

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19790 BG

Thema

Hochdruckbauteile aus höchstfesten Stählen – Grundlagen, Potential, Bemessungsmethoden

Berichtszeitraum

01.11.2017 bis 30.04.2021

Forschungsvereinigung

Verbrennungskraftmaschinen

Forschungsstelle(n)

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

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

Darmstadt, 29.10.2021

Dr.-Ing. H. Thomas Beier

Weimar, 29.10.2021

Dipl.-Ing. Andreas Kleemann

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Hochdruckbauteile aus höchstfesten Stählen

Vorhaben Nr. 1289

Hochdruckbauteile aus höchstfesten Stählen – Grundlagen, Potential, Bemessungsmethoden

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsvorhabens wurden die Grundlagen zur Verwendung von höchstfesten Stählen für nicht autofrettierte bis voll autofrettierte Hochdruckbauteile unter zyklischer Innenhochdruckbelastung geschaffen. Dabei wurde exemplarisch der Stahl X50CrMoV5-3-1 untersucht, der im wärmebehandelten Zustand bei einer Zugfestigkeit von ca. 2250 MPa eine totale Bruchdehnung von über 10 % erreicht. Erkenntnisse zur Einsatz derart höchstfester Stähle sowie Nachweiskonzepte liegen bislang nicht vor.

Experimentell wurden zunächst Werkstoffversuche zur Charakterisierung des statischen und zyklischen Deformationsverhaltens sowie Rissfortschrittsversuche durchgeführt, da entsprechende Werkstoffkennwerte in der Literatur praktisch nicht bekannt sind. Anhand pulsierender Innenhochdruckversuche wurde die Schwingfestigkeit im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich für nicht-, teil und vollautofrettierten bauteilähnliche Proben (Kreuzbohrungsproben) ermittelt. Für die rechnerische Beurteilung der Schwingfestigkeit wurden drei Bewertungskonzepte „Synthetische Wöhlerlinien“, Kerbspannungskonzept“, „Örtliches Konzept“ und „Bruchmechanisches Konzept“ hinsichtlich ihrer Anwendung für Hochdruckbauteile aus höchstfeste Stähle ertüchtigt und mit den Versuchen an den Kreuzbohrungsproben validiert.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen das Potenzial des Einsatzes höchstfester Stähle bei Hochdruckanlagen auf: es konnte gezeigt werden, dass die in den statischen Werkstoffversuchen erzielte Festigkeitssteigerung gegenüber einem üblichen Vergütungsstahl 42CrMo4 auch für die Schwingfestigkeit erreicht wurde. Die Ergebnisse können als Absicherung zur Erweiterung des Gültigkeitsbereiches aktueller Nachweisrichtlinien (z.B. FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“ und FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis nichtlinear“) herangezogen werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	180 S., 104 Abb., 52 Tab., 95 Literaturstellen
Laufzeit:	01.11.2017 – 30.04.2021
Zuschussgeber:	BMWi/IGF-Nr. 19790 N
Forschungsstelle(n):	Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt Leiter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA), Bauhaus-Universität Weimar Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

Bearbeiter und Verfasser: Carl Fällgren, M.Sc. (IFSW)
Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (IFSW)
Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (IFSW)

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

Vorsitzende(r) projekt-
begleitender Ausschuss: Dr.-Ing. Wolfgang Scheibe (Heinzmann GmbH & CO. KG)

Vorsitzender Beirat: Dr.-Ing. Ekkehard Pott (Volkswagen AG)

Weitere Berichte zum
Forschungsvorhaben: R599 (2021)

Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. gestellt und am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt (IFSW) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald und an der Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar (MFPA) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke bearbeitet wurde.

Die FVV dankt den Professoren Vormwald und Könke sowie den wissenschaftlichen Bearbeitern Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (IFSW), Carl Fällgren, M.Sc. (IFSW), Dipl.-Ing. Andreas Kleemann (MFPA), Dr.-Ing. Susanne Kleemann (MFPA), Dr.-Ing. Torsten Richter (MFPA) und Dipl.-Ing. Heiko Beinersdorf (MFPA) für die Durchführung des Vorhabens sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e.V. für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Scheibe (Heinzmann GmbH & CO. KG) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 19790 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



