



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Claus-Peter Bork

**Schwingfestigkeitsuntersuchungen
an geschweißten Proben aus
austenitischen Stählen in
Kernkraftwerken zur Festlegung
von Kennwerten im Regelwerk**

261

Forschungsbericht



Dr.-Ing. Claus-Peter Bork

**Schwingfestigkeitsuntersuchungen
an geschweißten Proben aus
austenitischen Stählen in
Kernkraftwerken zur Festlegung
von Kennwerten im Regelwerk**

Forschungsbericht 261

Berlin 2003

Diesen Bericht hat die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Vorhabens SR 2258 erstellt.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Dank

Die im vorliegenden Abschlussbericht dargelegten Untersuchungen wurden mit Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Untersuchungsprogramm SR 2258 gefördert; dafür sei an dieser Stelle gedankt.

Impressum

Forschungsbericht 261: **Schwingfestigkeitsuntersuchungen an geschweißten Proben aus austenitischen Stählen in Kernkraftwerken zur Festlegung von Kennwerten im Regelwerk**
2003

Herausgegeben von
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2003 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
27568 Bremerhaven
Telefon: +49 471 94544-0
Telefax: +49 471 94544-77/-88

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM-Referat G.1

ISSN 0938-5533
ISBN 3-86509-012-5

Zusammenfassung

Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen im Labor V.32 „Betriebsfestigkeit Maschinenelemente“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hatten die Ermittlung regelwerksfähiger zulässiger Spannungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Lastanschlagspunkten aus austenitischen Stählen an Lasten in Kernkraftwerken zum Ziel. Dabei wurde an in einem vorausgegangenen Untersuchungsvorhaben SR 0421 erarbeitete Werte angeknüpft und die Datenbasis durch Untersuchung des Mittelspannungseinflusses sowie des Betriebsfestigkeitsverhaltens erweitert.

Um das Untersuchungsziel zu erreichen, wurden statistisch geplante und ausgewertete Schwingfestigkeitsversuche an gekerbten und geschweißten Flachproben aus dem austenitischen Stahl 1.4541 durchgeführt. Die Flachproben wurden in Einstufen-Wöhlerversuchen bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$) und bei schwellender Zugbeanspruchung ($R = 0,5$) geprüft. Die Untersuchungen umfassen gemäß der Terminologie der DIN 15 018 den Spannungsspielbereich N1 ... N4 für das Spannungskollektiv S_3 . Die Betriebsfestigkeitsversuche wurden mit zwei unterschiedlichen Lastkollektiven bei schwellender Zugbeanspruchung ($R = 0$) sowie in einem Fall bei $R = 0,5$ durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassen gemäß der Terminologie der DIN 15 018 den Spannungsspielbereich N1 ... N4 für das Spannungskollektiv S_0 sowie ein weiteres Spannungskollektiv, das genau in der Mitte zwischen S_1 und S_2 liegt.

Um im Sinne des Untersuchungsziels möglichst praxisnahe Ergebnisse zu erreichen, wurden die Proben bei der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Berlin-Brandenburg gefertigt; die Qualitätssicherung der Probenfertigung übernahm der TÜV Nord nach den Richtlinien der KTA 3905. Die Qualitätssicherung war im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der hier dargelegten Ergebnisse mit denjenigen aus dem Vorgängervorhaben SR 0421 besonders bedeutsam.

Umfangreiche fraktografische und metallografische Begleituntersuchungen erbrachten Aufschluss über die Qualität der Schweißnähte und die Ursachen der Schwingbruchinitiierung. Die Schweißnahtqualität der untersuchten Proben war durchgehend als gut bis sehr gut zu kennzeichnen.

Die Mittelspannungsabhängigkeit, die für drei Kerbfälle bei drei Spannungsverhältnissen in Versuchsreihen im Übergangsgebiet zur Dauerfestigkeit bestimmt wurde, folgt keinem einheitlichen Trend: In zwei Fällen erscheint die GOODMAN-Gerade ansatzweise die Abhängigkeit zu beschreiben; in einem Fall ist eine annehmbare Näherung durch die GERBER-Parabel möglich. Die Ergebnisse von Einstufenversuchen hinsichtlich der Mittelspannungsabhängigkeit sind jedoch nicht auf diejenigen von Betriebsfestigkeitsversuchen übertragbar.

Anhand der erarbeiteten Lebensdauerlinien und der vorliegenden Bauteilwöhlerlinien konnten die tatsächlichen Schadenssummen nach der gemäß HAIBACH mo-

difizierten Schadensakkumulationshypothese berechnet werden. Die derart berechneten tatsächlichen Schadenssummen liegen zwischen 0,001 und 1,5. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass ohne Kenntnis der Bauteilwöhlerlinie erhebliche Fehleinschätzungen – hier zum Teil auf der unsicheren Seite liegend – der zu erwartenden Lebensdauer möglich sind.

Die Herleitung zulässiger aus ertragbaren Spannungen für die Einstufenversuche an Schweißverbindungen wurde wie folgt vorgenommen: Die Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsgebiet wurde aus den experimentellen Ergebnissen für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50% abgeleitet; die Streuungen wurden mit Hilfe des den Angaben in der DS 804 zugrunde liegenden einheitlichen Streubands für Schweißverbindungen aus dem Wöhlerlinienkatalog von OLIVIER und RITTER abgeschätzt. Dabei wurde angenommen, dass das Streuverhalten der hier ermittelten Schwingfestigkeitswerte mit Hilfe der Großzahluntersuchungen des einheitlichen Streubands für Schweißverbindungen sicherer abgeschätzt wird als aus den vergleichsweise kleinen Stichproben der hier dargelegten Versuchsergebnisse.

Für die Kerbstäbe mit Mittenloch wurde der aus den ertragbaren Spannungen auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 99,9 % extrapolierte Wert als zulässig angegeben. In gleicher Weise wurden die zulässigen Spannungen für die Betriebsfestigkeitsversuche ermittelt. In beiden Fällen fehlt nämlich die Datenbasis aus dem Wöhlerlinienkatalog nach OLIVIER und RITTER, die lediglich für Schweißverbindungen unter einstufiger Beanspruchung gilt.

Der Vergleich der derart ermittelten zulässigen Spannungen mit den Angaben aus der DIN 15 018 zeigt, dass die Werte der DIN-Norm teils nicht konservativ, teils konservativ sind. Bei ein und demselben Kerbfall wechseln in einigen Fällen - je nach Schwingspielzahlbereich - nicht konservative und konservative Bereiche.

In ergänzenden Versuchen wurde das elastisch-plastische Verhalten des Grundwerkstoffs bestimmt. Hierzu wurde die Dehnungswöhlerlinie aufgenommen und nach MANSON-COFFIN ausgewertet. Ebenso wurde die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve ermittelt. Hierbei zeigte sich, dass die zyklische Ersatzstreckgrenze doppelt so groß wie die zügige ist. Dies weist auf das vergleichsweise hohe Verfestigungspotential des untersuchten Werkstoffs unter zyklischer Beanspruchung hin.

Im Hinblick auf die Abschätzung der Restnutzungsdauer anrissbehafteter Bauteile wurde das Rissfortschrittsverhalten nach PARIS sowie der bruchmechanische Schwellwert der zyklischen Spannungsintensität ermittelt.

Abstract

The fatigue tests in the laboratory V.32 "Service Loading Fatigue; Machine Elements" of the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM) aimed at the investigation of allowable stresses for certification of fatigue strength of load application points from austenitic stainless steels in nuclear power plants. Thereby it was proceeded from results of a previous research project SR 0421 by broadening the data base with results of a mean stress sensitivity analysis and of fatigue strength tests under variable amplitude loading.

In order to reach the purpose of the investigation statistically planned and evaluated fatigue tests were performed on notched and welded sheet specimens made of austenitic steel 1.4541. Flat specimens were tested under constant amplitude loading with R-values of -1 (alternating load) and of 0,5 (pulsating tensile load). The experiments comprise a load cycle range from N1 to N4 for the load spectrum S3 according to the terminology of the german standard DIN 15018. Tests with variable amplitude loading were performed with two different load spectra under pulsating tensile stresses at R-values of 0 and of 0,5. These experiments comprise a load cycle range from N1 to N4 for the load spectrum S0 and an additional one which lies just in the middle of the spectra S1 and S2; terminology according to the german standard DIN 15018.

To achieve most practical results - if possible the specimens were manufactured by the Welding Institute of Berlin-Brandenburg; quality control was performed by the TÜV Nord according to the german standard for nuclear components KTA 3905. With respect to the comparability with the results of the previous research project SR 0421 quality assurance was particularly meaningful.

Extensive fractographic and micrographic analyses gave information about the weld seams' quality and different reasons of fatigue crack initiation. The quality of the seam welds of the tested specimens was all good to very good.

Mean stress sensitivity of three tested notch configurations was evaluated for three stress relations from the fatigue limits. In two cases the dependency seems to follow a GOODMAN line; in one case a GERBER parabola will fit best. However the results of tests under constant amplitude loading with respect to mean stress sensitivity are not transferable to those of tests under variable amplitude loading.

With the GASSNER curves and the fatigue life curves the actual damage sums were calculated according to the linear damage accumulation rule in the modification of HAIBACH. The resulting actual damage sums cover a range from 0,001 up to 1,5. This result clarifies that without knowledge of the realistic S/N curve considerable false estimations of expected life time

values may be possible – in this case being partly on the non-conservative side.

Allowable stresses for the welded specimens were derived from experimentally determined endurable stresses in a way as follows: The slope of the S-N-curve in the region of finite life was taken from the experimental results for a failure probability of 50 %. The width of the scatterband - especially for the important low failure probability of 0,1 % - was estimated with the help of DS 804. The scatterband was supposed to be parallel to the S-N-curve with a failure probability of 50 %. The Standard DS 804 applies a unified scatterband of the S-N-curve for welded joints in structural steels. This was derived from thousands of experimental results by OLIVIER and RITTER. It was supposed that the scatter behaviour of the tested welded specimens could be estimated safer by the mentioned unified scatterband than by the individual scatter of the comparatively smaller number of samples of the test results presented here.

The allowable stresses for the notched specimens with centre hole were derived from the endurable stresses with a failure probability of 50 % by extrapolating to a probability of 99,9 %, using the experimental scatter. The allowable stresses for the random loaded specimens were calculated in the same way. In both cases no reference to the results of OLIVIER and RITTER is possible due to the fact that these results are valid only for welded specimens under constant load amplitude.

The comparison of the allowable stresses evaluated like that with the corresponding values in DIN 15 018 shows that the DIN values are partly not conservative and partly conservative. In some cases of one and the same notch type the results alternate from conservative to non-conservative regions depending on the number of oscillations.

Supplementary tests were carried out in order to evaluate the elastic-plastic behaviour of the base metal. Thus the strain S-N-curve with the COFFIN-MANSON parameters was determined. The cyclic stress strain curve was also evaluated. It could be recognised that the cyclic yield strength was nearly twice the static yield strength. This behaviour indicates the comparatively high potential of cyclic hardening of the investigated material.

With respect to the estimation of the crack propagation life of cracked components the PARIS parameters and the fracture mechanical threshold value of the cyclic stress intensity were determined.

Inhalt

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 7 |
| 2 | Kenntnisstand und Aufgabenstellung..... | 9 |
| 2.1 | Kenntnisstand..... | 9 |
| 2.2 | Aufgabenstellung..... | 9 |
| 2.2.1 | Schwing- und Betriebsfestigkeitsversuche..... | 10 |
| 2.2.2 | Zur Problematik der Grenzschwingspielzahl..... | 10 |
| 2.2.3 | Ergänzende Untersuchungen..... | 11 |
| 3 | Werkstoff und Proben..... | 13 |
| 3.1 | Werkstoffcharakterisierung..... | 13 |
| 3.2 | Probenformen und Kerbfälle..... | 13 |
| 3.3 | Ergänzende Angaben zur Schweißfertigung der Proben..... | 13 |
| 3.3.1 | Schweißverfahren..... | 13 |
| 3.3.2 | Nahtvorbereitung und –aufbau..... | 14 |
| 3.3.3 | Schweißelektrodenwerkstoffe..... | 14 |
| 4 | Qualitätssicherung der Probenfertigung..... | 21 |
| 4.1 | Allgemeine Hinweise..... | 21 |
| 4.2 | Befunde der zerstörungsfreien Prüfung..... | 21 |
| 5 | Versuchsergebnisse..... | 23 |
| 5.1 | Lastgeregelte Versuche bei einstufiger Beanspruchung..... | 23 |
| 5.1.1 | Versuchsdurchführung und –auswertung..... | 24 |
| 5.1.2 | Ergebnisse..... | 24 |
| 5.2 | Betriebsfestigkeitsversuche..... | 25 |
| 5.2.1 | Versuchsdurchführung und –auswertung..... | 25 |
| 5.2.2 | Ergebnisse..... | 25 |
| 5.2.3 | Schadenssummen..... | 26 |
| 5.3 | Mittelspannungsempfindlichkeit..... | 26 |
| 5.4 | Fraktografie..... | 27 |
| 5.5 | Metallografie..... | 29 |
| 5.6 | Härtemessungen..... | 29 |
| 5.7 | Ergänzende Untersuchungen..... | 30 |
| 5.7.1 | Rissfortschrittsversuche..... | 30 |
| 5.7.2 | LCF-Versuche..... | 31 |
| 6 | Ableitung zulässiger Spannungen..... | 61 |
| 6.1 | Methodik..... | 61 |
| 6.2 | Ergebnisse..... | 62 |
| 7 | Umsetzung der erarbeiteten Werte für die KTA 3905..... | 71 |
| 7.1 | Wöhlerlinien zulässiger Spannungen..... | 71 |
| 7.2 | Mittelspannungsabhängigkeit zulässiger Spannungen..... | 71 |
| 7.3 | Abgrenzung zu einigen anderen Regelwerken..... | 72 |
| 7.4 | Übertragbarkeit und weitere Einflussgrößen..... | 73 |
| 8 | Verwendete Symbole und Abkürzungen..... | 85 |
| 9 | Literaturverzeichnis..... | 87 |

1 Einleitung

Lastanschlagspunkte an Lasten in Kernkraftwerken werden häufig aus austenitischen, korrosionsbeständigen Stählen hergestellt. Für die Auslegung, Konstruktion und Berechnung derartiger Lastanschlagspunkte ist die derzeit in der Fassung 6/99 vorliegende KTA 3905 „Lastanschlagspunkte an Lasten in Kernkraftwerken“ [1] verbindlich.

Im Abschnitt 5.1.2 dieses Regelwerks wird für Schwingspielzahlen $>2 \cdot 10^4$ ein Betriebsfestigkeitsnachweis gefordert. Dieser basiert auf der linearen Schadensakkumulationshypothese nach PALMGREN [2] und MINER [3] und wird auf der Basis ertragbarer bzw. daraus abgeleiteter zulässiger Spannungen geführt und setzt die Kenntnis des Wöhlerfeldes - oder zumindest der Wöhlerlinie für die statistisch abgesicherte Überlebenswahrscheinlichkeit $P_v = 50\%$ - voraus.

In der KTA 3905 ist vorgesehen, dass bei Verwendung von Werkstoffen, für die in den allgemein gültigen Regeln der Technik keine zulässigen Spannungen festgelegt sind, diese durch „Berechnungen“ oder „wirklichkeitsnahe Versuche“ abzuleiten sind, (Abschnitt 6.1.2, Satz (2)). Die Festlegung zulässiger Spannungen auf der Basis von Ergebnissen aus wirklichkeitsnahen Versuchen ist diejenige Vorgehensweise, die a priori praktisch

umsetzbare Werte, deren Sicherheit quantifizierbar ist, erwarten lässt. Vor diesem Hintergrund wurde das 1993 abgeschlossene Forschungsvorhaben SR 0421 in der BAM realisiert.

Mit den im Abschlußbericht zum Untersuchungsvorhaben SR 0421 [4] erörterten Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurde die Datenbasis zur Ableitung zulässiger Spannungen für den in der KTA 3905 geforderten Betriebsfestigkeitsnachweis *austenitischer Stähle* erweitert und abgesichert. Die Ergebnisse fanden direkten Eingang in die KTA 3905, Anhang F.

Zwei wesentliche Parameter konnten damals jedoch nicht experimentell untersucht werden, nämlich

- der Mittelspannungseinfluß und
- der Einfluss der Kollektivform bei Betriebsfestigkeitsuntersuchungen.

In vorliegendem Bericht, werden die experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung dieser Parameter beschrieben und die Ergebnisse dargestellt. Das zugehörige Forschungsvorhaben SR 2258 wurde wiederum vom BMU finanziell gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

2 Kenntnisstand und Aufgabenstellung

2.1 Kenntnisstand

Es sei vorausgeschickt, dass der vorliegende Bericht thematisch und inhaltlich sehr eng an den vorausgegangenen Bericht [4] – im folgenden stets „Austenit I“ genannt – angelehnt ist. Insofern werden nicht alle Hinweise die dort gegeben sind, hier wiederholt. Infolge dieser engen Beziehung und der aufeinander aufbauenden Versuche sind Ergebnisse aus anderen Instituten in lediglich sehr begrenztem Umfang für die Betrachtungen nützlich.

Das Ergebnis einer Literaturrecherche zum Themenkreis „Schwingfestigkeit austenitischer Stähle“ erbrachte, dass keine den vorstehend genannten Forderungen entsprechenden Veröffentlichungen vorliegen. Über die Schwingfestigkeit geschweißter Proben wird lediglich in drei [5], [6], [7], von rund 50, in einer Recherche ermittelten themenrelevanten Publikationen berichtet.

In [5] wird über Untersuchungen, auch unter Random-Beanspruchungen, berichtet, die mit geschweißten Proben aus 1.4571 durchgeführt wurden. Es fehlt aber die statistische Absicherung; zulässige Nennspannungen werden nicht angegeben.

In [6] und [7] werden an Proben aus rostfreien Stählen ermittelte Versuchsergebnisse (1.4318, geschweißte Proben, Einstufen- und Random-Beanspruchung) dargestellt. Es wird auch eine Methode zur Herleitung zulässiger Spannungen erörtert. Diese ist der im Bericht Austenit I [4] dargelegten Verfahrensweise sehr ähnlich. Dieser Aspekt wird im Abschnitt 6.1 diskutiert.

2.2 Aufgabenstellung

Mit den im Abschlußbericht zum Untersuchungsvorhaben Austenit I [4] erörterten Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurde die Datenbasis zur Ableitung zulässiger Spannungen für den in der KTA 3905 geforderten Betriebsfestigkeitsnachweis austenitischer Stähle erweitert und abgesichert. Zwei wesentliche Parameter konnten bisher aber noch nicht experimentell untersucht werden, nämlich

- a) der Mittelspannungseinfluß und
- b) der Einfluss der Kollektivform bei Betriebsfestigkeitsuntersuchungen.

zu a)

Die Höhe der dauerhaft ertragbaren Spannungsamplitude hängt von der gleichzeitig einwirkenden statischen Spannung (Mittelspannung) ab. Dieser Effekt wird als Mittelspannungsempfindlichkeit bezeichnet. Eigenspannungen wirken, solange sie zeitlich stabil sind, wie Mittelspannungen. Schweißverbindungen werden in der Regel zusätzlich durch Schweißbeigenspannungen beeinflusst.

Den in DIN 15 018 angegebenen zulässigen Spannungen für ferritische Stähle liegt eine Mittelspannungsabhängigkeit ohne Berücksichtigung der Schweißbeigenspannungen zugrunde. Zum Mittelspannungseinfluß bei austenitischen Stählen liegen z. Z. keine belastbaren Ergebnisse vor. Infolge der vergleichsweise niedrigen Streckgrenze austenitischer Stähle werden geringere Schweißbeigenspannungen als bei ferritischen Stählen erwartet. Diese bauen sich möglicherweise auch stärker ab. Zuverlässigen Aufschluss können jedoch *nur* entsprechende Ermüdungsversuche bringen.

Da die im Rahmen des Vorhabens Austenit I [4] abgeleiteten zulässigen Spannungen (mit Ausnahme der Probenform „Rohr mit angeschweißten Kopfplatten“, Kerbfall K4) lediglich das Spannungsverhältnis $R = 0$ abdecken, wurden in diesem Vorhaben ergänzende Versuche bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$) und bei Schwellbeanspruchung mit höheren Mittelspannungen ($R = 0,5$) durchgeführt.

Die Versuche bei $R = -1$ dienten dazu, die Vergleichsbasis der Schwingfestigkeitswerte für Schweißverbindungen in austenitischen Stählen gegenüber entsprechenden Kerbfällen bei ferritischen Baustählen zu verbreitern. Die experimentellen Untersuchungen bei $R = 0,5$ erbrachten quantitative Hinweise über die derzeitige Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses über Hublastbeiwerte.

Für das Gebiet der Zeitfestigkeit werden hier 11...16 Proben als hinreichend erachtet [10], das Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ($N_e = 10^7$) wird mit mindestens 12 Proben bestimmt [11]. Als Versagenskriterium wird stets der Probenbruch gewertet, d. h. die Rissfortschrittsphase ist in den angegebenen Lebensdauerwerten enthalten. Anhand der Versuchsergebnisse werden aus den ertragbaren Spannungen zulässige Spannungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis hergeleitet; diese werden mit den zulässigen Spannungen gemäß DIN 15 018 verglichen.

zu b)

Die DIN 15 018 ordnet dem Zusammenhang zwischen Spannungsspielbereichen $N_1 \dots N_4$ und Spannungskollektiven $S_0 \dots S_3$ sogenannte Beanspruchungsgruppen $B_1 \dots B_6$ zu. Die auf das Bauteil wirkenden Beanspruchungen werden in Regelwerken häufig allein durch den Spannungsspielbereich und die Beanspruchungsgruppe gekennzeichnet. Da sich der Schwingzahlbereich für den Betriebsfestigkeitsnachweis von ca. $N = 2 \cdot 10^4$ bis $N = 5 \cdot 10^6$ erstrecken kann, müssen für verschiedene Spannungsspielbereiche und Beanspruchungsgruppen verschiedene Spannungskollektive maßgeblich sein. Die im Bericht Austenit I [4] erörterten Schwingfestigkeitswerte und die daraus abgeleiteten zulässigen Spannungen gelten demnach *aus-schließlich* für das Spannungskollektiv S_3 .

Da es versuchstechnisch nahezu unmöglich ist, die Beanspruchungen a priori derart festzulegen, dass bei den bisher noch nicht untersuchten Spannungskollektiven S_0 bis S_2 bestimmte Spannungsspielbereiche bzw. Lebensdauerwerte erreicht werden, wurde nunmehr der gesamte Spannungsspielbereich N1 bis N4 mit den Kollektiven S_0 und einem Kollektiv S_{BAM} , das zwischen S_1 und S_2 liegt und durch $p = 0,5$ gekennzeichnet ist, experimentell untersucht. Das Kollektiv S_{BAM} sowie die übrigen Kollektive der DIN 15 018 sind im Bild 2-1 dargestellt.

Die Versuche wurden derart angelegt, dass für jedes der beiden Kollektive und jeden der drei o. a. Kerbfälle eine Betriebsfestigkeits-Lebensdauerlinie an 10 Proben ermittelt wurde. Da die Reduzierung der zulässigen Spannungen mit einem pauschalen Abminderungsfaktor bei der untersuchten Kollektivform S_3 nicht in allen Fällen konservativ ist, konnte dieses Verhalten auch für Kollektive mit geringerer Fülligkeit vermutet werden. Darüber hinaus ist bei letztgenannten Kollektiven auch ein anderes Rissentstehungs- und Ausbreitungsverhalten zu erwarten. Dieses kann die Schwingfestigkeit maßgeblich beeinflussen. Die experimentell gestützte Klärung dieser Zusammenhänge erschien daher geboten.

In einer weiteren stichprobenartigen Versuchsreihe mit dem Spannungskollektiv S_{BAM} wurde der Mittelspannungseinfluß bei Kollektivbeanspruchungen anhand von Proben des Kerbfalls K1 bestimmt.

2.2.1 Schwing- und Betriebsfestigkeitsversuche

Es wurden nur Proben aus dem Hauptwerkstoff 1.4541 geprüft, da sich erwiesen hatte [4], dass im Rahmen der untersuchten Gruppe austenitischer Stähle werkstoffspezifische Unterschiede von untergeordneter Bedeutung sind.

Lediglich die Kerbfälle W1-1 (Kerbstab mit $K_t = 2,4$), K1 (geschweißte Probe mit Stumpfstoß) und K4 (geschweißte Probe mit Kreuzstoß, Kehlnaht), die besonders praxisrelevant sind, wurden untersucht.

Es wurden kraftgeregelte Schwingfestigkeitsversuche an Proben mit den drei vorstehend genannten Kerbfällen durchgeführt. Die Versuche wurden bei den Spannungsverhältnissen $R = -1$ und $R = 0,5$ realisiert. Insgesamt wurden also 6 vollständige, statistisch abgesicherte Wöhlerfelder mit jeweils rund 36 Proben ermittelt; der gesamte Probenaufwand hierfür betrug rund 216 Proben.

Die KTA 3905 bezieht sich beim Betriebsfestigkeitsnachweis auf die Kranbaunorm DIN 15 018. In dieser Norm wird angegeben, dass die zulässigen Spannungen für die ferritischen Stähle mit den Spannungskollektiven $S_0 \dots S_2$ (sehr leicht bis mittel) auf einem Gauß-Kollektiv beruhen.

Deswegen wurden kraftgeregelte Betriebsfestigkeitsversuche bei einem Beanspruchungsverhältnis $R = 0$ an jeweils 8...13 Proben je Kerbfall und Spannungskollektiv durchgeführt. Der Probenumfang musste hier im Vergleich zu den Einstufenversuchen verringert werden, da die Betriebsfestigkeitsversuche im Mittel um etwa zwei Größenordnungen längere Versuchszeiten erfordern. Wegen des hohen Zeitaufwands wurde ebenso auf Untersuchungen mit dem Spannungskollektiv S_1 (leicht) verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass durch Interpolation zwischen den experimentellen Ergebnissen für S_0 und S_{BAM} bzw. S_{BAM} und S_3 die erforderlichen Kennwerte für S_1 bzw. S_2 erhalten werden können. Für die vorstehend genannten experimentellen Untersuchungen wurden 79 Proben geprüft.

In einer zusätzlichen Versuchsreihe wird der Einfluss der Mittelspannung auf die Betriebsfestigkeit untersucht. Hierbei sollten 13 Proben mit dem Kollektiv S_{BAM} bei $R = 0,5$ geprüft werden.

2.2.2 Zur Problematik der Grenzwahrscheinlichkeit

Als Grenzwahrscheinlichkeit N_G wurde 10^7 festgelegt, d. h. alle Proben, die bis $N=N_G$ nicht brechen, wurden als Durchläufer gewertet. Die Beschränkung auf diesen technisch und wirtschaftlich vertretbaren Wert ist hier auch vor dem Hintergrund von 285 geprüften Proben zu sehen. Es sei erwähnt, dass in der Literatur [12] darauf hingewiesen wird, dass Werkstoffe mit kubisch flächenzentrierter Elementarzelle - dazu zählen auch die hier untersuchten Stähle - keine deutlich ausgeprägte Dauerfestigkeitsschranke wie die ferritischen Baustähle mit kubisch raumzentrierter Elementarzelle aufweisen. Andererseits wird im Schrifttum, z. B. [7], über Schwingfestigkeitsversuche an austenitischen Stählen häufig $N_G = 10^7$ als Grenzwert angegeben.

Im KTA-Regelwerk wird in der KTA 3204 [13] eine Ermüdungskurve für austenitische Stähle angegeben, die für Zyklenzahlen $> 10^6$ gilt. Diese stammt aus dem ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division I. Aus dieser Kurve in Bild 6.4 auf Seite 46 der KTA ist bei gegebener Lastspielzahl die zugehörige Vergleichsspannungsschwingbreite zu ersehen. Die Kurve überdeckt einen Lastspielzahlbereich bis 10^{11} . Sie beruht auf Ergebnissen aus lastgeregelten Versuchen, die bei zwei Grenzwahrscheinlichkeiten wie folgt angelegt wurden [14]: Für $N_G = 10^6$ wurden Treppenstufenversuche [15] mit 12 Kleinproben durchgeführt und daraus die zugehörige Dauerfestigkeit bestimmt. In einer zweiten Reihe wurde für $N_G = 3,2 \cdot 10^8$ die Dauerfestigkeit mit weiteren 9 Proben ermittelt. Aus diesen beiden Dauerfestigkeitswerten wurde auf $N = 10^{11}$ Schwingspiele extrapoliert. Die in der Ermüdungskurve aus KTA 3204 angegebenen Werte jenseits von $3,2 \cdot 10^8$ Schwingspielen sind demnach im engeren Sinne *nicht* experimentell gesichert.

Die im vorliegenden sowie im Bericht Austenit I [4] angewandte Methode zur Bestimmung der Dauerfestig-

keit führt zur Angabe zulässiger Spannungen, die die Proben nicht „beliebig oft“ ertragen, sondern zu einem Ersatzwert, der ausdrücklich *nur bis zu 10^7 Schwingspielen* Gültigkeit besitzt. Der Einfachheit halber wird dieser Ersatzwert im vorliegenden Bericht Ersatzdauerfestigkeit genannt.

2.2.3 Ergänzende Untersuchungen

a) Fraktografie

Wie bereits im Vorhaben Austenit I geschehen, wurden alle Schwingungsbrüche fraktografisch beurteilt und katalogisiert. Gegenstand der Betrachtung waren sowohl die Bruchursachen als auch die Anrissorten. Kerbfalltypische Bruchbilder wurden nicht angefertigt, da hier ohne Ausnahme auf den entsprechenden Abschnitt im Bericht Austenit I [4] verwiesen werden kann.

b) Untersuchungen zum Grundwerkstoff und zum Schweißnahtgefüge

Zur Charakterisierung der Werkstoffe sowie der Spezifika austenitischer Schweißverbindungen wurden die folgend genannten Untersuchungen durchgeführt:

- Chemische Analyse, Vergleich mit den Abnahmeprüfzeugnissen
- Ermittlung der statischen Festigkeitswerte, Vergleich mit den Abnahmeprüfzeugnissen

- Lichtmikroskopische Gefügeuntersuchungen (Längs- und Querschliffe)
- Makroschliffe und Härteprofile der Schweißnähte
- Brinell-Härtemessungen zur Abschätzung der Probengleichmäßigkeit

c) Dehnungsgesteuerte Schwingfestigkeitsversuche

Zur Kennzeichnung des elasto-plastischen Werkstoffverhaltens dienen Dehnungswöhlerlinien, die Ergebnisse sogenannter LCF-Versuchen (Low Cycle Fatigue) darstellen. Besonders im Hinblick auf neuere, nach dem örtlichen Konzept angelegte Dimensionierungsregeln sind derartige Daten für die Rechnungen notwendig. Die Versuche wurden an glatten (ungekerbten) Grundwerkstoffproben bei $R_e = -1$ durchgeführt.

d) Schwingbruchmechanische Untersuchungen

Die Versuche wurden an Dreipunkt-Biegeproben aus dem Grundwerkstoff durchgeführt. Die ermittelte Rissfortschrittsgeschwindigkeit da/dN in Abhängigkeit von der Schwingbreite der zyklischen Spannungsintensität ΔK liefert die notwendigen Werkstoffdaten, um den Rissfortschritt angerissener Bauteile rechnerisch abschätzen zu können. Darüber hinaus wurde auch der Schwellenwert der zyklischen Spannungsintensität ermittelt. Anhand dieses Kennwerts kann abgeschätzt werden, ob vorhandene Risse bei bekannter schwingender Beanspruchung ausbreitungsfähig sind.

Bilder zu Kapitel 2

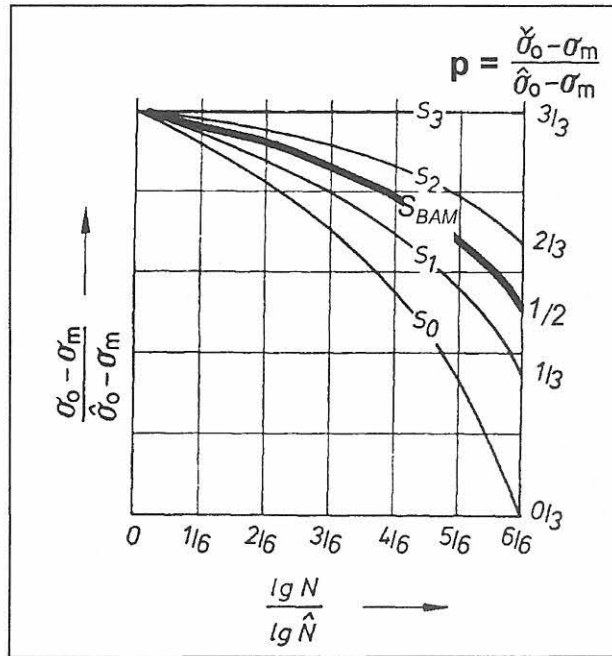


Bild 2-1: Bezogene Spannungskollektive nach DIN 15 018 und S_{BAM}

3 Werkstoff und Proben

3.1 Werkstoffcharakterisierung

Wie im [Abschnitt 2.2.1](#) bereits erläutert, wurde der Werkstoff 1.4541 ausgewählt. Die Kerbfälle der Versuchsstäbe erstrecken sich von der mäßig gekerbten Lochprobe über den Stumpfstoß bis zum vergleichsweise stark gekerbten Kreuzstoß mit Doppelkehlnaht.

Aus [Tabelle 3-1](#) ist die chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe zu ersehen. Neben den Angaben aus den Abnahmeprüfzeugnissen, die Bestandteil der Fertigungsdokumentation [8] gemäß KTA 3905 sind, enthält die Tabelle die Werte aus DIN 17 440 sowie die Ergebnisse einer Spektralanalyse der BAM. Die Anforderungen aus DIN 17 440 werden sowohl hinsichtlich der Herstelleranalysen als auch hinsichtlich der BAM-Untersuchungen eingehalten. Die vergleichsweise geringen Abweichungen zwischen den Angaben aus den Abnahmeprüfzeugnissen und der BAM-Analyse erklären sich aus den Messunsicherheiten der jeweiligen Analyseverfahren.

In [Tabelle 3-2](#) sind die Festigkeitswerte des Versuchswerkstoffs aufgeführt. Die Zugproben wurden wie die Schwingproben aus Flachmaterial mit 10 mm Dicke quer zur Walzrichtung entnommen. Die aufgeführten Werte gelten für Raumtemperatur. Neben den Angaben aus den Abnahmeprüfzeugnissen, die Bestandteil der bereits o. a. Fertigungsdokumentation [8] gemäß KTA 3905 sind, enthält die Tabelle die Werte aus DIN 17 440 sowie die Ergebnisse von in der BAM durchgeführten Zugversuchen nach DIN EN 10 002. Die Mindestanforderungen aus DIN 17 440 werden sowohl von den Herstellerangaben als auch von den BAM-Ergebnissen übertroffen. Die Abweichungen zwischen den Abnahmezeugnissen und den BAM-Ergebnissen erklären sich zum einen aus der Tatsache, dass gemäß Werkstoffprüfblatt 7 der KTA 3905 im Abnahmeprüfzeugnis nur *ein* Versuch verlangt wird, die BAM jedoch Mittelwerte aus *vier* Versuchen angibt. Zum anderen ist die den Angaben aus den Abnahmeprüfzeugnissen zugrunde liegende Spannungsanstiegsgeschwindigkeit beim Zugversuch nicht angegeben. Die BAM-Versuche wurden mit rund 12 N/mm²/s durchgeführt.

3.2 Probenformen und Kerbfälle

Im [Abschnitt 2.2.1](#) wurde bereits erwähnt, dass aus dem vorausgegangenen Projekt Austenit I, in dem 8 Kerbfälle untersucht wurden, drei Kerbfälle ausgewählt wurden, nämlich:

Kerbfall W1-1: Zur Ermittlung der Kerbempfindlichkeit des Grundwerkstoffs wurden innengekerbte Proben mit rundem Mittenloch geprüft, siehe [Bild 3-1](#). Die mäßige Kerbwirkung ist durch $K_t = 2,4$ charakterisiert. K_t wurde gemäß [9] berechnet.

Kerbfall K1: Geschweißte Proben *mäßiger* Kerbwirkung mit Stumpfnaht (Normalgüte) quer zur Krafrichtung, siehe [Bild 3-2](#). Güte der Schweißarbeiten gemäß DIN EN 25817, Bewertungsgruppe B.

Kerbfall K4: Geschweißte Proben *besonders starker* Kerbwirkung mit Kreuzstoß (Doppelkehlnaht in Normalgüte) quer zur Krafrichtung, siehe [Bild 3-3](#). Güte der Schweißarbeiten gemäß DIN EN 25817, Bewertungsgruppe B.

Aus [Tabelle 3-3](#) ist das Versuchsprogramm sowie die Anzahl der geprüften und die Anzahl der in die Auswertung eingezogenen Proben zu ersehen. Einstufenversuche wurden sowohl zur Ermittlung des Zeitfestigkeitsgebiets (ZFG) als auch des Übergangsgebiets zur Ersatzdauerfestigkeit (ÜG) durchgeführt. Für diese Versuche gilt gemäß DIN 15018 grundsätzlich das Spannungskollektiv S_3 , s. a. [Bild 2-1](#). Unter der Angabe „Kantenvers.“ ist eine separate Prüfreihe, mit der der mögliche Einfluss des Kantenversatzes untersucht wurde, aufgenommen worden; s. [„Zum Einfluss des Winkel- und Kantenversatzes“](#)

Anhand der Versuchsseriennummer kann im vorliegenden Bericht jede Serie eindeutig identifiziert werden.

3.3 Ergänzende Angaben zur Schweißfertigung der Proben

Geschweißte Proben sind nicht allein durch ihren Werkstoff und ihre Nahtform gekennzeichnet; Nahtvorbereitung, Nahtaufbau und Schweißzusatzwerkstoffe sind weitere wesentliche Parameter.

3.3.1 Schweißverfahren

Die Schweißungen wurden als Lichtbogenhandschweißungen (E-Hand 111) ausgeführt. Die Schweißposition war - mit Ausnahme des Kerbfalls K4 (Kreuzstoß mit Kehlnaht) – „Wannenlage“; bei K4 war die Schweißposition „horizontal“. Die Bleche wurden vor dem Schweißen gebeizt, um Verunreinigungen der Schmelze durch Oxide vorzubeugen. Es wurden Stabelektroden aus 1.4316 mit saurer Titandioxid-Umhüllung (Rutil-Typ) und besonders niedrigem Kohlenstoffgehalt eingesetzt. Die Festigkeit der Schweißelektroden im Schweißzustand war stets höher als diejenige des Grundwerkstoffs. Näheres zu den Schweißelektroden ist im [Abschnitt 3.3.3](#) dargelegt.

3.3.2 Nahtvorbereitung und -aufbau

Die geschweißten Flachproben wurden derart gefertigt, dass für die Stumpfstöße 12 Proben, für die Kreuzstöße 17 Proben aus jeweils einer Tafel in einem gemeinsamen Fertigungsvorgang geschweißt wurden; erst nach dem Schweißen wurden die Tafeln in die einzelnen Proben durch Sägeschnitte geteilt und die Kanten durch Fräsen bearbeitet. Mit dem (hier nicht wiedergegebenen) Verschnitt- und Probenlageplan [8] lässt sich die Lage jeder einzelnen Probe in den Blechtafeln eindeutig angeben.

Aus Bild 3-4 und Bild 3-5 ist die Nahtvorbereitung und der Nahtaufbau zu ersehen. Diese Angaben, die die Original-Schweißpläne des Herstellers - entnommen aus [8] - wiedergeben, enthalten weitere Angaben über:

- Die Schweißstromart und -stärke
- Die Schweißposition
- Das Schweißverfahren
- Das eingesetzte Elektrodenmaterial
- Das Auskreuzen der Wurzel

3.3.3 Schweißelektrodenwerkstoffe

Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Stabelektroden ist in Tabelle 3-4 wiedergegeben. Diese Tabelle enthält die Werte aus den Abnahmeprüfzeugnissen [8]. Zur Orientierung sind die Typbezeichnungen mit aufgeführt. Die Herstellerbezeichnung, die auch in Bild 3-4 und Bild 3-5 aufgeführt ist, lautet: Thermanit JEW 308 L - 16.

