

Michael Wächter
Christian Müller
Alfons Esderts

Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie

Kurz und bündig

EXTRAS ONLINE



Springer Vieweg

Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie

Michael Wächter · Christian Müller ·
Alfons Esderts

Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie

Kurz und bündig



Springer Vieweg

Michael Wächter
IMAB
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Alfons Esderts
IMAB
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Christian Müller
IMAB
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

ISBN 978-3-658-17458-3

ISBN 978-3-658-17459-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-17459-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Obwohl das vorliegende Buch sorgfältig erarbeitet wurde, sind inhaltliche Fehler nicht auszuschließen. Zudem beinhaltet das Buch aus didaktischen Gründen nicht alle für einen Festigkeitsnachweis in den Gültigkeitsgrenzen der FKM-Richtlinie benötigten Vorschriften und Gleichungen, weshalb eine Bauteilauslegung nach FKM-Richtlinie allein aufgrund dieses Buches nicht empfohlen wird – hierzu ist einzig die FKM-Richtlinie selbst heranzuziehen. Die Verfasser haften daher nicht für fehlerhaft ausgelegte Bauteile und daraus resultierende Schäden.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Das vorliegende Fachbuch geht auf ein Fachpraktikum zurück, das seit mehreren Jahren im Masterstudiengang Maschinenbau an der TU Clausthal durch das Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) angeboten wird. Mit der Initiierung des Fachpraktikums verfolgten die Autoren das Ziel, den Studierenden eine Anleitung für die Anwendung der FKM-Richtlinie an die Hand zu geben. Dabei sollten insbesondere die Aspekte

- Beanspruchungsermittlung durch den Einsatz von FE-Simulationen,
- korrekte Durchführung des rechnerischen Festigkeitsnachweises und
- sinnvolle Dokumentation der Ergebnisse

im Fokus stehen. Bei der Entwicklung des Praktikums kam den Autoren die langjährige Erfahrung am Institut in den Bereichen des experimentellen und rechnerischen Festigkeitsnachweises zugute. Zu Beginn der 1990er-Jahre entstand die erste Auflage der FKM-Richtlinie unter Federführung von Dr.-Ing. Bernd Hänel, der sowohl in Dresden als auch in Clausthal wirkte. Neben anderen Forschungsstellen war das IMAB mit mehreren Forschungsvorhaben an der Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie maßgeblich beteiligt.

Im beruflichen Alltag und bei der Entwicklung des Fachpraktikums erkannten die Autoren durch die Behandlung verschiedener Anwendungsfälle zahlreiche Herausforderungen in der Anwendung der FKM-Richtlinie. Dieses sind bei der Anwendung des Nachweises mit örtlichen Spannungen insbesondere

- die Ermittlung der plastischen Formzahl im Statischen Festigkeitsnachweis,
- die Bestimmung der höchstbeanspruchten Oberfläche für die statistische Stützzahl im Ermüdungsfestigkeitsnachweis,
- die Ableitung des bezogenen Spannungsgradienten für die bruchmechanische Stützzahl im Ermüdungsfestigkeitsnachweis

sowie die Durchführung der linearen Schadensakkumulation nach dem Verfahren Miner konsequent. Für die identifizierten Hürden wurden praxistaugliche, richtlinienkonforme Lösungen erarbeitet und den Studierenden zur Verfügung gestellt.

Das Fachpraktikum erhielt von den Studierenden positive Kritiken. Zusätzlich ergaben sich zahlreiche positive Rückmeldungen von Vertretern der Industrie sowie eine Auszeichnung im Rahmen des Lehrpreises der TU Clausthal im Jahr 2015. Dies veranlasste die Autoren ein Jahr später dazu, das Praktikumsskript zu überarbeiten, zu erweitern und in das vorliegende Fachbuch zu überführen.

