.

Untersuchungen wie in Kapitel 7.6.2 zeigen, dass das Kerbspannungsmodell geeignet ist, um Vorhersagen über den Einfluss unterschiedlicher geometrischer Einflussfaktoren zu machen. So konnte mithilfe eines Kerbspannungsmodells im Vorfeld der Versuche vorhergesagt werden, dass die maßgebende Kerbe für Gurtlamellenenden mit angepasster Nahtgeometrie (Serie 3) an der Schweißnahtwurzel liegen wird. Andere Vorhersagen, wie der Blechdickeneinfluss konnten dagegen nicht experimentell bestätigt werden.

Eine Untersuchung zu der Streuung von Lamellen, Steifen und anderen Anbauteilen auf Grundlage experimenteller Untersuchungen in Kapitel 5.7 deutet an, dass die Streubreite der Ermüdungsfestigkeit der nach dem Nennspannungskonzept ausgewerteten Versuche ähnlich und teilweise kleiner ist als die Streuung bei Ermüdungsversuchen, die mit dem Kerbspannungskonzept ausgewertet wurden. Das verdeutlicht, dass das Kerbspannungskonzept trotz der genaueren Ermittlung der einwirkenden Spannungskonzentration nicht allgemein bessere Vorhersagen als das Nennspannungskonzept hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit machen kann.

Einen möglichen Erklärungsansatz bieten die unterschiedlichen Versagenskriterien. Für einen großen Teil der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Ermüdungsdaten war der Bruch des Prüfkörpers das maßgebende Kriterium. Für das Kerbspannungskonzept stellt der Anriss des Prüfkörpers ein passendes Versagenskriterium dar, da die Kerbspannung an der Oberfläche nur bis zum Anriss existiert und der Riss anschließend in das Material wandert. Jedoch ist es technisch anspruchsvoll das Versagenskriterium „Anriss“ im Versuch zu messen (siehe auch Kapitel 3.2). Viele Hintergrundversuche zum Kerbspannungskonzept beziehen sich deshalb auf das komplette Versagen des Prüfkörpers [142], S. 5. Bei vielen Versuchskörpern zum Konstruktionsdetail Gurtlamellenende konnte nach etwa  $2/3$  der Gesamtlebenszeit ein Ermüdungsriß durch Sichtprüfung beobachtet werden [38]. Diese „Unschärfe“ in Bezug auf die Versagenskriterien trifft ebenfalls auf das Nennspannungskonzept zu, siehe auch Kapitel 2.2. Möglicherweise wirkt sich das weniger stark aus, da das Verhältnis von Rissentstehung und Risswachstum für die definierten Kerbdetails etwa gleich ist. Dagegen kann das Kerbspannungskonzept längere bzw. kürzere Risswachstumsphasen für kerbweiche bzw. kerbscharfe Konstruktionsdetails nicht detailspezifisch erfassen. Weiterhin können die bereits in 5.7 diskutierten Modellfehler durch die notwendige Idealisierung im FE Modell ursächlich für die vergleichsweise ungenaueren Vorhersagen des Kerbspannungskonzeptes sein.

Ein weiterer Erklärungsansatz sind die großen Fertigungseinflüsse. Erhebliche Fertigungseinflüsse wurden bei den Versuchskörpern festgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, vgl. Kapitel 6.4.5 und Kapitel 6.5.5. Ein Großteil der geschweißten Konstruktionen im Bauwesen wird von Hand geschweißt. Dadurch ist auch die Kerbschärfe der Sekundärkerbe im maßgebenden Bereich einer großen Streuung unterworfen, siehe auch Kapitel 2.4.1. Das übliche Kerbspannungsmodell, bei dem die maßgebende Kerbe mit 1 mm ausgerundet wird und damit eine unendlich scharfe Kerbe abbildet (siehe auch Kapitel 2.7), ist nicht in der Lage, diese für die Ermüdungsfestigkeit bedeutende Streuung abzubilden. Gleichzeitig sind geometrische Einflussfaktoren wie die Blechdicke kerbempfindlich [126], S.7. Aus diesem Grund wird der Blechdickeneinfluss in den IIW Empfehlungen [83] für kerbfrei bearbeitete Konstruktionsdetails deutlich reduziert.

Die von streuenden Fertigungseinflüssen abhängige Kerbschärfe kann also nicht unabhängig von anderen geometrischen Einflussfaktoren wie der Blechdicke betrachtet

werden. Bei einer numerischen Betrachtung entsprechender geometrischer Einflussgrößen an Modellen, deren Kerbgrund mit 1 mm ausgerundet ist und damit eine unendlich scharfe Kerbe darstellt, vgl. Kapitel 7.2, wird demzufolge der ungünstigste Fall für den Blechdickeneinfluss abgebildet.

Auch für Gurtlamellenenden, die in dieser Arbeit untersucht wurden, zeigten die numerischen Untersuchungen einen strukturmechanischen Blechdickeneinfluss (vgl. Kapitel 7.6.4), der in den Versuchen nicht beobachtet werden konnte.

Bei der Bewertung der Ermüdungsfestigkeit mit experimentell bestätigten charakteristischen Kerbspannungskerbfällen wie FAT 225 [83] sind Streubreiten aus Fertigungseinflüssen, der konservative Ansatz einer unendlich scharfen Kerbe und der daraus resultierende strukturmechanische Blechdickeneinfluss auf der Widerstandsseite berücksichtigt. Die Wechselwirkung mit geometrischen Einflüssen ist mitverantwortlich für die großen Streuungen auf der Widerstandsseite. Die große Streubreite bedingt einen tieferen charakteristischen Kerbspannungskerbfall und das führt in der Regel zu einer konservativen Bemessung bei der Anwendung des Kerbspannungskonzeptes.

Dieser Zusammenhang soll im Folgenden am Beispiel der Versuchsergebnisse am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende verdeutlicht werden. Im Gegensatz zu der Auswertung in Kapitel 6.4.8 werden externe Versuchsergebnisse dabei vernachlässigt.

In Abb. 8-2 links ist die Ermittlung des charakteristischen Nennspannungskerbfalls auf Grundlage der entsprechenden Versuchsergebnisse gegeben, vgl. Anhang B. Für die Ermittlung des Bemessungswertes wurden alle Versuche gemeinsam ausgewertet.

In Abb. 8-2 rechts ist der charakteristische Kerbspannungskerbfall unter Berücksichtigung der in Kapitel 7 bestimmten Kerbspannungsfaktoren für die einzelnen Serien gegeben. Die einwirkenden Spannungsschwingbreiten wurden dabei mithilfe der jeweils maßgebenden Kerbspannungsfaktoren am Nahtübergang bzw. an der Nahtwurzel ermittelt.

In Tab. 8-11 sind die entsprechenden Streuungen gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die ermittelte Streubreite deutlich geringer ist, wenn die Versuche auf Grundlage des Nennspannungskonzeptes ausgewertet werden. Die Streuung bei der Auswertung mit dem Nennspannungskonzept ist demzufolge geringer, obwohl geometrische Einflüsse vollständig vernachlässigt wurden.

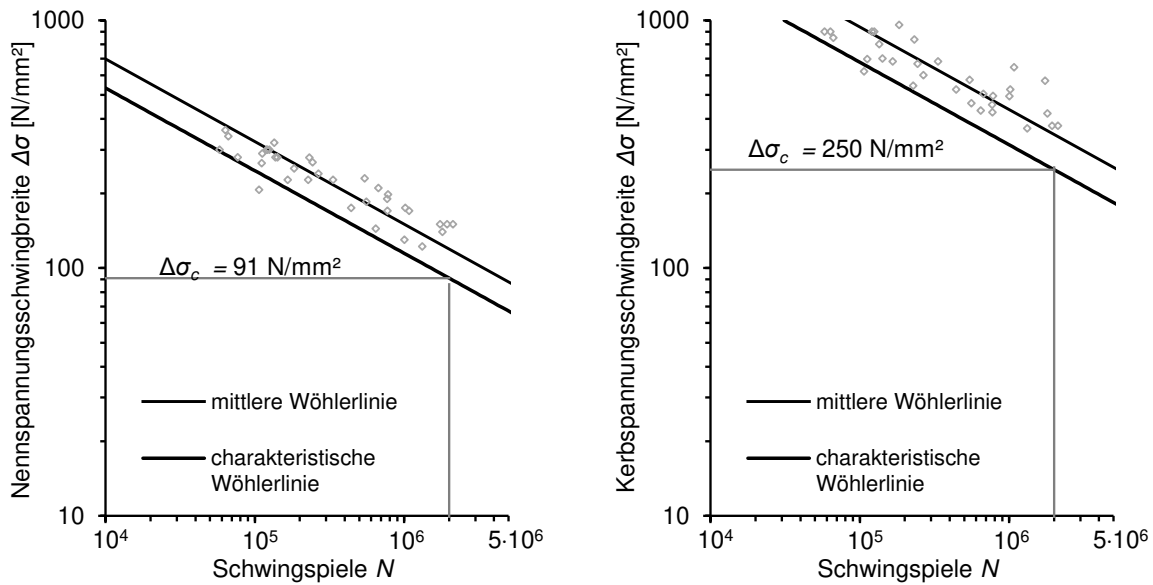


Abb. 8-2: Ermittlung eines Bemessungswertes für Gurtlamellenenden mit dem Nennspannungskonzept (links) und mit dem Kerbspannungskonzept (rechts)

Daten: siehe Anhang B

Tab. 8-11: Vergleich der Streuung zwischen Nennspannungskonzept und Kerbspannungskonzept an Versuchen zu Gurtlamellenenden.

