

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19667 BG

Thema

Entwicklung einer validierten Methodik zur Berechnung der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen

Berichtszeitraum

01.09.2017 bis 28.02.2021

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.

Forschungsstelle(n)

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA), Weimar

Technische Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik – Fachgebiet Werkstoffmechanik, Darmstadt

Freiburg, 30.06.2021

Weimar, 30.06.2021

Darmstadt, 30.06.2021

Dr.-Ing. Michael Luke

Dipl.-Ing. Andreas Kleemann

Dr.-Ing. H. Thomas Beier

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

Höchstfeste Stähle

Entwicklung einer validierten Methodik zur
Berechnung der Schwingfestigkeit von
Bauteilen aus höchstfesten Stählen

Abschlussbericht

FKM-Vorhaben Nr. 610
Heft 340 | 2021



Das Urheberrecht an diesem Bericht mit sämtlichen Beilagen verbleibt beim FKM.

Das FKM übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Ohne schriftliche Genehmigung des FKM darf der Bericht weder kopiert noch vervielfältigt werden.

Höchstfeste Stähle

Vorhaben Nr. 610

Entwicklung einer validierten Methodik zur Berechnung der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden Beiträge zur Entwicklung validierter Methoden zur Berechnung der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen erarbeitet. Hiermit konnten die Absicherung bzw. eine Grundlage für die Erweiterung des Gültigkeitsbereichs der FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile sowie der FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens (kurz Richtlinie Nichtlinear) für höchstfeste Stähle geschaffen werden.

Die untersuchten Werkstoffe X3CrNiMoAl13-8-2 (1.4534), 100Cr6 (1.3505), 16MnCr5 (1.7131) und X40CrMoV5-1 (1.2344) decken den Festigkeitsbereich von ca. $1500 \leq R_m \leq 2400 \text{ MPa}$ sowie verschiedene metallurgische Fertigungsrouten von konventionell erschmolzenen Stählen bis zur schmelzmetallurgischen Fertigung unter Vakuum ab. Die für die drei Bewertungskonzepte: Synthetische Wöhlerlinien (Kerbspannungskonzept); Örtliches Konzept; bruchmechanisches Konzept notwendigen Werkstoffparameter wurden in monotonen Zugversuchen, Schwingfestigkeits- und Rissfortschrittsuntersuchungen beginnend beim Kurzzeit- bis hin zum Langzeitschwingfestigkeitsverhalten (Grenzschwingenspielzahl $N_G = 5 \cdot 10^6$) an Makro- und Mikroproben bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser Informationen und zum Teil auch Eigenspannungszuständen wird die Anwendbarkeit der Konzepte zur Lebensdauervorhersage von gekerbten Probenversuchen sowie eines Bauteils aus der Praxis demonstriert. Mit allen drei erarbeiteten Berechnungskonzepten lässt sich die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen mit guter Genauigkeit berechnen. Da die Ermüdungsmechanismen bei dieser Werkstoffgruppe sehr unterschiedlich sind, werden alle drei Berechnungskonzepte als gleichberechtigt angesehen. Welches Konzept angewendet werden kann, ist variabel und hängt u.a. davon ab, welche Eingangsdaten und Berechnungsmöglichkeiten dem Anwender zur Verfügung stehen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang: 218 S., 203 Abb., 57 Tab., 96 Lit.

Laufzeit: 01.09.2017 – 28.02.2021

Zuschussgeber: BMWi/IGF-Nr. 19667 BG

Forschungsstelle(n): Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Freiburg
Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Peter Gumbsch

Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA),
Bauhaus-Universität Weimar
Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald

Bearbeiter und Verfasser: Dr.-Ing. Thomas Straub (IWM)
Dr.-Ing. Igor Varfolomeev (IWM)
Dr.-Ing. Michael Luke (IWM)

Dipl.-Ing. Andreas Kleemann (MFPA)
Dr.-Ing. Susanne Kleemann (MFPA)
Dr.-Ing. Torsten Richter (MFPA)
Dipl.-Ing. Heiko Beinersdorf (MFPA)

Patrick Yadegari, M.Sc. (IFSW)
Dr. H. Thomas Beier (IFSW)
Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (IFSW)

Vorsitzende(r) projekt-
begleitender Ausschuss: Dr.-Ing. Matthias Funk (Schaeffler Technologies AG & Co. KG)

Vorstandsvorsitzender FKM: Dipl.-Ing. Hartmut Rauen (VDMA)

Weitere Berichte zum
Forschungsvorhaben: -

Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von dem Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) e.V. gestellt und am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Peter Gumbsch, der Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke und am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW) Fachgebiet Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald bearbeitet wurde.

