

# Rauheit und Randschicht

Erfassung von Randschichtverfestigungen,  
Eigenspannungen und Oberflächenfeingestalt in  
Schwingfestigkeitsnachweisen mit Berücksichtigung  
nichtlinearen Verformungsverhaltens

Abschlussbericht

FKM-Vorhaben Nr. 616  
Heft 344 | 2022



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.

# Rauheit und Randschicht

Vorhaben Nr. 616

---

## Erfassung von Randschichtverfestigungen, Eigenspannungen und Oberflächenfeingestalt in Schwingfestigkeitsnachweisen mit Berücksichtigung nichtlinearen Verformungsverhaltens

---

### Abschlussbericht

#### Kurzfassung:

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden Methoden zur Erfassung von Randschichtverfestigungen, Eigenspannungen und der Oberflächenfeingestalt im Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach dem Vorgehen des Örtlichen Konzepts erarbeitet. Hiermit konnte eine Grundlage für die Erweiterung des Anwendungsbereichs der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens“ (kurz: „FKM-Richtlinie Nichtlinear“) für randschichtbehandelte Bauteile geschaffen werden.

Experimentelle Untersuchungen umfassten statische und zyklische Versuche mit kugelgestrahlten, ein- und zweipunktgeharteten sowie induktivgeharteten Werkstoff- und Kerbproben aus 16MnCr5 und 42CrMo4. Diese sowie Versuchsergebnisse aus der Literatur lieferten eine Datenbasis zur Entwicklung verschiedener Abschätzmethoden und Näherungsverfahren: Es wurde eine Methode zur Abschätzung zyklischer Werkstoffkennwerte auf Grundlage der Vickers-Härte sowie ein angepasstes Vorgehen zur Erfassung der Oberflächenrauheit entwickelt. Die Algorithmen des Örtlichen Konzepts wurden zur Anwendung auf randschichtverfestigte Bauteile um einen Zweipunkt-Nachweis, einen neuen Berechnungsablauf zur Abschätzung elastisch-plastischer Beanspruchungen und die Erfassung von Eigenspannungen an beiden Nachweispunkten erweitert. Das Vorgehen zur Berücksichtigung der Oberflächenrauheit wurde modifiziert. Die erarbeiteten Methoden sind für die Aufnahme in die FKM-Richtlinie Nichtlinear vorgesehen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

---

Laufzeit:	01.07.2019 – 31.03.2022
Fördergeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz / Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (BMWK/AiF)
Fördernummer(n):	IGF 20745 N
Forschungsstelle(n):	Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt Leiter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald  Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB), Abteilung Betriebsfestigkeit und Systemverhalten, Technische Universität Clausthal Leiter: Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts
Bearbeiter und Verfasser:	Patrick Yadegari, M.Sc. (IFSW) Dr.-Ing. H. Thomas Beier (IFSW) Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (IFSW) Moritz Hupka, M.Sc. (IMAB) Dr.-Ing. Michael Wächter (IMAB) Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts (IMAB)
Projektkoordination/projektbegleitender Ausschuss:	Dr.-Ing. Stephan Issler (Steinbeis-Transferzentrum Bauteilfestigkeit und -sicherheit, Werkstoff- und Fügetechnik BWF)
Vorstandsvorsitzender FKM:	Dipl.-Ing. Hartmut Rauen (VDMA)



## Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von dem Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) e.V. gestellt und am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Fachgebiet Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald sowie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB), Abteilung Betriebsfestigkeit und Systemverhalten der Technischen Universität Clausthal unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts bearbeitet wurde.

Das FKM dankt den Professoren Vormwald und Esderts sowie den wissenschaftlichen Bearbeitern Patrick Yadegari (IFSW), Moritz Hupka (IMAB), Dr.-Ing. H. Thomas Beier (IFSW) und Dr.-Ing. Michael Wächter (IMAB) 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.-Ing. Stephan Issler (Steinbeis-Transferzentrum Bauteilfestigkeit und -sicherheit, Werkstoff- und Fügetechnik BWF) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Insbesondere danken wir den Firmen

- Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
- Robert Bosch GmbH, Stuttgart
- SCHERDEL siment GmbH, Marktrechwitz

für die Bereitstellung der Versuchswerkstoffe, die Probenfertigung und die Durchführung von Wärmebehandlungen. Des Weiteren danken wir der Firma

- Steinbeis-Transferzentrum Bauteilfestigkeit und -sicherheit, Werkstoff- und Fügetechnik BWF, Esslingen

für die Durchführung von Zugversuchen, Gefügeanalysen, Härtetiefenverläufe und fraktographische Untersuchungen mittels REM. Außerdem danken wir der Firma

- Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach

für weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung des Restaustenitgehalts und der Nachbehandlung der Proben.

