


## Mehrachsigkeit örtlich

Anwendungsgerechte Lebensdauerabschätzung für  
mehrachsig nichtproportional beanspruchte  
Bauteile auf Basis des Örtlichen Konzepts

Abschlussbericht

FKM-Vorhaben Nr. 615  
Heft 346 | 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.

# Mehrachsigkeit örtlich

Vorhaben Nr. 615

---

## Anwendungsgerechte Lebensdauerabschätzung für mehrachsig nichtproportional beanspruchte Bauteile auf Basis des Örtlichen Konzepts

---

### Abschlussbericht

#### Kurzfassung:

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Algorithmen entwickelt, die es ermöglichen, einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis für mehrachsig nichtproportional beanspruchte Bauteile auf Basis des Örtlichen Konzepts durchzuführen. Die entwickelten Algorithmen sind geeignet, um die FKM-Richtlinie Nichtlinear („Rechnerischer Festigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens“) auf nichtproportionale Beanspruchungen zu erweitern.

Zur Validierung der Algorithmen wurden Versuche am Eisengusswerkstoff mit Kugelgraphit EN-GJS-500-14 und am Baustahl S355 durchgeführt. Hierbei wurden zum einen einachsige statische und zyklische Versuche sowie Versuche zur Erfassung mehrachsig nichtproportionalen Werkstoffverhaltens zur Werkstoffcharakterisierung durchgeführt. Zum anderen wurden Versuche an gekerbten, bauteilähnlichen Proben durchgeführt. Zusammen mit Versuchsergebnissen aus der Literatur bilden diese eine Datenbasis, die zur Treffsicherheitsbewertung der Algorithmen herangezogen wurde.

Das Forschungsvorhaben liefert zwei Algorithmen zur Berücksichtigung nichtproportionaler Beanspruchungen. Ein Algorithmus verwendet eine Vergleichsspannung, die skalierte Normalspannung, zur Erfassung nichtproportionaler Beanspruchung. In diesem Algorithmus findet der Schädigungsparameter  $P_{RAM}$  aus der FKM-Richtlinie Nichtlinear Anwendung. Der zweite Algorithmus basiert auf einem Werkstoffmodell in Verbindung mit einer mehrachsigen Kerbdehnungssimulation. In Verbindung mit diesem Algorithmus werden drei Schädigungsparameter untersucht. Hierzu zählt der Schädigungsparameter  $P_{RAM}$ , der Schädigungsparameter  $P_{FS}$  nach Fatemi und Socie sowie der Schädigungsparameter  $P_Z$ , der auf der Bruchmechanik kurzer Risse basiert. Beide Algorithmen verwenden die Methode der kritischen Schnittebene. Anhand einer Treffsicherheitsbewertung wird gezeigt, dass beide Algorithmen zur Erweiterung der FKM-Richtlinie Nichtlinear geeignet sind.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

---

Laufzeit: 01.03.2022 - 31.05.2022

Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz /Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (BMWK/AiF)

Fördernummern: IGF 20613 N

Forschungsstelle(n): Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB),  
Technische Universität Clausthal  
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts

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

Bearbeiter und Verfasser: Alexander Linn, M.Sc. (IMAB)  
Jan Kraft, M.Sc. (IFSW)  
Dr.-Ing. Michael Wächter (IMAB)  
Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (IFSW)  
Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts (IMAB)  
Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (IFSW)

Projektkoordination/projekt-  
begleitender Ausschuss: Dipl.-Ing. (FH) Tim Kirchhoff (ihf Ingenieurgesellschaft mbH)

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 Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB), Abteilung Betriebsfestigkeit und Systemverhalten der Technischen Universität Clausthal unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts sowie am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (IFSW), Abteilung Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald bearbeitet wurde.

Das FKM dankt den Professoren Esderts und Vormwald sowie den wissenschaftlichen Bearbeitern Alexander Linn (IMAB), Jan Kraft (IFSW), Dr.-Ing. Michael Wächter (IMAB) und Dr.-Ing. H. Thomas Beier (IFSW) für die Durchführung des Vorhabens. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis des FKM unter der Leitung von Dipl.-Ing. (FH) Tim Kirchhoff (ihf Ingenieurgesellschaft mbH) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die umfassende Unterstützung. Für die Bereitstellung der vorhabenbezogenen Aufwendungen danken wir insbesondere den Firmen:

- Audi AG
- IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH
- Magna Powertrain Engineering Center Steyr GmbH & CoKG
- SLR Giesserei St. Leon-Rot GmbH
- Volkswagen AG
- ZF Friedrichshafen AG

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 20613 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:





## Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	7
1.1	Executive Summary (DE)	7
1.2	Executive Summary (EN)	8
2	Einleitung	9
3	Stand der Forschung	11
3.1	Werkstoffmodelle	11
3.1.1	Ansatz nach Ramberg und Osgood	11
3.1.2	Dehnungswöhlerlinie	11
3.1.3	Kennwertermittlung für den Ramberg-Osgood-Ansatz	12
3.1.4	Inkrementelle Plastizitätsmodelle	13
3.1.5	Parametrisierung der Plastizitätsmodelle	16
3.2	Werkstoffeffekte	18
3.2.1	Masing-Verhalten	18
3.2.2	Werkstoffgedächtnis	19
3.2.3	Zyklische Ver- und Entfestigung	20
3.2.4	Zyklisches Kriechen und zyklische Relaxation	21
3.2.5	Nichtproportionale Verfestigung	21
3.2.6	Kennwertermittlung der Kennzahl $\alpha$ zum nichtproportionalen Verfestigungsvermögen	22
3.2.7	Einfluss der Nichtproportionalität auf die Lebensdauer	25
3.3	Vergleichsspannungen	26
3.3.1	Gängige Vergleichsspannungshypothesen	26
3.3.2	Skalierte Normalspannung	29
3.4	Kerbnäherungen	30
3.5	Nichtproportionalitätskennzahlen	32
3.6	Methode der kritischen Schnittebene	33
3.7	Stützwirkungskonzept	35
3.8	Schädigungsparameter	36
3.8.1	Schädigungsparameter $P_{RAM}$	36
3.8.2	Schädigungsparameter $P_{FS}$	37
3.8.3	Schädigungsparameter $P_Z$	38
4	Versuche	47
4.1	Zugversuche	47
4.2	Dehnungsgeregelte Versuche	48
4.3	Schiebungsgeregelte Versuche	53
4.4	Versuche zur nichtproportionalen Verfestigung	56
4.5	Lastgeregelte Versuche an bauteilähnlichen Proben	57
4.5.1	Kalibrierung	60
4.5.2	Übertragungsfaktoren	62
4.5.3	Anrisserkennung	63
4.5.4	Variable Amplitude und unkorrelierte Lastfolgen	65
4.5.5	Versuchsergebnisse	68
5	Datenbank	69
6	Berechnungsalgorithmen	73
6.1	Ermittlung von Eingabewerten aus Finite-Elemente-Simulation	73

6.2	Lebensdauerabschätzung mehrachsig beanspruchter Bauteile auf Basis skaliertes Normalspannungen . . . . .	75
6.2.1	Modifikation der skalierten Normalspannung . . . . .	77
6.2.2	Berücksichtigung der nichtproportionalen Verfestigung . . . . .	81
6.2.3	Berücksichtigung des Einflusses der Nichtproportionalität auf die Lebensdauer . . . . .	82
6.2.4	Auffinden der kritischen Schnittebene . . . . .	87
6.2.5	Treffsicherheit und Sicherheitskonzept . . . . .	91
6.2.6	Fazit . . . . .	95
6.3	Lebensdauerabschätzung auf Basis einer mehrachsigen Kerbdehnungssimulation . . . . .	96
6.3.1	Kerbdehnungssimulation . . . . .	97
6.3.2	Schädigungsrechnung . . . . .	103
6.3.3	Treffsicherheit . . . . .	113
6.3.4	Sicherheitskonzept . . . . .	118
6.4	Vergleich der Berechnungsalgorithmen . . . . .	121
6.4.1	Benchmarkrechnung zum Vergleich der Rechenzeiten . . . . .	121
6.4.2	Vergleich der Treffsicherheiten der vorgestellten Algorithmen . . . . .	121
6.5	Anwendungsbeispiel: Polverbinder . . . . .	122
6.6	Vergleichsrechnung mit FEMFAT . . . . .	127
7	Zusammenfassung und Ergebnisse . . . . .	131
8	Anhang . . . . .	133
8.1	Literaturverzeichnis . . . . .	133
8.2	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	140
8.3	Symbolverzeichnis . . . . .	141
8.4	Abbildungsverzeichnis . . . . .	143
8.5	Tabellenverzeichnis . . . . .	149
8.6	Zugversuche . . . . .	151
8.6.1	EN-GJS-500-14 . . . . .	152
8.6.2	S355 . . . . .	153
8.7	Dehnungs- und schiebungsgeregelte Versuche . . . . .	153
8.7.1	EN-GJS-500-14 . . . . .	154
8.7.2	S355 . . . . .	160
8.8	Versuche zur nichtproportionalen Verfestigung . . . . .	166
8.8.1	EN-GJS-500-14 . . . . .	167
8.8.2	S355 . . . . .	174
8.9	Versuche an bauteilähnlichen Proben . . . . .	180



## 1 Executive Summary

### 1.1 Executive Summary (DE)

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Verfahren erarbeitet, mit denen der Ermüdungsfestigkeitsnachweis der FKM-Richtlinie Nichtlinear zur Erfassung mehrachsiger nichtproportionaler Beanspruchungen erweitert werden kann.

