
Modellierung des Ermüdungsrisswachstums in Nahtschweißverbindungen unter Einbeziehung des transienten plastischen Verformungsverhaltens

DFG-Abschlussbericht
Förder-Nr. V0729/14-1



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für Stahlbau und
Werkstoffmechanik



Zusammensetzung der Arbeitsgruppe:

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (vormwald@wm.tu-darmstadt.de)

Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (beier@wm.tu-darmstadt.de)

Projektdurchführung: M.Sc. Désiré Tchoffo Ngoula (tchoffo@wm.tu-darmstadt.de)

Abschlussbericht

Zusammenfassung

Dieses Forschungsvorhaben ist ein Teilprojekt (Teilprojekt G3) des DFG-AIF-Forschungsclusters IBESS (Integrale Bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen). Das Forschungsziel des vorliegenden Vorhabens ist also in das Gesamtziel der IBESS-Prozedur eingebunden.

In diesem Teilprojekt wurden sowohl experimentelle als auch theoretisch- numerische Untersuchungen an Schweißverbindungen durchgeführt. Im experimentellen Teil des Vorhabens wurden Schwingfestigkeitsversuche an Kreuzstößen aus hochfesten Stahl S960QL durchgeführt. Ziel dabei war die Ermittlung von Wöhlerkurven im Zeitfestigkeitsbereich sowie im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit. Hierbei dienten die erzielten Ergebnisse zur Validierung der Modelle und der IBESS-Prozedur. Experimentell lieferten die geglühten Kreuzstoßproben im Vergleich zu den Proben im Schweißzustand kleinere Bruchschwingspielzahlen. Dies lag an der Tatsache, dass die unbehandelten Kreuzstoßproben laut Eigenspannungsmessungen ein Druckeigen-spannungsfeld aufweisen, das sich günstig auf die Lebensdauer auswirkt. Der Einfluss des R-Verhältnisses konnte auch experimentell beobachtet werden: die Lebensdauer nimmt mit zunehmendem R-Verhältnis ab.

Im theoretisch-numerischen Teil des Vorhabens wurden Rissfortschrittssimulationen für Kreuz- und Stumpfstöße unter Berücksichtigung von Schweißeigen-spannungen sowie von Riss-schließeffekten durchgeführt. Hierzu wurden ebene und räumliche, mit rissartigen Imperfektionen versehene FEM-Modelle erstellt. Die Simulation des Ermüdungsrisswachstums erfolgte unter Anwendung des Node-Release-Verfahrens mit dem kommerziellen FE-Programm ABAQUS.

Gezielte Strukturberechnungen mit adäquaten thermischen Randbedingungen wurden unter Ansatz des Werkstoffgesetzes nach Chaboche durchgeführt, um die aus dem Schweißprozess resultierenden Eigenspannungsfelder im FE-Modell abbilden zu können. Die gemessenen Schweißeigen-spannungsprofile konnten damit gut angenähert werden. Nach der Übernahme von Eigenspannungen im FE-Modell wurde ihre Entwicklung bei einer zyklischen äußeren Belastung untersucht: Sowohl Zug- als auch Druckeigen-spannungen bauten sich unter einer zyklischen äußeren Belastung ab. Es konnte auch festgestellt werden, dass die ersten Lastwechsel für den Eigenspannungsabbau entscheidend waren und dass der Eigenspannungsabbau von der Höhe der zyklischen Belastung abhing.

Kontaktrandbedingungen wurden zwischen Rissflanken definiert, um plastizitätsinduzierte Riss-schließeffekte zu berücksichtigen. Das effektive zyklische J -Integral ΔJ_{eff} wurde als Riss-spitzenbeanspruchungsparameter in einer Rissfortschrittsgleichung in Verbindung mit einem Potenzgesetz für die Berechnung der Lebensdauer verwendet. Zu diesem Zweck wurde ein Python-Code geschrieben, um ΔJ_{eff} für jede Risslängenkonfiguration bestimmen zu können. Die mit ΔJ_{eff} berechneten Anrisslebensdauern wurden mit experimentellen Daten verglichen: es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungs- und Versuchsergebnissen. ΔJ_{eff} ist offenbar ein geeigneter Parameter für Berechnungen zur Anrisslebensdauer-vorhersage von Schweißverbindungen.

Der Einfluss von Schweißeigen-spannungen auf ΔJ_{eff} als auch auf die Anrisslebensdauer wurde numerisch untersucht: wie erwartet wirken sich Druckeigen-spannungen bei niedriger Spannungsamplitude günstig auf die Lebensdauer aus und Zugeigen-spannungen dagegen führen zu kürzerer Lebensdauer. Bei höheren Lastamplituden spielen Eigenspannungen praktisch keine Rolle mehr.

Die Schwingfestigkeiten von Kreuz- und Stumpfstößen aus S355NL bei $R = -1$ wurden unter Verwendung der zyklischen R-Kurve (Werkstoffwiderstand oder Schwellenwert gegen Ermüdungsrisswachstum) des Stahls S355NL sowie von numerisch berechneten Rissbeanspruchungskurven bestimmt: die Berechnungen lieferten für beide Verbindungen die gleiche Dauerfestigkeit $\sigma_e \cong 100$ MPa. Dieses Ergebnis entsprach den Ergebnissen der IBESS-Prozedur sowie Versuchsergebnissen.

Folgende Erkenntnisse und Daten wurden dem Forschungscluster IBESS als Basisdaten zur Validierung zur Verfügung gestellt:

- FE-Ergebnisse der Spannungstiefenprofile am Nahtauslauf, die mit gescannten Proben sowie idealisierten Probengeometrie berechnet wurden.
- Experimentelle Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche an Kreuzstößen aus Stahl S960QL.
- Numerische Ergebnisse sowie Erkenntnisse zu der Umlagerung von Schweißeigen-spannungen bei zyklischer Belastung.
- Numerische Ergebnisse des zyklischen J -Integrals und des effektiven zyklischen J -Integrals für Stumpf- und Kreuzstöße bei kurzen halbkreisförmigen Rissen.
- Numerische Erkenntnisse zum Schließverhalten von kurzen Rissen.

Das Ziel dieses Teilprojekts (G3) wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1.....Allgemeine Angaben	1
1.1 DFG-Geschäftszeichen	1
1.2 Antragsteller	1
1.3 Institut/Lehrstuhl	1
1.4 Thema des Projekts	1
1.5 Berichtszeitraum, Förderzeitraum insgesamt	1
1.6 Liste der Publikationen aus diesem Projekt	1
2.....Arbeits- und Ergebnisbericht	3
2.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts	3
2.2 Durchgeführte Arbeiten	3
2.2.1 Experimenteller Teil	3
2.2.1.1 Probenfertigung und -geometrie	3
2.2.1.2 Schwingfestigkeitsversuche an Kreuzstößen	3
2.2.2 Theoretisch numerischer Teil	4
2.2.2.1 FE-Netz, Randbedingungen und Materialparameter	4
2.2.2.2 FE-Modellierung von Schweißeigenstressungen	5
2.2.2.3 Entwicklung von Schweißeigenstressungen bei zyklischer Belastung	6
2.2.2.4 Rissfortschrittssimulationen mit ΔJ_{eff}	7
2.3 Darstellung der erreichten numerischen Ergebnisse und Diskussion	9
2.3.1 Ergebnisse eines Kreuzstoßes aus Stahl S355NL	9
2.3.2 Numerische Ermittlung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen	10
2.3.3 Einfluss von Eigenstressungen auf das Ermüdungsrisswachstum	10
2.3.4 Vergleich von Ergebnissen aus Berechnung und Experiment	11
2.4 Stellungnahme zur wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Ergebnisse	12
2.5 Am Projekt beteiligte Personen/Kooperationspartner	12
2.6 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses	12
3.....Zusammenfassung	13
4.....Literaturverzeichnis	14

1 Allgemeine Angaben

1.1 DFG-Geschäftszeichen

V0729/14-1

1.2 Antragsteller

Michael Vormwald, Prof. Dr.-Ing, Professor, Fachgebietsleiter, 06.05.1957, deutsch

- Dienstadresse: Technische Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik, Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt
- Telefon: 06151/16-23082
- Fax: 06151/16-23083
- Email: vormwald@wm.tu-darmstadt.de

1.3 Institut/Lehrstuhl

Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik

1.4 Thema des Projekts

Modellierung des Ermüdungsrisswachstums in Nahtschweißverbindungen unter Einbeziehung des transienten plastischen Verformungsverhaltens

1.5 Berichtszeitraum, Förderzeitraum insgesamt

- Berichtszeitraum: 01. Mai 2012 – 31. Dezember 2015
- Förderzeitraum: insgesamt 3 Jahre und 8 Monate
Das vorliegende Forschungsprojekt wird seit dem 01. Mai 2012 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Förderung endete am 31. Dezember 2015

1.6 Liste der Publikationen aus diesem Projekt

Veröffentlichungen aus diesem Projekt

- H. Th. Beier, B. Schork, J. Bernhard, D. Tchoffo Ngoula, T. Melz, M. Oechsner, M. Vormwald:
Simulation of fatigue crack growth in welded joints. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 46 (2) pp. 110-122. ISSN 0933-5137, 2015.
Online-Edition: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mawe.201400366/pdf>
- Désiré Tchoffo Ngoula, Heinz Thomas Beier, Michael Vormwald:
Numerische Modellierung des Ermüdungsrisswachstums in Schweißverbindungen unter Berücksichtigung von Eigenspannungen. DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315, S. 294-299, 2015.
- J. Hensel, T. Nitschke-Pagel, D. Tchoffo Ngoula, D. Tchuindjang:
Charakterisierung des Schweißspannungszustandes für die Anwendung in schwingbruchmechanischen Ansätzen. DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315, S. 282-287, 2015.
- J. Bernhard, M. Madia, B. Schork, P. Kucharczyk, D. Tchoffo Ngoula, J. Baumgartner, D. Schöne:
Integrale bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen: Validierung an Stumpfstoßen und Kreuzstoßen. DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315, S. 306-309, 2015.

