

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].

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

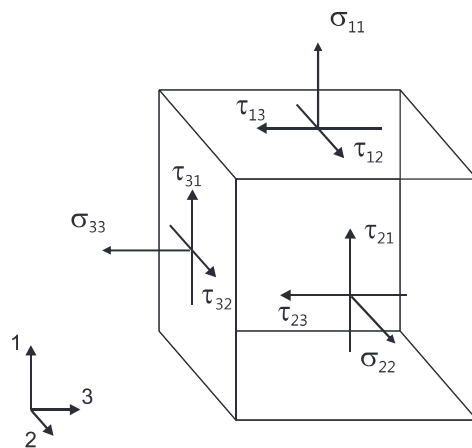


Bild 2.1 Mehraxialer Spannungszustand, Komponenten des Spannungstensors

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:

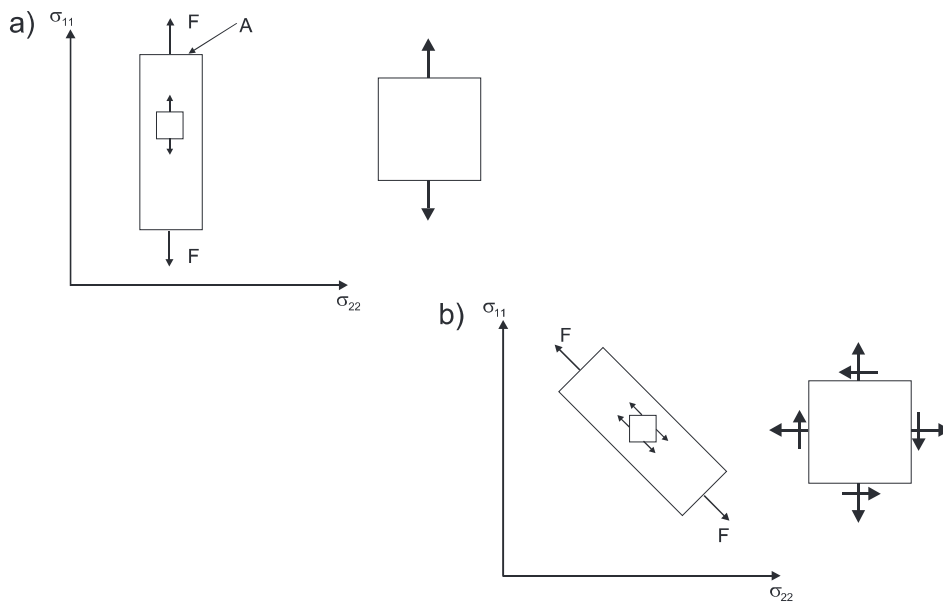


Bild 2.2 Spannungskomponenten in verschiedenen Koordinatensystemen

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

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).

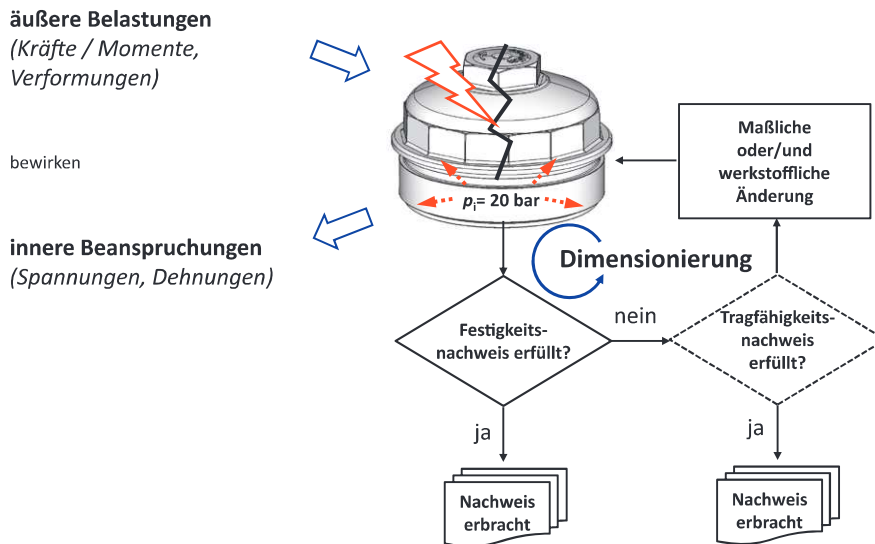


Bild 3.1 Belastungen, Beanspruchungen und Dimensionierung

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.

