

Quantifizierung des Einflusses von Schweißnahtimperfectionen durch Referenzproben

I. Demidov, N. Woywode

Für labortechnische Untersuchungen an ausgewählten Schweißnahtimperfectionen wurde für die Simulation der vorhandenen Struktur- und Kerbspannungen und für den experimentellen Nachweis eine Referenzprobe entwickelt und erprobt. Die Arbeit verfolgte das Ziel, den Einfluß kurzfristig erzeugter örtlicher plastischer Verformungen auf die Ermüdungsfestigkeit zu ermitteln, wie sie an Rund- und Längsnähten in zylindrischen Druckbehältern auftreten können. Durch die besondere Form der gekerbten Referenzprobe wurden die Imperfektion und die Geometrie der Schweißnähte reproduziert. Auf einem Hochfrequenzpulsator erfolgte die Durchführung der Schwingfestigkeitsversuche bei Zugschwellbeanspruchung an den Referenzproben. Es wurde ein FE-Modell für die Referenzprobe entwickelt und der Spannungszustand simuliert. Auf der Grundlage der FE-Analyse erfolgte entsprechend dem Kerbdehnungskonzept die Lebensdauerabschätzung. Die Versuchsergebnisse wurden mit den rechnerischen Ergebnissen für die Referenzproben verglichen und deren Übereinstimmung festgestellt.

1 Einleitung

Die Einflüsse der konstruktiv, technologisch und metallurgisch bedingten Kerbwirkungen an Schmelzschweißverbindungen von Komponenten von Druckbehältern sind maßgebliche Einflüsse, die sich auf die Lebensdauer dieser Bauteile auswirken. Kerbwirkungen entstehen aufgrund der Unregelmäßigkeiten im Bereich der Schweißverbindungen. Zu häufig auftretenden und typischen Unregelmäßigkeiten im Bereich der Längs- und Rundschweißnähte an zylindrischen Druckbehältern gehören Abweichungen von der idealen geometrischen Form, also die äußeren geometrischen Imperfektionen, die bei der Fertigung entstehen, wie z. B. Kantenversatz und Aufdachung. Diese Imperfektionen können sich schon allein aus den Fertigungstoleranzen bei der Halbzeugherstellung ergeben. Die Korrektur dieser Imperfektionen ist nach dem Schweißen nur begrenzt oder gar nicht möglich. Durch Betriebs- bzw. Prüfdrucke treten im Bereich der Schweißnähte zusätzlich zu den Membranspannungen noch Biegespannungen auf. Diese Biegespannungen können zu erhöhten Gesamtspannungen führen. Infolge solcher Zusatzspannungen ist schon bei geringen Beträgen der Imperfektionen ein Erreichen oder ein Überschreiten der Fließgrenze möglich. Es entstehen plastische Zonen in örtlichen Bereichen (Woywode, 1979).

Die Wirkung der entstehenden Zusatzspannungen wird nicht immer oder nur unzureichend in den Berechnungsverfahren erfaßt. Die örtlichen Spannungsüberhöhungen infolge der Imperfektionen bei zyklischer Beanspruchung aus pulsierendem Innendruck und / oder Temperaturschwankungen wirken sich besonders nachteilig auf die Lebensdauer der Druckbehälter aus. Deswegen ist es bei hoch belasteten Druckbehältern wichtig, die qualitativen und quantitativen Einflüsse von geometrischen Schweißnahtimperfectionen auf die Lebensdauer zu ermitteln und zu bewerten. In (Demidov und Woywode, 1999) wurde die FE-Analyse der Einflüsse von zusammenbaubedingten Imperfektionen an zylindrischen Druckbehältern mit Längs- und Rundschweißnähten auf die Beanspruchbarkeit sowie die rechnerische Lebensdauerabschätzung solcher Bauteile dargestellt. Solche theoretisch ermittelten Ergebnisse müssen experimentell im Versuch überprüft werden. Dabei erweist es sich wiederum als problematisch, die Versuchsergebnisse von Proben quantitativ auf Bauteile zu übertragen. Deshalb wurden Untersuchungen durchgeführt und eine Methode entwickelt, um den Einfluß von ausgewählten Schweißnahtimperfectionen an Referenzproben rechnerisch und experimentell nachweisen.

2 Begründungen für die Auswahl der Form der Referenzproben

Für die gezielte Entwicklung geeigneter Referenzproben stellt die Uneinigkeit unter den Wissenschaftlern bezüglich der Form der Referenzproben und deren Konzeption ein Problem dar. So geht eine Gruppe von Theoretikern davon aus, daß es besser wäre, die Fehlerwirkung an unbearbeiteten Nähten zu untersuchen, wogegen andere Wissenschaftler die Untersuchung eben dieser Ergebnisse an blecheben bearbeiteten Schweißnähten für zweckmäßiger erachten (Radaj, 1985).