Tabellen zu Kapitel 3

Tabelle 3-1: Chemische Zusammensetzung des Versuchswerkstoffs in Masse-%

| 1.4541 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Ti |
|--------|--------|-------|-------|---------|--------|-----------|------|-------|----------|
| APZ | 0,043 | 0,48 | 1,33 | 0,021 | <0,003 | 17,02 | 9,02 | n.b. | 0,39 |
| DIN | ≤ 0,08 | ≤ 1,0 | ≤ 2,0 | ≤ 0,045 | ≤ 0,03 | 17-199-12 | | k.A. | 0,23-0,8 |
| BAM | 0,039 | 0,514 | 1,310 | 0,027 | 0,002 | 16,85 | 8,84 | 0,346 | 0,392 |

k.A.: keine Angabe

n.b.: nicht bestimmt

APZ: Angaben aus dem Abnahmeprüfzeugnis (Bescheinigung nach DIN EN 10204-3.1B)

DIN: Angaben gemäß DIN 17440

BAM: Spektralanalyse (Funkenemissionsspektrometer OBLF QSL 1500, Labor I.13)

Tabelle 3-2: Festigkeits- und Bruchdehnungswerte des Versuchswerkstoffs

| 1.4541 | R_m in N/mm ² | $R_{p0,2}$ in N/mm ² | $R_{p1,0}$ in N/mm ² | A_5 in % |
|--------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|
| APZ | 603 | 254 | 292 | 55 |
| DIN | 500-730 | ≥ 205 | ≥ 240 | ≥ 35 |
| BAM | 603 | 259 | 289 | 52 |

APZ: Angaben aus dem Abnahmeprüfzeugnis (Bescheinigung nach DIN EN 10204-3.1B)

DIN: Angaben gemäß DIN 17440

BAM: Zugversuche nach DIN EN 10002 (Mittelwerte aus vier Einzelversuchen)

Tabelle 3-3: Versuchsprogramm und eingesetzte Proben

| Versuchs- serien-Num- mer | Kerbfall | Versuchsart | Beanspru- chungs- verhältnis | Kollektiv | geprüfte Proben | in die Auswer- tung einbezo- gene Proben |
|---------------------------------|----------|-------------|------------------------------------|-----------|--------------------|--|
| 1 | W1-1 | ZFG | R = -1 | S_3 | 15 | 11 |
| —*) | W1-1 | ZFG | R = 0,5 | S_3 | 1 | 0 |
| 2 | W1-1 | BF | R = 0 | S_0 | 13 | 8 |
| 3 | W1-1 | BF | R = 0 | S_{BAM} | 16 | 8 |
| 4 | W1-1 | ÜG | R = -1 | S_3 | 15 | 14 |
| 5 | W1-1 | ÜG | R = 0,5 | S_3 | 27 | 18 |
| 6 | K1 | ZFG | R = -1 | S_3 | 14 | 13 |
| —*) | K1 | ZFG | R = 0,5 | S_3 | 1 | 0 |
| 7 | K1 | BF | R = 0 | S_0 | 11 | 11 |
| 8 | K1 | BF | R = 0 | S_{BAM} | 17 | 13 |
| 9 | K1 | BF | R = 0,5 | S_{BAM} | 13 | 13 |
| 10 | K1 | ÜG | R = -1 | S_3 | 20 | 15 |
| 11 | K1 | ÜG | R = 0,5 | S_3 | 23 | 15 |
| 12 | K4 | ZFG | R = -1 | S_3 | 16 | 16 |
| 13 | K4 | ZFG | R = 0,5 | S_3 | 16 | 15 |
| 14 | K4 | BF | R = 0 | S_0 | 11 | 10 |
| 15 | K4 | BF | R = 0 | S_{BAM} | 11 | 10 |
| 16 | K4 | ÜG | R = -1 | S_3 | 16 | 12 |
| 17 | K4 | ÜG | R = 0,5 | S_3 | 19 | 18 |
| 18 | K4 | Kantenvers. | R = -1 | S_3 | 10 | 10 |

ZFG: Zeitfestigkeitsgebiet

ÜG: Übergangsbereich zur Ersatzdauerfestigkeit

BF: Betriebsfestigkeit

Kantenvers.: Siehe Text

*) Versuchsreihe nicht geprüft, da $S_0 \geq R_{p0,2}$

Tabelle 3-4: Chemische Zusammensetzung der Stabelektroden aus 1.4316 in Masse-%

| Char- gen-Nr. | Bezeichnung n. DIN ISO 5182 | Ø in mm | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
|------------------|--------------------------------|------------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|
| 93537 | E 19 9 L R 23 | 2,5 | 0,026 | 0,79 | 0,75 | 0,014 | 0,016 | 20,46 | 9,89 |
| 93537 | E 19 9 L R 23 | 3,2 | 0,026 | 0,89 | 0,65 | 0,013 | 0,016 | 20,52 | 9,97 |
| 93488 | E 19 9 LR 23 | 4,0 | 0,022 | 0,94 | 0,65 | 0,018 | 0,013 | 20,48 | 9,66 |

Bilder zu Kapitel 3

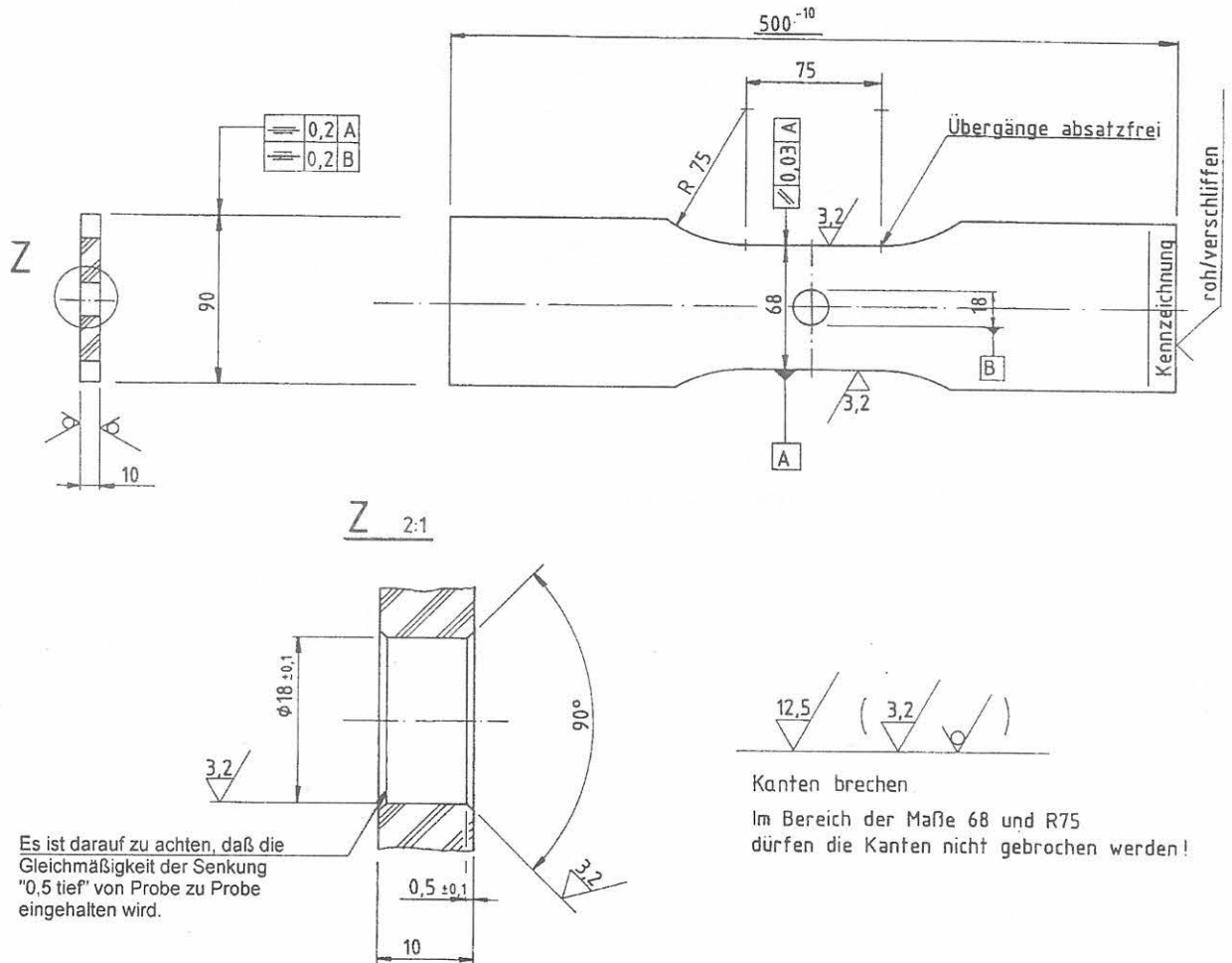


Bild 3-1: Kerbstab mit Rundloch, $K_t = 2,4$, Kerbfall W1-1

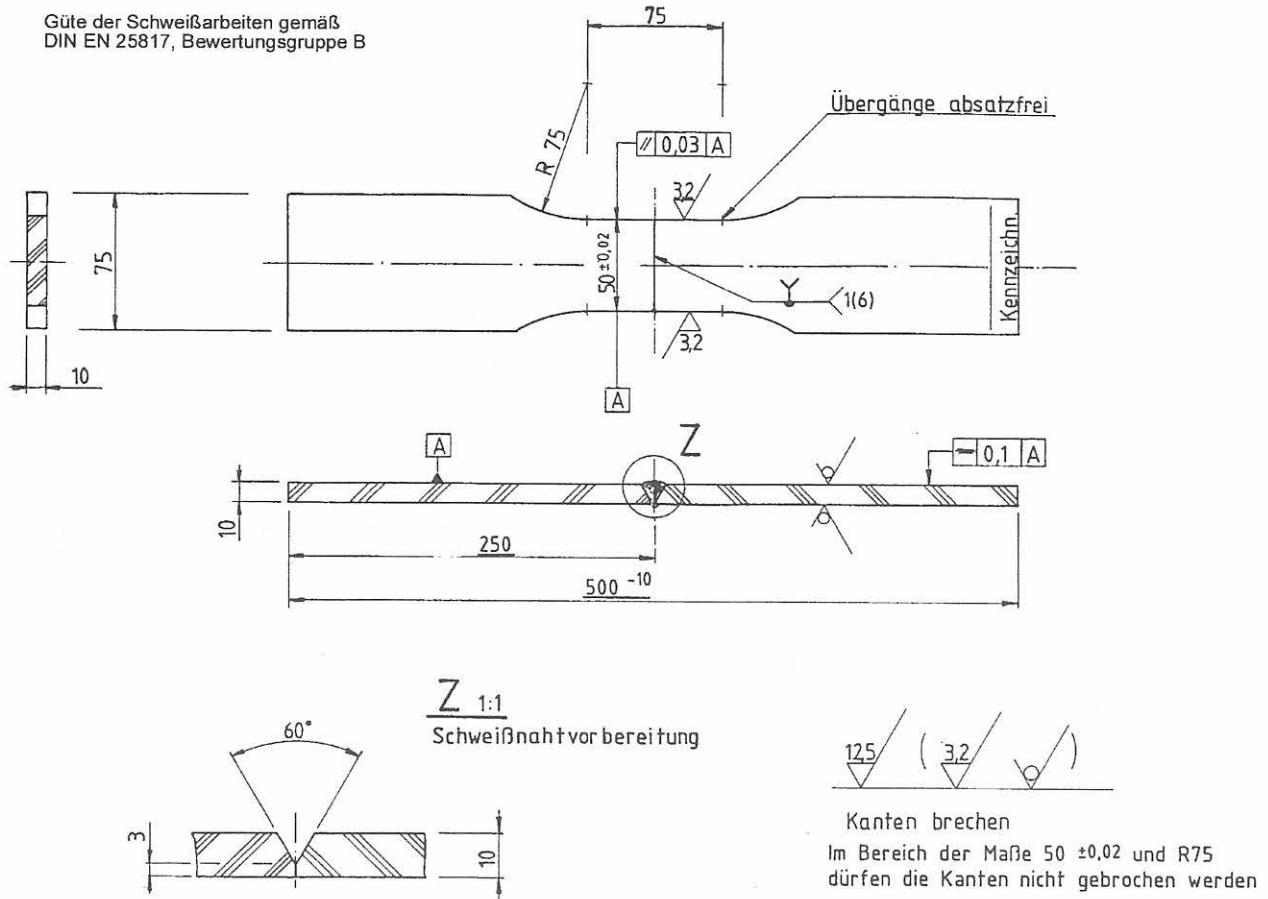


Bild 3-2: Geschweißte Probe mit Stumpfstoß, Kerbfall K1

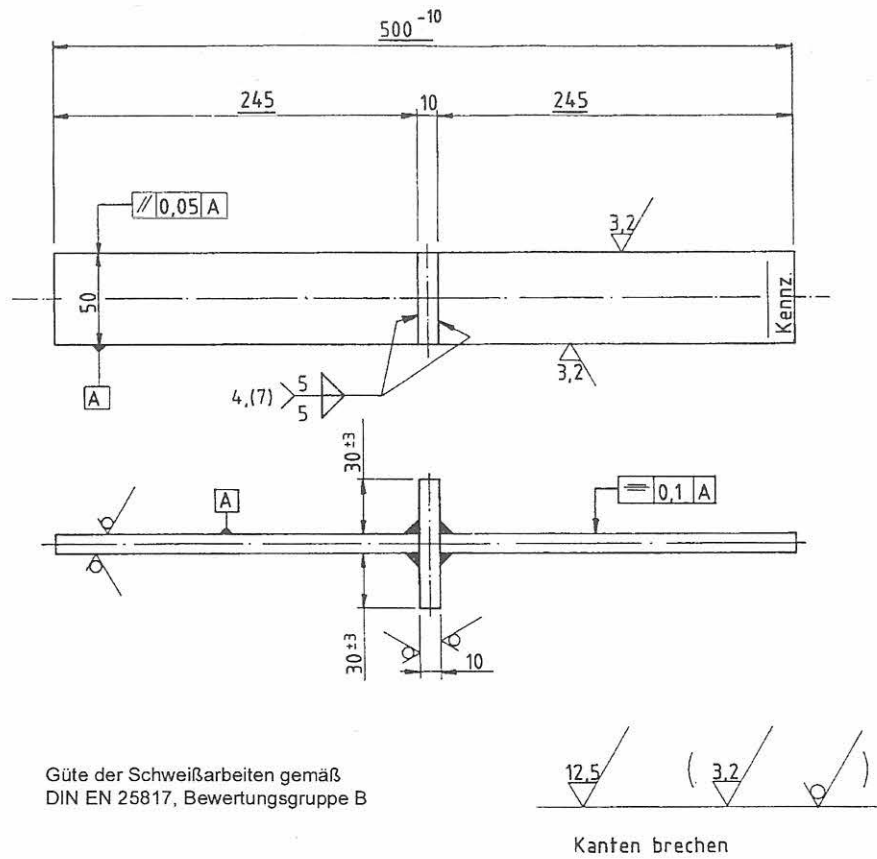


Bild 3-3: Geschweißte Probe, Kreuzstoß (Doppelkehlnaht, Normalgüte), Kerbfall K4

| Lfd. Nr. | SKIZZE SCHWEISSFLUGENFORM VERHÄSSUNG DIN EN 23692 | POSITION NACH ZEICHNUNG UND WERNSTOFFE | ANFORDERUNGEN | SCHWEISSVERFAHREN | HERSTELLER HERSTELLERBE-ZEICHNUNG DER ZUSATZWERNSTOFFE ELEKTRODRÄHT PULVER ABMESSUNG FORMERGAS / SCHUTZGAS | SCHWEISSBEDINGUNGEN | | | | WÄRMEHANDLUNGEN | ARBEITSFOLGE | ZULASSUNGSBEDINGUNGEN | BEMERKUNGEN | SCHWEISSPLAN-NR. SP1 (K1) |
|----------|---|--|---------------|-------------------|--|---------------------|--------------------|--------|--------------------|-----------------|--------------|--|--|--|
| | | | | | | WURZEL | FÜLL. U. DECKLAGEN | WURZEL | FÜLL. U. DECKLAGEN | | | | | |
| 1 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 3,2 | 60-110 | 24-28 | + | PA | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Ausrichten und Spannen der Bauteile - Heften der Bauteile H₁ bis H₂ | <ul style="list-style-type: none"> - Bleche gereinigt im Nahtbereich - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Nahte - Ausmessen der Naht | Projekt Nr. V-P02-06 Ausenteil-Tolge-Vorhaben Nr. 5328 Ausenteil II BLATT 1 VON 1 BLATT ANÄNDERUNGEN ANÄNDERUNG DATUM NAME GEPRÜFT ERSTELLT SLV Berlin Brandenburg 300.192/197 HERSTELLER DATUM 09.03.1997 (SLV) (P.197) PRÜFVERMERK: HERSTELLER DATUM PRÜFVERMERK: SACHVERSTÄNDIGER ANLAGE ANLAGENKENNZEICHEN ZUGEHÖRIGE ZEICHNUNGS-NR Schweißfolgeplan 1-9 ZUGEHÖRIGE STÜCKLISTE ZUGEHÖRIGER BAUPRÜFFOLGEPLAN Ausenteil II Nr. 1 Bauteilstempelung EE; EA; BE; CA, CB; BD; BF; EF; EC; |
| 2 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 3,2 | 60-110 | 24-28 | + | PA | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Schweißen der Wurzellage S₁ - Heftnähte angeschliffen | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |
| 3 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 3,2 | 60-110 | 24-28 | + | PA | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Schweißen der Mittel Lage S₂ | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |
| 4 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 4 | 90-150 | 25-30 | + | PA | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Wenden des Bauteils - Ausschleifen bis zur Wurzellage - Schweißen der Gegen Lage S₃ | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |
| 5 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 4 | 90-150 | 25-30 | + | PA | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Wenden des Bauteils - Schweißen der Decklage S₄ | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |

Bild 3-4: Schweißplan für den Kerbfall K1

| Lfd. Nr. | SKIZZE SCHWEISSFLUGENFORM VERHÄSSUNG DIN EN 23692 | POSITION NACH ZEICHNUNG UND WERNSTOFFE | ANFORDERUNGEN | SCHWEISSVERFAHREN | HERSTELLER HERSTELLERBE-ZEICHNUNG DER ZUSATZWERNSTOFFE ELEKTRODRÄHT PULVER ABMESSUNG FORMERGAS / SCHUTZGAS | SCHWEISSBEDINGUNGEN | | | | WÄRMEHANDLUNGEN | ARBEITSFOLGE | ZULASSUNGSBEDINGUNGEN | BEMERKUNGEN | SCHWEISSPLAN-NR. SP2 (K4) |
|----------|---|--|---------------|-------------------|--|---------------------|--------------------|--------|--------------------|-----------------|--------------|--|---|--|
| | | | | | | WURZEL | FÜLL. U. DECKLAGEN | WURZEL | FÜLL. U. DECKLAGEN | | | | | |
| 1 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 2,5 | 50-80 | 23-26 | + | PB | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Ausrichten und Spannen der Bauteile - Heften der Bauteile H₁-H₂ - Entfernen von Schlacke, Spritzern - Bürsten | <ul style="list-style-type: none"> - Ausmessen der geschweißten Rauten - Das Heften und das Schweißen erfolgte wechselseitig durch einen Schweißer - Heftstellen angeschliffen | Projekt Nr. V-P02-06 Ausenteil-Tolge-Vorhaben Nr. 5328 Ausenteil II BLATT 1 VON 1 BLATT ANÄNDERUNGEN ANÄNDERUNG DATUM NAME GEPRÜFT ERSTELLT SLV Berlin Brandenburg 300.192/197 HERSTELLER DATUM 09.01.1998 (SLV) (P.198) PRÜFVERMERK: HERSTELLER DATUM PRÜFVERMERK: SACHVERSTÄNDIGER ANLAGE ANLAGENKENNZEICHEN ZUGEHÖRIGE ZEICHNUNGS-NR Schweißfolgeplan 10-1f ZUGEHÖRIGE STÜCKLISTE ZUGEHÖRIGER BAUPRÜFFOLGEPLAN Ausenteil II Nr. 1 Bauteilstempelung: DB; DC; DA; DE; ED; DF; DE |
| 2 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 2,5 | 50-80 | 23-26 | + | PB | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Bauteil gewendet - Heften der Bauteile Rückseite H₁-H₂ - Reinigen der Heftstelle - Schweißen der Wurzellagen S₁ u. S₂ - Reinigen der Wurzellagen | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |
| 3 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 4 | 50-80/80-150 | 23-26 / 28-30 | + | PB | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Bauteil gewendet - Schweißen der Wurzellagen S₁ u. S₂ - Reinigen der Wurzellagen - Schweißen der Decklagen S₃ u. S₄ - Reinigen der Decklagen | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |
| 4 | | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 4 | 90-150 | 28-30 | + | PB | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Bauteil gewendet - Schweißen der Decklagen S₃ u. S₄ - Reinigen der Decklagen | <ul style="list-style-type: none"> - Entfernen von Schlacke und Spritzern - Bürsten der Naht - Ausmessen der Naht | |
| 5 | Reparaturen | A 45/4 X 6 C/N/TI/AR 40 | B | III | Thermanit JEW 308 L-46 Ø 4 | 90-150 | 28-30 | + | PB | 220°C | 220°C | <ul style="list-style-type: none"> - Reparaturen | <ul style="list-style-type: none"> - Reparaturen | |

Bild 3-5: Schweißplan für den Kerbfall K4

4 Qualitätssicherung der Probenfertigung

4.1 Allgemeine Hinweise

Die Proben sollten hinsichtlich Ausführung und Qualität den Anforderungen der KTA 3905 entsprechen. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denjenigen des ersten Untersuchungsvorhabens Austenit I mit den experimentell neu zu bestimmenden Schwing- und Betriebsfestigkeitswerten war die Qualitätssicherung bei der Probenfertigung besonders wichtig. Es musste sichergestellt sein, dass beim zweiten Vorhaben die Proben so genau wie möglich in Übereinstimmung mit der Spezifikation des ersten Vorhabens hergestellt werden. Gemäß KTA 3905 muss die Qualitätssicherung von einer vom Hersteller und vom Prüfinstitut unabhängigen Organisation vorgenommen werden. Hier wurde wiederum der TÜV Nord mit den einschlägigen Überwachungsarbeiten beauftragt. Die Probenfertigung wurde von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Berlin Brandenburg übernommen. Die Spezifikation für die Probenfertigung ist in [8] enthalten. Die baubegleitenden Prüfungen wurden unter Federführung des TÜV Nord vom örtlichen TÜV Berlin Brandenburg überwacht. Die wichtigsten Punkte der Spezifikation werden im folgenden auszugsweise zitiert.

- Die Schweißfertigung erfolgte nach der Spezifikation und den beim Probenhersteller SLV gesammelten Erfahrungen. Das gewählte Schweißverfahren und die gewählten Schweißbedingungen mussten beim Verarbeiter bereits durch Verfahrens- bzw. Arbeitsprüfungen reproduziert worden sein.
- Die Schweißfertigung wurde je Kerbfall als komplette Blechtafelschweißung mit nachträglicher Herausarbeitung der Proben vorgenommen. Durch Vorversuche war für die Blechtafelschweißung eine geeignete Schweißfolge derart zu ermitteln, dass der Winkelversatz minimiert wird. Eine nachträgliche Kaltverformung sollte vom Probenhersteller nicht vorgenommen werden.
- Die zulässigen Kantenversätze sind der vorgegebenen Bewertungsgruppe nach DIN EN 25817 zu entnehmen. Sie wurden durch eine geeignete Schweißfolge so gering wie möglich gehalten; der maximal zulässige Wert beträgt bei den hier verarbeiteten Blechen mit einer Dicke von 10 mm in der Bewertungsgruppe B 1,5 mm. Vor Versuchsdurchführung wurden die Kantenversätze aller Proben dokumentiert.

Die weiteren Punkte der Spezifikation enthalten im wesentlichen Vorgaben zur Eingangskontrolle der Halbzeuge und Schweißzusatzwerkstoffe, Verwechslungs-

kontrolle, Gültigkeit der Verfahrensprüfung und Schweißzeugnisse, visuelle Kontrolle der Nahtvorbereitung und der Nähte und zur zerstörungsfreien Prüfung (Röntgen-Durchstrahlung beim Stumpfstoß, Oberflächenrissprüfung mit dem Farbeindringverfahren bei den Stumpf- und Kreuzstößen).

4.2 Befunde der zerstörungsfreien Prüfung

Infolge ihres Aufbaus sind nur die Proben mit Stumpfstoß (Kerbfall K1) zur Röntgen-Durchstrahlungsprüfung geeignet. Die Befunde lauten: „Die Prüfung erfüllt die gestellten Anforderungen. Es wurden keine unzulässigen Befundstellen angezeigt“. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass die Nahtqualität der DIN EN 25817, Bewertungsgruppe B entspricht. Beim Kerbfall K1 wurden gemäß den Durchstrahlungs-Prüfprotokollen [8] im einzelnen folgende Befunde gemäß DIN EN 26520 auf 30 Filmen ermittelt:

- 16 mal runde Pore (Aa)
- 1 mal Schlauchpore (Ab)
- 8 mal Schlackeneinschluss (Ba)
- 2 mal Schlackenzeile (Bb)
- 4 mal Fremdmalleinschluss ((H)
- 12 mal Formfehler (Kerben, Durchhang usw.) (FF).

Die Gesamtbewertung der 30 Filme lautete:

- 11 mal gut (=1, vereinzelt kleine Gaseinschlüsse)
- 14 mal brauchbar (=2, Gaseinschlüsse, Schlackenzeilen, Einbrandkerben)
- 3 mal belassen (=3, wie 2 aber größer)
- 2 mal ausbessern (=4, wie 3 aber größer, Bindefehler).

So wurden 2 Bereiche repariert; Art und Umfang ist in [8] dokumentiert. Die aufgeführten Befunde und Bewertungen liegen im Rahmen üblicher Fertigungsgängen beim Schmelzschweißen. Sie deuten darauf hin, dass hier – wie im Rahmen der Zielsetzung des Vorhabens definiert – praxisnah gefertigt wurde. Im Hinblick auf mögliche Schwingbruchursachen konnte anhand dieser Befunde keine weitere Information gewonnen werden.

Alle geschweißten Proben wurden auf Oberflächenrisse mit dem Farbeindringverfahren gemäß DIN 54 152 geprüft. Der Befund der Prüfprotokolle [8] lautet ohne Ausnahme: „Die Prüfung erfüllt die gestellten Anforderungen. Es wurden keine unzulässigen Befundstellen angezeigt“. Das bedeutet, mit dem angewandten Verfahren konnten keine Oberflächenrisse nachgewiesen werden.

Auf die ermittelten Werte des jeweiligen Kanten- und Winkelversatzes wird im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Schwingversuche auf Seite 23 näher eingegangen.

5 Versuchsergebnisse

Das Versuchsprogramm wurde bereits in Tabelle 3-3 aufgeführt. Im folgenden werden die Ergebnisse der Versuche dargelegt.

5.1 Lastgeregelte Versuche bei einstufiger Beanspruchung

Die auf den Seiten 33...37 wiedergegebene Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-10 geben die Einzelergebnisse der Schwingversuche wieder. In diese Tabellen sind nur die Werte derjenigen Proben aufgenommen, die in der endgültigen Auswertung der Wöhlerfelder berücksichtigt wurden. Proben für Vorversuche sowie Suchproben für den sogenannten Anschnitt des Übergangsgebiets oder zur Festlegung der Beanspruchungshorizonte im Zeitfestigkeitsgebiet sind nicht mit aufgeführt. Die Tabellen enthalten neben der Probennummer, der Amplitude der Nennspannung S_a und der Bruchschwingspielzahl N_B weitere Angaben zur Prüfmaschine, der angewandten Probenkühlungsart und fraktografische Befunde. Letztere werden im Abschnitt 5.4 erläutert. Die Tabelle 5-4 bis Tabelle 5-10, die die Ergebnisse der geschweißten Proben wiedergeben, sind um die jeweiligen Werte für den Kanten- und Winkelversatz erweitert.

Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurden mit fünf Prüfmaschinen bei sinusförmiger Beanspruchung durchgeführt:

- P.03: Vertikale servohydraulische Prüfeinrichtung in Kraftregelung, Bauart Schenck, maximale Prüfkraft 600 kN, Prüffrequenz 3 ... 30 Hz
- P.04: Vertikale servohydraulische Prüfeinrichtung in Kraftregelung, Bauart Schenck, maximale Prüfkraft 250 kN, Prüffrequenz 3 ... 30 Hz
- P.08: Vertikale servohydraulische Prüfeinrichtung in Kraftregelung, Bauart Schenck, maximale Prüfkraft 160 kN, Prüffrequenz 3 ... 30 Hz
- P.15: Vertikal-Resonanzpulser, Bauart PVT Schenck-Federn, max. Prüfkraft 200 kN, Prüffrequenz rund 35 Hz.
- P.16: Horizontal-Resonanzpulser, Bauart PHT Schenck-Erlinger, max. Prüfkraft 200 kN, Prüffrequenz rund 38 Hz.

Servohydraulische Prüfmaschinen wurde überwiegend bei hohen Beanspruchungen im Zeitfestigkeitsgebiet eingesetzt, da hierbei durch Frequenzreduktion die Probenerwärmung gering gehalten werden konnte. Alle eingesetzten Prüfmaschinen erfüllen die Anforderungen gemäß DIN EN ISO 7500-1; Kalibrierzeugnisse liegen

vor. Dadurch ist die Vergleichbarkeit von auf verschiedenen Maschinen erzielten Ergebnissen gewährleistet.

Bei den Versuchen wurde die Probentemperatur stichprobenartig kontrolliert. In Vorversuchen wurde ermittelt, welche Probentemperatur für die einzelnen Kerbfälle und Beanspruchungen zu erwarten ist. Wenn die Werte in der Kerbnähe 35 °C überschritten, wurde eine angemessene Kühlung für die Schwingversuche festgelegt:

- ohne: Keine Zwangskühlung, die Temperatur bleibt ohne weiteres unter 35 °C
- Luft: Zwangskühlung mit einem Luftstrom (Ventilator)
- Öl: Zwangskühlung mit allseitiger Ölumspülung der Probe

Zur Problematik des Probenrichtens

Hierzu wurde im Bericht Austenit I [4] Grundsätzliches ausgeführt. Insofern soll im folgenden eine verkürzte Darstellung gegeben werden. Bei geschweißten Proben ist in der Praxis Winkel- und Kantenversatz nahezu unvermeidbar. Die Proben sind infolgedessen nicht völlig eben. Durch diese Krümmung entsteht bereits beim Einbau der Proben in die Prüfmaschine eine der Axialbeanspruchung überlagerte Biegebeanspruchung, die zu einer größeren wirksamen Randspannung führt, als sich aus dem Quotienten von Axialkraft zum Querschnitt ergibt.

Die notwendige Minimierung der überlagerten Biegespannung hatte zur Konsequenz, dass die Proben gerichtet werden mussten. Dabei wurden die notwendigen Verformungen stets im Grundwerkstoff in hinreichender Entfernung von der Schweißnaht eingebracht.

Zum Einfluss des Winkel- und Kantenversatzes

Auch zu dieser Thematik wurde im Bericht zum vorausgegangenen Vorhaben Austenit I Wesentliches ausgesagt. Die Werte des Kantenversatzes waren jedoch vergleichsweise klein, sie lagen überwiegend unter 0,5 mm. Im Rahmen einer statistischen Analyse konnte für die untersuchten Proben kein Einfluss des Winkel- bzw. Kantenversatzes auf die Lebensdauer nachgewiesen werden. Somit besteht kein Anlass zu der Vermutung, zwischen den untersuchten Variablen bestehe ein Zusammenhang.

Im vorliegenden Fall wurde bei 37 Proben des Kerbfalls K4 der zulässige Wert des Kantenversatzes gemäß DIN EN 25817, Bewertungsgruppe B, in Höhe von 1 mm überschritten. Er betrug bis zu 2,6 mm. Die Proben mit KV-Werten über 2 mm wurden verworfen. Im Hinblick auf die Verwendbarkeit der Proben mit KV-Werten im Bereich 1,0 mm ... 2,0 mm und angesichts der langen Vorlaufzeiten für eine erneute schweißtechnische Fertigung wurden Versuche zur Beurteilung der Brauchbarkeit dieser Proben durchge-

führt, s. a. Teil 4.11 in [8]. Dies geschah derart, dass 5 Proben mit minimalen Werten des Kantenversatzes (0,03...0,30 mm) und 5 Proben mit maximalen Werten (1,65...1,88 mm) auf einem Spannungshorizont $S_a = 66 \text{ N/mm}^2$ bei $R = -1$ vergleichend geprüft wurden. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie Nr. 18 sind in Tabelle 5-11 aufgeführt. Die ermittelten Lebensdauerwerte wurde statistisch auf ihre Signifikanz getestet. Dabei ergab sich, dass die Nullhypothese (Gleichheit der Mittelwerte) bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit nicht abgelehnt werden kann: d. h. es besteht kein signifikanter Unterschied; die Proben mit KV-Werten im Bereich 1,0 mm ... 2,0 mm wurden zur Prüfung eingesetzt.

5.1.1 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuche im *Zeitfestigkeitsgebiet* wurden mit der Methode der linearen Regressionsanalyse [16] ausgewertet. Infolge der Annahme einer *logarithmischen* Normalverteilung der Bruchschwingungszahlen N_b und der Konvention, die Ordinate im Wöhlerdiagramm logarithmisch zu teilen, müssen die Logarithmen der Merkmale in die Regressionsrechnung eingesetzt werden. Mit dieser Methode ergeben sich Streubänder für die gefragten Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{\bar{v}}$, die *parallel* zur $P_{\bar{v}} = 50 \%$ -Geraden sind. Mit den Größen

- $\lg(S_a)$: Unabhängige (fehlerfreie) Variable x
- $\lg(N)$: Abhängige (fehlerbehaftete) Variable y
- m: Schätzwert für die Steigung der Regressionsgeraden
- b: Schätzwert für den Achsabschnitt der Regressionsgeraden
- t_x : Einseitige Schranke der Standard-NV für $P_{\bar{v}} = x \%$
- s_N : Standardfehler der Schätzung von N

folgt die Wöhlerliniengleichung:

$$\lg(N) = m \cdot \lg(S_a) + b + t_x \cdot s_N$$

bzw. (1)

$$\lg(S_a) = \frac{\lg(N) - b - t_x \cdot s_N}{m}$$

Von besonderer Bedeutung zur Abschätzung der Streubänder ist hierbei s_N , der Standardfehler der Regressionsrechnung, der sich nach Gleichung (5-2) aus der mittleren quadratischen Abweichung der Einzelwerte von der Regressionsgeraden bestimmt. s_N^2 wird auch als *Restvarianz* bezeichnet; sie ist der durch Regression nicht erklärte Streuungsanteil.

$$s_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{ \lg(N_i) - b - m \cdot \lg(S_{a,i}) \}^2}{n - 2}} \quad (2)$$

Die Versuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit wurden nach dem Treppenstufenverfahren ausgewertet. Dieses Verfahren wurde im Jahre 1948 von DIXON und MOOD publiziert. Im vorliegenden Bericht wurden die Ergebnisse nach der von HÜCK [11] angegebenen Modifikation unter der Annahme logarithmisch-normalverteilter Spannungen ausgewertet. Die Methode nach Hück hat gegenüber derjenigen nach DIXON und MOOD den Vorteil, dass die Streuungen bei den üblichen Stichprobenumfängen von 10 ... 50 Proben nachgewiesenermaßen nicht unterschätzt werden und dass sowohl Brüche als auch Durchläufer ausgewertet werden. Hier wurden durchschnittlich 15 Proben je Übergangsbereich geprüft. Das in [11] dargelegte Verfahren ist im Bericht Austenit I [4] ausführlich anhand eines Beispiels beschrieben; der am Detail interessierte Leser sei darauf verwiesen. Bild 5-1 bis Bild 5-6 zeigen in grafischer Darstellung die ausgewerteten Treppenstufen. Das Versagenskriterium war für das Zeitfestigkeits- und das Übergangsbereich der Anriss der Probe, der über eine Wegüberwachung des Servozylinders detektiert wurde.

5.1.2 Ergebnisse

In Bild 5-7 bis Bild 5-12 sind die Wöhlerfelder der Einstufenversuche wiedergegeben. In diese Bilder sind Linien für die Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{\bar{v}} = 10, 50, 90$ und $99,9\%$ eingetragen. Sie enthalten darüber hinaus die Linien für die von der BAM vorgeschlagenen zulässigen Spannungen, deren Ermittlung im Abschnitt 6 detailliert dargelegt ist. Die Lebensdauerlinien, die aus Versuchen unter Random-Beanspruchung ermittelt wurden, werden im Abschnitt 5.2.2 erläutert.

Die Ergebnisse der Versuche im Zeitfestigkeitsgebiet sind - mit Ausnahme der Werte für die Kerbfälle W1-1 und K1 bei $R = 0,5$ (grau unterlegt), für die keine Versuchsergebnisse vorliegen, da $S_0 > R_{p0,2}$ - in Tabelle 5-12 dargestellt. Aus dieser Tabelle sind folgende charakteristische Werte zu ersehen:

- Nummer der Versuchsserie, s. a. Tabelle 3-3; „Austenit I“ bedeutet, dass diese Ergebnisse aus dem vorausgegangenen Vorhaben [4] übernommen wurden
- R: Beanspruchungsverhältnis S_1/S_0
- S: Kollektiv, hier $S_3 =$ Einstufenversuch
- k: Neigung der Wöhlerlinie im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem
- $T_{s,90}$: Streuspanne der Spannungen. Infolge der hier angewandten Auswertung (Gesamtregression über alle Versuchswerte) ergeben sich parallele Streubänder, die für das gesamte Zeitfestigkeitsgebiet gültig sind.

- $T_{N,80}$: Streuspanne der Bruchschwingspielzahlen. Infolge der hier angewandten Auswertung (Gesamtregression über alle Versuchswerte) ergeben sich parallele Streubänder, die für das gesamte Zeitfestigkeitsgebiet gültig sind.
- $S_{a,50}$: Ertragbare Nennspannungsamplitude für $P_0 = 50\%$ für $N = 10^5$ und 10^6 .

In [Tabelle 5-13](#) sind die Gesamtergebnisse der Versuche im Übergangsbereich aufgeführt. $S_{A,z}$ ist die ertragbare Spannungsamplitude der Ersatzdauerfestigkeit für $P_0 = z\%$. Im [Bild 5-13](#) sind diese Ergebnisse grafisch dargestellt.

Im [Bild 5-13](#) repräsentiert jede Säule die Dauerfestigkeitsschätzwerte für den angegebenen Kerbfall und das angegebene Spannungsverhältnis R . Den höchsten Wert kennzeichnet $S_{A,50}$, den niedrigsten $S_{A,99,9}$; dazwischen liegt jeweils $S_{A,90}$. Aus Gründen der besseren Übersicht wurde der technisch weniger bedeutsame Wert $S_{A,10}$ nicht in das Bild eingetragen.

Es ist zu erkennen, dass für den Kerbfall W1-1 (Lochstab) im Bereich der Schwellbeanspruchung $R = 0$ bzw. $R = 0,5$ eine vergleichsweise geringe Mittelspannungsabhängigkeit besteht. Ähnliches gilt für den Kerbfall K4: Hier ist praktisch keine Mittelspannungsabhängigkeit vorhanden. Wie aus [Bild 5-13](#) deutlich zu ersehen ist, liegt dagegen für den Kerbfall K1 eine ausgeprägte Mittelspannungsabhängigkeit vor. Im Abschnitt 5.3 wird auf diesen Aspekt näher eingegangen.

5.2 Betriebsfestigkeitsversuche

Die auf den Seiten 39...41 wiedergegebene [Tabelle 5-14](#) bis [Tabelle 5-20](#) geben die Einzelergebnisse der Betriebsfestigkeitsversuche wieder. In diese Tabellen sind nur die Werte derjenigen Proben aufgenommen, die in der endgültigen Auswertung der Lebensdauerlinien berücksichtigt wurden. Proben für Vorversuche sind nicht mit aufgeführt. Die Tabellen enthalten neben der Probennummer, der Amplitude des Scheitelwerts der Nennspannung \hat{S}_a und der Bruchschwingspielzahl N_B weitere Angaben zur Prüfmaschine, der angewandten Probenkühlungsart und fraktografische Befunde. Letztere werden im Abschnitt 5.4 erläutert. Die [Tabelle 5-16](#) bis [Tabelle 5-20](#), die die Ergebnisse der geschweißten Proben wiedergeben, sind um die jeweiligen Werte für den Kanten- und Winkelversatz erweitert. Als Prüfmaschinen kamen hier systembedingt nur die servohydraulischen Einrichtungen P.03, P.04 und P.08 (s. Seite 23) zum Einsatz.

5.2.1 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuche zur Ermittlung der Lebensdauerlinien wurden in servohydraulischen Prüfeinrichtungen mit Rechnersteuerung durchgeführt. Dabei erzeugte der Rechner (MAS-Link-System, Vertrieb Fa. SWIFT, Reinheim) den Sollwert für den Regelkanal der Prüfmaschine. Da ein Regler nur für einen Arbeitspunkt ohne nennenswerte

Regelabweichungen einzustellen ist, müssen bei Random-Signalen übergeordnete Korrekturen vorgenommen werden. Der Rechner überwachte somit gleichzeitig den Istwert und erzeugte aus den Soll-Ist-Abweichungen eine Korrekturmatrix, mit der der mathematisch exakte Sollwert derart verändert wurde, dass der gewünschte Last-Zeit-Verlauf dem Prüfling aufgeprägt wurde. Das Versagenskriterium war der Anriss der Probe, der über eine Wegüberwachung des Servozylinders detektiert wurde.