- Desire Tchoffo Ngoula, Heinz Thomas Beier, Michael Vormwald:
Predicting the fatigue life at crack initiation in cruciform welded joints by using the effective cyclic J-integral (ΔJ_{eff}). 12th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM 12) in Karlsruhe, Book of Abstracts, p 151-152, 10-14 Mai, 2015.
Online: http://icm12.com/wp-content/uploads/2015/05/Book_of_Abstracts_ICM12.pdf
- D. Tchoffo Ngoula, H. Th. Beier, M. Vormwald:
Fatigue crack growth in cruciform welded joints: Influence of residual stresses and of the weld toe geometry. XVIII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM18), Gijón, Spain, 05-07.09.2016 (in Vorbereitung)

Nomenklatur			
a	Risstiefe	σ_y	Fließspannung
Δa	Risslängezuwachs	σ_e	Dauerfestigkeit
c	Halboberflächenrisslänge	t_{cl}	Risschließzeitpunkt
C, m	Koeffizienten der Rissfortschrittsgleichung in der linear-elastischer Schwingbruchmechanik	U_{cl}	Risschließfunktion
C_I, m_I	Koeffizienten der Rissfortschrittsgleichung in der elastisch-plastischer Schwingbruchmechanik	S_{cl}	Risschließspannung
E, E'	Elastizitätsmodul	Indices	
ρ	Nahtübergangsradius	a	Amplitude
θ	Nahtanstiegswinkel	cl	closure
T	Plattendicke	max	maximum
L	Nahtbreite	min	minimum
h	Nahtüberhöhung	el	elastisch
N	Schwingspielzahl	pl	plastisch
S	Nennspannung	eff	effektiv
R	Nennspannungsverhältnis	Präfix	
K', n'	Zyklische Werkstoffkennwerte	Δ	Schwingweite
J	J-integral	Abkürzungen	
ΔJ	Zyklisches J-integral	ES	Eigenspannungen
W	Deformationsenergiedichte	FE	Finite Elemente
K	Spannungsintensitätsfaktor	FEM	Finite Elemente Methode
ΔK_p	Plastizität korrigierte Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors	SA	Spannungsarmgeglüht
σ	Spannung	SZ	Schweißzustand
ε	Dehnung		

2 Arbeits- und Ergebnisbericht

2.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Bei dem vorliegenden Bericht handelt es sich um ein Teilprojekt (Teilprojekt G3, eine Übersicht über alle Teilprojekte ist im Punkt 3.5 zu finden) des DFG-AIF-Forschungsclusters IBESS (Integrale Bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen [4,17]). Es liefert mit der Bereitstellung von Grundlagenwissen bezüglich der transienten Materialbeanspruchung von zyklisch beanspruchten Schweißnähten und deren Auswirkungen auf das Risswachstum in Schweißnähten einen wesentlichen Bestandteil zur bruchmechanischen Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen. Das Forschungsziel des vorliegenden Vorhabens ist also in das Gesamtziel der IBESS-Prozedur eingebunden.

Ziel des Teilprojektes ist es, grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse zum Materialverhalten in gekerbten Schweißnahtbereichen unter örtlich elastisch-plastischer, zyklischer Beanspruchung zu gewinnen. Dabei sollen insbesondere die transienten Vorgänge wie zyklische Ver- oder Entfestigung, zyklische Relaxation und zyklisches Kriechen und deren Auswirkungen auf ein aus dem Schweißprozess vorhandenes Eigenspannungsfeld untersucht werden. Auf Basis eines bruchmechanischen Ansatzes soll anschließend die Auswirkung des transienten Materialverhaltens auf das Ermüdungsrisswachstum von kurzen Rissen in Schweißnähten modelliert werden.

Die genannten Vorgänge bestimmen zwar erheblich die Schwingfestigkeit von Schweißnähten, werden derzeit jedoch von keinem Schwingfestigkeitskonzept gesondert erfasst. Das geplante Vorhaben liefert somit einen wesentlichen Beitrag zum grundlegenden Verständnis der transienten Vorgänge (vor allem der Eigenspannungsumlagerung) und zur detaillierteren rechnerischen Beschreibung der Schwingfestigkeit von Schweißnähten.

2.2 Durchgeführte Arbeiten

2.2.1 Experimenteller Teil

2.2.1.1 Probenfertigung und -geometrie

Die Fertigung aller Probenkörper für das gesamte Projekt IBESS erfolgte aus einer Hand (im Teilprojekt G2), damit wurde die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Einzelprojekte gewährleistet. Die in diesem Teilprojekt verwendeten Strukturen sind Kreuzstöße (für experimentelle und numerische Untersuchungen) sowie Stumpfstoße (nur für numerische Untersuchungen). In beiden Fällen handelt es sich um durchgeschweißte Nähte. Die Geometrie und Abmessungen beider Strukturen sind im Bild 1 bzw. Bild 2 dargestellt. Beide Probentypen haben eine Plattendicke T von 10 mm sowie eine Gesamtlänge von ca. 360 mm. Die Nahtbreite L beträgt 38 mm bzw. 14 mm für den Kreuz- bzw. Stumpfstoß. Der untersuchte Querschnitt ist für beide Strukturen gleich und beträgt $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, d.h. 500 mm^2 . Der Nahtanstiegswinkel θ und Nahtübergangsradius ρ sind streuende Parameter, die vom Projektpartner A1 (MPA Darmstadt) gemessen und dokumentiert wurden. Laut Projektpartner hat ρ ein Mittelwert von ca. 1 mm [16] und variiert von 0,2 bis 3 mm. Darüber hinaus variiert θ zwischen 3 und 40 Grad.

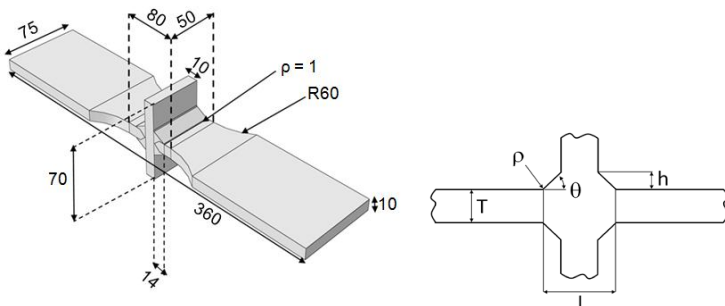


Bild 1: Geometrie und Abmessungen des Kreuzstoßes.

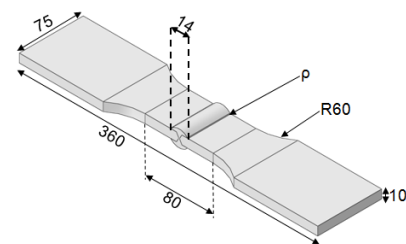


Bild 2: Geometrie und Abmessungen des Stumpfstoßes.

2.2.1.2 Schwingfestigkeitsversuche an Kreuzstößen

Ziele der Schwingfestigkeitsversuche waren die experimentelle Ermittlung von Wöhlerkurven im Zeitfestigkeitsbereich sowie im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit. Die erzielten Ergebnisse dienen zur Validierung der Rechenmodelle und der IBESS-Prozedur. Insgesamt wurden im Clustervorhaben zwei Werkstoffe (der mittelfeste Stahl S355N sowie der hochfeste Stahl S960QL) und drei unterschiedliche Schweißverbindungsformen (Stumpfnah, Kreuzstoß und Längssteife) an verschiedenen Forschungsstellen untersucht. Kreuzstöße aus Stahl S960 wurden in diesem Teilprojekt für die Wöhlerkurvenermittlung verwendet. Es wurden insgesamt 140 Einzelversuche gefahren. Die Versuchskörper hatten keine oder geringe Einbrandkerbe.

Ein Teil davon war im Schweißzustand (SZ) belassen und der andere Teil war spannungsarmgeglüht (SA). Die Proben im Schweißzustand wurden bei einem Lastverhältnis von $R=-1$, $R=0$ sowie $R=0.5$ geprüft. Spannungsarmgeglühte Proben wurden bei $R=0$ und $R=-1$ getestet.

Vor den Versuchen wurden die Probenkanten gefräst, um Anrisse ausgehend von Kanten zu vermeiden. Darüber hinaus wurden die Proben vermessen und einige davon gescannt. Die gescannten Proben wurden mittels Finite Elemente Methode (FEM) berechnet, um Informationen über die kerbbedingten Spannungsüberhöhungen am Nahtauslauf zu bekommen. Die Scandaten und die von gescannten Modellen berechneten Spannungsprofile wurden dem Projektpartnern A3 zur Verfügung gestellt. Diese Profile dienten als Input für die IBESS-Prozedur. Geeignete Methoden zur Aufbereitung eines FE-Netztes auf Basis eines 3D-Scans können dem abgeschlossenen Forschungsvorhaben [18] entnommen werden.

Versuchsergebnisse und Diskussion

Im Bild 3 sind alle Versuchsergebnisse mit Bruchausgang am Schweißnahtfuß dargestellt. Drei unterschiedliche Bruchausgänge wurden festgestellt: der Bruchausgang am Schweißnahtfuß, an der Wurzelnaht sowie im Einspannbereich. Außerdem gab es Durchläufer, d.h. Probenkörper, die bei 5 Millionen Lastwechseln noch nicht gebrochen waren. Bei den gebrochenen Probenkörpern wurden nur diejenigen mit Bruchausgang am Schweißnahtfuß ausgewertet.

Im Bild 3 sind Proben im Schweißzustand (links) und spannungsarmgeglühte Proben (rechts) getrennt dargestellt. Dabei sind die Bruchschwingspielzahlen gegenüber den Nennspannungsamplituden geplottet und zwar für unterschiedliche R-Verhältnisse. Es ist deutlich zu sehen, dass die Lebensdauer mit abnehmendem R-Verhältnis zunimmt. Darüber hinaus kann man beim Vergleich der Versuche mit $R=0$ feststellen, dass die geglühten Proben im Vergleich zu den Proben im Schweißzustand kleinere Lebensdauerwerte liefern. Grund dafür ist folgender: laut Eigenspannungsmessungen (im Teilprojekt G2) weisen die unbehandelten Kreuzstoßproben S960 ein Druckeigenspannungsfeld auf, das sich günstig auf die Lebensdauer auswirkt.