Es ist bekannt, daß Schweißnähte komplexe Einflüsse wie z. B. Werkstoff, mis-match-Verhalten, Schweißverfahren, konstruktiv und technologisch bedingte Einflüsse, Eigenspannungen usw. aufweisen (Radaj, 1995). Andererseits ist bekannt, daß es vorrangig die geometrischen Einflüsse sind, die das örtliche Spannungsniveau und damit die Ermüdungsfestigkeit prägen. Deswegen war es bei der Entwicklung der Referenzprobe für eine labortechnische Simulation der örtlichen Schädigungen im Bereich von Schweißnahtimperfectionen notwendig, daß einerseits eine solche Probe Fremdeinflüsse durch o. g. Größen weitestgehend unberücksichtigt läßt. Andererseits war es für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wichtig, durch eindeutige Geometrievariationen eine statistische Absicherung zu erreichen. Aus diesen Gründen wurden die Referenzproben aus ungeschweißtem Blech entwickelt und erprobt. Die durch die äußere Nahtgeometrie, wie z. B. Nahtüberhöhungen, Nahtbreite, Nahtanstiegswinkel, Einbrandkerben, Kantenversatz, Winkelverformung u.a.m., hervor gerufenen Kerbspannungen sollten durch eine äquivalente Kerbwirkung geometrisch klar und eindeutig definierter mechanisch eingearbeiteter Kerben ersetzt werden.

Zur Reproduktion der Schädigung durch äußere Imperfektionen mußte die Form der Referenzproben so entworfen werden, daß diese besondere Kerben aufweisen, an denen durch Belastung zusätzliche örtliche Spannungen auftreten und damit plastische Zonen erzeugt werden. Der Beanspruchungszustand im Bereich der Kerbe entspricht dem einer Schweißnaht mit Imperfektionen. Durch eine umfangreiche Analyse mittels der FE-Methode von Referenzproben mit vielen verschiedenen Kerbformen wurde die Referenzprobe (Bild 1) ausgewählt und getestet.

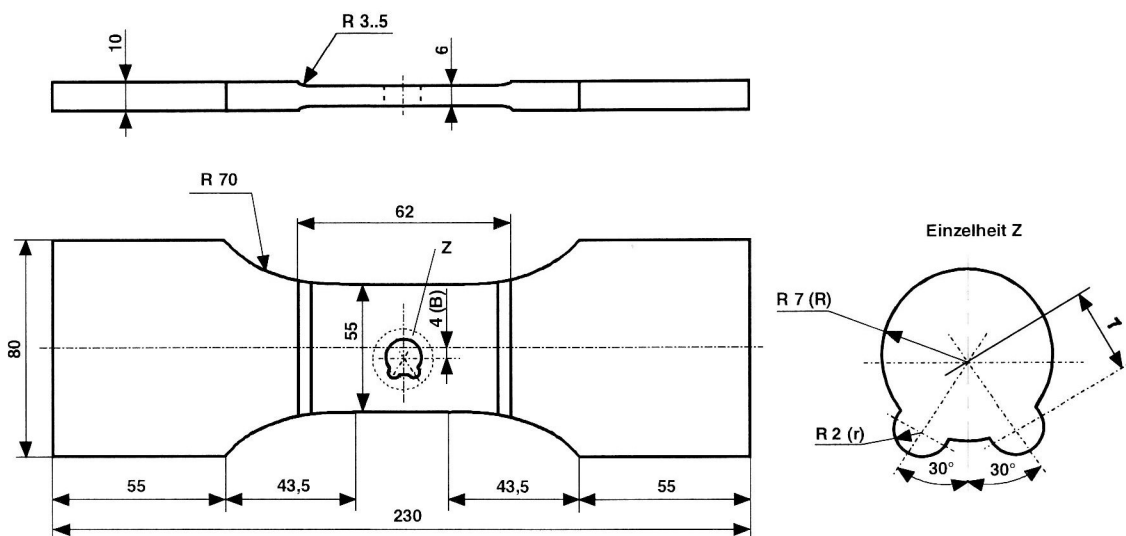


Bild 1. Referenzprobe für Ermüdungsversuche

Die Maße der Referenzproben wurden unter Berücksichtigung der Prüfbedingungen der Prüfmaschine gewählt. Die Besonderheit der Probe ist die Form der Kerbe, die aus einer großen und zwei kleinen Radien besteht. Es ist bekannt, daß in unbearbeiteten Schweißverbindungen Überlagerungen der Kerbspannungen infolge der schweißprozessbedingten Unregelmäßigkeiten und der geometrischen Imperfektionen auftreten. Deshalb wurde durch diese Bohrungen in der Referenzprobe versucht, einen ähnlichen Spannungszustand zu erreichen. Dabei steht die außermittig angeordnete große Bohrung für den örtlichen Spannungszustand infolge der Form der Schweißnaht. Die zwei kleinen symmetrischen Radien am Bohrungsrand imitieren äußere Imperfektionen, wie z. B. Aufdachungen u. a. und verschärfen damit die Kerbwirkungen. Der Vorteil solcher Referenzproben liegt in der guten Reproduzierbarkeit der für die Ermüdungsfestigkeit maßgebenden geometrischen Kerben, sowie der Vermeidung von mehr oder weniger gut reproduzierbaren metallurgischen, technologischen Einflüssen und Eigenspannungen, deren Vernachlässigung bewußt in Kauf genommen wird.