Die Betriebsfestigkeitsversuche wurden, wie bereits im Abschnitt 2.2, Seite 9 erwähnt, mit den Kollektiven S_0 und S_{BAM} durchgeführt. Die Mittelspannung wurde konstant gehalten. Die Kollektive sind in [Bild 5-14](#) dargestellt. In dieses Bild ist zur Information auch das (stark getreppte) Kollektiv aus DIN 15018 eingezeichnet. Darüber hinaus enthält es alle statistischen Angaben zu seiner Synthese. Der Teilfolgeumfang H_0 beträgt 10^6 . Das Kollektiv S_0 – und somit auch dasjenige nach DIN 15018 – gleicht einer klassischen Gaußverteilung. Das Kollektiv S_{BAM} ist „härter“, da es vergleichsweise mehr höhere Amplituden aufweist. Die Treppung erfolgte im vorliegenden Fall in 64 Stufen, dies liegt im eingesetzten Rechnersystem begründet.

Aus [Tabelle 5-21](#) sind die Summenhäufigkeiten sowie die Anzahl der Schwingspiele in den einzelnen Stufen zu ersehen. Anhand dieser Werte ist eine vollständige Rekonstruktion – mit Ausnahme der Reihenfolge – der hier verwendeten Lastkollektive möglich. Es sei darauf hingewiesen, dass die Tabelle nur die positiven Umkehrpunkte der Lastfolge enthält. Infolge der Symmetrie zur Mittellast ist die gegebene Beschreibung jedoch hinreichend. Dadurch erscheinen in der Tabelle nur 32 Klassen, obwohl mit in 64 Klassen getreppten Kollektiven gearbeitet wurde.

In [Bild 5-15](#) sind schematisch Ausschnitte aus den Beanspruchungs-Zeit-Verläufen der Kollektive wiedergegeben. Es wird verdeutlicht, dass die Mittelspannung zeitlich unveränderlich ist. Darüber hinaus ist veranschaulicht, dass das Kollektiv S_{BAM} eine höhere Schädigung verursacht als S_0 .

Die Auswertung erfolgte analog zu derjenigen für das Zeitfestigkeitsgebiet. Diese ist auf Seite 24 detailliert beschrieben. Kennwert für die Beanspruchung ist der Scheitelwert der Nennspannungsamplitude \hat{S}_a des jeweilig aufgebrauchten Kollektivs.

5.2.2 Ergebnisse

In [Bild 5-16](#) bis [Bild 5-18](#) sind die Lebensdauerlinien als Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsversuche wiedergegeben. In [Bild 5-10](#), ist die zur Ermittlung des Mittelspannungseinflusses bei Random-Beanspruchung bestimmte Lebensdauerlinie (Versuchsserie 9: Lebensdauerlinie S_{BAM} für Kerbfall K1, $\bar{R} = 0,5$) dargestellt. In diese Bilder sind Linien für die Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_0 = 10, 50, 90$ und $99,9\%$ eingetragen. Zur Orientierung sind die korrespondierenden Wöhlerlinien

für $P_0 = 50\%$, Kollektiv S_3 , dargestellt. Die Wöhlerlinien sind der Bezug für die Schadensrechnung, die im Abschnitt 5.2.3 erläutert ist.

Aus [Tabelle 5-22](#) sind die Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsversuche zu ersehen. Die aufgeführten Parameter wurden bereits auf Seite 24 erläutert.

5.2.3 Schadenssummen

Zur Lebensdauerberechnung von Bauteilen existieren zwei verschiedene Konzepte: Zum einen wird auf der Grundlage äußerer Lasten (Nennspannungskonzept), zum anderen auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen (Örtliches Konzept) dimensioniert. Die in DIN 15018 angegebene Vorgehensweise basiert auf dem Nennspannungskonzept, das die Kenntnis von Bauteil-Wöhlerlinien voraussetzt. Deswegen wird im folgenden dieses Konzept erläutert.

Als Eingangsgrößen des Nennspannungskonzepts dienen die Belastung und die Schwingfestigkeit eines Bauteils. Die Belastung wird mit einem Kollektiv in Größe und Häufigkeit eindeutig beschrieben. Die Reihenfolge der auftretenden Belastungsamplituden bleibt dabei unberücksichtigt. Die Schwingfestigkeit eines Bauteils ergibt sich durch die ertragbaren Lastamplituden gemäß seiner Bauteilwöhlerlinie, siehe [Bild 5-19](#).

Die durch die Amplituden der Betriebsfestigkeitsversuche hervorgerufenen Schädigungsanteile D_i werden über eine lineare Schadensakkumulationsrechnung nach PALMGREN-MINER [2], [3] zu einer Gesamtschädigung D aufsummiert, bis bei Erreichen des Wertes $D = 1$ das Versagen des Bauteils auftritt. Die Schädigungsanteile ergeben sich aus dem Quotienten der Stufenhäufigkeit der auf dem Lasthorizont i auftretenden Beanspruchungsamplituden n_i des Belastungskollektivs und den ertragbaren Beanspruchungsamplituden N_i der Bauteilwöhlerlinie. Die Reihenfolge der Teilschädigungen hat keinen Einfluss auf die Gesamtschädigung. Weiterhin tragen Belastungsamplituden unterhalb der Dauerfestigkeit nicht zur Schädigung bei, da die Anzahl der ertragbaren Belastungsamplituden N_i gegen unendlich geht.

Das Absinken der Dauerfestigkeit mit zunehmender Lebensdauer wird durch verschiedene „Modifikationen“ der Miner-Regel [17], [18] berücksichtigt, [Bild 5-20](#). Trotzdem sind beträchtliche Abweichungen von der theoretischen Schadenssumme $D = 1$ möglich. Um die tatsächlichen Schadenssummen hinreichend realitätsnah angeben zu können, müssen die aufgebrachten Belastungskollektive, die Wöhler- und der Lebensdauerlinien bekannt sein. Diese Voraussetzungen sind in der vorliegenden Arbeit erfüllt. Als Schädigungshypothese wurde hier die Miner-Modifikation nach Haibach [17] (Nr. 2 in [Bild 5-20](#)) angewandt. Diese hat gegenüber anderen Modifikationen den Vorteil, dass der Dauerfestigkeitsabfall mit fortschreitender Schädigung infolge der Überschreitung der Dauerfestigkeit bei höheren Amplituden des Kollektivs berücksichtigt wird. Dies wird durch eine fiktive Verlängerung der Wöhlerlinie

unterhalb des Abknickpunkts mit einer Neigung $k' = 2k - 1$ erreicht.

In [Tabelle 5-23](#) sind die nach der gemäß Haibach modifizierten Miner-Schadensakkumulationshypothese berechneten tatsächlichen Schadenssummen zusammengestellt. Das Beanspruchungsverhältnis ist $\bar{R} = 0$, d. h. Zugschwellbeanspruchung. Die Neigung der Lebensdauerlinien \bar{k} ist angegeben. Für jeden geprüften Beanspruchungshorizont \hat{S}_a wurde die Schadenssumme D auf der Basis der $P_0 = 50\%$ Wöhler- bzw. Lebensdauerlinien berechnet.

Diese experimentell ermittelten Werte sind für Schadensrechnungen angegeben, die strenggenommen nur unter der Voraussetzung gelten, dass die Beanspruchungskollektive den hier zugrundeliegenden Amplitudenverteilungen gleichen. Aus den Werten in [Tabelle 5-23](#) ist deutlich zu ersehen, dass die berechneten Werte für D zwischen 0,000 und 1,491 liegen. Der Wert „0,000“ ist hier durch Rundung entstanden, die rechnerische Schadenssumme ist nämlich kleiner 0,001. Hinsichtlich der Annahme $D = 1$ für Bauteilversagen bedeuten Werte $D < 1$, dass eine Rechnung zu konservativen Lebensdauerabschätzungen führen würde; umgekehrt wären Lebensdauerabschätzungen für $D > 1$ stets unsicher.

Es wird empfohlen, bei Berechnungen für jeden Kerbfall und jedes Kollektiv stets den kleinsten Wert von D als zulässig zugrunde zu legen, damit das Ergebnis auf der sicheren Seite liegt. Dies bedeutet beispielsweise für den Kerbfall W1-1 und das Kollektiv S_{BAM} : $D = 0,068$. Die zulässigen Schadenssummen sind in [Tabelle 5-23](#) durch Fettdruck hervorgehoben.

5.3 Mittelspannungsempfindlichkeit

Die Schwingfestigkeitsversuche wurden im Hinblick auf die Ermittlung der Mittelspannungsabhängigkeit bei den Spannungsverhältnissen $R = 0$ (Austenit I, [4]) und $R = 0,5$ bzw. $R = -1$ durchgeführt. Infolgedessen ist die Angabe der experimentell gesicherten Mittelspannungsabhängigkeit möglich. Zum Kennzeichnen der Mittelspannungsabhängigkeit dient der Wert M , der wie folgt berechnet wird [17]:

$$M = \frac{S_{A,50}(R = -1)}{S_{A,50}(R = 0)} - 1 \quad (3)$$

Im vorliegenden Fall ergeben sich die nachstehenden Werte für M :

| | |
|-------|------------|
| W1-1: | $M = 0,40$ |
| K1: | $M = 0,32$ |
| K4: | $M = 0,38$ |

Werte von $M = 0,33$ gelten als üblich. Diese Ergebnisse kennzeichnen lediglich die Steigung der Dauerfestigkeitslinien im Haigh-Diagramm im Bereich $-1 < R < 0$.

Das hier zutreffende Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh ist im [Bild 5-21](#) wiedergegeben.

Im Haigh-Diagramm ist der ertragbare Spannungsaus-schlag $S_{A,50}$ als Funktion der Zug-Mittelspannung S_m aufgetragen. Im vorliegenden Fall liegen diesem Dauerfestigkeitsschaubild 9 Versuchsreihen im Übergangsgebiet zur Ersatzdauerfestigkeit zugrunde. Die Linien für konstante R-Werte gehen vom Ursprung aus und sind eingezeichnet; die Linie für $R = -1$ fällt mit der Ordinate zusammen, da dort die Ortskurve für $S_m = 0$ liegt.

Im Schrifttum [17] gibt es einige Ansätze, um den Zusammenhang zwischen S_m und $S_{A,50}$ zu beschreiben. Hierzu gehört die *Goodman-Gerade*, die im einfachsten Fall eine Verbindung der Punkte $\{0 | S_{A,50}(R=-1)\}$ mit $\{S_m=R_m | 0\}$ darstellt. Da im vorliegenden Fall $R_m = 603 \text{ N/mm}^2$ beträgt, ist unschwer zu erkennen, dass die Goodman-Gerade hier keine sinnvolle Näherung zur Beschreibung des Mittelspannungseinflusses darstellt. Die *Gerber-Parabel* bietet eine weitere Möglichkeit, den geschilderten Zusammenhang zu beschreiben. Sie ist wie folgt definiert:

$$S_A = S_A(R = -1) \cdot \left[1 - \left(\frac{S_m}{R_{p0,2}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Aus [Bild 5-21](#) ist zu ersehen, dass die Gerber-Parabel den Einfluss der Mittelspannung auf die ertragbare Spannungsamplitude für den Kerbfall K1 in guter Näherung abbildet. Für die Kerbfälle W1-1 und K4 wurde in der Literatur keine passende Näherung gefunden. Auf den abgeflachten Kurvenverlauf für $R < 0$ wird in [17] eingegangen. Der Grund für den vergleichsweise flacheren Verlauf der Kurven im Bereich $0 < R < 0,5$ für diese Kerbfälle sind vermutlich Anteile plastischer Verformungen und Spannungsumlagerungen im Kerbgrund. An anderer Stelle [19] wird berichtet, dass Bauteile mit hohen Zugeigenstressungen und gleichsinnig überlagerten Lastspannungen im gesamten Mittelspannungsbereich niedrige, weitgehend gleichhohe Dauerfestigkeitswerte aufweisen. Das bedeutet im vorliegenden Fall, dass für die Kerbfälle W1-1 und K4 die ertragbare Dauerfestigkeit unter der Einwirkung von Zugmittelspannungen nicht mehr von deren Höhe abhängt.

Zur Untersuchung des Mittelspannungseinflusses unter Betriebsbeanspruchungen wurde die Versuchsserie 9 ([Tabelle 5-1](#), [Bild 5-10](#)) mit erhöhter Mittelspannung geplant und ausgeführt. Darin wurden Proben des Kerbfalls K1 bei einem Beanspruchungsverhältnis $\bar{R} = 0,5$ mit dem Kollektiv S_{BAM} geprüft. Mit dieser Serie wurde die Serie 8 ([Tabelle 5-17](#), [Bild 5-17](#)) verglichen, die unter ansonsten gleichen Bedingungen, jedoch mit $\bar{R} = 0$ geprüft wurde. Da bei diesen Serien keine Ersatz-Dauerfestigkeit angegeben werden kann, wurden die $\hat{S}_{a,50}$ -Werte auf $N = 10^7$ extrapoliert berechnet:

Serie 8: bei $\bar{R} = 0$ ist $\hat{S}_{a,50}(N=10^7) = 98,5 \text{ N/mm}^2$

Serie 9: bei $\bar{R} = 0,5$ ist $\hat{S}_{a,50}(N=10^7) = 81,0 \text{ N/mm}^2$

Mit diesen Angaben lässt sich formal (da $0 < R < 0,5$) eine Mittelspannungsabhängigkeit in Anlehnung an Gleichung (3) berechnen; sie beträgt

$$M = 0,22 \text{ für Kollektiv } S_{BAM}$$

Wird analog hierzu die Mittelspannungsabhängigkeit im gleichen R-Intervall für die Einstufenversuche im Übergangsgebiet (Serien Austenit I und 11, $S_{A,50}(R=0) = 120,4 \text{ N/mm}^2$ und $S_{A,50}(R=0,5) = 68,4 \text{ N/mm}^2$) berechnet, ergibt sich

$$M = 0,76 \text{ für Kollektiv } S_3 \text{ (einstufig).}$$

Diese Betrachtung zeigt, dass im vorliegenden Fall der Mittelspannungseinfluß bei ein- und mehrstufiger Beanspruchung nicht vergleichbar ist. Hier kann demnach aus den Angaben des Haigh-Diagramms nicht auf die Mittelspannungsabhängigkeit unter Betriebsbeanspruchungen geschlossen werden.

5.4 Fraktografie

In [Tabelle 5-1](#) bis [Tabelle 5-11](#) sowie in [Tabelle 5-14](#) bis [Tabelle 5-20](#) sind die fraktografischen Befunde aller durch die Schwingbeanspruchung gebrochenen *Flachproben* aufgeführt. Die dort enthaltenen Abkürzungen werden im folgenden erläutert. Dabei werden zum einen die örtliche Lage der Rissentstehung (*Bruchausgangsbereich*) und zum anderen zusätzliche rissinitiierende Merkmale (*Bruchursache*) beschrieben. Auf die Wiedergabe typischer Abbildungen der Bruchflächen wird hier verzichtet; der daran interessierte Leser sei auf die Bilder 5.2-1 bis 5.2-11 im Bericht „Austenit I“ [4] verwiesen.

Bruchausgangsbereich

Der Bruchausgangsbereich kennzeichnet den Bereich oder auch das probenformtypische Merkmal (oder die Merkmale), von dem - meist aufgrund von Kerbeinflüssen - der Ermüdungsbruch seinen Ausgang nahm, z. B.:

- bei Stumpfnah-Proben die Randkerbe (siehe RK), d. h. die geometrische Kerbe zwischen der Schweißraupe und dem Grundwerkstoff
- bei Kehlnahproben die konstruktiv bedingte Kerbe, der Wurzelspalt (siehe WS)

Die nachstehend alphabetisch zusammengestellten Merkmale sind häufig auch bereits ursächlich für die Rissinitiierung:

- F Bruchausgangsstelle lag bei Lochproben auf der Mantellinie der angesenkten FASE der Bohrungen (meist in Verbindung mit einer Bearbeitungsriefe).
- GW Bruchausgangsstelle lag bei Schweißproben im GRUNDWERKSTOFF und nicht im Bereich der Schweißung.

| | | | |
|----|--|----|---|
| K | innere KANTE; Bruchausgangsstelle lag bei Lochproben am Schnittpunkt der Bohrungsmantellinie mit der Mantellinie der angesenkten Fase. | NS | NAHTSCHUPPUNGSRILLEN; die Riffelung der Nahtschuppung war gelegentlich gegenüber den benachbarten Bereichen der Schweißraupen etwas stärker ausgeprägt, wodurch u. U. die Kerbwirkung am Randkerb (siehe auch RK) leicht verstärkt ist, ohne dass es sich hierbei schon um einen Einbrandkerb oder eigentliche Querkerben handelte. |
| KA | ÄUSSERE KANTE; Bruchausgangsstelle lag bei Lochproben am Schnittpunkt der Mantellinie der angesenkten Fase mit der Blechaußenseite. | NÜ | NAHTÜBERHÖHUNG; es wird ein weicher Übergang verlangt. In Bewertungsgruppe B muss $h < 2$ mm sein. |
| M | Bruchausgangsstelle lag auf der MANTELLINIE der Bohrung bei Lochproben. | RB | RIEFE auf der Mantelfläche der BOHRUNG, nur Lochprobe |
| RK | RANDKERBE; die geometrische Oberflächenkerbe zwischen Schweißraupe und Grundwerkstoff, bzw. der Übergang Schweißnaht/Grundwerkstoff (gemäß DIN 1910 Teil 11 Schmelzlinie oder Bindezone) an der Probenoberfläche - hier kein Schweißfehler, daher nicht zu verwechseln mit einer nicht erfassten Fugenlängskante (in DIN 8524 Teil 1 unter Ordnungsnummer 2.5018 ebenfalls Randkerbe genannt). | RF | RIEFE auf der angesenkten FASE der Bohrungen bei den Lochproben. |
| WO | WALZOBERFLÄCHE; die mechanisch nicht nachbearbeitete Blechoberfläche. | SE | SCHLACKENEINSCHLUSS, dieser bruchauslösende Fehler mit einem Schlackeneinschluss trat nur einmal bei K4 auf. |
| WS | WURZELSPALT; die konstruktiv bedingte Kerbe an der Kehlnahtwurzel bei Kreuzstoßproben. Bei den freigelegten Brüchen wirkte ohne Ausnahme der Wurzelspalt rissinitiierend. Zusätzliche Schweißimperfectionen auf der Decklage waren ohne Einfluss. Hinzu kommt noch der vergleichsweise kleinere tragende Nahtquerschnitt ($a = 5...6$ mm). | SR | SCHLEIFRIEFEN; in einigen Fällen führten relativ grobe Schleifriefen auf der Blechoberfläche, die meist der Nahtvorbereitung gedient hatten, zu Anrissen. |
| | | SS | SCHWEISS-SPRITZER; waren in einigen Fällen, jedoch nicht stets bruchauslösend. |
| | | WB | WALZHAUTBESCHÄDIGUNGEN; Beschädigungen (Kratzer, Riefen, Abdrücke), die offensichtlich <i>nach</i> dem Beizen auf der Blechoberfläche entstanden waren. Die Proben wurden vor dem Schweißen gebeizt, um Verunreinigungen der Schmelze durch Oxide zu verhindern. |
| | | WN | WALZHAUTNARBE; Unebenheiten (Narben, Poren, oder auch Beschädigungen), die offensichtlich <i>vor</i> dem Beizen auf der Blechoberfläche entstanden waren. |

Bruchursache

In vielen - jedoch nicht allen - Fällen waren zusätzliche, die Kerbwirkung verstärkende Merkmale (z. B. Bearbeitungs- oder Schweißimperfectionen bzw. -fehler) überlagert oder vorhanden, die dann gemäß folgender alphabetisch geordneter Liste als ursächlich für die Rissinitiierung in eine zweite Tabellenspalte für die fraktographische Auswertung aufgenommen wurden:

| | |
|----|--|
| EK | EINBRANDKERB; dieses Merkmal trat relativ selten auf, da die Schweißungen nahezu frei von Einbrandkerben waren, die sich dann, wenn vorhanden, ausnahmslos im zulässigen Bereich der vorgeschriebenen Schweißgüte befanden. EK wurden ab ca. 0,1 mm Tiefe als bruchauslösend bewertet. |
| KM | KANTENVERRUNDUNGSMÄNGEL; Mängel in der Kantenverrundung, z. B. nicht ganz auspolierte Feilriefen oder nicht ideal runder Radius (u. U. mit Grat) - besonders schwierig herzustellen war diese Verrundung im Bereich des Randkerbs der Schweißnähte (siehe RK). |
| NA | NAHTANSATZSTELLE; erhöhte Kerbwirkung der dort etwas höher und breiter ausgeformten Rau- |

Alle beobachteten Bruchausgangsstellen der Lochproben, Kerbfall W1-1 lagen im Bereich der Bohrung (K, KA, M). Bei einigen Proben waren Bearbeitungsimperfectionen, nämlich 17 mal Riefen auf der Mantelfläche der Bohrung (RB) und 7 mal Riefen auf der angesenkten Fase (RF) bruchauslösend. Es lagen teils eine, teils mehrere Initiierungsstellen sowohl nur auf einer als auch auf beiden Seiten vor. Die Bruchausgangsstellen waren etwa gleichmäßig auf den Bereich der Mantelfläche der Bohrung (K, M) und auf den Bereich der Randsenkung (F) verteilt.

Güte der Schweißarbeiten

Die Güte der Schweißarbeiten ist - soweit wie nach der Probenfertigung möglich - in der Dokumentation zur Schwingprobenfertigung [8] dargelegt; im Abschnitt 4.2 wurde näher darauf eingegangen. Schwingbruchauslösende Fehler oder Imperfektionen sind jedoch häufig nicht im voraus zu ermitteln [20]. Die fraktografische Analyse der Bruchflächen bot hierzu weiterreichende Möglichkeiten, auf die im folgenden eingegangen wird.

Die Sicherung der Güte von Schmelzschweißverbindungen aus Stahl regelt DIN EN 25817. Die Kennzeichnung der Fehler wird in DIN 8524, Teil 1 aufgelistet. Die Vorgabe für die Bewertung der Güte war B (hoch) für alle Schweißproben.

Einbrandkerben traten nur 4 mal auf und waren dann stets sehr kurz (nur wenige Millimeter lang und nicht durchgehend) und nie tief. Sie erhöhen aber immer die Kerbwirkung, was an diesen Stellen zu Schwingungsbrüchen führen kann. Die größte festgestellte, einen Schwingungsbruch auslösende Einbrandkerbe, lag unterhalb des zulässigen Wertes von 0,5 mm.

Poren wurden auf den Bruchflächen – entgegen den ZfP-Befunden gemäß Abschnitt 4.2 – nicht gefunden. Schlackeneinschlüsse wurden 7 mal festgestellt; bruchauslösend waren sie aber nur einmal (Serie 13, Probe DE 01). Es lagen aber noch weitere Befunde vor, *ohne* dass davon Schwingungsbrüche ausgingen. Erfahrungsgemäß haben derartige Fehler meist keine scharfkantige Gestalt und dadurch - zumal bei duktilen Werkstoffen - eine eher mäßige Kerbwirkung.

Beim Kerbfall K1 waren 10 mal Nahtansatzstellen (NA), 5 mal Nahtschuppungsrillen (NS) und 6 mal Schweißspritzer bruchauslösend. In 5 Fällen waren Walzhautbeschädigungen ursächlich für den Bruch. Bruchausgangsstelle war in nahezu allen Fällen die Randkerbe (RK).

Dem Kanten- und Winkelversatz kommt im vorliegenden Fall besondere Bedeutung zu. Diese Geometrieabweichungen bewirkten bei der axialen Prüfkrafteinleitung in der Prüfmaschine unerwünschte einspannungs- und beanspruchungsbedingte überlagerte Biegespannungen. Auf Seite 23 wurde ausführlich über die Wirkung dieser Größen auf die Lebensdauer berichtet. Dort wurde auch dargelegt, dass ein Zusammenhang zwischen diesen Daten und den ertragbaren Schwingungsspielzahlen statistisch nicht nachweisbar ist.

5.5 Metallografie

Im Rahmen der metallografischen Untersuchungen wurden Gefügeaufnahmen im Lichtmikroskop zur Charakterisierung des Grundgefüges des untersuchten Werkstoffs angefertigt. Die Vergrößerung der Schlibbilder wurde zu 500:1 gewählt. Es wurde sowohl ein Längs- als auch ein Querschliff hergestellt, beide Schlibbe wurden jeweils aus derselben Probe durch Anschleifen von zwei orthogonalen Ebenen präpariert. Die

Ätzung erfolgte mit GE-Beize. Die Aufnahmen der Schlibbe sind in Bild 5-22 und in Bild 5-23 dargestellt.

Die Schlibbilder zeigen das für austenitische Stähle typische Gefüge. Im Längsschliffen (Bild 5-22) wird die sich in Walzrichtung erstreckende Ausbildung der Karbide deutlich. Insgesamt liegt in beiden Schliffen ein gleichermaßen unverformtes feinkörniges, weitestgehend rekristallisiertes Austenit-Gefüge vor.

Auf eine ähnlich umfangreiche Dokumentation des Schweißnahtgefüges, wie sie im Bericht zum vorausgegangenen Vorhaben Austenit I [4] gegeben wurde, wird hier verzichtet, da keine grundlegend neuen Erkenntnisse zu erwarten sind. Die Nahtqualität ist durch die ZfP, dokumentiert in [8], hinreichend beschrieben, die Fraktografie erbrachte keine Befunde, anhand derer eine Dokumentation des Nahtgefüges notwendig erschiene. Der Vollständigkeit halber werden die Makroaufnahmen des Schweißnahtgefüges im Bild 5-24 und im Bild 5-25 wiedergegeben.

Aus Bild 5-24 ist deutlich der Nahtaufbau der Stumpfnaht gemäß Schweißplan (Bild 3-4, S. 19) zu ersehen: Nach dem Schweißen der Wurzellage wurde die nach oben weisende Mittellage aufgebracht. Danach wurde die Tafel gewendet, die Naht wurde bis zur Wurzellage ausgeschliffen und dann wurde die Gegenlage geschweißt. Zuletzt – nach erneutem wenden der Blechtafel – wurde die Decklage aufgebracht.

In Bild 5-25 ist der Nahtaufbau des Kreuzstoßes mit Doppelkehlnaht wiedergegeben. Die Schweißfolge ist im Schweißplan (Bild 3-5, S. 19) angegeben. Der zweilagige Nahtaufbau wird aus diesem Bild deutlich.

5.6 Härtemessungen

Zur Kontrolle des Schweißnahtgefüges wurden Härtemessungen exemplarisch an einem Querschliff des Kerbfalls K1 durchgeführt. Die Härteeindrücke wurden in 1,5 mm Abstand von der Walzhautoberfläche gemessen. An dem Schliff wurden zwei Härtereihen gemessen: einmal die Decklage und einmal die Gegenlage. Es zeigte sich die für Schweißverbindungen austenitischer Stähle typische Form: Die Härte steigt vom Grundwerkstoff (173 HV10) in Richtung auf das Schweißgut geringfügig auf 183 HV10 an; bei ferritischen Stählen häufig auftretende Härtemaxima im Bereich der Wärmeeinflusszone (als Folge von Aufhärtungseffekten) sind hier gefügebedingt nicht vorhanden. Der Härtegradient ist anhand der höheren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs gegenüber dem Grundwerkstoff („Overmatching“) zwanglos zu erklären.

Weitere Härtemessungen zur Kontrolle der Festigkeitsstreuungen des Grundwerkstoffs wurden an allen Proben des Kerbfalls W1-1 mit drei Härteeindrücken pro Probe durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass einige Tafeln, aus denen die Proben gefertigt wurden, signifikant höhere Härtewerte aufwiesen:

- 217 HV 30 ± 6,1 (Mittelwert ±Standardabweichung) in den „festeren“ Blechen
- 165 HV 30 ± 4,2 (Mittelwert ±Standardabweichung) in den „weicheren“ Blechen

Da eine Umwertung der Härte in Festigkeitswerte zulässig ist, repräsentieren die Unterschiede zumindest näherungsweise auch die relativen Festigkeitsstreuungen. Dieses Ergebnis war für ein gemäß Werkszeugnis einchargiertes Material eines Edeltstahles nicht zu erwarten. Um die Ursache zu ergründen, wurde weitere chemische Analysen durchgeführt, die sich im Ergebnis jedoch nicht unterscheiden: Die chemischen „Fingerabdrücke“ von je zwei weichen und je zwei harten Proben waren im Rahmen der Messunsicherheit des Analyse-Verfahrens identisch. Weiteres Material für Zugversuche stand leider nicht mehr zur Verfügung.

Aufgrund dieses Befundes wurde entschieden, die Proben des Kerbfalls W1-1 aus dem härteren Bereich der Lieferung zu verwerfen und lediglich die restlichen aus dem weicheren Bereich zu prüfen. Dies geschah im Hinblick auf eine möglichst konservative Abschätzung der zu erarbeitenden regelwerksfähigen Schwingfestigkeitswerte.

Für das Ermüdungsverhalten der geschweißten Proben (Kerbfälle K1 und K4) ist die Festigkeit des Grundwerkstoffes von untergeordneter Bedeutung; dies wurde im Vorhaben Austenit I [4] für diese Klasse der austenitischen Stähle nachgewiesen, die geometrischen und ggf. metallurgischen Imperfektionen dominieren das Ermüdungsgeschehen. Insofern wurden hier Proben sowohl aus dem weicheren als auch aus den härteren Bereichen gefertigt und geprüft.

5.7 Ergänzende Untersuchungen

Die im folgenden erörterten Ergebnisse der Rissfortschritts- und LCF-Versuche sind im Hinblick auf das Ziel der Versuche als Ergänzungen zu betrachten, da sie (z. Z. noch) keinen unmittelbaren Eingang in die KTA 3905 finden. Andererseits sind die aus diesen Versuchen gewonnenen Kennwerte zur vollständigen Charakterisierung des Werkstoffes notwendig: Für bruchmechanisch fundierte Analysen der Restnutzungsdauer schwingbeanspruchter Bauteile mit Anriss ist die Kenntnis des Rissfortschrittsverhalten erforderlich. Für Lebensdauerabschätzungen gekerbter Bauteile nach dem örtlichen Konzept sind die Parameter der Dehnungswöhlerlinie als Ergebnis des LCF-Versuchs unverzichtbar.

5.7.1 Rissfortschrittsversuche

Wenn im Bauteil ein Riss entsteht bzw. vorliegt, wird das weitere Verhalten dieses Bauteils unter Schwingbeanspruchung durch den Rissfortschritt bestimmt. Am Ende dieser Phase steht dann der Gewaltbruch des Restquerschnitts bzw. eine unzulässig hohe Verformung des Restquerschnitts. Detaillierte Angaben zum mechanisch theoretischen Hintergrund des Rissfortschrittkon-

zepts sind z. B. in [21] und – speziell zur Abschätzung der Lebensdauer – in [17], Abschnitt 3.4 zu finden.

Nach PARIS [22] lässt sich der Zusammenhang zwischen der die Beanspruchung kennzeichnenden Schwingweite der Spannungsintensität ΔK und der Rissfortschrittsrate da/dN wie folgt beschreiben:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (5)$$

Dabei ist C der Paris-Koeffizient mit der Dimension mm/Schwingspiel und m der dimensionslose Paris-Exponent. Durch Integration von (5) kann bei bekannter äußerer Beanspruchung die entstehende Risslänge nach N Schwingspielen berechnet werden. Neben den Paris-Parametern für den Rissfortschritt ist auch der Schwellwert („threshold“) der Schwingbreite der Spannungsintensität ΔK_{th} kennzeichnend: Beanspruchungen, die kleiner als dieser Wert sind, lassen einen vorhandenen Riss nicht weiter wachsen. ΔK_{th} kann als „schwingbruchmechanische Dauerfestigkeit“ aufgefasst werden.

Im vorliegenden Fall wurden 9 SENB3-Biegeproben geprüft. Form und Abmaße der Proben sind aus [Bild 5-26](#) zu ersehen. Die Rissstarterkerbe ist 0,2 mm breit und 1 mm tief; sie wurde durch Erodieren gefertigt.

Die Versuchsdurchführung erfolgte gemäß ASTM E 647-95a, Grundlage für die Auswertung bildete der BS 6835 (1988). Die rechnergestützten, kraftgeregelten Versuche mit sinusförmigem Kraft-Zeit-Verlauf wurden in einem elektromagnetischen HF-Resonanz-Pulsator (Nennkraft ±20 kN, Hersteller: Russenberger Prüfmaschinen AG (RUMUL)) bei Raumtemperatur in Laboratmosphäre durchgeführt. Die Prüffrequenz betrug rund 100 s⁻¹.

Zur Messung des Risswachstums wurde das Gleichstrom-Potentialsondenverfahren angewandt. Die Umrechnung der Potentialwerte in Risslängen erfolgte mit Hilfe einer Kalibrierkurve. Die Anriss erzeugung wurde in die eigentliche Versuchssequenz integriert.

Bei der Ermittlung der Rissausbreitungsgeschwindigkeit da/dN wurde mit 7 Proben die Belastung als Einstufenversuch unter Biegeschwellbeanspruchung mit R = 0,1 realisiert.

Die Schwellwert- (ΔK_{th} -) Bestimmung wurde mit 5 Proben bei konstantem Spannungsverhältnis R mit kontinuierlich abnehmender Schwingbreite der Spannungsintensität durchgeführt. Schwellwertversuche wurden dann abgebrochen, wenn die vorgegebene Mindest-rissfortschrittsgeschwindigkeit $da/dN < 10^{-7}$ mm/Schwingspiel unterschritten wurde oder wenn nach einer vorgegebenen Anzahl von 10⁷ Schwingspielen kein Rissfortschritt mehr erkennbar war. Aus [Tabelle 5-24](#) sind die Ergebnisse der einzelnen Versuche zu ersehen. Der in der letzten Zeile dieser Tabelle angegebene Gesamtmittelwert ist nicht durch Mittlung der Einzelwerte, sondern durch eine Regressionsrechnung für alle Einzelpunkte ermittelt worden. Die

derart bestimmten Kennwerte liegen im Rahmen der aus einer Vielzahl vergleichbarer Versuche vorliegenden Ergebnisse für ferritische Stähle.

In [Bild 5-27](#) sind die Ergebnisse der Schwellwert- und der Rissfortschrittsversuche grafisch dargestellt. In der Legende sind die Versuche bzw. Versuchssequenzen, die für die Schwellwertbestimmung und für die Rissfortschrittsdaten durchgeführt wurden, getrennt markiert. Ebenso sind die Regressionsgeraden („RegLin“) für beide Versuchsarten separat eingetragen. Es wird ersichtlich, dass die im Rahmen der Streuungen nach [Tabelle 5-24](#) relativ weit außen liegende Probe BB 2/21 sich in der Grafik nicht besonders hervorhebt, sondern im allgemeinen Streuband liegt.

5.7.2 LCF-Versuche

Die dehnungsgeregelten Versuche, auch häufig LCF-Versuche (low cycle fatigue) genannt, wurden an glatten, ungekerbten Grundwerkstoffproben bei einem Beanspruchungsverhältnis $R_e = -1$ in Laborluft bei Raumtemperatur (22 °C) durchgeführt. Der Zeitverlauf des Sollwerts war dreiecksförmig mit konstanter Dehngeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$. Das Versagenskriterium war ein Abfall der gemessenen Kraftamplitude von 10%, bezogen auf den stabilisierten Bereich.

Die Dehnungswöhlerlinie wird nach COFFIN [23], MANSON [24] und MORROW [25] gemäß folgender Gleichung (6) beschrieben:

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot N^b + \epsilon_f' \cdot N^c \quad (6)$$

mit

| | |
|--------------------|--|
| $\epsilon_{a,t}$: | Gesamtdehnungsamplitude |
| $\epsilon_{a,e}$: | elastische Dehnungsamplitude |
| $\epsilon_{a,p}$: | plastische Dehnungsamplitude |
| σ_f' : | zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient |
| E: | E-Modul |
| N: | Anrisschwingenspielzahl |
| b: | zyklischer Schwingfestigkeitsexponent |
| ϵ_f' : | zyklischer Duktilitätskoeffizient |
| c: | zyklischer Duktilitätsexponent |

Im Versuch werden kontinuierlich Hystereseschleifen aufgezeichnet. Aus der Wechselverformungskurve S_a über N wird die Anrisschwingenspielzahl gemäß dem oben bereits angegebenen Versagenskriterium (Abfall der gemessenen Kraftamplitude von 10%, bezogen auf den stabilisierten Bereich) bestimmt. Der elastische Anteil der Dehnung wird durch $\epsilon_{a,e} = S_a/E$ ermittelt; der plastische Anteil ergibt sich daraus zu $\epsilon_{a,p} = \epsilon_{a,t} - \epsilon_{a,e}$. Nach Separierung der Dehnungsanteile kann dann per linearer Regression im doppelt-logarithmisch geteilten Koordinatensystem eine Ausgleichsrechnung zur Ermittlung der zyklischen Exponenten und Koeffizienten vorgenommen werden.

Aus den Werten bei der halben Anrisschwingenspielzahl wird die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach folgender Gleichung (7) bestimmt:

$$\epsilon_{a,t} = \frac{S_a}{E} + \left(\frac{S_a}{K'} \right)^{1/n'} \quad (7)$$

mit

| | |
|-----|-------------------------------------|
| K': | Zyklischer Verfestigungskoeffizient |
| n': | Zyklischer Verfestigungsexponent |

Im Hinblick auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve ist besonders der Vergleich mit der zügigen Spannungs-Dehnungs-Kurve von Interesse. Daraus lässt sich erkennen, ob ein Werkstoff bei überelastischer Beanspruchung zyklisch ver- oder entfestigt.

Im vorliegenden Fall wurden 10 Proben zur Darstellung der Dehnungswöhlerlinie und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve ausgewertet. Form und Abmessungen dieser Rundproben sind aus [Bild 5-28](#) zu ersehen. Die Versuche wurden in einer servohydraulischen Prüfeinrichtung mit 25 kN Kraftkapazität durchgeführt. Die Versuchsergebnisse der einzelnen Proben sind in [Tabelle 5-25](#) zusammengestellt. [Tabelle 5-26](#) zeigt die berechneten zyklischen Koeffizienten und Exponenten der Dehnungswöhlerlinie und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Anhand dieser Parameter ist der hier untersuchte Werkstoff 1.4541 hinsichtlich seines zyklischen Verhaltens bei überelastischer Beanspruchung eindeutig charakterisiert.

Aus [Bild 5-29](#) ist die Dehnungswöhlerlinie zu ersehen. [Bild 5-30](#) zeigt den Vergleich der zyklischen mit der zügigen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Es ist deutlich ersichtlich, dass der Werkstoff 1.4541 bei zyklischer Beanspruchung erheblich verfestigt: Das Verhältnis der zügigen zur zyklischen 0,2%-Dehngrenze beträgt rund 1 : 2. Dieses Ergebnis kann dahingehend interpretiert werden, dass der Werkstoff 1.4541 bei einer überelastischen zyklischen Beanspruchung – die z. B. im Kerbgrund unter makroskopisch elastischer Beanspruchung auftreten kann – mit einer ausgeprägten Festigkeitssteigerung reagiert, d. h. den Widerstand gegen die Verformung deutlich erhöht.