Konzept	Charakteristische Ermüdungsfestigkeit Δσ <sub>c</sub> bei 2·10 <sup>6</sup> Schwingspielen [ N/mm <sup>2</sup> ]	Mittlere Ermüdungsfestigkeit Δσ <sub>50%</sub> bei 2·10 <sup>6</sup> Schwingspielen [ N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung s [ N/mm <sup>2</sup> ]	Streuspanne T <sub>N</sub>
Nennspannungskonzept	91	119	0,20	1:3.26
Kerbspannungskonzept	250	346	0,25	1:4.37

Die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit mit dem Nennspannungskonzept für die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Details ist in den meisten Fällen wirtschaftlicher als mit dem Kerbspannungskonzept. Beispielsweise würde ein Konstruktionsdetail, das an die Serie 3 des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Details des Gurtlamellenendes angelehnt ist (Kerbspannungsfaktor 3,8 an der Nahtwurzel), nach der Auswertung mit dem Kerbspannungsmodell auf Nennspannungsniveau eine charakteristische Ermüdungsfestigkeit von Δσ<sub>c</sub> = 66 N/mm<sup>2</sup> (= 250 N/mm<sup>2</sup> / 3,8) aufweisen. Bei der Auswertung mit dem Nennspannungsniveau beträgt die

charakteristische Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_c = 91 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Abb. 8-2. Das entspricht etwa einer Verdreifachung der ertragbaren Schwingspiele bis zum Versagen.

Dass Auswertungen auf Grundlage des Nennspannungskonzeptes im Vergleich zum Kerbspannungskonzept zu geringeren Streuungen und damit zu einer genaueren Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit führen, wurde ebenfalls auf Grundlage der Datenbankauswertung festgestellt, vgl. Kapitel 5.7.

Die Untersuchungen hinsichtlich der Streuung zeigen, dass geometrische Einflüsse in Kerbspannungsmodellen überschätzt werden können. Kerbspannungsmodelle sollten daher nicht angewendet werden, um Nennspannungskerbfälle ohne experimentelle Überprüfung zu korrigieren.

Das Nennspannungskonzept hat auch klare Grenzen. In komplexen Tragstrukturen, in denen eine klare Definition der Nennspannung oder des Nennspannungsquerschnitts nicht möglich ist, können lokale Konzepte wie das Struktur- oder das Kerbspannungskonzept geeignetere Methoden für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit sein. Dazu gehören beispielsweise Rohrknotenverbindungen und orthotrope Platten.

## 8.6 Schlussfolgerung

Für die in dieser Arbeit untersuchten Lamellen, Steifen und anderen Anbauteile ist das Nennspannungskonzept nach dem derzeitigen Stand der Technik das einfachste und wirtschaftlichste Konzept für die Bemessung der Ermüdungsfestigkeit. Die in Kapitel 8 empfohlenen Nennspannungskerbfälle sind, bis auf wenige Ausnahmen für nachbearbeitete Details, durch zahlreiche Ermüdungsversuche bestätigt. Die Kerbfallvorschläge für Längssteifen, Knotenbleche am Blechrand und kerbfrei bearbeitete Lamellen konnten gegenüber DIN EN 1993-1-9 [7] in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit angehoben werden. Zahlreiche Kerbdetails konnten vereinfacht werden, da einige geometrische Eigenschaften in experimentellen Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit zeigten. Dies betrifft beispielsweise Anfasungen von Längssteifen und Knotenblechen am Blechrand.

Zudem wurden Vorschläge für neue Kerbdetails erarbeitet. Dies betrifft beispielsweise „kleine Aufschweißteile“, zu denen sowohl umschweißte als auch hubgeschweißte Bauteile gehören.

Auf Grundlage zahlreicher experimenteller Untersuchungen konnten neue Kerbdetails zur Bemessung von aufgelöteten Bauteilen vorgeschlagen werden, die gegenüber aufgeschweißten Bauteilen höhere Ermüdungsfestigkeiten zeigen.



## 9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt Empfehlungen für die Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten und gelöteten Lamellen, Steifen und Anbauteilen.

Die empirische Grundlage bilden eine umfangreiche Datenbank für geschweißte Konstruktionen, in der über 8.000 Wöhlerversuche zu den genannten Details zusammengetragen wurden, vgl. Kapitel 3, und eigene experimentelle Untersuchungen an Details mit bisher unzureichenden Erkenntnissen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit, vgl. Kapitel 6.

Die in der Datenbank zusammengetragenen Versuche stammen aus unterschiedlichen Veröffentlichungen. Aus den dokumentierten Studien wurden Versuchsergebnisse und Versuchsparameter entnommen und für eine dauerhafte Speicherung in ein strukturiertes Datenbanksystem überführt.

Für die Analyse der Daten wurden in Kapitel 4 statistische Auswertemethoden vorgestellt. Die Methoden basieren dabei auf gemeinsamen statistischen Ansätzen, die konform zu normativen Anforderungen in DIN EN 1990 [4] sind. Für die Ermittlung charakteristischer Ermüdungsfestigkeitswerte wurden die Daten detailspezifisch ausgewertet. Für die Fraktilschätzung einer charakteristischen 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit wurde nach DIN EN 1990 [4] ein Vorhersageintervall genutzt, vgl. Kapitel 4.6.

Vereinfachend wurde davon ausgegangen, dass die Neigung der Wöhlerlinie aus Vorversuchen bekannt ist und selbst nicht als Parameter mit statistischer Unsicherheit berücksichtigt werden muss. Es konnte gezeigt werden, dass die Streuung der für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit herangezogenen Daten annähernd normalverteilt ist, vgl. Kapitel 4.5.

Das Potenzial dieser statistischen Herangehensweise wurde in Kapitel 5 bei der systematischen Auswertung von unterschiedlichen Versuchsdaten aus der Datenbank deutlich. Die statistisch bestimmten charakteristischen Wöhlerlinien grenzen streuende Versuchsdaten zuverlässig nach unten ab. Das Verfahren funktioniert gleichermaßen für einzelne Versuchsserien und für Metaanalysen mit mehreren tausend Versuchsergebnissen aus unterschiedlichen Quellen.

Die statistischen Analysen, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden, beziehen sich auf den Zeitfestigkeitsbereich, also auf das Spektrum, in dem ein doppelt logarithmisch linearer Verlauf der Wöhlerlinie angenommen werden kann. Deshalb wurden für die statistischen Auswertungen ausschließlich Daten aus dem entsprechenden Bereich berücksichtigt, vgl. Kapitel 2.5.2.

Die in der Datenbank zusammengetragenen Versuche sowie die eigenen experimentellen Untersuchungen ermöglichten im Zusammenhang mit der einheitlichen statistischen Auswertemethode eine umfassende Metaanalyse zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Lamellen, Steifen und Anbauteilen.

Für die Herleitung charakteristischer Ermüdungsfestigkeitswerte wurden experimentelle Untersuchungen aus unterschiedlichen Quellen gemeinsam ausgewertet. Um Verzerrungen der Daten durch den Mittelspannungseinfluss (Kapitel 2.3.2) und Reihenfolgeeffekte (Kapitel 2.3.1) zu minimieren, wurden ausschließlich Zugschwellversuche mit konstanter Amplitude ausgewertet. Weitere detailspezifische Unterteilungen (oder modellbasierte Korrekturen) der Rohdaten wurden nicht vorgenommen. Dieser Ansatz wurde in Kapitel 5.1 diskutiert und aus statistischer, wissenschaftlicher und praktischer Sicht als geeignet bewertet.

