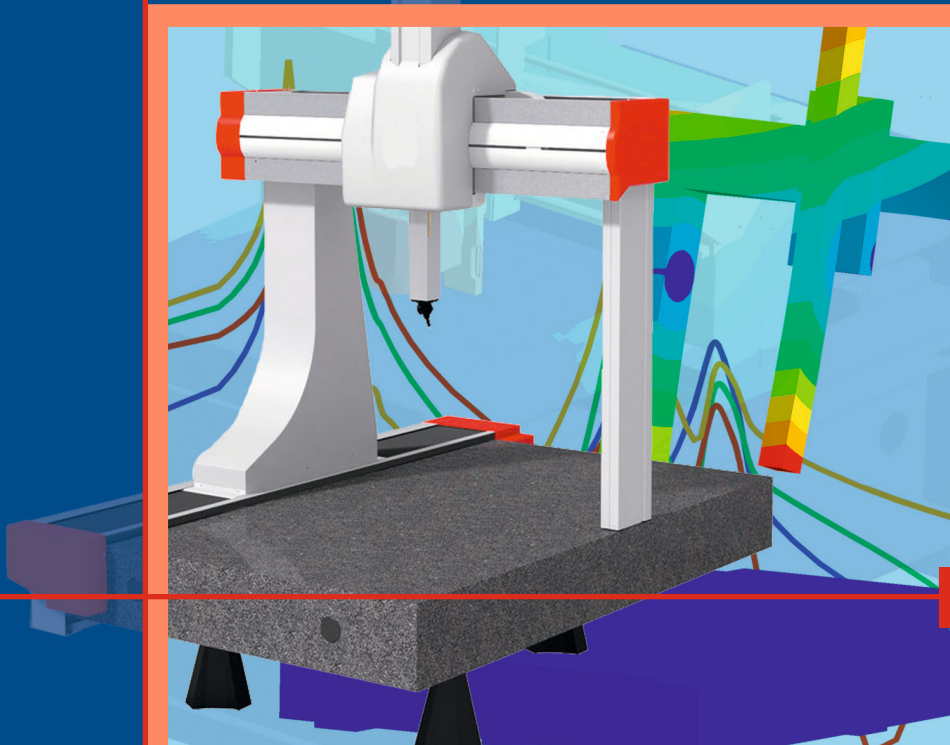


Christof Gebhardt

Mit  
30 Übungs-  
beispielen

# Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench

Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik



3., aktualisierte Auflage

HANSER

Christof Gebhardt

## Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench



### **Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

**HANSER** Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Christof Gebhardt

# Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench

Einführung in die lineare und  
nichtlineare Mechanik

3., aktualisierte Auflage



HANSER

Der Autor:

*Christof Gebhardt*, CADFEM GmbH, Grafing bei München



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ISBN 978-3-446-45001-1

E-Book-ISBN 978-3-446-45740-9

© 2018 Carl Hanser Verlag München

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Isabell Eschenberg, Christin Jahn

Umschlagkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Ulm

Printed in Germany

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort</b> .....	XI
<b>1</b>	<b>Vorteile der simulationsgetriebenen Produktentwicklung</b> .....	1
1.1	Zahl der Prototypen reduzieren .....	1
1.2	Kosten einsparen .....	3
1.3	Produktinnovationen fördern .....	4
1.4	Produktverständnis vertiefen .....	6
<b>2</b>	<b>Voraussetzungen</b> .....	9
2.1	Grundlagenkenntnisse .....	9
2.2	Organisatorische Unterstützung .....	10
2.3	Geeignete Soft- und Hardware-Umgebung .....	10
<b>3</b>	<b>Grundlagen der FEM</b> .....	13
3.1	Grundidee .....	13
3.2	Was heißt Konvergenz? .....	18
3.3	Was heißt Divergenz? .....	19
3.4	Genauigkeit .....	20
<b>4</b>	<b>Anwendungsgebiete</b> .....	23
4.1	Nichtlinearitäten .....	24
4.1.1	Kontakt .....	25
4.1.2	Nichtlineares Material .....	26
4.1.3	Geometrische Nichtlinearitäten .....	28

<b>4.2</b>	<b>Statik</b> .....	29
<b>4.3</b>	<b>Beulen und Knicken</b> .....	36
<b>4.4</b>	<b>Dynamik</b> .....	39
	4.4.1 Modalanalyse .....	39
	4.4.2 Angeregte Schwingungen .....	43
	4.4.3 Fortgeschrittene modalbasierte Dynamik .....	45
	4.4.4 Nichtlineare Dynamik .....	53
<b>4.5</b>	<b>Design for Additive Manufacturing</b> .....	67
<b>4.6</b>	<b>Betriebsfestigkeit</b> .....	71
<b>4.7</b>	<b>Composites</b> .....	79
<b>4.8</b>	<b>Weitergehende Simulationen</b> .....	82
	4.8.1 Temperaturfelder .....	82
	4.8.2 Strömung .....	83
	4.8.3 Elektromagnetische Felder .....	84
	4.8.4 Gekoppelte Analysen .....	85
	4.8.5 Systemsimulation .....	88
<b>4.9</b>	<b>Robust-Design-Optimierung</b> .....	90
<b>5</b>	<b>Standardisierung und Automatisierung</b> .....	97
5.1	Generische Lastfälle .....	97
5.2	Skriptprogrammierung .....	99
5.3	Makrosprache Mechanical APDL .....	101
5.4	FEM-Simulation mit dem Web-Browser .....	103
<b>6</b>	<b>Implementierung</b> .....	105
6.1	Training .....	105
6.2	Anwenderunterstützung .....	107
6.3	Qualitätssicherung .....	108
6.4	Datenmanagement .....	109
6.5	Hardware und Organisation der Berechnung .....	109
<b>7</b>	<b>Erster Start</b> .....	115
7.1	Analyse definieren .....	116
7.2	Berechnungsmodell und Lastfall definieren .....	118
7.3	Ergebnisse erzeugen und prüfen .....	122

<b>8</b>	<b>Der Simulationsprozess mit ANSYS Workbench</b>	127
<b>8.1</b>	<b>Projekte</b>	128
8.1.1	Systeme und Abhängigkeiten	129
8.1.2	CAD-Anbindung und geometrische Varianten	132
8.1.3	Archivieren von Daten	137
<b>8.2</b>	<b>Analysearten</b>	139
<b>8.3</b>	<b>Technische Daten für Material</b>	141
<b>8.4</b>	<b>Geometrie</b>	143
8.4.1	Modellieren mit dem DesignModeler	143
8.4.2	Geometrie erstellen	144
8.4.2.1	Geometrie aufbereiten	152
8.4.3	Analysen in 2D	158
8.4.4	Balken	160
<b>8.5</b>	<b>Modell</b>	163
8.5.1	Die Mechanical-Applikation	164
8.5.1.1	Selektion	164
8.5.1.2	Komponenten	166
8.5.1.3	Steuerung der Ansichten	166
8.5.2	Geometrie in der Mechanical-Applikation	168
8.5.3	Koordinatensysteme	169
8.5.4	Virtuelle Topologie	171
8.5.5	Kontakte	172
8.5.5.1	Funktionsprinzip von Kontaktelementen	172
8.5.5.2	Baugruppen-Handling	173
8.5.5.3	Kontaktdefinition	175
8.5.6	Netz	181
8.5.6.1	Adaptive Vernetzung	182
8.5.6.2	Manuelle Vernetzung	186
8.5.6.3	Kontrolle der Vernetzung	192
8.5.6.4	Dünnwandige Bauteile	196
<b>8.6</b>	<b>Setup</b>	204
8.6.1	Analyseeinstellungen	204
8.6.2	Randbedingungen	206
8.6.2.1	Mechanische Randbedingungen	207
8.6.2.2	Thermische Randbedingungen	216
8.6.2.3	Symmetrie	218
8.6.2.4	Schrauben	223
8.6.2.5	Schweißnähte	231
8.6.3	Definitionen vervielfältigen	233
<b>8.7</b>	<b>Lösung</b>	234
8.7.1	Solver-Informationen	237
8.7.2	Konvergenz nichtlinearer Analysen	238
8.7.3	Wenn die Berechnung nicht durchgeführt wird	241