Aus der reinen linearelastischen FE-Berechnung wurde mit Hilfe des erstellten Modells die Formzahl der Kerbe ermittelt, $K_t = 3,8$. Das entspricht z.B. einem Kantenversatz von 3,4 mm bei 16 mm dicken Stumpfstoßen als Längsnähte in Druckbehältern und von einer Winkelverformung von 2,5 mm bei einem Innendurchmesser von 1000 mm. Die Geometrie der V-Naht entspricht in diesem Fall den maximalen Werten der Bewertungsgruppe B der DIN EN 25817.

Um den Einfluß von äußeren geometrischen Schweißnahtimperfectionen mit anderen Größen an Referenzproben festzustellen, muß man die Formzahl der Kerbe an die Formzahl der Druckbehälter mit der Schweißnaht und Imperfectionen anpassen. Das ist durch die Veränderung von drei geometrischen Parametern der Kerben (Radius der großen Bohrung R , Radius der kleinen Bohrungen r und Außermittigkeit B von der Symmetrieachse der Probe) zu erreichen. Dabei kann jeder Parameter der Kerbe die Gesamtspannungsverteilung und damit die Formzahl beeinflussen. Die Gesamtspannung in den Kerben besteht aus verschiedenen Anteilen. Die Strukturspannungen in den Proben bestimmen die große Bohrung und Dezentrierung. Mit Vergrößerung der Parameter R und B wachsen die Strukturspannungen. Die Kerbspannungen sind vorzugsweise von den Radien der kleinen Bohrungen mit dem Radius r abhängig. Mit der Verkleinerung des Radius r , der an der Probe den selben Einfluß wie der Nahtübergangsradius an der realen Schweißnaht ausübt, werden die Kerbspannungen größer. Durch das gleichzeitige Zusammenwirken der Parameter auf den Spannungszustand der Probe tritt eine Spannungsüberlagerung auf. Durch Spannungsüberlagerung kann die Kerbwirkung eines Parameters durch die Kerbwirkung eines anderen Parameters oder eine Kombination der Parameter vergrößert oder vermindert werden. Man kann die Parameter variieren, um einen Spannungszustand im Bereich der Kerbe ähnlich dem Spannungszustand der Druckbehälter mit verschiedenen Abmessungen und verschiedenen Größen der geometrischen Schweißnahtimperfectionen zu erreichen.

3 Chemische Zusammensetzung und statische Kennwerte des Werkstoffs

Für die durchgeführten Untersuchungen wurde der unlegierte Baustahl S235JRG2 (Werkstoffnummer 1.0038) als Werkstoff ausgewählt. Der Stahl S235JRG2 gehört zu den duktilen Werkstoffen und einer Gruppe mit ähnlichen Festigkeitsklassen des Materials, die im Druckbehälterbau eine breite Anwendung finden. Weitere Kriterien, die zur Entscheidung für eben diesen Stahl führten, sind sein ausgeprägtes plastisches Verhalten, die technische Relevanz des Werkstoffs aber auch die gute mechanische Bearbeitbarkeit dieses Stahls.

Die funktenspektrometrisch ermittelte chemische Zusammensetzung ist in der Tabelle 1 angegeben.

Stahlsorte Bezeichnung		Massenanteile in %					
nach EN 10027-1	nach EN 10027-2	C	Si	Mn	P	S	N
S235JRG2	1.0038	0,1220	0,0050	0,4970	0,0125	0,0147	0,0115

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung des Stahls S235JRG2

Die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs (Tabelle 2) wurden aus den Zugversuchen an einer statischen Zug-Druck-Prüfmaschine ZD40 mit eingeschalteter Kraftkonstanthalteeinrichtung bestimmt.

Aus den Kraft-Verlängerungs-Diagrammen, die mit dem Feindehnungsmeßgerät MKE-Universal aufgenommen worden sind, wurden die wahre Spannung und die Gesamtdehnung ermittelt, die für die multilineare Verfestigung in der numerischen Berechnung notwendig sind.

Die Kennwerte liegen unter der Normwerten, was aber für die Zielsetzung der Untersuchungen ohne Belang ist.

Streckgrenze, R_{eH} [MPa]	Zugfestigkeit, R_m [MPa]	Bruchdehnung, A_5 [%]
210,0	342,0	40,6

Tabelle 2. Statische Werkstoffkennwerte für Stahl S235JRG2

4 Probengeometrie für Ermüdungsversuche

Die Probe wurde aus Blech mit einer Dicke von 10 mm hergestellt. Die Kontur der Probe wurde zunächst mit Laser geschnitten und anschließend geschliffen. Nach dem Laserschneiden entstehen minimale Eigenspannungen in den Randbereichen, die durch Abschleifen entfernt werden können, wodurch eine notwendige Wärmebehandlung der Probe eingespart wird.

Da die Rauheit der äußeren Walzoberfläche nicht den gewünschten Anforderungen entsprach, wurde auch diese geschliffen. Im Bereich der Kerben wurde die Dicke der Proben beidseitig bis auf 6 mm gefräst. Anschließend

wurde das Werkstück mit drei Bohrungen gemäß Bild 1 versehen. Die scharfen Ränder der Bohrungen wurden durch Überschmirmgeln gebrochen.

Es wurde darauf geachtet, daß bei allen Proben die Längsachse in der Walzrichtung lag, um mögliche Einflüsse aus der Walztextur auszuschließen.