Die Auswertungen der Ermüdungsdaten aus den Veröffentlichungen offenbarten auch einige Lücken. So fehlen Versuchsergebnisse im Dickblechbereich sowie für Längssteifen und Knotenbleche, bei denen die Schweißnähte durch Schleifen nachbearbeitet wurden. An diesem Punkt setzten eigene experimentelle Untersuchungen an.

Das Detail der ermüdungskritischen Enden von Lamellen wird im Brückenbau in Deutschland traditionell mit dicken Endnähten geschweißt und anschließend durch Schleifen nachbehandelt. Die in Kapitel 6.4 dokumentierten umfangreichen Versuche erlauben im Zusammenhang mit einigen bereits bekannten Versuchen zu diesem Detail eine Anhebung des Kerbfalls im Vergleich zu einer aktuell deutschen Kerbfalleinstufung im Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-2 [10]. Das Detail wird zudem voraussichtlich in den Kerbfallkatalog von prEN 1993-1-9 [8] aufgenommen werden. Neben der empirisch bestätigten hohen Ermüdungsfestigkeit des Details konnte anhand von Versuchen an 20 mm und 50 mm dicken Blechen gezeigt werden, dass kein Blechdickeneinfluss für das Detail besteht. Fertigungseinflüsse, die durch Restkerben am Schweißnahtübergang deutlich wurden, zeigten dagegen einen vergleichsweise großen Einfluss in Bezug auf Streuung und Ermüdungsfestigkeit der Versuchsdaten.

Ein weiterer Schwerpunkt der Experimente war die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit von Anbauteilen, die durch Lichtbogenlötungen gefertigt wurden. Die Versuche zeigten, dass bei einem grundsätzlich ähnlichen Ermüdungsverhalten das Niveau der Ermüdungsfestigkeit für gelötete Bauteile deutlich höher ist. Für den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Lotzusatzwerkstoff CuAl7 wurden in Kapitel 8.4

konkrete Bemessungswerte für die Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit vorgeschlagen.

In Kapitel 5 wurden potenzielle Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht. Dabei zeigten geometrische Einflussgrößen einen kleineren Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit als erwartet. So konnten beispielsweise für Längssteifen, Lamellen und kleine Aufschweißteile in unterschiedlichen Experimenten keine Blechdickeneinflüsse nachgewiesen werden. Untersuchungen zum Einfluss der Endgeometrie von Längssteifen im Schweißzustand zeigten bei allen bekannten Untersuchungen in der Datenbank keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Detailspezifische Metavergleiche zwischen Kleinversuchen und Bauteilversuchen zeigten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Ermüdungsfestigkeit.

Eigene experimentelle Untersuchungen ergaben, dass die Geometrie die Ermüdungsfestigkeit einen geringeren Einfluss hat, als es Kerbspannungsmodelle vorhersagen, vgl. Kapitel 8.5.

Auf Grundlage der in Kapitel 5.6.2 untersuchten Streuung einzelner Details wurde die These aufgestellt, dass geometrische Einflüsse in FE basierten Modellen wie dem Kerbspannungskonzept tendenziell überbewertet werden, wenn Fertigungseinflüsse unberücksichtigt bleiben. In Kapitel 8.5 wurden mögliche Ursachen dieser Beobachtung diskutiert. Als einer der Hauptgründe wurde das Verhältnis zwischen strukturmechanischen Einflussgrößen und Fertigungseinflüssen identifiziert.

Es wurde geschlussfolgert, dass die Herleitung von Nennspannungskerbfällen für Lamellen, Steifen und andere Anbauteile möglichst empirisch erfolgen sollte. Eine numerische Extrapolation von Versuchsergebnissen ohne Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen zur Herleitung von Nennspannungskerbfällen sollte nach Möglichkeit vermieden werden, da eine Überschätzung geometrischer Einflussgrößen möglich ist.

Die Auswertung der detailspezifischen charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten aus den eigenen Versuchen in Kapitel 6 und der zusammengetragenen Versuche in der Datenbank in Kapitel 5 wurden mit aktuellen Empfehlungen für Kerbfalleinstufungen verglichen und führten schließlich zu konkreten Kerbfallempfehlungen in Kapitel 8. Die Kerbfallempfehlungen basieren im Wesentlichen auf der Auswertung von Versuchen. Es wurde gezeigt, dass für einen Großteil der behandelten Konstruktionsdetails im Vergleich zu DIN EN 1993-1-9 [7] ein gleichwertiger oder verbesserter Kerbfall empfohlen werden kann.



## 10 Ausblick

Für zukünftige Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit ist es sinnvoll, verstärkt Fertigungseinflüsse zu berücksichtigen. In Versuchen kann dies beispielsweise durch unterschiedliche Hersteller oder unterschiedliche Schweißer umgesetzt werden. Es ist dabei davon auszugehen, dass Fertigungseinflüsse insbesondere bei handgeschweißten Konstruktionen nur eingeschränkt beeinflusst werden können. Generell gibt es über Bewertungsgruppen wie in DIN EN ISO 5817 [2] Möglichkeiten zur Bewertung von Schweißnahtqualitäten, die in der Qualitätssicherung auch angewendet werden. Die Möglichkeiten zur Einflussnahme auf die mikroskopische Gestalt von Kerben und deren Variation in handgeschweißten Konstruktionen ist aber sehr eingeschränkt. Eine gewisse Streuung muss hier akzeptiert und berücksichtigt werden.

Die modelltechnische Berücksichtigung der aus Fertigungseinflüssen resultierenden Streuung ist bisher nicht möglich.

Um Fertigungseinflüsse bewerten zu können, müssen Bauteile im Bereich der Kerbe mit hoher Auflösung messtechnisch erfasst werden. Diese lokale Kerbgeometrie sollte für möglichst viele unterschiedliche Kerbdetails unter Berücksichtigung streuender Fertigungseinflüsse dokumentiert werden.

Generell erscheint eine modellbasierte Herangehensweise zur Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen möglich. Moderne optische Sensoren wie das ARAMIS Messsystem sind grundsätzlich in der Lage geometrische Fertigungseinflüsse wie die schweißtechnisch geprägte Sekundärkerbe in hoher Auflösung zu erfassen (vgl. Kapitel 2.4.1). Mit der Implementierung von messtechnisch erfassten Realgeometrien im Bereich der ermüdungskritischen Schweißnahtübergänge sind FE Modelle allgemein in der Lage strukturmechanische Einflussgrößen auch unter Berücksichtigung von repräsentativen und gemessenen Fertigungseinflüssen zu bewerten.

Konkret müsste die vereinfachte Kerbmodellierung nach NEUBER und RADAJ (vgl. Kapitel 7.2) durch messtechnisch erfasste Realgeometrien im FE Modell ersetzt werden. Kerbspannungsmodelle könnten dadurch potenziell in die Lage versetzt werden genauere Vorhersagen zu Ermüdungsfestigkeiten und Überlebenswahrscheinlichkeiten von geschweißten Details zu machen. Durch die Modellierung unterschiedlicher Kerbgeometrien wäre es zudem möglich, Streuungen in der Ermüdungsfestigkeit abzubilden.

## 11 Literatur

### 11.1 Normen, Regelwerke und Richtlinien

- [1] DIN 18800-1: Stahlbauten Teil 1: Bemessung und Konstruktion, 2008
- [2] DIN EN ISO 5817 Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten, Ausgabedatum: Oktober 2006.
- [3] DIN EN ISO 9606-1:2017-12: Prüfung von Schweißern – Schmelzschweißen – Teil 1: Stähle, Deutsche Fassung EN ISO 9606-1:2017
- [4] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Ausgabedatum: Dezember 2010
- [5] DIN EN 1993-1-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700, Deutsche Fassung EN, 2005
- [6] DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen, Deutsche Fassung EN, 2005
- [7] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung, Ausgabedatum: Dezember 2010
- [8] prEN 1993-1-9:2021 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, CEN TC 250 / SC3 N3405
- [9] DIN EN 1993-2: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN, Dezember 2010
- [10] DIN EN 1993-2/NA: Nationaler Anhang zu Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken, Oktober 2014
- [11] DVS Merkblatt 0938-1: Lichtbogenlötten – Grundlagen, Verfahren, Anforderungen an die Anlagentechnik, 2012
- [12] DVS Merkblatt 0938-2: Lichtbogenlötten – Anwendungshinweise, 2005
- [13] DVS Merkblatt 0938-3: Lichtbogenlötten – Unregelmäßigkeiten und Hinweise zu deren Vermeidung, 2012
- [14] Background Documentation Eurocode 1 (ENV 1991), Part 1: Basis of Design, JCSS – Joint Committee on Structural Safety, First Edition, 1996
- [15] Empfehlungen für die Bemessung und Konstruktion von ermüdungsbeanspruchten Stahlbauten; EKS – Technische Kommission 6 – Ermüdung; EKS Publikation Nr. 34, 1987
- [16] DVS Merkblatt 0905: Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzepts für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen. DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Q 1.1 Konstruktion und Berechnung, 2017