Tabellen zu Kapitel 5

Tabelle 5-1: Serie 1: Kerbfall W1-1, Zeitfestigkeitsgebiet, R = -1, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüfma- schine | Küh- lung | Bruch- ausgang | Bruchur- sache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------|
| BC 2/05 | 230 | 11.800 | P.04 | Luft | M, KA, K | | |
| BC 2/03 | 230 | 16.000 | P.04 | Luft | M, M | RB, RB | |
| BA 2/34 | 210 | 47.300 | P.04 | Luft | KA, KA, WO | | |
| BB 2/27 | 205 | 110.600 | P.04 | Luft | KA, KA | | |
| BA 2/37 | 200 | 24.900 | P.04 | Luft | F, K | RF, - | |
| BB 2/28 | 200 | 92.200 | P.04 | Luft | KA | | |
| BB 2/26 | 200 | 170.400 | P.04 | Luft | F, WO, F | RF, -, RF | |
| BA 2/33 | 200 | 179.900 | P.04 | Luft | M, KA | RB, - | |
| BB 2/30 | 195 | 113.100 | P.04 | Luft | WO, KA | WB, - | |
| BC 2/07 | 190 | 116.200 | P.04 | Luft | WO | | |
| BA 2/36 | 190 | 231.200 | P.04 | Luft | F, K, KA | RF, -, - | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-2: Serie 4: Kerbfall W1-1, Übergangsbereich, R = -1, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüfma- schine | Küh- lung | Bruch- ausgang | Bruchur- sache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------|
| BC 2/04 | 165 | 582.158 | P.15 | Luft | WO, KA | | |
| BB 2/29 | 165 | 836.325 | P.15 | Luft | WO | WB | |
| BB 2/23 | 165 | 733.035 | P.15 | Luft | KA | | |
| BA 2/40 | 160 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |
| CF 2/11 | 160 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |
| CF 2/16 | 160 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |
| BB 2/22 | 160 | 662.057 | P.15 | Luft | KA, KA | | |
| BC 2/10 | 160 | 665.454 | P.15 | Luft | KA | | |
| BC 2/08 | 160 | 1.419.600 | P.15 | Luft | F | RF | |
| BA 2/38 | 155 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |
| CF 2/13 | 155 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |
| CF 2/20 | 155 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |
| BA 2/35 | 155 | 573.505 | P.15 | Luft | F | RF | |
| BB 2/24 | 150 | Durchläufer | P.15 | Luft | | | |

P.15 = 200 kN Schenck-Vertikalpulser PVT

Tabelle 5-3: Serie 5: Kerbfall W1-1, Übergangsgebiet, $R = 0,5$, Kollektiv S_3

| Proben- Nummer | S_a in N/mm ² | N_b | Prüfma- schine | Küh- lung | Bruch- ausgang | Bruchursa- che | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------|-------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| AE 2/53 | 120 | 168.700 | P.03 | ohne | K, M, M, M | | mehrfache Anrisse |
| CE 2/98 | 120 | 371.000 | P.03 | ohne | M, M | | |
| CE 2/102 | 115 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| CE 2/103 | 115 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| AE 2/55 | 115 | 190.600 | P.03 | ohne | M | | |
| BA 2/31 | 115 | 196.000 | P.03 | ohne | M, M, M | RB, RB, RB | |
| CE 2/105 | 115 | 537.300 | P.03 | ohne | K | | |
| CD 2/84 | 115 | 564.400 | P.03 | ohne | M | | |
| CD 2/92 | 115 | 8.677.400 | P.03 | ohne | M | | |
| CD 2/81 | 110 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| CD 2/87 | 110 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| CE 2/100 | 110 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| CE 2/106 | 110 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| CE 2/99 | 110 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| AD 2/61 | 110 | 191.100 | P.03 | ohne | M, M, M, M | | mehrfache Anrisse |
| BB 2/25 | 110 | 357.300 | P.03 | ohne | F, K, M | RF, -, RB | |
| CD 2/89 | 105 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |
| CE 2/96 | 105 | Durchläufer | P.03 | ohne | | | |

P.03 = 600 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-4: Serie 6: Kerbfall K1, Zeitfestigkeitsgebiet, $R = -1$, Kollektiv S_3

| Proben- Nummer | S_a in N/mm ² | N_b | Prüf- ma- schine | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------|-----------|------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|-----------|
| BF 03 | 235 | 36.200 | P.04 | Luft | 0,06 | 0,65 | RK | | |
| EA 04 | 208 | 274.500 | P.04 | Luft | 0,20 | 0,47 | RK | | |
| BF 01 | 208 | 90.200 | P.04 | Luft | 0,34 | 0,57 | RK | | |
| BF 08 | 200 | 166.900 | P.04 | Luft | 0,07 | 0,78 | RK | | |
| BF 09 | 194 | 194.200 | P.04 | Luft | 0,05 | 0,95 | RK, RK | | |
| CB 12 | 194 | 307.400 | P.04 | Luft | 0,14 | 0,38 | RK, RK, RK | - , - , WB | |
| EA 06 | 187 | 615.200 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,15 | RK | | |
| EA 01 | 180 | 600.000 | P.04 | Luft | 0,09 | 0,85 | RK | SS | |
| CB 11 | 180 | 1.532.500 | P.04 | Luft | 0,07 | 0,46 | RK, RK | | |
| BF 07 | 175 | 301.600 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,59 | RK | NA | |
| BF 06 | 175 | 358.900 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,76 | RK | | |
| EA 10 | 170 | 180.300 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,86 | RK | NA | |
| BF 11 | 170 | 524.100 | P.04 | Luft | 0,11 | 0,58 | RK, RK, RK | | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-5: Serie 10: Kerbfall K1, Übergangsgebiet, R = -1, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchausgang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|--------------|--------------|-----------|
| BF 02 | 165 | 450.263 | P.16 | Öl | 0,12 | 0,44 | RK | | |
| BF 04 | 165 | 596.626 | P.16 | Öl | 0,08 | 0,70 | RK | | |
| BF 12 | 165 | 1.113.735 | P.16 | Öl | 0,03 | 0,65 | RK | | |
| EA 05 | 165 | 1.247.118 | P.16 | Öl | 0,00 | 0,52 | RK, RK | NA, - | |
| BF 05 | 165 | 1.483.798 | P.16 | Öl | 0,08 | 0,84 | RK | | |
| EA 02 | 160 | Durchläufer | P.16 | Öl | 0,00 | 0,91 | | | |
| EA 03 | 160 | Durchläufer | P.16 | Öl | 0,04 | 0,68 | | | |
| EA 09 | 160 | Durchläufer | P.16 | Öl | 0,00 | 0,70 | | | |
| EA 12 | 160 | Durchläufer | P.16 | Öl | 0,00 | 0,52 | | | |
| CB 03 | 160 | 868.935 | P.16 | Öl | 0,15 | 0,47 | RK | | |
| CB 09 | 155 | 1.317.076 | P.16 | Öl | 0,06 | 0,63 | RK | NA | |
| BE 05 | 155 | 2.283.310 | P.16 | Öl | 0,02 | 0,70 | RK, RK | NS, NS | |
| EC 11 | 155 | 2.397.082 | P.16 | Öl | 0,00 | 0,23 | RK | | |
| BE 12 | 150 | Durchläufer | P.16 | Öl | 0,16 | 0,14 | | | |
| EA 07 | 150 | Durchläufer | P.16 | Öl | 0,00 | 0,47 | | | |

P.16 = 200 kN Schenck-Horizontalpulser PHT

Tabelle 5-6: Serie 11: Kerbfall K1, Übergangsgebiet, R = 0,5, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchausgang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|--------------|--------------|-----------|
| EC 05 | 77,5 | 607.600 | P.03 | ohne | 0,07 | 0,45 | RK | NA | |
| CB 02 | 72,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,42 | 0,56 | | | |
| EF 02 | 72,5 | 1.612.800 | P.03 | ohne | 0,27 | 0,73 | RK, RK | EK, - | |
| CA 02 | 72,5 | 2.709.500 | P.03 | ohne | 0,48 | 0,44 | RK | EK | |
| CA 08 | 72,5 | 5.896.500 | P.03 | ohne | 0,06 | 0,64 | RK | NA | |
| EE 08 | 67,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,19 | 0,54 | | | |
| CA 12 | 67,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,11 | 0,41 | | | |
| CB 08 | 67,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,05 | 0,58 | | | |
| EF 08 | 67,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,35 | 1,04 | | | |
| EC 03 | 67,5 | 1.364.100 | P.03 | ohne | 0,07 | 0,70 | RK | NÜ | |
| EE 05 | 67,5 | 3.423.800 | P.03 | ohne | 0,04 | 0,79 | RK | EK | |
| BE 07 | 67,5 | 4.469.500 | P.03 | ohne | 0,03 | 0,70 | RK | EK | |
| CA 10 | 62,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,14 | 0,32 | | | |
| EF 06 | 62,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,28 | 1,28 | | | |
| EF 09 | 62,5 | Durchläufer | P.03 | ohne | 0,29 | 1,03 | | | |

P.03 = 600 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-7: Serie 12: Kerbfall K4, Zeitfestigkeitsgebiet, R = -1, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|-----------|
| DA 01 | 120 | 87.062 | P.15 | ohne | 0,63 | 0,20 | WS, WS | NS | |
| DD 13 | 120 | 106.888 | P.15 | ohne | 1,41 | 0,19 | RK | | |
| DE 04 | 110 | 146.403 | P.15 | ohne | 1,46 | 0,24 | WS, WS, WS | | |
| ED 15 | 110 | 175.675 | P.15 | ohne | 1,42 | 1,28 | WS, WS | | |
| ED 03 | 100 | 270.798 | P.15 | ohne | 1,41 | 1,08 | WS, WS | | |
| DA 06 | 100 | 276.494 | P.15 | ohne | 0,89 | 0,18 | WS, WS | | |
| ED 04 | 90 | 271.254 | P.15 | ohne | 1,49 | 1,27 | WS, WS | | |
| DB 07 | 90 | 390.664 | P.15 | ohne | 0,42 | 0,70 | WS, WS | | |
| DD 06 | 80 | 461.080 | P.15 | ohne | 1,16 | 0,49 | WS, WS | | |
| DA 07 | 80 | 510.386 | P.15 | ohne | 0,87 | 0,06 | WS, WS | | |
| DA 09 | 70 | 858.185 | P.15 | ohne | 0,80 | 0,06 | WS, WS | | |
| DE 10 | 70 | 1.068.502 | P.15 | ohne | 1,20 | 0,54 | WS, WS, WS | | |
| DF 05 | 60 | 878.025 | P.15 | ohne | 1,15 | 0,30 | WS, WS | | |
| DA 15 | 60 | 878.404 | P.15 | ohne | 0,41 | 0,20 | WS, WS | | |
| DB 15 | 50 | 1.146.641 | P.15 | ohne | 0,08 | 0,79 | WS, WS | | |
| ED 10 | 50 | 1.459.911 | P.15 | ohne | 1,17 | 0,75 | WS, WS | | |

P.15 = 200 kN Schenck-Vertikalpulser PVT

Tabelle 5-8: Serie 13: Kerbfall K4, Zeitfestigkeitsgebiet, R = 0,5, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|--------------------------|
| DB 12 | 70 | 56.800 | P.04 | Luft | 0,43 | 0,70 | WS, WS | SE, - | Schlackenein- schluss |
| DE 01 | 70 | 58.300 | P.04 | Luft | 1,36 | 0,57 | WS, WS | | |
| DD 12 | 60 | 123.700 | P.04 | Luft | 1,36 | 0,23 | WS, WS | | |
| DB 10 | 60 | 140.500 | P.04 | Luft | 0,37 | 0,59 | WS, WS | | |
| DE 14 | 55 | 172.100 | P.04 | Luft | 1,17 | 0,31 | WS, WS | | |
| ED 01 | 55 | 188.200 | P.04 | Luft | 1,16 | 1,62 | WS, WS | | |
| DB 01 | 50 | 209.900 | P.04 | Luft | 0,12 | 0,07 | WS, WS | | |
| DB 03 | 50 | 272.200 | P.04 | Luft | 0,34 | 0,82 | WS, WS | | |
| DD 17 | 45 | 375.400 | P.04 | Luft | 1,32 | 0,33 | WS, WS | | |
| ED 14 | 45 | 504.400 | P.04 | Luft | 0,97 | 0,70 | WS, WS | | |
| DF 06 | 40 | 733.500 | P.04 | Luft | 1,34 | 0,29 | WS, WS | | |
| DC 07 | 40 | 945.200 | P.04 | Luft | 0,32 | 0,09 | WS | | |
| DF 15 | 35 | 912.700 | P.04 | Luft | 1,34 | 0,07 | WS, WS | | |
| DB 16 | 35 | 1.216.100 | P.04 | Luft | 0,10 | 0,89 | WS, WS, WS | | |
| DA 13 | 30 | 2.768.400 | P.04 | Luft | 0,42 | 0,00 | WS, WS | | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-9: Serie 16: Kerbfall K4, Übergangsgebiet, R = -1, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|---------------------------|
| DC 17 | 40 | 4.801.991 | P.15 | ohne | 0,37 | 0,31 | WS, WS | | |
| DC 06 | 40 | 8.206.561 | P.15 | ohne | 0,38 | 0,83 | WS | | |
| DB 13 | 36 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,50 | 0,72 | | | |
| DC 04 | 36 | 5.436.293 | P.15 | ohne | 0,28 | 0,70 | WS, WS, WS | | |
| DA 14 | 36 | 5.883.440 | P.15 | ohne | 0,49 | 0,07 | WS, WS | | Schlackenein- schlüsse |
| DA 02 | 36 | 8.611.728 | P.15 | ohne | 0,76 | 0,02 | WS, WS, WS | | |
| DC 11 | 32 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,55 | 0,30 | | | |
| DC 12 | 32 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,72 | 0,03 | | | |
| DA 04 | 32 | 7.082.501 | P.15 | ohne | 0,81 | 0,06 | WS, WS, WS | | |
| DB 08 | 32 | 8.760.606 | P.15 | ohne | 0,30 | 0,71 | WS, WS | | |
| DC 05 | 28 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,39 | 1,00 | | | |
| DC 08 | 28 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,60 | 0,38 | | | |

P.15 = 200 kN Schenck-Vertikalpulser PVT

Tabelle 5-10: Serie 17: Kerbfall K4, Übergangsgebiet, R = 0,5, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|-----------|
| DA 17 | 28 | 4.646.576 | P.15 | ohne | 0,97 | 0,18 | WS, WS | | |
| DC 10 | 26 | 6.641.242 | P.15 | ohne | 0,70 | 0,47 | WS, WS | | |
| DC 03 | 26 | 9.209.115 | P.15 | ohne | 0,16 | 0,29 | WS, WS | | |
| DB 11 | 24 | 4.372.587 | P.15 | ohne | 0,32 | 0,59 | WS, WS, WS | | |
| DE 16 | 24 | 5.269.031 | P.15 | ohne | 0,53 | 0,16 | WS, WS | | |
| DC 09 | 24 | 7.351.825 | P.15 | ohne | 0,74 | 0,48 | WS, WS | | |
| DB 14 | 24 | 8.188.071 | P.15 | ohne | 0,27 | 0,70 | WS, WS, WS | | |
| DB 04 | 24 | 8.956.279 | P.15 | ohne | 0,66 | 1,17 | WS, WS | | |
| DF 03 | 24 | 9.008.708 | P.15 | ohne | 0,64 | 0,27 | WS, WS | | |
| DA 03 | 24 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,78 | 0,20 | | | |
| DB 09 | 24 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,43 | 0,72 | | | |
| DE 15 | 24 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,90 | 0,09 | | | |
| DA 10 | 22 | Durchläufer | P.15 | ohne | 1,00 | 0,11 | | | |
| DC 18 | 22 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,29 | 0,01 | | | |
| ED 12 | 22 | Durchläufer | P.15 | ohne | 1,21 | 0,85 | | | |
| DA 16 | 20 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,79 | 0,41 | | | |
| DB 05 | 20 | Durchläufer | P.15 | ohne | 0,38 | 0,91 | | | |
| DD 15 | 20 | Durchläufer | P.15 | ohne | 1,11 | 0,03 | | | |

P.15 = 200 kN Schenck-Vertikalpulser PVT

Tabelle 5-11: Serie 18: Kerbfall K4, Kantenversatzuntersuchung, R = -1, Kollektiv S₃

| Proben- Nummer | S _a in N/mm ² | N _B | Prüf- ma- sche- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|--|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|-----------|
| DC 15 | 65,86 | 765.805 | P.15 | ohne | 0,03 | 0,28 | WS, WS | | |
| DB 06 | 65,86 | 1.365.922 | P.15 | ohne | 0,14 | 0,87 | WS, WS | | |
| DC 01 | 65,86 | 838.312 | P.15 | ohne | 0,20 | 0,68 | WS, WS | | |
| DA 12 | 65,86 | 1.474.562 | P.15 | ohne | 0,29 | 0,22 | WS, WS | | |
| DB 02 | 65,86 | 496.336 | P.15 | ohne | 0,30 | 0,90 | WS, WS | | |
| DF 08 | 65,86 | 571.061 | P.15 | ohne | 1,65 | 0,77 | WS, WS | | |
| DF 10 | 65,86 | 542.687 | P.15 | ohne | 1,76 | 0,08 | WS, WS | | |
| DE 06 | 65,86 | 806.907 | P.15 | ohne | 1,78 | 0,25 | WS, WS | | |
| DF 07 | 65,86 | 815.431 | P.15 | ohne | 1,82 | 0,77 | WS, WS | | |
| DE 13 | 65,86 | 496.700 | P.15 | ohne | 1,88 | 0,51 | WS, WS | | |

P.15 = 200 kN Schenck-Vertikalpulser PVT

Tabelle 5-12: Zeitfestigkeitskennwerte

| Kerbfall | Versuchs- serie | Beanspru- chungs- verhältnis | Kollektiv | k | T _{S,80} | T _{N,80} | S _{a,50} (10 ⁵) in N/mm ² | S _{a,50} (10 ⁶) in N/mm ² |
|----------------------|--------------------|------------------------------------|----------------|--------|-------------------|-------------------|--|--|
| W1-1 (Loch- stab) | 1 | R = -1 | S ₃ | -13,00 | 1 : 1,12 | 1 : 4,52 | 198,7 | 166,5 |
| | - | R = 0,5 | S ₃ | | | | | |
| | Austenit I | R = 0 | S ₃ | -6,96 | 1 : 1,09 | 1 : 1,81 | 151,3 | - |
| K1 (Stumpf- stoß) | 6 | R = -1 | S ₃ | -6,99 | 1 : 1,29 | 1 : 5,90 | 219,2 | 157,7 |
| | - | R = 0,5 | S ₃ | | | | | |
| | Austenit I | R = 0 | S ₃ | -12,98 | 1 : 1,14 | 1 : 5,18 | 158,7 | 132,9 |
| K4 (Kreuz- stoß) | 12 | R = -1 | S ₃ | -2,89 | 1 : 1,27 | 1 : 1,98 | 132,6 | 59,8 |
| | 13 | R = 0,5 | S ₃ | -4,38 | 1 : 1,10 | 1 : 1,52 | 62,6 | 37,0 |
| | Austenit I | R = 0 | S ₃ | -3,91 | 1 : 1,40 | 1 : 3,75 | 68,7 | 38,1 |

Tabelle 5-13: Schwingfestigkeitskennwerte im Übergangsbereich

| Kerbfall | Versuchsserie | Beanspruchungs- verhältnis | Kollektiv | S _{A,10} in N/mm ² | S _{A,50} in N/mm ² | S _{A,90} in N/mm ² | T _{S,80} | S _{A,99,9} in N/mm ² |
|----------------------|---------------|-------------------------------|----------------|---|---|---|-------------------|---|
| W1-1 (Loch- stab) | 4 | R = -1 | S ₃ | 166,5 | 158,8 | 151,5 | 1 : 1,10 | 141,7 |
| | 5 | R = 0,5 | S ₃ | 120,8 | 112,7 | 105,1 | 1 : 1,15 | 95,2 |
| | Austenit I | R = 0 | S ₃ | 125,2 | 113,7 | 103,2 | 1 : 1,21 | 90,1 |
| K1 (Stumpfstoß) | 10 | R = -1 | S ₃ | 185,3 | 158,6 | 135,7 | 1 : 1,37 | 108,9 |
| | 11 | R = 0,5 | S ₃ | 75,5 | 68,4 | 61,9 | 1 : 1,22 | 53,7 |
| | Austenit I | R = 0 | S ₃ | 140,5 | 120,4 | 103,1 | 1 : 1,36 | 82,9 |
| K4 (Kreuzstoß) | 16 | R = -1 | S ₃ | 46,8 | 33,3 | 23,7 | 1 : 1,97 | 14,7 |
| | 17 | R = 0,5 | S ₃ | 25,3 | 23,1 | 21,0 | 1 : 1,21 | 18,4 |
| | Austenit I | R = 0 | S ₃ | 27,0 | 24,2 | 21,7 | 1 : 1,24 | 18,6 |

Tabelle 5-14: Serie 2: Kerbfall W1-1, Betriebsfestigkeit, R = 0, Kollektiv S_0

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüfma- schine | Küh- lung | Bruch- ausgang | Bruch-ursa- che | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------|--------------|-------------------|--------------------|-----------|
| BC 2/09 | 240 | 1.246.796 | P.04 | Luft | M, K, M | RB, -, RB | |
| AE 2/54 | 240 | 1.391.824 | P.04 | Luft | M | RB | |
| BA 2/39 | 230 | 1.319.036 | P.04 | Luft | F, M, K | RF, RB, - | |
| AD 2/63 | 230 | 2.008.629 | P.04 | Luft | K, M | RB, - | |
| AF 2/50 | 220 | 1.792.710 | P.04 | Luft | M | RB | |
| AF 2/46 | 220 | 2.632.259 | P.04 | Luft | M | RB | |
| AE 2/59 | 210 | 1.892.072 | P.04 | Luft | M, M | RB, RB | |
| AE 2/57 | 210 | 4.723.016 | P.04 | Luft | K | | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-15: Serie 3: Kerbfall W1-1, Betriebsfestigkeit, R = 0, Kollektiv S_{BAM}

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüfma- schine | Küh- lung | Bruch- ausgang | Bruch-ursa- che | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------|--------------|-------------------|--------------------|-----------|
| AE 2/58 | 160 | 681.048 | P.08 | Luft | K, M | -, RB | |
| AD 2/62 | 160 | 837.410 | P.04 | Luft | K, M | -, RB | |
| AE 2/52 | 155 | 1.252.433 | P.04 | Luft | M | RB | |
| BC 2/02 | 150 | 470.020 | P.08 | Luft | M | RB | |
| BA 2/32 | 150 | 692.031 | P.04 | Luft | M | RB | |
| AD 2/64 | 150 | 2.140.499 | P.08 | Luft | M | | |
| AE 2/51 | 145 | 1.946.874 | P.04 | Luft | M | RB | |
| AE 2/56 | 145 | 2.475.275 | P.08 | Luft | M | | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

P.08 = 200 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-16: Serie 7: Kerbfall K1, Betriebsfestigkeit, R = 0, Kollektiv S_0

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüf- ma- schine | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|------------|
| CB 10 | 225 | 946.077 | P.04 | Luft | 0,05 | 0,77 | RK | NA | |
| EC 06 | 225 | 1.742.569 | P.04 | Luft | 0,02 | 0,64 | RK, RK | | |
| CB 07 | 225 | 2.339.097 | P.04 | Luft | 0,08 | 0,55 | RK | SS | |
| EE 03 | 215 | 3.685.259 | P.04 | Luft | 0,58 | 1,62 | RK, RK | SR, SR | |
| BE 01 | 215 | 1.935.989 | P.04 | ohne | 0,45 | 0,37 | RK | | |
| EF 07 | 205 | 1.738.694 | P.04 | Luft | 0,27 | 0,70 | RK, RK | NA, SS | |
| CA 04 | 205 | 2.830.302 | P.04 | ohne | 0,22 | 0,16 | RK | WB | |
| CA 03 | 195 | 2.982.167 | P.04 | Luft | 0,49 | 0,18 | RK, RK, RK | | Einschluss |
| BD 07 | 195 | 4.173.282 | P.08 | ohne | 0,02 | 0,64 | RK | | |
| BE 11 | 195 | 6.344.318 | P.04 | Luft | 0,13 | 0,28 | RK, RK | -, WB | |
| CB 01 | 185 | 9.970.260 | P.04 | ohne | 0,50 | 0,59 | GW | SS | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

P.08 = 200 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-17: Serie 8: Kerbfall K1, Betriebsfestigkeit, R = 0, Kollektiv S_{BAM}

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|-----------|
| BD 12 | 245 | 81.920 | P.04 | Luft | 0,05 | 0,50 | RK, RK | NA | |
| EF 12 | 235 | 82.232 | P.04 | Luft | 0,29 | 0,85 | RK | | |
| BD 08 | 225 | 66.173 | P.04 | Luft | 0,07 | 0,71 | RK | | |
| EC 09 | 205 | 204.168 | P.04 | Luft | 0,12 | 0,75 | RK | | |
| CA 05 | 185 | 331.797 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,37 | RK | | |
| BD 02 | 165 | 471.552 | P.04 | Luft | 0,38 | 0,26 | RK | | |
| BE 03 | 165 | 699.811 | P.04 | Luft | 0,14 | 0,34 | RK | | |
| EE 04 | 155 | 342.103 | P.04 | Luft | 0,20 | 0,92 | RK | | |
| BE 10 | 155 | 1.018.574 | P.04 | Luft | 0,39 | 0,43 | RK | | |
| EE 06 | 145 | 1.241.578 | P.04 | ohne | 0,35 | 0,16 | WO | | |
| EE 07 | 140 | 565.252 | P.04 | Luft | 0,23 | 0,44 | RK | NA | |
| EE 02 | 140 | 1.264.045 | P.04 | Luft | 0,62 | 1,10 | GW | WN | |
| BD 11 | 135 | 6.136.672 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,41 | RK | KM | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

P.08 = 200 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-18: Serie 9: Kerbfall K1, Betriebsfestigkeit, R = 0,5, Kollektiv S_{BAM}

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung | |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|-----------|----------------------------------|
| BD 10 | 120 | 638.951 | P.04 | Luft | 0,10 | 0,83 | RK, RK, RK | NA, NS, EK | | |
| EE 10 | 120 | 906.065 | P.04 | Luft | 0,17 | 0,46 | RK | NA | | |
| EE 01 | 120 | 1.042.092 | P.04 | Luft | 0,17 | 0,37 | RK, RK, RK | -, -, SR | | |
| CA 07 | 120 | 1.108.760 | P.04 | Luft | 0,14 | 0,57 | RK, RK | NS | | |
| EF 11 | 115 | 797.915 | P.04 | Luft | 0,60 | 0,86 | RK, RK | NS | | |
| BD 04 | 115 | 893.275 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,47 | RK, RK | NS, NS | | |
| CA 06 | 110 | 1.325.580 | P.04 | Luft | 0,11 | 0,53 | GW | SS | | |
| EC 01 | 110 | 1.581.786 | P.04 | Luft | 0,16 | 0,77 | RK | SS | | |
| BD 05 | 110 | 5.072.468 | P.04 | Luft | 0,00 | 0,59 | RK | | | |
| BE 02 | 105 | 2.843.928 | P.04 | Luft | 0,38 | 0,26 | RK | | | kleiner Schlacken- einschluss |
| EF 03 | 100 | 1.043.835 | P.03 | ohne | 0,15 | 0,76 | RK | NÜ | | |
| BE 04 | 100 | 2.849.271 | P.04 | Luft | 0,22 | 0,48 | RK, RK | | | kleiner Schlacken- einschluss |
| EE 09 | 100 | 4.163.721 | P.04 | Luft | 0,15 | 0,34 | RK | NS | | |

P.03 = 600 kN Schenck-Servohydraulik

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-19: Serie 14: Kerbfall K4, Betriebsfestigkeit, R = 0, Kollektiv S_0

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|---------------------------------|
| ED 16 | 120 | 1.591.603 | P.08 | ohne | 0,56 | 0,14 | WS, WS | | |
| DD 04 | 120 | 2.110.463 | P.08 | ohne | 0,86 | 0,52 | WS, WS, WS | | |
| DC 14 | 110 | 1.599.471 | P.04 | ohne | 0,21 | 0,11 | WS, WS | | |
| ED 02 | 110 | 2.684.764 | P.08 | ohne | 0,72 | 0,14 | WS, WS | | |
| DF 02 | 100 | 1.820.720 | P.04 | ohne | 0,7 | 0,19 | WS, WS | | |
| DF 09 | 100 | 1.932.370 | P.04 | ohne | 1,10 | 0,29 | WS, WS | | |
| DE 02 | 90 | 3.674.203 | P.04 | ohne | 0,77 | 0,44 | WS, WS | | |
| DD 05 | 90 | 3.707.171 | P.04 | ohne | 1,13 | 0,41 | WS, WS | | |
| DF 01 | 80 | 5.094.311 | P.08 | ohne | 1,06 | 0,34 | WS, WS | | grobe Schlacken- einschlüsse |
| DD 03 | 80 | 5.552.432 | P.04 | ohne | 0,68 | 0,69 | WS, WS | | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

P.08 = 160 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-20: Serie 15: Kerbfall K4, Betriebsfestigkeit, R = 0, Kollektiv S_{BAM}

| Proben- Nummer | \hat{S}_a in N/mm ² | N_B | Prüf- ma- schi- ne | Küh- lung | KV in mm | WV in ° | Bruchaus- gang | Bruchursache | Bemerkung |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-------------|---------|-------------------|--------------|---------------------------------|
| ED 09 | 90 | 434.275 | P.04 | ohne | 0,80 | 0,14 | WS, WS | | |
| ED 07 | 70 | 780.755 | P.04 | ohne | 0,88 | 0,06 | WS, WS | | grobe Schlacken- einschlüsse |
| DF 04 | 70 | 867.271 | P.08 | ohne | 1,00 | 0,24 | WS, WS | | |
| DD 08 | 60 | 1.486.716 | P.08 | ohne | 0,89 | 0,23 | WS, WS | | |
| DD 02 | 60 | 1.569.534 | P.08 | ohne | 0,78 | 0,45 | WS, WS | | |
| DD 07 | 60 | 2.296.773 | P.04 | ohne | 1,11 | 0,40 | WS, WS | | |
| DF 17 | 50 | 3.358.791 | P.08 | ohne | 0,47 | 0,11 | WS, WS | | |
| ED 06 | 50 | 3.680.429 | P.08 | ohne | 1,00 | 0,27 | WS, WS | | |
| DE 17 | 50 | 4.119.602 | P.08 | ohne | 0,24 | 0,26 | WS, WS | | |
| ED 08 | 40 | 7.293.822 | P.08 | ohne | 1,08 | 0,12 | WS, WS | | |

P.04 = 250 kN Schenck-Servohydraulik

P.08 = 200 kN Schenck-Servohydraulik

Tabelle 5-21: Tabellarische Beschreibung der verwendeten Kollektive

| Stufe i | Bezogene Amplituden S_a/\hat{S}_a in den Stufen i | | Summenhäufigkeit in den Stufen i | Lastspielzahl in den Stufen i |
|---------|--|-----------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | Kollektiv | | | |
| | S_0 | S_{BAM} | | |
| 1 | 1,000 | 1,000 | 1 | 1 |
| 2 | 0,968 | 0,984 | 3 | 2 |
| 3 | 0,937 | 0,968 | 8 | 5 |
| 4 | 0,905 | 0,952 | 19 | 11 |
| 5 | 0,873 | 0,937 | 42 | 23 |
| 6 | 0,841 | 0,921 | 88 | 46 |
| 7 | 0,810 | 0,905 | 177 | 89 |
| 8 | 0,778 | 0,889 | 343 | 166 |
| 9 | 0,746 | 0,873 | 644 | 301 |
| 10 | 0,714 | 0,857 | 1.172 | 528 |
| 11 | 0,683 | 0,841 | 2.068 | 896 |
| 12 | 0,651 | 0,825 | 3.542 | 1.474 |
| 13 | 0,619 | 0,810 | 5.892 | 2.350 |
| 14 | 0,587 | 0,794 | 9.525 | 3.633 |
| 15 | 0,556 | 0,778 | 14.975 | 5.450 |
| 16 | 0,524 | 0,762 | 22.910 | 7.935 |
| 17 | 0,492 | 0,746 | 34.133 | 11.223 |
| 18 | 0,460 | 0,730 | 49.559 | 15.426 |
| 19 | 0,429 | 0,714 | 70.179 | 20.620 |
| 20 | 0,397 | 0,698 | 97.002 | 26.823 |
| 21 | 0,365 | 0,683 | 130.979 | 33.977 |
| 22 | 0,333 | 0,667 | 172.922 | 41.943 |
| 23 | 0,302 | 0,651 | 223.415 | 50.493 |
| 24 | 0,270 | 0,635 | 282.745 | 59.330 |
| 25 | 0,238 | 0,619 | 350.848 | 68.103 |
| 26 | 0,206 | 0,603 | 427.288 | 76.440 |
| 27 | 0,175 | 0,587 | 511.269 | 83.981 |
| 28 | 0,143 | 0,571 | 601.686 | 90.417 |
| 29 | 0,111 | 0,556 | 697.205 | 95.519 |
| 30 | 0,079 | 0,540 | 796.372 | 99.167 |
| 31 | 0,048 | 0,524 | 897.736 | 101.364 |
| 32 | 0,016 | 0,508 | 1.000.000 | 102.264 |

Tabelle 5-22: Betriebsfestigkeitskennwerte

| Kerbfall | Ver- suchs- serie | Beanspru- chungs- verhältnis | Kollektiv | k | $T_{S,80}$ | $T_{N,80}$ | $\hat{S}_{a,50}$ (10^5) in N/mm ² | $\hat{S}_{a,50}$ (10^6) in N/mm ² |
|----------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------|-------|------------|------------|---|---|
| W1-1 (Loch- stab) | 2 | $\bar{R} = 0$ | S_0 | -6,18 | 1 : 1,14 | 1 : 2,23 | 362,8 | 250,0 |
| | 3 | $\bar{R} = 0$ | S_{BAM} | -8,72 | 1 : 1,18 | 1 : 4,19 | 200,1 | 153,7 |
| K1 (Stumpf- stoß) | 7 | $\bar{R} = 0$ | S_0 | -7,70 | 1 : 1,15 | 1 : 2,86 | 320,5 | 237,6 |
| | 8 | $\bar{R} = 0$ | S_{BAM} | -5,58 | 1 : 1,30 | 1 : 4,35 | 224,8 | 148,8 |
| | 9 | $\bar{R} = 0,5$ | S_{BAM} | -6,05 | 1 : 1,25 | 1 : 3,87 | 173,3 | 118,4 |
| K4 (Kreuz- stoß) | 14 | $\bar{R} = 0$ | S_0 | -2,73 | 1 : 1,26 | 1 : 1,86 | 330,5 | 142,2 |
| | 15 | $\bar{R} = 0$ | S_{BAM} | -3,76 | 1 : 1,12 | 1 : 1,56 | 128,0 | 69,4 |

Tabelle 5-23: Berechnete Schadenssummen

| Kerbfall | \bar{R} | Kollektiv | \bar{k} | \dot{S}_a in N/mm ² | tatsächliche Schadenssumme D |
|----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------|------------------------------|
| W1-1 | 0 | S_0 | 6,18 | 210 | 0,188 |
| | | | | 220 | 0,217 |
| | | | | 230 | 0,230 |
| | | | | 240 | 0,257 |
| | | S_{BAM} | 8,72 | 145 | 0,068 |
| | | | | 150 | 0,090 |
| | | | | 155 | 0,105 |
| | | | | 160 | 0,135 |
| K1 | 0 | S_0 | 7,70 | 185 | 0,024 |
| | | | | 195 | 0,038 |
| | | | | 205 | 0,050 |
| | | | | 215 | 0,068 |
| | | | | 225 | 0,090 |
| | | S_{BAM} | 5,58 | 135 | 0,000 |
| | | | | 140 | 0,001 |
| | | | | 145 | 0,001 |
| | | | | 155 | 0,006 |
| | | | | 165 | 0,016 |
| | | | | 185 | 0,058 |
| | | | | 205 | 0,150 |
| | | | | 225 | 0,318 |
| | | | | 235 | 0,441 |
| 245 | 0,603 | | | | |
| K4 | 0 | S_0 | 2,73 | 80 | 0,610 |
| | | | | 90 | 0,776 |
| | | | | 100 | 0,880 |
| | | | | 110 | 1,013 |
| | | | | 120 | 1,143 |
| | | S_{BAM} | 3,76 | 40 | 0,737 |
| | | | | 50 | 1,365 |
| | | | | 60 | 1,403 |
| | | | | 70 | 1,436 |
| | | | | 90 | 1,491 |

Tabelle 5-24: Ergebnisse der Schwellwert- und Rissfortschrittsversuche für da/dN in mm/Schwingspiel und ΔK in N/mm^{3/2}

| Probe | Schwellwerte K_{th} bei da/dN | | PARIS-Parameter | |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------|
| | 10^{-7} mm/SP | 10^{-8} mm/SP | m | C |
| AE 2/59 | 117,6 | 81,1 | 3,72 | 2,7109E-15 |
| AF 2/44 | | | 3,98 | 5,0199E-16 |
| BA 2/40 | | | 3,11 | 8,0660E-14 |
| BB 2/21 | 138,5 | 95,7 | 4,57 | 1,2744E-17 |
| CD 2/85 | | | 3,00 | 1,9211E-13 |
| CD 2/89 | 144,1 | 102,1 | | |
| CE 2/97 | 135,2 | 90,2 | 3,23 | 4,4425E-14 |
| CF 2/16 | | | 3,24 | 3,4935E-14 |
| AD 2/70 | 129,8 | 82,4 | | |
| | | | | |
| Gesamt- mittelwert | 131,9 | 87,5 | 3,18 | 6,2829E-14 |

Tabelle 5-25: Ergebnisse der LCF-Versuche, Werkstoff 1.4541, $R_\varepsilon = -1$

| Lfd.- Nr. | Probe Nr. | $\varepsilon_{a,t}$ | f in s^{-1} | N_A | $N_A / 2$ | $\varepsilon_{a,e}$ bei $N_A/2$ | $\varepsilon_{a,p}$ bei $N_A/2$ | S_a bei $N_A/2$ in N/mm^2 |
|-----------|-----------|---------------------|---------------|---------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 4 | BA 04 | 0,80% | 0,313 | 427 | 210 | 0,277% | 0,523% | 557,4 |
| 7 | BB 04 | 0,80% | 0,313 | 631 | 320 | 0,290% | 0,510% | 583,2 |
| 10 | BC 04 | 0,80% | 0,313 | 908 | 450 | 0,273% | 0,527% | 550,8 |
| 3 | BA 03 | 0,60% | 0,417 | 983 | 490 | 0,276% | 0,324% | 555,8 |
| 6 | BB 03 | 0,60% | 0,417 | 1.046 | 520 | 0,280% | 0,320% | 564,4 |
| 9 | BC 03 | 0,60% | 0,417 | 1.800 | 900 | 0,285% | 0,315% | 574,9 |
| 2 | BA 02 | 0,40% | 0,625 | 3.800 | 1.900 | 0,273% | 0,127% | 550,5 |
| 5 | BB 02 | 0,40% | 0,625 | 9.900 | 4.900 | 0,253% | 0,147% | 510,6 |
| 8 | BC 02 | 0,40% | 0,625 | 11.800 | 5.900 | 0,258% | 0,142% | 520,0 |
| 1 | BA 01 | 0,20% | 1,250 | 105.000 | 52.400 | 0,161% | 0,039% | 324,3 |

Tabelle 5-26: Zyklische Koeffizienten und Exponenten der Dehnungswöhlerlinie und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve, Werkstoff 1.4541, $R_\varepsilon = -1$

| Anzahl Versuche | σ'_f in N/mm^2 | b | ε'_f | c | E-Modul in N/mm^2 | K' in N/mm^2 | n' |
|-----------------|-------------------------|--------|------------------|--------|---------------------|------------------|-------|
| 10 | 1330 | -0,118 | 0,128 | -0,506 | 201.433 | 1676 | 0,196 |