Die Auswertung aller Versuchsergebnisse (z.B. bezüglich der Neigung und dem Streuband) des IBESS-Clusters wird einheitlich im Rahmen des Teilprojekt G4 (SzM, TU Darmstadt) durchgeführt. Alle erzielten Versuchsergebnisse wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

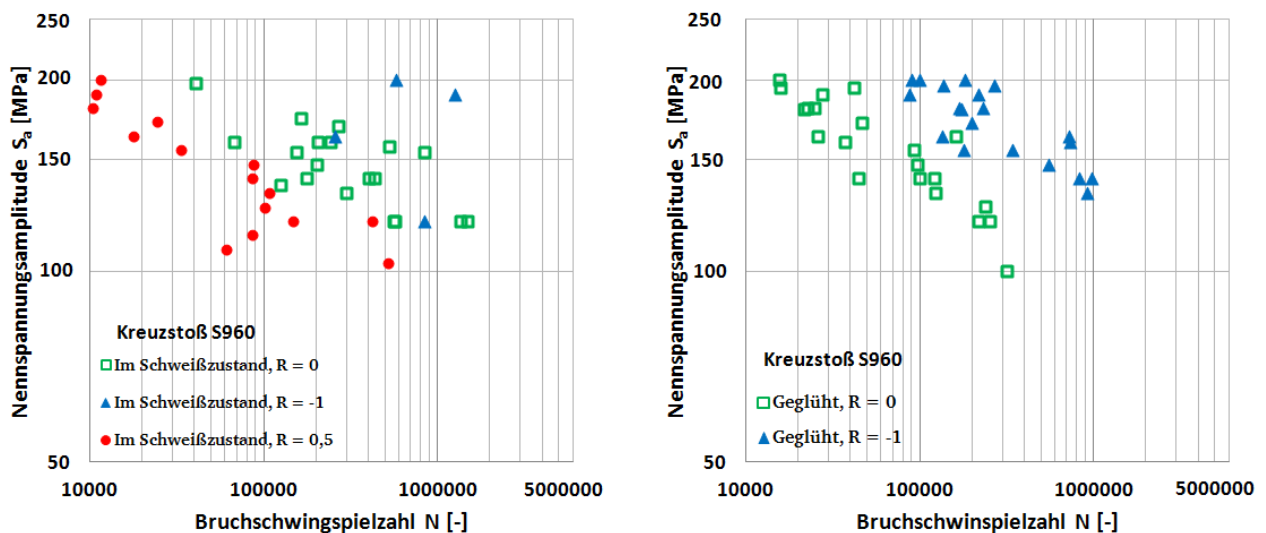


Bild 3: Ergebnisse der Wöhlerversuche an Kreuzstößen S960. (Links) - Proben im Schweißzustand, (rechts) – spannungsarmgeglühte Proben.

2.2.2 Theoretisch numerischer Teil

In diesem Teil des Vorhabens soll das transiente Materialverhalten in gekerbten Schweißnahtbereichen unter zyklischer Belastung sowie dessen Auswirkungen auf das Ermüdungsrisswachstum untersucht werden. Grundlagen der Untersuchungen sind ebene und räumliche Finite Elemente Modelle von ausgewählten Schweißnahtkonfigurationen.

2.2.2.1 FE-Netz, Randbedingungen und Materialparameter

Das Programm Paket ABAQUS [8] wurde für die FE-Modellierung verwendet. Die Nahtübergangskerbe wurde mit einem Radius von $\rho = 1\text{mm}$ ausgerundet und der Nahtanstiegswinkel auf $\theta = 30^\circ$ festgesetzt, siehe Bild 1.

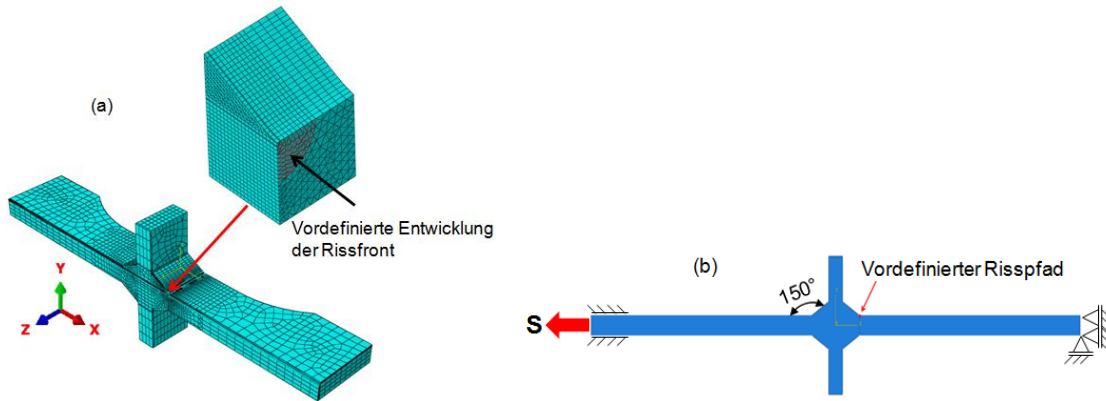


Bild 4: (a)-FE-Netz durch Ausnutzung der Symmetrie in Z-Richtung. (b)-Randbedingungen und Belastungsrichtung der Probe.

Durch Ausnutzung der Symmetrie in z-Richtung, musste nur die Hälfte des Modells erzeugt werden. Im Bild 4- (a) ist das FE-Netz zu sehen. Die Elementlänge im vordefinierten Bereich des Risses beträgt maximal 0,05 mm. Elemente mit linearen Ansatzfunktionen wurden verwendet. Die Randbedingungen sind schematisch im Bild 4- (b) dargestellt. Die Probe ist mit zyklischer äußerer Belastung S beaufschlagt.

Als Versuchswerkstoff dienen der mittelfeste Stahl S355NL sowie der hochfeste Stahl S960QL. Die zyklischen Werkstoffdaten für den Stahl S355NL (für die Ramberg-Osgood Gleichung (Gl. 1)) wurden ausgehend von den Versuchsdaten des Projektpartner G1 (IEHK, RWTH Aachen) sowie von den Daten dieses Teilprojekts ermittelt: $K' = 1115 \text{ MPa}$, $n' = 0,1961$ und $E = 210000 \text{ MPa}$. Die Daten für den Stahl S960 wurden der Literatur [22] entnommen: $K' = 1334 \text{ MPa}$, $n' = 0,083$ und $E = 206000 \text{ MPa}$. Ausgehend von diesen zyklischen Werkstoffdaten wurden die Materialparameter für das Gesetz nach Chaboche (Gl. 2, [7]) bestimmt. Diese Parameter sind in den Tabelle 2 und 3 zusammengefasst und wurden für die FE-Berechnung verwendet.

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_y + \sum_{i=1}^5 \left[\frac{C_i}{\gamma_i} \left(1 - \exp(-\gamma_i \varepsilon_{pl}) \right) \right] \quad (2)$$

Tabelle 2: Materialparameter nach Chaboche für den Stahl S355NL

C_1 [MPa]	C_2 [MPa]	C_3 [MPa]	C_4 [MPa]	C_5 [MPa]	σ_y [MPa]
305034	98322	90427	26762,3	7607	152,17
γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	
12318,92	3654,02	1204,24	230,5	21,07	

Tabelle 3: Materialparameter nach Chaboche für den Stahl S960

C_1 [MPa]	C_2 [MPa]	C_3 [MPa]	C_4 [MPa]	C_5 [MPa]	σ_y [MPa]
305034	98322	90427	26762,3	7607	607,23
γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	
12310,85	3606,26	967,86	273,52	29,65	

2.2.2.2 FE-Modellierung von Schweißeigenstressen

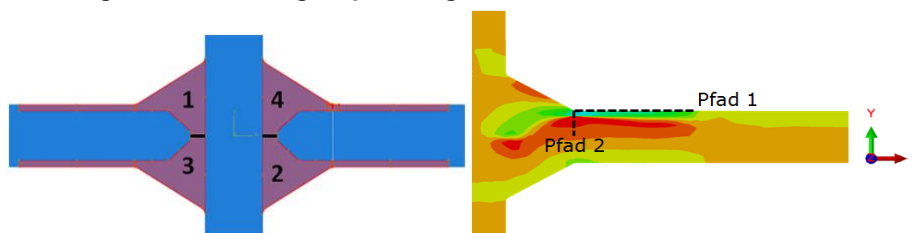


Bild 5: (Links)- Die Bereiche 1 bis 4 (entspricht die Schweißreihenfolge) wurden gezielt mit thermischen Lasten beaufschlagt. Hier Darstellung auf der X-Y Ebene; (Rechts)-Pfade zum Auslesen von Eigenspannungen.

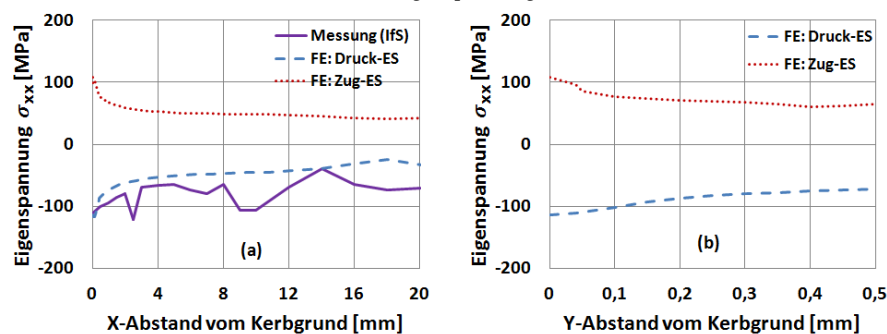


Bild 6: (a)-Eigenspannungsprofile auf der Oberfläche (Pfad1), (b)-Eigenspannungsprofile auf dem vordefinierten Risspfad (Teil von Pfad 2). Gepunktete Linie (obere Linie) – erzeugte Zugeigenspannungen; gestrichelte Linie – erzeugte Druckeigenspannungen; durchgezogene Linie in (a) – gemessene Eigenspannungen.

Nach der Schweißung wurden Eigenspannungen in ausgewählten Proben vom Projektpartner G2 (IfS, Braunschweig) gemessen. Die Messung wurde oberflächennah mittels Röntgendiffraktometrie entlang einer Linie in Probenmitte (Vgl. Bild 5 rechts, Pfad 1) durchgeführt. Diese Spannungen sollten im FE-Modell abgebildet werden. Um die Höhe der Eigenspannungen in der versagenskritischen Kerbe zu berücksichtigen, wurden gezielte Strukturberechnungen mit adäquaten thermischen Randbedingungen durchgeführt, siehe [5]. Die Schweißnähte und Wärmeeinflusszonen (Bereiche 1 bis 4, Bild 5 links) wurden gezielt mit einer thermischer Last beaufschlagt. Folgende Annahmen wurden getroffen: das Temperaturfeld wurde als gegeben angenommen; die Materialparameter waren temperaturunabhängig; die Temperatur zur Einbringung der Schweißspannungen konnte skaliert werden.