## 11.2 Literatur zur Ermüdungsfestigkeit

- [17] Albrecht, P., Friedland, M.:  
**Fatigue-Limit Effect on Variable Amplitude Fatigue of Stiffeners**  
Journal of the Structural Division 12 (1979), Dezember, S. 2657 – 2675
- [18] Aygül, M., Bokesjö, M., Heshmati, M., Al-Emrani, M.:  
**A comparative study on different fatigue failure assessments of welded bridge details**  
International Journal of Fatigue 49 (2013) S. 62-72
- [19] Bargel, H, Helms, R., Henke, H., Wohler, H.:  
**Untersuchung der Schwingfestigkeit hochfester, schweißgeeigneter Feinkornbaustähle**  
Stahl und Eisen 96 (1976), Nr. 21, S. 1038 – 1043
- [20] Basquin, O.:  
**The exponential law of endurance tests**  
American Society for Testing and Materials Proceedings 10 (1910), S. 625 – 630
- [21] Bathias, C.:  
**There is no infinite fatigue life in metallic materials**  
Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 22 (1999), Issue 7, S. 559 - 565
- [22] Berger, P.:  
**Ermüdungsversuche an geschweissten Biegeträgern**  
IABSE Report 37 (1982), S.323 – 330
- [23] Berger, P.:  
**Ermüdungsversuche an Trägern mit längs aufgeschweißten Knotenblechen**  
Schweißtechnik 36 (1986) Heft 6, S. 267 - 268
- [24] Berger, P.:  
**Festlegung der zulässigen Spannungen für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis in der neuen TGL 13500**  
Schweißtechnik 31 (1981), Heft 7, S. 316 – 319
- [25] Berger, P.:  
**Investigation on the Fatigue Strength of Welded Joints by Full Scale Tests**  
IIW Document, XIII-983-80, International Institute of Welding, 1980
- [26] Bergqvist, L., Sperle, J.:  
**Influence of TIG-Dressing on the fatigue strength of coverplated beams**  
IIW Document XIII-826-77, International Institute of Welding 1977
- [27] Booth, G.:  
**Constant amplitude fatigue tests on welded steel joints performed in air**  
The European Offshore Steel Research Seminar. Paper 4, Cambridge 1978.
- [28] Bosch, A., Lang, E., Beier, H., Vormwald, M., Langschwager, K., Scholz, A., Oechsner, M.:  
**Ermüdungsnachweis für unbearbeitete und nachbearbeitete Schweißverbindungen einschließlich thermozyklische, elastisch- plastische Beanspruchungen**  
Abschlussbericht, DVS- IGF Vorhaben Nr. 17457, 2014

- [29] Branco, C.M., Maddox, S.J., Sonsion, C.M.:  
**Fatigue Design of Welded Stainless Steel**  
Final report EUR 19972 EN, European Commission technical steel research, ECSC steel publications, Belgium, 2001
- [30] Braun, M., Scheffer, R., Fricke, W., Ehlers, S.:  
**Fatigue strength of fillet welded joints at subzero temperatures**  
Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 43 (2019), Nr. 2, S. 403 – 416
- [31] Caiza, P., Ummenhofer, T.:  
**Consideration of the runouts and their subsequent retests into S-N curves modelling based on a three-parameter Weibull distribution**  
International Journal of Fatigue, Vol. 106 (2018), Nr. 1, S. 70 – 80
- [32] Communauté Européenne du charbon et de l'acier (Hrsg.):  
**ÉTUDE DU COMPORTEMENT EN FATIGUE CLASSIQUE DE JOINTS TYPES SOUDÉS DE QUALITÉ INDUSTRIELLE**  
Abschlussbericht EUR 5266 f, 1975
- [33] D'Angelo, L.:  
**Probabilistic approach for Fatigue evaluation of welded connections with application to road steel bridges**  
Dissertation, EPFL Lausanne, 2015
- [34] Dißelmeyer, H., Degenkolbe, J.:  
**Schwingverhalten eines hochfesten wasservergüteten Chrom-Molybdän-Zirkonium-legierten Feinkornbaustahles mit 70 kp/mm<sup>2</sup> Mindeststreckgrenze im geschweißten und ungeschweißten Zustand**  
Schweißen und Schneiden 25 (1973) Nr. 3, S. 85 – 88
- [35] Dorek, O., Fricke, W., Selle, H.:  
**Validation of Different Fatigue Assessment Approaches for Thick Plate Structures Made of High Tensile Strength Steel YP 47**  
IIW Document XIII-2421-12, International Institute of Welding, 1921
- [36] Draper, N., Smith, H.:  
**Applied Regression Analysis**  
Wiley Verlag, New York, 1966
- [37] Drebenstedt, K., Euler, M.:  
**Statistical Analysis of Fatigue Test Data according to Eurocode 3**  
Proceedings of IABMAS 2018 Melbourne, S. 2244 – 2251
- [38] Drebenstedt, K., Scholz, A.:  
**Versuchsbericht der Ermüdungsversuche am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende**  
Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Nr. 2018-57X, 2018
- [39] Feldmann, F., Hegger, J., Hechler, O., Rauscher, S.:  
**Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Verwendung hochfester Werkstoffe**  
Abschlussbericht, AIF / FOSTA Forschungsbericht P621, 2007



- [40] Feldmann, M., Ummenhofer, T., Kuhlmann, U., Bartsch, H., Seyfried, B., Drebenstedt, K.:  
**Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen**  
Abschlussbericht, IGF-DASSt-FOSTA Forschungsprojekt 19178, Aachen 2019
- [41] Fisher, F., Albrecht, P., Yen, B., Klingerman, D., McNamee, M.:  
**Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments**  
National Cooperative Highway Research Program, Report 147, 1974
- [42] Fisher, J.:  
**Bridge Fatigue Guide**  
American Institute of Steel Construction, 1977
- [43] Fisher, J., Albrecht, P., Yen, B., Klingerman, D.:  
**Effects of weldments on the fatigue strength of steel beams with transverse stiffness and attachments**  
Fritz Engineering Laboratory Report 334.10, Lehigh University 1972
- [44] Fisher, J., Frank, K., Hirt, M., McNamee, B.:  
**Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams**  
Fritz Engineering Laboratory Report No. 334.2, Lehigh University 1969
- [45] Fisher, J.W., Mertz, D.R., Zhong, A.:  
**Steel Bridge Members under Variable Amplitude, Long Life Fatigue Loading**  
Fritz Engineering Laboratory Report No. 463-1, September 1983
- [46] Friis, L., Steneroth, E.:  
**Fatigue Strength of welded joints in mild and high strength structural steels**  
Jernkontorets annaler Nr. 152 (1986), n 4, S 157 – 169
- [47] Garcia, M.:  
**Multiaxial fatigue analysis of high-strength steel welded joints using generalized local approaches**  
Phd thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne, Thèse n° 7394, 2020
- [48] Gaßner, E., Griese, F., Haibach, E.:  
**Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweißverbindung aus Stahl St37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs**  
Archiv für das Eisenhüttenwesen 35 (1964), H.3, S. 255 – 267
- [49] Geißler, K.:  
**Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählernder Brücken**  
Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe, Technische Universität Dresden, 1995
- [50] Gilde W., Müller G., Schwarz H.:  
**Eine Möglichkeit der Erhöhung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen**  
Zentralinstitut für Schweißtechnik der Deutschen Demokratischen Republik, ZIS-Mitteilungen, 09/60, 2. Jahrgang (1960), S. 552 – 564
- [51] Gönnel, F.:  
**Dauerfestigkeitsversuche an Schweißverbindungen aus Stahl St37 mit und ohne Anstrich**  
Der Stahlbau 36 (1967), Nr. 7, S 199 – 202