Bilder zu Kapitel 5

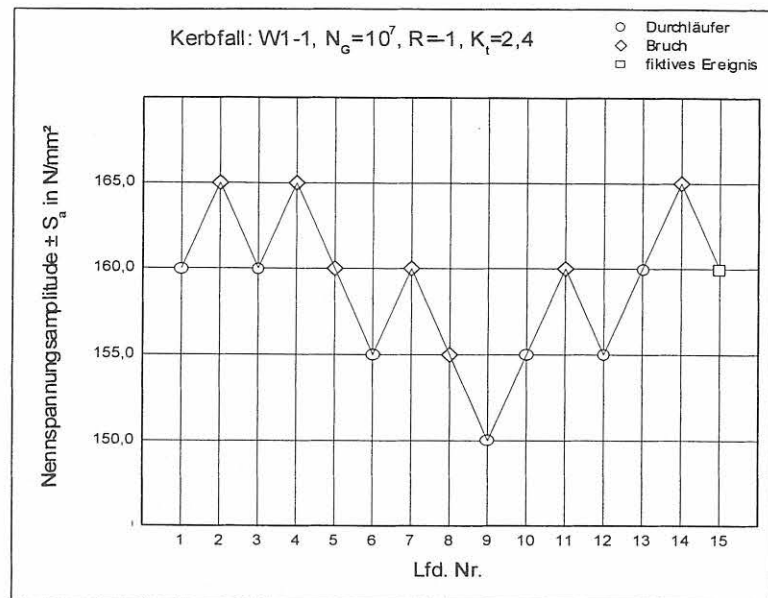


Bild 5-1: Serie 4: W1-1, R=-1, Treppenstufen im Übergangsbereich

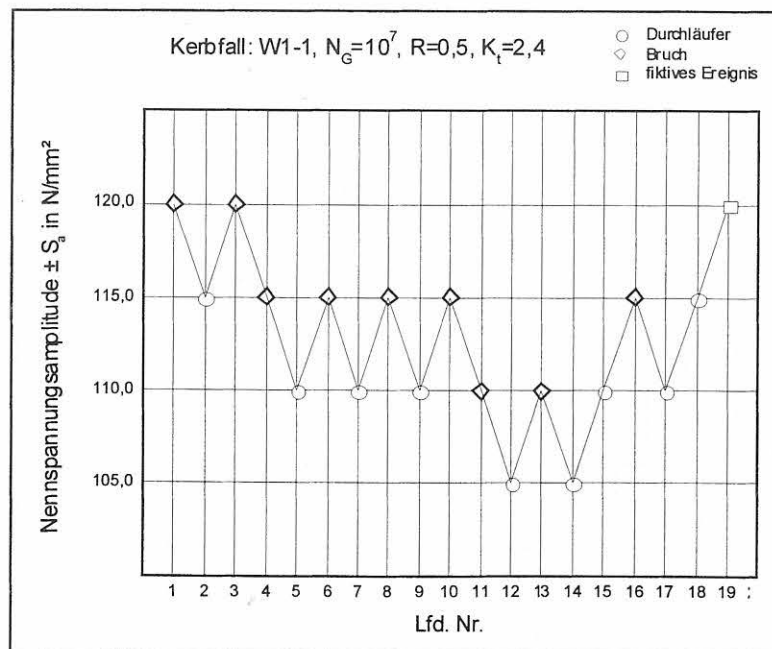


Bild 5-2: Serie 5: W1-1, R=0,5, Treppenstufen im Übergangsbereich

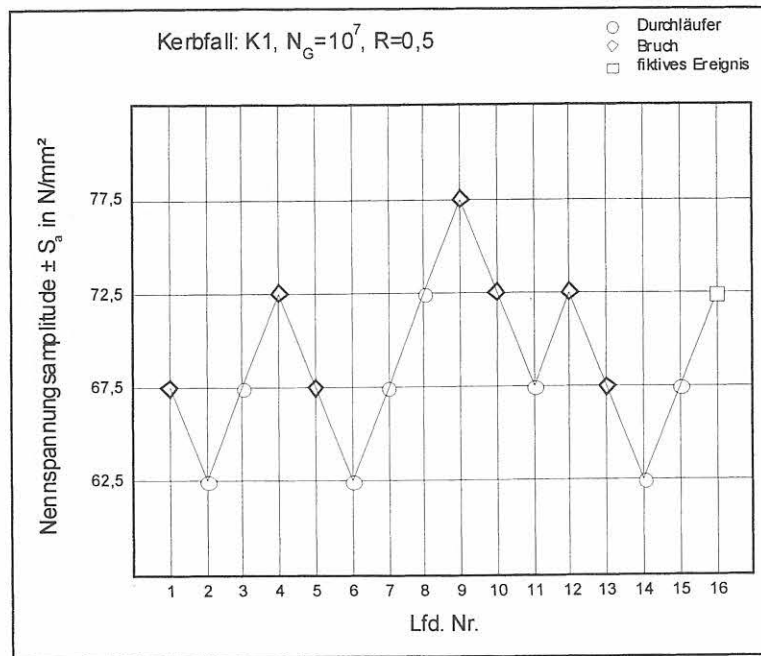


Bild 5-3: Serie 11: K1, $R=0,5$, Treppenstufen im Übergangsbereich

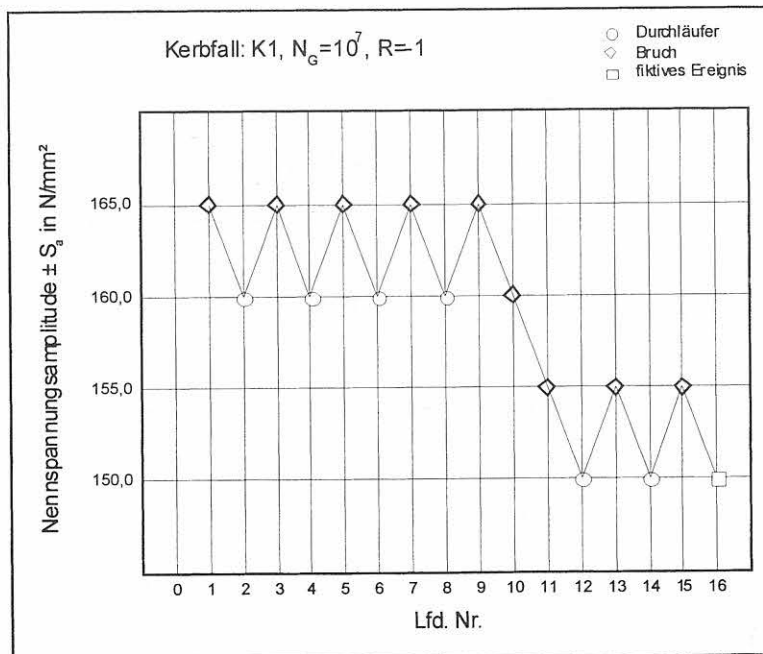
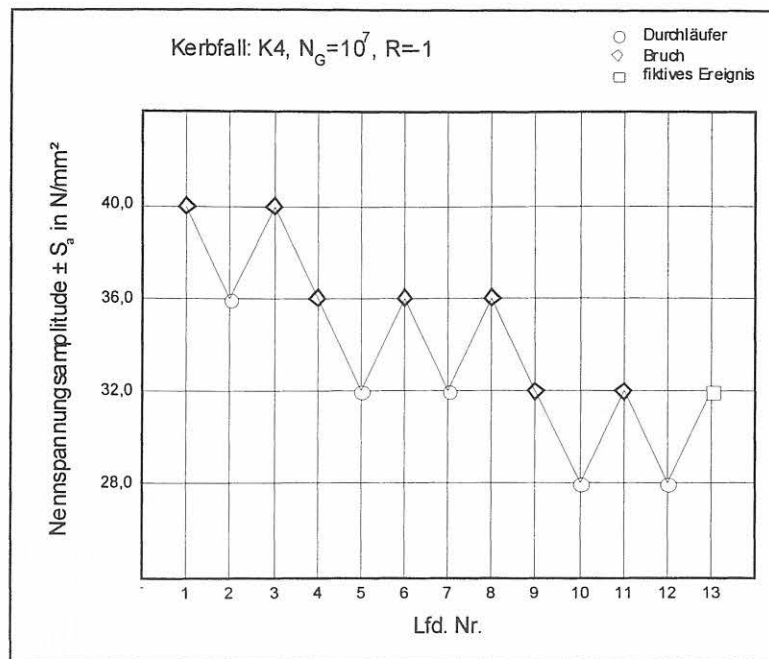
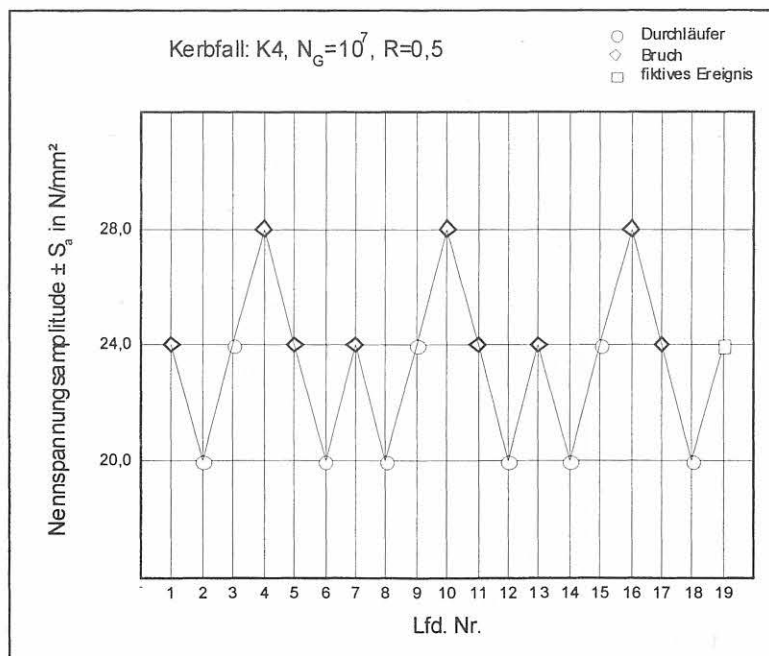


Bild 5-4: Serie 10: K1, $R=1$, Treppenstufen im Übergangsbereich

Bild 5-5: Serie 16: K4, $R=-1$, Treppenstufen im ÜbergangsbereichBild 5-6: Serie 17: K4, $R=0,5$, Treppenstufen im Übergangsbereich

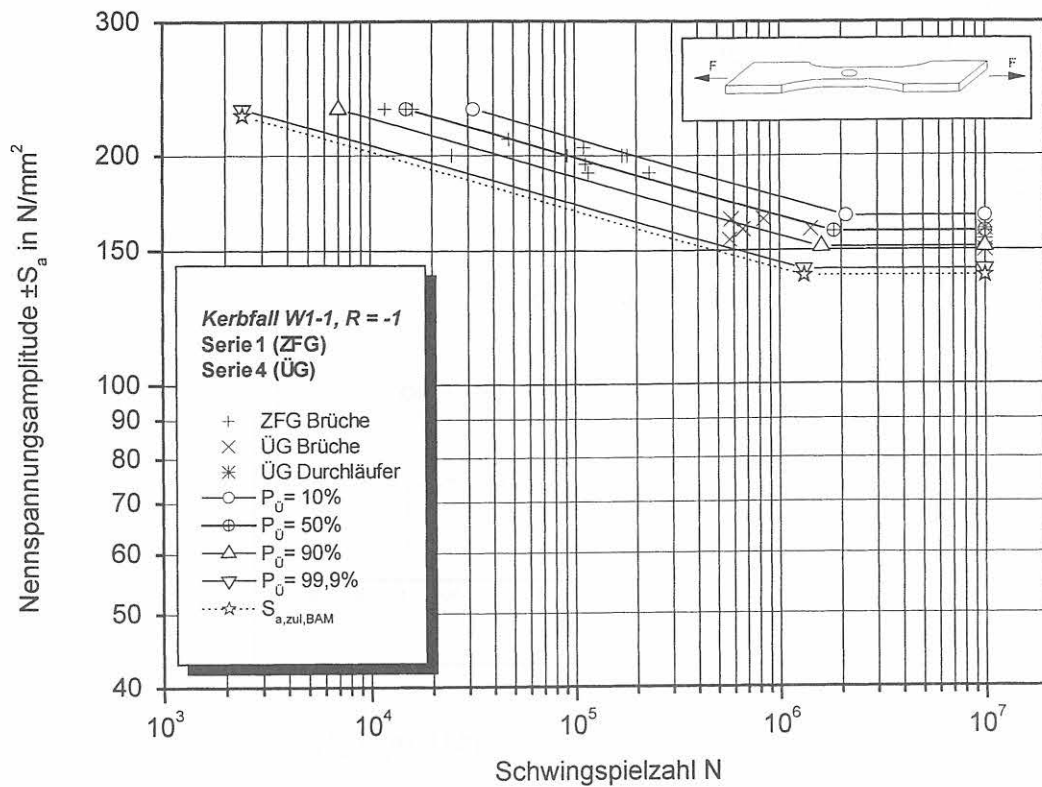


Bild 5-7: Versuchsserie 1 und 4: Wöhlerfeld ZFG und ÜG für Kerbfall W1-1, R = -1

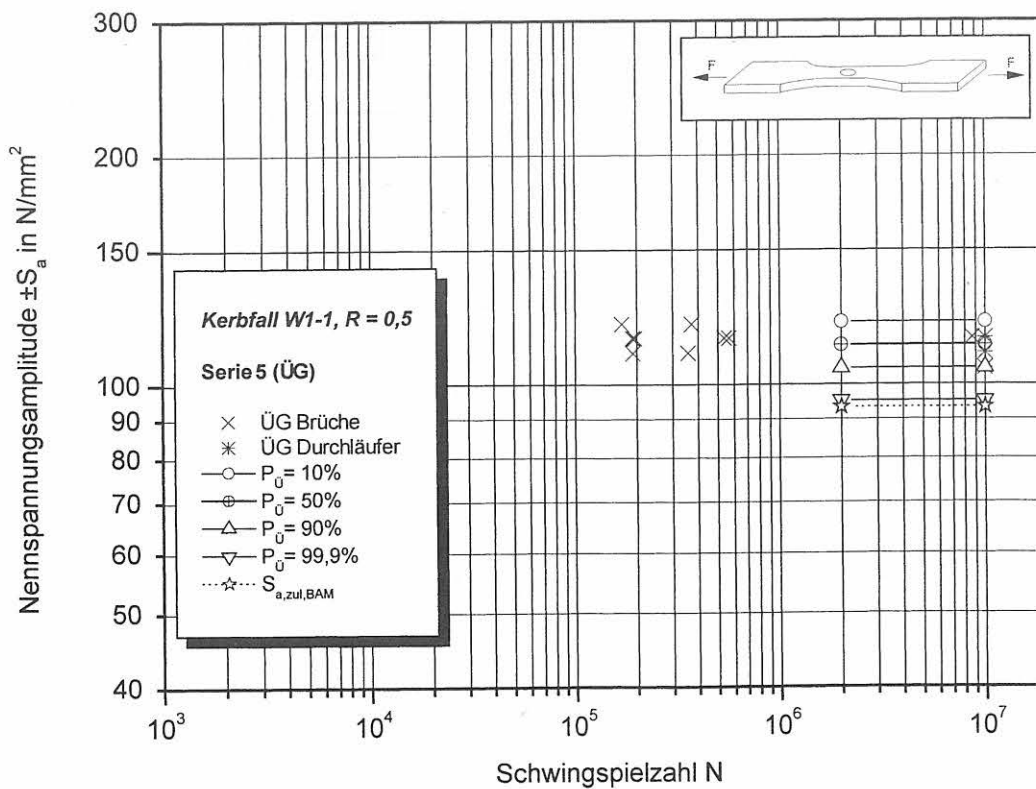


Bild 5-8: Versuchsserie 5: Wöhlerfeld ÜG für Kerbfall W1-1, R = 0,5

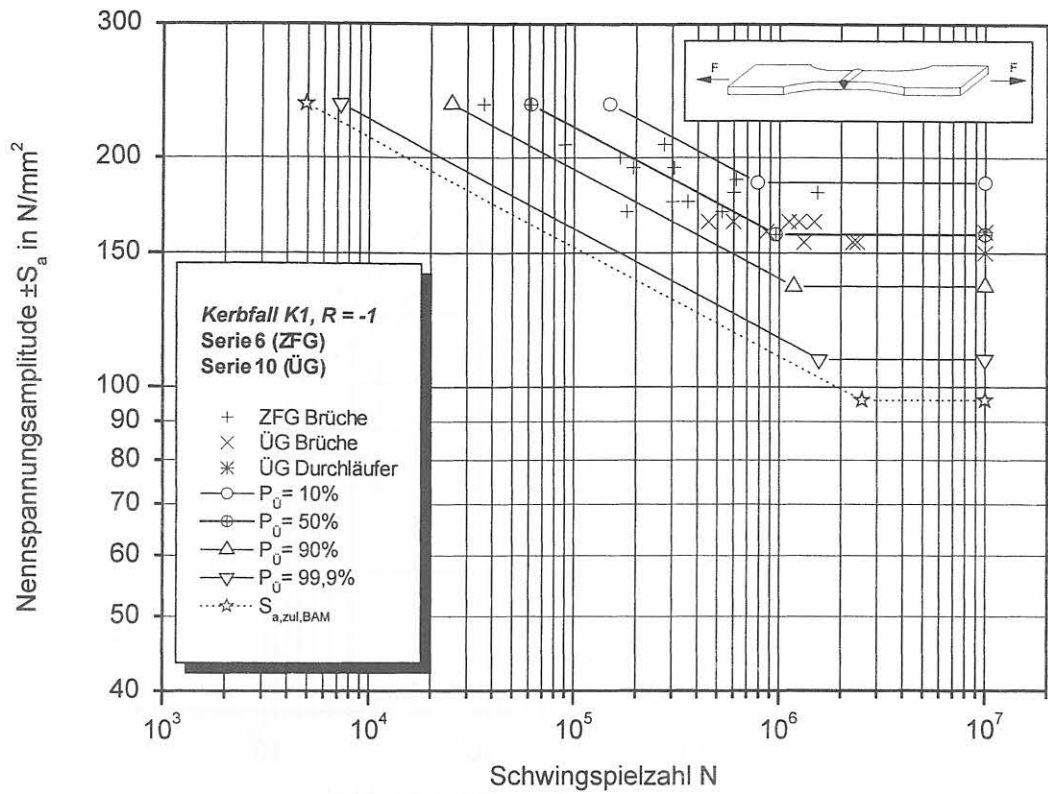


Bild 5-9: Versuchsserie 6 und 10: Wöhlerfeld ZFG und ÜG für Kerbfall K1, R = -1

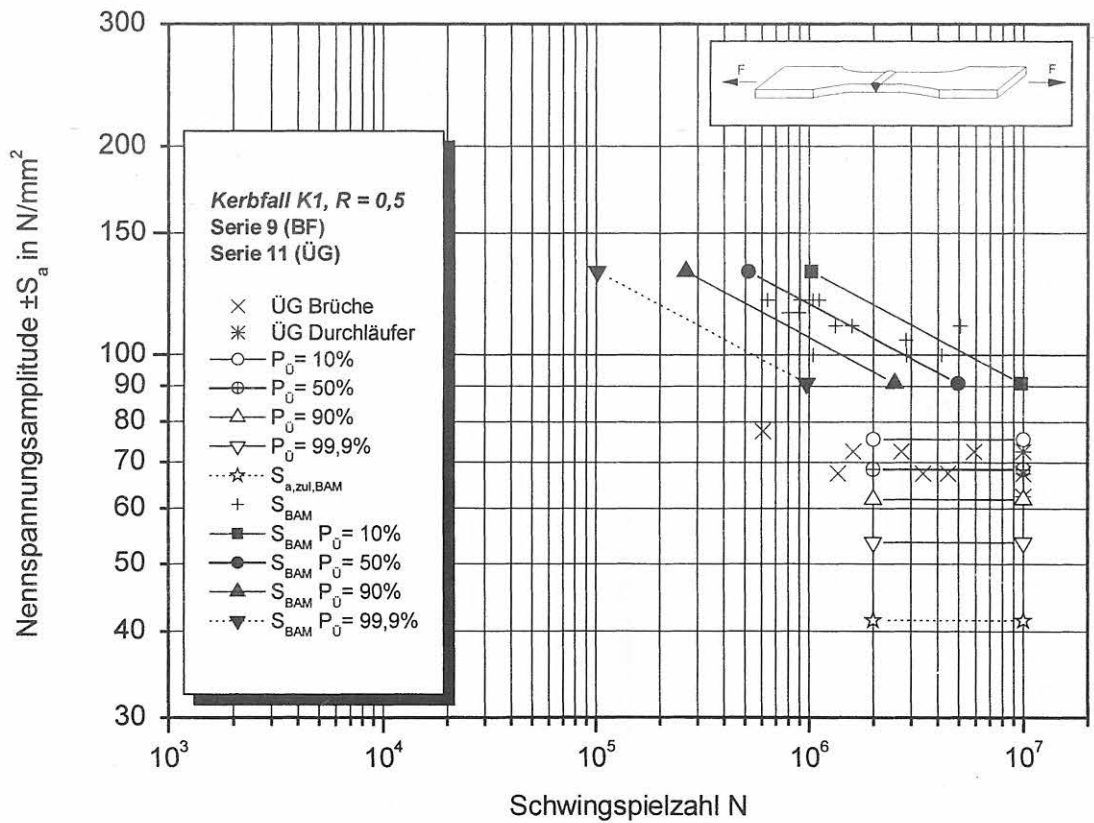


Bild 5-10: Versuchsserie 9 und 11: Wöhlerfeld ÜG und Lebensdauerlinie S_{BAM} für Kerbfall K1, R = 0,5

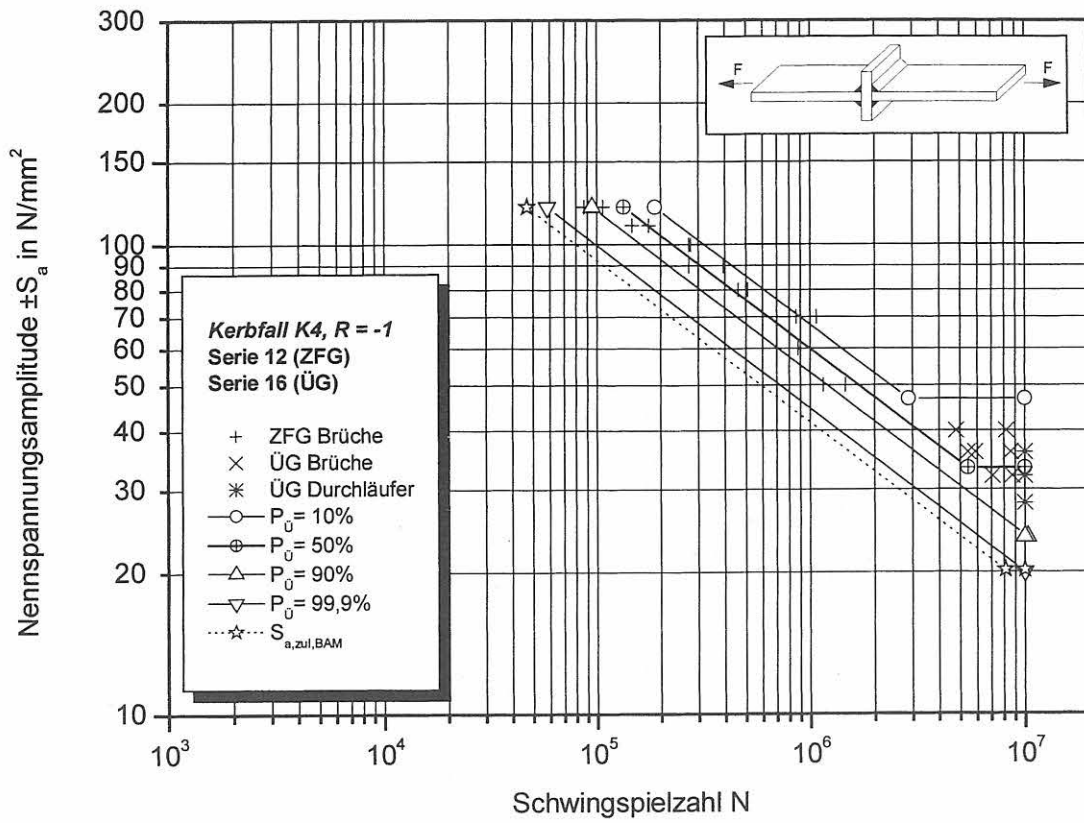


Bild 5-11: Versuchsserie 12 und 16: Wöhlerfeld ZFG und ÜG für Kerbfall K4, R = -1

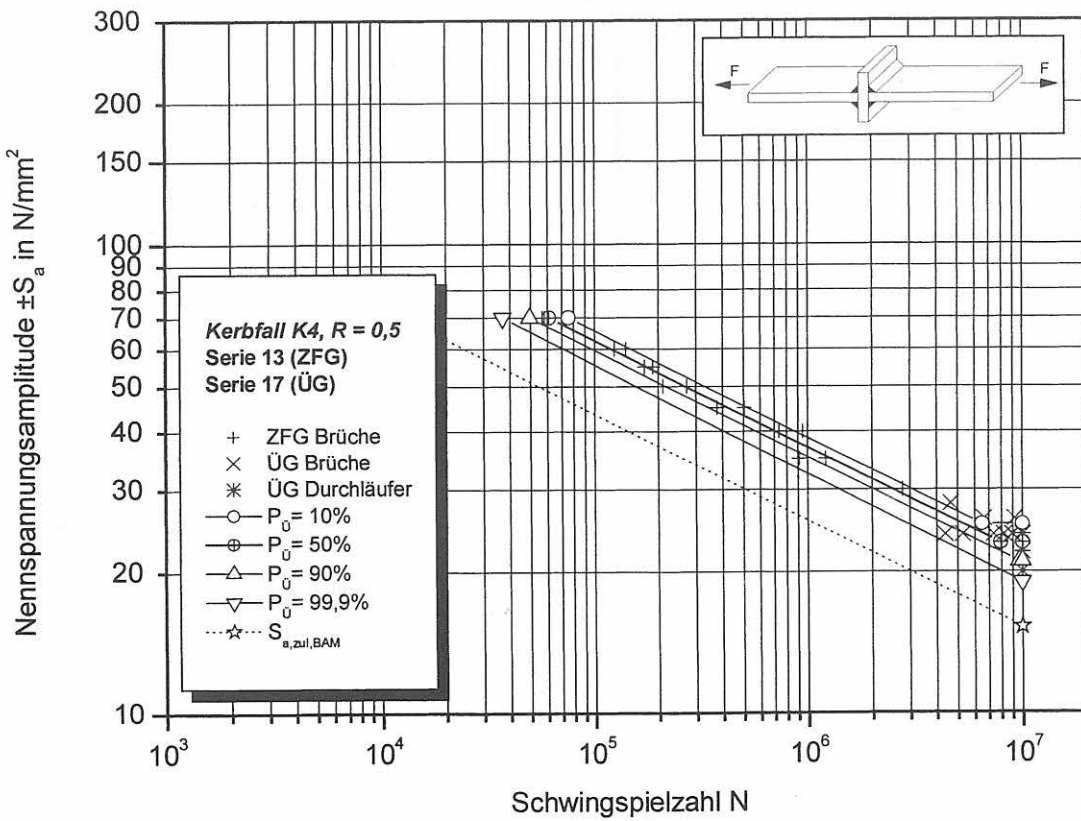


Bild 5-12: Versuchsserie 13 und 17: Wöhlerfeld ZFG und ÜG für Kerbfall K4, R = 0,5

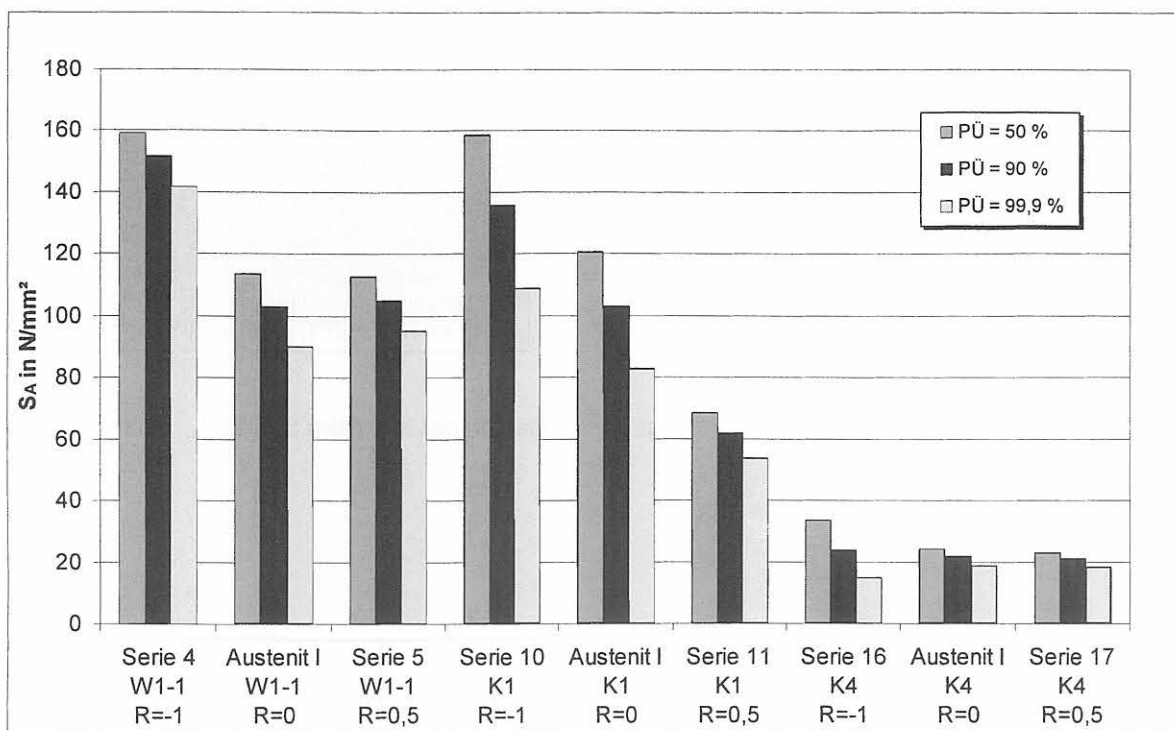


Bild 5-13: Ersatzdauerfestigkeitswerte für R = -1 ...0...0,5

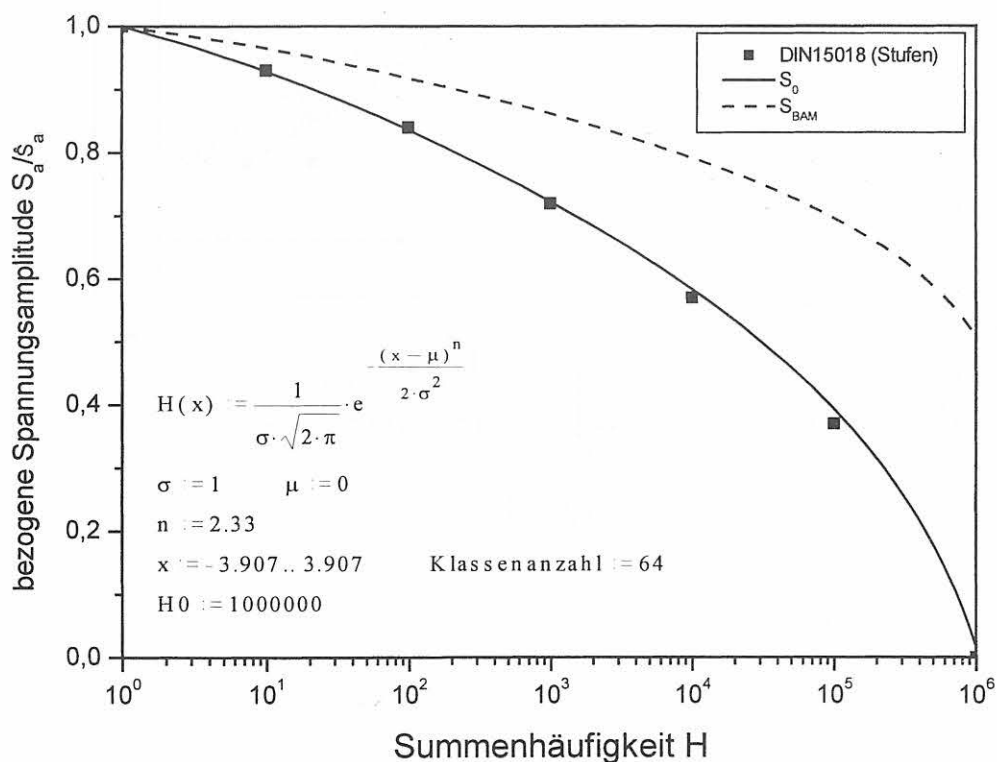


Bild 5-14: Lastkollektive

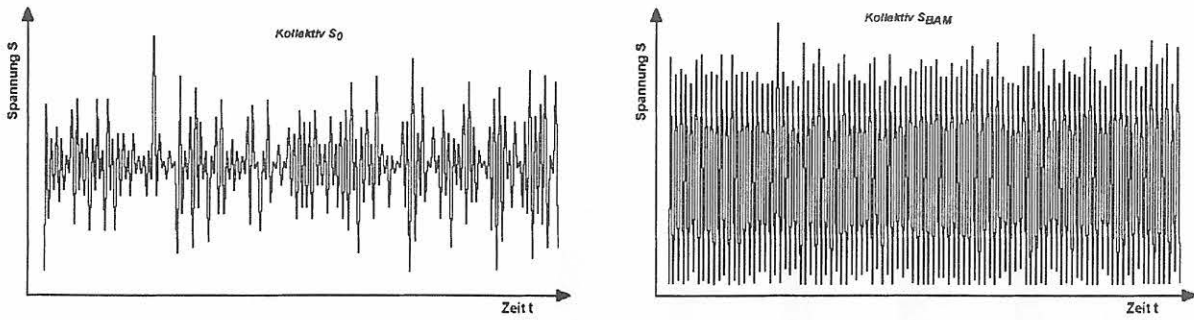


Bild 5-15: Ausschnitt aus den Beanspruchungs-Zeit-Verläufen der Kollektive S_0 und S_{BAM} , schematisch

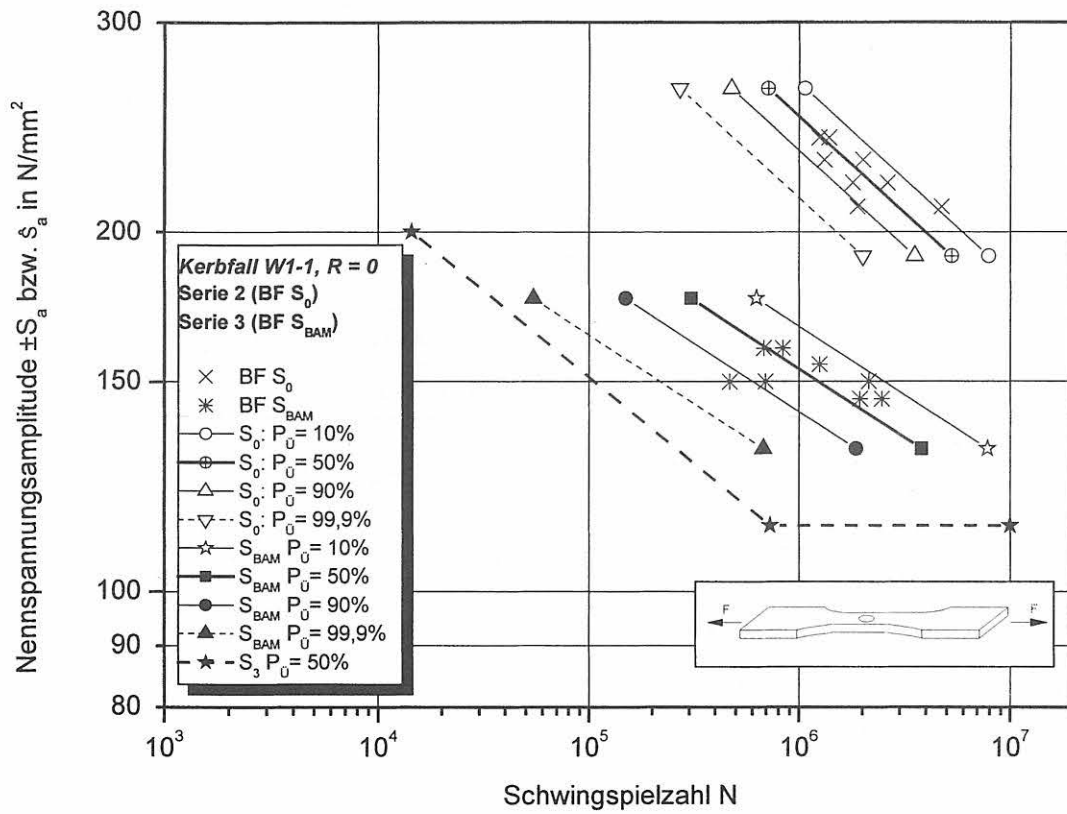


Bild 5-16: Versuchsserie 2 und 3: Kerbfall W1-1, Lebensdauerlinien, $\bar{R} = 0$

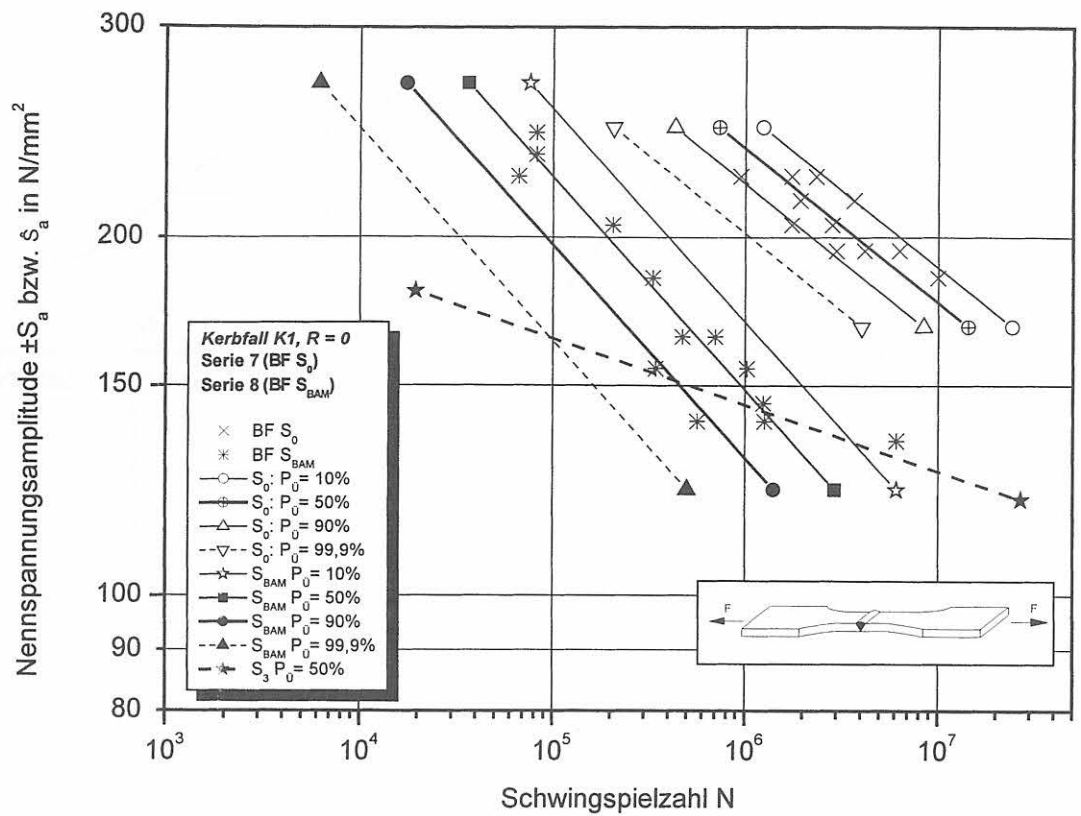


Bild 5-17: Versuchsserie 7 und 8: Kerbfall K1, Lebensdauerlinien, $\bar{R} = 0$

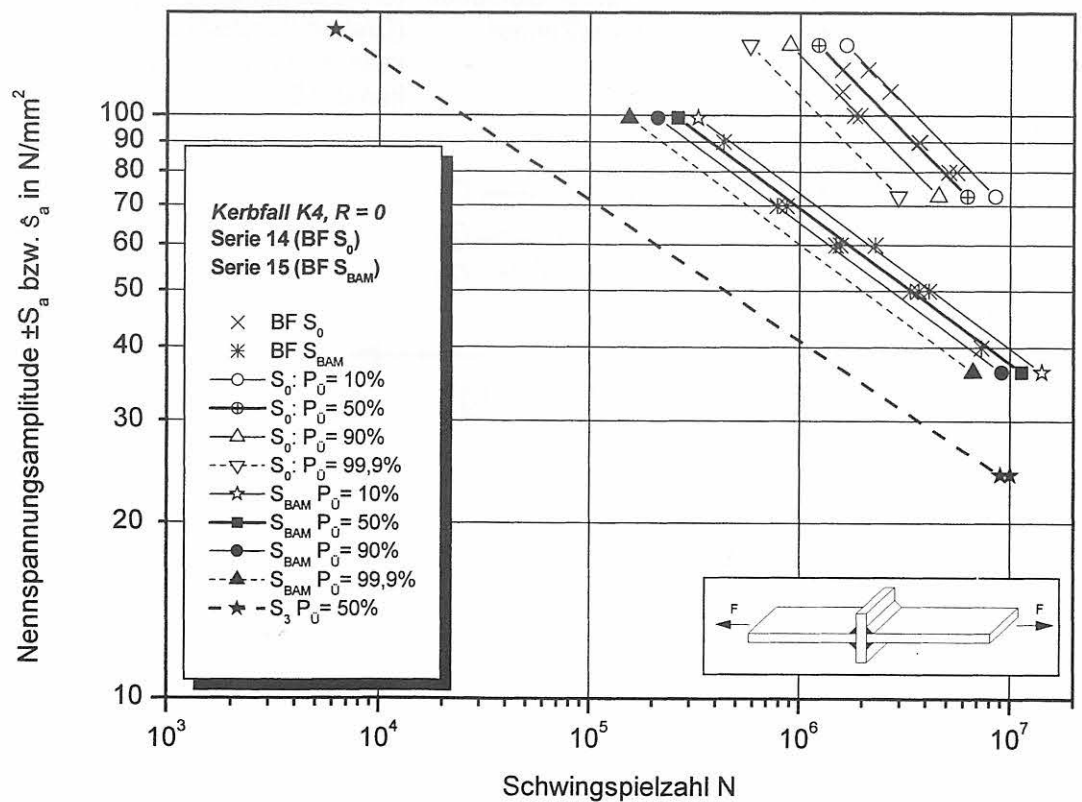


Bild 5-18: Versuchsserie 14 und 15: Kerbfall K4, Lebensdauerlinien, $\bar{R} = 0$