Die FKM-Richtlinie besitzt eine breite Anwendbarkeit, die in einigen Teilen eine erhöhte Komplexität bedingt. Viele Anwender entwickeln hohen Respekt vor dieser Komplexität, die bis zur Ablehnung führen kann. Die breite Anwendbarkeit ist jedoch in den Augen der Verfasser einer der entscheidenden Vorteile des Regelwerks, das insbesondere im Bereich der Ermüdungsfestigkeit seinesgleichen sucht. Das vorliegende Fachbuch geht über die Grundidee einer Anleitung für die Anwendung der FKM-Richtlinie des ursprünglichen Praktikumsskripts hinaus. Es soll dem unerfahrenen Ingenieur vielmehr den Einstieg in den Umgang mit der Richtlinie erleichtern und durch anschauliche Beispiele die genannten Vorbehalte nehmen. Für den fortgeschrittenen Berechnungsingenieur soll ein grundlegendes Verständnis für das Vorgehen in der FKM-Richtlinie vermittelt werden, was neben notwendigen theoretischen Ausführungen mit konkreten Beispielen erreicht werden soll. Mit dem Fokus auf der praktischen Anwendbarkeit werden Details in einer Tiefe erörtert, die für das Verständnis der FKM-Richtlinie erforderlich sind. Beispielen mit konkreten Anwendungsfällen wird der Vorzug vor komplexen und vollständigen Beschreibungen aller denkbaren Aspekte gegeben. Für die Durchführung der Festigkeitsnachweise existieren verschiedene kommerzielle Softwarelösungen. Deren Anwender soll dieses Buch dabei helfen, die im Hintergrund ablaufenden Berechnungen zu verstehen und die Ergebnisse richtig zu interpretieren. Weiterhin soll es ihm Hilfestellung bei der Ermittlung von Kennwerten geben, die die Software nicht automatisch bestimmt. Alle Lesergruppen soll das Buch dabei unterstützen, mit der FKM-Richtlinie sicher umzugehen. Das Buch kann und soll die FKM-Richtlinie jedoch nicht ersetzen, sondern eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

Die Autoren möchten an dieser Stelle nicht versäumen, zahlreichen Unterstützern zu danken. Dies ist zum einen das Green Voltage Racing Team der TU Clausthal, namentlich Herr Wolfgang Scherm, für die freundliche Bereitstellung des Planetenträgers im dritten Beispiel dieses Buches. Weiterhin Frau Dipl.-Betriebsw. (FH) Karin Friedrichs für die sorgfältige und gewissenhafte sprachliche Korrektur des Manuskriptes. Ebenso gilt der Dank der Autoren Herrn Dipl.-Ing. Torben Engelke für die Überprüfung der Teile des Buches, die die FE-Software

ANSYS Workbench betreffen und die dadurch entstandenen, wertvollen Impulse. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Karsten Hinkelmann für die Ausarbeitung wesentlicher Teile des Kapitels zur Entstehung und Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie sowie für die tatkräftige Unterstützung bereits bei der Entwicklung des ursprünglichen Praktikumsskripts.

Nach der vermeintlichen Fertigstellung des Manuskripts haben sich die Herren Professor Dr.-Ing. Eckehard Kullig, Dr.-Ing. Roland Rennert sowie Dr.-Ing. Dieter Siegele durch eine sehr intensive und wohlwollende Begutachtung des Manuskripts hervorgetan. Die z. T. sehr detaillierten und tiefgreifenden Rückmeldungen haben deutlich zur Verbesserung des Buches beigetragen. Insbesondere sei darauf verwiesen, dass Anhang A auf Professor Kullig zurückgeht. Wir sind den drei genannten Herren in besonderer Weise für Ihre Mühen dankbar.

Die Autoren danken nicht zuletzt dem Springer Vieweg Verlag für die Bereitschaft, dieses Buch zu verlegen und Herrn Thomas Zipsner sowie Frau Ellen-Susanne Klabunde für das gewissenhafte Lektorat.