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
3.1.1	Autofrettage	5
3.1.2	Schwingfestigkeit höchstfester Stähle.....	6
3.1.3	Fazit	8
3.2	Arbeitshypothese	8
4	Werkstoffbeschaffung und Probenherstellung (AP 1).....	11
4.1	Werkstoffauswahl und Beschaffung (AP 1.1).....	11
4.2	Probenfertigung und Wärmebehandlung (AP 1.2)	11
4.2.1	Probenfertigung am IFSW	11
4.2.2	Design und Fertigung der an der MFPA eingesetzten Proben	14
4.3	Werkstoffcharakterisierung (AP 1.3)	17
4.3.1	Quasistatische Zugversuche.....	17
4.3.2	Vergleich der Ergebnisse aus den Zugversuchen.....	20
4.3.3	Chemische Zusammensetzung.....	21
4.3.4	Reinheitsgrad	21
4.3.5	Gefüge.....	23
4.3.6	Härte	24
5	Zyklische Werkstoffversuche (AP 2)	27
5.1	Spannungs- und dehnungskontrollierte Versuche an LCF-Proben (AP 2.1).....	27
5.1.1	Einleitung.....	27
5.1.2	Versuchseinrichtung	27
5.1.3	Versuchsprogramm	29
5.1.4	Dehnungswöhlerlinie und zyklisch stabilisierte σ - ϵ -Kurve	30
5.1.5	Dehnungswöhlerlinie vorgereckt.....	33
5.1.6	Bauschingerverhalten	36
5.1.7	Zyklisches Ver- und Entfestigen	37
5.1.8	Zyklisches Kriechen / Zyklische Relaxation	38
5.2	Ermüdungsversuche zur Ermittlung der Mittelspannungsabhängigkeit (AP 2.2)	40
5.2.1	Eigen Spannungszustand	41
5.2.2	Ermüdungsversuche.....	41
5.3	Rissfortschrittsuntersuchungen an Mittenrissproben (AP 2.3).....	43
5.3.1	Einleitung.....	43
5.3.2	Versuchseinrichtung	43

5.3.3	Versuchsprogramm	44
5.3.4	Versuche zum Rissfortschritt	45
5.3.5	Versuche zur Schwellenwertermittlung	48
5.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Rissfortschrittsuntersuchungen..	49
5.4	Fraktografie an Werkstoffproben (AP 2.4).....	50
5.4.1	Vorgehensweise	50
5.4.2	Ergebnisse.....	51
6	Experimentelle Untersuchungen an bauteilähnlichen Proben (AP 3)	55
6.1	Innendruckschwellversuche an Kreuzbohrungsproben (AP 3.1)	55
6.1.1	Versuchskonzept	55
6.1.2	Berstversuche Kreuzbohrungsprobe $h/d=2,5$	56
6.1.3	Einstufenversuche Kreuzbohrungsprobe $h/d=2,5$	57
6.1.4	Berstversuch geschwächte Kreuzbohrungsprobe $h/d=2,0$	60
6.1.5	Laststeigerungsversuche Kreuzbohrungsprobe $h/d=2,0$	61
6.2	Fraktografie an Kreuzbohrungsproben.....	63
6.2.1	Dauerfestigkeitsversuche.....	63
6.2.2	Laststeigerungsversuche	64
7	Theoretisch-numerische Modelle zur Ermüdung (AP 4).....	69
7.1	Finite-Elemente Modelle	69
7.2	Rechnerische Beschreibung des Berstdrucks.....	70
7.2.1	Materialmodellierung	74
7.2.2	Parameteridentifikation für das Chaboche Modell	77
7.2.3	Parameterfindung für das Besseling Modell.....	78
7.3	Anrisslebensdauer nach Örtlichem Konzept (AP 4.1).....	81
7.3.1	Simulation der Autofrettage und numerische Berechnung der Eigenspannungen 82	
7.3.2	Ergebnisse der Anrisslebensdauerberechnung nach Örtlichem Konzept	86
7.4	Rissfortschrittslebensdauer, bruchmechanische Konzepte (AP 4.2)	92
7.4.1	Bewertung des Rissfortschrittsverhaltens	92
7.4.2	Berechnung der Rissfortschrittslebensdauern.....	100
7.4.3	Dauerfest ertragbare Druckschwingweiten aus Berechnung und Experiment	105
8	Vereinfachte Konzepte zur praktischen Bauteilauslegung (AP 5).....	109
8.1	Vereinfachte Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens (AP 5.1 IFSW) ..	109
8.1.1	Abschätzung der Mittelspannungsempfindlichkeit.....	110
8.1.2	Lebensdauerberechnung mit vereinfachten Ansätzen.....	112
8.2	Vereinfachte Modelle zur Struktur- und Lebensdaueranalyse (AP 5.2)	115
8.2.1	Einleitung.....	115
8.2.2	Synthetische Wöhlerlinien, Kerbspannungskonzept.....	116
8.2.3	Aufbau der Synthetischen Wöhlerlinien	116
8.2.4	Grundlegender Ablauf.....	118

8.2.5	Erweiterungen der SWL für höchstfeste Stähle.....	119
8.2.6	Anwendung der SWL-HFS auf bauteilähnliche Proben.....	127
9	Zusammenfassung	129
10	Anhang	133
10.1	Rechnerisch ermittelte Berstdrücke für alle untersuchten Probengeometrien ...	133
10.2	Maximale Autofrettagedrucke für alle untersuchten Probengeometrien.....	133
10.3	Identifizierte Parameter für das Chaboche Modell	134
10.4	Mit dem Chaboche Modell berechnete Druckeigenstressungen.....	136
10.5	Parameter für multilineare kinematische Verfestigung mit dem Besseling Modell 138	
10.6	Ablauf der Berechnung Synthetische Wöhlerlinien für höchstfeste Stähle	139
10.7	Anhang zu Abschnitt 4.3.1.2.....	146
10.7.1	Zugversuche an LCF-Proben.....	146
10.8	Anhang zu Abschnitt 5.1	146
10.8.1	Dehnungsgeregelte Versuche an LCF-Proben	146
11	Literaturverzeichnis.....	151
12	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	157
13	Abbildungsverzeichnis	161
14	Tabellenverzeichnis	167