5 Durchführung der Ermüdungsversuche

5.1 Prüfbedingungen

Die Schwingfestigkeitsversuche wurden mit Hilfe eines Roell Amsler Hochfrequenzpulsators 250 HFP 5100 durchgeführt und gelten als spannungskontrollierte Einstufenversuche. Die Versuche fanden unter reiner Zug-schwellbeanspruchung ($R = 0$) an Luft und bei Raumtemperatur statt. Für Komponenten des Druckbehälterbaus hat die schwellige Beanspruchung, die sich beispielsweise aus An- und Abfahrprozessen bzw. bei pulsierendem Betriebsinnendruck ergibt, eine besondere Bedeutung. Im Bereich der Zeitfestigkeit erfolgte die Prüfung der Referenzproben unter Zugbelastung auf drei Beanspruchungshorizonten mit jeweils zwei Proben.

Die Frequenzänderung wurde kontrolliert und zum Abschalten des Prüfstands vor Bruch sowie zur Bestimmung des Anrißbeginns eingesetzt. Die Prüffrequenz betrug etwa 83 Hz.

Die Grenzwahngspielzahl (maximale für den Werkstoff vorgesehene Schwahngspielzahl) war mit $N_D = 5 \cdot 10^6$ Schwahngspielen festgelegt.

5.2 Prüfergebnisse

Die gekerbten Referenzproben brachen immer im Sollquerschnitt, wobei die Brüche jeweils von einem der beiden kleineren Radien ausgingen. Grundsätzlich wurde festgestellt, daß sich die feinkörnige Schwingbruchfläche auf der schmaleren Seite der Referenzprobe - betrachtet von der asymmetrisch angeordneten großen Bohrung - und die grobkörnige Restbruchfläche auf der gegenüberliegenden Seite befinden. Das bedeutet, daß sich der Riß immer in Richtung des Randes der Probe ausbreitet. Wenn unter Einwirkung der Belastung der Restquerschnitt kleiner als der kritische Querschnitt wird, so tritt der Gewaltbruch ein.

Die plastischen Verformungen treten allerdings nur im Bereich der Radien auf, das heißt, daß sie örtlich begrenzt sind. Diese Verformung kann man besonders bei einer größeren Nominalbelastung mit bloßem Auge gut erkennen.

6 Mathematisches Modell zur Bewertung der Referenzproben

Die Versuchsergebnisse wurden mit den rechnerischen Ergebnissen für die Referenzproben, die mit Hilfe der FE-Methode (Müller und Groth, 1999) gewonnen wurden, verglichen, um die Eignung und die Anwendbarkeit der FE-Analyse für die quantitative Bewertung von Einflüssen der äußeren Imperfektionen an Schweißverbindungen von Druckbehältern nach dem Kerbdehnungskonzept (Haibach, 1989) zu überprüfen.

Es wurde ein 3D Finite-Element-Modell für die Referenzproben mit gleicher Geometrie und Abmessung, wie sie in den experimentellen Untersuchungen verwendet wurden, entwickelt und der Versuch simuliert.

Zur Modellierung der dreidimensionalen Struktur der Referenzprobe wurde das Volumenelement SOLID45 mit acht Knoten gewählt und unter Nutzung dieser Elemente diskretisiert. Gesamtmodell und Ausschnitt des Kerbbereiches sind in Bild 2 dargestellt.

Durch Parametervariation wurde mittels Finite-Elemente-Analyse die Spannungshöhe verändert und bewertet.

Die FE-Analyse wurde unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens ausgeführt. Um den Einfluß der Anwendung der verschiedenen Werkstoffgesetze auf die gezielten Ergebnisse festzustellen, wurde die FE-Berechnung mit zwei verschiedenen Verfestigungsgesetzen durchgeführt. Es wurden im Modell sowohl eine multilineare kinematische (KINH) als auch eine multilineare isotrope (MISO) Verfestigungen untersucht. Die Werkstoffkennwerte für die Berechnung mit isotroper Verfestigung wurden aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve der wahren Spannungen aus dem einaxialen Zugversuch für den Stahl S235JRG2 entnommen. Aus (Boller und Seeger, 1987) wurden die zyklischen Kennwerte für die kinematische Verfestigung verwendet. Allerdings weist der untersuchte Stahl niedrigere statische Festigkeitseigenschaften auf, als die Stähle der gleichen Marke, die in der o. g. Literatur angegeben wurden. Deswegen wurden die benötigten zyklischen Kennwerte durch

Approximation der vorhandenen Kennwerte für den untersuchten Stahl und unter Berücksichtigung der Kompatibilitätsbedingungen (1) und (2) gewonnen:

$$n' = \frac{b}{c} \quad (1)$$

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{n'}} \quad (2)$$

Die Gleichungen (1) und (2) beschreiben die Zusammenhänge zwischen den Parametern der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie (3) nach Manson, Coffin und Morrow (Manson, 1965; Coffin, 1954; Morrow, 1965) und den zyklischen Parametern der Gleichung der Spannungs-Dehnungs-Linie (4) nach Ramberg-Osgood (Ramberg und Osgood, 1943).

