

Ermüdungsrisssfortschritt in metallischen Strukturen unter Berücksichtigung von Plastizitätseffekten bei nichtproportionalen Belastungen

DFG-Abschlussbericht
Förder-Nr. Vo729/13-1



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für Stahlbau und
Werkstoffmechanik



Zusammensetzung der Arbeitsgruppe:

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

Projektdurchführung: M.Sc. Yiğiter Hoş (hos@wm.tu-darmstadt.de)

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Gewinnung grundlegender Erkenntnisse bezüglich des Ermüdungsrisswachstums bei proportionaler und insbesondere nichtproportionaler Schwingbelastung. Auf der Basis dieser Erkenntnisse sollte ein erster Schritt hin zu einem Simulationsverfahren gegangen werden, das es erlaubt, realitätsnahe Rissfortschrittslebensdauern zu prognostizieren. Hierfür wurden experimentelle und numerische Untersuchungen an dünnwandigen Rohren aus Baustahl durchgeführt.

Im experimentellen Teil des Vorhabens wurden drei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Versuchsreihe diente der Bestimmung von Materialparametern. Ungekerbte dünnwandige Rohre wurden unter Längskraft und Torsion zyklisch belastet. Die Ergebnisse der 16 Versuche mit unterschiedlichen Arten von Schwingbeanspruchungen, dehnungs- und spannungskontrolliert, mit und ohne Mittelspannungen, einachsig und mehrachsig, proportional und nichtproportional, führten zu einem Satz von Materialparametern für ein Plastizitätsmodell, das in der Lage ist, nichtproportionale Verfestigung und zyklisches Kriechen unter proportionalen sowie nichtproportionalen Beanspruchungsbedingungen darzustellen.

In der zweiten Versuchsreihe mit 36 Versuchen wurden Proben mit einer Starterkerbe unter diversen Belastungen bis zum Versagen belastet. Aus diesen Experimenten wurden anhand fotografischer Aufnahmen unter anderem Risswachstumskurven sowie Rissfortschrittsgeschwindigkeiten und Rissspitzenpositionen ermittelt. Die dritte Versuchsreihe besteht aus Experimenten, bei denen Verformungsfeldmessungen unter Verwendung der Methode der digitalen Bildkorrelation durchgeführt wurden. In diesen Experimenten wurden einige grundlegende Versuche aus der zweiten Versuchsreihe wiederholt. Aus diesen Experimenten wurden unter anderen die effektiven Schwingweiten, d.h. die Schwingweiten mit geöffneten Rissen, und die Dehnungsfelder in der Nähe der Risspitze ermittelt.

Im numerischen Teil des Vorhabens wurden neben der bereits erwähnten Parameteridentifikation im Wesentlichen Rissfortschrittssimulationen für die Proben mit Starterkerbe unter Berücksichtigung von Plastizität und Riss schließen durchgeführt. Für diesen Zweck wurden 3D-Finite-Elemente-Modelle erstellt. Die Simulation des Ermüdungsrisswachstums erfolgte unter Anwendung des Knotenlöse-(Node-Release)-Verfahrens mit dem kommerziellen Finite Element Programm ABAQUS. Das Plastizitätsmodell wurde an der UMAT-Schnittstelle eingepflegt.

Als Arbeitshypothese wurde in diesem Projekt postuliert, dass das effektive zyklische ΔJ_{eff} -Integral in der Lage sein sollte, die Risswachstumsgeschwindigkeiten auch bei nichtproportionaler Mixed-Mode-Beanspruchung einheitlich zu beschreiben. Die interne ABAQUS-Software zur Berechnung von J-Integralen ist nur zur Anwendung bei monotoner Belastung geeignet. Aus diesem Grund ist ein eigener Python-Code zur Durchführung dieser Auswertungen weiterentwickelt worden.

Die Finite Elemente Simulationen ergaben für den Basisfall einer Schwingbeanspruchung mit reiner Normalkraft eine gute Übereinstimmung der Beschreibung des Ermüdungsrisswachstums unter Verwendung des effektiven zyklischen ΔJ_{eff} -Integrals. Diese Aussage beinhaltet, dass die Berechnungen sowohl effektiver Schwingweiten als auch des ΔJ_{eff} -Integrals mit befriedigender bis guter Genauigkeit ausgeführt werden können.

Im Fall kombiniert mehrachsiger Belastung sind größere Unterschiede zwischen experimentell beobachteten und simulierten effektiven Schwingweiten aufgetreten. In der Simulation sind die effektiven Schwingweiten größer. Mit diesen eigentlich zu großen effektiven Schwingweiten sind zugehörige zyklische ΔJ_{eff} -Integral berechnet worden. Obwohl angenommen werden kann, dass diese Werte eher zu groß als zu klein sind, gelingt es derzeit nicht, das im Fall nichtproportionaler Mixed-Mode-Beanspruchung auftretende, relativ schnell erfolgende Ermüdungsrisswachstum mit einer einheitlichen, übergreifenden Theorie zu beschreiben. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Einflussgrößen auf das Ermüdungsrisswachstum sind äußerst zahlreich. Im Rahmen der anstehenden Verbesserung der Simulationsmethodik müssen gleichzeitig alle diese Einflussgrößen künftig verbessert erfasst werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Angaben	4
2. Arbeits- und Ergebnisbericht	5
2.1. Zielsetzung des Projektes	5
2.2. Entwicklung der durchgeführten Arbeiten und Darstellung der Ergebnisse	5
2.2.1. Experimentelle Arbeiten	5
2.2.1.1. Herstellung der Proben und der Einspann- sowie Messvorrichtung	5
2.2.1.2. Identifikation der Parameter des verwendeten Plastizitätsmodells	6
2.2.1.3. Rissfortschrittversuche	7
2.2.1.4. Verformungsfeldmessung mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation	9
2.2.2. Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	11
2.2.2.1. Berechnung des ΔJ -Integrals	11
2.2.2.2. Simulation für den Fall Normalkraft	11
2.2.2.3. Simulation für einen Fall nichtproportionaler Belastung	12
2.3. Stellungnahme zur wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Ergebnisse	14
2.4. Am Projekt beteiligte Personen/Kooperationspartner	14
2.5. Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses	14
3. Literatur	15

1. Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:

Vo729/13-1

Antragsteller:

Prof. Dr. –Ing. Michael Vormwald
Universitätprofessor
06.05.1957, deutsch

Institut:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik
Fachgebiet Werkstoffmechanik

Thema:

Ermüdungsrissfortschritt in metallischen Strukturen unter Berücksichtigung von Plastizitätseffekten bei nichtproportionalen Belastungen

Berichtszeitraum: 01.04.2011 – 31.12.2015

Förderungszeitraum: 01.04.2011 – 31.12.2015

Publikationen aus der Projekt

a)

1. Hos Y, Vormwald M, Freire JLF. Measurements of strain fields around crack tips under proportional and non-proportional mixed-mode fatigue loading. Int J Fatigue (2016) (in press)
2. Hos Y, Vormwald M. Experimental study of crack growth under non-proportional loading along with first modeling attempts, Int J Fatigue (2016) (submitted)
3. Hos Y, Vormwald M, Freire JLF. Measurement and simulation of strain fields around crack tips under mixed-mode fatigue loading. Frattura ed Integrità Strutturale 33 (2015) 42-55, <http://www.fracturae.com/index.php/fis/article/download/IGF-ESIS.33.06/1499>
4. Hos Y, Vormwald M. Measurement and simulation of crack growth rate and direction under non-proportional loadings. Frattura ed Integrità Strutturale 34 (2015) 133-141, <http://www.fracturae.com/index.php/fis/article/download/IGF-ESIS.34.14/1591>
5. Zerres P, Vormwald M. Review of fatigue crack growth under non-proportional mixed-mode loading. Int J Fatigue 58 (2014) 75–83

b)