Michael Wächter, Christian Müller, Alfons Esderts
Clausthal-Zellerfeld, im Januar 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur	3
2	Die FKM-Richtlinie	5
	2.1 Entstehung und Weiterentwicklung	5
	2.2 Anwendungsbereich	6
	2.3 Aufbau	7
	Literatur	8
3	Grundlagen: Beanspruchungszustand und Festigkeitsnachweis . .	9
	3.1 Nennspannungen, örtliche Spannungen, Spannungstensor	9
	3.2 Hauptspannungen und Mehrachsigkeit	12
	3.3 Vergleichsspannungshypothesen	16
	3.4 Elasto-Plastizität	16
	3.5 Rechnerische Festigkeitsnachweise	20
	3.6 Ableitung von Lastkennwerten	22
	3.7 Rechnerische Abschätzung von Festigkeitskennwerten	24
	3.8 Sicherheitskonzept und Zuverlässigkeitsaussagen	27
	Literatur	30
4	Der Festigkeitsnachweis am Beispiel einer Welle mit Absatz	33
	4.1 Statischer Festigkeitsnachweis einer Welle mit Absatz	35
	4.1.1 Beanspruchung (<i>Kap. 3.1</i>)	35
	4.1.2 Festigkeit (<i>Kap. 3.2 bis 3.4</i>)	40
	4.1.3 Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 3.5</i>)	54
	4.1.4 Nachweis (<i>Kap. 3.6</i>)	56
	4.2 Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis einer Welle mit Absatz	56
	4.2.1 Beanspruchung (<i>Kap. 4.1</i>)	56
	4.2.2 Festigkeit (<i>Kap. 4.2 bis 4.4</i>)	60

4.2.3	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 4.5</i>)	106
4.2.4	Nachweis (<i>Kap. 4.6</i>)	107
Literatur		109
5	Beispiel 2: Lagerbock	113
5.1	Der Statische Festigkeitsnachweis eines Lagerbocks	115
5.1.1	Beanspruchung (<i>Kap. 3.1</i>)	115
5.1.2	Festigkeit (<i>Kap. 3.2 bis 3.4</i>)	116
5.1.3	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 3.5</i>)	118
5.1.4	Nachweis (<i>Kap. 3.6</i>)	118
5.2	Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis eines Lagerbocks	118
5.2.1	Beanspruchung (<i>Kap. 4.1</i>)	118
5.2.2	Festigkeit (<i>Kap. 4.2 bis 4.4</i>)	119
5.2.3	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 4.5</i>)	123
5.2.4	Nachweis (<i>Kap. 4.6</i>)	124
5.2.5	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 4.5</i>)	124
5.2.6	Nachweis (<i>Kap. 4.6</i>)	125
6	Beispiel 3: Planetenträger	127
6.1	Der Statische Festigkeitsnachweis eines Planetenträgers	129
6.1.1	Beanspruchung (<i>Kap. 3.1</i>)	129
6.1.2	Festigkeit (<i>Kap. 3.2 bis 3.4</i>)	131
6.1.3	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 3.5</i>)	132
6.1.4	Nachweis (<i>Kap. 3.6</i>)	133
6.2	Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis eines Planetenträgers	133
6.2.1	Beanspruchung (<i>Kap. 4.1</i>)	133
6.2.2	Festigkeit (<i>Kap. 4.2 bis 4.4</i>)	134
6.2.3	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 4.5</i>)	137
6.2.4	Nachweis (<i>Kap. 4.6</i>)	137
6.2.5	Sicherheitsfaktoren (<i>Kap. 4.5</i>)	138
6.2.6	Nachweis (<i>Kap. 4.6</i>)	138
Anhang A – Praktische Hinweise zur Ermittlung der plastischen Formzahl		141
Anhang B – Mittelspannungsbewertung		143
Anhang C – lineare Schadensakkumulation nach dem Verfahren Miner elementar und Lebensdauer vielfaches		147
Sachverzeichnis		151

Das vorliegende Fachbuch richtet sich an Ingenieure und Studierende der Ingenieurwissenschaften, die sich mit dem Festigkeitsnachweis der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen“ (6. Auflage), [Renn 12], beschäftigen. Es soll sie in die Lage versetzen, die Grundzüge eines Betriebsfestigkeitsnachweises mithilfe der FKM-Richtlinie und dessen Hintergründe zu verstehen und sich mit der Struktur der FKM-Richtlinie vertraut zu machen, um mit ihr sicher umgehen zu können. Da sich viele Zusammenhänge anhand einer konkreten Anwendung anschaulicher erklären lassen, steht die Betrachtung von Beispielrechnungen in diesem Buch im Vordergrund.