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N)^b + \epsilon'_f \cdot (2N)^c \quad (3)$$

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (4)$$

- K' - zyklischer Verfestigungskoeffizient
- n' - zyklischer Verfestigungsexponent
- σ'_f - Ermüdungsfestigkeitskoeffizient
- ϵ'_f - Ermüdungsduktilitätskoeffizient
- b - Ermüdungsfestigkeitsexponent
- c - Ermüdungsduktilitätsexponent

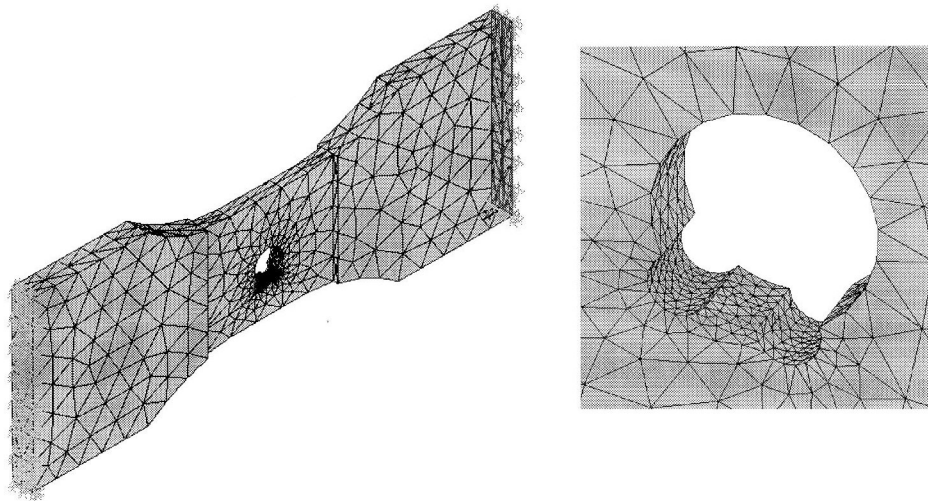


Bild 2. Finite-Element-Netz der Referenzprobe; Ausschnitt rechts

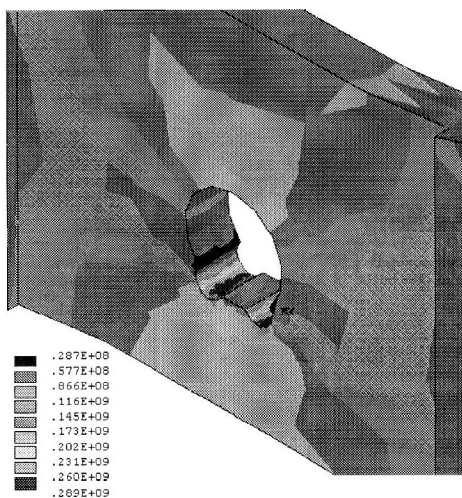
7 Ergebnisse der FE-Berechnung

Wie vorgesehen, entstehen durch die Kerbwirkung der mechanischen Kerben an den Rändern erhebliche Spannungserhöhungen. Die maximalen Spannungen treten im Bereich des Randes einer der beiden kleinen Radien auf. Das Bild 3 zeigt die Vergleichsspannungsverteilung im Bereich der Kerbe der Referenzprobe bei einer Nennspannung von $\sigma_n = 140$ MPa aus der Berechnung mit kinematischer und isotroper Verfestigung. Es ist ersichtlich, daß die maximalen Werte der Vergleichsspannung nach der Berechnung mit kinematischer Verfestigung größer sind als mit isotroper Verfestigung.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, daß parallel zu den Spannungserhöhungen die plastischen Verformungen am Rand der kleinen Radien entstehen: Bei steigender Belastung kann das Wachstum der lokalen plastischen Zonen und der Beginn der Spannungsumlagerung beobachtet werden. Bei vollständiger Entlastung der Proben werden durch die elastische Rückfederung des Querschnittes Druckeigenstressungen erzeugt, was zu einem positiven Einfluß auf die Lebensdauer der Probe führen kann. Die Werte der Druckeigenstressungen bei isotroper Verfestigung sind erheblich größer als bei kinematischer Verfestigung. Das Verhalten der Veränderung der bleibenden Dehnungen ist bei kinematischer und isotroper Verfestigung ähnlich. Bei steigender Belastung wachsen die Werte der bleibenden Dehnungen. Die Werte der bleibenden Dehnungen sind bei isotroper Verfestigung erheblich größer als bei der Berechnung mit kinematischer Verfestigung.

Rein isotrope oder kinematische Verfestigungen kommen praktisch nicht vor, da beide Verfestigungsarten meist gleichzeitig auftreten. In Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil jeder der Verfestigungsarten an der gesamten Verfestigung kann eines der beiden Werkstoffgesetze für die Beschreibung des tatsächlichen Werkstoffverhaltens mehr geeignet sein.

bei kinematischer Verfestigung



bei isotroper Verfestigung

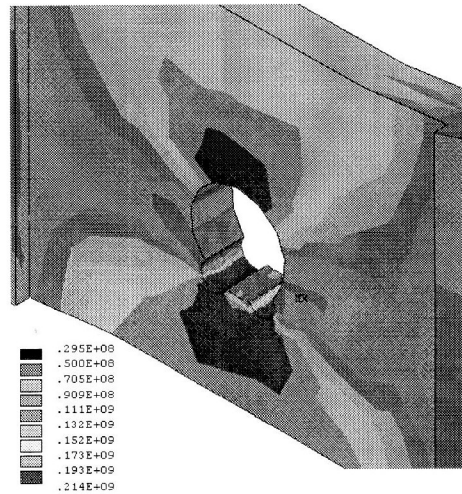


Bild 3. Vergleichsspannungsverteilung im Bereich der Kerben der Referenzprobe in Pa

