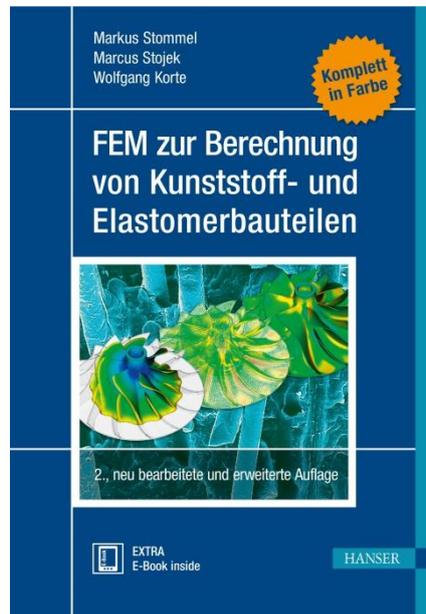


HANSER



Leseprobe

zu

FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen

Markus Stommel
Marcus Stojek
Wolfgang Korte

ISBN (Buch): 978-3-446-44714-1

ISBN (E-Book): 978-3-446-45283-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorwort	XI
2. Auflage	XI
1. Auflage	XIII
Die Autoren	XV
1 Einleitung und Übersicht	1
Literatur zu Kapitel 1	4
TEIL A: Werkstoffverhalten, Materialmodellierung und Bewertung	5
2 Mechanisches Werkstoffverhalten und -modellierung	7
2.1 Grundbegriffe der Mechanik	7
2.2 Charakteristische mechanische Werkstoffeigenschaften	28
2.2.1 Thermoplaste	29
2.2.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	39
2.2.3 Elastomere	40
2.2.4 Duroplaste	44
2.2.5 Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip	44
2.3 Modellierung des Werkstoffverhaltens	49
2.3.1 Thermoplaste	50
2.3.1.1 Materialmodelle für Kurzzeit-Belastung	51
2.3.1.2 Materialmodelle für Langzeit-Belastung	63
2.3.1.3 Materialmodelle für dynamische Belastung	73
2.3.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	74
2.3.2.1 Grundlagen zur Mikromechanik	76
2.3.2.2 Elastische Materialmodelle	82
2.3.3 Elastomere und TPE	90
2.3.3.1 Materialmodelle für Kurzzeit-Belastung	90

2.3.3.2	Materialmodelle für langzeitige und dynamische Belastung	94
2.3.3.3	Materialmodelle für die Kompressibilität	95
2.3.4	Duroplaste	97
2.4	Bestimmung von Materialparametern	101
2.4.1	Elastische Materialmodelle	102
2.4.2	Hyperelastische Materialmodelle	113
2.4.3	Elasto-plastische Materialmodelle	123
2.4.4	Kriechmodelle	130
2.4.5	Viskoelastische Materialmodelle	135
	Literatur zu Kapitel 2	142
3	Dimensionierung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen	145
3.1	Statische Festigkeit	148
3.1.1	Ermittlung von statischen Festigkeitskennwerten	149
3.1.2	Bewertung mehraxialer Beanspruchungen und Versagen	160
3.1.2.1	Spannungsbezogene Versagenshypothesen	165
3.1.2.2	Dehnungsbezogene Versagenshypothesen	170
3.1.3	Einflussfaktoren auf die Bauteilfestigkeit	174
3.1.3.1	Phänomenologisches Verhalten beim Versagen des Werkstoffs	176
3.1.3.2	Einfluss von Beanspruchungsgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte	176
3.1.3.3	Einfluss von Bauteilkonstruktion und Lastsituation	178
3.1.3.4	Einfluss der Fertigung	179
3.1.4	Ansätze zur Bemessung thermoplastischer Kunststoffbauteile ..	182
3.1.4.1	Werkstoffmechanik des Versagens von Thermoplasten ..	183
3.1.4.2	Bemessung gegen eine zulässige Dehnung	187
3.1.4.3	Bemessung gegen eine zulässige Spannung	188
3.1.4.4	Bemessung auf Basis von Spannungs-/Dehnungs-Kurven	191
3.1.4.5	Bemessung gegen eine zulässige spezifische Arbeitsaufnahme	196
3.1.4.6	Bemessung gegen eine zulässige plastische Vergleichsdehnung	196
3.1.5	Vergleich der Bemessungsansätze	197
3.1.5.1	Bemessungsgrenze und Bauteil-Beanspruchung	200
3.1.5.2	Spannungs- und dehnungsbasierte Vorgehensweise	203
3.2	Ermüdungsfestigkeit	203
3.2.1	Ermittlung von zyklischen Festigkeitskennwerten	205

3.2.2	Konstruktions- und fertigungsbedingte Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	213
3.2.2.1	Einfluss des Spannungsgradienten auf die Ermüdungsfestigkeit	214
3.3	Dimensionierung kurzfaserverstärkter Thermoplaste	219
3.3.1	Verhalten beim Versagen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten	221
3.3.2	Ermittlung von Dimensionierungskennwerten für kurzfaserverstärkte Thermoplaste	223
3.3.3	Versagenshypothesen für kurzfaserverstärkte Kunststoffe	228
3.3.4	Ermüdungsfestigkeit kurzfaserverstärkter Kunststoffe	235
3.3.4.1	Ermittlung von zyklischen Festigkeitskennwerten	235
3.3.4.2	Master-Wöhlerkurven Konzept	236
3.3.4.3	Interpolation von Wöhlerkurven	238
3.3.4.4	Wöhlerkurven-Ermittlung auf Basis mikromechanischer Ansätze	239
3.3.4.5	Lokales Wöhlerkurven-Konzept	241
3.4	Streuungen	244
	Literatur zu Kapitel 3	248
4	Dimensionierung von Elastomerbauteilen	253
4.1	Abschätzung der Belastbarkeit mittels Formänderungsenergiegedichte und Formänderungsbetrag	255
4.2	Praktische Auslegungsregeln	256
4.3	Auswertung von FEM-Ergebnissen bei großen Deformationen	258
4.4	Methode der „Crack-Energy-Density“ (CED)	260
	Literatur zu Kapitel 4	262
5	Prozesssimulation und Prozess-Struktur-Kopplung	265
5.1	Der Spritzgießprozess	266
5.2	Beschreibung von Strömungsvorgängen	270
5.2.1	Berechnung der Faserorientierungen	280
5.3	Modellierungsansätze für die Prozesssimulation	285
5.4	Prozess-Struktur-Kopplung	289
5.4.1	Ergebnisse für die Struktursimulation	293
	Literatur zu Kapitel 5	302

TEIL B: Vorschlag für einen vereinfachten Festigkeitsnachweis ...	305
6 Vereinfachte Vorgehensweise zum Festigkeitsnachweis thermoplastischer Kunststoffbauteile	307
6.1 Verwendete Konzepte beim vereinfachten Festigkeitsnachweis	308
6.1.1 Ermittlung der Bemessungsgrenze	308
6.1.2 Bauteilfestigkeit, Auslastungsgrad und Tragfähigkeit	310
6.1.2.1 Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit	310
6.1.2.2 Auslastungsgrad	311
6.1.2.3 Bauteiltragfähigkeit	316
6.1.3 Auswahl der Versagenshypothese und Berücksichtigung von Mehraxialität	322
6.1.4 Grenzspannungsamplitude und Näherungskonstruktion des Haigh-Diagramms	328
6.1.5 Mehraxialität bei zyklischer Beanspruchung	330
6.1.6 Kerbspannungskorrektur-Verfahren	340
6.2 Vorschlag für einen vereinfachten statischen Festigkeitsnachweis	342
6.2.1 Ermittlung der Spannungskennwerte	343
6.2.2 Ermittlung der lokalen Bauteilfestigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung	344
6.2.2.1 Erfassung des Temperatureinflusses auf die Bauteilfestigkeit	349
6.2.3 Ermittlung der lokalen Bauteilfestigkeit bei langzeitiger Beanspruchung	351
6.2.4 Ermittlung des statischen Auslastungsgrads	355
6.2.5 Tragfähigkeitsnachweis	359
6.3 Vorschlag für einen vereinfachten Ermüdungsfestigkeitsnachweis	359
6.3.1 Ermittlung der Spannungskennwerte	362
6.3.2 Nachweis gegen die Grenzspannungsamplitude	362
6.3.3 Erfassung des Mittelspannungseinflusses	364
6.3.4 Nachweis gegen eine Zeitfestigkeit	369
6.3.5 Ermittlung des zyklischen Auslastungsgrads	373
Literatur zu Kapitel 6	375
TEIL C: Einführung in die FEM	377
7 Prinzip der FEM	379
7.1 Grundlegende Vorgehensweise	381
7.2 Systemgleichungen und Gleichungslösung	389
7.3 Formfunktionen	398

7.4	Integrationspunkte	407
7.5	Nichtlineare Problemstellungen	410
7.6	Implizite und Explizite Solver	416
7.7	Elementtypen	420
7.7.1	Elementeigenschaften	420
7.7.2	Kontinuumselemente	428
7.7.3	Strukturelemente	430
7.7.4	Sonstige Elemente	434
7.8	Schwingungssimulation	436
7.8.1	Lösung von Schwingungsproblemen in der FEM	437
7.8.2	Definition des FE-Modells	440
7.8.3	Ergebnisse von Schwingungssimulationen	444
	Literatur zu Kapitel 7	449
8	FEM im Entwicklungsprozess	451
8.1	Planung	451
8.1.1	Ergebnisdefinition	453
8.1.2	Eingangsdaten, Datenquellen	456
8.2	Modellerstellung	457
8.2.1	Modellierungskonzept	457
8.2.2	Vernetzung	461
8.2.3	Randbedingungen	467
8.2.3.1	Kontaktprobleme	471
8.3	Lösungsverfahren	474
8.3.1	Lineare und nicht-lineare Probleme	474
8.3.2	Implizite und explizite Solver	474
8.4	Validierung	476
8.5	Auswertung und Dokumentation	479
8.5.1	Formale Anforderungen an einen Bericht	484
8.5.2	Prozesssicherheit	484
	Index	487

Vorwort

■ 2. Auflage

Die Autoren freuen sich über die äußerst positive Aufnahme der 1. Auflage des vorliegenden Buchs, das im Jahr 2011 in dieser Form erstmalig veröffentlicht wurde. Da nun diese 1. Auflage nahezu vergriffen ist und auch viele neue Erkenntnisse innerhalb den behandelten Themengebieten gesammelt wurden, ist eine neue Auflage erforderlich geworden.

Der Bereich der sogenannten integrativen Simulation, also der Kopplung von Prozesssimulation und nachfolgender Struktursimulation hat in den vergangenen Jahren einen deutlichen Aufschwung erlebt. Dies gilt sowohl hinsichtlich neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, softwaretechnischer Möglichkeiten, als auch im Hinblick auf die öffentliche Wahrnehmung der Bedeutung dieser Thematik. Folglich ist der Bereich der Materialmodellierung und Festigkeitsbewertung spritzgeossener kurzfaserverstärkter Bauteile in dieser Auflage erweitert und auf den aktuellen Stand der Technik gebracht worden. Es wurden hierbei insbesondere auch neue Ansätze der Mikromechanik zur Beschreibung dieser Werkstoffe im elastischen und elasto-plastischen Bereich ergänzt und ein Abschnitt zur Spritzgießsimulation im Hinblick auf die zur Ausbildung der Mikrostruktur verantwortlichen Strömungsvorgänge ergänzt. Des Weiteren wird detaillierter dargestellt, wie eine Kopplung von Spritzgießsimulation und Struktursimulation methodisch erfolgen kann.

Eine umfassende Überarbeitung und Ergänzung hat das Kapitel der Dimensionierung bzw. der Festigkeitsbewertung von thermoplastischen Kunststoffen erfahren. Die Wahrnehmung der Autoren ist, dass es hierzu sowohl in der Theorie als auch in der Praxis einer eindeutigen Vorgehensweise ermangelt. Eine allgemeingültige Richtlinie zur Festigkeitsbewertung von Kunststoffen ist bislang nicht veröffentlicht. Vor diesem Hintergrund machen die Autoren aus der eigenen praktischen Erfahrung heraus einen Vorschlag, wie in der Praxis ein Festigkeitsnachweis von thermoplastischen Bauteilen erfolgen kann. Es wird eine strukturierte Vorgehens-

weise im Sinne einer „best practice“ vorgestellt. Diese umfasst sowohl den statischen Festigkeitsnachweis, als auch den Ermüdungsfestigkeitsnachweis. Da in der Praxis vielfach sinnvolle Bemessungsgrenzen für die unterschiedlichen Beanspruchungssituationen und Werkstoffklassen fehlen, liegt ein Augenmerk hierbei auch auf dem Bereich der Abschätzung von Bemessungsgrenzen. Dies gilt sowohl für statische als auch für zyklische Festigkeitskennwerte. Ebenso werden die in der Praxis zur Anwendung kommenden Dimensionierungsmethoden vorgestellt und hinsichtlich der ihnen zugrundeliegenden Konzepte eingeordnet. Im Bereich der Dimensionierung von Elastomeren, womit vornehmlich die Betriebsfestigkeitsbewertung gemeint ist, wurden ebenfalls neuere Ansätze ergänzt.

Der Charakter des Buches, dem Leser ein praktisches Nachschlagewerk an die Hand zu geben, ist zur 1. Auflage unverändert. Auf theoretische Darlegungen wird zu Gunsten von praktischen Vorgehensweisen soweit wie möglich verzichtet. Der Leser soll in die Lage versetzt werden, Probleme aus der Praxis eigenständig, methodisch nachvollziehbar und werkstoffgerecht zu lösen.

Der Dank der Autoren gilt auch in der 2. Auflage denen, die zum Buch beigetragen haben mit Bauteil- und Bilddaten, Unterlagen, Hinweisen, Zeichenarbeiten und Lesen der Korrekturen.

Bergisch Gladbach/Dortmund, im August 2017

Marcus Stojek

Markus Stommel

Wolfgang Korte

■ 1. Auflage

Die Idee für dieses Buch geht zurück auf das Jahr 1998, als eine erste Veröffentlichung der Autoren unter ähnlichem Titel in Form einer temporär verfügbaren Sonderpublikation erschien. Damals waren die Autoren noch Mitarbeiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, das unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Michaeli auch die Herausgeberschaft übernahm. Danach war für viele Jahre eine elektronische Version des Buches im Internet frei verfügbar.

Die Rückmeldungen der Leser auf diese erste Publikation haben die Autoren ermutigt, nach nunmehr über zehn Jahren zu gleicher Thematik ein neues Buch in erheblich verbesserter Ausstattung zu veröffentlichen. Dabei kann das nun vorliegende Werk nur in dem Sinne als Neuauflage verstanden werden, dass die Thematik die gleiche geblieben ist. Die Entwicklungen im Bereich der FEM, neue wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich der Werkstoffmechanik der Kunststoffe und Elastomere und eigene Erfahrungen der Autoren haben eine umfassende inhaltliche Neuausrichtung und Erweiterung erforderlich gemacht. Die Grundidee ist jedoch geblieben, nämlich dem Praktiker ein verständliches Buch an die Hand zu geben, das versucht, komplexe Zusammenhänge in verständlicher Sprache darzustellen. Hierbei wird zu Gunsten der Darstellung der Gesamthematik auf eine umfassende Erläuterung theoretischer Hintergründe bei einzelnen Thematiken verzichtet. Das Buch beschränkt sich hier bewusst nach dem Grundsatz: So einfach wie möglich, so komplex wie nötig. Dem Praktiker sollen Konzepte vorgestellt werden, die er mit dem ihm zur Verfügung stehenden „Bordmitteln“ anwenden kann. Nicht die Darstellung des wissenschaftlich Wünschenswerten oder des technisch Möglichen war für die Autoren hierbei der Maßstab, sondern das, was unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit der Mittel in Form von Geld, Zeit, Soft- und Hardware und letztendlich auch Qualifikation im jeweiligen betrieblichen Umfeld umsetzbar ist. Die Autoren sind sich bewusst, dass hierbei die Gefahr des übermäßigen Simplifizierens besteht. Aus wissenschaftlicher Sicht werden manche Zusammenhänge sicherlich nicht erschöpfend behandelt, und manche Daumenregeln entstammen eher der praktischen Erfahrung und weniger aus Theorien. Hier gilt dann das Zitat: „Alle Modelle sind falsch, aber manche sind nützlich.“ (George E.P. Box, Statistiker). Auf der anderen Seite gilt auch: „Nichts ist so praktisch wie eine gute Theorie.“ (Kurt Lewin, Psychologe). In diesem Sinne wurde – wo immer es zum Verständnis sinnvoll erschien – erläutert, aus welchen theoretischen Modellvorstellungen sich die dargestellten Vorgehensweisen ableiten.