Da die FKM-Richtlinie in ihrem vollen Umfang komplex und auch für den Fachmann herausfordernd ist, werden folgende Einschränkungen für die behandelten Bauteile getroffen:

- nur Bauteile bei Raumtemperatur
- nur Bauteile aus Stahl (außer austenitischem Stahl), keine Bauteile aus Eisenguss- oder Aluminiumwerkstoffen
- keine Bauteile mit Randschichthärtung
- proportionale Beanspruchungen

Durch diese Einschränkungen ändert sich die prinzipielle Struktur des Festigkeitsnachweises nicht, auch wenn einige Einflussfaktoren nicht zur Anwendung kommen und daher in diesem Buch nicht behandelt werden. Weiterhin wird auf den Festigkeitsnachweis von Schweißnähten komplett verzichtet, da sich dieser z. T. deutlich von dem nicht geschweißter Bauteile unterscheidet.

Auch beschränkt sich dieses Buch auf die Festigkeitsnachweise mit örtlichen, elastizitätstheoretischen Spannungen – Nennspannungen werden nicht betrachtet. Dies hat den Vorteil, dass sich mit örtlichen Spannungen Festigkeitsnachweise

für alle Bauteile erbringen lassen (nicht nur stab- und flächenförmige, an denen sich Nennspannungen definieren lassen¹) und dieses Vorgehen den Anforderungen vieler Industrieunternehmen entspricht, die Beanspruchungen mithilfe von FE-Rechnungen ermitteln.

Neben dem eigentlichen Festigkeitsnachweis besteht ein erheblicher Aufwand in der Ermittlung der inneren Beanspruchungen, weshalb auch dieser Punkt im vorliegenden Buch behandelt wird. Hierfür wird das FE-Programm ANSYS® Workbench™² (im Weiteren ANSYS WB) verwendet. Die Abbildungen und Anleitungen wurden mit der Workbench-Version 17.2 erstellt. Die in diesem Buch dargestellten Vorgehensweisen lassen sich auch mit einigen älteren Versionen von ANSYS WB in ähnlicher Weise lösen. Allerdings können sich die zu verwendenden Befehle und Menüpunkte ggf. unterscheiden. Auch für die zu ermittelnden Beanspruchungsgrößen können sich geringfügig andere Werte ergeben.

Mit diesen Grundlagen sollen Ingenieure in die Lage versetzt werden, Festigkeitsnachweise nach der FKM-Richtlinie selbstständig zu erbringen.

Für die Grundlagen der Betriebsfestigkeit wird auf die Literatur verwiesen, z. B. [Haib 06; Rada 07; Sand 08].

Das Buch beinhaltet neben dieser Einleitung fünf weitere Kapitel. Im Folgenden zweiten Kapitel wird ein kurzer Überblick über die FKM-Richtlinie, deren Entstehung und Bestandteile gegeben. Während in Kap. 3 die wichtigsten Grundlagen und Hintergründe zu den Themen Spannungsermittlung, Festigkeitskennwerte, Lastannahme und Festigkeitsnachweise diskutiert werden, widmet sich das vierte Kapitel der eigentlichen Anwendung der FKM-Richtlinie. Dort werden die Algorithmen und Berechnungsschritte anhand eines Beispiels, das vielen Lesern aus dem Studium oder der Grundlagenliteratur bekannt sein wird, dargestellt: eine abgesetzte Welle. Ohne die Hintergründe erneut ausführlich zu erläutern, werden in den dann folgenden Kap. 5 und 6 schließlich zwei weitere Anwendungsfälle detailliert betrachtet.

Alle drei betrachteten Beispiele sind so ausgearbeitet, dass der Leser sie selbst nachrechnen kann. Es ist zu beachten, dass die angegebenen Zwischenergebnisse auf wenige (häufig eine) Nachkommastelle genau abgedruckt sind. Tatsächlich wurde jedoch mit einer deutlich höheren Genauigkeit weitergerechnet, sodass sich für den Leser beim Nachrechnen einzelner Abschnitte Abweichungen der Ergebnisse in den letzten Stellen der angegebenen Werte ergeben können. Bezüglich der

¹ Für bestimmte Bauteile jedoch, wie z. B. Wellen mit Pressverbänden, bei denen der Pressverband selbst kritisch ist, lässt sich der Nachweis ausschließlich mit Nennspannungen und experimentell ermittelten Kerbwirkungszahlen durchführen. Der Nachweis mit örtlichen Spannungen ist für Oberflächen mit Schubübertragung nicht zugelassen.