<b>8.8</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	243
8.8.1	Spannungen, Dehnungen, Verformungen .....	243
8.8.2	Darstellung der Ergebnisse .....	247
8.8.2.1	Fokussierung der Ergebnisdarstellung .....	250
8.8.2.2	Animation .....	253
8.8.3	Automatische Dokumentation – Web-Report .....	254
8.8.4	Schnitte .....	255
8.8.5	Reaktionskräfte und -momente .....	257
8.8.6	Ergebnisbewertung mit Sicherheiten .....	258
<b>8.9</b>	<b>Lösungskombinationen</b> .....	259
<b>9</b>	<b>Übungen</b> .....	261
9.1	Biegebalken .....	262
9.2	Scheibe mit Bohrung .....	264
9.3	Parameterstudie .....	266
9.4	Designstudien, Sensivitäten und Optimierung mit optiSLang .....	272
9.5	Temperatur und Thermospannungen .....	283
9.6	Festigkeit eines Pressenrahmens .....	285
9.7	FKM-Nachweis .....	291
9.8	Presspassung .....	297
9.9	Hertz'sche Pressung .....	301
9.10	Steifigkeit von Kaufteilen .....	305
9.11	Druckmembran mit geometrischer Nichtlinearität .....	311
9.12	Elastisch-plastische Belastung einer Siebtrommel .....	315
9.13	Bruchmechanik an einer Turbinenschaufel .....	324
9.14	Schraubverbindung .....	333
9.15	Elastomerdichtung .....	337
9.16	Aufbau und Berechnung eines Composite-Bootsrumpfs .....	346
9.17	Beulen einer Getränkedose .....	358
9.18	Schwingungen an einem Kompressorsystem .....	365
9.19	Mehrkörpersimulation .....	372
9.20	Containment-Test einer Turbine .....	378
9.21	Falltest für eine Hohlkugel .....	385
9.22	Lineare Dynamik einer nichtlinearen Elektronikbaugruppe .....	391
9.23	Kopplung von Strömung und Strukturmechanik .....	402
9.24	Akustiksimulation für einen Reflexionsschalldämpfer .....	404
9.25	Schallabstrahlung eines Eisenbahnrades .....	407
9.26	Elektrisch-thermisch-mechanischer Mikroantrieb .....	412
9.27	Verhaltensmodell für die Systemsimulation einer Messmaschine .....	416

9.28	Topologieoptimierung .....	421
9.29	Lattice-Optimierung .....	426
9.30	Simulation der Additiven Fertigung .....	428
<b>10</b>	<b>Konfiguration von ANSYS Workbench .....</b>	<b>431</b>
10.1	Maßeinheiten und Geometriearten festlegen .....	431
10.2	Simulationseinstellungen .....	432
<b>11</b>	<b>Export von Daten .....</b>	<b>435</b>
11.1	Einbindung von alternativen Solvern .....	435
11.2	Export zu Excel .....	436
	<b>Index .....</b>	<b>439</b>



# Vorwort

ANSYS Workbench ist eine der meistverbreiteten Softwarelösungen für strukturmechanische Simulationen, mit deren Hilfe Produkte schneller, zu geringeren Kosten und mit höherer Qualität auf den Markt gebracht werden können.

Auf Basis von Version 19 vermittelt dieses Praxisbuch die notwendigen Grundlagen, um mit ANSYS Workbench typische Fragestellungen mithilfe strukturmechanischer Simulationen zu beantworten.

Der grundlegende Aufbau wurde in der vorliegenden dritten Auflage beibehalten. Im ersten Teil (Kapitel 1 bis 6) werden die Grundlagen der verschiedenen Analysemöglichkeiten dargestellt, im zweiten Teil (Kapitel 7 und 8) werden die wichtigsten Funktionen für die strukturmechanische FEM-Simulation mit ANSYS erklärt und der dritte Teil (Kapitel 9) enthält Übungen zu typischen Applikationen.



Unter <http://downloads.hanser.de> finden Sie die Geometrien und Musterlösungen zu den im Buch beschriebenen Übungen.

In den letzten Jahren sind mir weitere interessante Anwendungsbereiche ans Herz gewachsen, in die Sie in dieser Auflage durch neu hingekommene Übungen einen Einblick erhalten:

- Topologieoptimierung
- Lattice-Optimierung
- Prozesssimulation für den 3D-Druck

Ich danke allen Lesern für ihre Rückmeldungen zu den ersten beiden Auflagen, meinen Kollegen bei CADFEM für ihr offenes Ohr bei all meinen Fragen, und vor allem meiner Frau Gerda für ihre Geduld.

*Grafing, im Mai 2018*

Christof Gebhardt



# 1

## Vorteile der simulationsgetriebenen Produktentwicklung

Das Umfeld, in dem sich die heutige Produktentwicklung befindet, erfährt immer schnellere Zyklen. Die Anforderungen von Kundenseite steigen, die Komplexität von technischen Systemen nimmt zu. Steigende Variantenvielfalt und höhere Qualitätsanforderungen zwingen zu einer verbesserten Produktqualität. Gleichzeitig treten neue Konkurrenten auf den Weltmarkt, welche die traditionelle Produktentwicklung zu deutlich niedrigeren Kosten bewerkstelligen können.

Herausforderungen

Um sich unter diesen verschärften Wettbewerbsbedingungen behaupten zu können, müssen alle Anstrengungen unternommen werden,

- die Entwicklungszeiten zu verringern,
- die Herstellkosten zu senken,
- die Innovation und Kreativität zu steigern,
- und eine höhere Qualität zu erzielen.

Die Verkürzung der Entwicklungszeit erlaubt es, mit einem Produkt schneller am Markt zu sein, und ermöglicht einen schnelleren Produktwandel. Besonders bedeutsam ist eine rasche Prototypenentwicklung. Prof. Bullinger stellte in der Zeitschrift Technica fest, dass häufig 25 % der Entwicklungszeit für die Erstellung von Prototypen aufgewendet wird und dass bei 60 % der Prototypen die Fertigungszeit mehrere Monate in Anspruch nimmt.