Das FKM dankt den Professoren Gumbsch, Könke und Vormwald und den wissenschaftlichen Bearbeitern Dr. Michael Luke (IWM), Dr. Thomas Straub (IWM), Dr. Igor Varfolomeev (IWM), Andreas Kleemann (MFPA), Dr. H. Thomas Beier (IFSW) und Patrick Yadegari (IFSW) für die Durchführung des Vorhabens sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis des FKM unter der Leitung von Dr. Matthias Funk (Schaeffler Technologies AG & Co. KG) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Insbesondere danken wir den Firmen

- Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
- Siemens Energy AG, Mülheim an der Ruhr
- SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal
- MAN Energy Solutions SE, Augsburg
- SKF GmbH, Schweinfurt

für die Bereitstellung der Versuchswerkstoffe und die Durchführung von Wärmebehandlungen. Des Weiteren danken wir den Firmen

- Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
- Siemens Energy AG, Mülheim an der Ruhr
- Scherdel siment GmbH, Marktredwitz
- MAN Energy Solutions SE, Augsburg

für die Durchführung röntgenologischer Eigenspannungsmessungen und der Firma Schaeffler Technologies AG & Co. KG für die Bereitstellung von Informationen und Ergebnissen aus Ermüdungsfestigkeitsversuchen an einem Bauteil, die für die Validierung der von den Forschungsstellen entwickelten Bewertungskonzepte herangezogen wurden.

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 19667 BG) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Haftungsausschluss

Dieser Abschlussbericht enthält Methoden zur Lebensdauerabschätzung und Bemessung von Bauteilen. Der Bericht ist mit der größtmöglichen Sorgfalt erstellt worden, dennoch ist es nicht möglich, eine Gewähr dafür zu übernehmen, dass die nach den vorgestellten Methoden abgeschätzten Lebensdauern und Bauteilfestigkeiten den tatsächlichen Lebensdauern bzw. Festigkeiten der Bauteile entsprechen. Eine Abschätzung auf der Grundlage der Methoden ersetzt nicht den experimentellen Festigkeitsnachweis. Eine exakte Lebensdauer- bzw. Festigkeitsberechnung ist vom Benutzer eigenverantwortlich vorzunehmen und experimentell zu validieren. Eine Haftung für Schäden jedweder Art, die aus der Verwendung der beschriebenen Methoden resultieren, ist ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	1
1.1	Executive Summary (DE).....	1
1.2	Executive summary (EN)	2
2	Einleitung.....	3
3	Wissenschaftlich-technischer Ansatz	5
3.1	Stand von Wissenschaft und Technik	5
3.2	Arbeitshypothese	7
4	Experimentelle Charakterisierung	9
4.1	Bereitstellung der Versuchswerkstoffe	9
4.2	Probengeometrien	10
4.2.1	Grundcharakterisierung	10
4.2.2	Schwingfestigkeitsuntersuchungen.....	12
4.2.3	Bruchmechanische Charakterisierung	14
4.3	Probenfertigung und Wärmebehandlung	16
4.3.1	Probenfertigung am Fraunhofer IWM.....	16
4.3.2	Probenfertigung an der MFPA	17
4.3.3	Probenfertigung am IFSW	17
4.3.4	Beschreibung der Wärmebehandlungen.....	17
4.4	Chemische Zusammensetzung.....	18
4.5	Grundcharakterisierung der Werkstoffzustände	19
4.5.1	Reinheitsgradbestimmung	19
4.5.2	Gefüge und Härte im Prüfzustand.....	23
4.5.3	Kerbschlagbiegeversuche.....	27
4.5.4	Quasistatische Zugversuche.....	27
4.5.5	Zusatzuntersuchen auf Wasserstoffversprödung an 16MnCr5.....	32
4.6	Schwingfestigkeitsuntersuchungen an LCF-Proben.....	35
4.6.1	Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven	37
4.6.2	Dehnungswöhlerlinien	39
4.6.3	Schädigungsparameterwöhlerlinien	41
4.6.4	Replika-Versuche	48
4.7	Schwingfestigkeitsversuche an Makroproben	56
4.7.1	Axialversuche an Rohrproben.....	56
4.7.2	Impulsdruckversuche an Rohrproben	58
4.7.3	Umlaufbiegeversuche	61
4.7.4	Torsionsversuche	63
4.7.5	Planbiegeversuche	65
4.8	Schwingfestigkeitsversuche an Mikroproben	67
4.9	Bruchmechanische Versuche	69