² ANSYS ist ein Produkt von ANSYS, Inc.

Spannungsermittlung müssen zum Nachvollziehen Grundkenntnisse im Umgang mit dem FE-Programm ANSYS WB vorhanden sein. Die für das Buch verwendeten FE-Modelle inklusive der Geometrie- und Vernetzungsinformationen kann der Leser über die Homepage des Springer-Verlags herunterladen.

Die in ANSYS WB gezeigten Vorgehensweisen können in den Grundzügen auf beliebige FE-Systeme übertragen werden. Der Leser kann die gezeigten Beispiele daher auch mit anderen FE-Systemen nachvollziehen.

Die Nomenklatur und die verwendeten Symbole sind, sofern vorhanden, aus der FKM-Richtlinie übernommen.

Obwohl das vorliegende Buch sorgfältig erarbeitet wurde, sind inhaltliche Fehler nicht auszuschließen. Zudem beinhaltet das Buch aus didaktischen Gründen nicht alle für einen Festigkeitsnachweis in den Gültigkeitsgrenzen der FKM-Richtlinie benötigten Vorschriften und Gleichungen (diese resultieren aus den o. g. Einschränkungen), weshalb eine Bauteilauslegung nach FKM-Richtlinie allein aufgrund dieses Buches nicht empfohlen wird – hierzu ist einzig die FKM-Richtlinie selbst heranzuziehen. Die Verfasser haften daher nicht für fehlerhaft ausgelegte Bauteile und daraus resultierende Schäden.

Insbesondere wird an dieser Stelle auch auf den Haftungsausschluss der FKM-Richtlinie selbst hingewiesen, [Renn 12]:

„Diese Richtlinie entspricht dem Stand der Technik. Sie wurde mit der erforderlichen Sorgfalt erarbeitet. Der Anwender hat zu entscheiden, ob die Richtlinie für seine Zwecke geeignet ist. Ihre Anwendung hat mit der erforderlichen Sorgfalt zu geschehen. Der Verlag, das Forschungskuratorium Maschinenbau e. V. als Herausgeber, die Verfasser und die beteiligten Fachleute erklären hiermit den Ausschluss jeder Haftung gegenüber dem Käufer oder irgend einer anderen natürlichen oder juristischen Person für Verluste oder Schäden, die direkt oder indirekt durch die Anwendung dieser Richtlinie verursacht oder angeblich verursacht sind.“

Literatur

- [Haib 06] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 3. Aufl. Springer, Berlin (2006) doi:[10.1007/3-540-29364-7](https://doi.org/10.1007/3-540-29364-7)
- [Rada 07] Radaj, D., Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure, 3. Aufl. Springer, Berlin (2007) doi:[10.1007/978-3-540-71459-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71459-0)
- [Renn 12] Rennert, R., Kullig, E., Vormwald, M., Esderts, A., Siegele, D.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (2012)
- [Sand 08] Sander, M.: Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen. Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage. Springer, Berlin (2008) doi:[10.1007/978-3-540-77733-5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77733-5)

2.1 Entstehung und Weiterentwicklung

Teile der heutigen FKM-Richtlinie reichen bis in die 1960iger Jahre zurück. Sie haben ihren Ursprung in DDR-Regelwerken, wie z. B. [IfL 70; IfL 86], welche am Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen (IfL) in Dresden zwischen 1961 und 1990 verfasst wurden. Das IfL hat seine Wurzeln im Flugzeugbau, der nach der Entwicklung des ersten strahlgetriebenen Verkehrsflugzeug Deutschlands eingestellt wurde. Später sind die zuvor erarbeiteten Berechnungsvorschriften in zahlreiche TGL-Standards überführt wurden (Technische Güte- und Lieferbedingungen, siehe z. B. TGL 19330, 19340, 19341, 19350). „Diese Normen hatten sich in der metallverarbeitenden Industrie der ostdeutschen Länder bewährt und waren mangels vergleichbarer Unterlagen auch in den alten Bundesländern bekannt geworden“, [Häne 94a]. Als Grundlage für die FKM-Richtlinie dienten aber noch weitere Regelwerke wie z. B. VDI 2226, DIN 18800, Eurocode 3 oder die IIW-Empfehlungen.