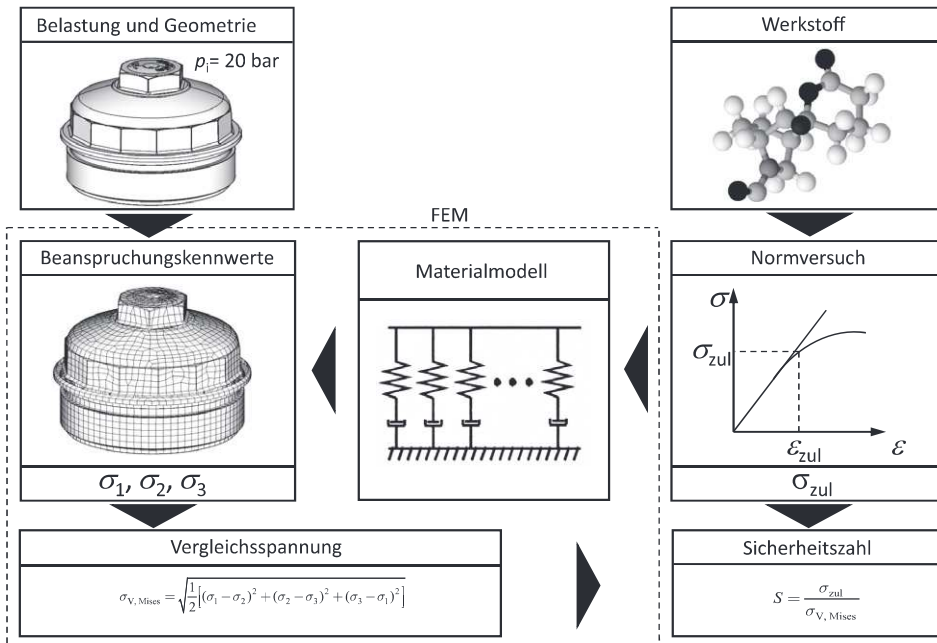


Bild 3.2 Festigkeitsnachweis eines Bauteils (exemplarisch)

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).

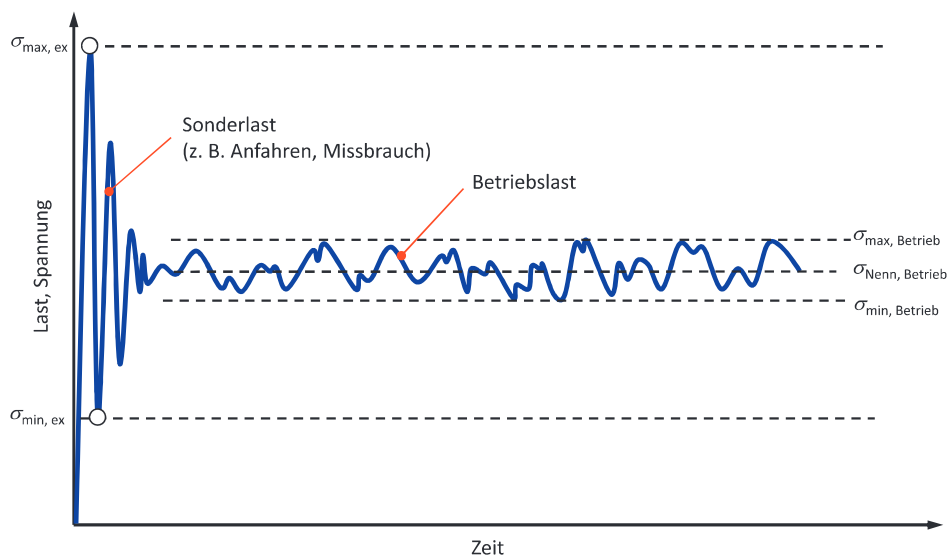


Bild 3.3 Beanspruchungskennwerte für statischen Nachweis und Ermüdungsfestigkeitsnachweis

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 Energiefreisetzungsrage 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 Energiefreisetzungsrage in Beziehung gesetzt. Die Energiefreisetzungsrage 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. Saintier 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 Formänderungsenergiedichte und Formänderungsbetrag

Die Formänderungsenergiedichte 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 Formänderungsenergiedichte 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 Formänderungsenergiedichte, 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.