4.9.1	Vorgehensweise	69
4.9.2	Risszähigkeit an Makroproben.....	69
4.9.3	Risszähigkeit an Mikroproben	76
4.9.4	Bruchmechanische Kennwerte unter zykl. Beanspruchung an Makroproben ..	77
4.9.5	Bruchmechanische Kennwerte unter zykl. Beanspruchung an Mikroproben ...	80
5	Eigenspannungsanalysen	83
5.1	Makroproben aus X3CrNiMoAl 13-8-2	83
5.2	Makroproben aus 100Cr6	85
5.3	Makroproben aus 100Cr6 und 16MnCr5	86
5.4	Makroproben aus X40CrMoV5-1	88
5.5	Mikroproben, alle Werkstoffe	89
5.6	Zusammenfassende Darstellung	90
6	Bruchflächenanalysen.....	93
6.1	X3CrNiMoAl13-8-2.....	93
6.1.1	Ermüdungsversuche an LCF-Proben.....	93
6.1.2	Bruchmechanische Versuche an Makroproben.....	93
6.1.3	Axialversuche an Rohrproben längs	93
6.1.4	Impulsdruckversuche an Rohrproben quer	95
6.1.5	Ermüdungsversuche an Kerbproben.....	96
6.1.6	Ermüdungsversuche an Mikroproben	98
6.1.7	Bruchmechanische Versuche an Mikroproben.....	98
6.2	100Cr6.....	99
6.2.1	Ermüdungsversuche an LCF-Proben.....	99
6.2.2	Bruchmechanische Versuche an Makroproben.....	101
6.2.3	Axialversuche an Rohrproben längs	101
6.2.4	Impulsdruckversuche an Rohrproben quer	101
6.2.5	Ermüdungsversuche an Kerbproben.....	101
6.2.6	Ermüdungsversuche an Mikroproben	102
6.2.7	Bruchmechanische Versuche an Mikroproben.....	103
6.3	16MnCr5.....	104
6.3.1	Ermüdungsversuche an LCF-Proben.....	104
6.3.2	Bruchmechanische Versuche an Makroproben.....	106
6.3.3	Axialversuche an Rohrproben längs	106
6.3.4	Impulsdruckversuche an Rohrproben quer	107
6.3.5	Ermüdungsversuche an Kerbproben.....	108
6.3.6	Ermüdungsversuche an Mikroproben	108
6.3.7	Bruchmechanische Versuche an Mikroproben.....	110
6.4	X40CrMoV5-1	110
6.4.1	Ermüdungsversuche an blindgehärteten LCF-Proben	110
6.4.2	Ermüdungsversuche an einsatzgehärteten LCF-Proben.....	111

6.4.3	Bruchmechanische Versuche an Makroproben.....	112
6.4.4	Axialversuche an Rohrproben längs	112
6.4.5	Impulsdruckversuche an Rohrproben quer	113
6.4.6	Ermüdungsversuche an Kerbproben	115
6.4.7	Ermüdungsversuche an Mikroproben	116
6.4.8	Bruchmechanische Versuche an Mikroproben.....	118
7	Vergleichende Darstellung von Makro- und Mikroversuchen.....	119
7.1	Quasistatische Zugversuche.....	119
7.2	Schwingfestigkeitsversuche (LCF+HCF).....	120
7.3	Bruchmechanische Versuche	123
8	Bewertungskonzepte	131
8.1	Synthetische Wöhlerlinien, Kerbspannungskonzept.....	131
8.1.1	Aufbau der Synthetischen Wöhlerlinien	131
8.1.2	Grundlegender Ablauf.....	133
8.1.3	Erweiterungen der SWL für höchstfeste Stähle.....	133
8.1.4	Anwendung der SWL-HFS auf bauteilähnliche Proben	141
8.2	Örtliches Konzept	145
8.2.1	Neue Abschätzmethode zykl. Werkstoffkennwerte für höchstfeste Stähle	146
8.2.2	Erfassung der Eigenspannungen.....	152
8.2.3	Validierung mit Versuchsergebnissen der Bauteilversuche	153
8.3	Bruchmechanisches Konzept	156
8.3.1	Allgemeine Vorgehensweise.....	156
8.3.2	Eingangsdaten für bruchmechanische Berechnungen	158
8.3.3	Berechnungsmodelle und Berechnungsablauf.....	160
8.3.4	Abschätzung der Rissnukleation.....	162
8.3.5	Konzeptvalidierung an makroskopischen Probenversuchen	164
8.3.6	Berücksichtigung der Eigenspannungen.....	166
8.4	Zusammenfassende Bewertung	168
9	Anwendungsbeispiel	171
9.1	Beschreibung.....	171
9.1.1	Werkstoffzustand	171
9.1.2	Versuchsbeschreibung	171
9.1.3	Beanspruchungszustand	172
9.1.4	Zusammenfassung der Eingabedaten	173
9.2	Anwendung SWL, Kerbspannungskonzept.....	174
9.3	Anwendung örtliches Konzept	175
9.4	Anwendung des bruchmechanischen Konzepts.....	176
10	Zusammenfassung	179
11	Anhang	183

