

# Schlussbericht vom 15.08.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20686 N

## Thema

Schaffung konsolidierter und ingenieurtechnisch anwendbarer Verfahren zur Ermüdungsbewertung nicht nachbearbeiteter und nachbearbeiteter Schweißverbindungen im LCF-Bereich

## Berichtszeitraum

01.04.2019 - 31.03.2022

## Forschungsvereinigung

Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS)

## Forschungseinrichtung(en)

1. Institut für Material- und Bauforschung (IMB), Hochschule München
2. Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Technische Universität Darmstadt

Gefördert durch:



# LCFWeld

Vorhaben Nr. 20686 N

---

## Schaffung konsolidierter und ingenieurtechnisch anwendbarer Verfahren zur Ermüdungsbewertung nicht nachbearbeiteter und nachbearbeiteter Schweißverbindungen im LCF-Bereich

---

### Abschlussbericht

#### **Kurzfassung:**

Im Rahmen des Projekts werden Schwingfestigkeitsversuche an Schweißstößen aus einem hochfesten Baustahl und aus einem austenitischen Stahl im niederzyklischen Bereich durchgeführt. Dabei wird auch untersucht, inwieweit die mechanische Nachbearbeitung von Nahtausläufen Einfluss auf die Schwingfestigkeit der Schweißverbindungen nimmt.

Die Schwingfestigkeit der Schweißverbindungen wird mit dem Örtlichen Konzept bewertet. Es wird untersucht, wie der Festigkeitsmismatch der Schweißverbindung in dem Rechenlauf berücksichtigt werden kann. Deshalb werden die mechanischen Eigenschaften von Grundwerkstoff, Schweißgut und Wärmeeinflusszone ermittelt. Auf Basis numerischer Untersuchungen wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches die Berechnung eines Dehnungskonzentrationsfaktors an der Grenze zweier benachbarter Materialien mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zulässt.

Zusätzlich wird die Prognosegüte bestehender vereinfachter Verfahren zur Ermüdungsbewertung von Schweißverbindungen aus dem Bereich der Druckbehälterauslegung und der kerntechnischen Anwendungen untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Ermüdungsfestigkeit im Falle sehr hoher Spannungskonzentrationen an Schweißnahtwurzeln überschätzt werden kann. Es wird ein Verfahren vorgeschlagen, die elastisch-plastische Kerbdehnung an Schweißnahtübergängen und -wurzeln konservativ abzuschätzen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

---

## II

Berichtsumfang:	169 Seiten, 82 Abb., 16 Tab., 44 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.04.2019
Ende der Arbeiten:	31.03.2022
Zuschussgeber:	BMWi / AiF-Nr. 20686 N
Forschungsstelle 1:	Institut für Material- und Bauforschung (IMB), Hochschule München, Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Rother
Forschungsstelle 2:	Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Technische Universität Darmstadt, Leiter: Prof. Dr.-Ing. M. Vormwald
Bearbeiter und Verfasser:	J. Neuhäusler, K. Rother (IMB), S. Moser, M. Vormwald, H. T. Beier (IFSW)
Obmann des Arbeitskreises:	Dr.-Ing. J. Rudolph (Framatome GmbH)

## Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die vom Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) gestellt und am Institut für Material- und Bauforschung (IMB) der Hochschule München unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Klemens Rother sowie am Fachgebiet Werkstoffmechanik (IFSW) der TU Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald bearbeitet wurde.