Das Buch richtet sich gleichermaßen an den operativ tätigen Berechnungsingenieur, den Konstrukteur, der konstruktionsbegleitend Simulationen durchführt, den CAE-Manager und alle, die das mechanische Verhalten von Kunststoff- und

Elastomerbauteilen bewerten müssen. Das Buch richtet sich dementsprechend nicht primär an den Werkstoffwissenschaftler, der sich über den neuesten Stand der Forschung in seinem Spezialgebiet informieren möchte.

Gemäß dem Anspruch des Buches, ein praktisches Handbuch zu sein und nicht die Ergebnisse eigener wissenschaftlicher Untersuchungen darzustellen, wurden aus einer Vielzahl von Quellen Erkenntnisse zusammengetragen. Häufig ist es dabei schwierig, den originären Autor einer Idee ausfindig zu machen bzw. jede einzelne Quelle im Nachhinein zu rekonstruieren. Sollten also in dem ein oder anderen Fall die Urheber der dargestellten Ansätze nicht oder unzureichend zitiert worden sein, so erheben die Autoren schon jetzt nicht den Anspruch darauf, sich diese zu eigen zu machen. Die wichtigsten Quellen sind jeweils am Ende der Kapitel aufgeführt.

Der Dank der Autoren gebührt vor allem denen, die zum Buch beigetragen haben mit Bauteil- und Bilddaten, Unterlagen, Hinweisen, Zeichenarbeiten und Lesen der Korrekturen.

Bergisch Gladbach/Saarbrücken, im Mai 2011

Marcus Stojek

Markus Stommel

Wolfgang Korte

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel

Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel wurde 1968 in Aachen geboren. Er absolvierte sein Studium zum Diplom-Ingenieur für Maschinenbau an der RWTH Aachen mit der Vertiefung in Kunststofftechnik. Im Anschluss war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und später Abteilungsleiter am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.e.h. W. Michaeli. Er promovierte in dieser Zeit an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen. 1999 gründete er mit den beiden Mitautoren die *PART Engineering GmbH*. Das Ingenieurunternehmen beschäftigt sich mit der technischen Simulation und der Entwicklung von Software. 2006 übernahm er die Professur „Konstruktion und Kunststofftechnik“ an der HAW Hamburg und leitete dort das kunststofftechnische Laboratorium. 2007 nahm Prof. Markus Stommel den Ruf auf den Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken an. Nach seinem Wechsel an die TU Dortmund, leitet er dort seit April 2014 den Lehrstuhl für Kunststofftechnologie an der Fakultät für Maschinenbau. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Konstruktion und Verarbeitung von Kunststoffbauteilen sowie Kunststoff-Verbundbauteilen. Weitere Forschungsaktivitäten beschäftigen sich mit der Entwicklung von Prüf- und Simulationsmethoden für Kunststoffe, insbesondere kurz- und endlosfaserverstärkte Kunststoffe.



Dr. Marcus Stojek

Dr. Marcus Stojek ist 1965 in Köln geboren. Er studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen und wählte als Fachrichtung die Kunststoffverarbeitung. Nach dem Studium promovierte er am Institut für Kunststoffverarbeitung unter Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. W. Michaeli zum Thema der automatischen Optimierung von Kunststoffbauteilen. Er ist einer der Gründer und Gesellschafter der *PART Engineering GmbH* und dort bis heute als Geschäftsführer tätig. Er betreut die Struktursimulation im gesamten Anwendungsspektrum von polymeren Werkstoffen und beschäftigt sich mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Berechnungs- und Bewertungsmethoden in diesem Umfeld. Aus dieser Tätigkeit entstand unter anderem die Software *Converse* als eines der ersten Werkzeuge zur Berücksichtigung von Faserorientierungen in der Struktursimulation.



Er leitet Seminare und In-house Schulungen im Umfeld der technischen Berechnung von Kunststoffbauteilen und ist Mitglied einer Reihe von projektbegleitenden Ausschüssen unterschiedlicher Forschungsvorhaben.

Dr. Wolfgang Korte

Dr. Wolfgang Korte wurde 1965 in Köln geboren und hat an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen Maschinenbau mit Fachrichtung Kunststofftechnik studiert. Nach seiner Promotion 1996 bei Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. W. Michaeli, leitete er am Institut für Kunststoffverarbeitung die Abteilung Formteilauslegung und Werkstofftechnik. Im Jahr 1999, nach seiner akademischen Tätigkeit, gründete er gemeinsam mit den Mitautoren dieses Buchs das Ingenieurunternehmen *PART Engineering GmbH* in Bergisch Gladbach. Neben der Geschäftsführung des Unternehmens beschäftigt er sich seit dem mit Fragestellungen der technischen Simulation sowie der Entwicklung von Software in diesem Bereich. Die FEM-Analyse und Bewertung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen gehört dabei zu seiner Expertise.



Er ist Referent bei zahlreichen Vortragsveranstaltungen, Leiter von Fortbildungsseminaren und pflegt weiterhin einen engen fachlichen Austausch mit Forschungseinrichtungen.

1

Einleitung und Übersicht

Kunststoffe haben sich als Konstruktionswerkstoffe für technisch anspruchsvolle Anwendungen etabliert. Als ein prominentes Beispiel für den umfassenden Einsatz von Kunststoffen kann die Automobilindustrie genannt werden: In einem Neuwagen wurden im Jahr 2014 15% des Gewichts in Form von Kunststoffen verbaut, wobei eine jährliche Zunahme von 1,8% vorliegt [CHE14]. Die zunehmende Elektromobilität wird diesen Trend zusätzlich beflügeln. Auch aus vielen anderen Bereichen, wie z. B. bei den Konsumgütern, den Haushaltswaren und weiteren, nahezu unzähligen technischen Gebrauchsprodukten sind Kunststoffe seit vielen Jahrzehnten nicht mehr wegzudenken. Dabei sind Kunststoffe schon seit langem nicht mehr nur preiswerter Ersatz für metallische Werkstoffe, sondern erfüllen aufgrund ihres spezifischen Eigenschaftsspektrums wichtige funktionelle und konstruktive Anforderungen, wie z. B. Leichtbau, Korrosionsbeständigkeit oder weitestgehend freie Formgebungsmöglichkeiten. Auf eine noch längere Historie des industriellen Einsatzes können Elastomere zurückblicken: Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde das erste Auto mit Gummiluftreifen ausgestattet [SPI03]. Umso erstaunlicher ist es, dass bis zum heutigen Tag für beide Werkstoffgruppen keine verbindlichen allgemeingültigen Regelwerke oder zumindest Richtlinien für die rechnerische Auslegung der Bauteile vorliegen. Für Kunststoffe ist der Stand der Technik noch nicht so weit entwickelt, wie bei metallischen Werkstoffen, für die einige bekannte Regelwerke (z. B. FKM-Richtlinie, ASME-Code, AD-Merkblätter) existieren. Zwar gibt es im Bereich der Materialmodellierung und des Versagensverhaltens von Kunststoffen und Elastomeren zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen, eine strukturierte Aufbereitung und für den Berechnungsingenieur unmittelbar anwendbare Darstellung des bereits vorhandenen Wissens fehlt.

Wenn heute von rechnerischer Auslegung gesprochen wird, ist meist die Simulation des mechanischen Bauteilverhaltens mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) gemeint. Aufgrund der offensichtlichen Vorteile des Verfahrens ist es aus der Produktentwicklung nicht mehr wegzudenken. Während noch vor einigen Jahrzehnten die FEM als ein mehr oder weniger kompaktes Fachgebiet erschien, so hat sie sich zwischenzeitlich in eine Vielzahl von Unterdisziplinen aufgeteilt, die

ihrerseits wiederum nur von Spezialisten mit entsprechender Spezial-Software beherrscht werden. So gibt es heute Berechnungsspezialisten, die sich beispielsweise jeweils ausschließlich mit Optimierungsverfahren, Ermüdungsfestigkeit, Crash-Berechnung, Motorberechnung, Schwingungssimulation, Kopplung von MKS und FEM, Prozess-Struktur-Kopplung etc. beschäftigen und die Aufzählung ließe sich noch erheblich erweitern. Zusätzlich zur oben angesprochenen Struktursimulation gibt es weitere Berechnungsfachgebiete, die ihrerseits wiederum Unterdisziplinen ausgebildet haben, wie die Strömungssimulation (CFD), die Prozesssimulation, die Mehrkörpersimulation (MKS), die Akustiksimulation etc.

Hand in Hand mit der Weiterentwicklung der Anwendungsmöglichkeiten der FEM verbesserte sich auch die Handhabbarkeit der entsprechenden Programme. So sind heute eine Vielzahl von FEM-Programmen auf dem Markt erhältlich, mit denen sich nach verhältnismäßig kurzer Einarbeitungszeit zumindest einfache Problemstellungen berechnen lassen. Nach der Konstruktion eines beliebigen Bauteils in einem 3D-CAD-Programm kann automatisiert ein FE-Netz erzeugt und die entsprechenden Last- und Randbedingungen definiert werden. In manchen Fällen gibt ein auf diese Weise erzeugtes Modell das reale Bauteilverhalten jedoch nur schlecht wieder. Die Anwendung der FEM verlangt trotz grafischer Benutzeroberflächen ein nicht unerhebliches Maß an Verständnis für das der Berechnungsmethode zugrunde liegende Prinzip sowie für die grundlegenden Zusammenhänge der Mechanik.

Gerade weil die FEM heute ein Standardwerkzeug in der Produktentwicklung geworden ist, wird ein solches Grundverständnis dabei nicht nur vom Anwender von Simulationssoftware verlangt, sondern auch von all denen, die sich mit den Ergebnissen von FEM-Simulationen auseinandersetzen müssen. In viele Entscheidungsprozesse in der Produktentwicklung fließen Simulationsergebnisse ein, die es erforderlich machen, dass die Entscheidungsträger die gelieferten Ergebnisse kritisch hinterfragen und damit deren Zuverlässigkeit beurteilen.

Vielfach verbreitet ist die Ansicht, dass Kunststoffe und Elastomere rechnerisch gänzlich anders zu behandeln seien als metallische Werkstoffe. Diese Ansicht ist nur teilweise gerechtfertigt. Die grundlegenden Gleichungen der Kontinuumsmechanik gelten zunächst unabhängig vom betrachteten Werkstoff. Effekte wie plastische Deformationen, Verfestigung, Anisotropie und Viskoelastizität sind nicht nur bei Kunststoffen, sondern auch bei Metallen bekannt und dort auch durch Materialmodelle beschrieben. Kunststoffe besitzen natürlich im Bereich üblicher Anwendungstemperaturen im Vergleich zu Metallen geringere Steifigkeiten, und plastische Deformationen treten bereits bei vergleichsweise geringen Beanspruchungen auf, so dass zur Beschreibung des Verformungs- und Beanspruchungsverhaltens von Kunststoffen nicht selten werkstoffliche und geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden müssen. Die bei Metallen häufig übliche Vorgehensweise, die Beanspruchungen unter Annahme elastischen Werkstoffverhaltens am unver-

formten Bauteil zu berechnen, ist dann nicht mehr anwendbar. Neben der Beschreibung des Verformungs- und Beanspruchungszustands eines Bauteils ist letztendlich die Beschreibung des Versagensverhaltens von Bedeutung. Hierzu existieren aus dem Bereich der Metalle und auch der lang- und endlosfaserverstärkten Kunststoffe eine Vielzahl von Versagenshypothesen, die je nach erwarteter Versagensart (spröde oder zäh) auch für Kunststoffe verwendet werden, wenn man die spezifische Versagenscharakteristik des betrachteten Kunststoffes berücksichtigt. Was sicherlich nicht von den metallischen Werkstoffen übernommen werden kann, sind die Bemessungsgrenzen, also die Art und Höhe der Beanspruchung, wann ein werkstoffliches Versagen zu erwarten ist. Aufgrund ihrer polymeren Struktur verhalten sich hier Kunststoffe und Elastomere anders als Metalle.

Auch bei alleiniger Beschränkung auf die Struktursimulation von Kunststoffen und Elastomeren kann das hier vorliegende Buch nur einen Überblick geben und dabei auf die Besonderheiten dieser Werkstoffe eingehen. Ziel dieses Buches ist es, in kompakter und verständlicher Form eine Übersicht über bereits vorhandene Ansätze zu liefern, die sich als sinnvoll und praktikabel erwiesen haben. Die Entscheidung, die hier angebotenen Vorgehensweisen für die jeweilige spezifische Problematik zu verwenden, bleibt aber letztlich dem verantwortlichen Berechnungsingenieur überlassen.

Buchteil A: Werkstoffverhalten, Materialmodellierung und Bewertung

Der Teil A des Buches umfasst die Kapitel 2 bis 5.

In Kapitel 2 wird das Materialverhalten von polymeren Werkstoffen beschrieben. Es wird hierbei auf die Effekte im Werkstoffverhalten fokussiert, die für die Berechnung polymerer Bauteile über die FEM von Bedeutung sind. Daran anschließend werden die verschiedenen Materialmodelle vorgestellt, mit denen in der FEM das Verformungs- und Beanspruchungsverhalten von Kunststoffen bzw. Elastomeren beschrieben wird. Es wird auf die Abstimmung dieser Modelle für die verschiedenen Werkstoffe eingegangen. Des Weiteren wird die Ermittlung der dazu jeweils erforderlichen Materialparameter mittels Werkstoffprüfungen diskutiert.

Kapitel 3 stellt dann den Zusammenhang zwischen den in der FEM-Simulation berechneten Beanspruchungsgrößen und dem Versagensverhalten des untersuchten Bauteils her. Diese Inhalte sind die wesentliche Grundlage für die Dimensionierung von Kunststoffbauteilen. Es werden dazu unterschiedliche Dimensionierungsansätze für thermoplastische Kunststoffe und insbesondere auch kurzfaserverstärkte Kunststoffe behandelt.

Kapitel 4 beschreibt Ansätze zur Dimensionierung von Elastomerbauteilen. Aufgrund der werkstoffspezifischen Besonderheiten dieser Werkstoffgruppe erfolgt die Darstellung in einem gesonderten Kapitel.

Das Kapitel 5 greift die für technische Anwendungen besonders relevanten kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteile auf. Aufgrund der Orientierung der Kurzfasern durch die Schmelzebewegungen im Spritzgießprozess entsteht hier der Werkstoff mit seinen Eigenschaften erst bei der Verarbeitung. Dies bedingt eine enge Kopplung der Prozess- und Struktursimulation. Kapitel 5 beschreibt diese Kopplung, welche auch als integrative Simulation bezeichnet wird und in den letzten Jahren eine stark gewachsene Bedeutung erhalten hat.

Buchteil B: Vorschlag für einen vereinfachten Festigkeitsnachweis

Im Teil *B* des Buches, bestehend aus Kapitel 6, wird dem Leser ein Vorschlag vorgestellt, wie thermoplastische Kunststoffbauteile anwendungs- und kunststoffgerecht auf Basis von FEM-Ergebnissen dimensioniert werden können. Mit diesem Vorschlag wird angestrebt die Lücke, die durch fehlende Richtlinien zur Dimensionierung von Kunststoffbauteilen derzeit existiert, zu schließen.

Buchteil C: Einführung in die FEM

Der dritte Teil *C* des Buches umfasst Kapitel 7 und 8. Dieser Teil ist nicht auf den Werkstoff ausgerichtet, sondern auf die Methode der FEM.

In Kapitel 7 werden die grundlegenden Prinzipien der Finite-Elemente-Methode erläutert und die wesentlichen Begrifflichkeiten vorgestellt. Es wird unter anderem diskutiert, wie ein FE-Modell in ein Gleichungssystem überführt wird, was Iterationen sind und was in diesem Zusammenhang die Konvergenz bedeutet. Elementtypen und Randbedingungen werden dabei ebenfalls diskutiert.

Kapitel 8 gibt eine kurze Einführung in den operativen Ablauf einer FE-Analyse. Es ist in dieser Form ausdrücklich nicht an den Berechnungsingenieur gerichtet, sondern soll vielmehr den anderen am Entwicklungsprozess beteiligten Partnern einen Einblick in die Arbeit und die Probleme der Berechnungsabteilung ermöglichen. Daher sind Modellerstellung, Definition der Randbedingungen, Auswertung, Validierung und Dokumentation Themen dieses Kapitels.