8 Auswertung der theoretischen und experimentellen Ergebnisse

8.1 Ermittlung der Schwingspielzahlen nach dem Kerbdehnungskonzept

Die Bewertung der mehrachsigen Beanspruchungszustände im Bereich des Randes der beiden kleinen Radien erfolgte über eine Vergleichsspannung oder -dehnung nach der Gestaltänderungshypothese von Mises.

Die aus der mehrachsigen, elastisch-plastischen Spannungs- und Dehnungsanalyse mit Hilfe der FE-Methode gewonnenen Ergebnisse bilden die Grundlage für die rechnerische Lebensdauerabschätzung der Referenzprobe nach dem Kerbdehnungskonzept, für welche vereinfachend folgende Annahmen als grundlegend angegeben werden können (Zenner, 1977):

- die Lebensdauer eines Bauteils bis zum Anriß wird in erster Linie durch den an der höchstbeanspruchten Stelle auftretenden Dehnungs-Zeitverlauf bestimmt;
- bei der Lebensdauer vorhersage werden an ungekerbten Probestäben ermittelte Kennwerte benutzt.

Das Kerbdehnungskonzept basiert auf einer möglichst genauen Beschreibung des Materialverhaltens im Kerbgrund unter Berücksichtigung der zeitlichen Abfolge der Belastung und der sich verändernden Eigenstresszustände. Durch Spannungsumlagerung entstehende Eigenstressungen können bei der Lebensdauerberechnung wie örtliche Mittelspannungen behandelt werden.

Die entstehenden örtlichen Mittelspannungsverschiebungen wurden mit Hilfe des Schädigungsparameters P_{SWT} , der die Werkstoffschädigung einer geschlossenen Spannungs-Dehnungs-Hysterese nach Smith, Watson und

Topper (Smith u.a., 1970) unter Berücksichtigung der Maximalspannung und der Totaldehnung beschreibt, einbezogen. Die ertragbaren Schwingspielzahlen wurden unter Berücksichtigung der Mittelspannung mit Hilfe der Gleichung der Schädigungsparameterwöhlerlinie (5) ermittelt.

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_f'^2 \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' \cdot E \cdot (2N)^{b+c}} \quad (5)$$

Der Schädigungsparameter beruht auf Annahmen, die bestimmte Einschränkungen seiner Verwendung aufweisen, wie z. B. die, daß der P_{SWT} -Parameter in der ursprünglichen Form keine werkstoffabhängige Beschreibung der Mittelspannungsempfindlichkeit erlaubt. Aus diesem Grund wurde die im Abschnitt 6 erläuterte Angleichung vorgenommen und zum Vergleich auch die ertragbaren Schwingspielzahlen nach der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie (3), bei der der Einfluß der Mittelspannung nicht berücksichtigt wird, bestimmt.

8.2 Analyse und Vergleich der rechnerisch und experimentell ermittelten Wöhlerlinien

Es wurden die Schwingspielzahlen nach der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie, zu deren Ermittlung die Vergleichswerte der Spannungs- und Dehnungsamplituden vorlagen, die Schwingspielzahlen nach der Gleichung der Schädigungsparameterwöhlerlinie, zu deren Ermittlung die Werte des Schädigungsparameters gegeben waren sowie die Versuchsergebnisse, die als Einzelwerte der Versuchsreihen nach Anrißschwingspielzahlen geordnet wurden, ausgewertet.

Die Zusammenfassung der charakteristischen Wöhlerliniendaten, abhängig von der Nennspannungsschwingbreite, die nach der statistischen Auswertung gemäß der Methode des International Institute of Welding (IIW) (Hobbacher, 1996) gewonnen wurden, sind ebenfalls in der Tabelle 3 dargestellt worden.

k	C $N < 5 \cdot 10^6$	FAT MPa	$\Delta S_{D,5 \cdot 10^6}$ MPa
aus Versuch			
6,41	$3,904 \cdot 10^{18}$	83,0	71,9
aus FE-Berechnung bei kinematischer Verfestigung			
nach der Gleichung der Schädigungsparameterwöhlerlinie			
5,28	$1,848 \cdot 10^{16}$	76,9	64,7
nach der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie			
5,52	$9,327 \cdot 10^{16}$	85,7	72,6
aus FE-Berechnung bei isotroper Verfestigung			
nach der Gleichung der Schädigungsparameterwöhlerlinie			
4,45	$7,772 \cdot 10^{14}$	85,4	69,5
nach der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie			
5,65	$2,118 \cdot 10^{17}$	89,5	76,1

Tabelle 3. Zusammenstellung der Wöhlerliniendaten für Referenzproben mit Kerbe aus Stahl S235JRG2 abhängig von der Nennspannungsschwingbreite

In doppellogarithmischen Diagrammen wurden die rechnerisch ermittelten Schwingspielzahlen und die charakteristischen Wöhlerlinien der Referenzproben bei kinematischer und isotroper Verfestigung dargestellt. Für den Vergleich wurden auch die Versuchspunkte der spannungskontrollierten Einstufenversuche und die statistisch ausgewerteten experimentellen Wöhlerlinien aufgetragen (Bilder 4 und 5). Bei der Darstellung der Ergebnisse ist jeweils die durch Regression ermittelte Wöhlerlinie bis zur Grenzschnwingspielzahl $N_D = 5 \cdot 10^6$ dargestellt.