1. Hos Y, Vormwald M. Measurement and simulation of crack growth rate and direction under non-proportional loadings, Konferenzbeitrag: The 5th International Conference on Crack Paths (Ferrara , 16-18 September 2015)
2. Hos Y, Vormwald M. Ermüdungsrissfortschritt bei nichtproportionalen Belastungen – Mess- und Simulationsergebnisse, Konferenzbeitrag: 48. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit: Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethode und Anwendungen (Freiburg, 16-17 Februar 2016)
3. Hos Y. Experimental study of crack growth behavior under nonproportional loading in S235 steel, Proceedings 36. Werkstoffmechanikseminar (Sensbachtal, 23.-27. Februar 2015) ISBN 978-3-939195-6, S. 66-78

2. Arbeits- und Ergebnisbericht

2.1. Zielsetzung des Projekts

Ziel des Vorhabens war die Gewinnung grundlegender Erkenntnisse bezüglich des Ermüdungsrisswachstums bei proportionaler und insbesondere nichtproportionaler Schwingbelastung. Auf der Basis dieser Erkenntnisse sollte ein erster Schritt hin zu einem Simulationsverfahren gegangen werden, das es erlaubt, realitätsnahe Rissfortschrittslebensdauern zu prognostizieren. Dabei sollte eine Reihe von Aspekten beleuchtet werden, beginnend mit der Bestimmung des effektiven Anteils eines Schwingspiels, dem ihm zuzuordnenden Risswachstumsinkrement bis zur Darstellung der nichtproportionalen Mixed-Mode-Rissspitzenbeanspruchung auch bei Rissuferkontakt. Die anzuwendende Mixed-Mode-Hypothese sollte auf einem Rissspitzenparameter der elastisch plastischen Bruchmechanik basieren. Deshalb sollte das Verformungsverhalten des Werkstoffs mit einem phänomenologischen Plastizitätsmodell beschrieben, das in der Lage ist, zyklische Ver- und Entfestigung, Ratcheting und zyklische Spannungsrelaxation sowie nichtproportionale Verfestigung zu beschreiben.

2.2. Entwicklung der durchgeführten Arbeiten und Darstellung der Ergebnisse

Der Stand der Wissenschaft zum Thema des Forschungsprojekts wurde in einem Überblicksaufsatz zusammen gefasst [1].

2.2.1. Experimentelle Arbeiten

Für die Durchführung der Versuche stand eine servohydraulische Tension-Torsion-Prüfmaschine zur Verfügung, mit der nichtproportionale Lastkombinationen von Zug-Druck und Torsion auf Probekörper, hier dünnwandige Rohre, aufgebracht werden können. Das Versuchsprogramm bestand aus zwei Abschnitten. Im ersten Abschnitt wurden Versuche zur Parameteridentifikation des Materialmodells durchgeführt, bei den Rissfortschrittsversuchen im zweiten Abschnitt wurden sowohl der Risspfad und die Risswachstumsrate als auch Rissspitzen-Deformationsfelder messtechnisch erfasst.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an Proben aus dem Baustahl S235 durchgeführt. In diesem Vorhaben steht die zyklische Plastizität im Mittelpunkt. Der Werkstoff sollte daher gut plastisch verformbar sein und ein stabiles Ermüdungsrisswachstum über große Risslängenbereiche aufweisen. Der Baustahl S235 erfüllt durch seine niedrige Fließgrenze und hohe Bruchzähigkeit beide Bedingungen. Außerdem ist der Werkstoff preisgünstig und leicht erhältlich. Ungeachtet der Wahl des Werkstoffs, sollten die Ergebnisse dieser Arbeit Allgemeingültigkeit für andere zähe Werkstoffe besitzen, was mit weiteren Forschungsarbeiten zu validieren wäre.

2.2.1.1. Herstellung der Proben und der Einspann- sowie Messvorrichtung

Die Proben wurden aus in Längsrichtung geschweißten Rohren $\varnothing 42,4 \times 2,6$ des Baustahls S235 hergestellt. Die Proben für die Rissfortschrittsversuche wurden mit einer schlitzförmigen Rissstarterkerbe versehen, siehe Abb. 1.

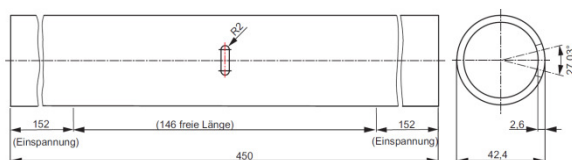


Abbildung 1: Probenform für Rissfortschrittsversuche

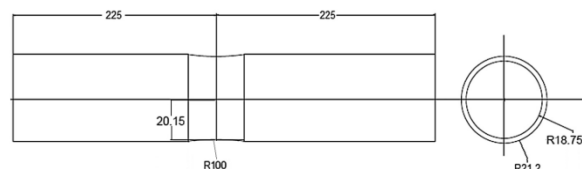


Abbildung 2: Probenform für Versuche zur Identifikation der Materialparameter

Das monotone und zyklische Deformationsverhalten wurde durch dehnungskontrollierte Schwingversuche mit Proben ermittelt, die nahezu dieselbe Gestalt haben wie die Kerbproben, mit Ausnahme der Rissstarterkerbe und einer leichten Blechdickenreduktion im Messbereich, Abb. 2. Ein

Dehnmessgerät (Produkt des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt) mit einer Messlänge von 12.5 mm wurde auf der Oberfläche montiert. Normal- und Schubdehnungen können mit diesem Gerät gleichzeitig gemessen werden.

In die Proben für die Rissfortschrittversuche wurde ein Raster mit einem Punktabstand von 1,00mm graviert. Dieses Raster diente zusammen mit einer mattweißen Scanspray-Beschichtung zur leichteren Identifikation der Rissspitzenkoordinaten auf Fotos, die während der Rissfortschrittsversuche in regelmäßigen Abständen von der Probenoberfläche (mit 3 Kameras) aufgenommen wurden. Dazu wurden die Versuche in regelmäßigen, vordefinierten Intervallen angehalten. Dann wurde die Probe mit 90% der Maximallast im Versuch statisch belastet. In diesem Belastungszustand mit geöffnetem und deshalb gut sichtbarem Riss wurde die Oberfläche der Probe fotografiert. Die Probe wurde wieder entlastet und der Versuch wurde planmäßig weitergefahren.

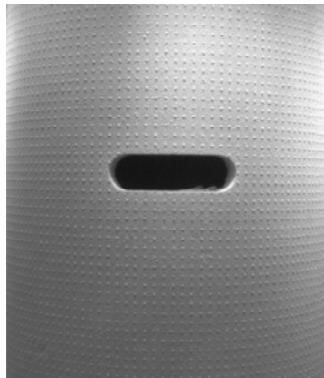


Abbildung 3: Graviertes Punktraster auf der Probenoberfläche

2.2.1.2. Identifikation der Parameter des verwendeten Plastizitätsmodells

Proben der Form gemäß Abb. 2 wurden in 15 Versuchen benutzt, um Materialparameter für ein Plastizitätsmodell [2] zu bestimmen. Das durchgeführte Versuchsprogramm ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Zur Definition der Parameter und der konstitutiven Gleichungen des Plastizitätsmodells wird auf die Veröffentlichungen [2][3] verwiesen. Aus diesen Versuchen ist der Parametersatz ermittelt worden, der in Tabelle 1 und 2 dargestellt ist.

