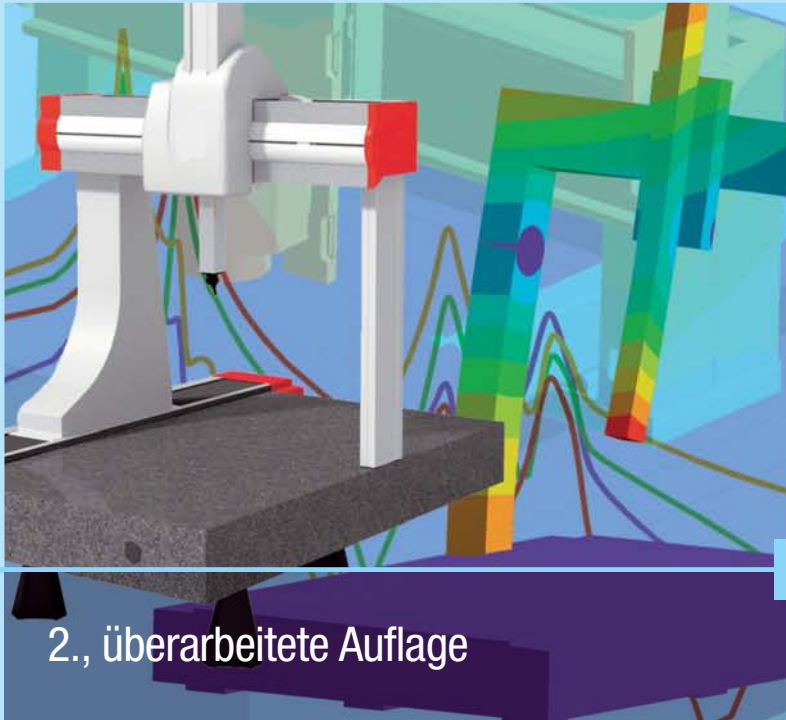


Christof Gebhardt

# Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench

Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik



2., überarbeitete 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

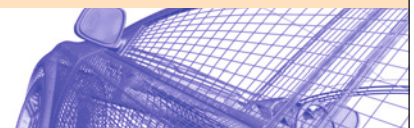
**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



**Der monatlich erscheinende Newsletter versorgt Sie mit News zu aktuellen Büchern aus den Bereichen CAD, CAM, CAE und PDM.**

- Buchtipps – so entgeht Ihnen keine Neuerscheinung!
- Autorenportraits
- Blog-News – die wichtigsten Online-Portale und Social-Media-Gruppen der Branche
- Veranstaltungshinweise
- Fachartikel
- Umfragen

**Gleich kostenlos 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

2., überarbeitete 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 benutzt 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.

© 2014 Carl Hanser Verlag München

Gesamtlektorat: Julia Stepp

Sprachlektorat: Kathrin Powik, Lassan

Herstellung: Andrea Reffke

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Titelillustration: © 3D-Messmaschine Universal von Coord3, Bruzolo, Italien (Vertrieb: Zaske Software & Technik GmbH, Bad Camberg)

Satz: Kösel, Krugzell

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN 978-3-446-43919-1

E-Book-ISBN 978-3-446-43956-6

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

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	IX
<b>1 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 Voraussetzungen</b>	7
2.1 Grundlagenkenntnisse	7
2.2 Organisatorische Unterstützung	8
2.3 Geeignete Soft- und Hardware-Umgebung	8
<b>3 Grundlagen der FEM</b>	11
3.1 Grundidee	11
3.2 Was heißt Konvergenz?	16
3.3 Was heißt Divergenz?	17
3.4 Genauigkeit	18
<b>4 Anwendungsgebiete</b>	21
4.1 Nichtlinearitäten	22
4.1.1 Kontakt	24
4.1.2 Nichtlineares Material	25
4.1.3 Geometrische Nichtlinearitäten	27
4.2 Statik	28
4.3 Beulen und Knicken	35
4.4 Dynamik	38
4.4.1 Modalanalyse	38
4.4.2 Angeregte Schwingungen	42
4.4.3 Fortgeschrittene modalbasierte Dynamik	44
4.4.4 Nichtlineare Dynamik	52

4.5	Topologie-Optimierung	65
4.6	Betriebsfestigkeit	66
4.7	Composites	73
4.8	Weitergehende Simulationen	77
4.8.1	Temperaturfelder	77
4.8.2	Strömung	78
4.8.3	Elektromagnetische Felder	79
4.8.4	Gekoppelte Analysen	80
4.8.5	Systemsimulation	82
4.9	Robust-Design-Optimierung	84
<b>5</b>	<b>Standardisierung und Automatisierung</b>	89
5.1	Generische Lastfälle	89
5.2	Skriptprogrammierung	91
5.3	Makrosprache Mechanical APDL	93
5.4	FEM-Simulation mit dem Web-Browser	94
<b>6</b>	<b>Implementierung</b>	97
6.1	Training	97
6.2	Anwenderunterstützung	99
6.3	Qualitätssicherung	100
6.4	Datenmanagement	101
6.5	Hardware und Organisation der Berechnung	101
<b>7</b>	<b>Erster Start</b>	107
7.1	Analyse definieren	107
7.2	Berechnungsmodell und Lastfall definieren	110
7.3	Ergebnisse erzeugen und prüfen	113
<b>8</b>	<b>Der Simulationsprozess mit ANSYS Workbench</b>	117
8.1	Projekte	118
8.1.1	Systeme und Abhängigkeiten	119
8.1.2	CAD-Anbindung und geometrische Varianten	122
8.1.3	Archivieren von Daten	127
8.2	Analysearten	129
8.3	Technische Daten für Material	130
8.4	Geometrie	132
8.4.1	Modellieren mit dem DesignModeler	132