Entwicklungszeit

### ■ 1.1 Zahl der Prototypen reduzieren

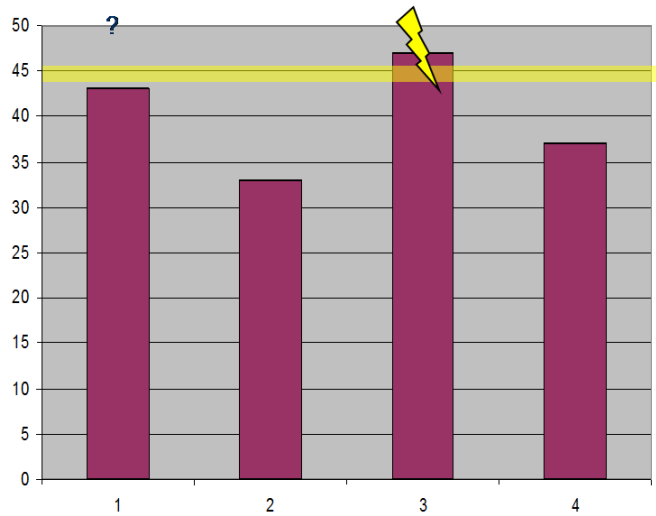
Die FEM-Simulation erlaubt es, die Anzahl der Prototypen deutlich zu reduzieren. Bereits während der Entwicklung können in frühen Phasen des Entwurfs die wesentlichen Eigenschaften überprüft werden. Gerät z. B. der Maschinentisch einer Werkzeugmaschine in Resonanz, weil die Eigenfrequenz in der Nähe der Anregungsfrequenz des Antriebes liegt, sind tief greifende Änderungen notwendig. Anstatt solche Probleme erst am realen Prototypen festzustellen, wo Änderungen sehr zeit- und kostenintensiv sind, werden durch entwicklungsbegleitende Überprüfungen per FEM Problemzonen noch vor dem Bau eines

Zahl der Prototypen reduzieren

Prototypen sichtbar. Mit dem Einsatz der FEM-Simulation werden weniger Änderungen notwendig und die Entwicklungszeiten verkürzen sich dadurch drastisch.

Aufwendige Versuche

Ein wichtiger Aspekt, der zur Verkürzung der Entwicklungszeit beiträgt, ist, dass problematische Bereiche nicht mühsam in mehreren Versuchen ermittelt werden müssen. Im realen Versuch tritt beispielsweise bei einer bestimmten statischen Belastung oder nach einer bestimmten Anzahl von Lastzyklen ein Versagen eines Bauteils auf. Damit ist in der Regel der Versuch zu Ende und die maximale ertragbare Last ermittelt. Man sieht, welcher Bereich das Versagen verursacht hat (z. B. Anriss an einer Kerbe; Messpunkt 3, siehe Bild 1.1), und kann entsprechende Konstruktionsänderungen vornehmen. In einem nächsten Versuch wird dann die maximal ertragbare Last der verbesserten Struktur ermittelt. Leider kann es jetzt geschehen, dass die neue, verbesserte Variante nur knapp bessere Werte ergibt, da das Spannungsniveau in anderen Bereichen der Struktur (hier Messpunkt 1, siehe Bild 1.1) ähnlich hoch ist, im ersten Versuch jedoch nicht erkannt werden konnte. Der große Vorteil des Versuchs ist, dass er für klare Versuchsbedingungen genaue Werte ergibt, ein Gesamtüberblick über das Bauteilverhalten gerade hinsichtlich Festigkeit ist jedoch schwer zu erreichen. Selbst bei Verwendung von Dehnmessstreifen muss die Lage der DMS im Vorfeld schon richtig eingeschätzt werden, weil man auch mit falscher oder fehlender Positionierung eines Messpunktes kritische Bereiche nicht erkennt.



**Bild 1.1** Ertragbare Belastung an vier verschiedenen Messpunkten

Weniger Durchläufe

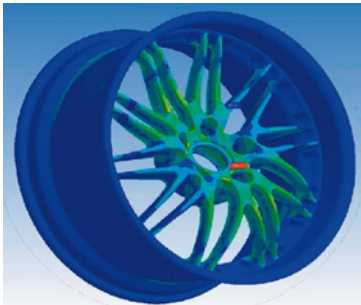
Im Vergleich hierzu liefert die Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode einen besseren Gesamtüberblick. Innerhalb der zu untersuchenden Baugruppe werden überall die Spannungen ermittelt und dargestellt, sodass in einem einzigen Durchlauf nicht nur ein einziges lokales Spannungsmaximum erkannt und bearbeitet werden kann, sondern auch alle weiteren Bereiche, deren Spannungsniveau sich in kritischen Regionen befindet.

Bei der Breyton Design GmbH entwickelt ein kleines Team von wenigen Ingenieuren Leichtmetallräder und Fahrwerkskomponenten für die Automobilindustrie. Gefertigt wird in Osteuropa, Test und Abnahme finden in Deutschland statt. Vor der Einführung der FEM-Simulation musste jede Design-Verifikation an realen Prototypen mit einem Biegeumlaufversuch durchgeführt werden. Die Zeit zur Beschaffung von Guss-Prototypen war und ist zeitaufwendig; mehrere Wochen sind hier nicht unüblich. Auch die Durchführung der Versuche braucht einige Zeit: Um die Streuung der im Versuch ermittelten Lebensdauer auszumerzen, werden mehrere Tests an gleichen Bauteilen durchgeführt. Insgesamt führte der hohe Aufwand bei der Beschaffung der Prototypen und im Versuch dazu, dass die Entwickler mit dieser traditionellen Methode erst sehr spät im Entwicklungsprozess auf eine zu geringe Lebensdauer aufmerksam wurden.

Ausgelagerte Fertigung

Mit der Einführung von ANSYS Workbench wird heute ein „virtueller Biegeumlaufversuch“ direkt am 3D-CAD-Modell durchgeführt (siehe Bild 1.2). Kritische Belastungen werden so rechtzeitig erkannt. Über eine Design-Studie mit zwei bis drei konstruktiven Änderungen kann innerhalb eines halben Tages ein verbessertes, validiertes Design ermittelt werden.

Virtueller Versuch



**Bild 1.2** Lebensdauerbewertung an Autofelgen

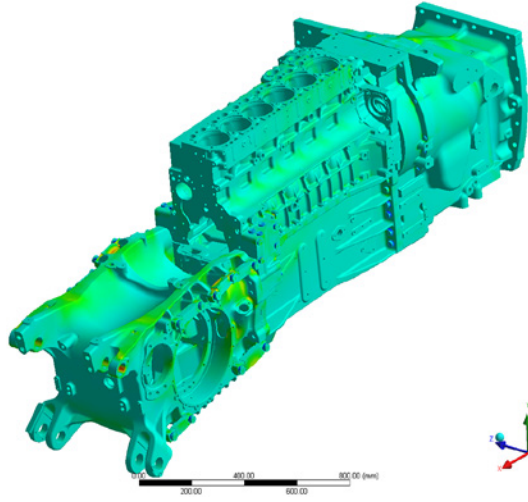
## ■ 1.2 Kosten einsparen

Die Kosten eines Produktes werden vielfach auch durch das Material mitbestimmt. Die Stahlpreise haben sich seit 2000 mehr als verdoppelt, der zunehmende Ressourcenbedarf wird langfristig ein sinkendes Preisniveau für Rohstoffe verhindern. Die FEM-Berechnung erlaubt es, Bauteile hinsichtlich Festigkeit zu überprüfen. Überdimensionierungen gehören damit der Vergangenheit an. Überflüssiges Material kann eingespart und das Gewicht minimiert werden.