Das entwickelte Verfahren wurde für den Fall des Kreuzstoßes aus Stahl S355NL unter Verwendung von Parametern nach Chaboche angewendet. Dabei wurden gezielt Zug- oder Druckeigenspannungen im Nahtbereich erzeugt (Bild 6). Die gepunkteten bzw. gestrichelten Linien im Bild 6-a stellen die durch FE-Rechnung erzeugten Zug- bzw. Druckeigenspannungsprofile auf der Probenoberfläche (horizontaler Pfad 1) dar. Die durchgezogene Linie zeigt die vom Projektpartner gemessenen Eigenspannungen. Eine gute Übereinstimmung zwischen simuliertem Druckeigenspannungsprofil und gemessenen Eigenspannungen wurde erzielt.

In Bild 6-b sind die erzeugten Zug- und Druckeigenspannungsprofile auf dem vordefinierten Risspfad (Teil des vertikalen Pfads 2) dargestellt. Eigenspannungen wurden nicht in dieser Richtung (Tiefe) gemessen. Die hier erzeugten Zug- und Druckeigenspannungsprofile wurden in Kapitel 3.4.3 verwendet, um den Einfluss von Eigenspannungen auf das Ermüdungsrisswachstum zu untersuchen.

2.2.2.3 Entwicklung von Schweißspannungen bei zyklischer Belastung

Die Entwicklung von Schweißspannungen bei zyklischer äußerer Belastung wurde sowohl mit Zug- als auch mit Druckeigenspannungen untersucht, siehe Bild 7. Berechnungen wurden wieder mit einem Kreuzstoß aus Stahl S355 NL unter Verwendung des Materialmodelles nach Chaboche durchgeführt. Berechnungen mit Druck- bzw. Zugeigenspannungen wurden bei $R = -1$ bzw. $R = 0$ bis 100 Lastzyklen durchgeführt. Die Ausgangslage von Druck- bzw. Zugeigenspannungen liegt bei $N = 0$, wobei N die Anzahl der Lastzyklen ist. Alle Spannungsprofile im Bild 7 wurden im belastungsfreien Zustand ausgelesen. Es ist deutlich zu sehen, dass sowohl Zug- als auch Druckeigenspannungen sich unter einer zyklischen äußeren Belastung abbauen. Darüber hinaus ist der Eigenspannungsabbau lastamplitudenabhängig: Je höher die Lastamplitude, desto größer ist der Abbau von Schweißspannungen. Man kann auch feststellen, dass das Eigenspannungsfeld fast stabil nach den ersten vier Lastwechseln bleibt. Die ersten Lastwechsel sind also für den Eigenspannungsabbau entscheidend. Vergleichbare Ergebnisse (Abbau von Schweißspannungen unter zyklischer Belastung, Lastamplituden-abhängigkeit des Eigenspannungsabbaus, Stabilität des Eigenspannungsfeldes nach erstem Lastwechsel) wurden experimentell vom Projektpartner G2 (IfS, TU Braunschweig) mit Längssteifen ermittelt [19].

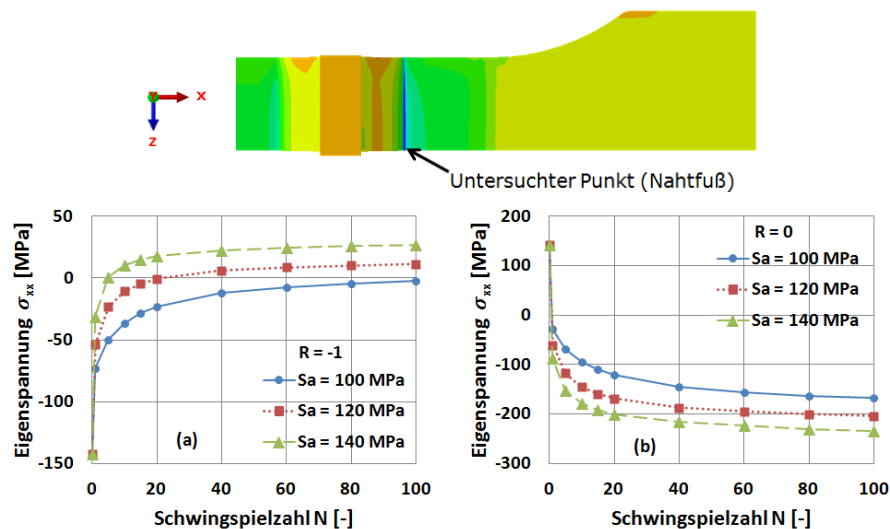


Bild 7: Entwicklung von (a)-Druck- und (b)-Zugeigenspannungen bei zyklischer Belastung. Kreuzstoß S355NL.

Der Einfluss des Spannungsverhältnisses sowie des Materialmodells auf den Eigenspannungsabbau wurden ebenfalls untersucht. Bei gleicher Nennspannungsamplitude führte die schwelende ($R=0$) Belastung im Vergleich zur wechselnden ($R=-1$) Belastung zu einem schnelleren Abbau von Zugeigenspannungen. Bei Druckeigenspannung dagegen war der Abbau größer bei einem Nennspannungsverhältnis $R=-1$ als bei $R = 0$; Bei

R=0 fiel der Abbau von Druckeigenspannungen geringer aus. Der rechnerische Eigenspannungsabbau zeigte große Abhängigkeiten vom gewählten Materialmodell.

2.2.2.4 Rissfortschrittssimulationen mit ΔJ_{eff}

Berechnung des zyklischen J -Integrals

Im Rahmen der elastisch-plastischen Bruchmechanik wird bei monotoner Belastung oft das J -Integral [10] als Risspitzenbeanspruchungsparameter verwendet. Das J -Integral ergibt sich als:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) ds \quad (3)$$

mit

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad t_i = \sigma_{ij} n_j. \quad (4)$$

Dabei ist Γ ein rissumschließender Pfad, W die Deformationsenergiedichte, t_i der Kraftvektor auf dem Pfad, u_i der Verschiebungsvektor der Punkte des Pfades und n_j der Pfadnormalvektor. Bei nichtmonotoner Belastung wird J durch ΔJ [11] ersetzt und ΔJ ergibt sich als:

$$\Delta J = \int_{\Gamma} \left(\Delta W dy - \Delta t_i \frac{\partial \Delta u_i}{\partial x} \right) ds \quad (5)$$

mit

$$\Delta W = \int_0^{\Delta \varepsilon_{ij}} \Delta \sigma_{ij} d\Delta \varepsilon_{ij}, \quad \Delta t_i = \Delta \sigma_{ij} n_j \quad (6)$$

und mit

$$\Delta \sigma_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0, \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^0, \quad \Delta u_i = u_i - u_i^0. \quad (7)$$

ΔJ und ΔW sind keine Schwingweiten sondern absolute Werte. Bei Unterstellung der Deformationsplastizität ist ΔJ wie J auch pfadunabhängig und kann deswegen auch als Risspitzenbeanspruchungsparameter verwendet werden. $\Delta \sigma_{ij}$, $\Delta \varepsilon_{ij}$ und Δu_i sind Änderungen der Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen bezüglich eines Ausgangszustands (Index 0), dem Zustand der Struktur bei Belastungsumkehr.

Effektives zyklisches J -Integral (ΔJ_{eff})

Falls Risssschließeffekte zu berücksichtigen sind, wird ΔJ durch das effektive zyklische J -Integral ΔJ_{eff} ersetzt. Gleichung (5) wird für die Berechnung von ΔJ als auch von ΔJ_{eff} verwendet, jedoch sind die Integrationsgrenzen unterschiedlich. Die Integrationsgrenzen für ΔJ sind die Lastumkehrpunkte. ΔJ_{eff} wird auf dem Entlastungsast gerechnet und die Integrationsgrenzen sind der obere Lastumkehrpunkt und der Zeitpunkt des Risssschließens. Um ΔJ und ΔJ_{eff} numerisch für jede Risslängenkonfiguration zu bestimmen, wurde ein Algorithmus in Python programmiert.

Algorithmus der Rissfortschrittssimulation

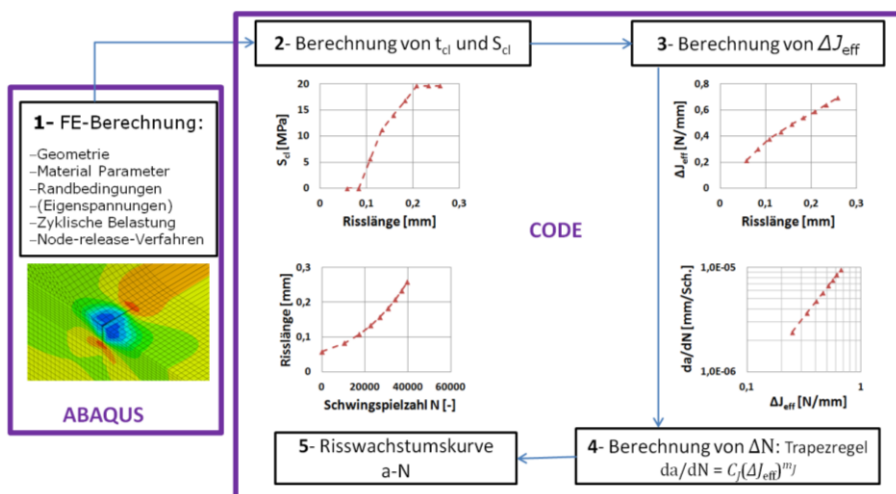


Bild 8: Algorithmus der Rissfortschrittssimulation.