Literatur zu Kapitel 1

- [CHE14] N.N.; Auto-Trends: Kunststoffeinsatz im Fahrzeugbau steigt weiter CHEManager, 15-16/2014; online unter <http://www.chemanager-online.com/>, 15.8.2014.
- [SPI03] N.N.; Gib' Gummi Reifen-Historie, Teil 1 <http://www.spiegel.de>, 2003.

TEIL A

**Werkstoffverhalten,
Materialmodellierung und Bewertung**

2

Mechanisches Werkstoffverhalten und -modellierung

Dieses Kapitel behandelt wesentliche Aspekte des mechanischen Verhaltens von Kunststoffen, die für die Struktursimulation Bedeutung haben. Im Folgenden werden daher sowohl Thermoplaste und Elastomere als auch faserverstärkte Thermoplaste behandelt. Nach einer kurzen Erläuterung wichtiger Grundbegriffe der Mechanik werden anhand eines vereinfachten Modells der molekularen Struktur von polymeren Werkstoffen die Vorgänge erläutert, die zu dem zeit- und temperaturabhängigen mechanischen Verhalten dieser Werkstoffgruppe führen. Anschließend werden die verschiedenen Möglichkeiten diskutiert, das mechanische Verhalten durch mathematische Gleichungen, den Materialgesetzen bzw. -modellen in der FEM zu erfassen und zu beschreiben. Besondere Beachtung findet dabei die Bestimmung der Materialparameter, die in den Materialmodellen enthalten sind. Die Darstellungen beschränken sich ausschließlich auf solche Modelle, die in industriell eingesetzten FEM-Programmen üblicherweise vorhanden sind.

■ 2.1 Grundbegriffe der Mechanik

Spannung

Die Mechanik definiert als ein Maß für die Werkstoffbeanspruchung die „Spannung“, die aus dem Quotienten aus Kraft F und Fläche A gebildet wird, auf welche die Kraft wirkt:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Die Spannung ist damit eine flächenbezogene Last, welche den Werkstoff beansprucht. Die Spannung besitzt, genau wie die Kraft, auch einen Betrag und eine Richtungsinformation und ist in einem Koordinatensystem definiert. Um den Spannungszustand an einer bestimmten Stelle eines belasteten Körpers zu beschreiben,

betrachtet man ein infinitesimal kleines Element des Werkstoffes und formuliert die an den Elementflächen wirkenden Spannungen (Bild 2.1). Die senkrecht auf den Flächen stehenden Spannungen werden dabei als Normalspannungen (Symbol σ), die zu den Flächen parallel-gerichteten als Schubspannungen (Symbol τ) bezeichnet. Für ein würfelförmiges Element sind damit bei sechs Flächen und jeweils drei Spannungskomponenten insgesamt 18 Zahlenwerte erforderlich, um den Spannungszustand zu definieren.

Aus dem Kräftegleichgewicht für das Element folgt, dass die jeweils gegenüberliegenden Spannungskomponenten entgegengesetzt ausgerichtet und von gleichem Betrag sein müssen. Damit reduzieren sich die erforderlichen Angaben auf neun Werte. Zusammengefasst in einer Matrix beschreiben diese neun Spannungskomponenten an jedem Punkt eines Körpers den jeweils herrschenden Spannungszustand [GHSW55].

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

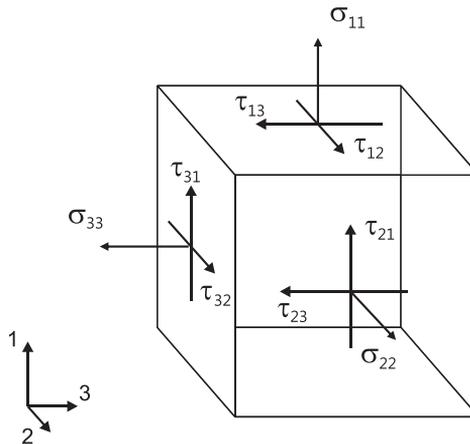


Bild 2.1 Mehraxialer Spannungszustand, Komponenten des Spannungstensors

Diese Matrix wird als Spannungstensor bezeichnet. Der erste Index jeder der Komponenten gibt dabei die Richtung der zugehörigen Flächennormalen an, der zweite Index die Richtung der Spannungskomponente. Aus dem Momentengleichgewicht für das betrachtete Element folgt, dass die auf eine gemeinsame Kante des Elementes weisenden Schubspannungen jeweils betragsgleich sein müssen. Der Spannungszustand kann dadurch mittels sechs Komponenten vollständig beschrieben werden [BET97]:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Die Eigenschaften des Spannungstensors werden im Folgenden an einem Beispiel weiter diskutiert: Das Bild 2.2 zeigt einen Zugstab mit der Querschnittsfläche A , der durch eine äußere Kraft F in Längsrichtung belastet wird. Für die weiteren Überlegungen wird angenommen, dass die Kraft gleichmäßig vom Stabquerschnitt aufgenommen wird. In Bild 2.2 a) ist ein aus dem Zugstab freigeschnittenes Element dargestellt. Um die Komponenten des Spannungstensors direkt ablesen zu können, ist das Element am Koordinatensystem ausgerichtet. An diesem Element wirkt ausschließlich eine Normalspannung in die 1-Richtung des Koordinatensystems. Der Spannungstensor ergibt sich somit zu:

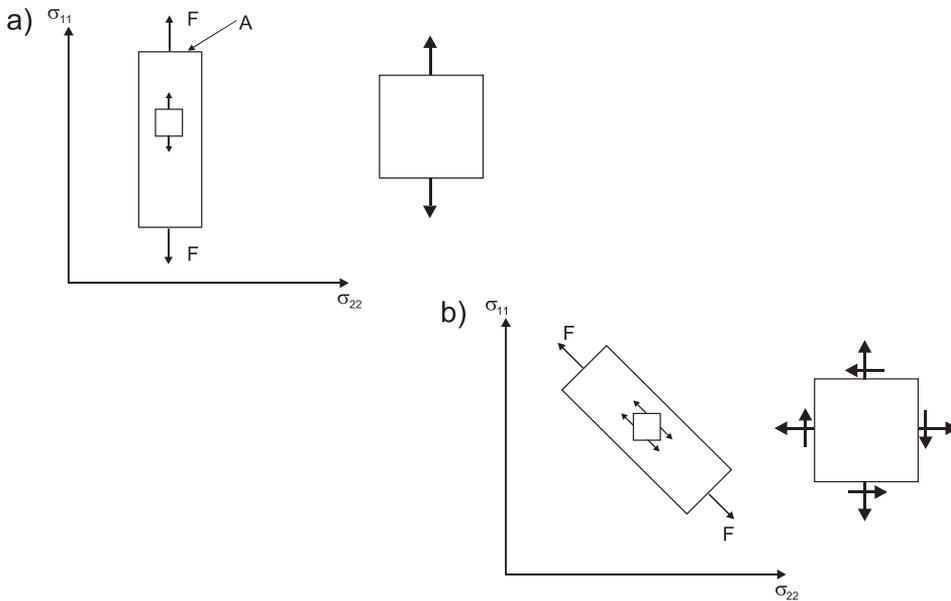


Bild 2.2 Spannungskomponenten in verschiedenen Koordinatensystemen

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Der Zugstab wird nun (einschließlich der Last) um 45° um die z -Achse gedreht. Für den Zugstab ändert sich der Spannungszustand dadurch natürlich nicht. Wiederum wird ein Element in dem jetzt gedrehten Zugstab betrachtet, das am Koordinatensystem ausgerichtet ist (Bild 2.2 b)). Die an den Elementflächen übertragene Kräfte müssen auch hier in Richtung der äußeren Kraft weisen. Die Zerlegung im gewählten Koordinatensystem ergibt somit an den Elementflächen sowohl Normal- als auch Schubspannungen. Der Spannungstensor ergibt sich damit zu:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Eine weitere Drehung des Zugstabes um die x - und/oder y -Koordinatenachsen würde zu einem Spannungstensor führen, in dem alle Komponenten ungleich null sind. Die Komponenten des Spannungstensors sind daher abhängig von der Wahl des Koordinatensystems. Ein und derselbe Spannungszustand führt in verschiedenen Koordinatensystemen somit zu unterschiedlichen Darstellungen des Spannungstensors. Wesentlich ist dabei, dass sich nur die Darstellung ändert, nicht aber der durch den Spannungstensor beschriebene Spannungszustand und die damit verknüpfte Werkstoffbeanspruchung.

Anmerkung zum Tensorbegriff

Da der Begriff des Tensors sowohl im weiteren Verlauf dieses Buches als auch bei der Auswertung von FEM-Ergebnissen von großer Bedeutung ist, soll er hier noch einmal an einem Beispiel erläutert werden. Bild 2.3 zeigt auf der linken Seite einen Quader mit den Kantenlängen 10/20/50. Er ist in einem Koordinatensystem so positioniert, dass eine Ecke im Ursprung liegt und die Kanten parallel zu den Achsen liegen. Auf diese Weise lässt sich der Quader eindeutig beschreiben, indem die Koordinaten der drei Eckpunkte auf den Achsen angegeben werden, bzw. in vektorieller Darstellung, die drei Kantenvektoren.

In einer Matrix zusammengefasst sieht der linke Quader dann so aus:

$$L = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

3

Dimensionierung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Dimensionierung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen dargestellt. Dabei liegt der Fokus zunächst auf isotropen Kunststoffen, die Dimensionierung kurzfaserverstärkter Kunststoffe wird gesondert in Abschnitt 3.3 erläutert. Unter Dimensionierung, die auch als Bemessung oder Auslegung bezeichnet wird, wird hierbei das Festlegen von Maßen für Wandbereiche oder Funktionselemente unter mechanischen Gesichtspunkten verstanden. Auf die fertigungsgerechte Auslegung wird daher nicht eingegangen.

In Kapitel 2 wurde dargestellt, wie unter Verwendung geeigneter Materialmodelle mittels FEM aus den gegebenen äußeren Belastungen die im Bauteil vorliegenden inneren Beanspruchungen berechnet werden. Diese Beanspruchungen sind dann maßgeblich zur Bewertung eines möglichen werkstofflichen Versagenseintritts.

Einerseits muss geprüft werden, inwieweit die mit der FEM berechneten Beanspruchungen kritisch hinsichtlich eines werkstofflichen Versagens sind. Andererseits bedeutet eine lokale irreversible Schädigung des Werkstoffs nichts zwangsläufig das mechanische Versagen des betrachteten Bauteilquerschnitts. Das Bauteil kann auch bei irreversibler Schädigung weiterhin eine ausreichende Tragfähigkeit unter den gegebenen Lasten aufweisen. Die Überprüfung des Eintritts eines werkstofflichen Versagens wird im Folgenden als „Festigkeitsnachweis“ bezeichnet, die Überprüfung der Tragfähigkeit des Bauteils als „Tragfähigkeitsnachweis“. Im Rahmen der Dimensionierung muss mindestens ein Festigkeitsnachweis durchgeführt werden, um Maße von Querschnitten und Funktionselementen so festlegen zu können, dass ein werkstoffliches Versagen vermieden wird. Gegebenenfalls muss die Werkstoffauswahl oder auch das konstruktive Konzept überdacht werden, falls die Dimensionierungsrechnung zu dem Ergebnis kommt, dass durch alleinige maßliche Modifikationen das Bauteil nicht beanspruchungsgerecht gestaltet werden kann. Die Dimensionierung ist somit ein übergeordneter iterativer Prozess (Bild 3.1).

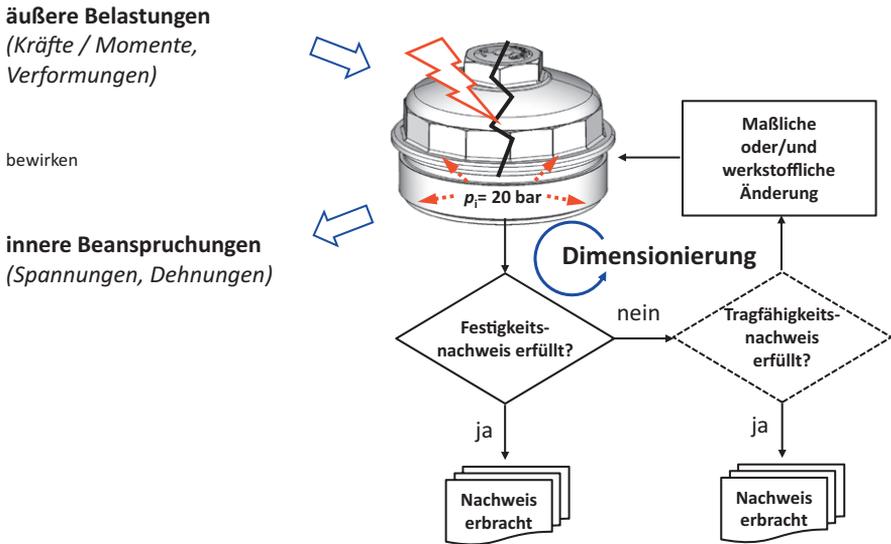


Bild 3.1 Belastungen, Beanspruchungen und Dimensionierung

Innerhalb dieses Kapitels wird nachfolgend nur noch auf den Festigkeitsnachweis eingegangen. Auf den Tragfähigkeitsnachweis wird in Kapitel 6 eingegangen. Hier wird also erläutert, wie festgestellt werden kann, ob die mit der FEM berechneten Bauteilbeanspruchungen den zulässigen Bemessungsgrenzen genügen. Dabei wird immer ein statischer Festigkeitsnachweis durchgeführt. Insofern zyklische Beanspruchungen vorliegen, ist zusätzlich ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis erforderlich, dieser wird in Abschnitt 3.2 dargestellt. Die grundsätzliche Vorgehensweise des Festigkeitsnachweises von Kunststoffbauteilen, wie sie auch klassischerweise aus dem Bereich der metallischen Werkstoffe bekannt ist, ist in Bild 3.2 exemplarisch dargestellt.

Die FEM wird dazu benutzt, die lokalen Beanspruchungen im Bauteil zu berechnen. Hierzu ist ein Materialmodell erforderlich, das auf Basis von Messungen kalibriert wird (siehe Kapitel 2). Aus den berechneten mehraxialen Beanspruchungszuständen wird mittels einer geeigneten sogenannten Versagenshypothese eine Vergleichsgröße berechnet. Diese Vergleichsgröße wird dann mit einem gemessenen oder aus Tabellen entnommenen Dimensionierungs- oder Bemessungskennwert verglichen. Ein werkstoffliches Versagen wird in der FEM also in der Regel nicht dadurch festgestellt, dass das analysierte Bauteil in der Simulation reißt, obwohl es zwischenzeitlich Modellierungsansätze gibt, die dies abbilden können. Die mittels FEM berechnete Vergleichsgröße muss zum Nachweis der werkstofflichen Funktion des Bauteils kleiner oder gleich dem Bemessungskennwert sein. Der Festigkeitsnachweis ist also ein Prozess, der *nach* der Durchführung der FEM-Simulation erfolgt und zum Ziel hat, die mit der FEM berechneten Beanspruchungsgrößen hinsichtlich eines werkstofflichen Versagens zu bewerten.