Kurz nach der Wiedervereinigung wurden die TGL-Standards als erhaltenswert angesehen. Beim Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) wurde daher im Arbeitskreis Bauteilfestigkeit ein Forschungsprojekt mit dem Ziel, ein durchgängiges Regelwerk für den rechnerischen Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile zu entwickeln, gestartet. Die daraus entstandene FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ ist in ihrer ersten Auflage im Jahre 1994 fertiggestellt worden, [Häne 94a]. Sie wurde in der 1. Auflage zusammen mit einem umfangreichen Kommentarband veröffentlicht, [Häne 94b].

Die FKM-Richtlinie wird regelmäßig weiterentwickelt und um neueste Erkenntnisse entsprechend dem Stand der Technik ergänzt. Nach der unveränderten 2. Auflage folgten 1998 mit der 3. Auflage inhaltliche und formale Änderungen. Neben einer Neugliederung mit den heute noch verwendeten vier Hauptabschnitten

(Kapitel 1 bis 4) wurden u. a. zusätzliche Stahl- und Gussorten eingeführt sowie der Nachweis von Schweißverbindungen grundlegend überarbeitet, [Häne 98]. In der 4. Auflage wurden Festigkeitsnachweise für Aluminiumknet- und Gusswerkstoffe ergänzt, [Häne 02]. Eine deutsche und inhaltlich identische englische Ausgabe gab es erstmals 2003 mit der 5. Auflage der Richtlinie, [Häne 03a; Häne 03b]. Derzeit liegt die 2012 erschienene und in allen Kapiteln vollständig überarbeitete 6. Auflage vor, [Renn 12]. Weitere Details der Änderungshistorie können den Vorworten der einzelnen Auflagen entnommen werden.

Die FKM-Richtlinie hat sich in zahlreichen Branchen zu einem Quasistandard bei der Auslegung von Maschinenbauteilen entwickelt – insbesondere, wenn keine anderen Regelwerke für die Auslegung existieren. Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, die sich mit Festigkeitsnachweisen basierend auf einem linear-elastischen Materialmodell befasst, ist nicht die einzige Richtlinie, die vom FKM herausgegeben wird, auch wenn sie häufig als „die FKM-Richtlinie“ verstanden wird. Neben ihr existiert auch die Richtlinie „Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis“, [Berg 09].

2.2 Anwendungsbereich

Mit der aktuellen, 6. Auflage der FKM-Richtlinie können Bauteile ausgelegt werden, die folgende Anforderungen erfüllen:

- Bauteile aus Stahl, Eisenguss- oder Aluminiumwerkstoffen
- Temperaturen zwischen -40 und 500 °C
- Geschweißte oder nicht geschweißte Bauteile
- Versagensort: Oberfläche¹

Der Festigkeitsnachweis in der FKM-Richtlinie ist in einen Statischen und einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis unterteilt. Für Bauteile, die lediglich statischen Lasten ausgesetzt sind, muss nur der Statische Festigkeitsnachweis erbracht werden. Für Bauteile, die schwingenden Belastungen unterworfen sind, müssen hingegen beide Festigkeitsnachweise erfüllt werden, um die Bauteile sowohl gegen Schwing- als auch gegen Gewaltbruch bzw. plastischen Kollaps auszulegen.