Der komplette Algorithmus der Rissfortschrittssimulation ist im Bild 8 vorgestellt und besteht aus 5 Punkten:

- (1) FE-Berechnung: Hier wird die komplette Strukturberechnung mit sukzessiver Erweiterung der Risslänge bis zur Endrisslänge im FE-Programm (hier ABAQUS) durchgeführt. Die Bauteilgeometrie, Materialparameter, Randbedingungen sowie die Lasten werden hier benötigt. Falls Eigenspannungen zu berücksichtigen sind, werden diese mit dem im Kapitel 3.3.2.2 beschriebenen Verfahren berücksichtigt.
- (2) Ermittlung von Risschließzeitpunkten (t_{cl}) und Risschließspannungen (S_{cl}): Nach der FE-Rechnung wird auf die Ergebnis-Datei durch einen Postprocessing-Code zugegriffen, um t_{cl} und S_{cl} zu ermitteln und zwar für jede Risslängenkonfiguration.
- (3) Berechnung von ΔJ_{eff} : Wenn die Risschließzeitpunkte bekannt sind, kann ΔJ_{eff} als Funktion der Risslänge berechnet werden.
- (4) Berechnung von ΔN (Anzahl der Schwingspiele, die gebraucht werden, um den Riss von einer Länge a_i bis a_{i+1} zu erweitern): Hier wird die Parisgleichung $\left(\frac{da}{dN} = C_J \cdot (\Delta J_{eff})^{m_J}\right)$ unter Verwendung der Trapezregel integriert, um ΔN Schritt für Schritt zu bestimmen. Die Materialparameter C und m der Parisgleichung $\left(\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_{eff})^m\right)$ von Stahl S355NL bei $R=-1$ wurden vom Projektpartner A3 (BAM, Berlin) ermittelt: $C = 8,37 \cdot 10^{-9} \text{ mm/cycl.} \cdot (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})^m$ und $m = 3$. Diese Parameter wurden für alle Berechnungen mit $R=-1$ verwendet. Für Berechnungen mit $R=0$ wurden C und m der IIW-Richtlinie entnommen [20]. Folgende Beziehungen wurden verwendet, um die Parameter C_J und m_J zu bestimmen: $m_J = \frac{m}{2}$, $C_J = C \cdot (E')^{m_J}$.
- (5) Risswachstumskurve (a-N Kurve): Hier wird die Risslänge über der berechneten Schwingspielzahl dargestellt.

Node-Release-Verfahren

Unter der Annahme, dass die Entwicklung der Geometrie des Risses bekannt ist, kann das Node-Release-Verfahren [6,9] verwendet werden, um einen Riss sukzessiv von Anfangsrisslänge a_0 bis Endrisslänge a_{End} zu erweitern. Experimentell ergeben sich für die verwendeten Proben verschiedene Geometrien von Rissen: durchgehende, halbelliptische sowie halbkreisförmige Risse, siehe Bild 9. Für die hier durchgeführten Simulationen werden nur die durchgehenden (führen zu kürzeren Lebensdauern) bzw. halbkreisförmigen (führen zu längeren Lebensdauern) Risse modelliert, d.h. $a/c \cong 0$ bzw. $a/c = 1$. Hierbei sind a bzw. c die Risttiefe bzw. die halbe Risslänge auf der Oberfläche. Im Bild 9 rechts ist die Entwicklung des Risses in einigen Konfigurationen dargestellt. Eine Anfangsrisslänge $a_0 = 0,05 \text{ mm}$ wurde ausgewählt, was ungefähr der vom Projektpartner A1 (MPA, Darmstadt) gemessenen, maximalen Defektgröße von 25 bis 70 μm in den Proben entspricht [5,16]. Berechnungen wurden bis zur Endrisslänge $a_{End} = 0,5 \text{ mm}$ durchgeführt, was dem gewählten numerischen Anrisskriterium entspricht. Um die FE-Berechnungszeit zu beschränken, wurden nur zwei Lastwechsel für jede Risslänge angewendet. Darüber hinaus wurden zwei Lastwechseln vor dem ersten „Node-Release“ aufgebracht, um den Eigenspannungsabbau zu berücksichtigen. Die Risserweiterung erfolgt bei maximaler Belastung und der Risslängenzuwachs Δa beträgt 0,05 mm. Die Elementlänge im Bereich des Risses ist gleich Δa und entspricht nur der Hälfte der monoton-plastischen Zonenlänge nach Dugdale $r_p = \frac{\pi}{8\alpha} \left(\frac{K_I}{\sigma_{yield}}\right)^2 \cong 80 \mu\text{m}$, die mit $a_0 = 0,05 \text{ mm}$ und $S = 120 \text{ MPa}$ für ein 2D-Modell gerechnet wurde. Der Parameter α beträgt 1 im ebenen Spannungszustand und 3 im ebenen Dehnungszustand.

Um Risschließeffekte zu berücksichtigen [1,12], wurden Kontakte zwischen Rissflanken definiert. Die Kontaktöffnungsverschiebungen auf allen Rissuferknoten wurden beobachtet, um t_{cl} zu ermitteln. Der Riss gilt als geschlossen, falls eine der Kontaktöffnungsverschiebungen während der Entlastungsphase eines Lastzyklus zu Null wird.

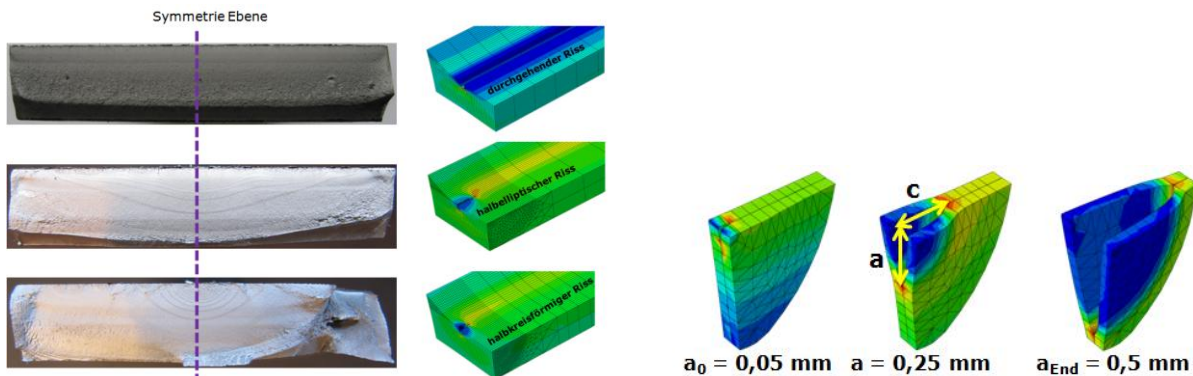


Bild 9: (Links) - Bruchfläche. oben-durchgehender Riss; mittig-halbelliptischer Riss; unten-halbkreisförmiger Riss. (Rechts)-Angerissene Konfigurationen.

2.3 Darstellung der erreichten numerischen Ergebnisse und Diskussion

2.3.1 Ergebnisse eines Kreuzstoßes aus Stahl S355NL

Im Folgenden werden die mit dem vorgestellten Algorithmus der Rissfortschrittssimulation erzielten Ergebnisse präsentiert und zwar für die 3D-Geometrie des Kreuzstoßes. Die gewählte Geometrie des Risses war halbkreisförmig. Berechnungen wurden zuerst ohne Berücksichtigung von Schweißeigenstressungen mit zwei unterschiedlichen Lastverhältnissen ($R = 0$, $R = -1$) bei einer Nennspannungsamplitude von $S_a = 120 \text{ MPa}$ sowie mit drei unterschiedlichen Nennspannungsamplituden ($S_a = 120 \text{ MPa}$, $S_a = 160 \text{ MPa}$ und $S_a = 200 \text{ MPa}$) bei einem Lastverhältnis von $R = -1$ durchgeführt, siehe Bilder 10-12.

Im Bild 10 ist die normierte Risschließspannung S_{cl}/S_{max} sowie die Risschließfunktion $U_{cl} = (S_{max} - S_{cl}) / (S_{max} - S_{min})$ gegenüber der Risslänge dargestellt. Hierbei bestimmt U_{cl} den Anteil des Lastwechsels, bei dem der Riss geöffnet ist. Bei beiden Funktionen (S_{cl}/S_{max} und U_{cl}) sieht man einen graduellen Aufbau des Risschließeffektes, wie er bei Kurzrisen stattfindet. Es werden zwei Effekte unterschieden: ein *transientes Risschließverhalten*, das sich bei Beginn des Risswachstums mit der Risslänge verändert und ein *stabilisiertes Risschließverhalten*, das sich mit zunehmender Risslänge nicht mehr verändert. Es ist auch zu sehen, dass das Risschließverhalten vom R-Verhältnis abhängig ist: Bei gleicher Spannungsamplitude steigen die Funktionen S_{cl}/S_{max} und U_{cl} mit zunehmendem R-Verhältnis an.

Im Bild 11 ist die ΔJ_{eff} -Kurve (a) bzw. die Risswachstumskurve (b) in Abhängigkeit vom R-Verhältnis dargestellt. Wie erwartet steigt die risstreibende Kraft ΔJ_{eff} mit zunehmender Risslänge sowie mit zunehmendem R-Verhältnis an. Dies führt auch dazu, dass die Lebensdauer mit zunehmendem R-Verhältnis bei gleicher Spannungsamplitude abnimmt.

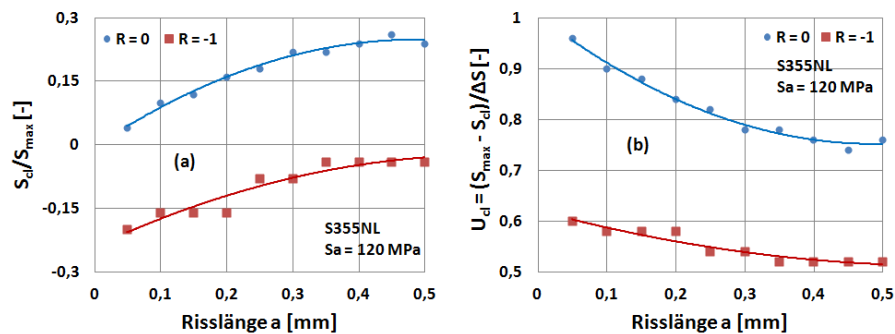


Bild 10: (a)-Normierte Risschließspannungen und (b)-Risschließfunktion in Abhängigkeit vom R-Verhältnis, Kreuzstoß-3D, S355NL.