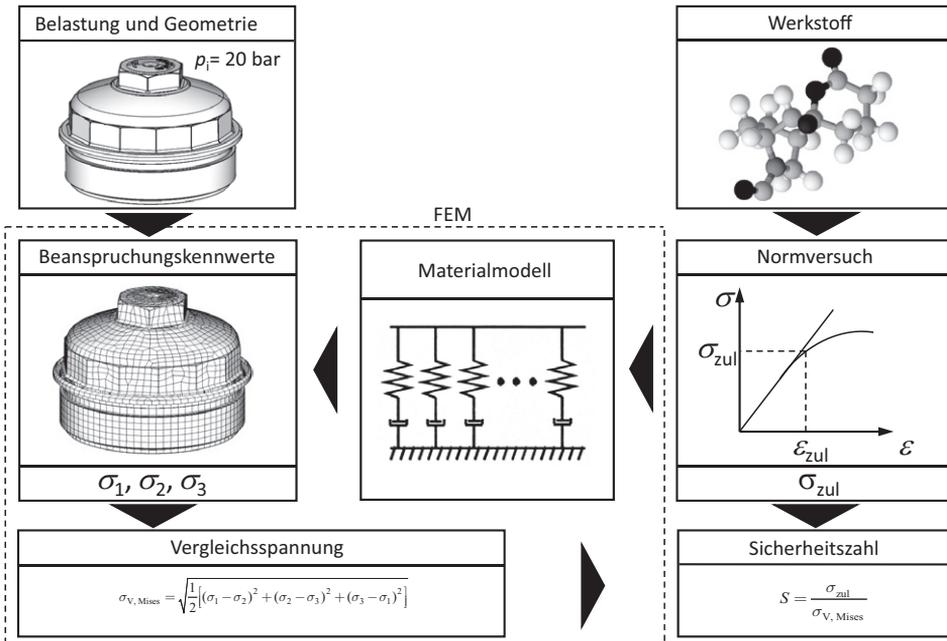


Bild 3.2 Festigkeitsnachweis eines Bauteils (exemplarisch)

Unter dem Festigkeitsnachweis wird hierbei die Klärung der Frage verstanden, ob die im Bauteil vorliegende Beanspruchung eine für die Beanspruchungsart und für diesen Werkstofftyp als zulässig erachtete Bemessungsgrenze über- oder unterschreitet.

Im Folgenden werden die grundlegenden Zusammenhänge im Rahmen der Festigkeitsbewertung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen dargestellt. Zunächst erfolgt eine Erläuterung hinsichtlich der statischen Festigkeit, danach hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit. Es werden jeweils die verschiedenen charakteristischen Werkstoffkennwerte zur Festigkeitsbewertung (Bemessungskennwerte), die damit verknüpften Prüfverfahren sowie Bemessungsansätze und Versagenshypothesen vorgestellt. Die Besonderheiten bei der Festigkeitsbewertung von spritzgegossenen, kurzfaserverstärkten Kunststoffen werden dabei jeweils getrennt behandelt.

Eine *vereinfachte* Vorgehensweise zur Durchführung eines statischen Festigkeitsnachweises und eines Ermüdungsfestigkeitsnachweises wird in Kapitel 6 beschrieben.

■ 3.1 Statische Festigkeit

Als statisch werden hierbei alle Beanspruchungen definiert, die nicht zyklisch, schwingend wirken. Dies sind also Beanspruchungen die aus kurzzeitigen einmaligen Lasten sowie aus langfristig wirkenden Lasten resultieren. Hierunter werden auch kurzzeitig stoßartige Lasten verstanden.

Maßgeblich zur Einordnung in den Bereich des statischen Nachweises ist somit nicht die Lastaufbringungsrate bzw. die daraus resultierende Dehnrage, sondern die Tatsache, dass beim statischen Nachweis eine Überprüfung des Versagenseintritts infolge einer extremalen Beanspruchung erfolgt, die zu einem Überschreiten der Tragfähigkeit eines betrachteten kritischen Querschnitts führt. Dabei erfolgt der Versagenseintritt spontan durch Gewaltbruch bei einmaliger kurzzeitiger quasi-statischer und stoßartiger Beanspruchung oder durch langzeitiges Ausfließen infolge Kriechen. Maßgeblich sind die extremen Maximal- und Minimalbeanspruchungen eines im Allgemeinen veränderlichen Beanspruchungsverlaufs entsprechend dem jeweiligen ungünstigsten Betriebszustand. Die Beanspruchungskennwerte müssen mindestens den extremen Werten des zeitlich veränderlichen Beanspruchungsverlaufs entsprechen. Sie können aber auch durch Einbeziehung von Sonderlasten höhere Werte annehmen (Bild 3.3).

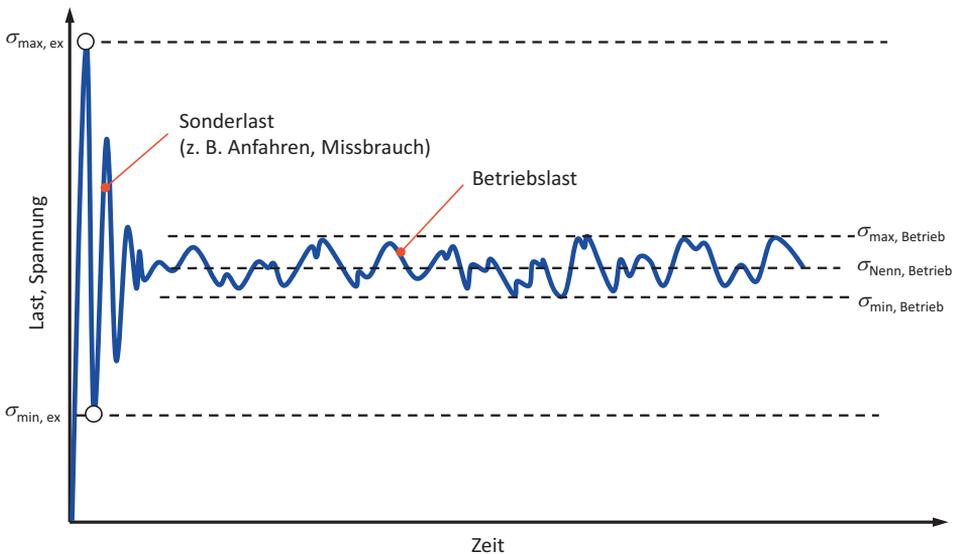


Bild 3.3 Beanspruchungskennwerte für statischen Nachweis und Ermüdungsfestigkeitsnachweis

4

Dimensionierung von Elastomerbauteilen

Die bisher vorgestellten Dimensionierungsverfahren gelten für Thermoplaste. Bei Elastomerbauteilen müssen in der Regel andere Ansätze verwendet werden. Die Werkstoffstruktur der Elastomere erlaubt es im Allgemeinen nicht, dass die Dimensionierungsansätze von anderen Thermoplasten übertragen werden, da sich die Mechanismen beim Werkstoffversagen unterscheiden.

Grundsätzlich ist bei Elastomeren, wie auch bei Kunststoffen, zuerst die Beanspruchungsart nach quasistatischer oder dynamisch/zyklischer Beanspruchung zu unterscheiden. Bei quasistatischer Beanspruchung wird das schlagartige Versagen des Elastomerwerkstoffes bei Erreichen einer versagenskritischen Beanspruchungshöhe bewertet. Im Rahmen der Dimensionierung ist zu entscheiden, ob das Elastomerbauteil unter maximaler Belastung einen ausreichenden Abstand der Werkstoffbeanspruchung zur Versagensgrenze aufweist. Elastomerwerkstoffe weisen allerdings sehr hohe Bruchdehnungen unter quasistatischen Lasten auf, wohingegen die auftretenden Werkstoffbeanspruchungen unter den Betriebslasten meist weit unterhalb dieser Versagensgrenzen liegen. Beispielsweise weist Naturkautschuk durchaus Bruchdehnungen von 600% und höher auf. Im technischen Einsatzfall treten aber maximale Dehnungen von selten mehr als 100% auf. Die Dimensionierung gegen die quasistatischen Versagensgrenzen ist in praxisüblichen Anwendungsfällen daher häufig nicht relevant. Bei der Dimensionierung von Elastomerbauteilen steht vielmehr meistens eine Bewertung der ertragbaren Lastzyklenzahl bei einer dynamisch/zyklischen Beanspruchung im Vordergrund. Es nimmt demnach die Dimensionierung gegenüber einer Werkstoffermüdung und damit verknüpft die Vorhersage der Betriebsfestigkeit des Bauteils eine zentrale Rolle im Dimensionierungsprozess eines Elastomerbauteils ein.

Zur Vorhersage des Ermüdungsverhaltens sind die Phasen der Rissbildung und des anschließenden Risswachstums zu unterscheiden. Ansätze zur Rissbildung betrachten bei Elastomeren die Richtung maximaler Werkstoffbeanspruchung, wobei der Riss senkrecht zu deren Richtung verläuft. Die Aussagen bezüglich des Versagens sind somit von der Art und Richtung der Beanspruchung abhängig und es können nicht ohne weiteres Rückschlüsse aus uniaxialen Daten auf mehraxiale

Beanspruchungszustände gezogen werden. Neben den Hauptdehnungen werden in der Literatur seltener oktaedrische Schubdehnungen sowie maximale Hauptspannungen betrachtet [MAF2006] [MAF2005-b]. Die genaue Bestimmung letzterer ist allerdings schwierig. Als weiteres Kriterium wird die Formänderungsenergiegedichte angeführt. Im nachfolgenden Abschnitt „Abschätzung der Belastbarkeit mittels Formänderungsenergiegedichte und Formänderungsbetrag“ werden diese Kriterien vorgestellt.

Demgegenüber stehen die Ansätze zum Risswachstum, welche davon ausgehen, dass Risskeime aufgrund äußerer Belastungen bereits zu einer Rissbildung führten. Als Bemessungsgröße wird hier eine Energiefreisetzungsrate verwendet, deren Basis die Bruchmechanik ist [LAL65]. Sie stellt die Energieänderung bezogen auf die Flächenänderung eines Risses, als Umwandlung von potentieller Energie in Oberflächenenergie beim Risswachstum, dar. Es werden dadurch die Formänderungsenergiegedichte um die Risspitze und die Energiefreisetzungsrate in Beziehung gesetzt. Die Energiefreisetzungsrate kann für Elastomerbauteile mit dem in FEM-Programmen berechenbaren, sogenannten J-Integral in Bezug gesetzt werden [HAM98]. Hierdurch kann prinzipiell die Vergrößerung eines Anrisses pro Lastzyklus berechnet werden. Dennoch hat diese Berechnungsmethode für die Praxis häufig eine nur sehr begrenzte Aussagekraft, da zur Bestimmung der Form und der Position des Ausgangsrisses die Bruchmechanik nicht geeignet ist [ALS2009]. Ferner liegt im Bauteil dann bereits ein makroskopischer Anriss vor, der ggf. aufgrund der Bauteilanforderungen bereits nicht mehr tolerabel ist.

In der Literatur werden verschiedene Erweiterungen der bruchmechanischen Konzepte vorgeschlagen, die sich insbesondere mit multiaxial belasteten Elastomerbauteilen und deren Lebensdauervorhersage befassen. Ein Vorteil dieser Konzepte ist die Anwendbarkeit sowohl für die Rissbildung als auch das Risswachstum. Sainnier et al. [SCP2006] [ASV2010] führen das Prinzip der kritischen Ebene ein. Hierbei wird ausgenutzt, dass die Projektion eines Tensors auf eine Ebene einen Vektor darstellt (engl.: traction vector). Dadurch kann der über einen Tensor beschriebene mehraxiale Beanspruchungszustand in eine, vektorielle und damit uniaxiale Beanspruchung umgerechnet werden. Die kritische Ebene entspricht der Ebene, in der die größte Beanspruchung auftritt. Eine weitere Methode ist der von Verron entwickelte „configurational mechanics approach“ (CMA-Ansatz) [ASV2010] [VEA2008] [VCG2006] [VAC2009]. Die Formulierung über den Eshelby-Tensor lässt Aussagen über die Veränderung eines Risses oder Defekts zu und beschreibt Kräfte an elastischen Singularitäten und Defekten. Neben dieser Methode entwickeln Mars und Fatemi [MAF2005] [MAF2006-c] das Kriterium der Rissenergiegedichte, die sogenannte „critical energy density“ (CED-Ansatz). Dieser Ansatz beschreibt den Anteil der Formänderungsenergiegedichte, der das Wachstum von mikroskopischen Rissen in einer kritischen Ebene beschreibt. Sowohl das CMA als auch das CED-Verfahren wurden z.B. in [SIM2014] hinsichtlich ihrer prakti-

schen Umsetzbarkeit für einen Betriebsfestigkeitsnachweis von Elastomerbauteilen untersucht. Die CED wird im Abschnitt 4.4 „Methode der „Crack-Energy-Density“ (CED)“ weitergehend erläutert, da sie zwischenzeitlich für die praktische Anwendung Bedeutung erlangt hat.

■ 4.1 Abschätzung der Belastbarkeit mittels Formänderungsenergiegedichte und Formänderungsbetrag

Die Formänderungsenergiegedichte und der Formänderungsbetrag haben sich als einfach anzuwendende und oftmals ausreichend aussagekräftige Kriterien zur abschätzenden Bewertung mehraxialer Beanspruchungszustände hinsichtlich des Versagens von Elastomeren erwiesen. Die Formänderungsenergiegedichte wird über Gleichung (3.2) berechnet. Der Formänderungsbetrag folgt aus der Beziehung:

$$F_V = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} = \sqrt{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}} \quad (4.1)$$

mit:

F_V : Formänderungsbetrag

$\varepsilon_{1,2,3}$: Hauptdehnungen

Den Dimensionierungskennwert für die Formänderungsenergiegedichte, der auch schon bei der Dimensionierung bei Stoßbeanspruchung vorgestellt wurde, erhält man beispielsweise aus einem uniaxialen Zugversuch mit Gleichung (3.2) als die Fläche unter der Spannungs-/Dehnungs-Kurve bis zum Versagenspunkt.

Der Dimensionierungskennwert für den maximalen Formänderungsbetrag folgt ebenfalls aus der Werkstoffprüfung eines Probekörpers. Hierzu wird die Dehnung zum Versagenszeitpunkt bestimmt, aus der dann über Gleichung (4.1) der maximale Formänderungsbetrag bestimmt werden kann. Hierbei sind aufgrund der hohen Dehnungen wahre Dehnungswerte ε_w vorzuziehen:

$$\varepsilon_w = \ln \lambda = \ln(\varepsilon_t + 1) \quad (4.2)$$

mit:

λ : Verstreckgrad

ε_t : technische Dehnung

Der Formänderungsbetrag kann anschaulich als ein Maß für die Verstreckung der Makromolekülketten aufgrund der vorliegenden Beanspruchung interpretiert werden. Erreicht diese Verstreckung einen kritischen Wert, so zerreißt die Polymer-

TEIL B

**Vorschlag für einen
vereinfachten Festigkeitsnachweis**

6

Vereinfachte Vorgehensweise zum Festigkeitsnachweis thermoplastischer Kunststoffbauteile

In Kapitel 3 wurden die Grundlagen der Dimensionierung von thermoplastischen Bauteilen dargestellt. Insbesondere wurden verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Bemessungsgrenze erläutert. In diesem Kapitel wird nun ein Vorschlag für eine vereinfachte Vorgehensweise des Festigkeitsnachweises von thermoplastischen Bauteilen gemacht, sowohl hinsichtlich der statischen Festigkeit als auch hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit. Dieser Vorschlag stellt die bisher beschriebenen und weitere, noch zu erläuternde, Verfahren zur Dimensionierung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen in einen gesamtheitlichen, systematischen Rahmen. Dies soll die strukturierte Bearbeitung der Dimensionierungsaufgabe erleichtern.

Der in diesem Kapitel beschriebene Vorschlag einer vereinfachten Vorgehensweise zum Festigkeitsnachweis thermoplastischer Kunststoffbauteile ist aus der Notwendigkeit heraus entstanden, die Bewertung von FEM-Berechnungsergebnissen auf eine algorithmische, personenunabhängige Basis zu stellen. Die Vorgehensweise liefert nach Erfahrung der Autoren in der praktischen Anwendung plausible Ergebnisse. An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Vorschlag bislang noch nicht in methodischer Weise umfassend experimentell abgesichert wurde. Veröffentlichte Belege zu einer solchen Absicherung existieren somit zurzeit noch nicht. Insofern ist der Festigkeitsnachweis als vorläufig zu betrachten und mit Vorsicht anzuwenden. Er hat daher bislang abschätzenden Charakter. Sinnvolle Anwendungsbereiche sind also z. B. Machbarkeitsstudien oder Optimierungen in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses.

Unabhängig davon hat eine algorithmische Vorgehensweise jedoch schon als solches einen Nutzen, dieser ist mindestens:

- Vergleichbarkeit der Ergebnisse (personenunabhängig)
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (personenunabhängig)
- eindeutige Kommunikation der Ergebnisse und Bewertungsgrundlagen
- verbesserte Aussagekraft durch Lerngewinne

Nachfolgend wird in Abschnitt 6.2 ein Vorschlag für einen vereinfachten statischen Nachweis vorgestellt und in Abschnitt 6.3 ein Vorschlag für einen vereinfachten Ermüdungsfestigkeitsnachweis. Zunächst werden in Abschnitt 6.1 die im Rahmen dieser Vorschläge verwendeten Konzepte erläutert, die im Grundlagenkapitel 3 noch nicht oder nicht in der erforderlichen Tiefe vorgestellt wurden. Die in Abschnitt 6.1 erläuterten Konzepte fördern das Verständnis zur vorgeschlagenen Vorgehensweise beim vereinfachten Festigkeitsnachweis. Es wird deshalb empfohlen dieses Kapitel zu lesen, bevor in den Abschnitten 6.2 und 6.3 die Nachweisverfahren selber dargelegt werden.