E in MPa	R _{p0.2} in MPa	K' in MPa	n'
210000	378	680	0.11

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte der untersuchten Charge des Werkstoffs S235

	η	ξ	ψ	c_T	c_A	$q_{N,0}$	a_N	b_N
	0.2	0.02	2	50	80	2.25	-0.4	280
		$r_{init}^{(i)}$ in MPa	b_1	b_2	b_3	b_P	a_X	b_X
		202	10	2.5	1	10	0	1
i	$c^{(i)}$	$r_{eq0}^{(i)}$ in MPa	$\alpha_1^{(i)}$	$\alpha_2^{(i)}$	$\alpha_3^{(i)}$	$\alpha_P^{(i)}$	$Q^{(i)}$	$c_X^{(i)}$
0	-	201	0	0	0	0	-	-
1	1256	40	0	0	0	0	3	7
2	408.2	31.9	0	0	0	0	3	7
3	125.6	35.4	0	0	0	0	3	7
4	40.82	39.4	0	0	0	0	3	3
5	12.56	72.5	0	0	0	0	3	3

Tabelle 2: Parameter des Plastizitätsmodells [3] der untersuchten Charge des Werkstoffs S235

Name	Steuerung	ϵ_a, σ_a	$R_{\sigma,\epsilon}$	γ_a, τ_a	$R_{\tau,\gamma}$	Φ	Anmerkung
M-001	Dehnung	1%	-1	-	-	-	Zyklische Ver- bzw. Entfestigung, einachsigt
M-002	Dehnung	0,70%	-1	-	-	-	Zyklische Ver- bzw. Entfestigung, einachsigt
M-003	Dehnung	2%	-1	-	-	-	Zyklische Ver- bzw. Entfestigung, einachsigt
M-004	Dehnung	0,25%	-1	-	-	-	Zyklische Ver- bzw. Entfestigung, einachsigt
M-005	Spannung	247.5 MPa	-0,5	-	-	-	Einachsigt Ratcheting, Bruch über Einspannung
M-006	Spannung	325 MPa	-0,625	-	-	-	Einachsigt Ratcheting

M-007	Spannung	224 MPa	-1	74 MPa	konst.	-	Nichtproportionales Ratcheting
M-008	Spannung	188 MPa	konst.	173 MPa	-1	-	Nichtproportionales Ratcheting
M-009	Dehnung	1%	-1	1,73%	-1	90°	Nichtproportionale Verfestigung
M-010	Dehnung	0,25%	-1	0,433%	-1	90°	Nichtproportionale Verfestigung, Einspannungsbruch
M-011	Dehnung	0,404%	-1	0,7%	-1	90°	Nichtproportionale Verfestigung
M-012	Spannung	325 MPa	-1,6	-	-	-	Einachsiges Ratcheting
M-013	Spannung	350 MPa	-1,33	-	-	-	Einachsiges Ratcheting
M-014	Spannung	350 MPa	-0,76	-	-	-	Einachsiges Ratcheting
M-015	Dehnung	max. 1,75%	-	-	-	-	Incremental Step Test
M-016	Dehnung	-	-	max. 1,75%	-	-	Incremental Step Test

Tabelle 3: Experimente zur Identifikation der Materialparameter (Φ : Phasenwinkel)

2.2.1.3. Rissfortschrittversuche

In einer ersten Versuchsreihe wurden Risspfade in Abhängigkeit von der Schwingspielzahl bestimmt. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 4 abgebildet. Zudem wurden noch 9 Zweistufenversuche (R-034 bis R-043) durchgeführt, deren Versuchsparameter Tabelle 5 entnommen werden können. Mit dem Index 1 sind die Amplituden, R-Verhältnisse und Häufigkeiten der ersten, größeren Stufe mitgeteilt, mit Index 2 diejenigen der zweiten, kleineren Stufe. Amplituden, R-Verhältnisse und Häufigkeiten wurden so gewählt, dass bei einer linearen Schadensakkumulationsrechnung die beiden Stufen ungefähr gleiche Beiträge zur Schadensumme bewirken.

#	Axial			Torsional			φ	N	Anmerkungen
	N_m	N_a	R_{ax}	$M_{T,m}$	$M_{T,a}$	R_{tor}			
R-001	0	45	-1	0	0	-	0	16923	
R-002	0	25	-1	0	0	-	0		
	0	35	-1	0	0	-	0	59084	
R-003	0	0	-	0	530	-1	0	28875	
R-004	0	33	-1	0	382	-1	0	9671	
R-005	0	33	-1	0	382	-1	90	31450	
R-006	0	33	-1	0	382	-1	45	15810	
R-007	0	25,66	-1	0	297,11	-1	0	23146	
R-008	0	25,66	-1	0	297,11	-1	90	63402	
R-009	0	25,66	-1	0	297,11	-1	45	54736	
R-010	0	27,93	-1	0	431	-1	0	11943	
R-011	0	27,93	-1	0	431	-1	90	38985	
R-012	0	27,93	-1	0	431	-1	45	17960	
R-013	13,50	31,5	-0,4	0	0	-	0	37336	
R-014	0	0	-	159	371	-0,4	0	89036	
R-015	59,50	10,5	0,7	0	0	-	0	-	
R-016	12	28	-0,4	159	371	-0,4	0	11222	
R-017	12	28	-0,4	159	371	-0,4	90	33388	
R-018	12	28	-0,4	159	371	-0,4	45	20121	
R-019	0	40	-1	159	371	-0,4	0	5491	Verschiedene R-Verhältnisse
R-020	12	28	-0,4	0	530	-1	0	4783	Verschiedene R-Verhältnisse
R-021	0	40	-1	159	371	-0,4	90	15506	Verschiedene R-Verhältnisse mit 90° Phasenverschiebung
R-022	0	40	-1	159	371	-0,4	45	8072	Verschiedene R-Verhältnisse mit 45° Phasenverschiebung
R-023	12	28	-0,4	0	530	-1	90	18563	Verschiedene R-Verhältnisse mit 90° Phasenverschiebung
R-024	12	28	-0,4	0	530	-1	45	13246	Verschiedene R-Verhältnisse mit 45° Phasenverschiebung
R-025	0	33	-1	0	382	-1		11942	Schmetterlingspfad-Versuch (N: f=1Hz; T: f=2Hz)
R-026	0	33	-1	0	382	-1		9174	Schmetterlingspfad-Versuch (N: f=2Hz; T: f=1Hz)
R-027	0	33	-1	0	382	-1		44000	Kreuzpfad-Versuch

Tabelle 4: Übersicht über die einstufig durchgeführten Rissfortschrittversuche zur Bestimmung der Risspfade

#	Axial						Torsional						φ in °	N
	N_{a1} in kN	R_1	h_1	N_{a2} in Nm	R_2	h_2	M_{a1}	R_1	h_1	M_{a2}	R_2	h_2		
R-034	45	-1	1	35	-1	3	0	-	-	0	-	-	-	19600
R-035	33	-1	1	25,66	-1	3	382	-1	1	297	-1	3	0	18756
R-036	33	-1	1	25,66	-1	3	382	-1	1	297	-1	3	90	59016
R-037	33	-1	1	25,66	-1	3	382	-1	1	297	-1	3	45	20432
R-038	45	-1	1	31,5	-0,4	3	0	-	-	0	-	-	-	17409
R-039	0	-	-	0	-	-	530	-1	1	410	-1	4	-	56155
R-040	0	-	-	0	-	-	530	-1	1	371	-0,4	3	-	43953
R-041	33	-1	1	33	-1	3	382	-1	1	297	-1	3	0	12400
R-042	33	-1	1	33	-1	3	382	-1	1	297	-1	3	90	16365

Tabelle 5: Übersicht über die zweistufig durchgeführten Rissfortschrittsversuche zur Bestimmung der Risspfade