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 20745 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages





## Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary .....	9
1.1	Executive Summary (DE).....	9
1.2	Executive summary (EN) .....	10
2	Einleitung.....	11
3	Wissenschaftlich-technischer Ansatz.....	12
3.1	Stand von Wissenschaft und Technik.....	12
3.1.1	Örtliches Konzept und FKM-Richtlinie Nichtlinear .....	12
3.1.2	Randschichtbehandlung .....	17
3.1.3	Oberflächenfeingestalt.....	18
3.1.4	Eigenspannungen .....	21
3.2	Arbeitshypothese .....	22
4	Experimentelle Grundcharakterisierung der untersuchten Werkstoffe .....	23
4.1	Untersuchte Werkstoffe, Randschichtbehandlungen und Rauheiten .....	23
4.2	Probengeometrien.....	26
4.2.1	Zugproben.....	26
4.2.2	Ungekerbte Werkstoffproben.....	26
4.2.3	Bauteilähnliche Proben .....	27
4.3	Probenfertigung und Wärmebehandlung .....	27
4.4	Grundcharakterisierung .....	28
4.4.1	Chemische Zusammensetzung .....	28
4.4.2	Gefüge, Härte bzw. -tiefenverlaufsmessungen .....	30
4.4.3	Rauheitsmessungen .....	40
4.4.4	Eigenspannungsanalysen.....	42
4.5	Quasistatische Zugversuche.....	44
4.5.1	Prüftechnik .....	44
4.5.2	Versuchsergebnisse .....	44
4.6	Dehnungsgeregelte Schwingversuche .....	45
4.6.1	Prüftechnik .....	45
4.6.2	Kennwerte und Formeln .....	46
4.6.3	Ergebnisse der dehnungsgeregelten Werkstoffversuche.....	48
4.7	Auffälligkeiten beim 80MnCr5 .....	49
4.7.1	Versuchstechnische Ursachen .....	52
4.7.2	Eigenspannungen .....	53
4.7.3	Restaustenitumwandlung .....	54
4.7.4	Spannungs-Differenz-Effekt.....	61
5	Schwingfestigkeitsversuche an bauteilähnlichen Proben .....	64
5.1	Prüftechnik und -durchführung.....	64
5.2	Mechanische Kennwerte und Formeln .....	65
5.3	Spannungswöhlerlinien .....	65
5.3.1	16MnCr5 einatzgehärtet .....	66

5.3.2	42CrMo4 induktivgehärtet .....	67
5.3.3	42CrMo4 kugelgestrahlt .....	69
5.3.4	42CrMo4 vorvergütet .....	70
5.4	Bruchflächenanalysen .....	71
6	Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Schwingfestigkeit .....	76
6.1	Experimentelle Untersuchungen .....	77
6.2	Literaturrecherche .....	82
6.3	Herleitung einer neuen Methode .....	85
6.3.1	Neigungsanpassung für die $P_{RAM}$ -Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich.....	85
6.3.2	Neigungsanpassung für die $P_{RAJ}$ -Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich .....	87
6.4	Anwendung der neuen Vorschläge .....	89
6.4.1	Anwendung auf Literaturergebnisse .....	90
6.4.2	Zusammenfassende Betrachtung .....	95
7	Abschätzen zyklischer Kennwerte auf Grundlage der Härte nach Vickers HV .....	96
7.1	Abschätzung zyklischer Kennwerte und Schädigungsparameter-Wöhlerlinien aus (quasi-)statischen Werkstoffeigenschaften .....	96
7.2	Datenbasis.....	98
7.2.1	Korrelation von Härte und Zugfestigkeit.....	98
7.2.2	Zusammensetzung der Datenbasis .....	99
7.3	Modifizierte Abschätzmethode .....	100
7.4	Treffsicherheitsbewertung .....	101
7.5	Absenken der Schädigungsparameter-Wöhlerlinien auf niedrige Ausfallwahrscheinlichkeiten .....	105
7.6	Vergleich der Treffsicherheit mit der bestehenden Abschätzmethode .....	106
8	Datenbank mit Ergebnissen von Schwingfestigkeitsversuchen randschichtbehandelter Proben..	108
9	Ermüdungsfestigkeitsnachweis für randschichtbehandelte Bauteile .....	110
9.1	Modell „Dicke Randschicht“.....	110
9.1.1	Näherungsverfahren zur Abschätzung elastisch-plastischer Beanspruchungen .....	111
9.1.2	Erfassung von Eigenspannungen .....	116
9.1.3	Vakuurfaktor .....	118
9.2	Berechnungsablauf des Zweipunkt-Nachweises .....	118
9.3	Treffsicherheitsbewertung .....	120
10	Zusammenfassung und Ergebnisse .....	125
11	Anhang .....	128
11.1	Ergebnisse der (quasi-)statischen Untersuchungen (Steinbeis-Transferzentrum Esslingen)	128
11.1.1	42CrMo4 vorvergütet .....	128
11.1.2	42CrMo4 induktiv gehärtet.....	132
11.1.3	16MnCr5 blindgehärtet .....	135
11.1.4	16MnCr5 blindgehärtet und im Prüfbereich aufgekohlt .....	138
11.2	Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche an Werkstoffproben (IMAB) .....	141
11.2.1	42CrMo4 vorvergütet, polierte Oberfläche.....	142