Materialkosten



Beispiel AGCO FENDT:  
Durch Optimierung des mittragenden Antriebsstrangs bei Traktoren kann Material eingespart werden.



**Bild 1.3** Spannungsverteilung eines Traktor-Antriebsstrangs

Fertigungskosten  
senken

Gerade bei schnell bewegten Strukturen wie z. B. Bestückungsautomaten oder Robotern kann dadurch der Antrieb verkleinert werden, was zusätzliche Kostenreduzierungen nach sich zieht. Geringeres Gewicht erfordert geringe Antriebsleistung, sodass auch der Energieverbrauch reduziert wird. Als mögliche Alternative können kostengünstigere oder leichtere Werkstoffe (Kunststoffe, Leichtmetalle) in einer Simulation sehr schnell auf ihre Tauglichkeit getestet werden.

Die in ANSYS Workbench enthaltene Materialdatenbank ist mit einem Grundstock von Materialien verschiedener Gruppen (Metalle, Keramik etc.) ausgestattet, kann aber einfach um die unternehmensspezifisch bevorzugten Materialien erweitert werden. Vom Anbieter, der CADFEM GmbH, wird eine kostenfreie Materialdatenbank mitgeliefert, die ca. 250 vorwiegend metallische Werkstoffe enthält.

Fertigungskosten  
senken

Neben dem Materialeinsatz selbst spielt auch die Verarbeitung eine wichtige Rolle. Große Schweißstrukturen, bei denen Wandstärken reduziert werden können, helfen nicht nur, Gewicht einzusparen, sondern minimieren auch die Größe der Schweißnähte und damit Fertigungskosten.

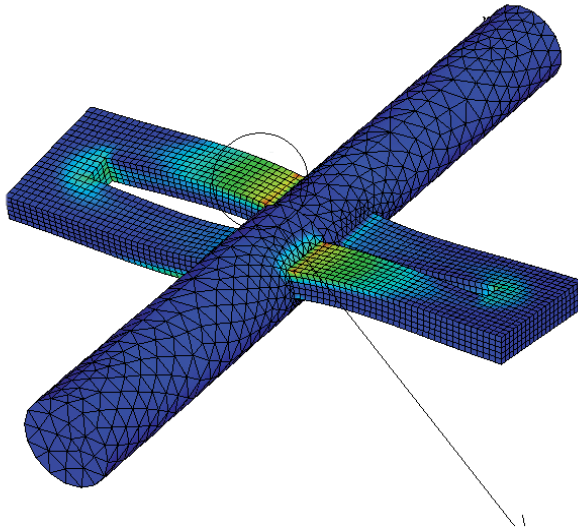
## ■ 1.3 Produktinnovationen fördern

Innovation und  
Kreativität

Durch den zunehmenden Wettbewerb muss die traditionelle Entwicklung, die auch von den (internationalen) Mitbewerbern zunehmend beherrscht wird, in den Bereichen Innovation und Kreativität gestärkt werden. Nur durch eine höhere Produktivität kann ein höheres Kostenniveau ausgeglichen werden. Moderne Entwicklungswerkzeuge wie CAD

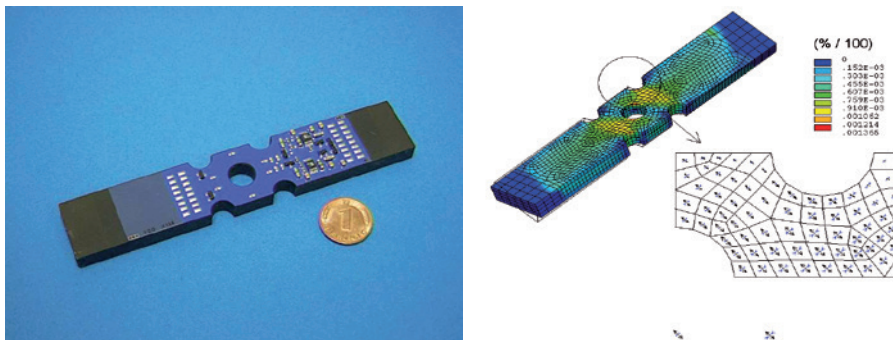
und Simulation ermöglichen es durch ihre Schnelligkeit, auch einmal unkonventionelle Wege auszuprobieren. So konnte durch Berechnungen nachgewiesen werden, dass der bei elektronischen Baukörpern traditionell aufgeklebte oder verschraubte Kühlkörper durch einen Kühlkörper mit Clip ersetzt werden kann. Neben reduziertem Material- und Montageaufwand wurde auch eine einfachere Herstellung in Blech möglich.

Von der Prinzipstudie zum Produkt



**Bild 1.4** Konzeptstudie für einen Drehwinkelsensor

In einem anderen Anwendungsfall sollte bei VDO ein neuer Sensor zur Ermittlung von Torsion entwickelt werden. Die Besonderheit: Andere Lasten als Torsion sollten das Messergebnis nicht beeinflussen. Außerdem sollte die Bauform klein sein, um unter beengten Platzverhältnissen zum Einsatz kommen zu können. In einer Prinzipstudie wurden verschiedene Strukturen untersucht, bei denen Torsionsbelastungen zu eindeutigen DMS-Messergebnissen führen. Mit der in Bild 1.4 gezeigten Variante wurde diese Bedingung erreicht, allerdings war die Bauform noch zu groß. Die Geometrie wurde dann verändert, das Wirkprinzip aber beibehalten, sodass auch die zweite Bedingung – kleine Bauform – erreicht werden konnte (Bild 1.5).



**Bild 1.5** Umsetzung des erarbeiteten Prinzips als Produkt

Topologie-Optimierung  
zur Formfindung

Eine weitere Möglichkeit, neue, innovative Designs zu finden, ist die Topologie-Optimierung. Dabei wird ein Designraum definiert, von dem Material an den Stellen entfernt wird, an denen die Steifigkeit am wenigsten beeinflusst wird. Bei Gussbauteilen wird diese Methode in der Automobilindustrie als Standardverfahren bereits seit einigen Jahren eingesetzt. Doch auch im Werkzeugmaschinenbau werden zunehmend komplexe Maschinenbetten auf dieser Methode basierend entwickelt. Für den Rahmen einer C-Presse, der ursprünglich mit einer geschlossenen Rückwand entworfen wurde, wäre nach der traditionellen Methode – Bauchgefühl und Erfahrung – eine verbesserte Formgebung durch eine außen umlaufende Materialanordnung umgesetzt worden (Bild 1.6).

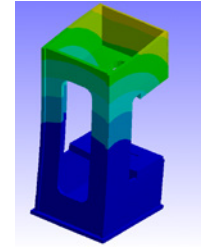
Setzt man die Topologie-Optimierung ein, kann man bei gegebener Belastung für diese Rückwand eine Materialreduktion (hier 30%) festlegen. Über mehrere Berechnungsschritte ermittelt ANSYS Workbench diejenige Form, die mit dem verbleibenden Restmaterial die beste Steifigkeit besitzt (Bild 1.7).