In Abb. 5 sind exemplarisch Fotos gezeigt, die zu Versuchsende von Probe R-006 (Foto Nr. 158) aufgenommen wurden. In diesen und in allen anderen während der Versuche aufgenommenen Fotos wurden die Positionen der Risspitzen identifiziert und in Tabellen protokolliert. Die Tabelle 6 zeigt einen Ausschnitt einer solchen Tabelle, hier für nur einen der zwei bis vier Risse je Probe. Darin ist s die Bogenlänge in Rohrumfangsrichtung, gemessen vom Kerbgrund (auf der Oberfläche) und z ist der Abstand in Rohrlängsrichtung von der Probensymmetrieebene. Die Risslänge a ist definiert als die Summe aller Inkremente aller Zuwächse $a = \sum[\Delta a_i] = \sum[(\Delta s_i^2 + \Delta z_i^2)^{1/2}]$. Die Risswachstumsraten wurden berechnet mit $(da/dn)_i = (a_{i+1} - a_i) / (n_{i+1} - n_i)$. Die Tabellen stehen u.a. für künftige eigene Forschungen und für interessierte andere Forscher zur Verfügung. Aus diesen gespeicherten Rohdaten können z.B. Rissfortschrittskurven wie in Abb. 4 erzeugt, Risswachstumsraten berechnet oder Abbildungen der Rissgeometrien wie in Abb. 6 erstellt werden. Die Daten wie in Tabelle 6 werden in der aus dem Projekt hervorgehenden Dissertationsarbeit für jeden einzelnen Versuch in digitaler Form veröffentlicht werden.

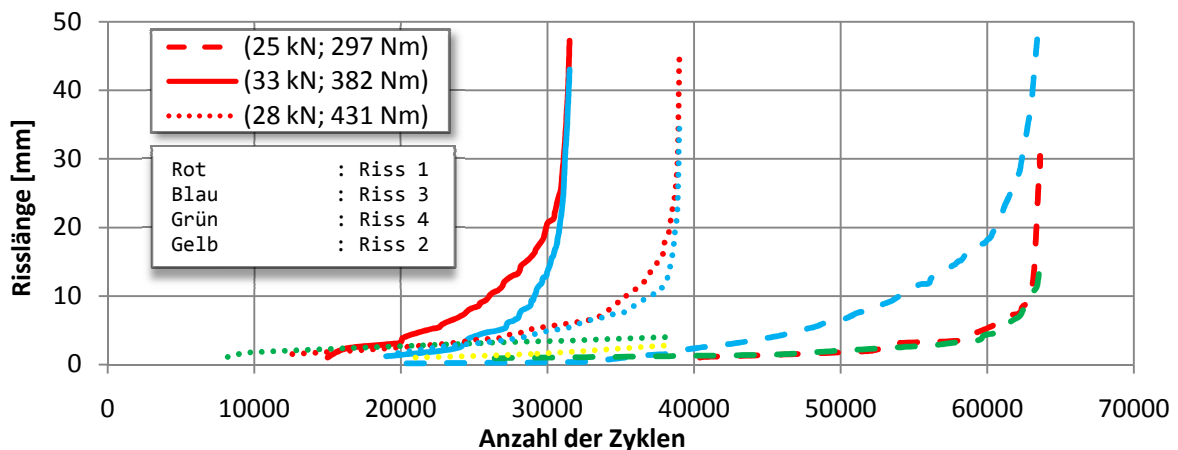


Abbildung 4: Rissfortschrittskurven der Rissfortschrittsversuche mit 90° Phasenverschiebung (R-005, R-008 und R-011)

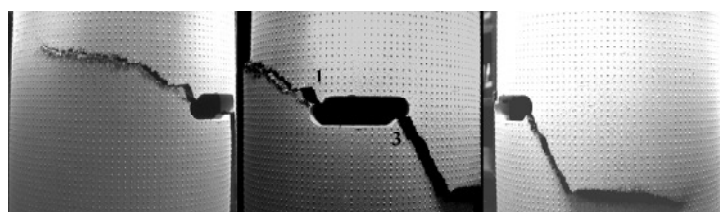


Abbildung 5: Risse an der Probe R-006, nichtproportionale Belastung mit 45° Phasenverschiebung
 $F_{\max} = 33 \text{ kN}$, $M_{\max} = 382 \text{ Nm}$ und $R_F = R_M = -1$

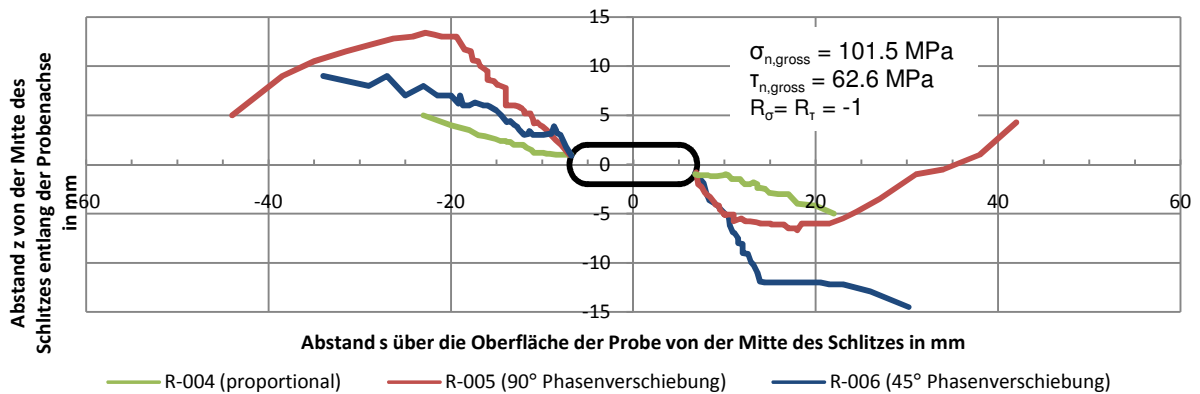


Abbildung 6: Risspfade aus R-004, R-005 and R-006 mit $F_{\max} = 33 \text{ kN}$, $M_{\max} = 382 \text{ Nm}$ und $R_F = R_M = -1$

Probe:		R-006-Fa33-MT382-P45							
laufender Zähler i	Foto	Ssp.	für Riss 1:						
	Nr.	n	s [mm]	z [mm]	Δs [mm]	Δz [mm]	Δa [mm]	a [mm]	da/dn [mm/cyc]
1	93	9300	1.0	3.0				2.04	
2	95	9500	1.4	3.2	0.4	0.2	0.45	2.49	2.5E-03
3	96	9600	1.5	3.5	0.1	0.3	0.32	2.81	6.4E-04
.									
33	156	15600	18.0	7.0	2.0	-1.0	2.24	24.12	2.5E-02
34	157	15700	20.0	9.0	2.0	2.0	2.83	26.94	2.5E-02
35	158	15800	22.0	8.0	2.0	-1.0	2.24	29.18	3.7E-02
36	159	15900	27.0	9.0	5.0	1.0	5.10	34.28	

Tabelle 6: Ausschnitt aus dem Protokoll der Bestimmung der Rissspitzenposition, Probe R-006 mit $F_{\max} = 33 \text{ kN}$, $M_{\max} = 382 \text{ Nm}$ und $R_F = R_M = -1$, Phasenverschiebung 45° , Riss 1

2.2.1.4. Verformungsfeldmessung mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation

Auf Anregung der Gutachter wurden in einer weiteren Versuchsreihe die Deformationsfelder in der Umgebung von Rissspitzen während der Schwingspiele messtechnisch erfasst. Zum Einsatz kam ein eigens beschafftes Messgerät (mit Auswertesoftware) der Firma isi-sys GmbH. Das Gerät macht Aufnahmen von der Probenoberfläche mit bis zu 15 Bildern pro Sekunde. Weitere Information über diese Methode können den Publikationen [4][5] entnommen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden u.a. verwendet, um Riss schließen zu identifizieren, wobei auf die Verwendung von Dehnungsmessstreifen für diesen Zweck verzichtet werden konnte. Sechs solche Versuche sind durchgeführt worden: reine Normalkraft, reines Torsionsmoment, nichtproportionale Belastung mit 90° und 45° Phasenverschiebung. Wegen des mit dieser Versuchstechnik verbundenen Aufwands musste auf die ursprünglich geplante vollständige Wiederholung der Versuche gemäß Tabellen 4 und 5 verzichtet werden.