Zur Validierung dieser neuen Methodiken bzw. Algorithmen zur Berücksichtigung von nichtproportionalen Beanspruchungen wurden einerseits Versuche an Proben aus zwei Werkstoffen durchgeführt, dem Baustahl S355 und einem Eisenguss mit Kugelgraphit EN-GJS-500-14. Eine ausführliche Werkstoffcharakterisierung erfolgte, die nicht nur statische und zyklische Werkstoffkennwerte beinhaltet, sondern auch Kennwerte zur Beschreibung der nichtproportionalen Werkstoffeffekte, wie beispielsweise die nichtproportionale Verfestigung. Zudem wurde ein umfangreiches Programm von Schwingversuchen an gekerbten bzw. bauteilähnlichen Proben durchgeführt, um die Übertragbarkeit der entwickelten Algorithmen auf Bauteile sicherzustellen. Damit der Anrisszeitpunkt möglichst genau detektiert werden konnte, wurde ein Kamerasystem entwickelt, das es ermöglicht, den Anrisszeitpunkt für verschiedene Festlegungen der technischen Anrisslänge zu bestimmen.

Zusätzlich zu Daten aus den im Projekt durchgeführten Schwingversuchen wurden Daten aus der Literatur entnommen, um eine Datenbank aufzubauen, die zur Treffsicherheitsbewertung der Algorithmen herangezogen wurde. Diese umfasst mehr als 150 Versuchsreihen mit etwa 1300 Einzelversuchen. Alle enthaltenen Geometrien der Probekörper wurden nachmodelliert und die für die Algorithmen notwendigen Größen in Finite-Element-Rechnungen bestimmt. Die Werkstoffkennwerte wurden größtenteils übernommen. Nur in wenigen Fällen, in denen die Einzelversuche vorlagen, konnte eine Neuauswertung der Kennwerte über die Einzelversuche erfolgen.

Aus dem Projekt haben sich zwei Algorithmen zur Erweiterung der FKM-Richtlinie Nichtlinear auf nichtproportionale Beanspruchungen ergeben. Bei einem Algorithmus wurde eine hohe Kompatibilität zur bestehenden FKM-Richtlinie Nichtlinear bei der Einführung der nötigen Modifikationen gewahrt. Die Umsetzung erfolgt mittels Bildung einer Vergleichsspannung, der skalierten Normalspannung. Der andere Algorithmus bedient sich mehrachsiger Werkstoffmodelle und mehrachsiger Kerbdehnungssimulationen, um das nichtlineare Werkstoffverhalten möglichst realitätsnah darzustellen. In Verbindung mit diesem Algorithmus wurden verschiedene Schädigungsparameter hinsichtlich der Treffsicherheit gegenübergestellt.

Beispielhafte Vergleichsrechnungen erfolgten mit der kommerziellen Software FEMFAT, um die Treffsicherheiten der neuen Algorithmen anwenderseitig einordnen zu können. Auch zur Bewertung der Anwendbarkeit wurden Beispielrechnungen für Bauteile, deren Daten vom Projektausschuss zur Verfügung gestellt wurden, durchgeführt. Vorschläge aus dem Projektausschuss zur Verbesserung der Anwendbarkeit, der in einem Softwareworkshop vorgestellten Algorithmen, wurden realisiert.

Die in diesem Projekt entwickelten Algorithmen sind ausreichend auf ihre Richtlinientauglichkeit überprüft worden und stellen allesamt eine Möglichkeit zur Erweiterung der FKM-Richtlinie Nichtlinear dar.

### 1.2 Executive Summary (EN)

Within the research project, methods were developed with which the fatigue assessment of the FKM-guideline nonlinear can be extended to multiaxial nonproportional stresses.

In order to validate these new methods and algorithms for the consideration of non-proportional stresses, tests were carried out on specimens of two materials, the structural steel S355 and a cast iron with spheroidal graphite EN-GJS-500-14. A detailed material characterisation was carried out, which not only included static and cyclic material parameters, but also parameters for the description of the nonproportional material effects, such as the nonproportional hardening. In addition, an extensive test programme was carried out on notched or component-like specimens to ensure the transferability of the developed algorithms to components. In order to detect the crack initiation point as accurately as possible, a camera system was developed that makes it possible to determine the crack initiation point for different specifications of the technical crack length.

In addition to data from the tests carried out in the project, data was taken from the literature to build up a database that was used to evaluate the accuracy of the algorithms. This comprises more than 150 test series with more than 1300 individual tests. All included geometries of the test specimens were re-modelled and the quantities necessary for the algorithms were determined in FE calculations. The parameters were taken over for the most part. Only in a few cases was it possible to re-evaluate the parameters with the tests.

The project resulted in two algorithms for the extension of the FKM guideline nonlinear to nonproportional stresses. In the case of one algorithm, a high degree of compatibility with the existing FKM-guideline nonlinear was maintained when introducing the necessary modifications. The implementation is done by forming an equivalent stress, the scaled normal stress. The other algorithm uses multiaxial material models and multiaxial notch root strain simulations to represent the nonlinear material behaviour as realistically as possible. In connection with this algorithm, different damage parameters were compared with regard to their accuracy.

Comparative calculations were carried out with commercial software in order to be able to better classify the accuracy of the algorithms. Also with regard to applicability, there were example calculations for components, the data of which were made available by the project committee. Suggestions from the project committee to improve the applicability of the algorithms presented in a software workshop were realised. The algorithms developed in this project have been sufficiently checked for their guideline suitability and all of them represent a possibility for the extension of the FKM-guideline nonlinear.