Ungewöhnliche Struktur

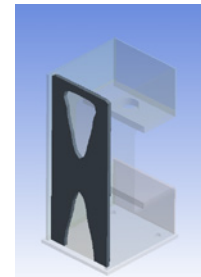
Diese auf den ersten Blick etwas ungewöhnliche Struktur erklärt sich dadurch, dass im mittleren Bereich der Rückwand die Biegung durch das Aufweiten der C-Presse am größten ist, während am oberen Ende ein Zugstab die seitliche Deformation des Rahmens verhindern hilft, wie man am Rahmen ohne Rückwand gut erkennen kann (Bild 1.8).

Geeignete Anwendungsgebiete

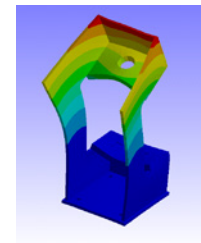
Solche Topologie-Optimierungen machen vor allem dann Sinn, wenn die Struktur der zu entwickelnden Bauteile belastungsgerecht konstruiert werden kann. Das ist beispielsweise bei Gussbauteilen der Fall, weil dort die Formgebung durch das Fertigungsverfahren vergleichsweise frei ist. Die Topologie-Optimierung wird beispielsweise beim Werkzeugmaschinenhersteller Heller in Nürtingen mit Erfolg dabei eingesetzt, hochkomplexe Maschinenbetten zu entwickeln.



**Bild 1.6** Klassische Konstruktion eines Pressenrahmens



**Bild 1.7** Topologie-optimierung für den Pressenrahmen-Rücken



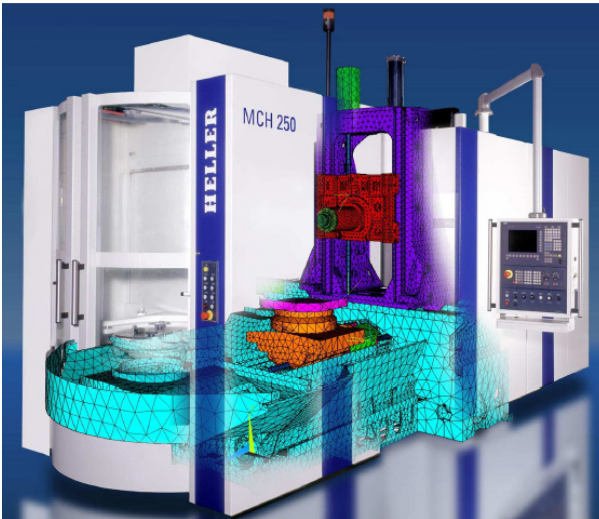
**Bild 1.8** Pressenrahmen-Verformung ohne Rückwand

## ■ 1.4 Produktverständnis vertiefen

Einfache Handhabung

Wichtig für die entwicklungsbegleitende FEM-Berechnung ist den Anwendern – gerade bei sporadischer Nutzung – eine einfache und effektive Handhabung. Gut gestaltete Systeme wie ANSYS Workbench haben einen logischen Aufbau, der den Anwender Schritt für Schritt über die Modelldefinition begleitet. Das Modell wird durch einen Strukturbaum definiert, der über Symbole zeigt, ob die Modelldefinition komplett und fehlerfrei

ist. Das FEM-System wird dadurch intuitiv bedienbar und kann nach kurzem Training sicher angewandt werden. Statt Berechnungsaufträge nach außen zu vergeben, kann der Entwicklungsingenieur mit solchen Werkzeugen heute seine Konzepte selbst unter die Lupe nehmen. Die Abstimmung mit Berechnungsdienstleistern entfällt, und mit den Erkenntnissen aus der Simulation erhält der berechnende Entwickler ein besseres Gespür für das Verhalten seiner Strukturen. Bei ähnlichen Aufgabenstellungen werden so von vornherein die effektiven Lösungsansätze bevorzugt, sodass der Einsatz der Simulation auch einen indirekten Wert – die Erfahrung des Anwenders – steigert.



**Bild 1.9** Simulationsgestützte Entwicklung einer Bearbeitungsmaschine

Gegenüber der traditionellen Vorgehensweise, Bauteile nach Erfahrungswerten, Berechnungshandbüchern oder Berechnungen von Hand auszulegen, hat die Simulation basierend auf FEM den Vorteil, dass sie vom Anwender schneller durchzuführen ist, dass die Genauigkeit höher ist und dass der Anwender ein besseres Verständnis für das Verhalten seiner Bauteile bekommt. Setzt der Entwickler die Simulation bereits sehr früh im Entwicklungsprozess ein, kann er mögliche Schwachstellen auch sehr früh erkennen und durch konstruktive Maßnahmen verhindern. Der frühzeitige Einsatz von FEM bereits in der Produktentwicklung hilft also, Prototypen einzusparen, Fehler zu vermeiden und damit die Faktoren Zeit und Kosten als Wettbewerbsvorteil für sich zu nutzen.

Vorteile



# 2

## Voraussetzungen

Damit die Simulation schnelle und gute Ergebnisse bringt, sollten einige Rahmenbedingungen erfüllt sein. Das beinhaltet menschliche, technische und organisatorische Komponenten.

### ■ 2.1 Grundlagenkenntnisse

Als wichtigste notwendige Voraussetzung ist eine gute Ingenieurausbildung der Anwender zu nennen. Die Grundlagen der technischen Mechanik wurden im Studium erarbeitet, das heißt, die Begriffe Vergleichsspannung, Kerbfaktor, Fließgrenze, Eigenfrequenz sollten bekannt sein. Diese Grundlagen werden in einem Einführungstraining in die FEM-Software meist wieder kurz aufgefrischt, das Verständnis für die Größen und Begriffe sollte allerdings latent vorhanden sein. Fehlen die entsprechenden Grundlagen, besteht die Gefahr, dass Berechnungsergebnisse kritiklos verwendet werden und somit keine Sicherheit bei den Aussagen erreicht werden kann. Neben der Ausbildung, ist der zweite, mindestens ebenso wichtige Faktor die persönliche Motivation des Anwenders. Sieht er die Einführung der FEM-Simulation lediglich als zusätzliche Arbeitsbelastung, wird er sie, so zeigt die Erfahrung, nicht oder nicht effektiv einsetzen, um diese zusätzliche Tätigkeit möglichst bald einstellen zu können. Jedoch werden jene Ingenieure, welche die FEM-Berechnung als Chance begreifen, den eigenen Entwurf besser zu verstehen und die Produkteigenschaften von vornherein zu optimieren, die Entwicklung insgesamt nach vorne treiben. Bei der Einführung eines FEM-Paketes ist es deshalb entscheidend, gut ausgebildete und motivierte Pilotanwender einzubinden.

Ausbildung

## ■ 2.2 Organisatorische Unterstützung

Organisatorische  
Unterstützung

Damit die Motivation erhalten bleibt und der Nutzen möglichst bald zu erreichen ist, kann das Management diesen Prozess unterstützen, indem es geeignete Rahmenbedingungen schafft. Dazu gehören die geeignete Software, ein Anbieter mit einem Schulungsprogramm, das nicht nur Software-Schulungen, sondern auch Technologie-Schulungen („Schrauben, Schweißnähte, Pressverbindungen“ ...) enthält, aber auch organisatorische Unterstützung. Die simulationsgetriebene Produktentwicklung erfordert eine gewisse Investition von Zeit (für die Simulation), um im Verlauf der Produktentstehung Zeit für Prototypen und Versuche einzusparen. Gerade in der Anfangsphase ist daher ein Zeitpuffer hilfreich, um dem Anwender die Chance zu geben, sich mit der neuen Thematik auseinanderzusetzen. Es ist entscheidend, dass die Projektverantwortlichen den Gesamtprozess betrachten, vom Entwurf bis zum funktionsfähigen Produkt, da die Vorteile nicht unmittelbar während der Konstruktion realisierbar sind, sondern sich erst im Laufe der Produktentwicklung, z. B. im Versuch oder im Einsatz, zeigen.