11.2.2	42CrMo4 vorvergütet, Rz = 10µm .....	144
11.2.3	42CrMo4 vorvergütet, Rz = 50 µm .....	146
11.2.4	42CrMo4 induktiv gehärtet, poliert.....	148
11.2.5	42CrMo4 induktiv gehärtet, Rz = 10 µm.....	150
11.2.6	42CrMo4 induktiv gehärtet, Rz = 50 µm.....	152
11.2.7	16MnCr5 blindgehärtet, poliert .....	154
11.2.8	16MnCr5 blindgehärtet und im Prüfbereich aufgekohlt, poliert .....	156
11.2.9	16MnCr5 blindgehärtet und im Prüfbereich aufgekohlt, Rz = 10 µm .....	157
11.2.10	16MnCr5 blindgehärtet und im Prüfbereich aufgekohlt, Rz = 50 µm .....	157
11.2.11	16MnCr5 blindgehärtet und im Prüfbereich aufgekohlt, nachpoliert .....	158
11.3	Versuchsergebnisse Boller .....	158
11.3.1	Einstufige Belastung der Kerbstäbe .....	159
11.3.2	Belastung mit variabler Amplitude .....	160
11.4	Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche an bauteilähnlichen Proben (IFSW) .....	160
11.4.1	Kerbproben aus einsatzgehärtetem 16MnCr5, CHD1 R2 .....	161
11.4.2	Kerbproben aus einsatzgehärtetem 16MnCr5, CHD1 R4 .....	161
11.4.3	Kerbproben aus einsatzgehärtetem 16MnCr5, CHD2 R4 .....	162
11.4.4	Kerbproben aus induktivgehärtetem 42CrMo4, SHD1 R4 .....	163
11.4.5	Kerbproben aus induktivgehärtetem 42CrMo4, SHD2 R4 .....	164
11.4.6	Kerbproben aus kugelgestrahltem 42CrMo4, D1 R2 .....	164
11.4.7	Kerbproben aus kugelgestrahltem 42CrMo4, D1 R4 .....	165
11.4.8	Kerbproben aus kugelgestrahltem 42CrMo4, D2 R4 .....	166
11.4.9	Kerbproben aus vorvergütetem 42CrMo4, R2.....	166
11.4.10	Kerbproben aus vorvergütetem 42CrMo4, R4 .....	167
12	Verzeichnisse .....	168
12.1	Literaturverzeichnis .....	168
12.2	Abkürzungsverzeichnis .....	171
12.3	Symbolverzeichnis .....	172
12.4	Abbildungsverzeichnis .....	174
12.5	Tabellenverzeichnis .....	181



## 1 Executive Summary

### 1.1 Executive Summary (DE)

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden Vorarbeiten zur Erweiterung der FKM-Richtlinie Nichtlinear [1] geleistet und Methoden zur Führung eines Ermüdungsfestigkeitsnachweises für randschichtverfestigte Bauteile erarbeitet. Hierbei wird eine Berücksichtigung des Einflusses von Eigenspannungen, Gefügeänderungen und Oberflächenfeingestalt auf die Bauteillebensdauer ermöglicht.

Stellvertretend für alle randschichtbeeinflussenden Fertigungsverfahren wurden kugelgestrahlte, ein-satzgehärtete sowie induktivgehärtete Kerbproben aus 16MnCr5 und 42CrMo4 statischen und zyklischen Versuchen unterzogen und hinsichtlich der Schwingfestigkeitssteigerung infolge der Einbringung der Randschicht untersucht. Zusätzlich zu den unterschiedlichen Randschichtbehandlungen wurden auch verschiedene Rauheiten betrachtet, um den Einfluss der Oberflächenfeingestalt auf die Ermüdungsfestigkeit identifizieren zu können, wobei polierte Proben und Proben mit erhöhter Rauheit ( $R_z = 10 \mu\text{m}$ ) sowie stark erhöhter Rauheit ( $R_z = 50 \mu\text{m}$ ) zum Einsatz kamen. Diese experimentellen Untersuchungen sowie Versuchsergebnisse aus der Literatur dienten als Datenbasis für die Entwicklung der Abschätzmethoden und Näherungsverfahren.