#	Axial			Torsional			φ	N	Anmerkungen
	N_m	N_a	R_{ax}	$M_{T,m}$	$M_{T,a}$	R_{tor}			
R-028	0	45	-1	0	0	-	0°	20250	Wiederholung R-001 - opt. Bildkorrelation
R-029	0	0	-	0	530	-1	0°	-	Maschinenfehler - Auf Torsion verzichtet
R-030	0	33	-1	0	382	-1	0°	14600	Wiederholung R-004 - opt. Bildkorrelation
R-031	0	33	-1	0	382	-1	90°	33500	Wiederholung R-005 - opt. Bildkorrelation
R-032	0	33	-1	0	382	-1	45°	-	Wiederholung R-006 - Maschinenfehler
R-033	0	33	-1	0	382	-1	45°	15200	Wiederholung R-006 - opt. Bildkorrelation

Tabelle 6: Übersicht über die Versuche mit optischer Bildkorrelation

Zu den wichtigsten Befunden aus diesen Analysen zählen die Verschiebungs- und Dehnungsfelder um die Risspitze, die daraus ermittelbare Rissöffnungsverschiebung und die effektiven Schwingweiten. In Abbildung 7 ist die Rissöffnungsverschiebung während des Versuchs R-028 dargestellt. Die Messung der Relativverschiebung von Punkten gemäß Abb. 8 wurde bei einer Risslänge von 6 mm durchgeführt. Detaillierte Diskussionen solcher Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht [5][6][7].

In Abbildung 9 und 10 sind zwei Kraft-Moment Diagramme als Beispiel dargestellt. Diese Diagramme gehören zu einem Versuch mit 90° Phasenverschiebung und die Zustandspunkte, bei denen Rissöffnen und -schließen auftritt, sind in der Grafik dargestellt. Derartige Aufnahmen wurden regelmäßig bei einem Risslängenzuwachs von 1mm durchgeführt, woraus sich das risslängenabhängige Rissöffnungs- und -schließverhalten bestimmen lässt. Die Punkte, die außerhalb des Kreises liegen, entstehen einmalig durch Regelungsfehler beim Anfahren der Belastung. Die Auswertarbeiten dieser Experimente sind noch nicht abgeschlossen und werden Inhalt der bereit angesprochenen künftigen Dissertationsschrift sein.

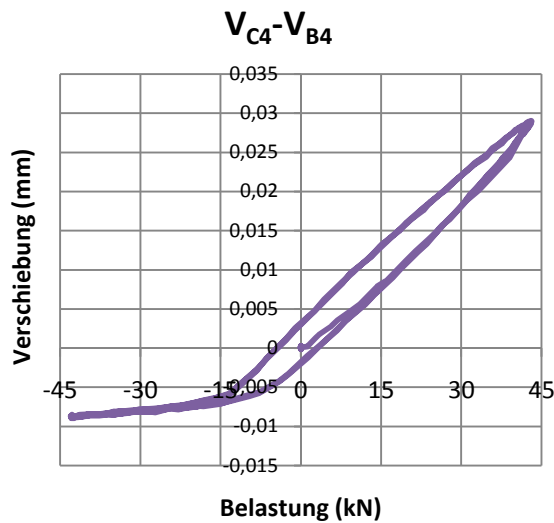


Abbildung 7: Rissöffnungsverschiebung an der Probe R-028 während zweier Zyklen

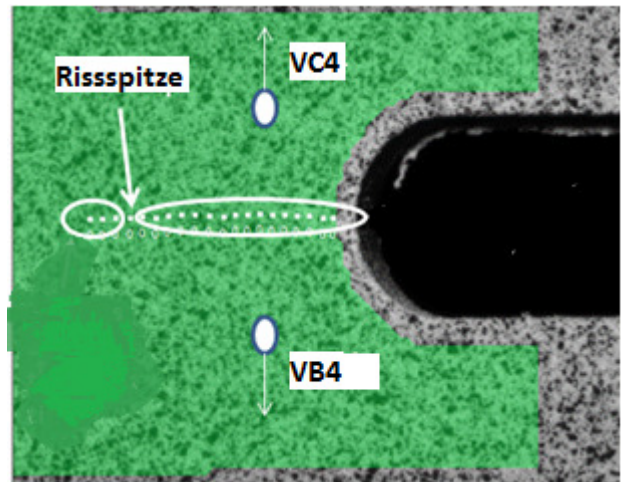


Abbildung 8: Die Lage der Messpunkte C4 und B4

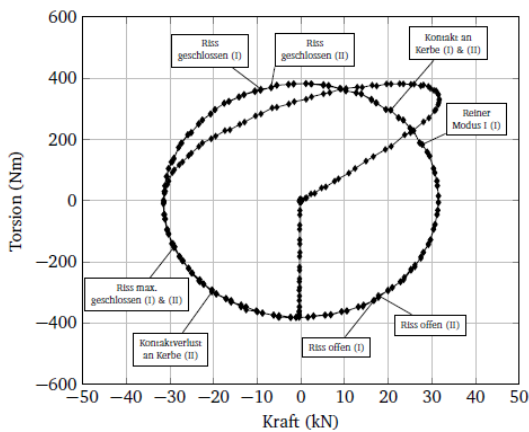


Abbildung 9: Kraft-Moment Diagramm in Probe R-031, Zyklus 31001 und 31002.

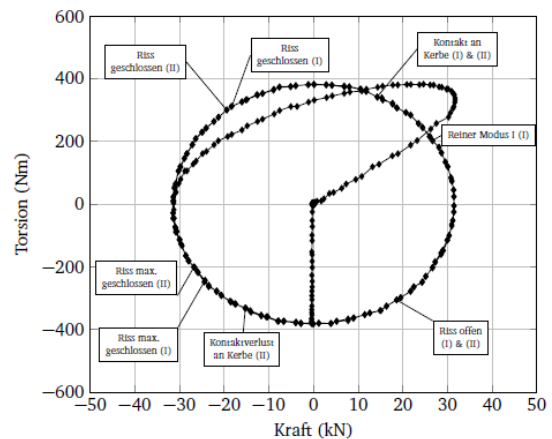


Abbildung 10: Kraft-Moment Diagramm in Probe R-031, Zyklus 31501 und 31502.

2.2.2. Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Für die numerische Simulation wurde die Finite Element Methode unter Verwendung des Programmpakets ABAQUS eingesetzt. Das Plastizitätsmodell [2] ist mithilfe eines UMAT-Unterprogramms eingebracht worden. Außerdem besteht bei ABAQUS die Möglichkeit, sich wiederholende Aufgaben oder komplizierte Rechnungen durch Python-Skripte zu automatisieren. Davon wurde z.B. bei der Berechnung von ΔJ -Integralen Gebrauch gemacht.