- [52] Graf, O.:  
**Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten La-  
schen in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern**  
Bericht des Deutschen Ausschusses für Stahlbau, Heft 8, Ausgabe B, 1937
- [53] Guerrero, U.:  
**How the categories of the constructional details were generated**  
Commentary to Appendix B of the Recommendations for the fatigue design of steel  
structures of the European Convention for Constructional Steelwork,  
June 1986 (unpublished)
- [54] Gurney T.R.:  
**Influence of elapsed time on fatigue strength of welded joints**  
Metal Construction and British Welding Journal 1 (1969), Nr. 6, S. 294 – 295
- [55] Gurney, T.R., Maddox, S.J.:  
**A re-analysis of fatigue data for welded joints in steel**  
Welding Research International Volume 3 (1973) Number 4
- [56] Gurney, T.R.:  
**Fatigue strength of beam with stiffeners welded to the tension flange**  
British Welding Journal 7 (1960), Heft 9, S. 569 – 577
- [57] Gurney, T.R.:  
**Fatigue of welded structures**  
Second Edition. London: Cambridge University Press, 1979
- [58] Gurney, T.R.:  
**Effect of peening and grinding on the fatigue strength of fillet welded joints**  
British Welding Journal 15 (1968), Nr. 12, S. 601 – 609
- [59] Gurney, T.R.:  
**Fatigue tests on butt and fillet welded joints in mild and high tensile structural  
steels**  
British Welding Journal 9 (1962), Nr. 11, S. 614 – 620
- [60] Gurney, T.R.:  
**Further fatigue tests on mild steel specimens with artificially induced residual  
stresses**  
British Welding Journal 9 (1962), Nr. 11, S. 609 – 613
- [61] Gurney, T.R.:  
**Influence of local heating on fatigue behaviour of welded specimens**  
British Welding Journal 6 (1959), Heft 10, S. 491 – 497
- [62] Gurney, T.R.:  
**Influence of residual stresses on fatigue strength of plates with fillet welded at-  
tachments**  
British Welding Journal 7 (1960), Heft 6, S. 415 – 430
- [63] Gurney, T.R.:  
**Investigation into the Fatigue Strength of Welded Beams - Part III: High Tensile  
Steel Beams with Stiffeners welded to the Eeb**  
British Welding Journal 9 (1962), Nr. 9, S. 533 – 539
- [64] Gurney, T.R.:  
**Some fatigue tests on fillet welded mild and high tensile steel specimens in the  
as-welded and normalised condition**  
British Welding Journal 13 (1966), Nr. 11, S. 648 – 651

- [65] Gurney, T.R.:  
**The Fatigue Strength of Transverse Fillet Welded Joints - A Study of the Influence of Joint Geometry,**  
Abington Publishing, Cambridge, 1991
- [66] Gurney, T.R.:  
**The influence of thickness on the fatigue strength of welded joints**  
Second International Conference on Behaviour of Off-Shore Structures (BOSS'79),  
London 1979
- [67] Hahn, G., Meeker, W.:  
**Statistical Intervals – A Guide for Practitioners**  
Wiley Verlag, New York, 1991
- [68] Haibach, E.:  
**Abhängigkeit der ertragbaren Spannungen schwingbeanspruchter Schweißverbindungen vom Beanspruchungskollektiv**  
Bericht Nr. FB-79 (1968), Laboratorium für Betriebsfestigkeit Darmstadt
- [69] Haibach, E.:  
**Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung**  
3., korrigierte und ergänzte Auflage, Springer Verlag, 2005
- [70] Haibach, E.:  
**Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung**  
Bericht FB-77, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, 1968
- [71] Haibach, E.:  
**Fatigue investigation of higher strength structural steels in notched and in welded condition**  
Final report, Laboratorium für Betriebsfestigkeit Darmstadt, Bericht EUR 5357 e, 1975
- [72] Haibach, E.:  
**Fatigue Investigation on Typical Welded Joints in Steel Fe E460 as Compared to FE E 355**  
Final Report, Report No. FB-147, Fraunhofer Gesellschaft 1979
- [73] Haibach, E., Olivier, R., Finaldi, F.:  
**Statistical design and analysis of an interlaboratory program on the fatigue data for welded joints in structural steel**  
ASTM STP, Band 744 (1981), S. 24 – 54.
- [74] Haibach, E., Olivier, R., Ritter, W.:  
**Einfluß der Naht- und Blechdicke auf die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen mit Kehlnähten**  
Schweißen und Schneiden 30 (1978) Heft 11, S. 442 – 446
- [75] Haibach, E., Seeger, T.:  
**Größeneinfluss bei schwingbeanspruchten Schweißverbindungen**  
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 29 (1998), S. 199 – 205
- [76] Hanzawa, M., Yokota, H., Ishiguro, T., Takashima, H., Kado, S., Tanigaki, T., Hashida, Y.:  
**Improvement of Fatigue Strength in Welded High Tensile Strength Steel by Toe Treatment**  
IIW Document XII-829-77, International Institute of Welding 1977

- [77] Harrison, J.D.:  
**Some Tests on the Effect of Friction Welded Studs on Fatigue**  
British Welding Journal 12 (1965), S. 420 – 423
- [78] Hartmann A. J., Munse W. H.:  
**Fatigue behaviour of welded joints and weldments in HY-80 steel subjected to axial loadings**  
Department of Civil Engineering, USA, Structural Research Series (SRS) No. 250, 1962
- [79] Henkel, K., Gericke, A., Kuhlmann, U., Drebenstedt, K.:  
**Einsatz des Lichtbogenlötens zum Fügen von Anbauteilen an schwingend hoch beanspruchten Stahlkonstruktionen**  
Abschlussbericht, IGF/ FOSTA Vorhaben Nr. 29 EWBG/ FOSTA P 1282, 2020
- [80] Hensel, J.:  
**Einfluss von Schweißeigenstressungen auf den Schwingfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen im Nennspannungskonzept**  
Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der TU Braunschweig, 2017
- [81] Hirt M.A., Crisinel M.:  
**La résistance a la fatigue des poutres en âme pleine composées-soudées, effect des plaquettes et goussets soudés à l' aile,**  
Versuchsbericht ICOM 017, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Institut de la Construction Métallique, 1975
- [82] Hirt, M.:  
**Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Ermüdung und deren Berücksichtigung bei der Bemessung von Eisenbahnbrücken**  
Bauingenieur 52 (1977), S. 255 – 262
- [83] Hobbacher, A.:  
**Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components – Second Edition**  
IIW Document IIW-2259-15, International Institute of Welding, Springer International Publishing Switzerland, 2016
- [84] Holický, M., Materna, A., Sedlacek, G., Arteaga, A., Sanpaolesi, L., Vrouwenvelder, T., Kovse, I., Gulvanessian, H.:  
**Reliability Backgrounds**  
Implementation of Eurocodes, Handbook 2, Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007, 2005
- [85] Ikeda, K., Denoh, S., Godai, T., Ogawa, T.:  
**Improvement of Fatigue Strength of Fillet Welded Joint for 80 kg/mm<sup>2</sup> high strength steel**  
IIW Document XIII-835-77, International Institute of Welding 1977
- [86] Kado, S., Ishiguro, Hanzawa, M., Yokota, H.:  
**The improvement of fatigue strength in welded high tensile strength steels by additional weld run with coated electrodes**  
IIW Document XIII-77.4-75, International Institute of Welding, 1975
- [87] Kado, S., Ishiguro, T., Ishii, N.:  
**Fatigue Strength Improvement of Welded Joints by Plasma Arc Dressing**  
IIW Document XIII-772-75, International Institute of Welding, 1975

- [88] Klippstein, K., Schilling, C.:  
**Pilot study on the constant and variable amplitude of transverse stiffener welds.**  
Journal of Constructional Steel Research 12 (1989), S. 229 – 252
- [89] Klöppel K., Weihermüller H.:  
**Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen aus Stahl St 52**  
Der Stahlbau 29 (1960),Nr. 5, S. 129 – 137
- [90] Knight, J.:  
**Improving the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints by Grinding and Peening**  
IIW Document XIII-851-77, International Institute of Welding 1976
- [91] Kobayashi, K., Matsumoto, S., Tanaka, M., Funakoshi, T., Sakamoto, N., Shinkawa, K.:  
**Improvement in the Fatigue Strength of Fillet Welded Joint by Use of the New Welding Electrode**  
IIW Document XIII-828-77, International Institute of Welding 1977
- [92] Kouba, N., Stallmeyer, J.:  
**The behavior of stiffened beams under repeated loads**  
Technical Report, Structural Research Series No. 173, University of Illinois, 1959
- [93] Kuhlmann, U., Breunig, S., Ummenhofer, T., Weidner, P.:  
**Entwicklung einer DAST Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren**  
Abschlussbericht, DAST-IGF Forschungsvorhaben Nr. 17886, 2018
- [94] Kuhlmann, U., Bergmann, J., Dürr, A., Thumser, R.:  
**Effizienter Stahlbau aus härtesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung**  
Abschlussbericht, AiF Vorhaben Nr. 13866 BG, 2006
- [95] Kuhlmann, U., Breunig, S., Ummenhofer, T., Weidner, P.:  
**Entwicklung einer DAST-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren**  
Abschlussbericht, DAST - IGF Forschungsvorhaben 17886, 2017
- [96] Kuhlmann, U., Drebenstedt, K.:  
**Ermüdungsfestigkeit von Gurtlamellenenden.**  
Stahlbau 89 (2019), H. 3, S. 229 – 293
- [97] Kuhlmann, U., Euler, M., Hubmann, M., Bucak, Ö., Fischl, A., Mangerig, I., Hess, A., Kranz, B., Herrmann, J., Zschech, R.:  
**Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundhohlprofilen mit dickwandigen Gurten**  
Abschlussbericht FOSTA Forschungsvorhaben P 815, Stuttgart 2014
- [98] Kuhlmann, U., Euler, M., Kudla, K.:  
**Weiterentwicklung und Spezifizierung der Ermüdungsnachweise im Stahl- und Stahlverbundbrückenbau**  
Abschlussbericht, DAST-IGF Vorhaben Nr. 15380, Stuttgart 2011
- [99] Kuhlmann, U., Ummenhofer, T., Kudla, K., Weidner, P.:  
**Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau**  
Abschlussbericht, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2013
- [100] Kühn, B.:  
**Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbruch**  
Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2004