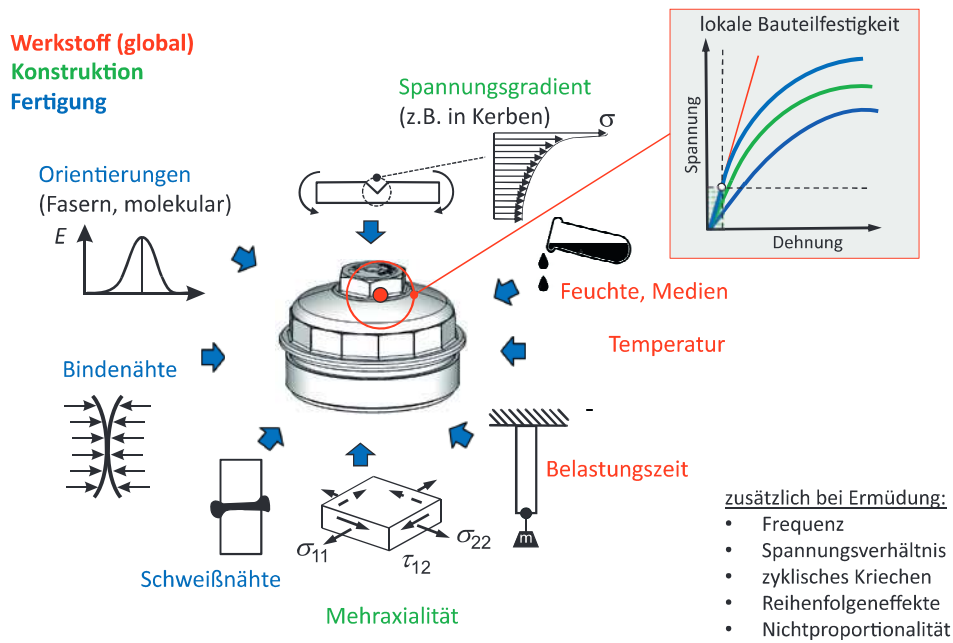


Bild 6.1 Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit

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.

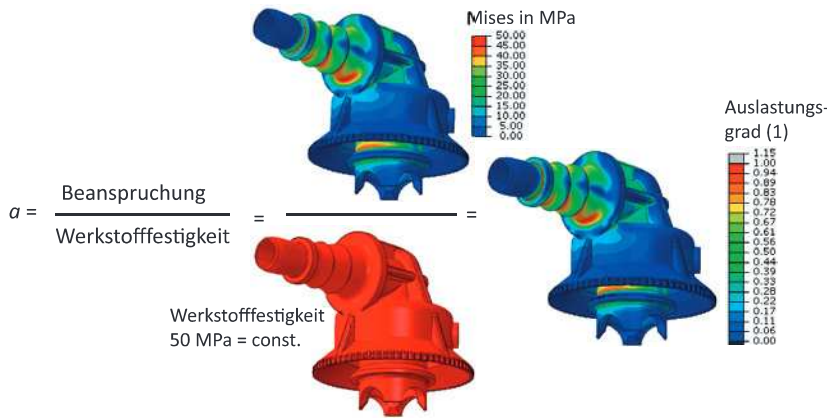


Bild 6.2 Auslastungsgrad als Auswertgröße für das werkstoffliche Versagen

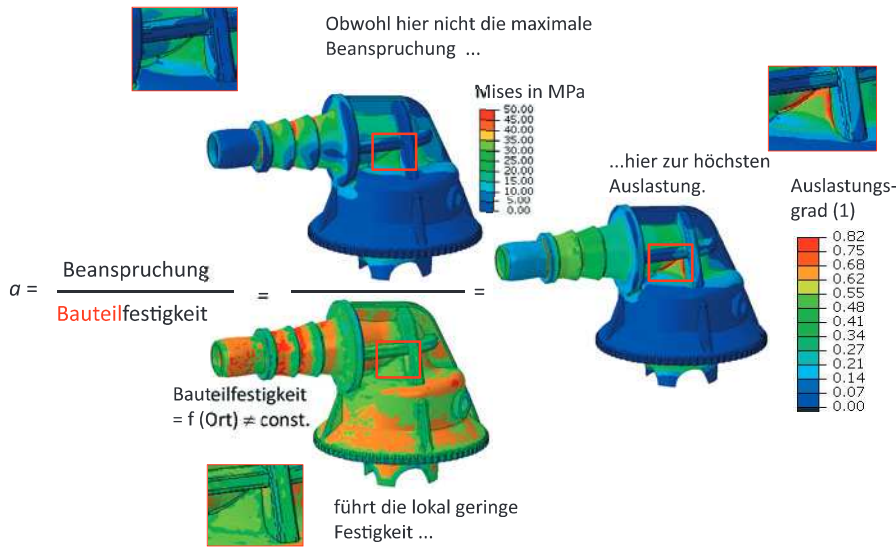


Bild 6.3 Auslastungsgrad als Auswertgröße für das Bauteilversagen

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 Bauteil-Beanspruchungsgrenze. 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 Formänderungsenergiegedichte 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-)Formänderungsenergiegedichte (aus FEM)