## ■ 2.3 Geeignete Soft- und Hardware-Umgebung

Weitere Voraussetzungen sind eine geeignete Soft- und Hardware-Umgebung. 3D-Modelle sind sozusagen die Eintrittskarte in die FEM-Simulation. Die gängigen Systeme sind Inventor, Creo Parametric, SolidWorks, SolidEdge, Unigraphics, CATIA und Creo Elements/Direct Modeling. Daneben gibt es eine Reihe weiterer Systeme wie HiCAD, Caddy oder Microstation. Allen diesen CAD-Systemen ist gemeinsam, dass Sie damit (unfacetierte) Volumenmodelle erstellen können.

3D-CAD

Die Datenübertragung solcher 3D-CAD-Modelle fand früher meist auf Basis einer sogenannten IGES-Datei statt. Das IGES-Format ist eine neutrale Schnittstelle, die es erlaubt, Oberflächen zu übertragen. Eine Zusammenfassung dieser Oberflächen zu Körpern wurde zwar vom Standard vorgesehen, aber von den wenigsten CAD-Anbietern implementiert. Daher war und ist die Übertragung von Volumengeometrie über IGES fehleranfällig und oft mit langer manueller Bereinigung der importierten Geometrie verbunden. Weitere flächenbasierte Austauschformate sind VDA-IS oder VDA-FS, die mit ähnlichen Problemen zu kämpfen haben.

Datenübertragung

Daher wurde in den 80er-Jahren ein neuer Standard namens STEP entwickelt, der 1994/95 schließlich in eine ISO-Norm 10303 mündete. Basierend auf STEP lassen sich Produktdaten zwischen verschiedenen Systemen austauschen, wozu eben auch 3D-Modelle gehören. Die beiden Anwendungsprotokolle 203 und 214 beschreiben das Format für die Übertragung von 3D-Volumengeometrie. Basierend auf STEP ist heute eine relativ zuverlässige

Übertragung von 3D-Volumen möglich, auch wenn in einigen Einzelfällen immer noch Übertragungsfehler vorkommen. Bei der Übertragung über STEP wird die Modellhistorie nicht mit übertragen. Ein mit STEP importiertes Modell hat also die Geometrie, aber keine Konstruktionselemente mehr, die diese Geometrie erzeugen. Sind Änderungen nötig, muss über neu zu erzeugende Bearbeitungsschritte am 3D-Modell Geometrie modifiziert werden, es lassen sich keine bei der erstmaligen Geometrieerzeugung verwendeten Features modifizieren, weil diese Historie des Modells bei der Übertragung abgeschnitten wird.

Beim Datenaustausch zwischen verschiedenen Unternehmen wird dieser Verlust manchmal bewusst eingesetzt, um Konstruktions-Know-how, das in den Konstruktionselementen enthalten ist, nicht nach außen zu geben. Für die Geometrieübertragung eines Ingenieurs, der FEM-Berechnungen durchführen will, bedeutet eine Geometrieübertragung basierend auf STEP, dass er zwar die Geometrie selbst für eine erste Berechnung mit hoher Wahrscheinlichkeit brauchbar übertragen kann, dass bei Geometrieänderungen aber alle auf der Geometrie basierenden Definitionen im FEM-Modell neu zugeordnet werden müssen. Für eine schnelle Untersuchung von geometrischen Varianten ist dies sehr störend.

Weitere Standardformate, die ähnlich STEP eine zuverlässige Geometrieübertragung realisieren, sind Parasolid (Datei-Extension \*.x\_t bzw. \*.x\_b) und ACIS (Datei-Extension \*.SAT). Parasolid und ACIS sind sogenannte Modellierkerne, die in verschiedenen CAD-Systemen die Beschreibung des 3D-Modells übernehmen, während das CAD-System selbst die Interaktion des Anwenders mit dem 3D-Kern übernimmt. Parasolid-basierende CAD-Systeme sind z. B. SolidWorks, SolidEdge oder Unigraphics; ACIS-basierende Systeme sind Inventor oder MegaCAD.

CAD-Kerne

Aufgrund der Beschränkungen der neutralen Formate wie IGES, STEP, Parasolid oder ACIS setzt ANSYS auf eine direkte Anbindung des FEM-Berechnungsmodells an die CAD-Geometrie. Die aktive Geometrie des CAD-Modells – das kann sowohl eine Baugruppe als auch ein Einzelteil sein – wird direkt an ANSYS übergeben. Der Vorteil: Die Geometrieübertragung verläuft einfach, schnell und zuverlässig. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die Assoziativität des in ANSYS vorliegenden Geometriemodells mit dem CAD-Modell. Wenn Änderungen am CAD-Modell vorgenommen werden, können diese Änderungen vom CAD-System nach ANSYS übertragen werden. Alle geometriebasierenden Definitionen in ANSYS, wie beispielsweise das Aufbringen von Lasten oder Lagerungen, werden automatisch auf die neue Geometrie adaptiert. Während der Anwender bei Verwendung neutraler Schnittstellen solche Geometriezuordnungen neu vornehmen muss, wird bei der Direktschnittstelle von ANSYS Workbench zum CAD-System diese Zuordnung automatisch aktualisiert, sodass die Berechnung einer Variante in einem Bruchteil der Zeit zu machen ist.

Das Betriebssystem der verwendeten Arbeitsplatzrechner ist heute in der Regel Windows in der 64-Bit-Ausführung. Einige CAD-Systeme sind sogar ausschließlich unter Windows verfügbar (SolidWorks, SolidEdge, Inventor). Neben dem Betriebssystem sollte auch die Hardware angepasst sein. Selbst die größte Motivation lässt irgendwann nach, wenn aus falsch verstandener Sparsamkeit ungeeignete Rechner verwendet werden müssen, die den Anwender ausbremsen, während für geeignete Rechner heute geringe Kosten anfal-

Betriebssystem



len. Eine typische Konfiguration beinhaltet heute 8 Kerne und 64 GB RAM, während ambitionierte Anwendungen bereits auf Workstations mit 36 Kernen und 768 GB RAM, schnellen SSDs und mehreren Grafikkarten zur beschleunigten Gleichungslösung gut bedient werden können. Darüber hinaus ermöglichen Cluster-Systeme eine skalierbare Performance, um sowohl extrem detailreiche und damit auch genaue Simulationen auszuführen, als auch rechenintensive Simulationen zu beschleunigen, sowie den Durchsatz für eine Vielzahl von Variationen einer Simulation (Sensitivitätsstudien, Optimierung) durch simultane Berechnungen wirtschaftlich zu realisieren.