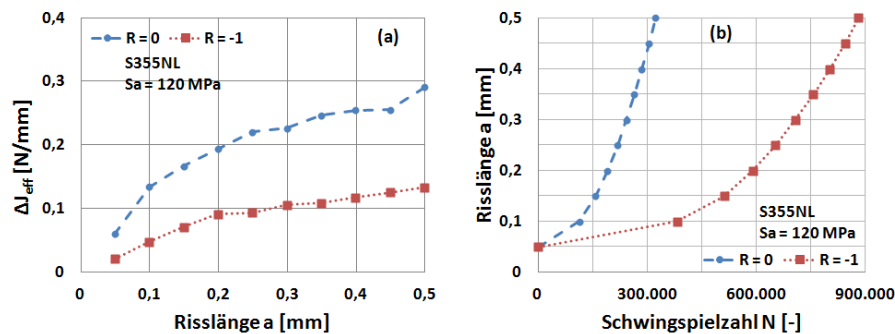


Bild 11: (a)- ΔJ_{eff} und (b)- Risswachstumskurven in Abhängigkeit vom R-Verhältnis, Kreuzstoß-3D, S355NL.

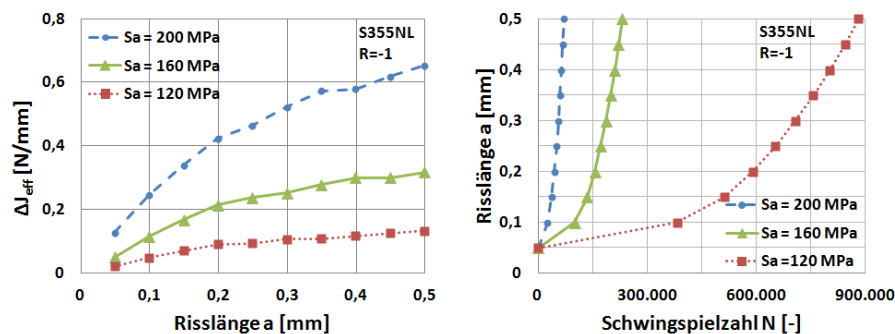


Bild 12: (Links)- ΔJ_{eff} und (Rechts)- Risswachstumskurven in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude, Kreuzstoß-3D, S355NL.

Im Bild 12 sind die ΔJ_{eff} -Kurven sowie die Risswachstumskurven in Abhängigkeit von der Nennspannungsamplitude dargestellt: Wie erwartet steigt ΔJ_{eff} mit zunehmender Belastung an. Dies führt dazu, dass die Lebensdauer mit zunehmender Belastung abnimmt, siehe Bild 12 rechts.

2.3.2 Numerische Ermittlung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen

Bruchmechanische Methoden können angewendet werden, um die Dauerfestigkeit eines Bauteils zu bestimmen [17, 21, 25]. Dabei ist die Dauerfestigkeit mittels der zyklischen R-Kurve (Werkstoffwiderstand oder Schwellenwert gegen Ermüdungsrisswachstum) zu ermitteln. Diese Kurve muss also für den verwendeten Werkstoff im Kurzriszbereich bekannt sein. Sie ist experimentell zu ermitteln und hängt vom R-Verhältnis ab. Für den Stahl S355NL wurde experimentell vom Projektpartner A3 (BAM Berlin) die zyklische R-Kurve bei $R = -1$ ermittelt, siehe Bild 13-a. Für die numerische Dauerfestigkeitsermittlung werden die Rissbeanspruchungskurven $\Delta J - a$ oder $\Delta K_p - a$, mit $\Delta K_p = \sqrt{\Delta J \cdot E'}$, mit einer Variation der Spannungsamplitude berechnet. Die Spannungsamplitude, bei der die berechnete Rissbeanspruchungskurve die zyklische R-Kurve tangential berührt, wird als Dauerfestigkeit des Bauteils definiert, siehe Bild 13-b.

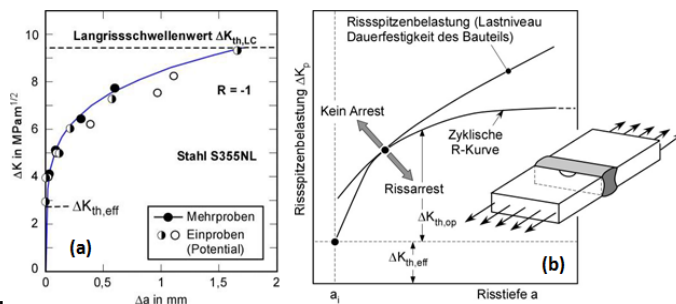


Bild 13: (a)-Zyklische R-Kurve des Stahls S355NL bei $R = -1$, (b)-R-Kurve-Ermittlung der Größe eines nichtarretierenden Risses und der Dauerfestigkeit eines Bauteils. Quelle Zerbst & Madia [21]

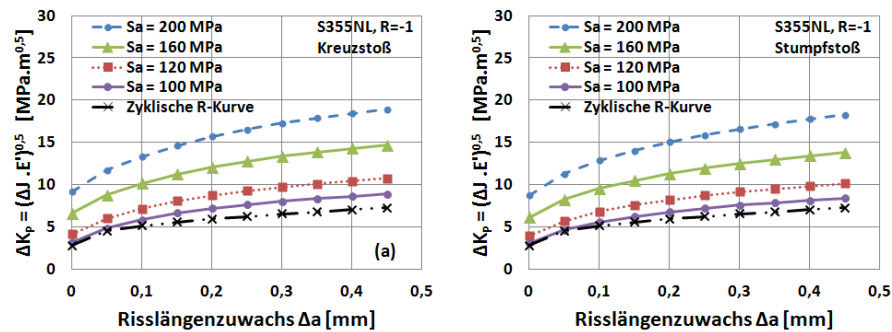


Bild 14: Numerische Ermittlung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen mittels zyklischen R-Kurven. (a)-Kreuzstoß, (b)-Stumpfstoß.

Numerisch wurde ein Kreuz- und Stumpfstoß aus Stahl S355NL für die Abschätzung der Dauerfestigkeit verwendet, siehe Bild 1 und Bild 2. Beide Strukturen wurden mit einem Nahtanstiegswinkel $\theta = 30^\circ$ und mit einem Kerbradius $\rho = 1\text{mm}$ modelliert. Es ist deutlich aus Bild 14 zu sehen, dass die $\Delta K_p - \Delta a$ -Kurven für beide Verbindungen bei gleicher Spannungsamplitude fast identisch sind. Für beide Verbindungen berührt die mit $S_a = 100$ MPa gerechnete Rissbeanspruchungskurve tangential die zyklische R-Kurve des Materials. Dies bedeutet, dass die Dauerfestigkeit von beiden Verbindungen gleich ist und 100 MPa beträgt ($\sigma_e \cong 100$ MPa). Die FE-Rechnung liefert somit fast das gleiche Ergebnis wie die IBESS-Prozedur ($\sigma_e \cong 95$ MPa bzw. 93 MPa für Stumpf- bzw. Kreuzstöße) und wie die experimentelle Ergebnisse, siehe [26].

2.3.3 Einfluss von Eigenspannungen auf das Ermüdungsrisswachstum

Die im Kapitel 3.3.3.2 erzeugten Zug- und Druckeigenspannungsprofile (siehe Bild 7) wurden verwendet, um den Einfluss von Eigenspannungen auf das Ermüdungsrisswachstum numerisch zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Bild 15 dargestellt: Wie erwartet ist festzustellen, dass die mit Druck- bzw. Zugeigenspannungen gerechneten ΔJ_{eff} -Werte im Vergleich zu den Werten ohne Eigenspannungen kleiner bzw. größer sind. Dies führt dazu, dass die Berücksichtigung von Druck- bzw. Zugeigenspannungen zu längeren bzw. kürzeren Lebensdauer führt. Grund dafür ist die Tatsache, dass Druckeigenspannungen Risssschließeffekte verstärken und Zugeigenspannungen diese Effekte dagegen vermindern.

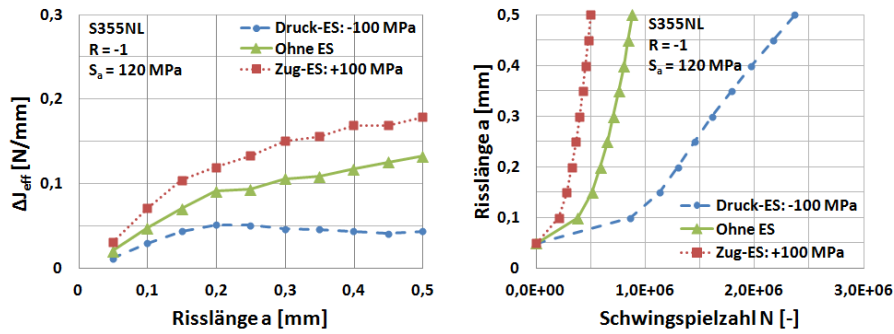


Bild 15: Einfluss von Eigenspannungen auf: (Links)- ΔJ_{eff} ; (Rechts)- die Risswachstumskurve. Kreuzstoß-3D, S355NL.

2.3.4 Vergleich von Ergebnissen aus Berechnung und Experiment

Die für Kreuz- und Stumpfstoße berechneten Anrisslebensdauern wurden mit experimentellen Daten verglichen, siehe Bild 16 und Bild 17. Berechnungen wurden mit und ohne Eigenspannungen durchgeführt, wobei das numerische Anrisskriterium $a = 0,5$ mm beträgt. Experimentelle Daten wurden in unterschiedlichen Forschungsstellen ermittelt, sodass das experimentelle Anrisskriterium von der Methode der Anrissdetektion abhängig ist. Bei den S355NL z.B. war laut Projektpartner G4 (SzM, TU Darmstadt) als Anrisskriterium das Auftreten kleinster Veränderungen im Thermographie-Bild [5], dies entspricht einer Oberflächenrissslänge von ca. $2c = 1$ mm. Die Ermittlung der Anrisschwingenspielzahl bei Kreuzstößen S960 erfolgte in diesem Vorhaben durch Rastlinienversuche. Hierbei entsprach das experimentelle Anrisskriterium eine Risstiefe a zwischen 0,5 mm und 2 mm.