w_{zul} : zulässige Formänderungsenergiegedichte

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 Hookeschen Bereich), so ist dies bei Kunststoffen bei einem angenommenen nichtlinearen Verhalten der Spannungs-/Dehnungs-Kurve ein mitunter deutlicher Unterschied (Bild 6.4, links).

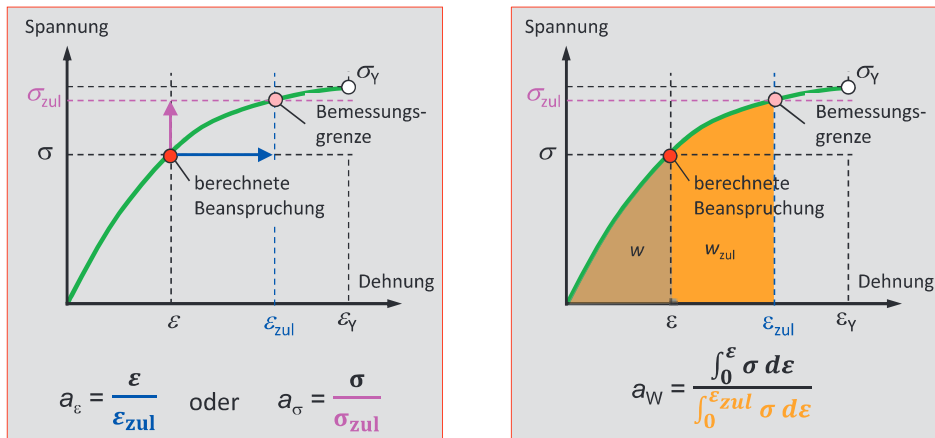


Bild 6.4 Definition des Auslastungsgrads

So führt z. B. der identische Zustand der Beanspruchung bei dehnungsbezogener Betrachtungsweise immer zu geringeren Auslastungsgraden als bei spannungsbezogener 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 Datenformaten 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 Kontinuums- oder Strukturelemente 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.

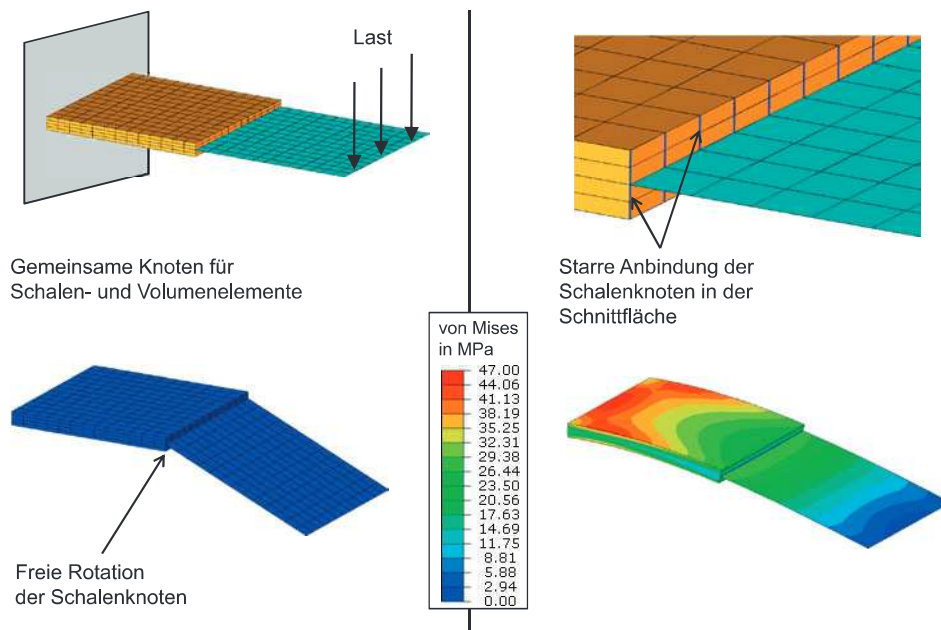


Bild 8.1 Anbindung von Schalen an Kontinuumselemente

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 schadigungsrelevante 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.