■ 6.1 Verwendete Konzepte beim vereinfachten Festigkeitsnachweis

Der Vorschlag der Autoren für einen vereinfachten Festigkeitsnachweis von thermoplastischen Kunststoffbauteilen basiert auf der Zusammenstellung unterschiedlicher Verfahren und Konzepte, die aus der Literatur bekannt sind. Sie wurden, soweit erforderlich, an die hier vorliegenden spezifischen Gegebenheiten angepasst. Es sind also im Sinne eines „Baukastenprinzips“ als zweckmäßig erscheinende Elemente in strukturierter Form zusammengefügt worden. Dabei sind auch Konzepte verwendet worden, die bisher nur aus dem Bereich der metallischen Werkstoffe bekannt waren, die aber, gemäß der Einschätzung der Autoren, auch sinnvoll für die Anwendung bei Kunststoffen erscheinen. Diese Konzepte werden im Folgenden ebenfalls aufgeführt. Dies erfolgt bewusst innerhalb dieses Kapitels bzw. Buchteils, damit keine Durchmischung von im Zusammenhang mit Kunststoffen bekannten Verfahren (siehe Kapitel 3) und für diese Werkstoffe neuen Verfahren erfolgt. Der Leser kann so entscheiden, ob und in welchem Umfang er diese Verfahren anwenden möchte.

6.1.1 Ermittlung der Bemessungsgrenze

Die hier verwendete Vorgehensweise zur Ermittlung der Bemessungsgrenze basiert auf dem Ansatz der Bemessung auf Basis einer Spannungs-/Dehnungs-Kurve nach Oberbach, wie er bereits in den Abschnitten 3.1.4.4 und 3.1.5 dargestellt und diskutiert wurde. Dieser Ansatz wurde als Basis des Vorschlags verwendet, weil der besondere Charakter des Ansatzes darin besteht, dass er ausschließlich auf den, für viele Werkstoffe verfügbaren, kurzzeitigen isothermen und langzeitigen isochronen Spannungs-/Dehnungs-Kurven aufsetzt. Die Vorgehensweise kann als phänomenologisch betrachtet werden, da sie weniger auf werkstoffmechanisch

quantifizierbaren Werten als vielmehr auf langjähriger Erfahrung basiert. Sie spiegelt also eine erfolgreiche Praxis der Bemessung von Kunststoffbauteilen wieder.

Die hier dargestellte Vorgehensweise hat einige Vorteile. Es ist keine rein schematische Anwendung von tabellierten Abminderungsfaktoren, sondern sie zeigt dem Anwender in anschaulicher Weise, in welchem Bereich des charakteristischen Werkstoffverhaltens (Kapitel 3, Bild 3.20) er sich befindet. Insbesondere wird grafisch deutlich, inwieweit er sich mit den zulässigen Beanspruchungen noch im (linear-)viskoelastischen Bereich befindet oder bereits im (nichtlinear-)viskoplastischen Bereich, in dem mit irreversiblen Werkstoffveränderungen zu rechnen ist (vgl. Kapitel 2). Die Vorgehensweise erlaubt grundsätzlich das Zulassen irreversibler plastischer Verformungen, etwa bei kurzzeitiger einmaliger Beanspruchung von teilkristallinen Werkstoffen. Pragmatische Vorteile des Verfahrens sind die Verfügbarkeit der erforderlichen Werkstoffkennwerte und einfache Handhabbarkeit der Vorgehensweise.

Weil es sich um ein abschätzendes Verfahren handelt, sollte der Anwender keine unangemessene Genauigkeit bei der Darstellung der Berechnungsergebnisse verwenden. Das Verfahren *„... kann immer dann angewendet werden, wenn mit geringer Tragweite für den Versagensfall zu rechnen ist und keine gravierende Änderung der Eigenschaften durch Umwelteinflüsse zu erwarten ist.“* [OBE81].

Der ursprüngliche Ansatz nach Oberbach wurde durch die Autoren bezüglich der eindeutigen Festlegung eines Abminderungsfaktors innerhalb der jeweils zulässigen Bereichsgrenzen modifiziert, Details hierzu werden in Abschnitt 6.2 erläutert. Insbesondere auch die Vorgehensweise zum vereinfachten Ermüdungsfestigkeitsnachweis kann in weiten Teilen als neu betrachtet werden und basiert nur im Sinne der Ermittlung eines Schätzwertes für die Wechselfestigkeit auf dem Ansatz nach Oberbach. Weiterhin wurde der Ansatz in eine formelle Struktur gebracht, die eine Abarbeitung der verschiedenen Arbeitsschritte bis hin zur Berechnung eines Auslastungsgrades erlaubt. Überall dort, wo der ursprüngliche Ansatz durch die Autoren modifiziert oder erweitert wurde, wird darauf hingewiesen.

Das Verfahren der „Bemessung auf Basis von Spannungs-/Dehnungs-Kurven“ (Oberbach-Ansatz), wurde bereits in Abschnitt 3.1.4.4 mit dem dahinter liegenden Konzept prinzipiell vorgestellt. In Abschnitt 6.2 wird die Anwendung des Verfahrens detailliert erläutert. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit, zur Vermeidung von Rücksprüngen innerhalb dieses Buches, wird das Verfahren dort nochmals gesamtheitlich dargestellt, auch wenn dabei partielle Redundanzen zu vorherigen Erläuterungen in Kapitel 3 entstehen.

6.1.2 Bauteilfestigkeit, Auslastungsgrad und Tragfähigkeit

Bisher wurden ausschließlich Aspekte des werkstofflichen Versagens, dargestellt. Die ermittelten zulässigen Beanspruchungsgrenzen bezogen sich auf die Vermeidung nicht zulässiger Beanspruchungen des Werkstoffs. Zur Bewertung der Funktionsfähigkeit eines Bauteils sind diese werkstofflichen Versagensgrenzen jedoch bei statischer Beanspruchung häufig zu konservativ. Besitzt der Werkstoff ein zähes Verhalten, so können häufig lokal plastische Verformungen in Kauf genommen werden. Unter welchen Umständen dies zulässig ist, wird im Rahmen einer Tragfähigkeitsanalyse ermittelt. Ergebnis des Festigkeitsnachweises und des Tragfähigkeitsnachweises ist dann ein sogenannter Auslastungsgrad, der die örtliche Beanspruchung des Bauteils ins Verhältnis setzt zur örtlichen Bauteilfestigkeit. Im Folgenden werden die Konzepte der lokalen Bauteilfestigkeit, der Tragfähigkeit und des Auslastungsgrads zueinander in Beziehung gesetzt und beschrieben.

6.1.2.1 Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit

Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, gibt es Einflussfaktoren auf die Festigkeit eines Bauteils, die an der Werkstoffprobe, die zur Ermittlung der werkstofflichen Festigkeit verwendet wurde, nicht vorliegen. D. h. beim Übergang von der rein werkstofflichen Betrachtungsweise des Versagens, auf das letztendlich interessierende Bauteil, das hinsichtlich seiner Festigkeit bewertet werden soll, sind zusätzliche Einflüsse zu berücksichtigen. Dies sind:

- Spannungsgradienten,
- Mehraxialität,
- Schweiß- und Bindenähte,
- Orientierungen.

Alle oben genannten Einflüsse sind entweder abhängig von der Bauteilgeometrie und der vorliegenden Belastungssituation (Spannungsgradienten, Mehraxialität) oder vom Fertigungsprozess (Schweiß- und Bindenähte, Orientierungen). Charakteristisch ist, dass alle Einflüsse im Bauteil lokal unterschiedlich stark ausgeprägt sind, bzw. vorhanden oder nicht vorhanden sein können. Das heißt aber auch, dass im Bauteil nicht etwa *eine* zulässige Beanspruchungsgrenze existiert, sondern lokal *unterschiedliche* Beanspruchungsgrenzen. Die Berücksichtigung dieses Zusammenhangs erfolgt durch das Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit (Bild 6.1).

Dieses Konzept findet sowohl für statische als auch für zyklische Beanspruchung Anwendung. Mit dem Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit ist der Auslastungsgrad eng verbunden, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

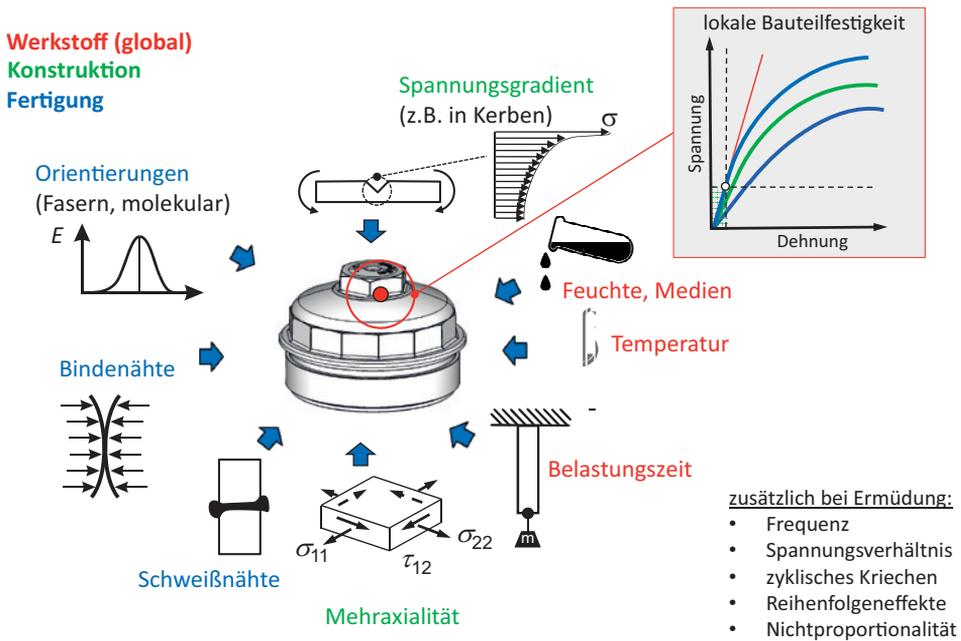


Bild 6.1 Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit

6.1.2.2 Auslastungsgrad

Die alleinige qualitative Aussage ob das Bauteil überbeansprucht ist oder nicht, reicht im Allgemeinen nicht aus. In der Regel will der Ingenieur wissen, wieviel Potenzial des Werkstoffs aufgrund der gegebenen Lastsituation bereits ausgeschöpft wurde. Üblicherweise wird dies als Auslastungsgrad bezeichnet (er entspricht dem Kehrwert des Sicherheitsfaktors). Der Auslastungsgrad ist definiert als der Quotient aus vorliegender Beanspruchung dividiert durch die zulässige Beanspruchung. Für Werte kleiner oder gleich eins ist kein Versagen zu erwarten. Das Zusammenspiel des Auslastungsgrads mit der lokalen Bauteilfestigkeit wird in Bild 6.2 und Bild 6.3 erläutert.

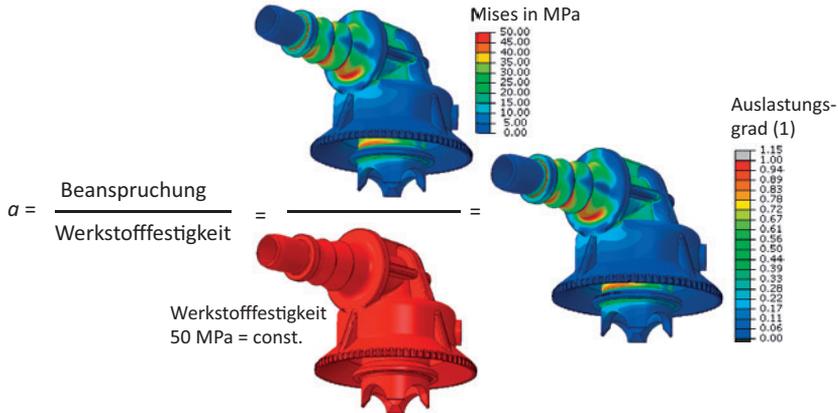


Bild 6.2 Auslastungsgrad als Auswertgröße für das werkstoffliche Versagen

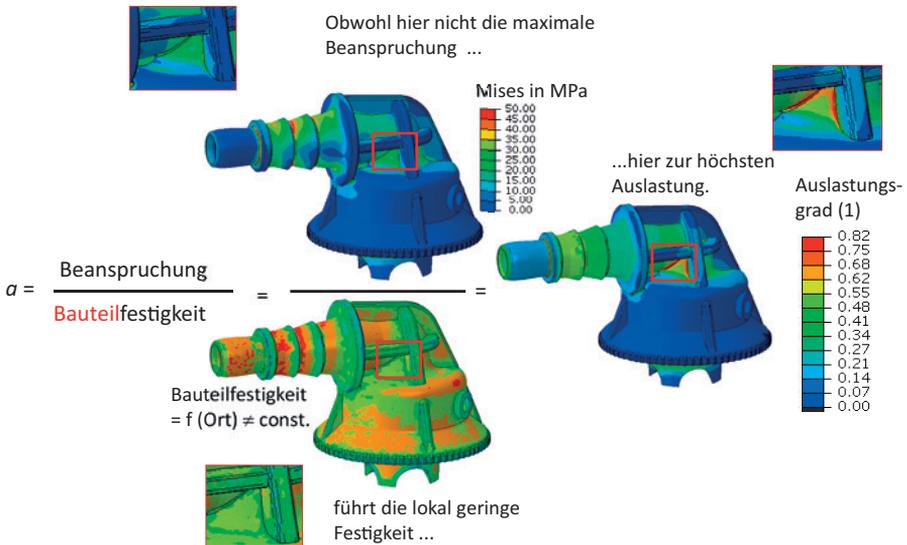


Bild 6.3 Auslastungsgrad als Auswertgröße für das Bauteilversagen

Unter der Annahme einer homogenen Bauteilfestigkeit, die der zulässigen werkstofflichen Beanspruchungsgrenze entspricht, ergibt sich ein Auslastungsgrad, dessen Verteilung äquivalent der Verteilung der Beanspruchung ist. Die örtliche Beanspruchung wird durch eine, für das gesamte Bauteil einheitliche zulässige Werkstofffestigkeit dividiert. Bei komplexen Bauteilen mit Kerben, Bindenähten und, sofern es sich um ein kurzfaserverstärktes Bauteil handelt, auch unterschiedlichen lokalen Faserorientierungen entsteht fälschlicherweise der Eindruck, die versagenskritische Position (höchster Auslastungsgrad) entspräche immer der Position der höchsten Werkstoffbeanspruchung (Bild 6.2). Definiert man nun im Bau-

teil unterschiedliche lokale Bauteilfestigkeiten, so stellt sich die Situation anders dar. Die Position der höchsten Beanspruchung entspricht dann nicht mehr zwangsläufig auch der Position des höchsten Auslastungsgrads. Eine Position mit geringerer Beanspruchung kann zu höheren Auslastungsgraden führen. Dies kann etwa dadurch verursacht sein, dass dort eine Bindenaht liegt, eine Faserorientierung quer zur Richtung der höchsten Beanspruchung ausgerichtet ist, eine hohe Mehraxialität oder ein geringer Spannungsgradient vorliegt. Das heißt in der praktischen Anwendung, dass die Identifikation der versagenskritischen Position nur aufgrund der Interpretation der Beanspruchungsverteilung (Konturdarstellung von Spannungen oder Dehnungen im FEM-Post-Prozessor) irreführend sein kann. Vielmehr ist hier eine zusätzliche örtliche Information erforderlich, wie z. B. die lokale Faserorientierung oder Größen, die sich aus der Beanspruchungssituation selber direkt aus der FEM ergeben (Mehraxialitätsgrad, Spannungsgradient). Die Berücksichtigung des Mehraxialitätsgrads wird an späterer Stelle besprochen, eine praktische Umsetzung im Rahmen des vereinfachten Festigkeitsnachweises wird in Abschnitt 6.2 beschrieben. Der Spannungsgradient wurde bereits in Bezug auf den Ermüdungsfestigkeitsnachweises in Kapitel 3 erläutert und spielt nachfolgend auch noch eine Rolle bei der Bauteiltragfähigkeit in Abschnitt 6.1.2.3.