2.2.2.1. Berechnung des ΔJ -Integrals

In der elastisch-plastischen Bruchmechanik werden Bruchvorgänge oft mit Hilfe des J-Integrals bewertet. Erweiterungen zur Anwendung und Beschreibung des Ermüdungsrisswachstums gehen auf Dowling und Begley [8] sowie Wüthrich [9] zurück. Bei nichtproportionaler Mixed-Mode-Beanspruchung wurde ein Erweiterungsvorschlag von Hertel et al. [10] unterbreitet. Das zyklische J-Integral wurde gemäß seiner Definition,

$$\Delta J = \int_{\Gamma} \int_0^{\Delta \varepsilon_{ij}} \Delta \sigma_{ij} d\Delta \varepsilon_{ij} dy - \int_{\Gamma} \Delta \sigma_{ij} n_j \frac{\partial \Delta u_i}{\partial x} ds \quad (1)$$

numerisch unter Verwendung eines Python-Skripts berechnet. Ein solches Skript lag zur Anwendung auf zweidimensionale Fälle vor [11]. Dieser Code wurde zur Behandlung dreidimensionaler Fälle erweitert und in diesem Projekt letztendlich eingesetzt. Tatsächlich ausgewertet wurden allerdings nur die J-Integralwerte in Blechmitte.

Das Symbol Δ in Gl. (1) weist auf eine Veränderung der dem Symbol folgenden Variablen hin, nämlich in diesem Fall die Veränderung des Spannungstensors, Dehnungstensors und Verschiebungsvektors. Diese Veränderungen müssen im Bezug zu einem Referenzzustand berechnet werden. Dieser Referenzzustand dient als ein neuer Ursprung, damit die Inkremente dieser Feldvariablen definiert werden können, daher das Symbol Δ . Der Spannungs- und Verschiebungszustand bei Belastungsumkehr ist eindeutig ein solcher Referenzzustand. Danach steht das Symbol Δ für die Änderungen der Feldgrößen nach einem Umkehrpunkt. Deshalb bedeutet das Symbol Δ in ΔJ nicht die Änderungen in J, sondern ΔJ ist eine Funktion seiner Argumente, wie in Gl. (1) definiert.

In nichtproportionalen Fällen gibt es nicht viele Ansätze bezüglich der Wahl der Referenzzustände. Hertel [10] hat einen Algorithmus entwickelt, der pfadunabhängige Werte liefert, wenn Gl. (1) angewendet wird. Wegen dieser Pfadunabhängigkeit sollte der dadurch ermittelte Wert als rissstreibende Kraft gelten. Im nichtproportionalen Fall sind die Lastumkehrpunkte so festgelegt: Wenn die Veränderung in ΔJ zwischen zwei Inkrementen negativ ist, wird der letzte Gleichgewichtszustand als ein Lastumkehrpunkt akzeptiert. Deshalb wird der Referenzzustand zu diesem Zustand gesetzt und die Rechnung wird dann dementsprechend fortgesetzt. Aus diesem Grund ist Abaqus interne Postprozessorsoftware zur J-Integralberechnung nicht für die Berechnung des zyklischen J-Integral verwendbar. Die Feldgrößen sind stattdessen einzeln auszuwerten und mit dem Referenzzustand zu vergleichen. Hertels Algorithmus wurde hier erweitert, um Riss schließen zu berücksichtigen. Nur der Anteil des Zyklus wurde berücksichtigt, während dessen der Riss offen war. Deswegen können die dadurch ermittelten Werte als effektives zyklisches J-Integral, ΔJ_{eff} , benannt werden. Das Lastinkrement, in dem das Riss schließen auftritt, kann durch eine Risswachstumssimulation mithilfe der Finite-Element-Methode gefunden werden.

2.2.2.2. Simulation für den Fall Normalkraft

Bei der Simulation für den Fall reiner Normalkraftbelastung kann bei der Modellerstellung und der Formulierung der Randbedingungen noch von Symmetriebedingungen Gebrauch gemacht werden. Nur ein Viertel der Probe mit Symmetrierandbedingungen wurde unter Annahme gleicher Risslängen an beiden Initiierungsstellen modelliert. Die Simulation beginnt mit zwei Zyklen, die auf eine Struktur ohne Riss aufgebracht werden. Nach diesen zwei Zyklen wird ein Riss mit 0.25 mm Länge eingebracht und zwar durch Lösen der Kopplungsbedingungen von Knoten auf dem Risswachstumspfad. Auf dem neuen Rissufer wird eine Kontaktbedingung aktiviert, damit die gegenseitige Durchdringung der Rissufer verhindert und

dadurch Riss schließen realitätsnah simuliert werden kann. Mit der neuen Risslänge werden wieder zwei Zyklen ohne Risswachstum weiterberechnet. Dieser Knotenlöse-Vorgang (0.25 mm Risswachstum nach zwei Belastungszyklen) wird bis zum Erreichen der gewünschten Risslänge wiederholt. An jedem Risswachstumsschritt sind entweder drei oder vier Elemente beteiligt, so dass die Summe der Länge der Elementkanten auf dem Rissufer 0.25 mm beträgt. Es muss erwähnt werden, dass Empfehlungen in Publikationen von Herz et al. [12][13], Zerres und Vormwald [14] bezüglich Konvergenz nicht erfüllt werden konnten. Der Grund ist die Begrenzung der Simulationskapazität. Diese zitierten Studien wurden mit 2D Geometrien durchgeführt, wobei der Simulationsaufwand nicht so groß ist wie bei 3D Modellen. Die dort empfohlenen Risswachstumsschritte sind so klein, dass sie in einer 3D Simulation mit vielen Nichtlinearitäten derzeit nicht umsetzbar sind. Ebenso ist derzeit eine Neuvernetzung mit Übertragung der Zustandsvariablen zwischen zwei FE-Netzen aus Rechenkapazitätsgründen nicht möglich, weshalb das Knotenlöse-Verfahren angewendet werden musste, wobei der jeweilige Risspfad aus den experimentellen Untersuchungen bekannt war.

In Abbildung 11 sind die berechneten ΔJ_{eff} Werte für drei verschiedene Risslängen in Abhängigkeit von der Änderung der Last-Nennspannung, $\Delta\sigma$, abgebildet. In Abbildung 12 sind gemessene Risswachstumsraten (Probe R-001) über den mit der geschilderten Simulationsmethode erhaltenen ΔJ_{eff} Werten aufgetragen. In der Abbildung ist ein Zusammenhang der beiden Größen aus der Literatur [15] mit eingetragen, der aus dem Bereich kleinerer Risswachstumsraten (10^{-5} bis 10^{-4} mm/cyc) extrapoliert wurde. Dieser Vergleich zeigt, dass die Simulation erwartete und realitätsnahe Ergebnisse liefert.

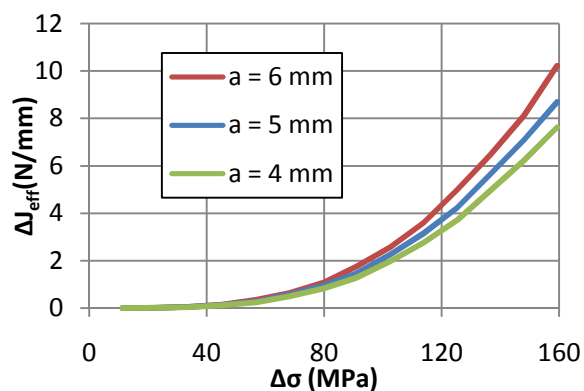


Abbildung 11: ΔJ_{eff} als Funktion von $\Delta\sigma = \Delta F/A$, Probe R-001, axiale Belastung mit $F_{\text{max}} = 45$ kN, $R_F = -1$, Material: S235.