- [101] Lang, R., Lener, G., Schmid, J., Ladinek, M.:  
**Schweißnahtbewertung basierend auf 3D-Laserscanning – Praktische Anwendung eines mobilen Laserscansystems zur Oberflächenbewertung von Schweißnähten – Teil 1**  
Stahlbau 85 (2016), S. 336 – 343
- [102] Lang, R., Lener, G.:  
**Schweißnahtbewertung basierend auf 3D-Laserscanning – Praktische Anwendung eines mobilen Laserscansystems zur Oberflächenbewertung von Schweißnähten – Teil 2**  
Stahlbau 85 (2016), S. 395 – 408
- [103] Lassen, T., Darcis, P., Recho, N.:  
**Fatigue Behaviour of Welded Joints Part 1 – Statistical Methods for Fatigue Life Prediction**  
Welding Journal Vol. 84 (2005) Nr. 12, S. 183 – 187
- [104] Lew, H., Toprac, A.:  
**Fatigue Tests of Welded Hybrid Plate Girders under Constant Moment**  
Research Report No. 77-2F, Center for Highway Research, University of Texas, 1967
- [105] Lieurade, H.:  
**Étude du comportement en fatigue à programme d'assemblages soudés en croix en acier E 24 et E36 (E355)**  
IIW Document XII-769-75, International Institute of Welding, 1975
- [106] Maddox, S.:  
**Fatigue strength of welded structures**  
Second Edition, Abington Publishing, Cambridge, 1991
- [107] Maddox, S.J.:  
**The effect of plate thickness on the fatigue strength of fillet welded joints**  
Welding Institute Publication, 1987
- [108] Maddox, S.J., Branco, S.M., Sonsino, C.M., Manteghi, S., Kueppers, M., Infante, V.:  
**Fatigue Design Data for Welded Stainless Steels**  
IIW Document, XIII-1768-99, International Institute of Welding 1999
- [109] Mang, F., Bucak, Ö., Koch, E.:  
**Fatigue behaviour of welded austenitic steels**  
Proceedings, Innovations Stainless Steel, Florence, Oktober 1993
- [110] Mang, F., Konlak, Bucak, Ö.:  
**Zeit und Dauerfestigkeit von gewalzten I-Profilen mit angeschweißten Steg-aussteifungen**  
Abschlussbericht, AIF/DVS Forschungsbericht Nr. 7678, 1992
- [111] Melz, T., Möller, B., Baumgartner, J., Ummenhofer, T., Herion, S., Hrabowski, J., Henkel, J., Boos, B.:  
**Erweiterung des örtlichen Konzeptes zur Bemessung von LCF beanspruchten geschweißten Kranstrukturen aus hochfesten Stählen**  
Abschlussbericht IGF/ FOSTA Forschungsvorhaben 17102N, 2015
- [112] Minner, H., Seeger, T.:  
**Erhöhung der Schwingfestigkeiten von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen durch das WIG Nachbehandlungsverfahren**  
Der Stahlbau 46 (1977) Heft 9, S. 257 – 263

- [113] Minner, H., Seeger, T.:  
**Investigations on the Fatigue Strength of weldable high strength steels StE 460 and StE 690 in as welded and TIG dressed conditions**  
IIW Document, XIII-912-79, International Institute of Welding 1979
- [114] Minner, H., Seeger, T.:  
**Schwingfestigkeitsuntersuchung an MAGM geschweißten Stumpf- und Kehlnahtverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen StE47 und StE70**  
Oerlikon Schweißmitteilungen 36 (1978), Ausgabe 83, S. 13 – 23
- [115] Müller-Stock, H.:  
**Der Einfluss dauernd und unterbrochen wirkender, schwingender Überbeanspruchung auf die Entwicklung des Dauerbruchs**  
Mitteilungen Kohle- und Eisenforschung, 1938
- [116] Mummery, A.:  
**The Fatigue Strength of CO<sub>2</sub> Fillet Welds**  
The Welding Institute Research Bulletin, Vol. 12 (1971), November, S. 303 – 306
- [117] Nather, F., Quel, R.:  
**MAG- geschweißte Stumpfnähte in dynamisch beanspruchten Bauteilen**  
DVS Berichte, Band 50, S. 76 – 82, 1978
- [118] Neuber, H.:  
**Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen**  
Konstruktion im Maschinen, Apparate- und Gerätebau 20 (1968), Heft 7, S. 245 – 251
- [119] Neumann, A.:  
**Probleme der Dauerfestigkeit von Schweissverbindungen**  
VEB Verlag Technik Berlin, 1960
- [120] Neumann, P.:  
**Bildung und Ausbreitung von Rissen bei Wechselverformung.**  
Zeitschrift für Metallkunde 58 (1967), Nr. 11, S. 780 – 798
- [121] Newman R.P., Gurney, T.R.:  
**Fatigue Tests on ½ in. Thick Transverse Butt Welds Containing Slag Inclusions**  
First Interim Report, B.W.R.A. Report, British Welding Journal 11 (1959), No. 7, S. 341 – 352
- [122] Newman R.P., Gurney, T.R.:  
**Fatigue Tests on Plain Plate Specimens and Transverse Butt Welds in Mild Steel**  
First Interim Report, B.W.R.A. Report, Dezember 1959
- [123] Newman, R.P.:  
**Results of fatigue tests on mild steel specimens with welded attachments**  
IIW Document, XIII-154-85, International Institute of Welding 1958
- [124] Odegard, K., Hembre, P.:  
**Fatigue tests of ship building steel, Part 2: Tests with notched and welded test pieces of “high tensile and ordinary ship building steel”**  
IIW Document XII-598-70, International Institute of Welding 1970
- [125] Ono, Yuki, Baptista, C., Kinoshita, K., Nussbaumer, A.:  
**A re- analysis of fatigue test data for longitudinal as-welded gusset joints**  
IIW Document, XIII-2817-19, International Institute of Welding, 2019

- [126] Örjasäter, O.:  
**Effect of plate thickness on fatigue of welded components**  
IIW Document, XIII-XV–118-93 and XII-1582-95, International Institute of Welding  
1995
- [127] Pasqual, F., Meeker, W.:  
**Estimation Fatigue Curves with the Random Fatigue-Limit Model**  
Technometrics 41 (1999), Nr. 4, S. 227 – 290
- [128] Peckover, R.S., Fraser, R.A.W., Crisp H.G.:  
**United Kingdom Offshore Steels Research Project – Phase 1**  
Final Report, UKOSRP Management Safety and Reliability Directorate, London 1988
- [129] Pedersen, M.M., Mouritsen, O., Hansen, M.R., Andersen, J., Wenderby, J.:  
**Re-analysis of fatigue data for welded joints using the notch stress approach**  
International Journal of Fatigue Nr. 23 (2010), S. 1620 – 1626
- [130] Puchner, O.:  
**Increase of the fatigue limit of plates and beams with welded on gusset plates  
by local heating**  
IIW Document, XII-179-59, International Institute of Welding, 1959
- [131] Puthli, R., Herion, S., Bergers, J., Sedlacek, G., Müller, C., Stötzel, J., Höhler, S.,  
Bucak, Ö., Lorenz, J.:  
**Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz  
hoch- und ultrahochfester Stähle**  
Abschlussbericht FOSTA P512, 2006
- [132] Radaj, D.:  
**Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen – Ermüdungsfes-  
tigkeit**  
Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 82 (1985)
- [133] Radaj, D.:  
**Untersuchungen zur geometrischen Form von Stumpf- und Kehlnähten**  
Schweißen und Schneiden 22 (1970), Heft 5, S. 206 – 209
- [134] Ruge, J., Woesle, H.:  
**Ergebnisse von Dauerfestigkeitsuntersuchungen**  
Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 23 (1962), S. 59 – 68
- [135] Schmackpfeffer, A., Schleicher, W., Fiedler, M., Hellmich, M.:  
**Trogbrücken mit dickem Fahrbahnblech**  
Stahlbau 88 (2019), Heft 2, S. 97 – 104
- [136] Scholz, A.:  
**Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von  
Gurtlamellenenden**  
Masterarbeit, Mitteilungen am Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität  
Stuttgart, Nr. 2018-64X, 2018
- [137] Schulze, G.:  
**Die Metallurgie des Schweißens**  
4. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [138] Sedlacek, G., Hobbacher, A., Nussbaumer, A., Stötzel, J., Schäfer, D.:  
**Commentary to Eurocode 3 EN 1993 – Part 1-9 – Fatigue**  
unveröffentlichter Hintergrundbericht, Aachen 2016