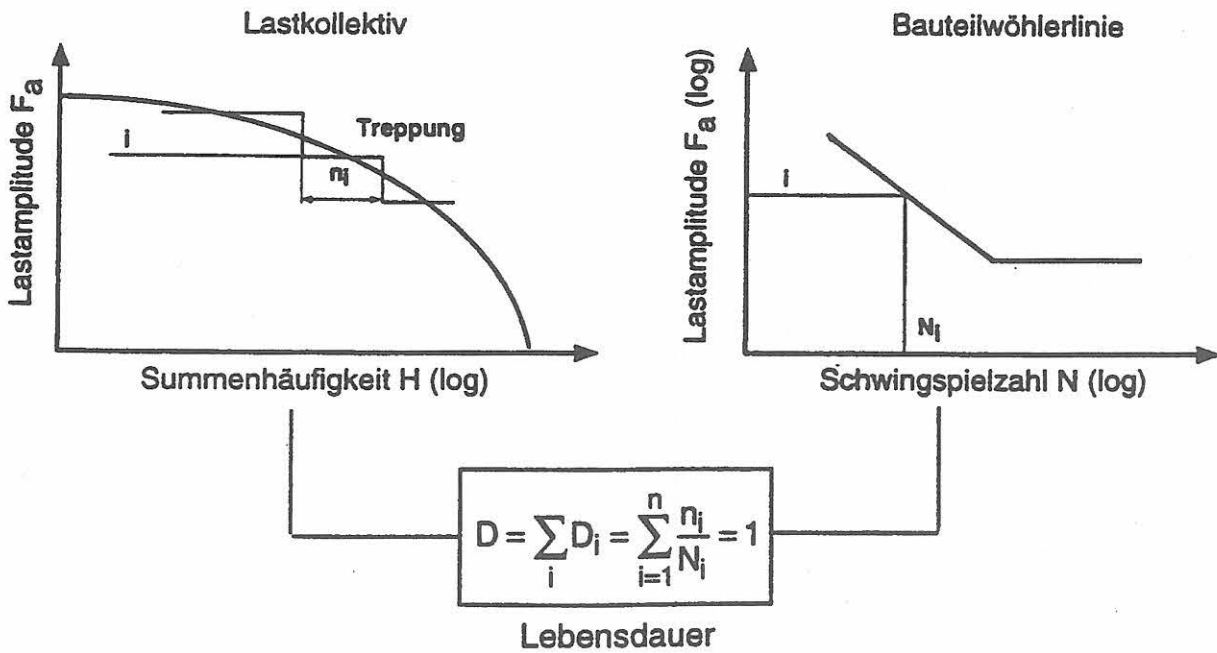


Bild 5-19: Veranschaulichung des Nennspannungskonzepts

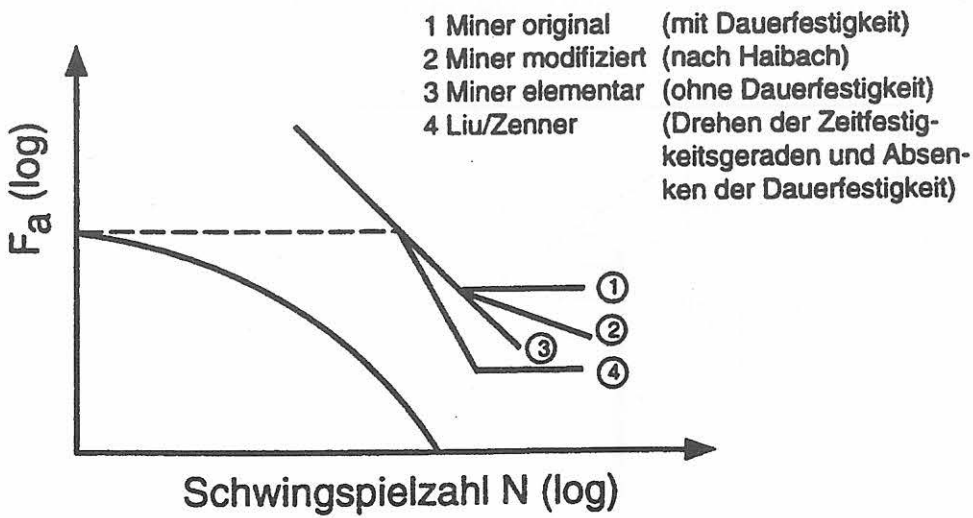


Bild 5-20: Modifikationen der Miner-Regel

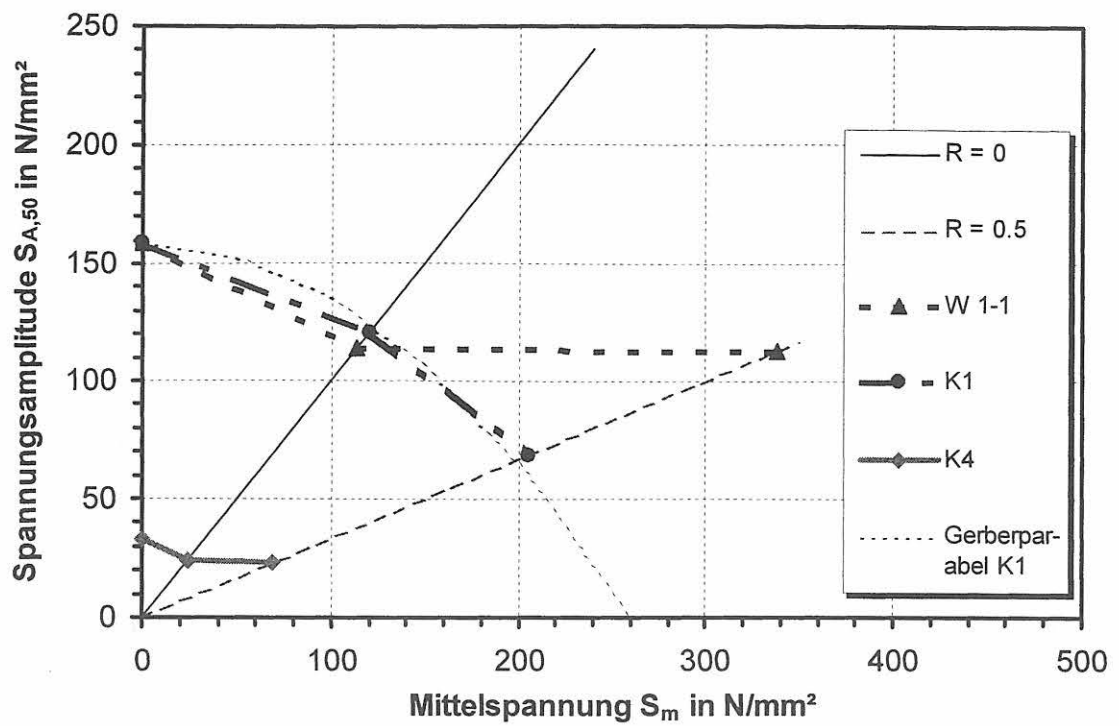


Bild 5-21: Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh, Werkstoff 1.4541, Kerbfälle W1-1 (Lochstab mit $K_t = 2,4$), K1 (Stumpfstoß) und K4 (Kreuzstoß mit Doppelkehlnaht)



Bild 5-22: Grundwerkstoffgefüge 1.4541, Längsschliff, 500 : 1



Bild 5-23: Grundwerkstoffgefüge 1.4541, Querschliff, 500 : 1

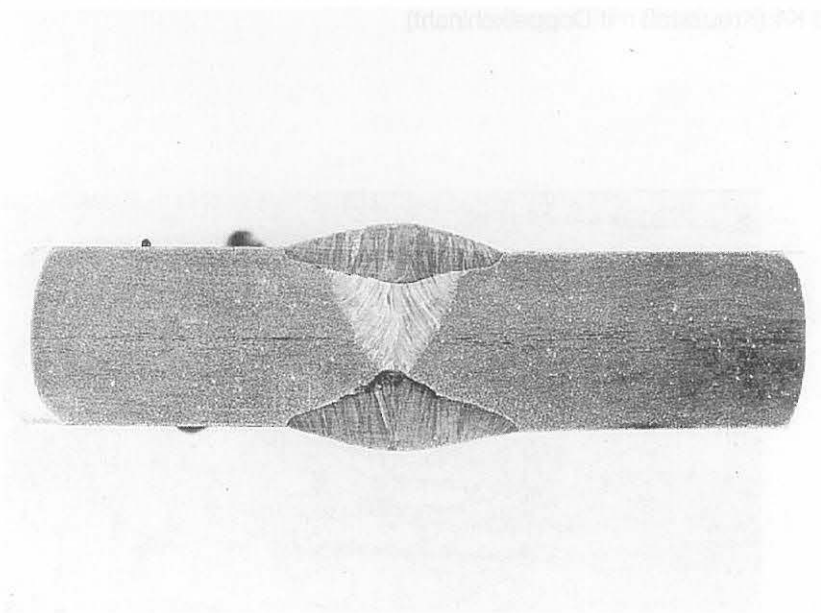


Bild 5-24: Makroschliff der Schweißnaht, Stumpfstoß, Kerbfall K1, Vergrößerung 1 : 2.3, Negativ-Nr. 7067

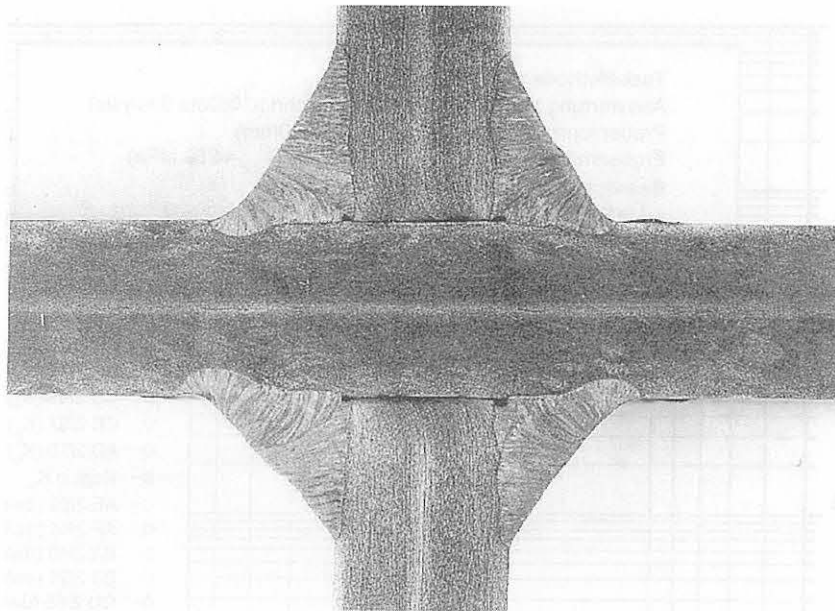


Bild 5-25: Makroschliff der Schweißnaht, Kreuzstoß mit Doppelkehlnaht, Kerbfall K4, Vergrößerung 1 : 2.3, Negativ-Nr. 7066

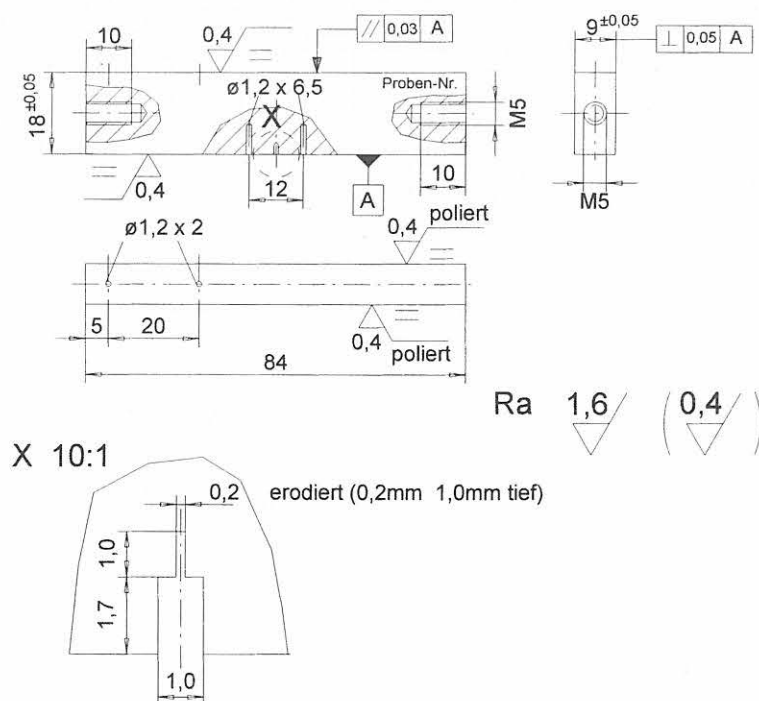


Bild 5-26: Form und Abmaße der SENB3-Biegeproben für schwingbruchmechanische Untersuchungen

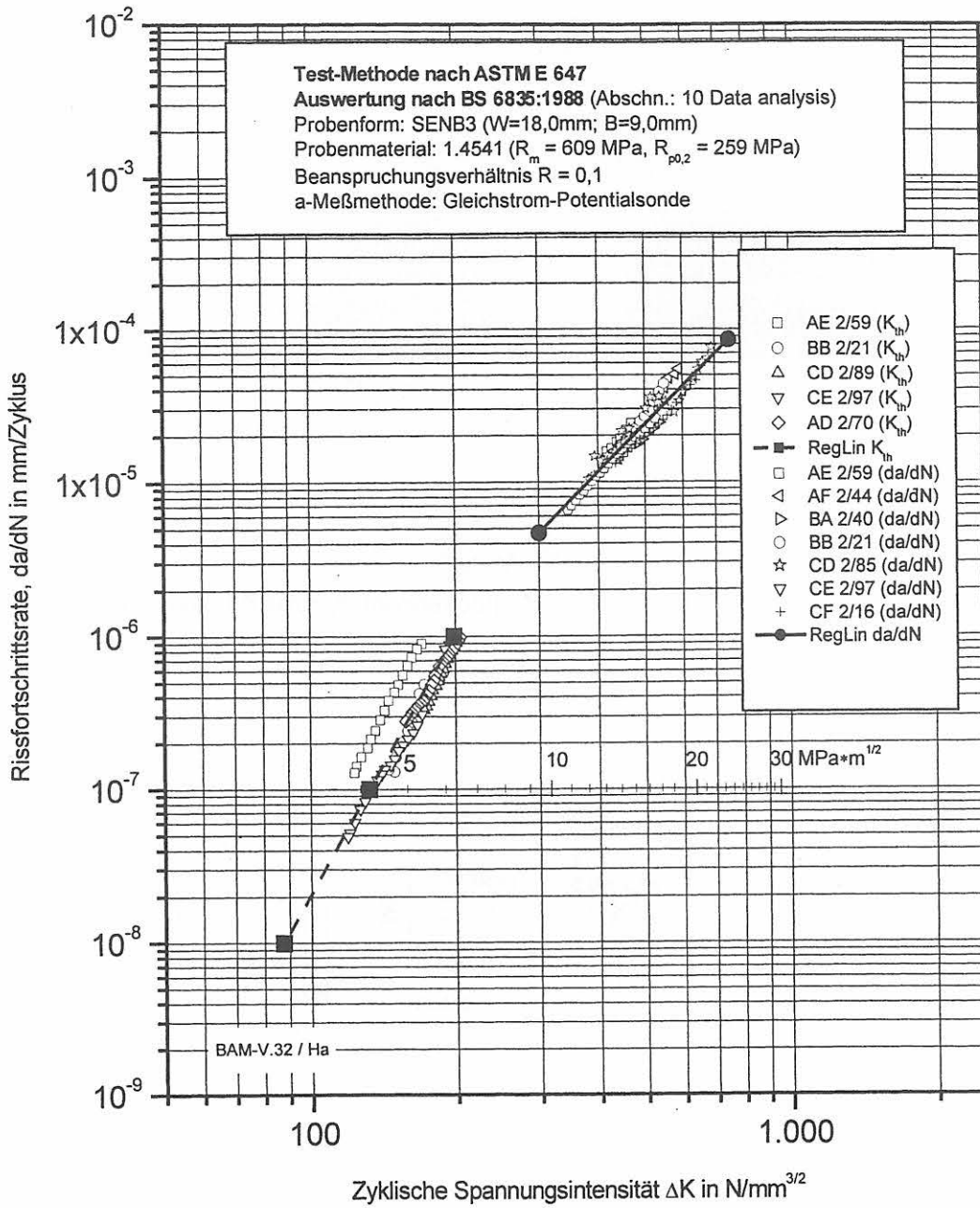


Bild 5-27: Schwellen- und Rissfortschrittwerte der SENB3-Proben aus 1.4541, $R = 0,1$

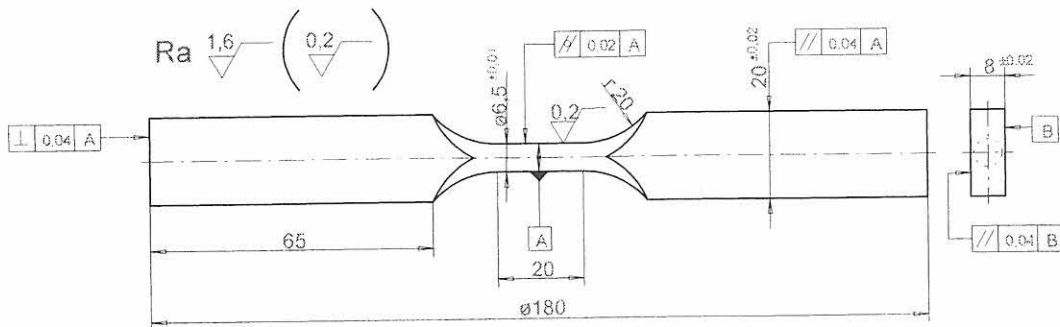


Bild 5-28: Form und Abmaße der LCF-Probe aus 1.4541

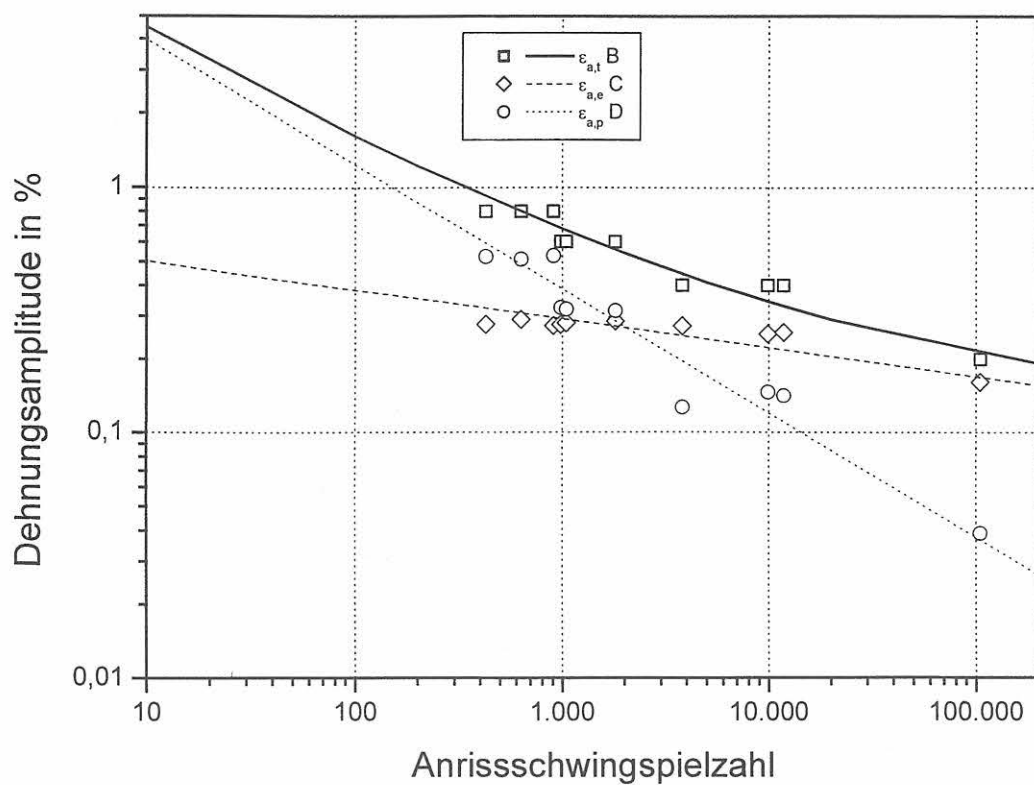


Bild 5-29: Dehnungswöhlerlinie, Werkstoff 1.4541, $R_e = -1$

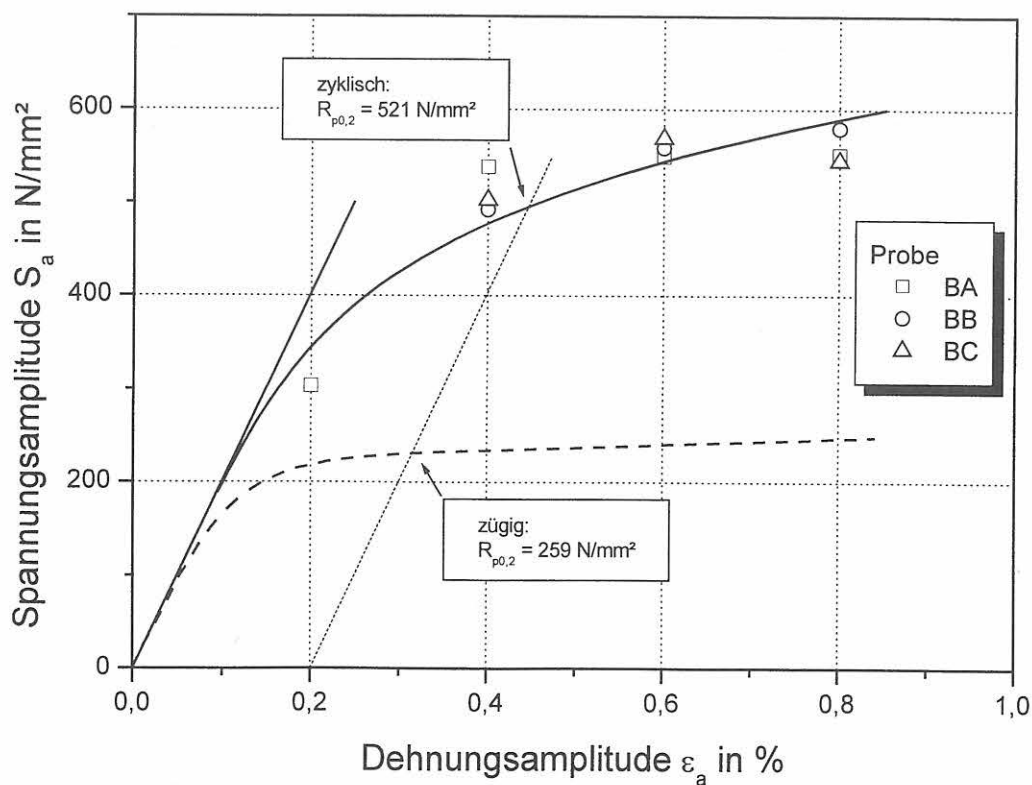


Bild 5-30: Zyklische und zügige Spannungs-Dehnungs-Kurven, Werkstoff 1.4541

6 Ableitung zulässiger Spannungen

Im vorliegenden Bericht wurde bisher die Ermittlung der *ertragbaren* Schwingbeanspruchungswerte für die untersuchten Werkstoffe und Kerbfälle erörtert. Im Hinblick auf die Umsetzung der erarbeiteten Werte müssen jedoch *zulässige* Spannungen aus den experimentellen Ergebnissen abgeleitet werden. Die Herleitung zulässiger Spannungen aus ertragbaren Spannungen nach dem „BAM-Vorschlag“ wird in den folgenden Abschnitten erläutert. Die dargelegte Methode ist dabei als *ein* möglicher Vorschlag zu interpretieren. Sie wurde im Bericht Austenit I ausführlich erläutert, Details sind aus [4] zu entnehmen. Hier erfolgt eine gestraffte Darstellung.

6.1 Methodik

Infolge des Stichprobencharakters der im vorliegenden Bericht erörterten Ergebnisse können die Verteilungsparameter *Mittelwert* und *Streuung der Grundgesamtheit* lediglich geschätzt werden. Zur Quantifizierung der dabei entstehenden Unsicherheiten dienen die sogenannten Vertrauensbereiche oder -bänder. Die Angabe von Vertrauensbereichen ist - insbesondere wegen des in der Regel aus technischen und wirtschaftlichen Gründen geringen Stichprobenumfangs bei Schwingfestigkeitsuntersuchungen - umstritten [28]. Deswegen wurde im vorliegenden Fall der Weg gewählt, auf sehr hohe Überlebenswahrscheinlichkeiten zu extrapolieren. Diese Methode liegt auch den in der DS 804 angegebenen Werten zugrunde.

Bei der Ableitung der zulässigen Spannungen wurde von folgenden Überlegungen, die für das Zeitfestigkeitsgebiet, das Übergangsgebiet zur Dauerfestigkeit und die Lebensdauerlinien getrennt erläutert sind, ausgegangen:

Zeitfestigkeitsgebiet

Hier wurde die jeweilige Wöhlerlinienneigung k aus den Versuchsergebnissen als zutreffend und charakteristisch für austenitische Stähle angegeben. Die Lage der Lebensdauerlinie für $P_{\bar{0}} = 50\%$ im Wöhlerdiagramm lässt sich selbst mit geringen Stichprobenumfängen erfahrungsgemäß gut abschätzen. Die Streuung der experimentellen Ergebnisse aus kleinen Stichproben erschien angesichts der im Vergleich zum Wöhlerlinienkatalog [26] bzw. der DS 804 erheblich größeren Stichprobenumfänge jedoch nicht hinreichend sicher, um auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 99,9% zu extrapolieren. Infolgedessen wurde zur Ableitung der zulässigen Spannungen für Schweißverbindungen die aus dem einheitlichen Wöhlerlinien-Streuband [26] zu errechnende Streuung bei $N = 10^5$ zugrunde gelegt. Die Streuspanne beträgt $T_{s,80} = 1,35$. Damit und unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung lässt sich aus der Streuspanne $T_{s,80}$ die (logarithmische) Standardabweichung s_s der Spannung gemäß Gleichung (8) errechnen:

$$s_s = \frac{\lg(T_{s,80})}{t_{10} - t_{90}} \quad (8)$$

Werden in (8) die Zahlenwerte für $T_{s,80} = 1,35$ und für $t_{10} = 1,282$ bzw. $t_{90} = -1,282$ (Werte für die einseitige Schranke der Standard-Normalverteilung) eingesetzt, so ergibt sich $s_s = 0,050832$. Dieser Wert - multipliziert mit der einseitigen Schranke $t_{99,9} = -3,090$ der Standard-Normalverteilung für $P_{\bar{0}} = 99,9\%$ - gibt im normierten Wöhlerdiagramm für $N = 10^5$ den vertikalen Abstand der Lebensdauerlinie für $P_{\bar{0}} = 99,9\%$ von derjenigen für $P_{\bar{0}} = 50\%$ an. Die Zeitfestigkeitslinie für die zulässigen Spannungen der Schweißverbindungen, die parallel zur Lebensdauerlinie für $P_{\bar{0}} = 50\%$ verläuft, wurde im vorliegenden Fall aus den ertragbaren Spannungen nach Gleichung (9) berechnet.

$$S_{a,zul} = 10^{\lg(S_{a,50}) + t_{99,9} \cdot s_s} = S_{a,50} \cdot 10^{t_{99,9} \cdot s_s} \quad (9)$$

Die zulässigen Spannungen für die *gekerbten* Proben (Kerbfall W1-1) wurden - da hier keine vergleichbare Datenbasis wie für geschweißte Verbindungen verfügbar ist - aus den ertragbaren Spannungen abgeleitet, und zwar derart, dass $S_{a,zul} = S_{a,99,9}$ gesetzt wurde.

Übergangsgebiet zur Ersatzdauerfestigkeit

Hier wurde von analogen Betrachtungen wie für das Zeitfestigkeitsgebiet ausgegangen. Der Rechengang wurde durch Anwendung des Teilsicherheitsbeiwerts des Widerstands $\gamma_R = 1,65$ der DS 804 jedoch erheblich vereinfacht. Die zulässigen Spannungen für *Schweißverbindungen* wurden nach Gleichung (10) ermittelt.

$$S_{A,zul} = \frac{S_{A,50}}{1,65} \quad (10)$$

Zulässige Spannungen für die *gekerbten* Proben (Kerbfall W1-1) wurden - wie bereits für das Zeitfestigkeitsgebiet beschrieben - aus ertragbaren Spannungen gemäß $S_{A,zul} = S_{A,99,9}$ abgeleitet.

Betriebsfestigkeit

Die Methode der Ableitung zulässiger Spannungen mit Hilfe des Wöhlerlinienkatalogs [26], wie oben für das Zeitfestigkeitsgebiet beschrieben, war hier nicht anzuwenden, da der Wöhlerlinienkatalog ausschließlich auf Ergebnissen aus Einstufenversuchen beruht. Infolgedessen blieb wurden die zulässigen Spannungen für alle drei untersuchten Kerbfälle aus den ertragbaren Spannungen gemäß $\hat{S}_{a,zul} = \hat{S}_{a,99,9}$ abgeleitet.

6.2 Ergebnisse

Im Zusammenhang mit den vorgeschlagenen zulässigen Spannungen für Schweißverbindungen ist ein Vergleich der experimentell ermittelten Streuspannen $T_{s,80}$ (Tabelle 5-12, S. 38) mit dem Wert 1,35 aus dem einheitlichen Wöhlerlinien-Streuband von Interesse. Für das Zeitfestigkeitsgebiet ist aus Tabelle 5-12 zu ersehen, dass die experimentell ermittelten Streuspannen, die im vorliegenden Fall infolge der Parallelität der Lebensdauerlinien für $P_0 = \text{const.}$ für das gesamte Zeitfestigkeitsgebiet gelten, lediglich für den Kerbfall K4, $R = 0$ ($T_{s,80} = 1,40$) geringfügig größer sind, als der Wert 1,35 für $N = 10^5$ aus der normierten Wöhlerlinie für ferritische Schweißverbindungen. Da die Streuspannen gemäß Gleichung (8) die logarithmische Standardabweichung repräsentieren, könnte vermutet werden, dass die mit Hilfe der kleineren Streuspanne aus der normierten Wöhlerlinie ermittelten zulässigen Spannungen für den Kerbfall K4 nicht hinreichend sicher seien. Die experimentell ermittelte Standardabweichung ist jedoch ein Schätzwert für diejenige der (praktisch nicht bekannten) Grundgesamtheit. Aus statistischer Sicht ist bei zwei alternativen Werten für s_s stets demjenigen Wert der Vorzug zu geben, der mit einer vergleichsweise deutlich größeren Stichprobe bestimmt wurde. Unter der Annahme eines quantitativ vergleichbaren Streuverhaltens von Schwingfestigkeitswerten geschweißter Proben aus ferritischen und aus austenitischen Stählen bedeutet dies, dass die o. a. Methode der Ermittlung zulässiger Spannungen zuverlässige Werte liefert.

Ein ähnlicher Vergleich der experimentell ermittelten Streuspannen $T_{s,80}$ (Tabelle 5-13, S. 38) mit dem Wert 1,5 aus dem einheitlichen Wöhlerlinien-Streuband für den Bereich des Übergangsgebiets zur Dauerfestigkeit zeigt, dass – bis auf einen Fall (Kerbfall K4, $R = -1$ mit $T_{s,80} = 2$) in allen untersuchten Fällen die experimentell ermittelten Streuspannen kleiner als der Wert aus dem einheitlichen Wöhlerlinien-Streuband sind.

Für die Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsuntersuchungen lassen sich derartige Betrachtungen nicht anstellen, da eine Vergleichsbasis fehlt.

In Tabelle 6-1 sind die gemäß dem BAM-Vorschlag ermittelten Werte der zulässigen Spannungen für die Ersatzdauerfestigkeit den aus DIN 15 018 entnommenen Werte vergleichend gegenübergestellt. Die in der Tabelle angegebenen zulässigen Spannungen $S_{A,zul}$ nach DIN 15 018 wurden aus den Werten für $R = -1$ aus Tabelle 17 dieser Norm für die Beanspruchungsgruppe B6 und den Werkstoff St 52-3 abgeleitet, indem sie mit dem in Tabelle 18 (DIN 15 018) angegebenen Umrechnungen angepasst wurden. Da die derart erhaltenen Werte Oberspannungen sind, wurden sie auf Spannungsamplituden S_a umgerechnet.

In Tabelle 6-2 sind für die Betriebsfestigkeit Vergleichswerte aus DIN 15 018 mit den zulässigen Spannungen nach dem BAM-Vorschlag gegenübergestellt. Da hier keine Dauerfestigkeitsschranke existiert, wurden hilfsweise die entsprechenden Werte für $N = 10^7$ angege-

ben. Im Spannungsspielbereich N4 wird in DIN 15 018 lediglich „über $2 \cdot 10^6$ “ genannt. Anhand der Sekundärliteratur [29] wurde ermittelt, dass die experimentelle Basis für N4 10^7 Schwingspiele bedeutet. Für das Kollektiv S_{BAM} sind in DIN 15 018 direkt keine zulässigen Spannungen angegeben. Da das Kollektiv S_{BAM} genau in der Mitte zwischen S_1 und S_2 liegt, wurden die Spannungsangaben durch lineare Interpolation zwischen den zugehörigen Beanspruchungsgruppen aus Tabelle 14 der DIN ermittelt. Beispiel: Für den Spannungsspielbereich N3 ergibt sich für das Spannungskollektiv S_1 die Beanspruchungsgruppe B4, für S_2 entsprechend B5. Somit wurden zwischen den zulässigen Beanspruchungen für B4 und B5 der DIN 15 018 interpoliert.

Die Ergebnisse sind für die Einstufenversuche in Bild 5-7 (S. 48) bis Bild 5-12 und für die Betriebsfestigkeitsversuche in Bild 5-16 (S. 52) bis Bild 5-18 grafisch dargestellt. Diese Bilder enthalten die Wöhlerlinien für $P_0 = 10, 50, 90$ und $99,9\%$ sowie – gekennzeichnet mit „ $S_{a,zul,BAM}$ “ – die Linien zulässiger Spannungen. Bei den Betriebsfestigkeitsversuchen gelten, wie oben ausgeführt, die Linien für $P_0 = 99,9\%$ als Linien zulässiger Spannungen. Aus den Bildern ist zu ersehen, dass die Lage der Abknickpunkte von der Zeitfestigkeit zur Ersatzdauerfestigkeit (horizontaler Bereich) für $N \leq 10^7$ merklich variiert, für den Kerbfall K4 (Bild 5-12, S. 50), ergibt sich gar kein Abknickpunkt für $N \leq 10^7$. Dieser Effekt beruht auf der hier gewählten Art der Konstruktion der Wöhlerlinien: Der Abknickpunkt wurde als Schnittpunkt der jeweiligen Zeitfestigkeitslinie mit der (horizontalen) Ersatzdauerfestigkeitslinie definiert.

In Bild 6-1 bis Bild 6-10 sind die zulässigen Spannungen gemäß DIN 15 018 und die Werte nach den BAM-Vorschlägen vergleichend gegenübergestellt. Die dort eingetragenen DIN-Werte für die Dauerfestigkeit entsprechen denjenigen aus Tabelle 6-1; im Kontext dieser Tabelle ist auch die Ermittlung erläutert. Die Zeitfestigkeitslinie der nach DIN 15 018 zulässigen Spannungen wurde kerbfallspezifisch aus den dort aufgeführten Werten wie folgt abgeleitet: Für $N = 2 \cdot 10^5$ der $S_{A,zul}$ -Wert der Beanspruchungsgruppe B4, für $N = 6 \cdot 10^5$ der $S_{A,zul}$ -Wert der Beanspruchungsgruppe B5 und für $N = 2 \cdot 10^6$ der $S_{A,zul}$ -Wert der Beanspruchungsgruppe B6. Die Umrechnung auf Spannungsamplituden für $R = 0,5$ wurde, wie bereits weiter oben beschrieben, vorgenommen. In ähnlicher Weise wurden unter Beachtung der notwendigen Anpassung an die jeweiligen Spannungsverhältnisse R die zulässigen Spannungen für die Betriebsfestigkeit aus der Norm entnommen.

In Bild 6-7 sowie in Bild 6-8 sind die Linien der zulässigen Spannungen gemäß DIN für das Kollektiv S_0 bei geringen Schwingspielzahlen flacher als bei hohen Schwingspielzahlen. Die Ursache liegt darin, dass in diesen Fällen in der DIN der Stufensprung zwischen den oberen Beanspruchungsgruppen gemäß Tabelle 17 durch die max. zulässigen Spannungen für den Allgemeinen Spannungsnachweis (Lastfall HZ) begrenzt ist.

Wie bereits im Bericht Austenit I [4] festgestellt, sind auch im vorliegenden Fall keine grundsätzlich systematischen Beziehungen zwischen den zulässigen Spannungen gemäß DIN 15018 und den hier dargestellten BAM-Vorschlägen herzustellen. Deswegen wird im folgenden getrennt auf die Beanspruchungsverhältnisse und Kerbfälle eingegangen; darüber hinaus werden die Einstufen- und Betriebsfestigkeitsversuche separat betrachtet.

Einstufenversuche

- W1-1: Sowohl für $R=-1$ als auch für $R=0,5$ ist die DIN im wesentlichen konservativ; für $R = 0,5$ bezieht sich dies infolge fehlender experimenteller Befunde im Zeitfestigkeitsgebiet lediglich auf die Dauerfestigkeit.
- K1: Für $R = -1$ sind die DIN-Werte ab $N = 300.000$ konservativ, bei $R = 0,5$ jedoch unsicher. Auch hier bezieht sich letzteres infolge fehlender experimenteller Befunde im Zeitfestigkeitsgebiet lediglich auf die Dauerfestigkeit.
- K4: DIN ist für $R = -1$ und $R = 0,5$ bis etwa $N = 3 \cdot 10^6$ konservativ, darüber jedoch unsicher.

Betriebsfestigkeit

Es sei vorausgeschickt, dass der Teilfolgeumfang der idealisierten Spannungskollektive gemäß DIN 15018 10^6 Schwingspiele beträgt. Selbst bei einer guten Durchmischung der Amplituden im Kollektiv sind Ergebnisse, die mit weniger als 10^6 Schwingspielen erzielt wurden, im Sinne der klassischen Betriebsfestigkeit nicht unumstritten. Insofern besteht in der DIN 15018 ein gewisser Widerspruch zwischen dem Teilfolgeumfang und zumindest den Spannungsspielbereichen – einschließlich zugeordneter Beanspruchungsgruppen – N1 (bis $2 \cdot 10^6$) und N2 (bis $6 \cdot 10^5$).

Bei allen drei hier untersuchten Kerbfällen zeigt sich für $R = 0$ folgendes einheitliches Verhalten: Für das Kollektiv S_0 ist die DIN konservativ, für das Kollektiv S_{BAM} jedoch unsicher. Eine Ausnahme stellt die Versuchsreihe Kerbfall K1, S_{BAM} , mit $R = 0,5$ dar: bei diesen vergleichsweise hohen Mittelspannungen ist die DIN konservativ.

Diese Ergebnisse belegen, dass sich der hier in verschiedenen Kerbfällen vorliegende austenitische Werkstoff 1.4541 bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen und Belastungskollektiven im Hinblick auf sein Schwing- und Betriebsfestigkeitsverhalten nicht durch Ableitungen aus dem Regelwerk DIN 15018 beschreiben lässt.