Bisher wurde der Auslastungsgrad allgemein definiert als Verhältnis von örtlicher im Bauteil vorliegender Beanspruchung zu einer zulässigen lokalen Bauteilbeanspruchungsgrenze. Die Beanspruchung kann nun entweder als Spannung, Dehnung oder auch energiebasiert über die volumenspezifische Energieaufnahme ausgedrückt werden. Damit kann der Auslastungsgrad grundsätzlich auch bezogen auf Spannungen, Dehnungen oder Formänderungsenergiedichte definiert werden:

$$a_{\sigma} = \frac{\sigma_V}{\sigma_{zul}}; \quad a_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_V}{\varepsilon_{zul}}; \quad a_W = \frac{w_V}{w_{zul}} = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma_V d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_{zul}} \sigma d\varepsilon} \quad (6.1)$$

mit:

σ_V : Vergleichsspannung (aus FEM)

σ_{zul} : zulässige Spannung

ε_V : vorliegende Vergleichsdehnung (aus FEM)

ε_{zul} : zulässige Dehnung

w_V : vorliegende (Vergleichs-)Formänderungsenergiedichte (aus FEM)

w_{zul} : zulässige Formänderungsenergiedichte

Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, ist es zur Festlegung eines Beanspruchungszustands im Bauteil bzw. einer zulässigen Beanspruchungsgrenze unerheblich, ob diese als Spannung, Dehnung oder auch volumenspezifische Energieaufnahme

beschrieben wird. Alle Größen beschreiben den identischen Punkt der Werkstoffanstrengung auf der Spannungs-/Dehnungs-Kurve (siehe auch Abschnitt 3.1.5). Bei der Definition des Auslastungsgrads spielt es jedoch eine Rolle, welche der Beanspruchungsgrößen verwendet wird. Dies wird im Folgenden exemplarisch zunächst anhand von spannungs- und dehnungsbasierter Definition beschrieben. Zur Ermittlung des Auslastungsgrads wird auf der Spannungs-/Dehnungs-Kurve nicht nur der Punkt der *vorliegenden* Beanspruchung benötigt, sondern auch ein *zweiter* Punkt der *zulässigen* Beanspruchung. Das heißt der Abstand zwischen beiden Punkten kommt zum Tragen. Während es bei Metallen unerheblich ist, ob dieser Quotient bezogen auf Spannungen oder Dehnungen formuliert wird (aufgrund der Proportionalität im Hooke'schen Bereich), so ist dies bei Kunststoffen bei einem angenommenen nichtlinearen Verhalten der Spannungs-/Dehnungs-Kurve ein mitunter deutlicher Unterschied (Bild 6.4, links).

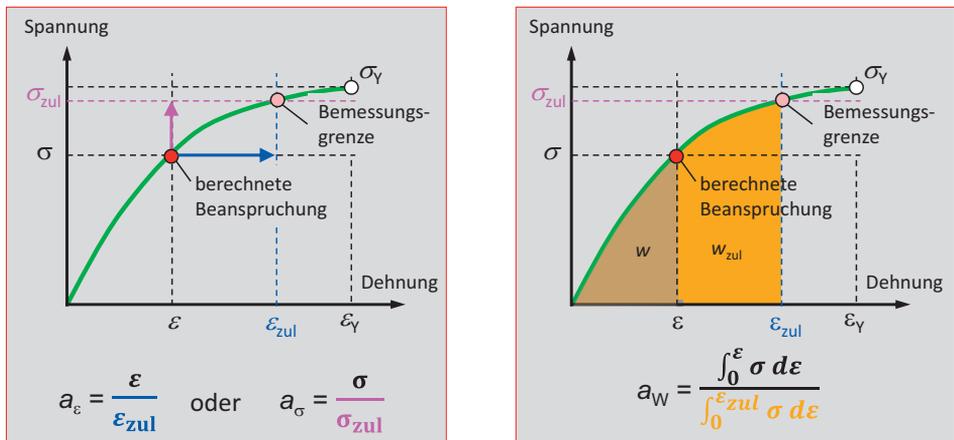


Bild 6.4 Definition des Auslastungsgrads

So führt z. B. der identische Zustand der Beanspruchung bei dehnungsbezogener Betrachtungsweise immer zu geringeren Auslastungsgraden als bei spannungsbbezogener Betrachtungsweise. Infolge des angenommenen nichtlinearen degressiven Spannungs-/Dehnungs-Verhaltens von thermoplastischen Kunststoffen, ist der Abstand der vorliegenden Dehnung zur zulässigen Dehnung größer als der Abstand der vorliegenden Spannung zur zulässigen Spannung. Wiederum ein anderer Zahlenwert des Auslastungsgrads würde für die energiebasierte Betrachtungsweise folgen, bei der über Integration ein Flächenverhältnis gebildet wird.

In der Praxis stellt sich nun die Frage, welche Definition die richtige ist. Die Frage als solche kann nicht beantwortet werden. Da dieses davon abhängt welche Definition festgelegt wurde, also welche Konvention getroffen wird. Grundsätzlich kann jede der dargestellten Definitionen des Auslastungsgrads verwendet werden, so

8

FEM im Entwicklungsprozess

Die vorangegangenen Kapitel haben sich recht detailliert mit inhaltlichen Fragen der Simulation und Materialbeschreibung beschäftigt und waren vor allem an den durchführenden Berechnungsingenieur gerichtet. An den Schnittstellen des eigentlichen Simulationsprozesses mit der gesamten Bauteil- oder Systementwicklung müssen aber oft auch mit der Thematik weniger vertraute Personen Entscheidungen treffen, die mit FE-Simulationen zu tun haben. Das kann zum Beispiel bei der Entwicklungsplanung oder dem Schadensmanagement der Fall sein, wenn konkrete Fragestellungen für eine Simulation aufbereitet werden müssen, die Durchführung der Simulation intern oder extern zu vergeben und sowohl der zeitliche als auch der finanzielle Aufwand abzuschätzen ist.

Ebenso ist ein gewisses Grundverständnis der Abläufe und Restriktionen einer FE-Simulation erforderlich, wenn Berichte mit Simulationsergebnissen entgegengenommen und bewertet und möglicherweise weitreichende Entscheidungen auf Basis dieser Ergebnisse getroffen werden müssen.

Das folgende Kapitel soll daher die einzelnen Aspekte eines Simulationsprojektes so beschreiben, dass auch fach- oder themenfremde Mitarbeiter die wesentlichen Kriterien kennen, die den erforderlichen Input, den ungefähren Aufwand und die zu erwartende Ergebnisqualität für eine FE-Simulation bestimmen. Außerdem sollen die wichtigsten Schlagwörter aus unterschiedlichen Themenbereichen (Modellierungskonzepte, Lösungsverfahren etc.) vermittelt werden, die die Kommunikation mit der Berechnungsabteilung erheblich vereinfachen.

■ 8.1 Planung

Der Bedarf nach einer FE-Simulation entsteht in den allermeisten Fällen nicht innerhalb einer Berechnungsabteilung, sondern an anderen Stellen im Unternehmen. Erste Schritte sind daher die Formulierung der Berechnungsaufgabe für die zuständigen Fachleute und deren Aufwandsabschätzung (zeitlich, finanziell).

Schon diese Kommunikation wird häufig dadurch erschwert, dass der Berechnungsingenieur keine genaue Vorstellung vom erwarteten Nutzen, der Produktverantwortliche meist keine Vorstellung von dem erforderlichen, ergebnisabhängigen Aufwand hat. Unklarheiten oder Auslassungen in der Aufgabenbeschreibung führen entweder zu unnötigem Aufwand bei der Berechnung (hohe Kosten/Bearbeitungszeiten) oder der Vernachlässigung wesentlicher Randbedingungen (eingeschränkter Nutzen der Ergebnisse). Beides beeinflusst das Kosten/Nutzen Verhältnis negativ.

Dabei ist allerdings schon die genauere Definition der Begriffe *Kosten und Nutzen* meist nicht ganz einfach. Zumindest die Gewichtung der einzelnen Punkte unterscheidet sich oft von Fall zu Fall.

Auf der *Kostenseite* (Berechnerperspektive) können z. B. aufgeführt werden:

- Modellierung, Arbeitsstunden für die Vernetzung der Bauteilgeometrie(en)
- Anzahl der Freiheitsgrade im Modell (Berechnungsdauer)
- Parametrisierbarkeit des Modells (Erzeugung von Bauteilvarianten)
- Berücksichtigung spezieller Effekte (Alterung, Temperaturexpansion, Faserorientierung)
- Abbildung von Kontaktphänomenen (kinematische Randbedingungen als Alternative)
- Aufwand für die Beschaffung von Material- oder Modellparametern
- CPU-Zeit (Lizenzkosten)
- Effektive Berechnungszeit
- Speicherbedarf
- Wahrscheinlichkeit von Konvergenzproblemen (erneute Simulation erforderlich, kein Ergebnis zum gegebenen Termin)
- Aufwand für die Simulationsauswertung
- Fehleinschätzung infolge unzureichender oder falscher Simulationsergebnisse

Auf der *Nutzenseite* (Kundenperspektive) können stehen:

- Genauigkeit bestimmter quantifizierbarer Berechnungsergebnisse (Steifigkeit, Eigenfrequenz, Berstdruck etc.), häufig Testergebnisse
- Aussagen in Form einer Machbarkeitsstudie
- Verständnis eines Systemverhaltens (Schadensmechanismus, Optimierungspotenzial)
- Auswahl optimaler Bauteilparameter (Werkstoff, Abmaße, Wanddicken, Sicken, Rippen)
- Qualitative Bewertung einer Bauteilmodifikation
- Zeit- und/oder Kostenersparnis durch die Vermeidung von Versuchen bzw. Schadensfällen

8.1.1 Ergebnisdefinition

Der erste Schritt in der Planung einer FE-Simulation ist daher stets die genaue Definition des erwarteten, oder besser benötigten Ergebnisses. Je genauer die Bauteilgeometrie, die Randbedingungen (Einspannungen, Lager etc.) und die Lasten eingegrenzt werden können, desto mehr reduziert sich der Aufwand. Ebenso hat die Art des geforderten Ergebnisses erheblichen Einfluss auf den Aufwand.

Steifigkeit

Als Ergebnis wird eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Kraft und Deformation des Bauteils erwartet. Dies beinhaltet zunächst keine Aussage über die Festigkeit, also das mögliche Versagen des Bauteils. Das verwendete FE-Modell muss die äußeren Randbedingungen, also Lasten und/oder Verschiebungen sowie Einspannungen, Auflager und ggf. Kontakte enthalten.

Das Materialmodell muss das mechanische Verhalten des Werkstoffes im relevanten Dehnungsbereich abbilden (siehe Kapitel 2). Je nach erwartetem Dehnungsniveau kann der Werkstoff vereinfachend als linear-elastisch angenommen werden oder muss (bei größeren Dehnungen) elastisch-plastisch definiert werden. Grundsteifigkeiten, Modalanalysen und Fragestellungen aus dem Bereich der Ermüdungsfestigkeit kommen meist mit linear-elastischen Materialmodellen aus.

Eine weitere Fragestellung ist die nach der Isotropie des Materialmodells. Müssen lokale Faserorientierungen berücksichtigt werden oder nicht. In der Regel kann diese Frage immer dann bejaht werden, wenn kurzfaserverstärkte Kunststoffe betrachtet werden. Zusätzlicher Aufwand ist dann die erforderliche Füllsimulation (siehe Kapitel 7), das Fasermapping und die Verwendung eines anisotropen Materialmodells in der Simulation. Einzig für den Fall eines qualitativen Variantenvergleiches kann man vereinfachend ein isotropes Materialmodell verwenden.

Weiterhin ist zu prüfen, ob es eine zeitliche Abhängigkeit des Materialverhaltens von Kraft oder Deformation gibt, ob also z.B. Relaxations- oder Retardationsvorgänge abgebildet werden sollen.

Wesentlicher Vorteil der Steifigkeitsanalyse gegenüber einer Festigkeitsanalyse ist es, dass lokale Beanspruchungsspitzen in Kerben oder Übergängen nicht betrachtet werden müssen. Bei der Vernetzung brauchen diese Details also nicht im Modell abgebildet zu werden. Dies kann eine erhebliche Ersparnis an Modellierungs- und Berechnungszeit bedeuten. Die Verwendung vereinfachter CAD-Modell (ohne Ver rundungen) und ist im Einzelfall mit dem Lieferanten der CAD-Daten abzustimmen. Weiterhin entfällt natürlich die Bewertung von Spannungen und Dehnungen und die Beschaffung von werkstoffspezifischen Versagensgrenzen.

Festigkeit

Ergebnis ist zunächst die Antwort auf die Frage nach dem Bauteilversagen. Im Gegensatz zur Steifigkeit gehört die Festigkeit allerdings nicht zu den direkten Ergebnissen einer FE-Simulation. Während Verschiebungen und Knotenkräfte die Lösungen der Systemgleichungen darstellen, taucht eine wie auch immer geartete Bewertung des Versagens in diesen Gleichungen nicht auf, kann also auch nicht abgelesen werden. Diese Bewertung ist im Anschluss an die Simulation auf Basis der berechneten Spannungs- oder Dehnungswerte durchzuführen. Die Methode, mit der diese Bewertung durchgeführt werden soll bestimmt wesentlich die Art der Modellbildung (Geometrie und Materialmodell).

Typische Auslegungsgrenzen sind:

- Erreichen eines gegebenen Spannungswertes (von-Mises, Hauptspannung etc.)
- Erreichen eines gegebenen Dehnungswertes
- Bewertung von Beanspruchungsamplituden und -mittelwerten im Zusammenhang mit zyklischen Festigkeiten
- Erreichen gegebener plastischer Dehnungsgrenzen
- Tragfähigkeitsverlust infolge von Plastifizierung, typischerweise im Rahmen von expliziten Crash-Simulationen

Je nach Bewertungsmethode sind ggf. unterschiedliche Materialmodelle zu verwenden. Plastische Dehnungen können beispielsweise nur dann ausgewertet werden, wenn auch ein elastisch-plastisches Materialmodell verwendet wird. Viele standardisierte Methoden zur Fatigue-Bewertung (z.B. FKM) erwarten dagegen Ergebnisse aus einer linear-elastischen Simulation. Zur Bestimmung von Spannungs- oder Dehnungsamplituden müssen zudem mehrere Lastsituationen berechnet werden, während bei Verwendung von Beanspruchungsobergrenzen eine Lastsituation ausreicht.

Für Aussagen bezüglich der Festigkeit sind Beanspruchungsspitzen in Kerben und Übergangsradien von wesentlicher Bedeutung. Sie sind also bei der Modellierung mit zu erfassen. Des Weiteren sollten Elemente mit quadratischer Formfunktion verwendet werden. Falls die Position(en) des möglichen Bauteilversagens bekannt sind (Versuch oder Vorsimulation), kann durch lokale Anpassung des Diskretisierungsgrades die Modellgröße deutlich reduziert werden.

Festigkeitsanalysen beinhalten immer auch alle Ergebnisse zur Bauteilsteifigkeit.

Parametervariationen

Die Variation einzelner Modellparameter (Werkstoffkennwerte, Wanddicken, Radien, Reibungskoeffizienten, Temperaturen etc.) kann aus zwei Gründen erforderlich werden: zum einen in einem Vergleich möglicher Bauteilvarianten im Sinne einer Optimierung, zum anderen im Sinne einer Toleranzbetrachtung oder anderer Streuungen um einen zulässigen Einsatzbereich einzugrenzen.

Der eigentliche Berechnungsaufwand im Sinne der CPU-Zeit ist dabei für alle betrachteten Varianten als konstant anzunehmen. Für die Modellierung der Varianten sind skalare Modellgrößen (Schalendicke, Temperatur, E-Modul, Reibungskoeffizient) abzugrenzen gegenüber geometrischen Änderungen der Bauteilgeometrie. Während die erstgenannten Werte praktisch ohne Aufwand modifiziert werden können, erfordert die Änderung der Bauteilgeometrie unter Umständen erheblichen Aufwand.