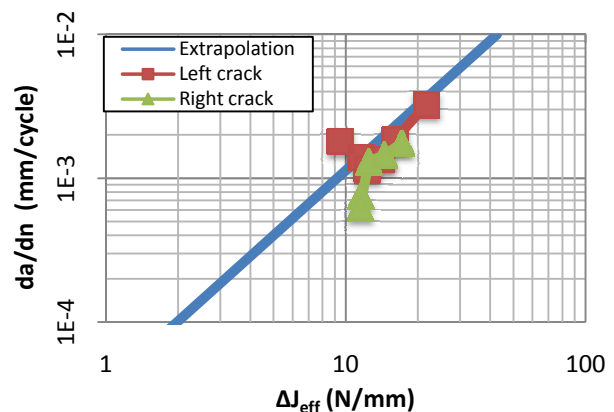
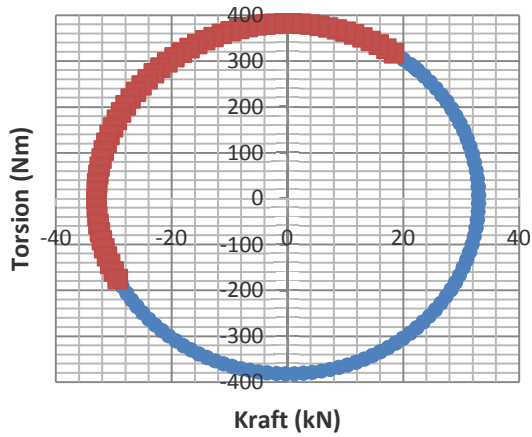


Abbildung 12: Experimentell bestimmte Risswachstumsraten da/dn in Probe R-001, $F_{\text{max}} = 45$ kN und $R_F = -1$, Material: S235, geplottet gegen berechnete Werte von ΔJ_{eff}

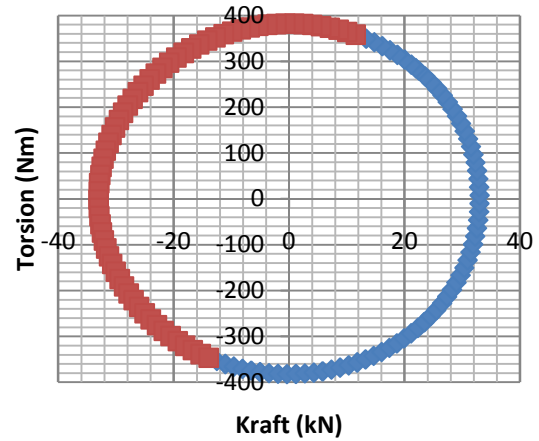
2.2.2.3. Simulation für einen Fall nichtproportionaler Belastung

Eine Simulation wurde zum Beispiel für den Fall einer 90° -Phasenverschiebung mit $F_{\text{max}} = 33$ kN, $M_{\text{max}} = 382$ Nm durchgeführt. Hierfür stehen Versuchsergebnisse erzielt mit den Proben R-005 und R-031 zu Vergleichszwecken zur Verfügung. Nachgebildet wurde der Risspfad, der in Experiment R-031 entstand. In den Abbildungen 13 und 14 sind die effektiven Schwingweiten gegenüber gestellt, wie sie sich aus der Simulation und der Messung ergaben. Dabei ist zu erkennen, dass für diesen Fall der Riss in der Simulation länger geöffnet ist als dies in der Realität (Messung) der Fall ist. Dies wird vielfältige Ursachen haben, deren detailliert Ergründung noch nicht möglich war. Der Vergleich zeigt dennoch ein insgesamt vernünftiges Simulationsergebnis.



- Riss offen (Simulation)
- Riss geschlossen (Simulation)

Abbildung 13: Kraft-Moment Diagramm aus der Simulation des Experimentes R-031, $a=3$ mm



- Riss offen (Experiment)
- Riss geschlossen (Experiment)

Abbildung 14: Kraft-Moment Diagramm aus dem Experiment R-031, $a=3$ mm, nach 23500 Zyklen

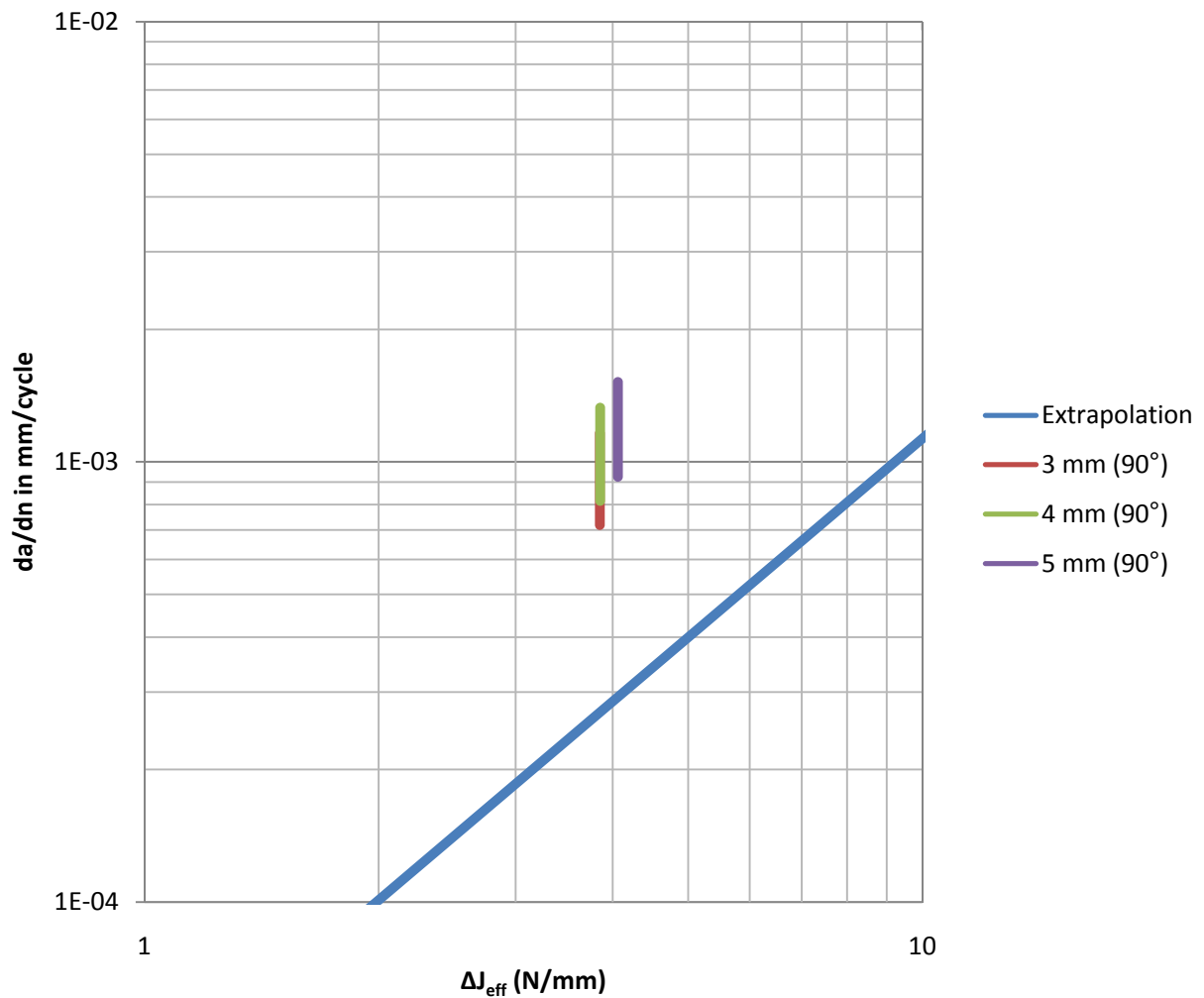


Abbildung 15: Experimentell bestimmtes Streuband der Risswachstumsraten da/dn aus Proben R-005 und R-031 aufgetragen neben den berechneten Werten von ΔJ_{eff} aus Probe R-031, beide Versuche durchgeführt mit $F_{max} = 33$ kN, $M_{max} = 382$ Nm, 90° Phasenverschiebung, $R_F = R_M = -1$, S235.