Die Festigkeitsnachweise (Statisch als auch Ermüdungsfestigkeit) können mithilfe von Nennspannungen als auch mit örtlichen Spannungen durchgeführt wer-

¹ Mit Ausnahme des Sonderfalls „randschichtverfestigtes Bauteil“, für den die FKM-Richtlinie mit **Kapitel 5.5** auch den Nachweis für einen Punkt unterhalb der Bauteiloberfläche zulässt.

den. Beide Spannungsarten sind rein elastizitätstheoretisch ermittelt, d. h. es wird ein linearer Zusammenhang zwischen äußerer Belastung und innerer Beanspruchungsgröße unterstellt. Nennspannungen können nur bei stab- oder flächenförmigen Bauteilen definiert werden. Die für einen Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen (Normalspannung σ und Schubspannung τ) benötigten Spannungen werden in der Praxis mithilfe von FE-Rechnungen mit linear-elastischem Materialverhalten ermittelt.

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis kann abhängig von der Beanspruchung unterschiedliche Ausprägungen haben, die sich durch die Struktur der FKM-Richtlinie automatisch ergeben:

- Dauerfestigkeitsnachweis
- Zeitfestigkeitsnachweis
- Betriebsfestigkeitsnachweis

Ermüdungsbeanspruchungen können im Festigkeitsnachweis erst ab einer geforderten Lebensdauer von 10^4 Lastwechseln berücksichtigt werden. Dies liegt daran, dass davon ausgegangen wird, dass die Beanspruchungen bei kleineren Lebensdauern starke plastische Anteile enthalten, die dem elastizitätstheoretischen Ansatz widersprechen. Die in der FKM-Richtlinie verwendeten Wöhlerlinien verlieren in diesem Bereich ihre Gültigkeit.

2.3 Aufbau

Die FKM-Richtlinie gliedert sich in 9 Kapitel, zu denen im Folgenden die wichtigsten Inhalte aufgeführt sind:

0. Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Gültigkeits- und Anwendungsgrenzen der FKM-Richtlinie sowie der Berechnungsablauf dargestellt.

1. Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen
2. Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen
3. Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen
4. Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen
5. Anhänge:

Die Anhänge enthalten Eingabeinformationen für die Festigkeitsnachweise sowie Hinweise zu deren Festlegung. Hierzu zählen Tabellen mit Norm-Zugfestigkeiten und Norm-Fließgrenzen, Form- und Kerbwirkungszahl-Diagramme

me, Hinweise zu Verwendung von experimentell ermittelten Festigkeitswerten, Hinweise zur Festlegung von Lastannahmen.

6. Beispiele:

Dieser Abschnitt enthält sechs Anwendungsbeispiele für den Statischen und Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Zwischenergebnissen.

7. Formelzeichen:

Symbolverzeichnis

8. Änderungen:

Dieser Abschnitt enthält eine Auflistung der wesentlichen Änderung in der FKM-Richtlinie in Bezug zu älteren Ausgaben.

Literatur

- [Berg 09] Berger, C., Blauel, J.G., Hodulak, L., Pyttel, B., Varfolomeev, I.: Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis, 3. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (2009)
- [Häne 94a] Hänel, B., Wirthgen, G., Zenner, H., Seeger, T.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Richtlinie. FKM-Vorhaben Nr. 154. FKM-Heft 183-2. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (1994)
- [Häne 94b] Hänel, B., Wirthgen, G., Zenner, H., Seeger, T.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Richtlinie. FKM-Vorhaben Nr. 154. FKM-Heft 183-1. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (1994)
- [Häne 98] Hänel, B., Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 3. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (1998)
- [Häne 02] Hänel, B., Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffe, 4. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (2002)
- [Häne 03a] Hänel, B., Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffe, 5. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (2003)
- [Häne 03b] Hänel, B., Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: Analytical strength assessment of components made of steel, cast iron and aluminum materials in mechanical engineering. FKM Guideline, 5. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (2003)
- [IfL 70] Institut für Leichtbau: E – Festigkeit. Leichtbau. Konstruktions- und Berechnungsunterlagen, Bd. 3. Institut für Leichtbau, Dresden (1970)
- [IfL 86] Institut für Leichtbau: Festigkeitsberechnung: Ermüdungsfestigkeit, Bruchmechanik, 1. Aufl. Leichtbau-Handbuch, Bd. 4/2. Institut für Leichtbau, Dresden (1986)
- [Renn 12] Rennert, R., Kullig, E., Vormwald, M., Esderts, A., Siegele, D.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6. Aufl. VDMA-Verlag, Frankfurt am Main (2012)