Die Möglichkeiten des verwendeten Preprozessors (eine parametrische Modellierung z.B. führt die Vernetzung automatisch einer Geometrieänderung nach) und die grundsätzliche Modellierungsstrategie (z.B. mögliche Geometrievarianten schon im Ausgangsmodell berücksichtigen, Schalenelemente verwenden) können dabei eine erhebliche Effizienzsteigerung bewirken.

Auswertung

Unabhängig von der Art der Ergebnisse kann deren Auswertung stets auf unterschiedliche Arten erfolgen. So können Spannungs- oder Dehnungswerte als Farbverläufe auf dem Bauteil dargestellt oder in tabellarischer Form ausgewertet werden. Gleiches gilt für Deformationen oder Kräfte. Weiterhin können sie für eine bestimmte Laststufe oder als kontinuierlicher Verlauf über den Lastanstieg dargestellt werden.

- Ausgabe der gewünschten Ergebnisvariablen: Spannung, Dehnung und Deformation sind trivial und meist voreingestellt. Wichtig können aber auch sein: Plastische Dehnungen, Kontaktdrücke, Temperaturen oder Reaktionskräfte. Es ist also darauf zu achten, dass alle benötigten Daten während der Simulation auch in die Ergebnisdatei geschrieben werden.
- Je nach verwendeter Software kann die Auswertung von Schnittkräften im Bauteil schwierig sein und ist, falls erforderlich, im Vorhinein zu planen.
- Das verwendete Koordinatensystem kann die Auswertung von Kraftkomponenten oder Verschiebungen erheblich erleichtern oder eben erschweren. Dabei ist nicht nur die Position und Ausrichtung eines kartesischen Koordinatensystems gemeint, sondern auch die Art des Systems selber. Zylindrische oder sphärische Koordinatensysteme können sehr hilfreich sein, müssen aber in der Regel bei der Modellerstellung definiert werden. Ebenso kann die Definition von bestimmten Referenzpunkten in einem Modell (z. B. Mittelpunkt eines Rings) bei der Auswertung hilfreich sein.
- Insbesondere für die später diskutierte Validierung können zusätzliche Simulationsergebnisse hilfreich sein, die möglicherweise nicht in die eigentliche Ergebnispräsentation mit einfließen. Hier sind insbesondere Energieanteile (kinetische Energie, elastische Energie, Energie durch Hourglassing) und im expliziten Fall die erfolgte Masseskalierung zu nennen.

8.1.2 Eingangsdaten, Datenquellen

Einen wesentlichen Einfluss auf die Modellierung und den Berechnungsaufwand haben auch die geforderte und die mögliche Genauigkeit der Ergebnisse. Natürlich sollte die Genauigkeit stets so hoch wie möglich sein. Es ist grundsätzlich immer besser, feiner zu vernetzen und Randbedingungen genauer abzubilden. In der Verantwortung des Berechnungsingenieurs liegt es aber, die Simulationskosten in das rechte Verhältnis zur erreichbaren Ergebnisqualität zu setzen; und die hängt eben nicht nur vom FE-Modell, sondern auch von den verfügbaren Eingangsdaten ab. Das Problem von Abweichungen der realen Bauteilgeometrie aufgrund von Verzug oder anderen Fertigungstoleranzen wurde bereits angesprochen. Ebenso streuen die Materialdaten in Abhängigkeit von Charge, Verarbeitung und Alterungsvorgängen, ja sogar Farbe. Die in Datenbanken vorhandenen Referenzdaten können mitunter deutlich von individuellen Messungen abweichen.

Die Definition angreifender Lasten oder Randbedingungen ist ein weiterer Punkt, der mit relativ großen Ungenauigkeiten behaftet sein kann. Die Simulation von manuell durchgeführten Montagevorgängen oder abgeschätzte Ersatzlasten sind dafür gute Beispiele. Ebenso die Vorgabe von Reibungskoeffizienten, die abhängig von der Art der Reibpartner, dem Druck, der Oberflächenbeschaffenheit und der Gleitgeschwindigkeit sind und praktisch immer nur als grobe Schätzwerte vorliegen. Addiert man alle genannten Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten auf, so ergeben sich mitunter erhebliche Streubreiten. Zur Planung einer Simulation kann es dann auch gehören, auf deren Durchführung, zumindest mit den vorliegenden Daten, zunächst zu verzichten oder den Aufwand zur vereinfachten Modellierung zu reduzieren. Die Validierung von Simulationsergebnissen an bestehenden und vermessenen Bauteilen kann bei der Beurteilung von erheblichem Nutzen sein.

Neben den diskutierten, eher grundsätzlichen Problemen bzgl. der verwendeten Bauteilgeometrien können CAD-Daten sehr unterschiedliche Grade der Eignung für eine FE-Modellerstellung aufweisen. Prinzipiell kann man sagen, dass CAD-Daten dabei umso schwieriger zu verarbeiten sind, je weiter sie im Fertigungsprozess vorangeschritten sind. Der erste Rohentwurf eines Bauteils ist meist mit überschaubarem Aufwand sinnvoll zu vernetzen (zumindest bei Verwendung von Tetraederelementen). Mit dem Einpflegen von Radien und Fasen und später von Entformungsschrägen entstehen dann geometrische Details, die zumindest lokal schon kleinere Elemente erfordern und eine Hexaedervernetzung wird schwieriger oder unmöglich. Mit fortschreitender Modifikation einzelner Freiformflächen kommen zunehmend schleifende Schnitte, kleine Versprünge und andere Details hinzu, die die Vernetzung oder auch die Erzeugung einer Mittelfläche um Faktoren aufwändiger machen. Den finalen Endpunkt stellen meist die CNC-Werkzeugdaten des Bauteils dar, die zudem in der Regel auch noch einen Wechsel des Datenformates hinter sich haben. Natürlich kann es erforderlich und sinnvoll sein, die Radien

und andere Details der Bauteilgeometrie in der Simulation zu erfassen (Festigkeitsbewertung, Kerbspannungen). Allerdings sollte dies eine bewusste Entscheidung und kein notwendiges Übel sein. Zumindest sollte dem Lieferanten der CAD-Daten klar sein, dass Qualität und Detaillierungsgrad seiner Daten ein hohes Maß an Blindleistung bei der Modellerstellung erzeugen können. Der Anbieter wiederum sollte keine Termin- oder Kostenschätzung abgeben, ohne die CAD-Daten gesehen zu haben.

Nachdem in der Planungsphase nunmehr die Art, Umfang und Qualität der Eingangsdaten gesichtet und durchdacht sowie die erwarteten Ergebnisse definiert worden sind, sollte eine ungefähre Vorstellung von der Machbarkeit, der Sinnhaftigkeit und dem Umfang der durchzuführenden Simulationen existieren. Um die erwartete Modellgröße und die daraus resultierenden Berechnungszeiten bewerten zu können, muss der Anwender eine ungefähre Vorstellung von der Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen haben. Wie lange dauert z. B. die Simulation eines nicht-linearen, impliziten Problems mit normalem Konvergenzverhalten und 1 Million Freiheitsgraden? Wie lange benötigt ein explizites Problem mit bestimmter Zeitschrittweite, Knotenzahl und physikalischer Zeit? Nur durch den Vergleich mit solchen Leistungskennzahlen kann abgeschätzt werden, ob mögliche Konvergenzprobleme in Kauf genommen werden können, ob das Modell zu verkleinern oder ein angestrebter Termin zu halten ist.

■ 8.2 Modellerstellung

Die Modellerstellung erfolgt auf Basis der CAD-Daten im Pre-Prozessor. Sie gliedert sich in die Teilschritte der Vernetzung, der Definition von Randbedingungen und Lasten sowie der Beschreibung des Materialverhaltens.

8.2.1 Modellierungskonzept

Ziel bei der Wahl des Modellierungskonzeptes ist primär die Reduzierung der Modellgröße (des Berechnungsaufwandes) auf ein erträgliches Maß. Unterschiedliche Herangehensweisen bei der Modellierung und die Wahl des Lösungsverfahrens können den Aufwand für eine gegebene Problemstellung dabei um Faktoren verändern.

Im einfachsten Fall erlaubt es die Problemstellung, gegebene Symmetrien bei der Modellerstellung auszunutzen. Dabei soll noch einmal betont werden, dass die Symmetrie des Bauteils alleine nicht ausreicht. Auch die angreifenden Lasten und

die Materialeigenschaften müssen die gleichen Symmetrien aufweisen. Insbesondere für die Materialeigenschaften ist dies nicht immer offensichtlich (Faserorientierung in Spritzgussbauteilen, Fasergewebe, Rowings etc.).

Mögliche Symmetrievarianten sind:

- Achsensymmetrie (Rohr unter Innendruck)
- Eine oder mehrere Symmetrieebenen (Würfel unter Innendruck)
- Zyklische Symmetrie (Laufrad einer Radialpumpe)
- Zyklische Symmetrie, linear (Glieder einer Kette unter Zug)

Die Verwendung gegebener Symmetrien kann erheblichen Einfluss auf den Umfang einer Simulation haben. Der oben aufgeführte Würfel kann so z.B. durch ein Achtel der Geometrie abgebildet werden. Die Zahl der Freiheitsgrade reduziert sich im Vergleich zum Vollmodell damit ebenfalls um das 8-Fache. Bei solchem Potenzial ist insbesondere zu prüfen, ob eventuelle Symmetrieabweichungen für das geforderte Simulationsergebnis relevant sind. Es kann also durchaus sinnvoll sein, ein Bauteil in der Simulation als symmetrisch anzunehmen, auch wenn dies in der Realität nicht vollständig zutrifft.

Falls zwar das Bauteil, nicht aber der Lastfall oder die Materialeigenschaften symmetrisch sind, kann die Bauteilsymmetrie aber zumindest bei der Vernetzung ausgenutzt werden. Vernetzung des kleinsten symmetrischen Abschnittes und anschließende Spiegelung der Elemente an den Symmetrieachsen spart Zeit. Es ist darauf zu achten, dass die gespiegelten Teilbereiche des Modells auch miteinander verbunden werden.

Zweiter Aspekt des Modellierungskonzeptes ist die Frage, ob Kontinuums- oder Strukturelemente verwendet werden sollen. Während Strukturelemente auf der einen Seite die Zahl der Freiheitsgrade in einem Modell deutlich reduzieren, gehen auf der anderen Seite auch Informationen verloren. Radien und Wanddickenübergänge in der Bauteilgeometrie sind offensichtliche Punkte, die ggf. eingeschränkte Schubdeformation und die nicht vorhandenen Spannungen in Dickenrichtung sind aber mitunter ebenso relevant. Die oben erläuterte Unterscheidung in Steifigkeits- und Festigkeitsfragestellung muss bei der Entscheidung berücksichtigt werden.

Es gibt zwei Methoden, die Vorteile von Kontinuums- und Strukturelementen in einem Modell zu vereinen:

Zum einen die Erstellung von Hybridmodellen in denen flächige Bauteilbereiche mit geringem erforderlichen Detaillierungsgrad mit Hilfe von Schalenelementen vernetzt werden und Bereiche, in denen Radien und Kerbgeometrien von Bedeutung sind mit Volumenelementen. Das Problem ist in diesem Fall die Verbindung von Schalen- und Volumenelementen an den Übergangsbereichen. Wie oben erläutert verfügen die Knoten der Schalenelemente über rotatorische Freiheitsgrade, die der Kontinuumsselemente aber nicht. Eine einfache Durchvernetzung von Schale

zu Volumen würde also dazu führen, dass die Schalen frei um die Verbindungspunkte drehbar sind, also keine Momente übertragen werden können. Gelöst wird dieses Problem dadurch, dass die relevanten Knoten der Schalenelemente über starre Hilfselemente mit allen zugehörigen Knoten der Kontinuumsschnittfläche verbunden werden (siehe Bild 8.1). Die den Strukturelementen zugrunde liegende Annahme, dass ebene Querschnitte eben bleiben, wird so auf die Kontinuumselemente im Übergangsbereich übertragen. Momente können über die Verbindungsstelle übertragen werden. Einige Solver bieten komfortablere Methoden an, um Schalen- und Kontinuumselemente aneinander zu koppeln.

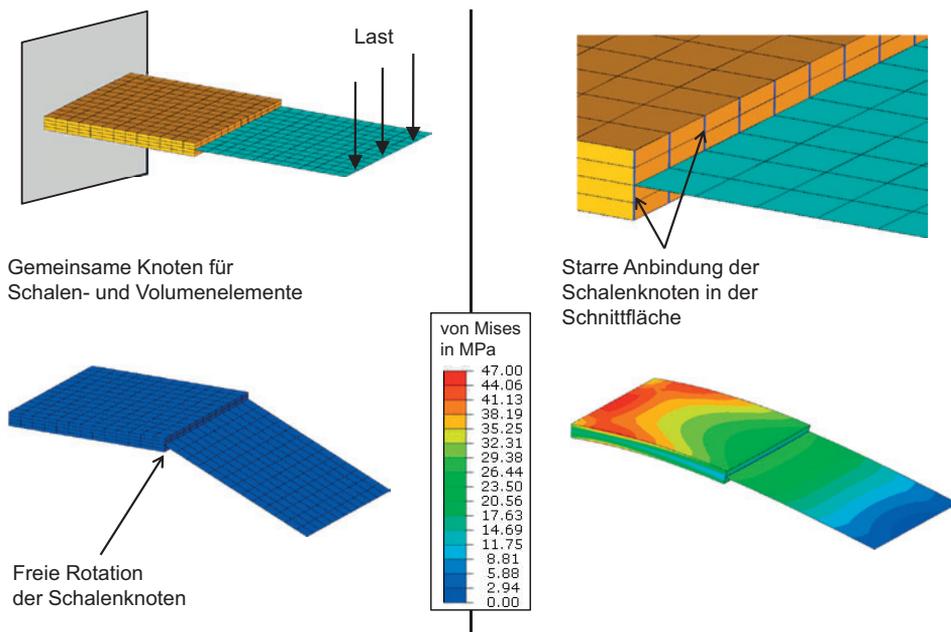


Bild 8.1 Anbindung von Schalen an Kontinuumselemente

Die zweite Methode ist das sogenannte Submodelling. Dabei wird das Gesamtmodell zunächst relativ grob vernetzt und die Simulation durchgeführt. Gesucht ist in dieser ersten Simulation das Deformationsverhalten, das Problem wird also als Steifigkeitsproblem aufgefasst. In einem zweiten Schritt werden schädigungsrelevante Bereiche des Modells deutlich feiner vernetzt, die restliche Bauteilgeometrie wird nicht im Modell erfasst. Die so erstellten Teilmodelle werden als Submodels bezeichnet. Alle relevanten FE-Solver bieten nun die Möglichkeit, diese Teilmodelle entlang ihrer Grenzflächen durch die Verschiebungen des zuvor berechneten Gesamtmodells steuern zu lassen. Die Submodelling Technik kann immer dann eingesetzt werden, wenn die im Teilmodell auftretenden, lokalen Effekte (beispielsweise Plastizität) das Steifigkeitsverhalten des Gesamtmodells nicht beeinflussen.