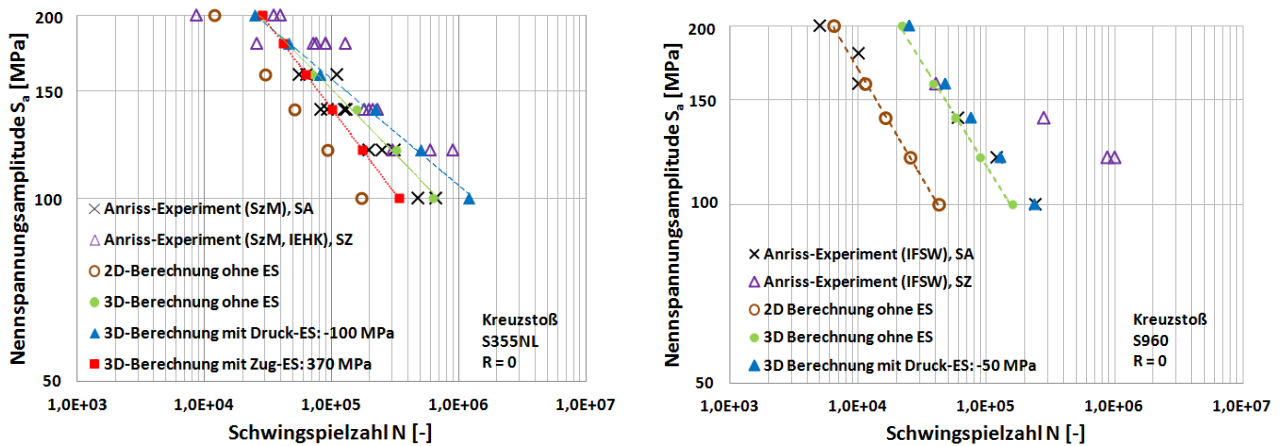


Bild 16: Anrisslebensdauer – Vergleich zwischen Berechnung und Experiment, gegläute (SA) vs. nicht gegläute Proben (SZ), $R=0$. (Links)- Kreuzstoß S355NL. (Rechts)- Kreuzstoß S960QL.

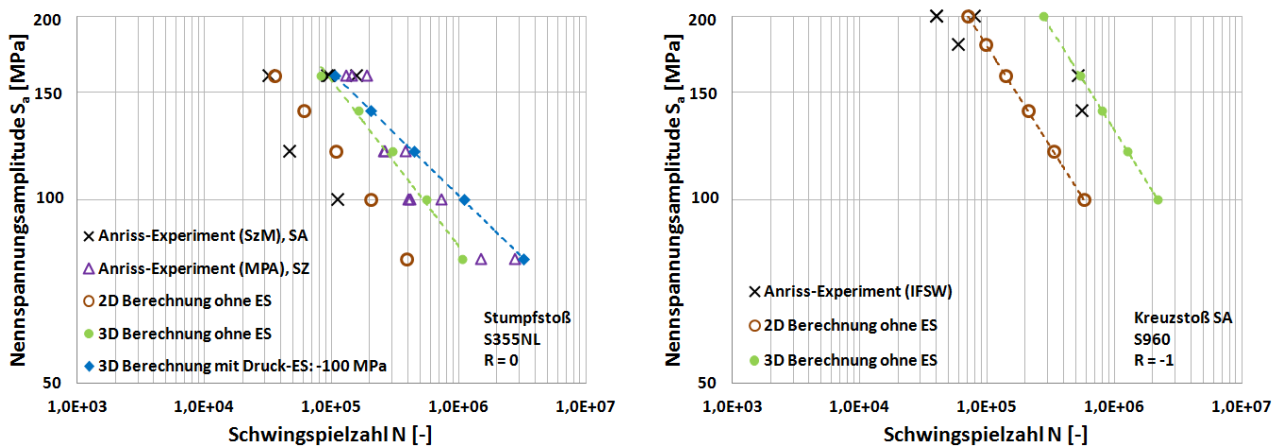


Bild 17: Anrisslebensdauer – Vergleich zwischen Berechnung und Experiment. (Links)-Stumpfstoß S355NL, gegläute (SA) vs. nicht gegläute Proben (SZ), $R=0$. (Rechts)- Kreuzstoß S960QL, gegläute Proben (SA), $R=-1$.

Im Bild 16 und Bild 17 sind Ergebnisse aus Berechnung und Experiment für gegläute (SA) und nichtgeglühte (SZ) Kreuzstöße (S355NL, S960) sowie Stumpfstoße (S355NL) dargestellt. Hinsichtlich der unterschiedlichen

Rissgeometrien (siehe Bild 9), wurden Berechnungen mit 2D-Modellen (entspricht einem durchgehenden Riss im 3D-Modell) als auch mit 3D-Modellen (für den Fall eines halbkreisförmigen Risses) durchgeführt. Es ist festzustellen, dass die Lebensdauern der mit höherer bzw. niedriger Lastamplitude durchgeführten Experimente sehr nah an den Ergebnissen der 2D bzw. 3D Berechnungen liegen. Grund dafür ist die Tatsache, dass es sich bei Schweißverbindungen nicht nur um einen Riss entlang des Nahtübergangs handelt [16, 26], sondern um mehrere Risse und, dass die Anzahl der wachstumsfähigen Risse mit zunehmendem Lastniveau ansteigt.

Bei niedriger Spannungsamplitude zeigen die geglühten Proben im Vergleich zu nichtgeglühten Proben experimentell eine kürzere Anrisschwingenspielzahl, siehe Bild 16 und Bild 17 links. Grund dafür ist folgender: gemäß Eigenspannungsmessungen (im Teilprojekt G2) weisen die unbehandelten Stumpf- und Kreuzstoßproben ein Druckeigenspannungsfeld auf, welches sich günstig auf die Lebensdauer auswirkt. Bei höherer Spannungsamplitude (Bild 16 links) zeigen sowohl Experimente als auch Berechnungen fast keinen Einfluss von Eigenspannungen auf die Anrisschwingenspielzahl. Im Bild 16 links passen Ergebnisse der Berechnungen mit Druckeigenspannungen gut zu Versuchsergebnissen von nichtgeglühten Proben. Ergebnisse der Berechnungen ohne Eigenspannungen passen auch gut zu Versuchsergebnissen von geglühten Proben. Eine gute Übereinstimmung von Ergebnissen aus Berechnung und Experiment wurde damit erzielt.

2.4 Stellungnahme zur wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Frage der wirtschaftlichen Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse ist vornehmlich im Zusammenhang mit der im Forschungscluster IBESS entwickelten IBESS-Prozedur zu beantworten. Mit ihr wurde – als Ergänzung der etablierten Bemessungskonzepte - ein neuartiges Werkzeug geschaffen, mit dem die rechnerische Abschätzung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen auch für bislang normativ nicht erfasste Strukturdetails möglich wird. Damit werden, besser als bisher, die Forderungen nach verkürzten Entwicklungszeiten, optimierter Werkstoffausnutzung und sicherem Betrieb miteinander in Einklang gebracht. Die IBESS-Prozedur wurde im Rahmen des Forschungsclusters für die unmittelbare Anwendung in der Praxis aufbereitet.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Erkenntnisse sind als Grundlagenwissen bezüglich der transienten Materialbeanspruchung und deren Auswirkung auf das Risswachstum von zyklisch beanspruchten Schweißverbindungen in die IBESS-Prozedur eingeflossen.

2.5 Am Projekt beteiligte Personen/Kooperationspartner

Das Forschungsprojekt wurde von dem aus der Sachbeihilfe der DFG finanzierten wissenschaftlichen Mitarbeiter *Herrn M.Sc. Désiré Tchoffo Ngoula* bearbeitet. Unterstützt wurde er dabei von technischen Mitarbeitern sowie studentischen Hilfskräften, die ebenfalls aus der Sachbeihilfe finanziert wurden. Über den gesamten Förderungszeitraum wurde das Forschungsprojekt von *Herrn Prof. Dr.-Ing Michael Vormwald* und von *Herrn Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier* wissenschaftlich und technisch begleitet.

Mit den Kooperationsprojektpartnern des Forschungsclusters IBESS wurde während des gesamten Forschungszeitraumes intensiv zusammengearbeitet. Die IBESS-Projektpartner sind:

- Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin: Teilprojekt A3
- Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik: Teilprojekt G3
- Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen, TU Hamburg-Harburg: Teilprojekt A4
- Institut für Füge- und Schweißtechnik (IfS), TU Braunschweig: Teilprojekt G2
- Staatliche Materialprüfungsanstalt, Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde (MPA/IfW), TU Darmstadt: Teilprojekt A1
- Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik (SzM), TU Darmstadt: Teilprojekt G4
- Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, IWM Freiburg: Teilprojekt A2
- Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK), RWTH Aachen: Teilprojekt G1

2.6 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Im Rahmen des Vorhabens hat *Herr Harold Paulin Njike* seine Masterarbeit mit dem Thema „*Ermüdungsrisswachstum in Schweißverbindungen – Einfluss des Nahtanstiegswinkels und des Kerbradius auf die Lebensdauer*“ sehr erfolgreich abgeschlossen. *Herr Özer Üngor* hat seine Bachelorarbeit mit dem Titel „*Eigenspannungen in zyklisch belasteten Schweißverbindungen – Entstehung, Umlagerung und Relaxation*“ mit gutem Erfolg abgeschlossen. *Herr Désiré Tchoffo Ngoula*, der das Projekt bearbeitet hat, plant die erzielten Forschungsergebnisse in seiner Dissertation zu verwenden.

3 Zusammenfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurden sowohl experimentelle als auch theoretisch- numerische Untersuchungen an Schweißverbindungen durchgeführt. Im experimentellen Teil des Vorhabens wurden Schwingfestigkeitsversuche an Kreuzstößen aus hochfesten Stahl S960QL durchgeführt. Ziel dabei war die Ermittlung von Wöhlerkurven im Zeitfestigkeitsbereich sowie im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit. Hierbei dienten die erzielten Ergebnisse zur Validierung der Modelle und der IBESS-Prozedur. Experimentell lieferten die geglähten Kreuzstoßproben im Vergleich zu den Proben im Schweißzustand kleinere Bruchschwingspielzahlen, siehe Bild 3. Dies lag an der Tatsache, dass die unbehandelten Kreuzstoßproben laut Eigenspannungsmessungen ein Druckeigenspannungsfeld aufweisen, das sich günstig auf die Lebensdauer auswirkt. Der Einfluss des R-Verhältnisses konnte auch experimentell beobachtet werden, siehe Bild 3: die Lebensdauer nimmt mit zunehmendem R-Verhältnis ab.