Die FKM-Richtlinie Nichtlinear bietet Methoden zur Abschätzung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve und der Schädigungsparameterwöhlerlinien auf Basis der Zugfestigkeit für verschiedene Werkstoffgruppen an. Da eine Randschichtbehandlung zu einem inhomogenen Werkstoffzustand im Bauteil führt, ist die Bestimmung einer maßgebenden Zugfestigkeit nicht möglich. Es wurden daher Abschätzmethoden für die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und die Schädigungsparameterwöhlerlinien auf Basis der Vickershärte für die Werkstoffgruppe Stahl entwickelt.

Des Weiteren wurde die in der Richtlinie bestehende Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Oberflächenrauheit überarbeitet. Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass der Einfluss der Rauheit auf die Schwingfestigkeit im Kurzzeitfestigkeitsbereich nicht zu erkennen und erst mit steigender Lebensdauer stärker ausgeprägt ist. Statt einer Parallelverschiebung der gesamten Schädigungsparameterwöhlerlinie wurde eine neue Methode entwickelt, die den Rauheitseinfluss bei Lebensdauern von mehr als  $10^3$  Schwingspielen durch eine Neigungsänderung der Wöhlerlinie berücksichtigt.

Bei randschichtbehafteten Bauteilen kann das Versagen wegen der inhomogenen Materialeigenschaften und der meist vorhandenen Eigenspannungen sowohl vom Kerbgrund als auch vom Übergangsbereich zwischen niedrigstem Kernmaterial und hochfester Randschicht ausgehen. Zur Erfassung dieser zweiten versagensrelevanten Stelle wurde daher eine Anpassung des in der Richtlinie enthaltenen Ermüdungsfestigkeitsnachweises vorgenommen. Hierbei wurden die Algorithmen des Örtlichen Konzepts um einen Zweipunkt-Nachweis und die Erfassung von Eigenspannungen erweitert. Dazu wurde ein Näherungsverfahren zur Abschätzung der elastisch-plastischen Beanspruchungen an beiden Nachweispunkten entwickelt.

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens entwickelten Abschätzmethoden, Näherungsverfahren und Berechnungsalgorithmen fließen in den – an das Vorgehen der FKM-Richtlinie Nichtlinear angelehnten – Ermüdungsfestigkeitsnachweis für randschichtverfestigte Bauteile ein.

### 1.2 Executive summary (EN)

Within this project, preparatory work was performed to extend the “FKM-Guideline Nonlinear” [1] and to develop methods for the assessment of structural durability of surface-hardened components. Hereby, a consideration of the influence of residual stresses, microstructural changes and the surface roughness on the component’s fatigue strength were achieved.

Representing all manufacturing processes influencing the surface layer, shot-peened, case-hardened and induction-hardened notched specimens made of 16MnCr5 and 42CrMo4 were examined in static and cyclic tests with regard to the influence of surface-hardening on the fatigue life. In addition to the different surface treatments, various roughnesses were also investigated in order to identify the influence of the surface finish on the fatigue strength of the component, whereby polished specimens and specimens with increased roughness ( $R_z = 10 \mu\text{m}$ ) as well as strongly increased roughness ( $R_z = 50 \mu\text{m}$ ) were examined. These experimental investigations as well as test results from the literature served as a data basis for the development of the estimation methods and approximation procedures.

The “FKM Guideline Nonlinear” offers methods for estimating the cyclic stress-strain curve and the damage parameter-Wöhler-curves based on the ultimate tensile strength for different material groups. Since a surface treatment leads to inhomogeneous material properties in the component, the determination of a representative ultimate tensile strength is not possible. Therefore, estimation methods for the cyclic stress-strain curve and the damage parameter-Wöhler-curves based on the Vickers hardness were developed for steels.

Furthermore, the existing procedure in the guideline for taking surface roughness into account was revised. The experimental investigations showed that the influence of the roughness on the fatigue strength cannot be detected in the regime of low cycle fatigue and is only pronounced with increasing service life. Instead of a parallel shift of the entire damage parameter-Wöhler-curve, a new method was developed that takes into account the roughness influence from  $10^3$  cycles to failure onwards by changing the slope of the Wöhler-curve.

Due to the inhomogeneous material properties in terms of strength and residual stresses, the failure of components with surface layers may initiate from the notch root as well as from the transition area between the low-strength core material and the high-strength surface layer. Therefore, an adaptation of the fatigue strength assessment contained in the guideline was developed for the detection of this second failure-relevant point. The algorithms of the local strain approach were extended to include a two-point assessment as well as the consideration of residual stresses. An approximation method was developed to estimate the elastic-plastic strains at both assessment points.

All these estimation methods and calculation algorithms developed within this project are included in the assessment of structural durability for surface-hardened components, which is based on the procedure of the “FKM Guideline Nonlinear”.