- [139] Seeger, T.:  
**Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise**  
In: Stahlbau Handbuch für Studium und Praxis Teil 1 B, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH Köln (Hrsg.), S. 5 – 123
- [140] Shamaa, D., Geißler, K.:  
**Grundlagen der Festlegung der Sicherheitselemente des Betriebsfestigkeitsnachweises**  
Stahlbau 86 (2017), H.9, S. 753 – 764
- [141] Smith, I., Gurney, T.:  
**Changes in the Fatigue Life of Plates with Attachments due to Geometrical Effects**  
TWI Research and Development 1986, S. 244 – 250
- [142] Sonsino, C., Fricke, W., Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmadi, A., Zhang, G.:  
**Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints – Background and applications**  
International Journal of Fatigue 34 (2012), S. 2 – 16
- [143] Spaethe, G.:  
**Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen**  
Zweite, neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, 1992
- [144] Sperle, J.O.:  
**Fatigue strength of welded joints under variable amplitude loading**  
IIW Document, XII-963-80, International Institute of Welding 1980
- [145] Stauf, H.:  
**Fatigue Behavior of Rectangular Hollow Section Joints Made of High-Strength Steels**  
Abschlussbericht EUR 18522 EN, Directorate-General Science, Research and Development, 1998
- [146] Tchuindjang, D., Fricke, W.:  
**Schwingfestigkeitsverhalten von Bolzenschweißverbindungen in der tragenden Schiffskonstruktion**  
Forschungsbericht, Bericht Nr. 19/2012 CMT (Center of Maritime Technologies e.V.), 2012
- [147] Tilly G.P., Nunn D.E.:  
**Variable amplitude fatigue in relation to highway bridges**  
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol. 194 (1980), S.259 – 267
- [148] Todoroki, R., Hanzawa, M., Ishiguro, T., Yanayimoto, S.:  
**Effects of toe profile improvement on corrosion Fatigue properties of welded joints**  
IIW Document XII-875-78, International Institute of Welding, 1978
- [149] Toprac, A., Natarajan, M.:  
**Fatigue Strength of Hybrid Plate Girders**  
Journal of the Structural Division 97 (1971), Nr. 4, S. 1203 – 1225
- [150] Ummenhofer T., Telljohann G., Dannemeyer, S., Weich I., Strohbach, H., Eslami-Chalandar, H., Kern, K., Pinkernell, D., Smida, M., Senk, B., Herion S., Hrabowski, J., Rack S.:  
**REFRESH - Lebensdauerverlängerung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen**  
Abschlussbericht, IGF FOSTA Forschungsbericht P 702, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V 2011

- [151] Ummerhofer T., Weidner P., Zinke T., Mehdiانpour M., Rogge A.:  
**Fertigungs- und Instandhaltungsoptimierung bei Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen,**  
Abschlussbericht , IGF/FOSTA-Forschungsbericht P 864, Forschungsvereinigung  
Stahlanwendung e.V., 2016
- [152] Ummerhofer, T., Engelhardt, I., Weinert, J.:  
**Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Offshore-Windenergieanlagen durch  
Schweißnahtnachbehandlung unter Berücksichtigung des Korrosionseinflusses**  
Abschlussbericht, DVS/IGF Forschungsprojekt 18457 N, 2018
- [153] Ummerhofer, T., S. Herion, J. Hrabowski, M. Feldmann, B. Eichler, Ö. Bucak, J. Lorenz, B. Boos, C. Eiwand, J. Stötzel:  
**Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Bauteilen aus hoch- und ultrahochfesten Feinkornbaustählen im Kran- und Anlagenbau**  
Abschlussbericht, IGF/FOSTA Forschungsbericht P 778, 2013
- [154] Weck, R.:  
**Results of Fatigue Tests on Mild Steel Specimens with welded attachments**  
IIW Document XIII-154-58, International Institute of Welding 1958
- [155] Weibull, W.:  
**A Statistical Distribution Function of Wide Applicability**  
Journal of Applied Mechanics 18 (1951), S. 293 – 297
- [156] Welz, W., Dennin, G.:  
**Dauerfestigkeit von Konstruktionen mit aufgeschweißten Bolzen**  
Schweißen und Schneiden 33 (1981), Heft 2, S. 63 – 66
- [157] Welz, W., Dietrich, G.:  
**Festigkeitsuntersuchungen an Bolzenschweißverbindungen**  
Schweißen und Schneiden 23 (1971), Heft 8, S. 308 – 311
- [158] Williams, H., Otten, H., Lawrence, F., Munse, W.:  
**The Effects of Weld Geometry on the fatigue behavior of welded connections**  
Civil Engineering Studies No. 366, The structural research laboratory, University of Illinois
- [159] Wintergerst, S., Heckel, K.:  
**Die Dauerfestigkeit von Flachstahl aus St 37 mit aufgeschweißter Querversteifung**  
Der Stahlbau 35 (1966), Heft 12, S. 353 – 357
- [160] Wöhler, A.:  
**Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl**  
Zeitschrift für Bauwesen 20 (1870), S. 74 – 106
- [161] Yamaguchi, I., Terada, Y, Nitta, A.:  
**On the Fatigue Strength of Steels for Ship Structures**  
IIW Commission XIII, Paper No. 425.66, Tokyo 1966

### 11.3 Sonstige Literatur

- [162] ANSYS Release 11.0 User`s Manual. ANSYS, Inc., Canonsburg, USA



## Anhang A – Rechenbeispiel statistische Auswertung

Für das Rechenbeispiel werden die Versuchsergebnisse aus Serie 15 ausgewertet. Es handelt sich um die Versuchsreihe, in der die Ermüdungsfestigkeit von Buchsen mit robotergeschweißten Kehlnähten untersucht wurde, vgl. Kapitel 6.5. Für die statistische Auswertung wird angenommen, dass die Neigung der Wöhlerlinie  $m = 3$  beträgt und selbst kein Parameter mit statistischer Unsicherheit ist. In Tab. A-1 sind die Versuchsergebnisse und die logarithmierten Werte gegeben.

Tab. A-1: Datensatz Serie 15

$i$	$S_i$	$N_i$	$\log S_i$	$\log N_i$
[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]
1	240	137.247	2,380	5,138
2	230	147.124	2,362	5,168
3	210	198.362	2,322	5,297
4	135	753.771	2,130	5,877
5	180	300.269	2,255	5,478
6	165	423.440	2,217	5,627
7	150	574.110	2,176	5,759
8	111	1.204.937	2,045	6,081
9	80	3.882.421	1,903	6,589
10	200	218.140	2,301	5,339
11	100	1.851.271	2,000	6,267
12	300	78.625	2,477	4,896
13	280	97.506	2,447	4,989
14	320	59.704	2,505	4,776
15	90	2.446.515	1,954	6,389
$\Sigma$			<b>33,476</b>	<b>83,669</b>

Aus den logarithmierten Daten kann der theoretische Schnittpunkt  $\log \hat{a}$  der mittleren Wöhlerlinie mit der Abszisse geschätzt werden, vgl. Gleichung (A-1):

$$\begin{aligned} \log \hat{a} &= \frac{1}{n} \cdot \left( \sum \log N_i + m \cdot \sum \log S_i \right) & (A-1) \\ &= \frac{1}{15} \cdot (83,669 + 3 \cdot 33,476) = 12,273 \end{aligned}$$