Index

Symbole

- 1-Wert 446
- 3 σ -Grenze 447
- 4,5 σ -Grenze 447

A

- Abminderungsfaktor 352 ff.
- Abminderungsfaktoren 181, 189, 192, 309
- Advani-Tucker-Modell 87
- aktiv (Freiheitsgrad) 425
- Alterung 156, 176, 185
- Amplitude 440
- Animation 478
- Anisotropieachsen 231
- Anregungsfrequenz 438
- Ansatzfreiwerte 164
- Ansatzfunktion 390
- Anstrengungsfaktor 231
- aperiodischer Grenzfall 443
- Äquipotenzialbedingung 162
- Äquipotenzialfläche 162
- Arbeitsaufnahmevermögen 158
- Arrhenius-Beziehung 45
- Arruda-Boyce-Modell 93
- artificial strain energy 428, 478
- Aspektverhältnis 285, 429, 465
- Auftretenswahrscheinlichkeit 446
- Auslastungsgrad 231, 311
- Auslegung 145
- äußere Gestalt 420
- Auswertung 455
- Autokorrelationsfunktion 441

- Averaging 479
- axialsymmetrisches Element 429

B

- Bailey-Norton-Modell 65
- Balkenelement 399
- Basquin 206
- Beanspruchungsgeschwindigkeit 157f., 177
- Beanspruchungsgrenzen 228
- Beanspruchungskomponenten 228
- Bemessung 145
- Bemessungsgrenze 198
- Bernoulli-Balken 430
- Beschleunigung 471
- Bewertungsmethode 454
- Biegelast 383
- Bilanzbetrachtung 478
- Bindenahtdurchströmung 180
- Bindenähte 180
- Bindenahtpositionen 294
- Bird-Carreau-Yasuda 271
- breitbandig 443
- Burgers-Modell 26

C

- Carreau-WLF 271
- Cauchy-Green-Tensor 17
- Composite-Schale 432
- Converse 299
- Crash-Simulation 419
- Crazes 185

cross-flow 227
Cross-WLF 271

D

Dämpfung 211f., 443
Dämpfungsmatrix 417
Dämpfungsverhältnis 443
Dang Van 337
Dauerfestigkeitsgrenze 328
Deformation, große 258
Deformationsgeschichte 70
Dehngeschwindigkeit 51
Dehngrenze 152
Dehngrenzenverschiebung 350
Dehnrage 158
Dehnung 14
Dehnungskristallisation 42
Dehnungstensor 15
Delete 206
Detaillierungsgrad 462
Determinante 397
deterministische FEM 244, 246
deviatorisch 165
Dichte 418
Dichtungselement 435
Dimensionierung 145
Dimensionierungsbedingung 161
Dimensionierungskennwert 146
direkte Steifigkeitsmethode 394
discontinuity 482
Diskretisierung 389, 424
Diskretisierungsgrad 482
DOE 247
dreidimensional 420
Drillsteifigkeit 425
Druckabhängigkeit 58
Druckbeanspruchung 166, 168, 258
Drucker-Prager-Kriterium 168
Drucker-Prager-Modell 59
Druckfestigkeit 168, 170
Druckunterschied 470
Druckversuch 114
Durchbiegung 403
Duroplast 44, 176, 253, 323

E

ebenes Dreieckselement 403
effektive Masse 444
Effektivwert 442
Eigenform 437
Eigenfrequenz 437
Eigenspannungen 180, 302
eindimensional 420
Eindringtiefe 472
Einlegeteile 293
Einphasenströmung 275
Elastizitätskonstante 22
Elastizitätsmodul 383
Elastizitätstensor 20
Elastomer 40
Elementeigenschaft 420
Elementformulierung 426
Elementkoordinatensystem 423, 483
Elementoberseite 483
Elementqualität 464
Elementsteifigkeitsmatrix 394
Elementtyp 420
Elementtypenbezeichnung 422
Energiebilanz 428, 478
Energieerhaltung 279
Entformungstemperatur 269
Ermüdungsfestigkeitsnachweis 146
Ermüdungsverhalten 212
Ersatz-E-Modul 89
Erwartungswert 446
Eshelby-Tensor 85
Euler 287
explizite Vorgehensweise 417
Extrapolation 418, 480

F

Faserbruch 221
Faserehaftung 221
Fasergehalt 285
Faserorientierung 39
Faserorientierungsverteilung 86, 284
Faservolumenanteil 84, 99
Fast-Fourier-Transformation (FFT) 441

Fatigue-Bewertung 454
Feder-Dämpfer-Ersatzmodell 26
Federsteifigkeit 392
Festigkeit 454
Festigkeitsnachweis 145
Findley-Modell 65
Flächennormale 422
Flächenträgheitsmoment 385, 431
Fließdehnung 152, 184
Fließen 165, 168, 170 f., 173
Fließgrenztemperatur 272
Fließspannung 53
Fließzonenbildung 185
Fluid 270
Folgar-Tucker-Modell 282
Formänderungsbetrag 255 f., 260
Formänderungsenergiebetrag 256
Formänderungsenergiegedichte 90, 157 f.,
160, 196, 255 f., 259
Formfunktion 390, 398, 400, 424
Formzahl 216
Fouriertransformierte 441
Freiheitsgrad 393
Frequenz 440
Frequenzbereich 437
Frequenzgehalt 443
Frequenzverhältnis 438
Füllphase 267

G

Gasbelastung 300
Gauß-Integration 407
geometrische Nichtlinearität 411
Geradengleichung 401
Gerber-Parabel 328
Gesamtpotenzial 394
Gesamtverlustarbeit 155
Geschwindigkeitseinfluss 176
Geschwindigkeitsprofil 277
Gestaltenergieänderungshypothese 165
Gewichtungsfaktor 408
Glasfaser 423
Gleichgewichtszustand 394
Gleitbruch 160, 163, 176

Gleitung 14
Goodman-Korrektur 328
Grenzdehnung 153 ff., 173, 184 ff., 212
Grenzspannungsamplitude 328
gRMS-Wert 446
Größtdehnungshypothese 171, 188
Gummi 40

H

Haigh-Diagramm 209, 328, 330
Halpin-Tsai-Modell 82
Hauptachsensystem 337, 339
Hauptorientierungsrichtung 87, 297
Hauptspannungsrichtung 338
HCF 206, 372
Heizelementschweißen 181
Hexaedervernetzung 464
High-Cycle-Fatigue 206
Hill-Kriterium 60
Hinterspritzen 294
h-Methode 424
Hookesche Gesetz 172
Hourglass Moden 427
Hourglassing 427, 478
hybrides Element 428
Hybridmodell 458
hydrostatischer Anteil 165, 168
Hysteresefläche 37, 155
Hysteresese-Messverfahren 155, 211 ff.

I

Imaginärteil 445
implizit 416
Impulserhaltung 279
Incompatible Mode Elemente 428
in-flow 227
Ingenieurskonstante 75
Inkompressibilität 259
Innenwinkel 466
innere Energie 399
Instabilität 160
instationär 437
Integration 390, 407

- Integrationspunkt 407f., 479
integrative Simulation 290
Interaktionsgleichung 322
Interpolation 390
Intervallgrenze 408
Invariante 333, 482
Invarianzbedingung 335
Invertierung 419
Iosipescu-Schubprobekörper 228
irreversible Dehnung 53
isoparametrische Elementformulierung 409
Iterationsalgorithmus 415
Iterationsschritt 412, 416
- J**
- Jacobi-Determinante 466
Johnson-Cook-Modell 58
- K**
- Kautschuk 40
Kavität 267
Kegelkriterium 163, 167
Kelvin-Voigt-Körper 25
Kerbeeinfluss 217
Kerben 167, 171, 178, 214
Kerbgrundbeanspruchungen 340 ff.
Kerbschärfe 342
Kerbspannungskorrektur 340
Kerbwirkung 158, 180
Kerbwirkungszahl 216
Kernversatz 294
Kinematik 469
kinetische Energie 476
Kirchhoff-Schale 432
Knotensteifigkeit 388
Knotenverschiebung 388
Knotenwert 479
Kompressibilität 272
Kompressionsmodul 21, 428
Konnektivität 422
konsistentes Einheitensystem 477
Kontaktproblem 471
Kontinuumselement 428
Konvergenzproblem 419
Konvergenzverhalten 415, 474
Koordinatenspannungen 339
Koordinatensystem 455, 483
Korrekturverfahren 333
Kriechen 29, 156
Kriechmodell 64
Kriechmodul 33, 63
Kriechmodul/Zeit-Kurve 33
Kriechverformung 151
Kriechversuch 32
Kristallisation 30
kritische Dämpfung 443
Kühlphase 269
Kunststoff, endlosfaserverstärkt 98
Kurzglasfaser 39
Kurzzeitfestigkeit 171, 372
Kurzzeit-Ursprungs-Modul, Bestimmung 102
Kurzzeitzugversuch 155, 174, 189, 246, 352
- L**
- Lagrange 286
Lagrange-Element 424
Lamésche Konstante 20
Lastspielzahl 205, 207
Laststeigerungsversuche 212
LCF 206, 372
linear 410
Linearisierung 440
lokales Koordinatensystem 409
Low-Cycle-Fatigue 206
- M**
- Manson-McKnight Verfahren, MMK 334
Mapping 290, 299
Masseerhaltung 279
Masse-Feder-Dämpfer System 438
Massenelement 434
Massenmatrix 417
Masseskalierung 419, 476

Materialgesetz 49
Materialmodell 49
Matrixbruch 221
Matrizenschreibweise 393
Maximalspannungskriterium 229
Maxwell-Körper 25
Medienbelastung 176
Mehrachsigkeit 178
Mehrachsigkeitsgrad 169, 325
mehraxial 339
Mehraxialität 178, 324, 330
Mehraxialitätsgrad 325
Mikrorisse 185
Mindlin-Schalenelement 432
Mittelfläche 433
Mittelflächenmodell 460
Mittelspannung 209, 328
Mittelspannungsempfindlichkeit 329
Mittelspannungsfaktor 365
Mittelung 479
Modalanalyse 437
Modellierungskonzept 457
Modellkalibrierung 101
Mooney-Rivlin-Modell 91
Mullins-Effekt 41

N

Nachdruckphase 268
Nachgiebigkeitstensor 76
Näherungskonstruktion 328
Navier-Stokes-Gleichungen 280
Necking-Bildung 123
negative Volume 423
Neo-Hooke-Modell 91
Neuber 341f.
neutrale Faser 384
Newton-Raphson-Verfahren 412
nichtlineare Problemstellung 410
nichtlineare Regression 116
nichtlineares Materialverhalten 411
Nichtlinearität aufgrund von Randbedingungen 411
nichtproportional 337
Normaldehnungshypothese 172f.

Normalspannungshypothese 167, 169f.,
172f., 322
Normalverteilung 245

O

Ogden-Modell 91
Oktaeder-Scher-Dehnungshypothese
171 ff.
Orientation Averaging 298
Orientierungsgrad 298
Orientierungstensor 284, 298
Ostwald-deWaele 271

P

Parabel 408
Paraboloidkriterium 167, 170
Parallelisierbarkeit 475
Parametervariation 454
Penalty-Verfahren 472
Phantomnetzwerk 93
Phasenlage 442
plane-strain 430
plane-stress 430
Planung 451
Plastifizierung 342
p-Methode 425
Polyamid 349
Polynomgrad 422
Polyolefine 181
Post-Prozessor 380
Potenzialbegriff 394
Power Spectral Density, PSD 439
Pre-Prozessor 380
Primärspannungen 317
probabilistischen 246f.
Probekörper 226
Prony-Reihe 67
proportional 331, 337f.
Proportionalität 338
Prozesssimulation 282
Prüfverfahren 149, 205
PSD-Beschleunigung 448
PSD-Diagramm 442

Puck-Ansatz 98
Pure-Shear-Versuch 113
pvT-Diagramm 272

Q

quadratische Formfunktion 405
Qualitätskriterium 465
Quellung 156
Querdehnungen 170 f.
Querkontraktionszahl 18, 103, 172 ff., 418

R

Randbedingung 467
Randschicht 226
Rankine 169
Ratenabhängigkeit 57
Rechte-Hand-Regel 422
reduziert integriertes Element 427
Referenzmodell 479
Regressionsmodell 247
Reißfestigkeit 150
Relaxation 29, 177, 203, 353 f.
Relaxationsmodul 67
Resonanzfrequenz 443
Retardation 29, 354
Reynolds-Zahl 276
richtungsabhängiges Materialmodell 423
Rigid Body 435
Rivlin-Modell, zeitabhängig 94
RMS-Wert 446
Rotation 468
rotatorisch 425
RSC-Modell 282
RVE 222

S

Sandwichstruktur 432
Schädigung 155
Schädigungsanteil 155
Schädigungsgrenze 184
Schalenelement 432

Schallemissionsanalyse 156
Schallgeschwindigkeit 418
Scherdeformation 178
Schergeschwindigkeit 270
Schichtaufbau 483
Schichtenströmung 288
schmalbandig 443
Schmelzefront 267
Schnellzerreiversuch 157f., 177f.
Schnittebene 339
Schubfestigkeitsfaktor 323
Schubmodul 19
Schweißfaktor 180 f.
Schweißnähte 182
Schwindung 301
Schwingungsamplitude 445
Schwingungsart 436
Schwingungsenergie 442
Schwingungssimulation 436
Sekantenmodul 52
Sekundärspannungen 317
Serendipity 424
Shear Locking 427
Shore-Härte A 119
Sicherheitsfaktoren 187, 189, 245
Siegelzeit 268
Signalverlauf 441
Signed-von-Mises-Spannung 333
singulär 397
skalierbar 474
Skew angle 466
Solver 380
Spaltenmatrix 392
Spannungsanteil, hydrostatischer 13
Spannungsdeviator 13
Spannungsgradient 179, 217, 319, 342
Spannungsgradienten 175, 179, 214, 310
Spannungsrissbildung 185
Spannungstensor 12
Spannungsverhältnis 209, 338
Spannungsverlauf 386
Speicherbedarf 419
Speichermodul 38
spektrale Leistungsdichte 441
Sphärolite 185 f.

Spritzgießsimulation 265
Spur 333
Stabilisierung 478
Stabilitätsproblem 419
Standardabweichung 446
Starrkörperbewegung 397
stationär 437
Steifigkeit 383, 453
Steifigkeitsmatrix 392, 410
Steifigkeitstensor 20
stochastische Anregung 436
Streckdehnung 149
Streckspannung 149f.
Streuungen 208, 244 ff., 256
Strukturelement 430
Stützstelle 389, 405
Stützwirkung 179, 216
Stützzahl 179, 215
Submodellierung 459
Superpositionsprinzip 68, 393
Symmetrie 457
Symmetrieachse 458
Symmetriebedingung 469
synchron 337f.

T

Tandon-Weng-Modell 84
Tangentensteifigkeitsmatrix 414
Taper 466
Taylor-Reihe 413
Temperatureinfluss 176
Temperaturleitfähigkeit 273
Thermoplast 29
thermoplastische Elastomere 90
Timoshenko-Balken 432
Torsion 425
Torsionsfeder 426
Tragfähigkeit 145, 316
Tragfähigkeitsanalyse 310, 317
Tragfähigkeitsnachweis 145
Trägheitselement 434
Transformationsmatrix 409
transient 419
translatorisch 425

Trennbruch 160, 163
Tsai-Hill-Kriterium 231
Tsai-Wu-Kriterium 233

U

Überlastungsfälle 365
Überlebenswahrscheinlichkeit 207
Überschreitungswahrscheinlichkeit 447
Übertragungsfunktion 439
Übertragungsverhalten 438, 445
Ultraschallschweißen 182
Ursprungs-E-Modul 19

V

V80-Konzept 218
van-der-Waals-Modell 94
Varianz 446
Verbindungselement 435
Verfestigung 55
Verformungsbehinderung 178
Verformungsgeschwindigkeit 158
Vergleichsauslastungsgrad 336
Vergleichsdehnungshypothesen 229
Vergleichsgröße 146
Vergleichsmittelspannung 336
Vergleichsspannung 54, 163 f., 189, 325
Vergrößerungsfunktion 439
Verlustmodul 38
Vernetzungsgrad 41
Versagensbedingung 161
Versagensfläche 230
Versagensgrenzen 226
Versagenshypothese 146, 162, 322
Versagenskriterium 162
Versagenswahrscheinlichkeit 245
Verschiebung 387
Verschiebungselement 426
Versprödung 157f., 177f.
Verstärkungsfaser 83
Verstreckgrad 17
Verteilungskurven 245
Vertrauensbereich 208
Verwölbung 432

Very-Low-Cycle-Fatigue 206
Verzerrung 14
Verzerrungstensor 172
Verzug 268, 301
Viskoelastizität 177, 309
Viskosität 270
vollintegriertes Element 426
Volumenkonstanz 259
von 165 f., 168 ff.
von-Mises-Dehnung 171
von-Mises-Spannung 165 ff., 333
Vorzugsrichtung 281

W

Wahrscheinlichkeit 439
Wahrscheinlichkeitsdichte 446
Wärmeleitfähigkeit 273
Wärmeübergangskoeffizient 468
Warpage 466
Wechselhaftigkeitsfaktor 363
weißes Rauschen 443
Werkstoffanstrengung 162 ff., 170, 257,
259
WLF-Gleichung 47
Wöhlerkurve 205

Y

Yeoh-Modell 92

Z

Zäh-Spröd-Übergang 157 f., 176
Zeitbereich 437
Zeitinkrement 416
Zeitintervall 418
Zeitstandfestigkeit 151, 329
Zeitstandversuch 151
Zeit-Temperatur-Verschiebungs-Prinzip
45
Zugfestigkeit 168
Zugstab 381
Zuverlässigkeit 244
Zwangsbedingung 469
zweidimensional 420
Zylinderkriterium 163
Zylinderpotenzial 164 f.