Der DVS dankt den Professoren Rother und Vormwald und den wissenschaftlichen Bearbeitern M.Sc. Josef Neuhäusler (IMB), M.Sc. Simon Moser (IFSW) und Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (IFSW) für die Durchführung des Vorhabens sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis des DVS unter der Leitung von Dr.-Ing. Jürgen Rudolph (Framatome GmbH) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Insbesondere danken wir der Outokumpu Nirosta GmbH, der voestalpine Stahl GmbH und der voestalpine Grobblech GmbH für die Bereitstellung der Versuchswerkstoffe sowie die durchgeführten Schweißarbeiten. Wir danken auch der GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH Niederlassung SLV München für die Durchführung sämtlicher Schweißarbeiten am austenitischen Werkstoff, sowie der DYNARDO GmbH für die Bereitstellung von Software für parameterische Untersuchungen. Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 20686 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand



Industrielle  
Gemeinschaftsforschung





# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1. Berechnungsverfahren im LCF Bereich . . . . .	2
1.2. Motivation . . . . .	2
1.3. Zielsetzung . . . . .	3
1.4. Aufbau des Berichts . . . . .	4
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1. Örtliches Konzept zur Bewertung von Schweißverbindungen . . .	7
2.2. Vereinfachter elastisch-plastischer Ermüdungsnachweis . . . . .	10
2.2.1. Bewertungskurven . . . . .	12
2.2.2. $K_e$ -Faktoren . . . . .	15
2.2.3. Fatigue Strength Reduction Factor . . . . .	20
2.2.4. Anwendbarkeit des vereinfachten elastisch-plastischen Nachweises . . . . .	21
<b>3. Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>23</b>
3.1. Übersicht . . . . .	23
3.2. Werkstoffversuche . . . . .	23
3.2.1. Probenfertigung und -geometrie . . . . .	23
3.2.2. Versuchsdurchführung . . . . .	25
3.2.3. Versuchsauswertung . . . . .	28
3.3. Versuche mit T- und Stumpfstößen . . . . .	38
3.3.1. Probenfertigung und -geometrie . . . . .	38
3.3.2. Schweißnahtcharakterisierung . . . . .	40
3.3.3. 3D-Scans . . . . .	48
3.3.4. Versuchsdurchführung . . . . .	52
3.3.5. Versuchsauswertung . . . . .	55
3.3.6. Optische Dehnungsfeldmessung . . . . .	59
<b>4. Numerische Untersuchungen</b>	<b>63</b>
4.1. Erweiterung des Örtlichen Konzepts . . . . .	63
4.1.1. Mismatch von Schweißverbindungen . . . . .	63
4.1.2. Herangehensweise zur Untersuchung des Mismatch . . . . .	63
4.1.3. Einfluss des Mismatch im Scheibenmodell . . . . .	64
4.1.4. Einfluss des Mismatch in anderen Modellen . . . . .	69
4.1.5. Schlussfolgerungen zum Einfluss des Mismatch . . . . .	73

---

4.2.	Anwendung des Verfahrens nach Rudorffer et al. . . . . .	73
4.2.1.	Voraussetzungen . . . . .	73
4.2.2.	Vorstellung und Validierung der FE-Modelle . . . . .	74
4.2.3.	Ergebnisse der Ermüdungsbewertung . . . . .	81
4.3.	Vereinfachter elastisch-plastischer Ermüdungsnachweis . . . . .	86
4.3.1.	Vorstellung und Validierung der FE-Modelle . . . . .	86
4.3.2.	Anwendbarkeit der KTA 3201.2 Dehnungswöhlerkurve . . . . .	98
4.3.3.	Strukturspannungsnachweis . . . . .	99
4.3.4.	Kerbdehnungsnachweis . . . . .	102
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>110</b>
5.1.	Zusammenfassung . . . . .	110
5.2.	Ausblick . . . . .	113
<b>6.</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit und Nutzung der erzielten Ergebnisse</b>	<b>114</b>
6.1.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	114
6.2.	Nutzung der erzielten Ergebnisse . . . . .	115
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang zum experimentellen Teil</b>	<b>129</b>
A.1.	Werkstoffversuche . . . . .	129
A.2.	Versuche mit T- und Stumpfstößen . . . . .	130
<b>B.</b>	<b>Anhang zum numerischen Teil</b>	<b>151</b>
B.1.	Ermittlung von Parametern für das Besseling-Modell . . . . .	151
<b>C.</b>	<b>Zahlenwerte zu den Ermüdungsversuchen</b>	<b>153</b>