Tabellen zu Kapitel 6

Tabelle 6-1: Nach dem BAM-Vorschlag abgeleitete Ersatzdauerfestigkeitswerte für 1.4541 im Vergleich zu zulässigen Spannungen für die Dauerfestigkeit nach DIN 15 018

| Kerbfall | Versuchs- serie | Beanspru- chungs- verhältnis | $S_{A,50}$ in N/mm ² | $S_{A,99,9}$ in N/mm ² | $S_{A,zul}$ in N/mm ² nach BAM | $S_{A,zul}$ in N/mm ² nach DIN** |
|-----------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| W1-1 (Lochstab) | 4 | R = -1 | 158,8 | 141,7 | 141,7 | 105,0 |
| | 5 | R = 0,5 | 112,7 | 95,2 | 95,2 | 60,4 |
| | Austenit I | R = 0 | 113,7 | 90,1 | 90,1 | 87,5 |
| K1 (Stumpfstoß) | 10 | R = -1 | 158,6 | 108,9 | 96,1 | 75,0 |
| | 11 | R = 0,5 | 68,4 | 53,7 | 41,4 | 47,3 |
| | Austenit I | R = 0 | 120,4 | 82,9 | *77,5 | 62,5 |
| K4 (Kreuzstoß) | 16 | R = -1 | 33,3 | 14,7 | 20,2 | 27,0 |
| | 17 | R = 0,5 | 23,1 | 18,4 | *15,2 | 20,2 |
| | Austenit I | R = 0 | 24,2 | 18,6 | *14,7 | 22,5 |

*) Wert bei $N = 10^7$

***) Werte für St 52-3

Tabelle 6-2: Nach dem BAM-Vorschlag abgeleitete zulässige Spannungen für 1.4541 im Vergleich zu zulässigen Spannungen für die Betriebsfestigkeit nach DIN 15 018

| Kerbfall | Versuchsserie | Beanspru- chungs- verhältnis | Kollektiv | $\hat{S}_{a,50} (N=10^7)$ in N/mm ² | $\hat{S}_{a,zul,BAM} (N=10^7)$ in N/mm ² | $\hat{S}_{a,zul} (N=10^7)$ in N/mm ² nach DIN |
|-----------------|---------------|------------------------------------|-----------|---|--|--|
| W1-1 (Lochstab) | 2 | R = 0 | S_0 | 172,2 | 147,2 | 134,7 |
| | 3 | R = 0 | S_{BAM} | 118,0 | 96,8 | 98,0 |
| K1 (Stumpfstoß) | 7 | R = 0 | S_0 | 176,2 | 149,5 | 125,0 |
| | 8 | R = 0 | S_{BAM} | 98,5 | 71,7 | 75,5 |
| | 9 | R = 0,5 | S_{BAM} | 81,0 | 61,8 | 54,4 |
| K4 (Kreuzstoß) | 14 | R = 0 | S_0 | 61,2 | 46,5 | 45,0 |
| | 15 | R = 0 | S_{BAM} | 37,6 | 32,7 | 27,2 |

Bilder zu Kapitel 6

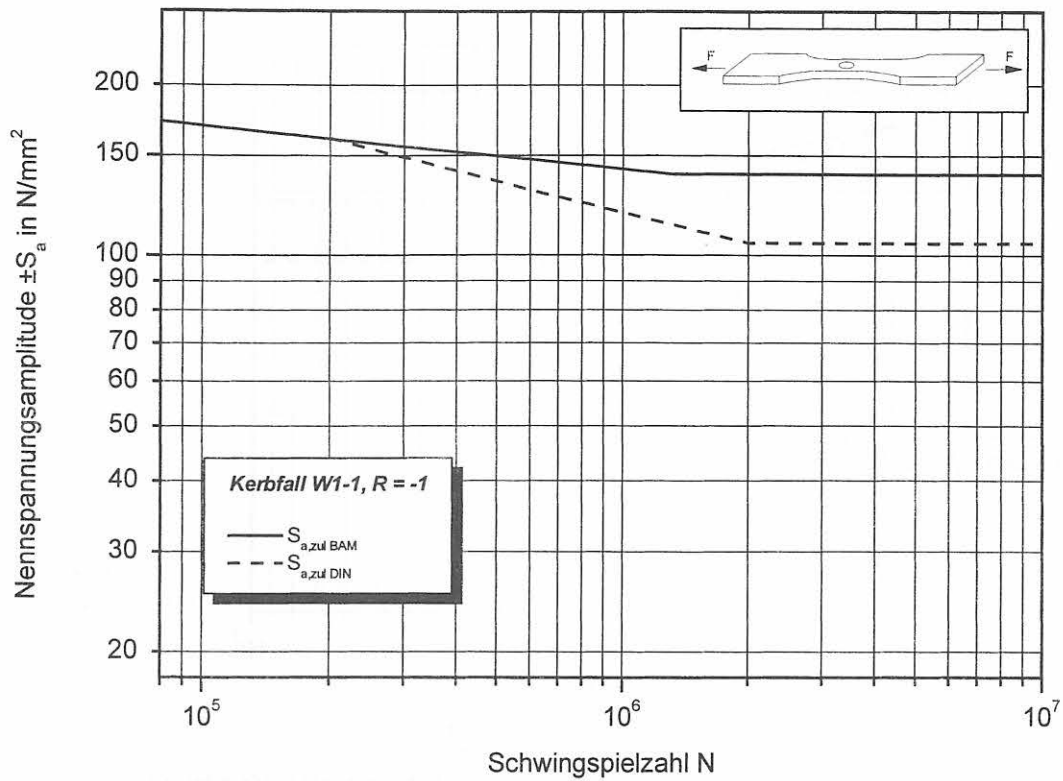


Bild 6-1: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall W1-1, Einstufenversuch, R = -1

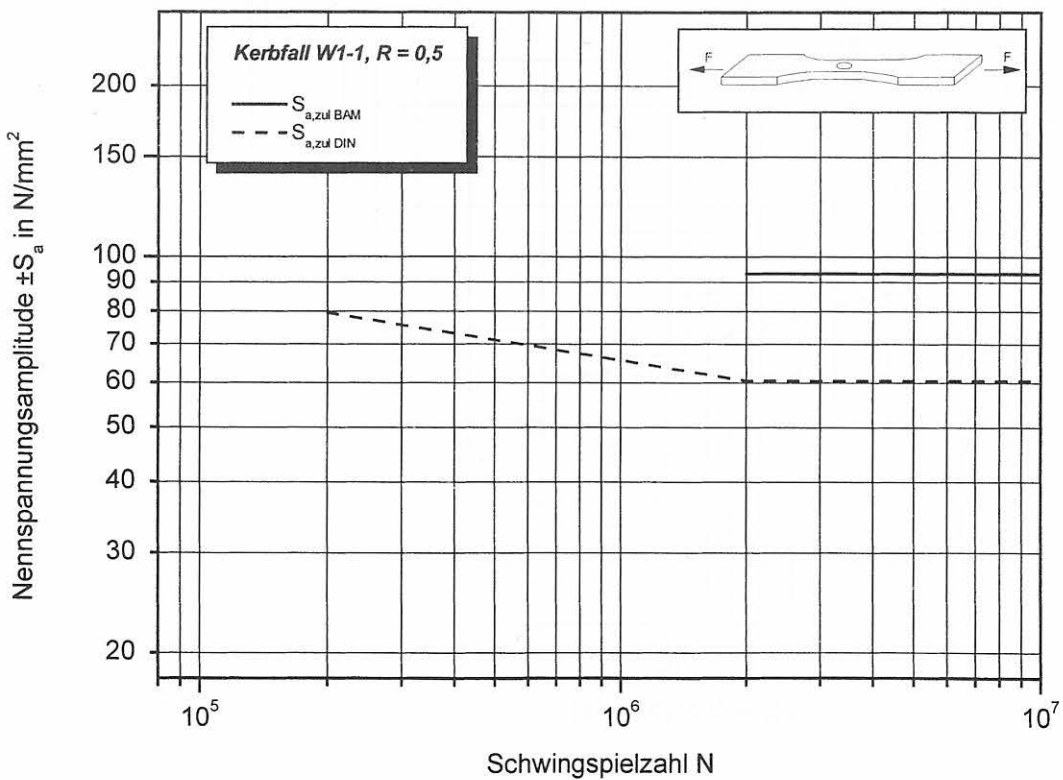


Bild 6-2: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall W1-1, Einstufenversuch, R = 0,5

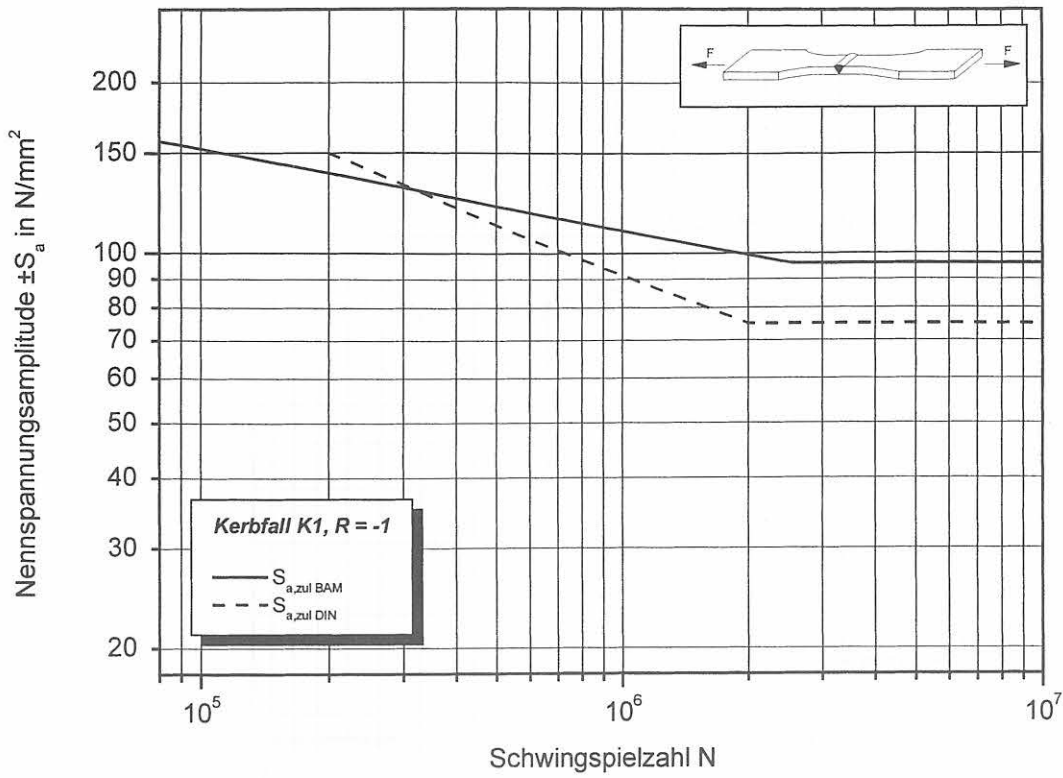


Bild 6-3: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K1, Einstufenversuch, R = -1

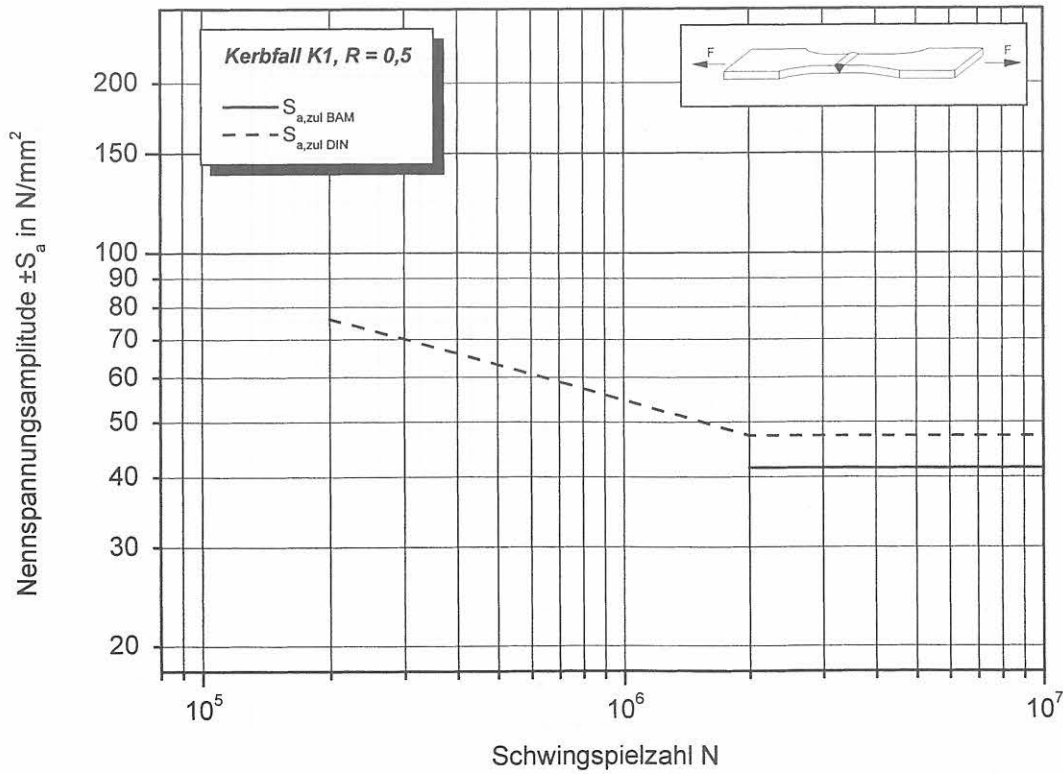


Bild 6-4: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K1, Einstufenversuch, R = 0,5

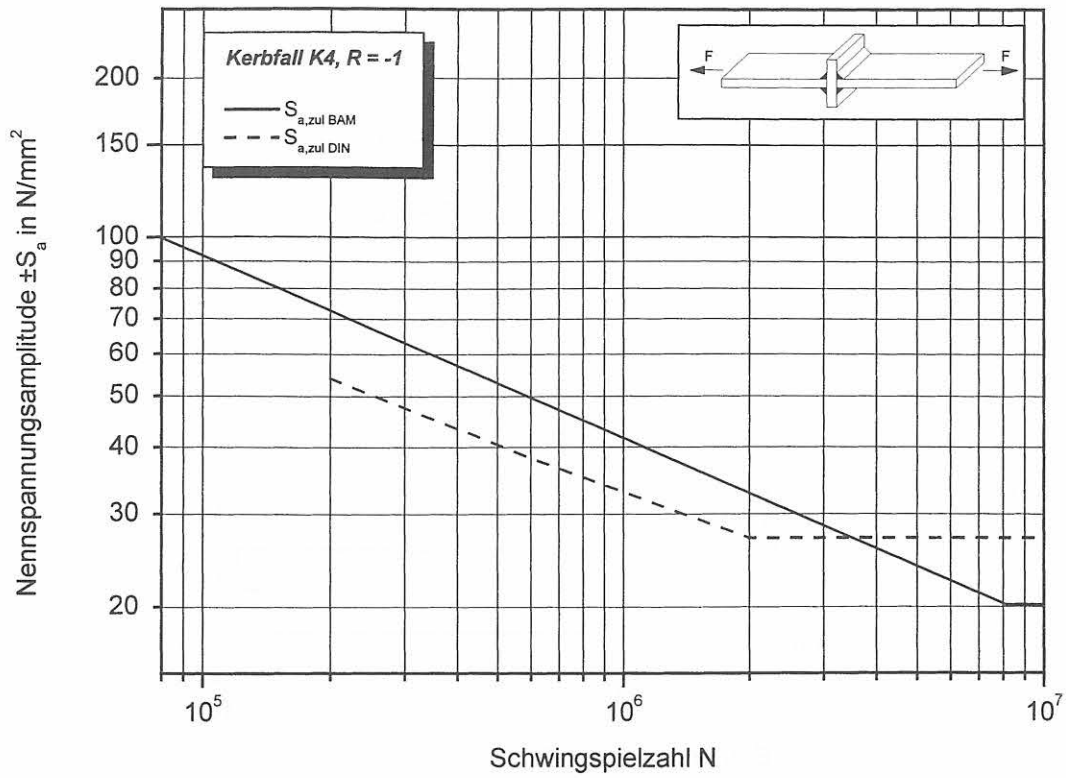


Bild 6-5: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K4, Einstufenversuch, R = -1

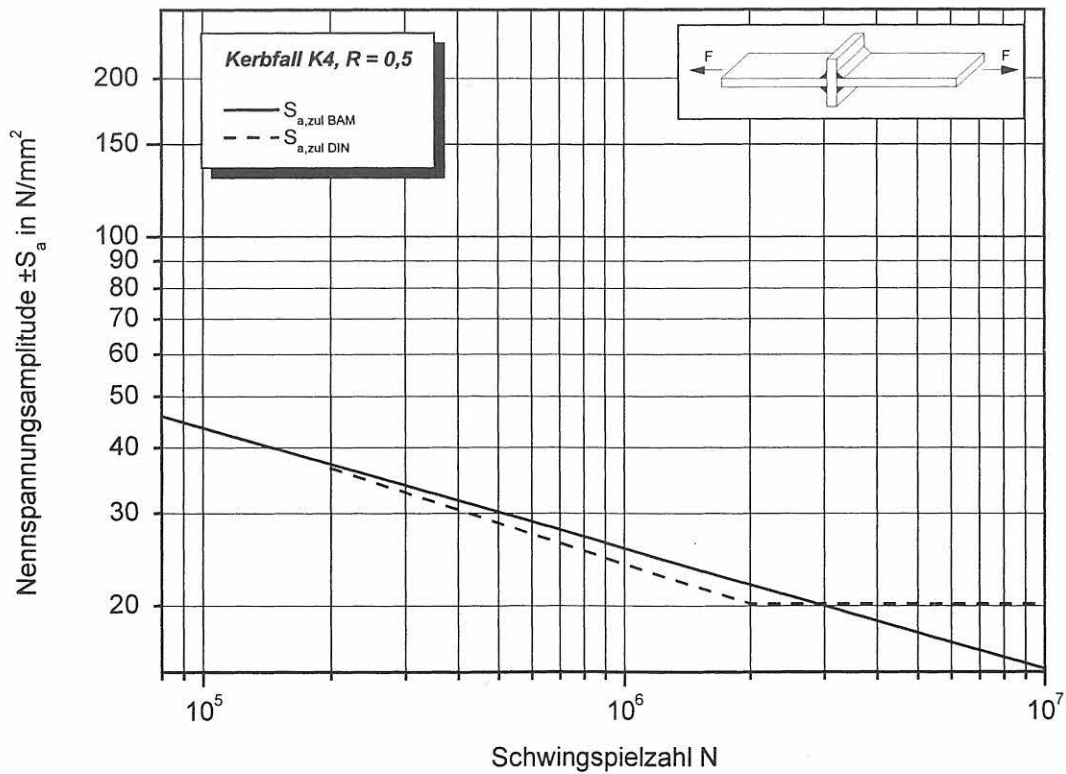


Bild 6-6: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K4, Einstufenversuch, R = 0,5

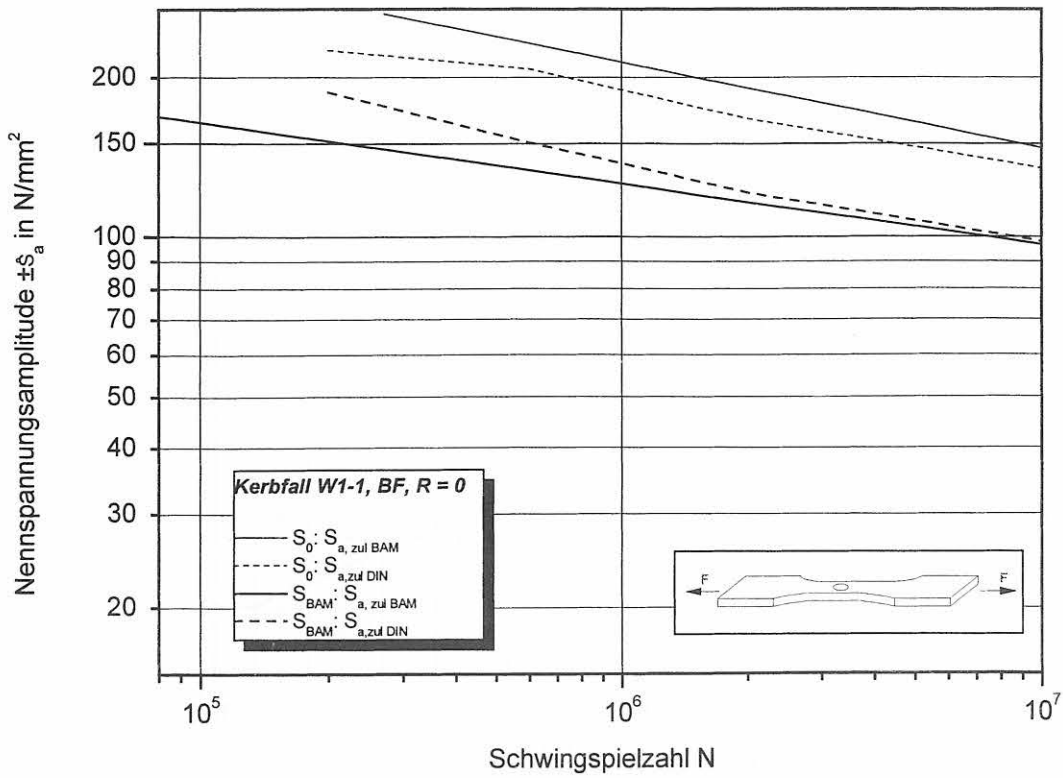


Bild 6-7: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall W1-1, Betriebsfestigkeit, R = 0

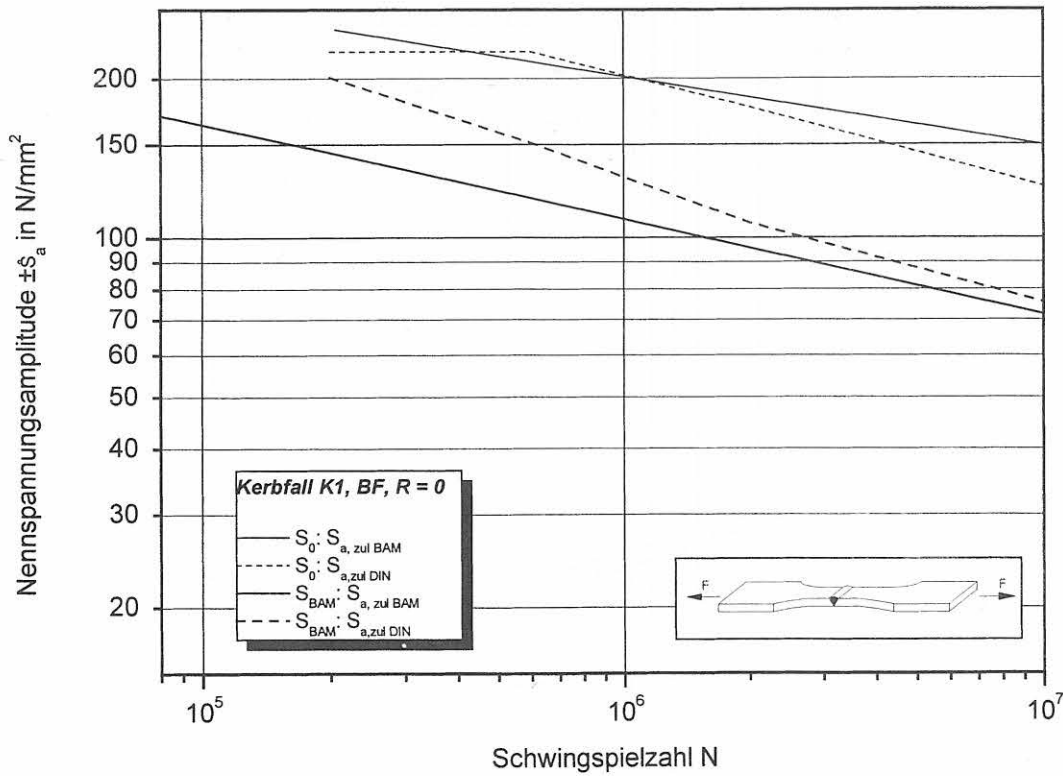


Bild 6-8: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K1, Betriebsfestigkeit, R = 0

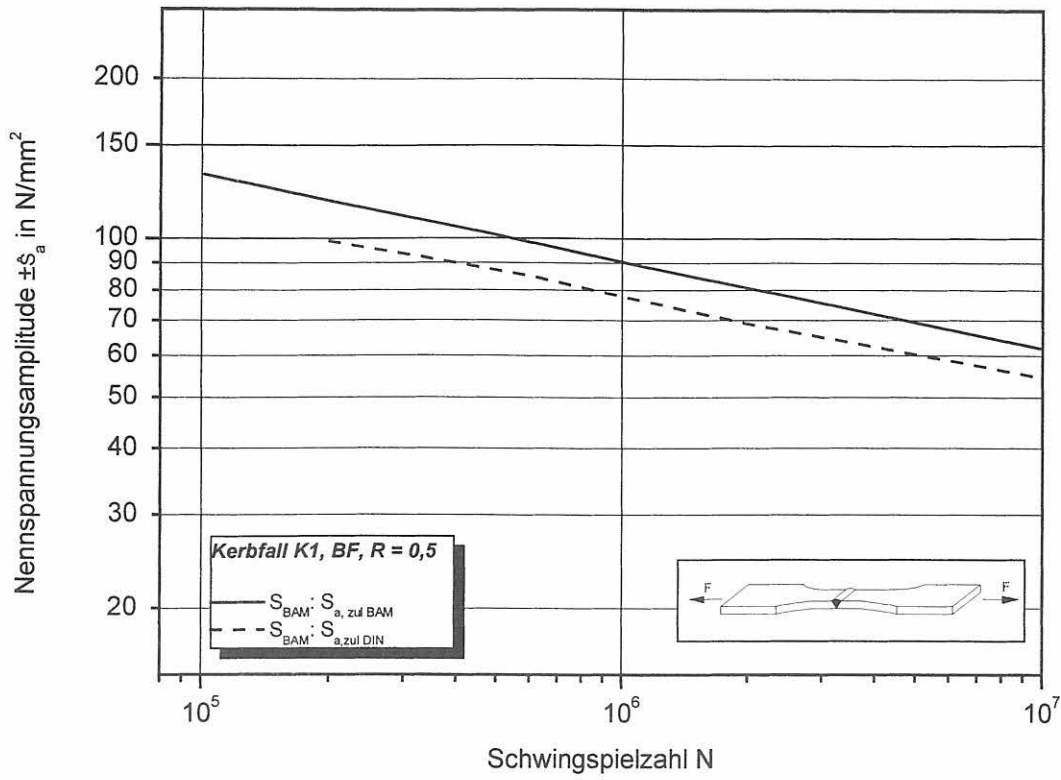


Bild 6-9: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K1, Betriebsfestigkeit, R = 0,5

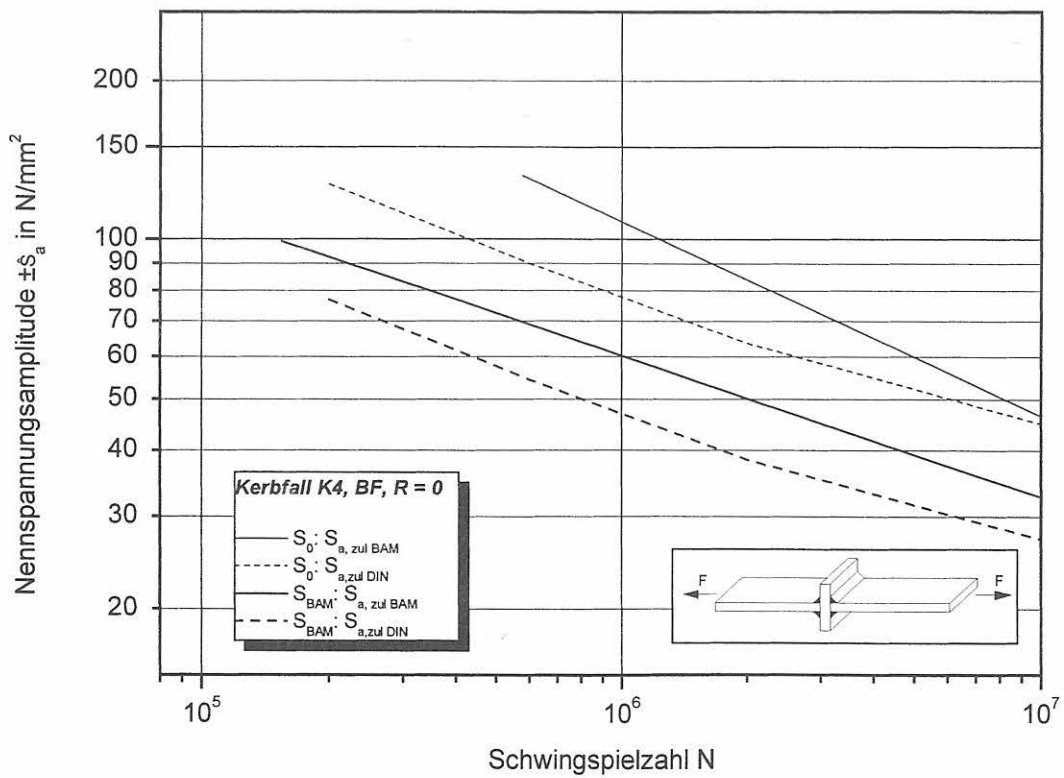


Bild 6-10: Vergleich der zulässigen Spannungen nach DIN 15018 mit dem BAM-Vorschlag; Kerbfall K4, Betriebsfestigkeit, R = 0

7 Umsetzung der erarbeiteten Werte für die KTA 3905

7.1 Wöhlerlinien zulässiger Spannungen

Mit den im vorliegenden Bericht erörterten Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurde die notwendige Basis zur Ableitung zulässiger Spannungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Lastanschlagspunkten aus austenitischen Stählen gemäß KTA 3905 geschaffen. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Anwendung der hier dargelegten Werte zulässiger Spannungen ein gutes Verständnis einhergehend mit einem umfassenden ingenieurwissenschaftlichen Können über die Zusammenhänge zwischen bauteilähnlichen Proben und den real auszulegenden bzw. im Betriebsfestigkeitsnachweis zu bewertenden Bauteilen voraussetzt.

Aus Tabelle 7-1 ist die Zuordnung der Beanspruchungsgruppen zu Spannungsspielbereichen und zu Spannungskollektiven der DIN 15 018 zu ersehen. Die in diesem Bericht sowie im vorausgegangenen Vorhaben Austenit I [4] beschriebenen Schwingfestigkeitswerte und die daraus abgeleiteten zulässigen Spannungen gelten für die in der Tabelle grau hervorgehoben Felder; das sind die Zeilen der Spannungskollektive S_0 , S_{BAM} und S_3 . In den Einstufenversuchen (S_3) wurden an Proben der Kerbfälle W1-1, K1 und K4 Versuche bei $R = -1$, $R = 0$ und $R = 0,5$ durchgeführt. Die Betriebsfestigkeitsversuche wurden mit den Kollektiven S_0 und S_{BAM} an Proben der Kerbfälle W1-1, K1 und K4 bei $R = 0$ durchgeführt; zusätzlich wurde eine Lebensdauerlinie an Proben des Kerbfalles K1 mit dem Kollektiv S_{BAM} bei $R = 0,5$ aufgenommen. Angaben zur Mittelspannungsempfindlichkeit werden im Abschnitt 5.3 (S. 26) und 7.2 (S. 71) mitgeteilt.

Die zulässigen Spannungen für die Kollektive S_1 bzw. S_2 können durch Interpolation zwischen den Werten der zulässigen Spannungen gemäß BAM-Vorschlag für die Kollektive S_0 und S_{BAM} bzw. S_{BAM} und S_3 bestimmt werden.

In Tabelle 7-2 werden die ermittelten zulässigen Spannungen im Hinblick auf ihre Aufnahme in den Anhang F der KTA 3905 in gleicher Form dargestellt, wie die Ergebnisse aus dem Vorhaben Austenit I [4] dort bereits vorliegen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass hier – im Sinne der durchgängig einheitlichen Darstellung in diesem Bericht – stets *Spannungsamplituden* und nicht *Oberspannungen* angegeben werden. Die Werte für S_3 und $R = 0$ wurden aus [4] übernommen.

Die Ermittlung der zulässigen Spannungen erfolgt nach der Haibach-Gleichung (11):

$$\frac{S_{a,zul}}{S_D} = \left(\frac{N}{N_D} \right)^{-\left(\frac{1}{k}\right)} \quad (11)$$

In (11) ist S_D die Dauerfestigkeit bzw. der Bezugswert der Spannung; dies ist in der Regel die Spannungsko-

ordinate des Abknickpunkts. N_D ist der Bezugswert der Lebensdauer bzw. die Schwingspielzahl am Abknickpunkt.

Auf die erneute Wiedergabe der Wöhler- und Lebensdauerlinien mit den zulässigen Spannungen wird an dieser Stelle verzichtet; es sei auf die entsprechenden Darstellungen in Bild 6-1 (S. 65) bis Bild 6-10 im Abschnitt 6.2 verwiesen.

Für die Übernahme der zulässigen Spannungen in die KTA 3905 können die hier angegebenen Spannungsamplituden S_a in Oberspannungen S_o gemäß folgender Beziehung (12) umgerechnet werden:

$$S_o = \frac{2 \cdot S_a}{1 - R} \quad (12)$$

7.2 Mittelspannungsabhängigkeit zulässiger Spannungen

Die experimentell erforschte Mittelspannungsabhängigkeit (s. Abschnitt 5.3, S. 26) wurde derart ausgewertet, dass Tabellen für die zulässigen Spannungen in Abhängigkeit vom Beanspruchungsverhältnis R und der Beanspruchungsgruppe (vgl. Tabelle 7-1, S. 76) für die drei untersuchten Kerbfälle erstellt wurden. Die Form der Darstellung lehnt sich dabei an die DIN 4132 an. Diese Norm über Kranbahnen/Stahltragwerke beruht auf derselben Datenbasis wie die DIN 15 018.

Die experimentell gesicherten Ausgangswerte zulässiger Spannungsamplituden wurden für die Beanspruchungsverhältnisse $R = 0$ und $R = -1$ sowohl im Zeitfestigkeits- als auch im Übergangsgebiet zur Dauerfestigkeit bestimmt. Für $R = 0,5$ wurden die jeweiligen Übergangsgebiete gleichfalls vollständig ermittelt; das Zeitfestigkeitsgebiet konnte jedoch nur für den Kerbfall K4 bestimmt werden, da für die Kerbfälle W1-1 und K1 die Oberspannungen $S_o > R_{p0,2}$ sind (vgl. Fußnote zu Tabelle 3-3, S. 15). Dies ist gemäß KTA 3905, Abschnitt 5.3.1.2 (Allgemeiner Spannungsnachweis) nicht zulässig.

Ausgehend von den experimentell gesicherten Stützstellen zulässiger Spannungsamplituden wurde für jede Beanspruchungsgruppe und jeden Kerbfall die Mittelspannungsempfindlichkeit (vgl. Gleichung (3) auf S. 26) aus den Wöhlerlinien bestimmt. Zur Berechnung der zulässigen Spannungsamplituden für R -Werte > -1 und $< 0,5$ wurden mit Hilfe der jeweiligen Mittelspannungsempfindlichkeit die interpolierten Spannungswerte nach Gleichung (13) berechnet.

$$S_{A,zul}(R) = \frac{S_{A,zul}(R = -1)}{\frac{1+R}{1-R} + \frac{1}{M}} \quad (13)$$

Die Ergebnisse sind in [Tabelle 7-3](#) bis [Tabelle 7-6](#) dargestellt.

Für die unter Randombeanspruchung (Kollektive S_0 und S_{BAM}) ermittelten Betriebsfestigkeitskennwerte kann keine Mittelspannungsabhängigkeit in der vorstehend dargelegten tabellarischen Form angegeben werden, da nur bei *einem* Kerbfall (K1) und einer Kollektivform (S_{BAM}) die Mittelspannung variiert wurde. Der in diesem Fall ermittelte M-Wert wurde bereits in Abschnitt 5.3, S. 26 zu $M = 0,22$ angegeben. Eine Umrechnung auf andere Spannungsspielbereiche bzw. Beanspruchungsgruppen erscheint nicht sinnvoll, da der Teilfolgeumfang des Lastkollektivs 10^6 Schwingspiele beträgt. Siehe auch Stichwort „Betriebsfestigkeit“, S. 63.

7.3 Abgrenzung zu einigen anderen Regelwerken

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden zulässige *Nennspannungen* ermittelt, die am Kerbfallkatalog der DIN 15 018 orientiert sind. Die Versuche wurden an bauteilähnlichen Proben durchgeführt; die Ergebnisse sind somit quasi Bauteilwöhlerlinien. Das Nennspannungskonzept lässt sich bei schwingbeanspruchten Bauteilen vor allem dort sinnvoll anwenden, wo es gelingt, die Vielzahl möglicher Kerbfälle durch Zusammenfassen zu Kerbfallklassen einzuschränken. Diese Möglichkeit ist z. B. bei ermüdungsbeanspruchten Schweißverbindungen gegeben. Die erarbeiteten zulässigen Spannungen sind somit *ausdrücklich nicht* als Datenbasis für Betriebsfestigkeitsnachweise nach dem örtlichen Konzept geeignet. Hierfür kann aber im Falle nicht geschweißter Bauteile die im Abschnitt 5.7.2 beschriebene Dehnungswöhlerlinie benutzt werden.

Im allgemeinen werden in den Regelwerken Spannungen angegeben, die aus experimentell ermittelten, ertragbaren *Nennspannungen* mit statistisch gesicherten Überlebenswahrscheinlichkeiten abgeleitet sind. Die zulässigen Nennspannungen weisen dann noch gewisse Sicherheitsabstände zu den ertragbaren Spannungen auf, die mit den Überlebenswahrscheinlichkeiten in unterschiedlicher Höhe verknüpft sind. Sie sind desto zuverlässiger, je größer die Stichprobenumfänge der Experimente sind. Darüber hinaus ist es wünschenswert, dass die einzelnen Versuchsergebnisse aus den Experimenten in tabellarischer Form zugänglich sind, um die Nachvollziehbarkeit des Rechengangs sicherzustellen. Ein ausführlicher Überblick über diese Problematik wird in [27], s. [Tabelle 7-7](#), gegeben. Darin werden die europäischen Regelwerke

- DIN 15018: Teil 1 (1984): Krane – Grundsätze für Stahltragwerke – Berechnung
- DS 804: Vorschriften für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke – Bemessung, Deutsche Bundesbahn, 1984
- Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau.

Deutsche Fassung DIN V ENV 1993-1-1: 1992

- BS 7608: Code for practice for fatigue design and assessment of steel structures. BSI, London 1993
- IIW: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile. International Institute of Welding, 1996 [35]
- FKM: Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, [32]. Die Richtlinie wurde auf der Basis ehemaliger TGL-Standards, der früheren Richtlinie VDI 2226 sowie Regelungen der DIN 18 800, des Eurocode 3 und der IIW-Empfehlung [35] erarbeitet.

hinsichtlich der Herkunft ihrer Datenbasis, den Wöhlerlinienparametern, und den Teilsicherheitsfaktoren und weiteren Aspekten vergleichend gegenübergestellt.

Die Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses in den genannten Regelwerken ist aus [Tabelle 7-8](#) zu ersehen. Diese Angaben beziehen sich auf geschweißte Verbindungen; bei nicht geschweißten Bauteilen ist der Eigenspannungseinfluss angemessen zu berücksichtigen. Dies ist in den Regelwerken im einzelnen dargelegt.

In der 1982 erschienenen DIN-Schrift „Berechnungsgrundsätze für Triebwerke in Hebezeugen“ [36] finden sich Angaben zum Betriebsfestigkeitsnachweis an den im Titel genannten Komponenten. Geschweißte Verbindungen sind damit a priori ausgeschlossen. Die „Berechnungsgrundsätze“ basieren auf dem Nennspannungskonzept. Für den Festigkeitsnachweis werden in Tabelle 9 von [36] Biegezugfestigkeitswerte σ_{bw} für verschiedene ferritische Baustähle angegeben, die jedoch offensichtlich nicht aus Versuchen, sondern aus der Abschätzung (14) stammen.

$$\sigma_{bw} = \frac{R_m}{2} \quad (14)$$

In nicht ganz zweifelsfreier Formulierung werden Umlaufbiegeversuche an polierten Rundstäben mit 10 mm Durchmesser erwähnt. Die Neigung der Wöhlerlinie wird aus der Zugfestigkeit R_m bei $5 \cdot 10^3$ Schwingspielen und dem vorstehend erläuterten σ_{bw} -Wert (gleich Dauerfestigkeit) bei $5 \cdot 10^6$ Schwingspielen (gleich Abknickpunkt) bestimmt. Es finden sich Korrekturen zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses, des Spannungszustands sowie des Form-, Oberflächen- und Größeneinflusses. Im Betriebsfestigkeitsnachweis muss geprüft werden, ob die ermittelten Lastspannungen kleiner als die mit einem angegebenen Sicherheitsbeiwert korrigierten Spannungen aus den „Berechnungsgrundsätzen“ [36] sind. Im Hinblick auf den Vergleich mit den in diesem Bericht beschriebenen zulässigen Spannungen sind die „Berechnungsgrundsätze“ weniger geeignet,

da ausschließlich ungeschweißte Bauteile aus ferritischen Stählen betrachtet werden.

Seit einigen Jahren wird im europäischen Komitee für Normung (CEN) eine Krannorm EN 13001 erarbeitet, die in ihrem Teil 3-1 „Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken“ die Anforderungen an den Betriebsfestigkeitsnachweis definieren soll. Zur Zeit der Abfassung dieses Berichts (März 2003) liegt ein entsprechender Normentwurf [37] vor, der noch nicht abschließend beraten ist. In [38] wird diese Krannorm erläutert und mit der DIN 15 018 verglichen. Im folgenden werden einige Ausführungen dazu wiedergegeben. Dabei wird ausschließlich der Betriebsfestigkeitsnachweis behandelt.

Die prENV 13001-3-1 ist sehr eng an den Eurocode 3, s. o., angelehnt. Dies lässt z. B. der gemeinsame Kerbfallkatalog erkennen. Die charakteristische Beanspruchung ist die Schwingbreite (doppelte Amplitude) der *Nennspannung*, lokale Spannungsüberhöhungen werden nicht betrachtet. Eine Mittelspannungsabhängigkeit für Schweißverbindung wird als vernachlässigbar angenommen. Die Wöhlerlinie ist geteilt: Im Bereich zwischen 10^4 bis $5 \cdot 10^6$ Schwingspielen beträgt die Neigung $m = 3$, danach – bis 10^8 Schwingspiele – ist $m = 5$. Die derart erzeugte Bauteilwöhlerlinie zulässiger Spannungen gilt für $P_{\bar{v}} = 97,7 \%$, die notwendigen Werte sind im Regelwerk, nach Klassen des Spannungszeitverlaufparameters s aufgeteilt, tabelliert. Die Klassen S des Spannungszeitverlaufparameters sind in ihrer Bedeutung mit den Beanspruchungsgruppen B der DIN 15 018 vergleichbar. Auf die Wiedergabe weiterer Details, wie z. B. Teilsicherheitsbeiwerte, die bei nichtlinearen Zusammenhängen zwischen äußeren Lasten und den Schnittkräften angewandt werden müssen, wird hier verzichtet; es sei auf [37] und [38] verwiesen.