11.1	Ablauf der Berechnung Synthetische Wöhlerlinien für höchstfeste Stähle	183
11.2	Literaturverzeichnis	189
11.3	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	195
11.4	Abbildungsverzeichnis.....	198
11.5	Tabellenverzeichnis.....	206

1 Executive Summary

1.1 Executive Summary (DE)

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden Beiträge zur Entwicklung validierter Methoden zur Berechnung der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen erarbeitet. Hiermit konnten die Absicherung bzw. eine Grundlage für die Erweiterung des Gültigkeitsbereichs der FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile [1] sowie der FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens [2] (kurz Richtlinie Nichtlinear) für höchstfeste Stähle geschaffen werden. In der aktuellen Auflage von [1] endet der Gültigkeitsbereich bei einer Zugfestigkeit von $R_m = 1400 \text{ MPa}$ für Stahl und Eisenguss. Der Anwendungsbereich der in dieser Richtlinie enthaltenen Algorithmen kann für Stahl mit Vorsicht bis Zugfestigkeiten von $R_m = 1600 \text{ MPa}$ erweitert werden. In [2] endet der Gültigkeitsbereich sogar bei einer Zugfestigkeit von $R_m = 1250 \text{ MPa}$. Die hier untersuchten Werkstoffe

- X3CrNiMoAl 13-8-2 (1.4534); ausscheidungshärtbarer Edelstahl
- 100Cr6 (1.3505); niedriglegierter martensitischer Chromstahl
- 16MnCr5 (1.7131); Einsatzstahl
- X40CrMoV5-1 (1.2344); Werkzeugstahl

decken den Festigkeitsbereich von $1500 \text{ MPa} \leq R_m \leq 2400 \text{ MPa}$ sowie verschiedene metallurgische Fertigungsrouten von konventionell erschmolzenen Stählen bis zur schmelzmetallurgischen Fertigung unter Vakuum ab. Zur Charakterisierung der genannten Werkstoffe wurden umfangreiche mechanische und mikrostrukturelle Untersuchungen vorgenommen und deren Wärmebehandlung und Fertigungsgeschichte dokumentiert. Die für die drei Bewertungskonzepte

- Synthetische Wöhlerlinien, Kerbspannungskonzept
- Örtliches Konzept gemäß [2]
- Bruchmechanisches Konzept

notwendigen Werkstoffparameter wurden in Schwingfestigkeits- und Rissfortschrittsuntersuchungen beginnend beim Kurzzeit- bis hin zum Langzeitschwingfestigkeitsverhalten (Grenzschwingspielzahl $N_G = 5 \cdot 10^6$) an Makro- und Mikroproben bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser Informationen und zum Teil auch Eigenspannungszuständen wird die Anwendbarkeit der Konzepte zur Lebensdauervorhersage von gekerbten Probenversuchen sowie eines Bauteils aus der Praxis demonstriert. Die Bewertungskonzepte unterscheiden sich unter anderem in dem Aufwand für die Parameteridentifikation.

1.2 Executive summary (EN)

Within the project “Development of a validated methodology for the fatigue assessment of high strength steel components” (Entwicklung einer validierten Methodik zur Berechnung der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen) three complementary assessment concepts have been developed as a contribution towards the overall goal to enhance the area of validity of the FKM guidelines “Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile” [1] and “Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens” [2] (short guideline nonlinear). In its present issue the application of [1] is limited to steels and cast iron with a maximum tensile strength of $R_m = 1400 \text{ MPa}$. However, it is stated that the applicability of the algorithms can be extended to $R_m = 1600 \text{ MPa}$ with caution. In [2] the area of validity is even limited to $R_m = 1250 \text{ MPa}$. To overcome these limitations the materials investigated

- X3CrNiMoAl 13-8-2 (1.4534); precipitation-hardened stainless steel
- 100Cr6 (1.3505); low-alloyed martensitic chrome steel
- 16MnCr5 (1.7131); case-hardened steel
- X40CrMoV5-1 (1.2344); tool steel

range from tensile strengths of $1500 \text{ MPa} \leq R_m \leq 2400 \text{ MPa}$. Moreover, they are representatives of different metallurgic fabrication routes from conventionally molten steels to steels remelted under vacuum conditions. Taking into consideration these methods, microstructural features and partially residual stress states three assessment concepts

- Synthetic SN-curves, notch root stress concept
- Local concept according to [2]
- Fracture mechanics concept

have been derived. Their applicability to predict cyclic lifetime is demonstrated on specimen level as well as a service component. The relevant material parameters were determined in fatigue and fatigue crack growth tests under low cycle up to high cycle fatigue conditions (maximum number of cycles $N_{max} = 5 \cdot 10^6$ on macroscopic and microscopic specimens).