Die Analyse der abgebildeten Diagramme zeigt im allgemeinen gute Übereinstimmung der rechnerischen Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen. Dabei kann man aber auch Unterschiede feststellen, die bei der Betrachtung einzelner berechneter Wöhlerlinien bei einer bestimmten Verfestigung und der experimentellen Wöhlerlinien ersichtlich werden.

Da es bei den hohen Beanspruchungen zu starken Plastifizierungen nicht nur im Bereich der Kerbe, sondern auch im gesamten Querschnitt der Probe kommt, begrenzt man die Betrachtung der Wöhlerlinien auf den Bereich von $N = 10^4$ bis zum Dauerfestigkeitsbereich.

Ein Vergleich der Werte der Dauerschwingfestigkeit zeigt, daß die berechneten Werte nach dem Korbdehnungskonzept mit den Versuchsergebnissen hinreichend gut übereinstimmen. Die ermittelten Werte der Dauerschwingfestigkeit aus der Berechnung bei isotroper Verfestigung und aus den Schwingspielzahlen, die auf der Grundlage der Gleichungen der Schädigungsparameter- und Dehnungswöhlerlinien bestimmt wurden, sowie die Werte aus der Berechnung bei kinematischer Verfestigung und aus den Schwingspielzahlen, die entsprechend der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie gewonnen wurden, sind etwas größer als die Werte der Dauerschwingfestigkeit aus dem Versuch. Die berechneten Werte, die auf den Schwingspielzahlen basieren, die aus der Berechnung bei kinematischer Verfestigung und nach der Gleichung der Schädigungsparameterwöhlerlinie gewonnen wurden, sind umgekehrt etwas niedriger als die Werte aus dem Versuch.

Bei hohen Beanspruchungen sieht man die Abweichungen zwischen den berechneten Wöhlerlinien und den Versuchswöhlerlinien. Die berechneten Wöhlerlinien nach dem Korbdehnungskonzept liegen im Zeitsfestigkeitsbereich etwas über den Versuchswöhlerlinien. Die berechneten Wöhlerlinien bei verschiedenen Verfestigungen weisen steilere Verläufe als die Versuchswöhlerlinien auf. Dabei nähern sich die berechneten Wöhlerlinien bei kinematischer Verfestigung an die Versuchswöhlerlinien besser an als die Wöhlerlinien bei isotroper Verfestigung. Die Ursache dafür ist, daß die Verwendung des kinematischen Verfestigungsgesetzes mit zyklischen Kennwerten für die Simulation des Schwingversuchs der Referenzprobe aus dem Stahl S235JRG2 besser geeignet ist als das isotrope Verfestigungsgesetz mit den statischen Werkstoffkennwerten. D. h. daß in diesem Fall der Anteil der kinematischen Verfestigung an der gesamten Verfestigung größer ist als Anteil der isotropen Verfestigung.