Von den vorstehend erläuterten Regelwerken ermöglicht allein die FKM-Richtlinie [32] einen rechnerischen Festigkeitsnachweis für Schweißverbindungen (Kerbfallkatalog aus [35] übernommen) aus austenitischen Stählen. Die erforderlichen Bauteilwöhlerlinien können aus den statischen Werkstoffkennwerten oder auf der Basis experimenteller Ergebnisse abgeschätzt werden. Im Hinblick auf Schweißverbindungen nichtrostender Stähle wird jedoch folgendes einschränkend angemerkt (Zitat aus [32]):

„Für andere Werkstoffgruppen (bedingt schweißbarer Stahl, nichtrostender Stahl, schweißbarer Eisengusswerkstoff, andere schweißbare Aluminiumlegierungen) gilt die Berechnung als vorläufig und ist mit Vorsicht anzuwenden.“

Im Hinblick auf die Kompatibilität mit dem Bericht Austenit I und die in der Aufgabenstellung vereinbarte Zielsetzung der Untersuchung wird hier im wesentlichen die nennspannungsbasierende DIN 15018 sowie die DS 804 betrachtet. Die Datenbasis der DIN 15018 ist nicht publiziert, die der DS 804 ist allgemein zugänglich und wurde im Wöhlerlinienkatalog von OLMIER und RIT-

TER [26] veröffentlicht. In den Teilen I ... III des Wöhlerlinienkatalogs, die die für den vorliegenden Bericht relevanten Kerbfälle Stumpfstoß und Kreuzstoß beinhalten, wurden insgesamt 9350 Einzelversuche aus 799 Versuchsreihen, die in 183 Literaturstellen verfügbar sind, ausgewertet. Aus den Versuchen wurde ein einheitliches Wöhlerlinien-Streuband angegeben, das für alle Schweißverbindungen aus Baustählen gültig ist. Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass diese Regelwerke ausschließlich für ferritische Baustähle gelten. Die zulässigen Spannungen für Schweißverbindungen werden im einzelnen wie folgt aus ertragbaren Spannungen abgeleitet:

DIN 15 018: Die Sicherheit von 4/3 gegen die mit $P_{\bar{v}} = 90\%$ ertragbaren Spannungen entspricht einer resultierenden Überlebenswahrscheinlichkeit von etwa $P_{\bar{v}} = 99,9\%$.

DS 804: Die in diesem Regelwerk berücksichtigte Teilsicherheit des Widerstands $\gamma_r = 1,65$ gegenüber den mit $P_{\bar{v}} = 50\%$ ertragbaren Spannungen ergibt gleichfalls eine Überlebenswahrscheinlichkeit von rund 99,9%. Nach dieser Strategie wurden im vorliegenden Fall die zulässigen Nennspannungen aus den ertragbaren abgeleitet.

7.4 Übertragbarkeit und weitere Einflussgrößen

Nennspannungskonzepte können auch als Verfahren zur Umrechnung von an Proben experimentell ermittelten Ergebnissen auf Bauteile interpretiert werden. Über dieses Problem der Übertragbarkeit wird in zahlreichen Veröffentlichungen berichtet. Damit der Anwender sachgerecht vorgehen kann, müssen ihm die bei der Versuchsdurchführung und –auswertung angewandten Strategien vermittelt werden. Dies ist im vorliegenden Bericht geschehen: Der Probenwerkstoff wurde hinreichend charakterisiert. Die Probenform und –maße sind detailliert dargestellt. Die Qualität der Proben wurde gemäß KTA-Anforderungen bestimmt und dokumentiert. Jede einzelne Probe wurde hinsichtlich der geometrischen Imperfektionen wie Kantenversatz und Winkelschrumpf vermessen; die Ergebnisse sind in den Tabellen zur Schwingfestigkeitsprüfung mit aufgeführt. Die Versuchsdurchführung ist in allen Details (z. B. auch Angabe der Prüffrequenz) dargelegt. Insofern hat der Anwender der Ergebnisse weitaus mehr Informationen zur Verfügung, als ihm z. B. in der DIN 15 018 gegeben werden. Dies ermöglicht ihm, das Problem der Übertragbarkeit auf der soliden Grundlage von Fakten zu lösen.

Mittelspannungseinfluss

Hierzu wurde im Abschnitt 7.2 Näheres ausgeführt. Im vorliegenden Fall bleibt festzustellen, dass eine nicht zu vernachlässigende Mittelspannungsabhängigkeit besteht. Dies wird bei Betrachtung der Zahlenwerte in der Tabelle 7-3 bis Tabelle 7-6 erkennbar.

Größen- und Oberflächeneinfluss

Es gibt den

- technologischen
- geometrischen
- statistischen und den
- oberflächentechnischen

Größeneinfluss. Detaillierte Erörterungen und Hinweise zur Berücksichtigung sind in [17] und [39] zu finden. Eine praxisnahe Vorgehensweise zur Berücksichtigung des technologischen Größenfaktors, der die vorstehend genannten Einflüsse umfasst, wird in der FKM-Richtlinie [32] im Abschnitt 1.2.2 bzw. 2.3.3 (Rauheit) gegeben. Im Abschnitt 2.3.7 der FKM-Richtlinie wird ein Blechdickenfaktor eingeführt. Damit lassen sich beispielsweise die Ermüdungsfestigkeitswerte der hier untersuchten 10 mm dicken Bleche auf größere Blechdicken umrechnen. Dies gilt auch für Schweißverbindungen.

Spannungsverteilung/Stützwirkung

Die im vorliegenden Bericht dargelegten Werte wurden unter Zug-Druck-Schwell- und Wechselbeanspruchung an 10 mm dicken Flachproben erarbeitet. Die einzige Ausnahme bilden die Wechseltorsionsversuche an den Rohrproben (vgl. Bericht Austenit I [4]). Für den Beanspruchungsfall „Biegung“ können die angegebenen Werte ohne Einschränkung angewandt werden. Infolge der dabei auftretenden Stützwirkung stellen die unter Axialbeanspruchung ermittelten Festigkeitswerte konservative Abschätzungen dar. Praktische Hinweise zur Ermittlung der Dauerfestigkeit unter Zug-Druck, Biegung und Torsion bei Berücksichtigung der wirksamen geometrischen und werkstofftechnischen Einflussparameter finden sich z. B. im Abschnitt 2.2 der FKM-Richtlinie [32]. Hier wird auch dargelegt, wie zulässige Nennspannungsamplituden aus statischen Festigkeitswerten abgeleitet werden können. Damit besteht die Möglichkeit, die im vorliegenden Bericht angegebenen Schwingfestigkeitswerte auf verwandte Werkstoffe mit abweichender statischer Grundfestigkeit umzurechnen.

So sind z. B. für die Auslegung eines auf Biegung beanspruchten Bolzens die mitgeteilten zulässigen Spannungen nur begrenzt, d. h. bei demselben K_t , verwendbar. Bei davon abweichenden Werten der Formzahl können Unsicherheiten auftreten, deren Ursache unter der Überschrift „Kerbwirkungszahl“ erörtert ist.

Gemäß [39] gilt, dass bei großen biegebeanspruchten Bauteilen ($D > 100$ mm) - wegen der geringen Stützwirkung - Wöhlerlinien für Axialbeanspruchung und nicht

für Biegebeanspruchung verwendet werden sollten. Das gleiche gilt sinngemäß auch für große torsionsbeanspruchte Bauteile, wobei die Wöhlerlinie für Torsionsbeanspruchung aus der Wöhlerlinie für Axialbeanspruchung zu bestimmen ist. Um den Fehler bei dieser Umrechnung klein zu halten, sind jedoch gesicherte Grenzwerte der Ermüdungsfestigkeit bei Axial- und Torsionsbeanspruchung wünschenswert. Siehe dazu Beziehung (8.28) mit (8.29) in Abschnitt 8.5.2.1 von [39]. In diesen Fällen unterbleibt eine weitere Berücksichtigung des geometrischen Größeneinflusses, da mit den Wöhlerlinien für Axialbeanspruchung keine Überbewertung der Stützwirkung besteht.

Kerbwirkungszahl K_t

Die Kerbwirkungszahl berücksichtigt den Einfluss der Gestalt (Form und Größe) auf die Ermüdungsfestigkeit nicht-geschweißter Bauteile. Im Bericht Austenit I [4] wurde im Abschnitt 5.1.2 auf S. 57 ausgeführt (Zitat):

Die Kerbempfindlichkeit wird im Hinblick auf die dauerfest ertragbare Spannungsamplitude durch die Kerbwirkungszahl K_t gekennzeichnet. Diese ist definiert als der Quotient aus der Dauerfestigkeit bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$) des glatten (polierten) Prüflings mit $K_t = 1$ zur Dauerfestigkeit bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$) des gekerbten Prüfstabes mit $K_t > 1$. Im vorliegenden Fall waren zwei Voraussetzungen dieser Definition nicht erfüllt:

- Die Grundwerkstoffprobe war nicht poliert, die Blechoberflächen waren im Anlieferungszustand belassen (Walzhaut)
- Die Beanspruchung war schwellend im Zugbereich ($R = 0$)

Infolgedessen wird hier ein Ersatzwert für die Kerbwirkungszahl definiert, der als K_t^* bezeichnet wird. Es ergeben sich folgende experimentell gesicherten Werte für die Lochstäbe bei $P_0 = 50$ %:

- W1-1 mit $K_t = 2,4$: $K_t^* = 1,16$
- W1-2 mit $K_t = 4,2$: $K_t^* = 2,20$

... Die experimentell bestimmten K_t^* -Werte charakterisieren die vergleichsweise geringe Kerbempfindlichkeit des hier untersuchten Werkstoffs 1.4541. (Zitat Ende)

Für Beanspruchungsverhältnisse $R \neq 0$ können keine Angaben zur Kerbwirkungszahl gemacht werden, da die Referenzwöhlerlinie für den Kerbfall W0 (glatter Probekörper) nicht ermittelt wurde. Insofern haben die angegebenen K_t^* -Werte orientierenden Charakter und dürfen nicht im Sinne der klassischen Festigkeitslehre eingesetzt werden.

Umgebungseinfluss

Die im vorliegenden Bericht dargelegten Werte wurden bei Raumtemperatur an Luft erarbeitet. Untersuchungen zum Temperatureinfluss und zur Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen (Feuchte, Korrosion) wurden nicht vorgenommen. Der Temperatureinfluss kann (vgl. beispielsweise Abschnitt 2.2.3 der FKM-Richtlinie [32]) mit einem Temperaturfaktor berücksichtigt werden.

Sicherheitsfaktor

Bild 7-1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsfaktor j_s und den Verteilungen der ertragbaren und der im Betrieb auftretenden Spannungsamplituden. Zusätzlich ist die resultierende Ausfallwahrscheinlichkeit P_A eingetragen.

Die in diesem Bericht publizierten zulässigen Spannungen gelten für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 99,9 %. Sie würden also, falls sie in Bild 7-1 eingetragen wären, parallel, aber noch unterhalb der $P_{\bar{0}}=90\%$ -Linie liegen. Insofern brauchen die im vorliegenden Bericht publizierten zulässigen Spannungen im Rahmen von Festigkeitsnachweisen mit keinem zusätzlichen Werkstoff-Sicherheitsbeiwert abgemindert zu werden. Schließlich verdeutlicht Bild 7-1, dass bei der Anwendung von Sicherheitszahlen sehr genau auf die Definition ($P_{\bar{0}}$ - bzw. P_E -Wert) der aufeinander bezogenen Spannungsamplituden geachtet werden muss.

Der Sicherheitsfaktor ist in den jeweiligen Regelwerken definiert. Gemäß FKM-Richtlinie [32] beträgt der Grundsicherheitsfaktor für den Ermüdungsfestigkeits-

nachweis von Stahl $j_s = 1,5$ und gilt für eine Überlebenswahrscheinlichkeit der Ermüdungsfestigkeitswerte von 97,5 %.

Schlussfolgerungen

Die hier dargelegten, aus Versuchen abgeleiteten zulässigen Spannungen können für Festigkeitsnachweise nach dem Nennspannungskonzept herangezogen werden. Die Dehnungswöhlerlinie kann für Festigkeitsnachweise an nicht geschweißten Bauteilen nach dem örtlichen Konzept verwendet werden.

Die Übertragbarkeit der Ermüdungsfestigkeitswerte muss – wie auch bei den eingeführten, im Abschnitt 7.3 beschriebenen Regelwerken – stets mit kritischem Sachverstand und in jedem Einzelfall geprüft werden. Gegebenfalls müssen vorstehend die im Einzelnen beschriebenen Einflussfaktoren durch Korrekturen berücksichtigt werden.

Die Konzeption der beiden Untersuchungsvorhaben (Austenit I [4] und das hier dargelegte) zielte auf eine optimale Kompatibilität mit der DIN 15 018 ab. Dieses Ziel wurde erreicht. Die Erarbeitung eines in sich geschlossenen Regelwerks war nicht vorgesehen. Insofern ist erklärlich, dass in Bezug auf andere einschlägige Regelwerke (z. B. Eurocode 3, prENV 13001) gewisse Inkompatibilitäten erkennbar werden, wie beispielsweise Neigung und Abknickpunkt der Wöhlerlinien. Es sei jedoch nochmals erwähnt, dass diese Regelwerke nicht für austenitische Stähle gelten.

Tabellen zu Kapitel 7

Tabelle 7-1: Beanspruchungsgruppen nach Spannungsspielbereichen und Spannungskollektiven (in Anlehnung an DIN 15018, Tabelle 14)

| Spannungsspielbereich | N1 | N2 | N3 | N4 |
|---|---|--|---|--|
| Gesamte Anzahl der vorgesehenen Spannungsspiele \hat{N} | über $2 \cdot 10^4$ bis $2 \cdot 10^5$ | über $2 \cdot 10^5$ bis $6 \cdot 10^5$ | über $6 \cdot 10^5$ bis $2 \cdot 10^6$ | über $2 \cdot 10^6$ |
| | Gelegentliche nicht regelmäßige Benutzung mit langen Ruhezeiten | Regelmäßige Benutzung bei unterbrochenem Betrieb | Regelmäßige Benutzung im Dauerbetrieb | Regelmäßige Benutzung im angestregtem Dauerbetrieb |
| Spannungskollektiv | Beanspruchungsgruppe | | | |
| S_0 sehr leicht | B1 | B2 | B3 | B4 |
| S_1 leicht | B2 | B3 | B4 | B5 |
| S_{RAM} | | | | |
| S_2 mittel | B3 | B4 | B5 | B6 |
| S_3 schwer | B4 | B5 | B6 | B6 |

Tabelle 7-2: Wertetabelle für die Wöhlerlinien zulässiger Spannungen

| Bezeichnung | Kerbfall | Beanspruchungsverhältnis | Kollektiv | Parameter der Wöhlerlinie im doppelt-logarithmischen Koordinatensystem | | | Geltungsbereich |
|--------------------------|----------|--------------------------|-----------|--|-------------------------------------|---------|--|
| | | | | Spannungskordinate des Knickpunkts | Lebensdauerordinate des Knickpunkts | Neigung | |
| | | R | | S_D in N/mm ² | N_D | k | |
| Lochstab, $K_t = 2,4$ | W1-1 | -1 | S_3 | 141,7 ¹⁾ | $1,32 \cdot 10^6$ | 13,00 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 1,32 \cdot 10^6$ |
| | | 0 | S_3 | 90,1 ¹⁾ | $1,81 \cdot 10^6$ | 6,96 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 1,81 \cdot 10^6$ |
| | | 0,5 | S_3 | 95,2 ²⁾ | — | — | nur Dauerfestigkeit |
| | | 0 | S_0 | 147,2 | $1,0 \cdot 10^7$ | 6,18 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0 | S_{BAM} | 96,8 | $1,0 \cdot 10^7$ | 8,72 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| Stumpfstoß | K1 | -1 | S_3 | 96,1 ¹⁾ | $2,54 \cdot 10^6$ | 6,99 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 2,54 \cdot 10^6$ |
| | | 0 | S_3 | 73,0 | $2,20 \cdot 10^7$ | 12,98 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0,5 | S_3 | 41,4 ²⁾ | — | — | nur Dauerfestigkeit |
| | | 0 | S_0 | 149,5 | $1,0 \cdot 10^7$ | 7,70 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0 | S_{BAM} | 71,7 | $1,0 \cdot 10^7$ | 5,58 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0,5 | S_{BAM} | 61,8 | $1,0 \cdot 10^7$ | 6,05 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| Kreuzstoß, Kehlnaht | K4 | -1 | S_3 | 20,2 ¹⁾ | $8,14 \cdot 10^6$ | 2,89 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 8,14 \cdot 10^6$ |
| | | 0 | S_3 | 14,7 | $1,01 \cdot 10^7$ | 3,91 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0,5 | S_3 | 14,0 | $1,44 \cdot 10^7$ | 4,38 | $1,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0 | S_0 | 46,5 | $1,0 \cdot 10^7$ | 2,73 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |
| | | 0 | S_{BAM} | 32,7 | $1,0 \cdot 10^7$ | 3,76 | $5,0 \cdot 10^5 < N < 1,0 \cdot 10^7$ |

Für alle Betriebsfestigkeitsversuche (Kollektive S_0 und S_{BAM}) ist der Abknickpunkt eine fiktive Größe und kein Ersatzwert für die Dauerfestigkeit

¹⁾ Für diese Fälle gilt: bei $N > N_D$ ist $S_{a,zul} = S_D$

²⁾ Hier ist nur die Dauerfestigkeit angegeben: $S_{a,zul} = S_D$

Tabelle 7-3: Mittelspannungsabhängigkeit der nach dem BAM-Vorschlag abgeleiteten zulässigen Spannungsamplituden für die Beanspruchungsgruppe B4 mit dem Spannungsspielbereich N1 bis $2 \cdot 10^5$ und das Spannungskollektiv S_3 (schwer)

| R | W1-1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K4 $S_{A,zul}$ in N/mm ² |
|------|--|--|--|
| -1,0 | 163,8 | 138,2 | 72,7 |
| -0,9 | 161,0 | 135,9 | 69,7 |
| -0,8 | 158,1 | 133,5 | 66,6 |
| -0,7 | 154,9 | 130,9 | 63,5 |
| -0,6 | 151,5 | 128,0 | 60,4 |
| -0,5 | 147,8 | 124,9 | 57,2 |
| -0,4 | 143,8 | 121,6 | 53,9 |
| -0,3 | 139,4 | 118,0 | 50,5 |
| -0,2 | 134,6 | 114,0 | 47,1 |
| -0,1 | 129,4 | 109,6 | 43,6 |
| 0,0 | 123,6 | 104,8 | 40,1 |
| 0,1 | | | 39,7 |
| 0,2 | | | 39,3 |
| 0,3 | | | 38,8 |
| 0,4 | | | 38,1 |
| 0,5 | | | 37,2 |

Beanspruchungsgruppe B4
Spannungsspielbereich N1 bis
 $2 \cdot 10^5$
Kollektiv S_3 schwer

Tabelle 7-4: Mittelspannungsabhängigkeit der nach dem BAM-Vorschlag abgeleiteten zulässigen Spannungsamplituden für die Beanspruchungsgruppe B5 mit dem Spannungsspielbereich N2 bis $6 \cdot 10^5$ und das Spannungskollektiv S_3 (schwer)

| R | W1-1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K4 $S_{A,zul}$ in N/mm ² |
|------|--|--|--|
| -1,0 | 150,5 | 118,1 | 49,7 |
| -0,9 | 147,2 | 116,7 | 48,1 |
| -0,8 | 143,7 | 115,2 | 46,4 |
| -0,7 | 140,0 | 113,6 | 44,6 |
| -0,6 | 136,0 | 111,8 | 42,8 |
| -0,5 | 131,8 | 109,8 | 40,9 |
| -0,4 | 127,3 | 107,7 | 39,0 |
| -0,3 | 122,4 | 105,3 | 36,9 |
| -0,2 | 117,2 | 102,6 | 34,8 |
| -0,1 | 111,6 | 99,6 | 32,6 |
| 0,0 | 105,6 | 96,3 | 30,2 |
| 0,1 | | | 30,1 |
| 0,2 | | | 29,9 |
| 0,3 | | | 29,7 |
| 0,4 | | | 29,4 |
| 0,5 | | | 28,9 |

Beanspruchungsgruppe B5
Spannungsspielbereich N2 bis
 $6 \cdot 10^5$
Kollektiv S_3 schwer

Tabelle 7-5: Mittelspannungsabhängigkeit der nach dem BAM-Vorschlag abgeleiteten zulässigen Spannungsamplituden für die Beanspruchungsgruppe B6 mit dem Spannungsspielbereich N3 bis $2 \cdot 10^6$ und das Spannungskollektiv S_3 (schwer)

| R | W1-1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K4 $S_{A,zul}$ in N/mm ² |
|------|--|--|--|
| -1,0 | 141,7 | 99,4 | 32,8 |
| -0,9 | 137,5 | 98,7 | 32,0 |
| -0,8 | 133,2 | 98,0 | 31,2 |
| -0,7 | 128,7 | 97,2 | 30,3 |
| -0,6 | 123,9 | 96,2 | 29,3 |
| -0,5 | 119,0 | 95,2 | 28,3 |
| -0,4 | 113,7 | 94,1 | 27,2 |
| -0,3 | 108,3 | 92,8 | 26,1 |
| -0,2 | 102,5 | 91,3 | 24,9 |
| -0,1 | 96,5 | 89,7 | 23,6 |
| 0,0 | 90,1 | 87,8 | 22,2 |
| 0,1 | | | 22,2 |
| 0,2 | | | 22,2 |
| 0,3 | | | 22,1 |
| 0,4 | | | 22,1 |
| 0,5 | | | 22,0 |

Beanspruchungsgruppe B6
Spannungsspielbereich N3 bis
 $2 \cdot 10^6$
Kollektiv S_3 schwer

Tabelle 7-6: Mittelspannungsabhängigkeit der nach dem BAM-Vorschlag abgeleiteten zulässigen Spannungsamplituden für die Beanspruchungsgruppe B6 mit dem Spannungsspielbereich N4 über $2 \cdot 10^6$ und das Spannungskollektiv S_3 (schwer)

| R | W1-1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K1 $S_{A,zul}$ in N/mm ² | K4 $S_{A,zul}$ in N/mm ² |
|------|--|--|--|
| -1,0 | 141,7 | 96,1 | 20,2 |
| -0,9 | 137,5 | 94,9 | 19,8 |
| -0,8 | 133,2 | 93,6 | 19,4 |
| -0,7 | 128,7 | 92,2 | 19,0 |
| -0,6 | 123,9 | 90,7 | 18,5 |
| -0,5 | 119,0 | 89,0 | 18,0 |
| -0,4 | 113,7 | 87,2 | 17,4 |
| -0,3 | 108,3 | 85,1 | 16,8 |
| -0,2 | 102,5 | 82,9 | 16,2 |
| -0,1 | 96,5 | 80,4 | 15,5 |
| 0,0 | 90,1 | 77,5 | 14,7 |
| 0,1 | 90,6 | 70,7 | 14,8 |
| 0,2 | 91,3 | 63,7 | 14,8 |
| 0,3 | 92,2 | 56,5 | 14,9 |
| 0,4 | 93,4 | 49,0 | 15,0 |
| 0,5 | 95,2 | 41,4 | 15,2 |

Beanspruchungsgruppe B6
Spannungsspielbereich N4
über $2 \cdot 10^6$
Kollektiv S_3 schwer

Tabelle 7-7: Wöhlerlinien-Kenngrößen und Datenbasis für die Ableitung von zulässigen Spannungen in Regelwerken für Schweißverbindungen (entnommen aus [27])

| Regelwerk | Wöhlerexponent 1) k | Dauerfestigkeit N _D | Überlebenswahrscheinlichkeit P _Ü % | Vertrauensbereich VB % 2) um S _{a50%} | Ermüdungsfestigkeit S _{A,zul} | | |
|------------|---------------------------|-----------------------------------|---|--|--|---|------------|
| | | | | | Herleitung | Deutung | Datenbasis |
| DIN 15018 | 3,3 3) | 2 · 10 ⁶ | 99,9 | 50 | σ _{a90%} / (4/3) | σ _{a50%} - 3 · S _S 4) | unklar 4) |
| DS 804 | 3,75 | 2 · 10 ⁶ | 99,9 | 50 | σ _{a50%} /1,65 | σ _{a50%} - 3 · S _S 4) | 5) |
| EC 3 | 3,0 | 5 · 10 ⁶ | Angaben widersprüchlich 95 95 | | σ _{a50%} - 1,96 · S _N 6) | | 6) |
| BS 7608 | 3,0 | 10 ⁷ | 97,7 | 50 | σ _{a50%} - 2 · S _N | | 7) |
| IIW | 3,0 | 5 · 10 ⁶ | 95 | 75 | σ _{a50%} - 1,645 · S _N 8) | | unklar |
| FKM [32] | 3,0 | 5 · 10 ⁶ | 97,7 | 50 | | σ _{a50%} - 2 · S _N | IIW |

1) für S-N-Kurve

2) VB = 50 %, wenn keine Angabe vorhanden

3) abgeleitet aus tabellierten S_{A,zul}-Werten in DIN 15 018

4) siehe [30]

5) siehe [26]

6) siehe [31]

7) [33] und [34]

8) [35], Abschnitt 6.4.1

Tabelle 7-8: Berücksichtigung von Mittelspannungen und Eigenspannungen auf die Ermüdungsfestigkeit in älteren und neueren Regelwerken für Schweißverbindungen (entnommen aus [27])

| Regelwerk | | Voraussetzungen |
|----------------------|---|---|
| ältere Regelwerke | DIN 4132 (1981) DIN 15018 (1984) DS 804 (1993) | Annahme: Schweißnaht eigenspannungsfrei → Ermüdungsfestigkeit <u>mittelspannungsabhängig</u> |
| neuere Regelwerke | EC 3 (1993) BS 7608 (1993) IIW (1996) FKM (2002) | Konservative Annahme: Geschweißte Bauteile enthalten extreme Zug-Eigenspannungen aus Schweißprozess u. Montagezwängungen → Ermüdungsfestigkeit <u>mittelspannungsunabhängig</u> |

Bilder zu Kapitel 7

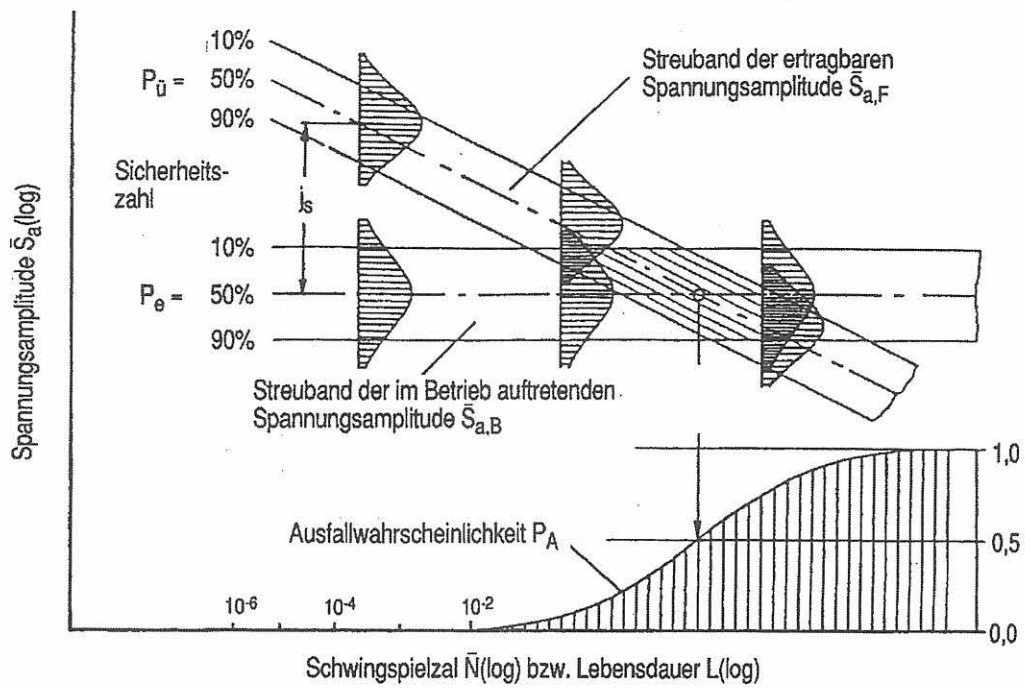


Bild 7-1: Ausfallwahrscheinlichkeit P_A eines schwingbeanspruchten Bauteils in Abhängigkeit von der geforderten Lebensdauer, hergeleitet aus den sich überschneidenden Streubereichen der ertragbaren und der im Betrieb auftretenden Spannungsamplituden (entnommen aus [17])

8 Verwendete Symbole und Abkürzungen

| | |
|------------------------------------|---|
| b | Zyklischer Schwingfestigkeitsexponent |
| c | Zyklischer Duktilitätsexponent |
| D | Schadenssumme |
| da/dN | Rissfortschrittsrate bei schwingbruchmechanischen Versuchen |
| F, F _a | Prüfkraft, Prüfkraftamplitude |
| K _t | Formzahl; synonymes Symbol α_K |
| K _f | Kerbwirkungszahl, synonymes Symbol β_K |
| k | Neigung der Wöhlerlinie bei doppeltlogarithmischer Auftragung |
| K' | Zyklischer Verfestigungskoeffizient |
| M | Mittelspannungsempfindlichkeit |
| n' | Zyklischer Verfestigungsexponent |
| N, N _B , N _A | Schwingspielzahl, Bruchschwingspielzahl, Anrisschwingspielzahl |
| N _D , S _D | Koordinaten des Abknickpunkts im Wöhlerdiagramm bzw. Bezugswerte |
| N _G | Grenzschwingspielzahl, hier 10 ⁷ |
| p | Kollektivkennwert, kennzeichnet den Fülligkeitsgrad |
| P _Ü | Überlebenswahrscheinlichkeit in % |
| R | Spannungs- bzw. Beanspruchungsverhältnis, = S _ü /S _o |
| S _a | Nennspannungsamplitude = ½ Spannungsschwingbreite |
| \hat{S}_a | Nennspannungsamplitude des Kollektivhöchstwerts |
| S _{a,z} | Nennspannungsamplitude für P _Ü = z % |
| S _{a,zul} | zulässige Nennspannungsamplitude |
| S _{A,z} | Nennspannungsamplitude der Dauerfestigkeit für P _Ü = z % |
| S _o , S _u | Nennoberspannung, Nennunterspannung |
| s _N | Standardfehler der Schätzung von lg(N) aus lg(S _a) |
| T _{N,80} | Streuspanne für N, für S _a =const. gilt: T _{N,80} = N _{PÜ=10%} / N _{PÜ=90%} |
| T _{S,80} | Streuspanne für S _a , für N=const. gilt: T _{S,80} = S _{a,10} / S _{a,90} |
| t _z | Einseitige Schranke der Standard-Normalverteilung für P _Ü = z % |
| x | Unabhängige (fehlerfreie) Variable bei der Regressionsrechnung |
| y | Abhängige (fehlerbehaftete) Variable bei der Regressionsrechnung |
| ε _{a,t} | Gesamtdehnungsamplitude |
| ε _{a,e} | Elastische Dehnungsamplitude |
| ε _{a,p} | Plastische Dehnungsamplitude |
| ε _f ' | Zyklischer Duktilitätskoeffizient |
| σ _f ' | Zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient |
| ΔK | Schwingbreite der zyklischen Spannungsintensität |

Abkürzungen für die Kerbfälle

| | |
|------|--|
| W1-1 | Kerbstab mit Rundloch, K _f = 2,4 |
| K1 | Schweißverbindung, mäßige Kerbwirkung (Stumpfstoß) |
| K4 | Schweißverbindung, besonders starke Kerbwirkung (Kreuzstoß mit Doppelkehlnaht, Normalgüte) |

9 Literaturverzeichnis

- [1] KTA 3905: Lastanschlagpunkte an Lasten in Kernkraftwerken (6/99), Carl Heymanns Verlag, Köln 1999
- [2] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. VDI-Z. 68 (1924) 339-341
- [3] Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue. J. Appl. Mech. Trans. ASME 12 (1945) A159-A161
- [4] Bork, C.-P., Hackbarth, A., Wohler, H.: Schwingfestigkeitsuntersuchungen an geschweißten Proben aus austenitischen Stählen im Hinblick auf Lastanschlagpunkte in Kernkraftwerken. Bericht BMU 1993-385 aus der Schriftenreihe „Reaktorsicherheit und Strahlenschutz“
- [5] Mang, F., Bucak, Ö. Koch, E.: Fatigue Behaviour of Welded Austenitic Steels. Processes and Materials: Innovation Stainless Steel. Vol 2, Florence, Italy, Oct 11. ... 14., 1993, Associazione Italiana di Metallurgia
- [6] Sonsino, C. M., Müller, F. et al: Fatigue Life of Welded Stainless Steels. Conference Proceedings. Stainless Steels. Jun 3. ... 5. 1996, VDEh, Düsseldorf
- [7] Müller, F., Sonsino, C. M.: Betriebsfestigkeitsverhalten einer Auswahl von nichtrostenden Stählen für den Anlagen- und Waggonbau. Abschlußbericht EUR 18470 der Europäischen Kommission. Generaldirektion Wissenschaft, Forschung und Entwicklung, Luxemburg 1998
- [8] Dokumentation Nr. 300192/97: Herstellung von geschweißten Proben aus austenitischem Stahl. Zu Schwingfestigkeitsuntersuchungen Austenit II. Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Berlin-Brandenburg GmbH. Berlin, 1998 (unveröffentlicht)
- [9] Peterson, R. E.: Stress Concentration Factors. John Wiley & Sons, New York, 1974, 110-131
- [10] Bargel, H.-J., Helms, R., Henke, H., Wohler, H.: Untersuchung der Schwingfestigkeit hochfester, schweißgeeigneter Feinkornbaustähle Stahl und Eisen 96 (1976) 1038-1043
- [11] Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. Z. Werkstofftechnik 14 (1983) 406-417
- [12] Maennig, W.: Das Abgrenzungsverfahren, eine kostensparende Methode zur Ermittlung von Schwingfestigkeitswerten - Theorie, Praxis und Erfahrung. Materialprüfung 19 (1977) 280-289
- [13] KTA 3204: Reaktordruckbehälter-Einbauten (6/98), Carl Heymanns Verlag, Köln 1998
- [14] Manjoine, M.J. Landerman, E. I.: Techniques for Fatigue Testing and Extrapolation of Fatigue Life for Austenitic Stainless Steels. JTEVA 10 (1982) 115-120
- [15] Dixon, W.J. Mood, A. M.: A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. Journal of the American Statistical Association 43 (1948) 108-126

- [16] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. 7. Auflage, Springer -Verlag, Berlin 1992
- [17] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2002
- [18] Zenner, H.Liu, J.: Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept. Konstruktion 44 (1992), 9-17
- [19] Radaj, D.: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen. Ermüdungsfestigkeit. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), Düsseldorf, 1985
- [20] Helms, R., Jaenicke, B., Wohler, H., Bork, C.-P.: Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger. Forschungsbericht Nr. 164 der Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung. NW-Verlag, Bremerhaven, 1989
- [21] Schwalbe, K.-H.: Bruchmechanik metallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag München, 1980
- [22] Paris,P.C., Gomez, M.P., Anderson, W. A.: A rational analytic theory of fatigue. Trend in Engineering 13 (1961)
- [23] Coffin, L. F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Trans. ASME 76 (1954) 6, 931-950
- [24] Manson, S. S.: Fatigue: a complex subject – some simple approximations. Experimental Mechanics 5 (1965) 7, 193-226
- [25] Morrow, J. D.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. ASTM STP 378 (1965), 45-87
- [26] Olivier,R., Ritter, W.: Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen. DVS- Berichte Nr. 56 Teil I bis V. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1979-1985
- [27] Jaenicke, B.: Festigkeitsnachweis für ermüdungsbeanspruchte Schweißverbindungen nach deutschem und europäischem Regelwerk. Publ. in: VDI-Berichte 1442, Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. VDI-Verlag Düsseldorf 1998
- [28] Dengel, D.: Statistische Auswertung von Ermüdungsversuchen und Problematik des Begriffs „Sicherheit“. Publ. im Berichtsband des DVM-Kolloquiums 1980: Werkstoffermüdung und Bauteilfestigkeit, 53-82. DVM Berlin, 1980
- [29] Bierett, G.: Über die Betriebsfestigkeit von geschweißten und genieteten Stahlverbindungen. Stahl und Eisen 87 (1967) H. 24, 1465-1472
- [30] Seeger, T., Degenkolbe, J., Olivier, R.: Zulässige Spannungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis bei wetterfesten Baustählen nach sechsjähriger Bewitterung. Stahl und Eisen 111 (1991), S. 101/110
- [31] Brozetti, J., Hirt, M.A., Ryan, I., Sedlacek, G., Smith, C.: Background information on Fatigue design rules - Statistical Evaluation - to Eurocode No. 3, Part, Chapter 9 - Document 9.01, 1990
- [32] FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, 4. Ausgabe., VDMA-Verlag Frankfurt (2002)
- [33] Health & Safety Executive Publication, Offshore Installations: Guidance on design, construction and certification. 4th Edition (1990), GB

- [34] BS 5400-10:1980 Steel, concrete and composite bridges. Code of practice for fatigue

- [35] Hobbacher A.: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile. IIW-Doc. XIII-1539-96/XV-845-96. Düsseldorf: DVS-Verlag 1997

- [36] DIN: Berechnungsgrundsätze für Triebwerke in Hebezeugen. 1. Auflage, Beuth Verlag Berlin (1982)

- [37] prENV13001-3-1: 2000: Cranes – General Design. 3.1 Limit States and Proof of Competence of Steel Structures. CEN, Brüssel (2000)

- [38] Obretinow, R., Wagner, G.: Die Europäische Krannorm (EN 13001). Stahlbau 69(2000)218-227

- [39] Gudehus, H., Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung. 4. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf (1999)

Die Entwicklung der BAM in Daten und Stichworten

- 1870** Das Preußische Ministerium für Handel, Gewerbe und öffentliche Arbeiten veranlasst die Errichtung einer Mechanisch-technischen Versuchsanstalt mit der Aufgabe, Versuche im allgemeinen wissenschaftlichen und öffentlichen Interesse sowie Festigkeitsprüfungen durchzuführen.
- 1904** Das Königliche Materialprüfungsamt wird durch Vereinigung der Königlichen mechanisch-technischen Versuchsanstalt mit der Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien (gegr. 1875) und der Königlichen chemisch-technischen Versuchsanstalt (gegr. 1877) in Berlin-Dahlem errichtet.
- 1919** Das neu benannte Staatliche Materialprüfungsamt (MPA) ressortiert beim Preußischen Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung; ab 1936 wird die Reichsröntgenstelle in das MPA einbezogen.
- 1920** Die Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) wird beim Reichsministerium des Innern errichtet; sie ging hervor aus dem 1889 als Zentralversuchsstelle für Explosivstoffe geschaffenen Militärversuchsanstalt.
- 1945** MPA und CTR werden unter Betreuung durch den Magistrat von Berlin zusammengefasst.
- 1954** MPA/CTR werden als Bundesanstalt für mechanische und chemische Materialprüfung (BAM) – ab 1956 Bundesanstalt für Materialprüfung – von der Bundesrepublik Deutschland übernommen. Die BAM wird zusätzlich mit der Wahrnehmung amtlicher Materialprüfungsaufgaben für das Land Berlin beauftragt.
- 1969** Die BAM wird durch das Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz) Bundesoberbehörde; bei der Gesetzesnovellierung 1986 wird der Begriff Forschung in den Namen der BAM aufgenommen.
- 1975** Durch das Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter werden der BAM weitere Aufgaben im Bereich der öffentlichen technischen Sicherheit übertragen.
- 1990** Mit der deutschen Vereinigung wird entsprechend einer Empfehlung des Wissenschaftsrates die Funktion der BAM als chemisch-technische Bundesanstalt verstärkt. Dazu wird Personal des aufgelösten Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW) und der aufgelösten Akademie der Wissenschaften der DDR eingestellt. Die amtlichen Materialprüfungsaufgaben für das Land Berlin werden schrittweise aufgegeben.
- 1995** Die BAM erhält nach externer Evaluierung und umfassender Reorganisation durch Erlass des Bundesministeriums für Wirtschaft ein neues Statut, neue Managementinstrumente und ein zukunftsorientiertes Profil als Bestandteil der technisch-wissenschaftlichen Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland.