Im theoretisch-numerischen Teil des Vorhabens wurden Rissfortschrittssimulationen für Kreuz- und Stumpfstoße unter Berücksichtigung von Schweißeigenspannungen sowie von Risschließeffekten durchgeführt. Hierzu wurden ebene und räumliche, mit rissartigen Imperfektionen versehene FEM-Modelle erstellt. Die Simulation des Ermüdungsrisswachstums erfolgte unter Anwendung des Node-Release-Verfahrens mit dem kommerziellen FE-Programm ABAQUS.

Gezielte Strukturberechnungen mit adäquaten thermischen Randbedingungen wurden unter Ansatz des Werkstoffgesetzes nach Chaboche durchgeführt, um die aus dem Schweißprozess resultierenden Eigenspannungsfelder im FE-Modell abbilden zu können. Die gemessenen Schweißeigenspannungsprofile konnten damit gut angenähert werden, siehe Bild 6-a. Nach der Übernahme von Eigenspannungen im FE-Modell wurde ihre Entwicklung bei einer zyklischen äußeren Belastung untersucht: Sowohl Zug- als auch Druckeigenspannungen bauten sich unter einer zyklischen äußeren Belastung ab, siehe Bild 7. Es konnte auch festgestellt werden, dass die ersten Lastwechsel für den Eigenspannungsabbau entscheidend waren und dass der Eigenspannungsabbau von der Höhe der zyklischen Belastung abhing.

Kontaktrandbedingungen wurden zwischen Rissflanken definiert, um plastizitätsinduzierte Risschließeffekte zu berücksichtigen. Das effektive zyklische J -Integral ΔJ_{eff} wurde als Risspitzenbeanspruchungsparameter in einer Rissfortschrittsgleichung in Verbindung mit einem Potenzgesetz für die Berechnung der Lebensdauer verwendet. Zu diesem Zweck wurde ein Python-Code geschrieben, um ΔJ_{eff} für jede Risslängenkonfiguration bestimmen zu können. Die mit ΔJ_{eff} berechneten Anrisslebensdauern wurden mit experimentellen Daten verglichen: es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungs- und Versuchsergebnissen, siehe Bild 16 und Bild 17. ΔJ_{eff} ist offenbar ein geeigneter Parameter für Berechnungen zur Anrisslebensdauer vorhersage von Schweißverbindungen.

Der Einfluss von Schweißeigenspannungen auf ΔJ_{eff} als auch auf die Anrisslebensdauer wurde numerisch untersucht (siehe Bild 15 und Bild 16 links): Wie erwartet wirken sich Druckeigenspannungen bei niedriger Spannungsamplitude günstig auf die Lebensdauer aus und Zugeigenspannungen dagegen führen zu kürzerer Lebensdauer. Bei höheren Lastamplituden spielen Eigenspannungen praktisch keine Rolle mehr.

Die Schwingfestigkeiten von Kreuz- und Stumpfstoßen aus S355NL bei $R = -1$ wurden unter Verwendung der zyklischen R-Kurve (Werkstoffwiderstand oder Schwellenwert gegen Ermüdungsrisswachstum) des Stahls S355NL sowie von numerisch berechneten Rissbeanspruchungskurven bestimmt: die Berechnungen lieferten für beide Verbindungen die gleiche Dauerfestigkeit $\sigma_w \cong 100$ MPa, siehe Bild 14. Dieses Ergebnis entsprach den Ergebnissen der IBESS-Prozedur sowie Versuchsergebnissen, siehe [26].

Folgende Erkenntnisse und Daten wurden dem Forschungscluster IBESS als Basisdaten zur Validierung zur Verfügung gestellt:

- FE-Ergebnisse der Spannungstiefenprofile am Nahtauslauf, die mit gescannten Proben sowie idealisierten Probengeometrie berechnet wurden.
- Experimentelle Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche an Kreuzstößen aus Stahl S960QL.
- Numerische Ergebnisse sowie Erkenntnisse zu der Umlagerung von Schweißeigenspannungen bei zyklischer Belastung.
- Numerische Ergebnisse des zyklischen J -Integrals und des effektiven zyklischen J -Integrals für Stumpf- und Kreuzstoße bei kurzen halbkreisförmigen Rissen.
- Numerische Erkenntnisse zum Schließverhalten von kurzen Rissen.

Das Ziel dieses Teilprojekts (G3) wurde erreicht.

4 Literaturverzeichnis

- [1] E. Herz, O. Hertel, M. Vormwald: Numerical simulation of plasticity induced fatigue crack closure for autofrettaged intersecting holes. *Engineering Fracture Mechanics*, 78, S. 559-572, 2011.
- [2] R. Döring, J. Hoffmeyer, T. Seeger, M. Vormwald: A Plasticity Model for Calculating Stress-Strain Sequences Under Multiaxial Nonproportional Cyclic Loading. *Computational Materials Science*, 28, S. 587-596, 2003.
- [3] R. Thumser, J.W. Bergmann, M. Vormwald: Residual stress fields and fatigue analysis of autofrettaged parts. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79, S 113-117, 2002.
- [4] U. Zerbst: Assessment of welded joints by fracture mechanics. IBESS – The development of a procedure. *Proceedings of the 4th Symposium on Structural Durability in Darmstadt*, ISBN 978-3-8396-0734-3, S. 49-65, 2014.
- [5] H. Th. Beier, B. Schork, J. Bernhard, D. Tchoffo Ngoula, T. Melz, M. Oechsner, M. Vormwald: Simulation of fatigue crack growth in welded joints. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 46 (2) pp. 110-122. ISSN 0933-5137, 2015.
- [6] P.F.P. de Matos, D. Nowell: Numerical simulation of plasticity-induced fatigue crack closure with emphasis on the crack growth scheme: 2D and 3D analyses. *Engineering Fracture Mechanics*, in Press, Corrected Proof, online, doi:10.1016/j.engfracmech.2007.10.017
- [7] J.L. Chaboche: A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories, *Int. J. Plast.* 24, 1642-1693, 2008.
- [8] Hibbitt, Karlson and Sorensen Inc.: ABAQUS/Standard user's manual, 2012, version 6.12. J.L.
- [9] E. Herz, R. Thumser, J.W. Bergmann, M. Vormwald: Endurance limit of autofrettaged Diesel-engine injection tubes with defects. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(1), S. 3-21, 2006.
- [10] J. R. Rice: A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, ARPA SD-86, Report E39, Division of Engineering, Brown University Providence, R.I. 1-40, 1967.
- [11] N. Dowling, J. Begley: Fatigue crack growth during gross plasticity and the J-integral. *Mechanics of crack growth*, ASTM STP 590, Philadelphia 82-103, 1976.
- [12] D. Tchoffo Ngoula, H. Th. Beier, M. Vormwald: Numerische Modellierung des Ermüdungsrisswachstums in Schweißverbindungen unter Berücksichtigung von Eigenspannungen. *DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315*, S. 294-299, 2015.
- [13] D. Radaj, C.M. Sonsino and W. Fricke: *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*, Second edition. WILEY-VCH Verlag, 2006.
- [14] S.J. Maddox : Calculating the fatigue strength of a welded joint using fracture mechanics. *Metal Construction* 2, 327-331, 1970.
- [15] J. Polak : Cyclic deformation, crack initiation, and low-cycle fatigue. In: Ritchie R.O Ritchie und Y. Murakami (Hrsg.): *Comprehensive Structural Integrity; Volume 4: Cyclic loading and Fracture*; Elsevier, 1-39, 2003.
- [16] B. Schork, U. Zerbst, P. Kucharczyk, J. Bernhard, M. Kaffenberger, J. Baumgartner, M. Oechsner: Imperfektionen für die Bewertung von Schweißverbindungen. *DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315*, S. 271-276, 2015.
- [17] U. Zerbst, H. Th. Beier, T. Nitschke-Pagel: IBESS: Integrale bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen-Eine Einführung. *DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315*, S. 265-270, 2015.
- [18] M. Kaffenberger, M. Vormwald: Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSGgeschweißter Dünnbleche aus Stahl. *AViF Forschungsprojekt A249, Zwischenbericht 1*, 2007.
- [19] J. Hensel, T. Nitschke-Pagel, K. Dilger: Effects of residual stresses and compressive mean stresses on the fatigue strength of longitudinal fillet-welded gusets. *Weld World* (2016) 60:267-281. DOI 10.1007/s40194-015-0284-6.
- [20] A. Hobbacher: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. *IIW Document XIII-1965-03/XV-1127-03*, Revision 2006, International Institute of Welding (IIW), 2006.
- [21] M. Madia, U. Zerbst, H. Th. Beier, D. Schöne: IBESS: Analytische Beschreibung von Rissarrest, Kurz- und Langrisswachstum in Schweißverbindungen. *DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315*, S. 300-305, 2015.
- [22] G. Pusch, P. Hübner: Bruchverhalten des Stahles StE 960 und seiner Schweißverbindung bei statischer und zyklischer Belastung, *Europäische Kommission: technische Forschung Stahl* (1994) S. 40-42.
- [23] C.M. Sonsino: Effect of residual stresses on the fatigue behaviour of welded joints depending on loading conditions and weld geometry. *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 88-101. Online, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2008.02.015.
- [24] Tso-Liang Teng, Peng-Hsiang chang: Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints. *Journal of Materials Processing Technology* 145 (2004) 325-335. Online, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.07.012.
- [25] U. Zerbst, M. Madia (2015): Der Schwellenwert ΔK_{th} als Auslegekriterium. *Aktuelle Entwicklungen und Fragestellungen*. *DVM-Bericht* 247, 305-321.
- [26] U. Zerbst (2016): *Schussbericht zu den IGF-Vorhaben „Analytische bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit“ (IBESS-A3)*.
- [27] J. Bernhard, M. Madia, B. Schork, P. Kucharczyk, D. Tchoffo Ngoula, J. Baumgartner, D. Schöne: IBESS: Integrale bruchmechanische Ermittlung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen: Validierung an Stumpfstößen und Kreuzstößen. *DVS Congress 2015, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, DVS-Bericht 315*, S. 306-309, 2015.