Mit dem aus der Stichprobe geschätzten Parameter  $\log \hat{a}$  und der fest definierten Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden  $m = 3$  kann die Funktion der mittleren Wöhlerlinie aufgestellt werden, vgl. Gleichung (A-2):

$$\log \hat{N} = 12,273 - 3 \cdot \log S \quad (\text{A-2})$$

Das durch die Standardabweichung bestimmte Streuungsmaß kann ebenfalls aus der Stichprobe geschätzt werden, vgl. Gleichung (A-3):

$$s = \sqrt{\frac{\sum [\log N_i - (\log \hat{a} - m \cdot \log S_i)]^2}{n - 1}} = 0,031 \quad (\text{A-3})$$

Gleichung (A-4) kann für die Fraktilschätzung mit dem Prognoseintervall bezogen auf den Parameter  $\log \hat{a}$  herangezogen werden. Der Wert  $\log a_k$  kann als charakteristischer Wert mit 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit (bezogen auf die Abszisse) interpretiert werden:

$$\log a_k = \log \hat{a} - k_n \cdot s$$

mit:

$$k_n \text{ nach Gleichung (4-7) oder aus Tab. 4-1} \quad (\text{A-4})$$

$$\log a_k = 12,273 - 1,81 \cdot 0,031 = 12,217$$

Mit dem charakteristischen Wert  $\log a_k$  kann die charakteristische Wöhlerlinie wie in Gleichung (A-5) beschrieben, definiert werden. Die Auswertung der charakteristischen Ermüdungsfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen entspricht dem charakteristischen Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_c$ .

$$\log N_k = 12,217 - 3 \cdot \log S$$

$$\log S_c = \frac{\log(2 \cdot 10^6) - 12,217}{-3} = 1,972 \quad (\text{A-5})$$

$$\Delta\sigma_c = 10^{\log S_c} = \mathbf{94 \text{ N/mm}^2}$$

## Anhang B - Versuchsergebnisse

Tab. B-1: Übersicht Versuchsergebnisse Gurtlamellenenden

Prüfkörper Nr. [-]	Nennspannung $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele bis Bruch [-]	Maßgebende Kerbe [-]
1.1	240	266.969	Nahtübergang
1.2	230	542.995	Nahtübergang
1.3	320	134.785	Nahtübergang
1.4	198	780.372	Nahtübergang
1.5	170	772.145	Nahtübergang
1.6	150	1.938.606	Nahtübergang
1.7*	129	(5.000.001)	ohne Versagen
1.7H	267	243.626	Nahtübergang
1.8	185	559.059	Nahtübergang
1.9	150	2.123.825	Nahtübergang
1.10	360	63.531	Nahtübergang
1.11	280	141.561	Nahtübergang
1.12	340	66.316	Nahtübergang
2.1	300	120.649	Nahtübergang
2.2	279	231.938	Nahtübergang
2.3	227	333.866	Nahtübergang
2.4	175	1.017.164	Nahtübergang
2.5*	122	(3.000.001)	ohne Versagen
2.5H	300	124.635	Nahtübergang
2.6	140	1.801.883	Nahtübergang
2.7	300	58.102	Nahtübergang
2.8	227	165.816	Nahtübergang
2.9	175	488.755	Nahtübergang
2.10	207	99.605	Nahtübergang
2.11	122	1.321.677	Nahtübergang
2.12	144	643.787	Nahtübergang
3.1	300	120.649	Nahtwurzel
3.2	280	79.361	Nahtwurzel
3.3	227	227.398	Nahtübergang
3.4	252	182.797	Nahtwurzel
3.5	170	1.077.601	Nahtwurzel
3.6	280	137.547	Nahtwurzel
3.7	210	671.675	Nahtübergang
3.8	130	1.001.537	Nahtwurzel
3.9	150	1.737.766	Nahtwurzel
3.10	190	111.929	Nahtübergang
3.11	265	111.111	Nahtwurzel
3.12	190	770.013	Nahtübergang

\* Versuchskörper, die kein Risswachstum zeigten und erneut auf einem höheren Prüfniveau getestet wurden.

Tab. B-2: Übersicht Versuchsergebnisse Buchsen und Blechteller

Prüfkörper Nr. [-]	Nennspannung $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele bis Bruch [-]	Prüfkörper Nr. [-]	Nennspannung $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele bis Bruch [-]
5.1	241	72.465	6.1	200	176.868
5.2	82	1.963.535	6.2	240	102.778
5.3	182	162.660	6.3	80	2.606.285
5.4	151	233.775	6.4	100	1.167.915
5.5	121	717.105	6.5	230	133.827
5.6	225	82.141	6.6	/	/
5.7	195	127.933	6.7	260	82.603
5.8	165	202.043	6.8	190	234.679
5.9	136	332.249	6.9	110	912.402
5.10	106	829.834	6.10	180	314.114
5.11	211	101.979	6.11	120	812.681
5.12	226	94.118	6.12	170	261.398
5.13	135	401.507	6.13	160	422.575
5.14	180	176.741	6.14	140	508.772
5.15	150	271.603	6.15	150	481.702
7.1	150	561.920	8.1	240	107.862
7.2	140	691.262	8.2	260	82.623
7.3	145	579.504	8.3	180	287.830
7.4	90	2.190.646	8.4	300	60.026
7.5	130	1.022.105	8.5	200	209.813
7.6	100	2.093.181	8.6	220	180.738
7.7	200	469.840	8.7	100	2.104.900
7.8	350	38.882	8.8	300	47.713
7.9	135	1.107.773	8.9	280	88.146
7.10	120	1.198.767	8.10	230	109.170
7.11	275	141.663	8.11	160	556.861
7.12	250	204.066	8.12	90	2.211.509
7.13	300	112.094	8.13	130	629.404
7.14	80	3.320.012	8.14	110	1.501.609
7.15	110	1.288.402	8.15	140	92.5236
9.1	262	119686	10.1	80	2.831.455
9.2	236	181674	10.2	90	2.418.939
9.3	177	582139	10.3	120	994.456
9.4	281	122815	10.4	160	505.939
9.5	161	525589	10.5	150	548.065
9.6	205	318393	10.6	200	272.814
9.7	146	761940	10.7	190	162.108
9.8	275	108456	10.8	180	429.229
9.9	132	892681	10.9	170	316.367
9.10	/	/	10.10	190	232.949
9.11	/	/	10.11	180	253.639
9.12	/	/	10.12	200	200.433
9.13	/	/	10.13	110	1.251.541
9.14	/	/	10.14	140	619.733
9.15	/	/	10.15	130	698.195
11.1	240	257.641	12.1	225	267.947
11.2	100	4.221.272	12.2	197	350.938
11.3	220	306.108	12.3	169	731.808
11.4	180	542.779	12.4	239	239.161
		1.841.766	12.5	127	1.735.575

Prüfkörper Nr. [-]	Nennspannung $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele bis Bruch [-]	Prüfkörper Nr. [-]	Nennspannung $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingspiele bis Bruch [-]
11.5	120	110.716	12.6	253	162.941
11.6	300	142.162	12.7	155	918.796
11.7	280	185.963	12.8	211	293.557
11.8	260	2.022.078	12.9	183	495.927
11.9	140	358.946	12.10	246	233.193
11.10	220	625.718	12.11	119	1.822.618
11.11	160	1.638.571	12.12	176	583.975
11.12	130	1.307.574	12.13	267	187.512
11.13	140	902.430	12.14	148	811.249
11.14	150	406.593	12.15	141	1.218.345
11.15	200				
13.1	131	1.015.841	14.1	441	52.871
13.2	123	1.151.948	14.2	387	82.932
13.3	114	1.506.046	14.3	331	113.620
13.4	107	2.314.582	14.4	194	431.774
13.5	98	2.314.563	14.5	250	223.424
13.6	90	2.649.323	14.6	165	913.048
13.7	139	815.876	14.7	139	1.046.862
13.8	148	724.523	14.8	111	5.024.691
13.9	156	728.823	14.9	303	140.394
13.10	138	861.306	14.10	209	430.252
13.11	114	1.271.651	14.11	290	143.246
13.12	140	821.494	14.12	221	342.497
13.13	112	1.756.451	14.13	276	175.845
13.14	/	/	14.14	129	1.302.150
13.15	/	/	14.15	238	276.310
15.1	240	137.247			
15.2	230	147.124			
15.3	210	198.362			
15.4	135	753.771			
15.5	180	300.269			
15.6	165	423.440			
15.7	150	574.110			
15.8	111	1.204.937			
15.9	80	3.882.421			
15.10	200	218.140			
15.11	100	1.851.271			
15.12	300	78.625			
15.13	280	97.506			
15.14	320	59.704			
15.15	90	2.446.515			