Zur Drucklegung dieses Buches (Mitte 2018) hat sich darüber hinaus der Trend zu Cloud-Lösungen etabliert, die den flexiblen Zugriff auf in Rechenzentren ausgelagerte Workstations und Compute-Server realisieren. Aufgrund der großen Datenmengen werden die Simulationen komplett „in der Cloud“ durchgeführt und visualisiert, lediglich die Ergebnisinformationen (Grafiken, Animationen, Berichte) werden zum Anwender transferiert. Durch die Spezialisierung von Cloud-Anbietern auf die Belange der Simulation (3D-Grafik, hohe Datenmenge, Interaktion von mehreren Prozessen) ist eine hohe Performance sichergestellt. Flexible Mietmodelle für einen einzelnen Rechner ab einem Tag Nutzungszeit bis hin zur dauerhaften Hardware-Nutzung für ganze Simulationsteams sichern Simulationsanwendern mit verschiedensten Anforderungen eine schnelle Reaktionsfähigkeit und den bedarfsgerechten Zugriff auf die optimale Hardware für jede anfallende Aufgabe.

# 3

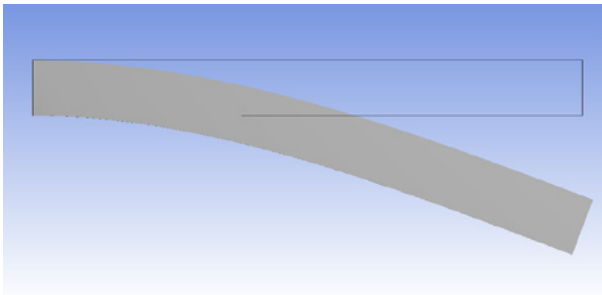
## Grundlagen der FEM

Wenn ein Bauteil berechnet werden soll, hat man grundsätzlich die Möglichkeit, in der Literatur nach entsprechenden geschlossenen Lösungen zu suchen, um über eine Gleichung das physikalische Verhalten eines Bauteils zu beschreiben. So lässt sich z.B. für einen Biegebalken die Gleichung

$$u = F \times l^3 / 3EI$$

finden, mit der die Durchbiegung berechnet werden kann.

Geschlossene Lösung



**Bild 3.1** Biegebalken – Deformation

Bei komplexeren Geometrien – und dazu gehört schon eine vergleichsweise einfach aufgebaute Geometrie wie der Flansch in Bild 3.2 – stößt diese Vorgehensweise schnell an ihre Grenzen, weil es keine geschlossenen Lösungen mehr gibt.

### ■ 3.1 Grundidee

Die Grundidee ist daher, diese komplexe Geometrie in einzelne Teilbereiche (die sogenannten Elemente) zu zerlegen. Jeder Teilbereich ist einfach beschreibbar (z.B. hinsichtlich seines Verformungsverhaltens). Die Einzellösungen der einzelnen Bereiche (Elemente) werden aufsummiert, um die Lösung für das Gesamtsystem zu erhalten. Nachdem die

Grundidee der FEM

Anzahl der Teillösungen endlich ist, leitet sich aus dieser Grundidee der Name **Finite-Elemente-Methode** (FE-Methode oder FEM) ab. Die Verbindung der einzelnen Elemente besteht an den sogenannten Knoten, d. h. Punkten an den Ecken, manchmal auch auf den Verbindungslinien dazwischen.

Die Grundgleichung der Statik lautet:

$$K \times u = F$$

(F: Kraft; K: Steifigkeit; u: Verschiebung)

Verformung berechnen

Diese Grundgleichung kennt jeder Ingenieur als Federgleichung. Man kann sich also vorstellen, dass jedes einzelne Element mit solchen Federgleichungen beschrieben wird. Für jeden Knoten ergeben sich dabei drei Unbekannte, die Verschiebungen in die drei Koordinatenrichtungen. Dadurch ergibt sich ein Gleichungssystem.

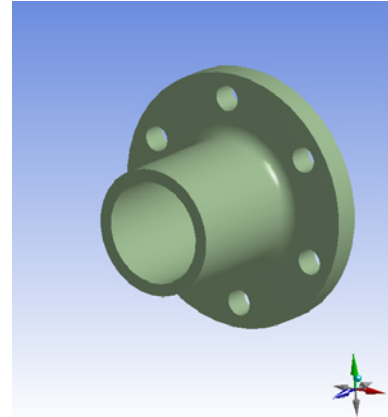
$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \cdot \left. \begin{array}{c} u_{y_1} \\ \phi_{z_1} \\ \cdot \\ u_{y_i} \\ \phi_{z_j} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \right\}$$

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\}$$

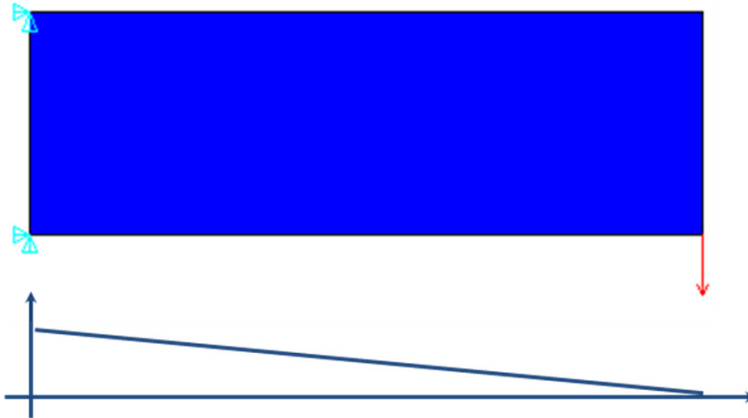
Spannungen ableiten

Dieses kann durch iterative oder direkte Gleichungslöser gelöst werden, sodass die Verschiebungen für jeden Knoten vorliegen. Anschließend wird durch ein Materialgesetz, im einfachsten Fall durch ein lineares Materialgesetz nach Hook  $\sigma = \varepsilon \times E$ , die Spannung aus den Verschiebungen abgeleitet. Dieses Ableiten der Spannungen aus den Verschiebungen ist von großer Bedeutung, wie an einem einfachen Prinzipmodell gezeigt werden soll.

Ein Biegebalken sei links fest eingespannt und rechts mit einer Kraft nach unten belastet. Dabei ergeben sich Biegespannungen, die von rechts nach links linear ansteigen, weil das Widerstandsmoment konstant ist und das Biegemoment mit dem Hebelarm linear ansteigt (siehe Bild 3.3).



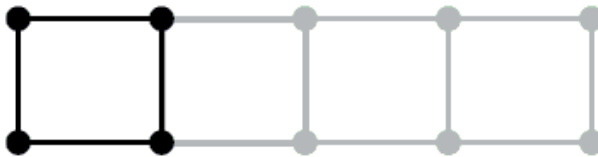
**Bild 3.2** Einfach, aber trotzdem zu komplex für eine analytische Lösung



**Bild 3.3** Biegebalken – Spannungsverlauf

Verwendet man einen einfachen Finite-Elemente-Ansatz, könnte man diesen Biegebalken in vier Elemente aufteilen (man spricht dann auch von „vernetzen“, siehe Bild 3.4).