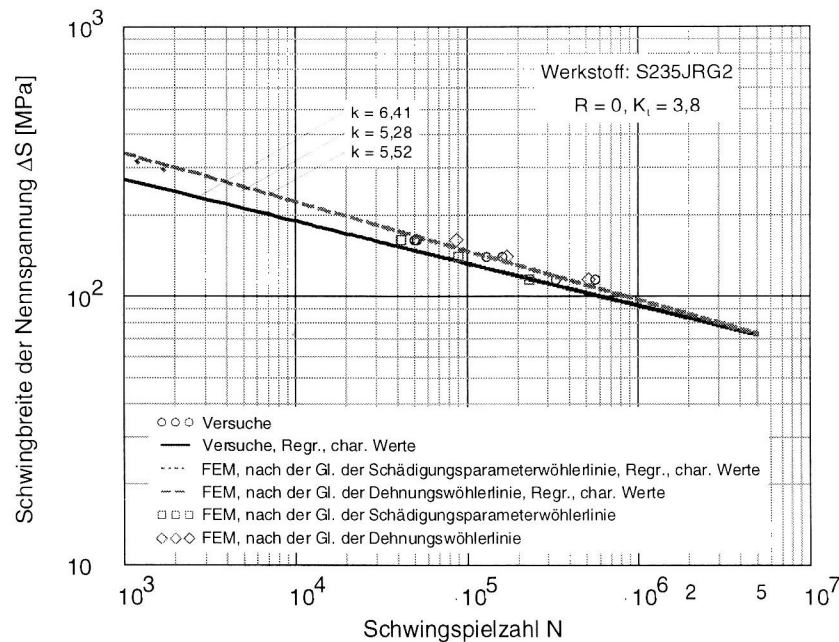


Bild 4. Wöhlerlinien für Referenzproben bei kinematischer Verfestigung

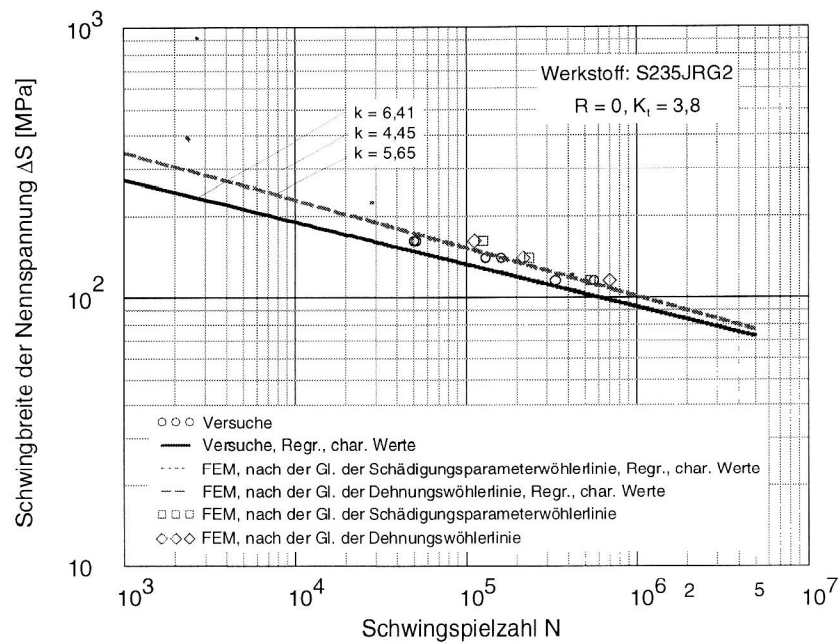


Bild 5. Wöhlerlinien für Referenzproben bei isotroper Verfestigung

9 Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Quantifizierung des Einflusses von örtlichen Schädigungen an der Referenzprobe mit künstlichen Kerben vorgestellt, die die Kerbspannungsverhältnisse an Stumpfnähten mit geometrischen Imperfektionen simuliert. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich, experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung der qualitativen und quantitativen Einflüsse von geometrischen Imperfektionen auf die Lebensdauer der geschweißten Komponenten von Druckbehältern durchzuführen. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche mit den berechneten Schwingspielzahlen, die nach dem örtlichen Konzept gewonnen wurden, konnte eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen nachgewiesen werden. Gleichzeitig wurde die Eignung und die Anwendbarkeit der FE-Analyse für die quantitative Bewertung von Einflüssen der äußeren Imperfektionen an geschweißten Komponenten von Druckbehältern anhand des Kerbdehnungskonzepts überprüft und bestätigt. Das ermöglicht bei Parametervariation eine Minimierung des experimentellen Aufwands und damit gleichzeitig eine Erweiterung der Parameterfenster.

Literatur

- Boller, Chr.; Seeger, T.: *Materials Data for Cyclic Loading*. Series. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam (1987).
- Coffin, L. F. jr: A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal. *Transactions of ASME*, 76, (1954), 931 -950.
- Demidov, I.; Woywode, N.: FEM-Analyse von Imperfektionen an Schmelzschweißverbindungen. *DVS-Berichte Bd. 198. Schweißtechnische Software: Stand und Entwicklung*. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, (1999), 67 – 72.
- Haibach, E.: *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. VDI-Verlag, Düsseldorf (1989).
- Hobbacher, A.: *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. IIW Dok. XIII-1539-96 / XV-845-96, (1996).
- Manson, S. S.: Fatigue: A Complex Subject - Some Simple Approximations. *Experimental Mechanics*, 5, (1965), 193 – 226.
- Morrow, J. D.: Cyclic Plastic Strain and Energy and Fatigue of Metals. *ASTM STP 378, American Society for Testing and Materials*, (1965), S. 45 -87.
- Müller, G.; Groth, C.: *FEM für Praktiker: die Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS*. 23 Edition expertsoft, 4., aktualisierte Auflage, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim (1999).

- Radaj, D.: *Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen*. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 82. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf (1985).
- Radaj, D.: *Lokale Konzepte des Betriebsfestigkeitsnachweises für Schweißkonstruktionen*. Konstruktion 47. Springer – Verlag, (1995), 168 – 176.
- Ramberg, W.; Osgood, W. R.: *Description of Strees-Strain Curves by Three Parameters*. Technical Report Technical Note No. 902, NACA (1943).
- Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H.: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. *Journal of Materials*, JMLSA, Vol. 5, Nr. 4, (1970), 767 – 778.
- Woywode, N.: Untersuchungen der Zusatzbiegespannungen aus fertigungsbedingten Baubweichungen. *Wiss. Zeitschrift der TH Magdeburg*, Nr. 23, Heft 2, (1979), 185 – 189.
- Zenner, H.: Niedrig-Lastwechsel-Ermüdung - Ein kritischer Überblick. *Z. Werkstofftechn.*, 7, (1977), 271 – 279.

Adresse: Dipl.-Ing. Iuori Demidov und Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Woywode, Institut für Füge- und Strahltechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg.
e-mail: Iuori.Demidov@student.uni-magdeburg.de