8.4.2	Geometrie erstellen	133
8.4.3	Analysen in 2D	143
8.4.4	Balken	145
<b>8.5</b>	<b>Modell</b>	148
8.5.1	Die Mechanical-Applikation	148
8.5.2	Geometrie in der Mechanical-Applikation	152
8.5.3	Koordinatensysteme	153
8.5.4	Virtuelle Topologie	156
8.5.5	Kontakte	156
8.5.6	Netz	165
<b>8.6</b>	<b>Setup</b>	187
8.6.1	Analyseinstellungen	187
8.6.2	Randbedingungen	189
8.6.3	Definitionen vervielfältigen	214
<b>8.7</b>	<b>Lösung</b>	216
8.7.1	Solver-Informationen	218
8.7.2	Konvergenz nichtlinearer Analysen	219
8.7.3	Wenn die Berechnung nicht durchgeführt wird	222
<b>8.8</b>	<b>Ergebnisse</b>	224
8.8.1	Spannungen, Dehnungen, Verformungen	224
8.8.2	Darstellung der Ergebnisse	228
8.8.3	Automatische Dokumentation – Web-Report	236
8.8.4	Schnitte	237
8.8.5	Reaktionskräfte und -momente	239
8.8.6	Ergebnisbewertung mit Sicherheiten	240
<b>8.9</b>	<b>Lösungskombinationen</b>	241
<b>9</b>	<b>Übungen</b>	243
9.1	Biegebalken	244
9.2	Scheibe mit Bohrung	246
9.3	Parameterstudie	248
9.4	Designstudien, Sensitivitäten und Optimierung mit optiSLang	252
9.5	Temperatur und Thermospannungen	264
9.6	Festigkeit eines Pressenrahmens	266
9.7	FKM-Nachweis	270
9.8	Presspassung	276
9.9	Hertz'sche Pressung	280
9.10	Steifigkeit von Kaufteilen	284
9.11	Druckmembran mit geometrischer Nichtlinearität	290
9.12	Elastisch-plastische Belastung einer Siebtrommel	293
9.13	Bruchmechanik an einer Turbinenschaufel	302
9.14	Schraubverbindung	310



9.15	Elastomerdichtung .....	313
9.16	Aufbau und Berechnung eines Composite-Bootsrumpfs .....	322
9.17	Beulen einer Getränkedose .....	333
9.18	Schwingungen an einem Kompressorsystem .....	340
9.19	Mehrkörpersimulation .....	346
9.20	Containment-Test einer Turbine .....	352
9.21	Falltest für eine Hohlkugel .....	359
9.22	Lineare Dynamik einer nichtlinearen Elektronikbaugruppe .....	365
9.23	Kopplung von Strömung und Strukturmechanik .....	374
9.24	Akustiksimulation für einen Reflexionsschalldämpfer .....	376
9.25	Schallabstrahlung eines Eisenbahnrades .....	380
9.26	Elektrisch-thermisch-mechanischer Mikroantrieb .....	385
9.27	Verhaltensmodell für die Systemsimulation einer Messmaschine ..	389
<b>10</b>	<b>Konfiguration von ANSYS Workbench .....</b>	<b>395</b>
10.1	Maßeinheiten und Geometriearten festlegen .....	395
10.2	Simulationseinstellungen .....	396
<b>11</b>	<b>Export von Daten .....</b>	<b>399</b>
11.1	Einbindung von alternativen Solvern .....	399
11.2	Export zu Excel .....	400
	<b>Index .....</b>	<b>403</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.

Dieses Praxisbuch vermittelt die notwendigen Grundlagen, um mit ANSYS Workbench typische Fragestellungen mithilfe strukturmechanischer Simulationen zu beantworten.

Der grundlegende Aufbau wurde in der vorliegenden zweiten 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.

Die Arbeitsabläufe wurden an den aktuellen Stand der Software (Version 15) angepasst und die Übungsbeispiele entsprechend aktualisiert.



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 Anwendungen ans Herz gewachsen, in die Sie in dieser Auflage durch neu hingekommene Übungen einen Einblick erhalten:

- Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM
- transiente Dynamik auf Basis modaler Superposition
- Linearisierung nichtlinearer Strukturen
- Schallabstrahlung und Akustik
- Modellordnungsreduktion zur Verwendung von reduzierten FEM-Modellen in der Systemsimulation
- Systematische Designvariation

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

*Grafing, im Januar 2014*

Christof Gebhardt