Theoretische Lösung



**Bild 3.4** Zerlegung des Biegebalkens in vier Finite Elemente

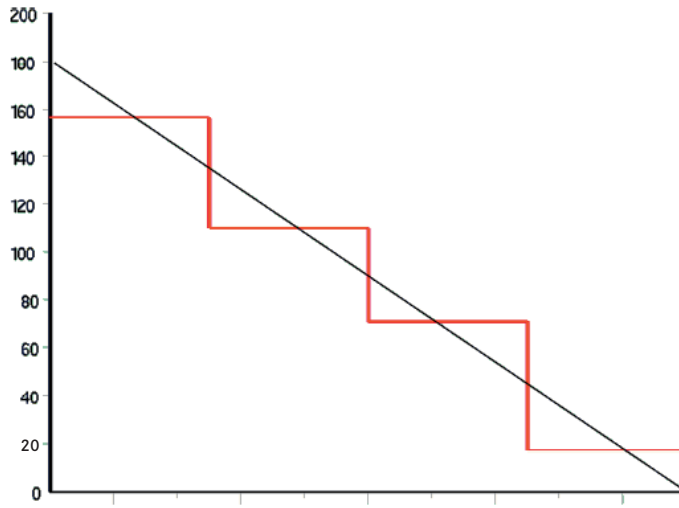
Innerhalb eines Elementes könnten die Verschiebungen über eine lineare Gleichung beschrieben werden:

$$u(x) = ax + b$$

Zur Berechnung der Spannungen innerhalb eines Elementes wird das Hooke'sche Gesetz  $\sigma = \epsilon \times E$  verwendet, wobei mit  $\epsilon = \Delta l / l$  die Dehnung aus den Verschiebungen abgeleitet wird. Für eine lineare Funktion  $u(x) = ax + b$  für die Verschiebungen ergibt sich mit der Ableitung dann ein konstanter Wert für die Spannung innerhalb eines Elementes.

Einfacher FEM-Ansatz

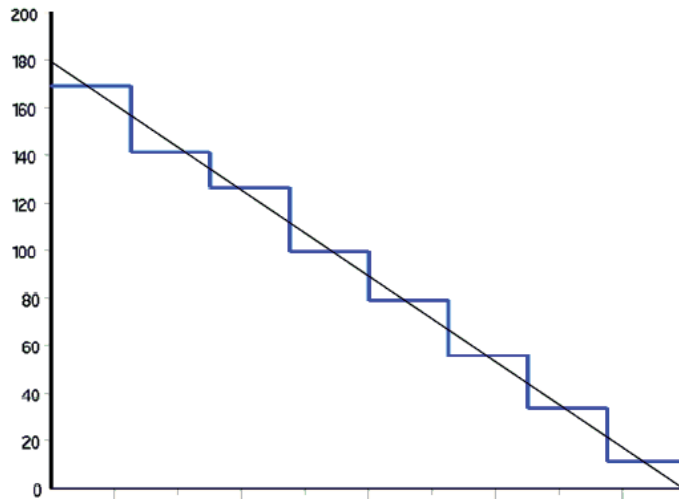
Demzufolge wird der Spannungsverlauf mit konstanten Werten für die Biegespannung abgebildet. Von der Einspannstelle links bis zum freien Ende ergibt sich damit ein Spannungsverlauf wie in Bild 3.5 dargestellt.



**Bild 3.5** Spannungsverlauf mit vier einfachen Elementen

Näherungsansatz

Der über die Länge des Biegebalkens eigentlich lineare Spannungsverlauf wird mit den hier verwendeten vier Elementen nur sehr grob abgebildet. Mit halbiert Elementgröße wäre der Verlauf schon etwas besser zu erkennen (siehe Bild 3.6).



**Bild 3.6** Spannungsverlauf mit mehr Finiten Elementen

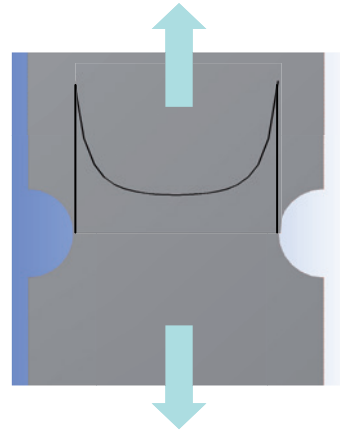
Betrachtet man den Maximalwert an der Einspannstelle links, sieht man, dass mit der groben Einteilung der Spannungswert unterhalb des korrekten Wertes liegt. Mit feinerer Einteilung wird diese Abweichung geringer. Mit zu geringer Netzdichte ist der Spannungswert zu niedrig und steigt mit feinerer Netzdichte an. Diese Aussage ist deshalb von hoher praktischer Bedeutung, weil mit einer unpassenden Vernetzung zu niedrige (optimis-

tische) Spannungen berechnet werden. Das kann bedeuten, dass aufgrund einer zu groben Vernetzung kritische Spannungen nicht als solche erkannt werden.

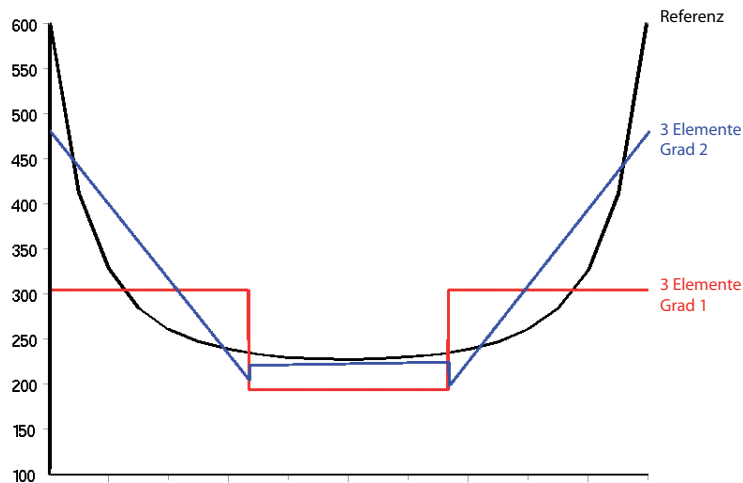
Bei einem gekerbten Flachstab ist dieser Effekt sehr deutlich erkennbar (siehe Bild 3.7).

Der Spannungsverlauf weist zu den Kerben hin einen sehr starken Gradienten auf. Verwendet man über den Querschnitt nur drei Elemente mit linearer Funktion für die Verschiebung, sind die Spannungen innerhalb eines Elementes konstant, wodurch sich ein ungenauer Maximalwert und Verlauf der Spannungen ergibt (rot, Grad 1, siehe Bild 3.8).

Verwendet man stattdessen Elemente mit parabolischer Funktion für die Verschiebungen (blau, Grad 2, siehe Bild 3.8), können lineare Spannungsverteilungen innerhalb eines Elementes abgebildet werden, sodass der Verlauf, aber auch der Maximalwert der Spannungen deutlich besser berechnet werden können.



**Bild 3.7** Spannungsverlauf an den Kerben



**Bild 3.8** Spannungsverlauf an den Kerben mit Finiten Elementen

In der praktischen Anwendung der FEM mit ANSYS Workbench werden keine Volumenelemente mit linearer Funktion für die Verschiebungen – man nennt diese auch Ansatzfunktion – eingesetzt, weil damit erst bei sehr starker Netzverfeinerung eine gute Genauigkeit erreichbar wäre. Stattdessen werden in der Regel Elemente mit parabolischer Ansatzfunktion verwendet. Für eine lineare Spannungsverteilung (z. B. über die Wandstärke eines Gehäuses unter globaler Biegung, Zug oder Druck) reicht ein einzelnes Element aus, den Spannungsverlauf hinreichend gut zu beschreiben. Bei lokalen Spannungs-