Aus dieser Simulation wurden wie in dem einachsigen Fall auch ΔJ_{eff} Werte ermittelt. Dabei handelt es sich um einen Gesamtwert, der derzeit nicht explizit in Modus-I zugeordnete und Modus-II zugeordnete Anteile aufgeteilt ist. Für die in Abbildung 15 dargestellten Ergebnisse für verhältnismäßig kurze Risslängen erscheint dies noch tragbar, weil der Modus-I Anteil dominiert. Dennoch erscheinen bereits deutliche Unterschiede zwischen erwarteten und beobachteten Risswachstumsgeschwindigkeiten. In Abbildung 15, ist eine Grafik der gemessenen Risswachstumsgeschwindigkeiten (da/dn) über den berechneten (Probe R-031) ΔJ_{eff} -Werten dargestellt. Der erwartete Zusammenhang, der bereits in Abbildung 12 dargestellt ist, ist hier ebenfalls eingezeichnet. Der Vergleich zeigt, dass deutlich höher als erwartete Risswachstumsgeschwindigkeiten beobachtet wurden. Auch für diese Diskrepanz müssen die Ursachen weiter erforscht werden. Sie können eher einfacher Natur sein, z.B. ist hier die Annahme eines symmetrischen Risswachstums in die Simulation eingeflossen, was nicht wirklich realitätsnah ist, denn der gegenüberliegende Riss verlief stärker gekrümmt. Eine vorrangig zu untersuchende simulatorische Unschärfe liegt in der ziemlich großen Schrittgröße bei Anwendung des Knotenlöse-Verfahrens, bedingt durch die begrenzte Rechenkapazität. Darüber hinaus müssen weiterhin das zyklische Kriechen bei nichtproportionaler Beanspruchung sowie der reibungsbedingte Rissuferkontakt (hier wurde kein Gleiten bei geschlossenem Riss erlaubt) als mögliche Fehlerquellen im Auge behalten werden, neben der hier zunächst einfach gewählten Mixed-Mode-Hypothese. Dies ist Aufgabe künftiger Forschungsprojekte.

2.3. Stellungnahme zur wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Ergebnisse

In diesem Projekt der Grundlagenforschung geht es um eine Erweiterung des jetzigen wissenschaftlichen Kenntnisstands. Die Ergebnisse sind derzeit noch nicht wirtschaftlich verwertbar, wobei dies wie bei ingenieurwissenschaftlichen Forschungsarbeiten gleichwohl ein Fernziel darstellt.

2.4. Am Projekt beteiligte Personen/Kooperationspartner

Das Forschungsprojekt wurde von dem aus der Sachbeihilfe der DFG finanzierten wissenschaftlichen Mitarbeiter *Herrn M. Sc. Yigiter Hos* 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 *Herrn Prof. Dr. José Luiz de França Freire* von der Katholischen Universität von Rio de Janeiro wurde intensiv zusammengearbeitet, besonders während der Auswertung der Ergebnisse der Verformungsfeldmessungen. Die Ergebnisse aus der Kooperation wurden in zwei internationalen Veröffentlichungen bereits dargelegt und eine weitere Kooperation in künftigen Veröffentlichungen ist geplant.

2.5. Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Herrn B.Sc. Shygeri Sadiku fertigt aktuell einen Vergleich der Ergebnisse mit dem linear-elastischen Bruchmechanik im Rahmen seiner Masterarbeit mit dem Thema „*Simulation des Risswachstums unter nichtproportionaler Schwingbelastung und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen*“ an. *Herrn B.Sc. Tobias Oberhansl* hat seine Bachelorarbeit mit dem Titel „*Auswertung von experimentellen Verzerrungsfeldern in Strukturen mit Ermüdungsrissen und Vergleich mit Ergebnissen von numerischen Simulationen*“ mit ausgezeichnetem Erfolg abgeschlossen. *Frau B. Sc. Theresa Döll* hat ihre Bachelorarbeit „*Eigenspannungen in Bauteilen infolge plastischer Verformungen – Vergleich von Ergebnissen verschiedener Berechnungsverfahren*“ sehr erfolgreich abgeschlossen. *Herr M. Sc. Yigiter Hos*, der das Projekt bearbeitet hat, plant die erzielten Forschungsergebnisse in seiner künftigen Dissertation zu verwenden.

3. Literatur

- [1] Zerres P, Vormwald M. Review of fatigue crack growth under non-proportional mixed-mode loading. *Int J Fatigue* 58 (2014) 75–83
- [2] Döring R, Hoffmeyer J, Seeger T, Vormwald M. A plasticity model for calculating stress-strain sequences under multiaxial nonproportional cyclic loading. *Computational Materials Science*, 28, S. 587-596, 2003.
- [3] Hos Y, Vormwald M. Experimental study of crack growth under non-proportional loading along with first modeling attempts, *Int J Fatigue* (2016) (submitted).
- [4] Hos Y, Vormwald M, Freire, JLF. Using digital image correlation to determine mixed mode stress intensity factors in fatigue cracks, *Proceedings of COTEQ 2015, Conference on Technology of Equipment*, organized by ABENDI, Brazilian Society for NDT and Inspection, June, 2015.
- [5] Hos Y, Vormwald M, Freire, JLF. Measurement and simulation of strain fields around crack tips under mixed-mode fatigue loading, *Frattura ed Integrità Strutturale* 33 (2015) 42-55.
- [6] Hos Y et al., Measurements of strain fields around crack tips under proportional and non-proportional mixed-mode fatigue loading. *Int J Fatigue* (2016) (in press)
- [7] Hos Y et al., Experimental study of crack growth under non-proportional loading along with first modeling attempts, *Int J Fatigue* (2016) (submitted)
- [8] Dowling NE, Begley JA. Fatigue crack growth during gross plasticity and the J-Integral. *ASTM STP*, 590, 82-103 (1976)
- [9] Wüthrich C. The extension of the J-integral concept to fatigue cracks. *Int J Fract*, 20, R35-7 (1982)
- [10] Hertel O, Döring R, Vormwald M. Cyclic J-integral under nonproportional loading. In: *Proc 7th Int Conf Biaxial/multiaxial Fatigue Fract* p. 513–8 (2004)
- [11] Tchoffo Ngoula D, Beier HT, Vormwald M. Numerische Modellierung des Ermüdungsrisswachstums in Schweißverbindungen unter Berücksichtigung von Eigenspannungen. *DVS Congress* (2015) p. 294-299
- [12] Herz E, Hertel O, Vormwald M. Numerical simulation of plasticity induced fatigue crack opening and closure for autofrettaged intersecting holes. *Engineering Fracture Mechanics*, 78 (3) (2011) 559-572
- [13] Herz E, Thumser R, Bergmann JW, Vormwald M. Endurance limit of autofrettaged Diesel-engine injection tubes with defects. *Engineering Fracture Mechanics*, 73 (2006) 3-21
- [14] Zerres P, Vormwald M. Finite element based simulation of fatigue crack growth with a focus on elastic–plastic material behavior, *Computational Materials Science* 57 (2012) 73–79
- [15] Vormwald, M., Anrißlebensdauervorhersage auf der Basis der Schwingbruchmechanik für kurze Risse, *Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt*, Bericht 47 (1989)