

Mahir B. Sayir, Jürg Dual, Stephan Kaufmann

Ingenieurmechanik 2

Deformierbare Körper

Mahir B. Sayir, Jürg Dual, Stephan Kaufmann

Ingenieurmechanik

Ingenieurmechanik 1

Grundlagen und Statik

Grundlagen: Bewegung eines materiellen Punktes – Geschwindigkeit –
Zur Kinematik starrer Körper – Kräfte – Leistung
Statik: Äquivalenz und Reduktion von Kräftegruppen – Parallele Kräfte und
Schwerpunkt – Ruhelage und Gleichgewicht – Lagerbindungen und
Lagerkräfte – Statik der Systeme – Statisch bestimmte Fachwerke –
Reibung – Seilstatik – Beanspruchung

Ingenieurmechanik 2

Deformierbare Körper

Spannungen – Verzerrungen – Linear elastisches Stoffverhalten –
Spezielle Biegung prismatischer Balken – Numerische Methoden –
Allgemeine Biegeprobleme – Torsion – Arbeit und Deformationsenergie –
Energiesätze und -verfahren – Stabilitätsprobleme, Knickung – Plastizität –
Bruchmechanische Grundlagen – Zeitabhängiges Materialverhalten

Ingenieurmechanik 3

Dynamik

Beschleunigung – Bewegungsgleichungen – Energiesatz –
Relativbewegungen – Kinetik starrer Körper – Schwingungen mit einem
Freiheitsgrad – Schwingungen mit mehreren Freiheitsgraden –
Dynamik einfacher kontinuierlicher Strukturen – Grundlagen der
analytischen Dynamik



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Mahir B. Sayir, Jürg Dual, Stephan Kaufmann

Ingenieurmechanik 2

Deformierbare Körper

Mit 235 Abbildungen, 49 Aufgaben und zahlreichen Beispielen



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Mahir B. Sayir, geb. 1940, studierte an der Abteilung Maschinenbau der TU Istanbul. Er doktorierte an der ETH Zürich bei Professor Ziegler, wurde am 1. Januar 1969 zum Assistenzprofessor für Mechanik gewählt und 1976 zum ordentlichen Professor befördert. Im Jahre 1985 war er „Lady Davis Visiting Professor“ am Technion in Haifa, Israel, und 1987 wurde er als „Russel Springer Honour-Professor“ des „Department of Mechanical Engineering“ der University of California nach Berkeley eingeladen. Von 1988 bis 2003 war er einer der drei Rektoren von CISM (International Center for Mechanical Studies) in Udine (Italien). Seine anfängliche theoretische Forschung begann er 1976 auch mit experimentellen Aspekten zu ergänzen und vor allem auf dynamische Probleme zu richten.

Jürg Dual, geb. 1957, studierte von 1976 bis 1981 an der ETH Zürich Maschinenbau, anschliessend Master of Science und Master of Engineering Abschluss in Mechanical Engineering an der UC Berkeley, USA. Nach dem Doktorat an der ETH Zürich bei Professor Sayir arbeitete er als Visiting Assistant Professor an der Cornell University in Ithaca, USA. 1989 kehrte er an die ETH Zürich zurück, zuerst als Assistenzprofessor, dann 1998 als ordentlicher Professor. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich von Schwingungen und Wellen, dem mechanischen Verhalten von Werkstoffen, sowie der Mikro- und Nanosystemtechnik.

Stephan Kaufmann, geb. 1954, studierte theoretische Physik an der ETH Zürich. Für das Doktorat bei Professor Brauchli wechselte er an das Institut für Mechanik der Abteilung Maschinenbau. Heute ist er wissenschaftlicher Adjunkt und Dozent am Zentrum für Mechanik ETH. Seine Arbeitsschwerpunkte sind verschiedene Aspekte des Computereinsatzes in Forschung und Unterricht.

1. Auflage November 2004

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2004

Der B. G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.teubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

ISBN 978-3-519-00484-4

ISBN 978-3-8351-9005-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-8351-9005-4

Vorwort

Das vorliegende Buch setzt den im ersten Band begonnenen Aufbau der Mechanik mit der Beschreibung des Verhaltens von deformierbaren Körpern fort. Der Inhalt entspricht dem zweiten Semester der dreisemestrigen Vorlesungsreihe, welche die Autoren für verschiedene Ausbildungsgänge an der ETH Zürich halten.

In den ersten drei Kapiteln werden die Grundbegriffe wie Spannungstensor, Verschiebungsvektor und Verzerrungstensor eingeführt, immer in enger Verbindung zwischen mathematischer Beschreibung (Lineare Algebra, Tensoren 2. Stufe, partielle Ableitungen) und physikalischer Bedeutung. Auch für diesen zweiten Band ist eine sorgfältige Abstimmung mit dem Inhalt einer parallel geführten Mathematikvorlesung notwendig, welche die neuen Begriffe einführt.

Die Verknüpfung von Spannungs- und Verzerrungstensor in Form der Stoffgleichungen wird dann am Beispiel des linear elastischen Körpers beschrieben. Die Stoffgleichungen, die Gleichgewichtsbedingungen für die Spannungskomponenten und die kinematischen Relationen, welche den Verschiebungsvektor mit dem Verzerrungstensor verknüpfen, erlauben zusammen mit geeigneten Anfangs- und Randbedingungen die mathematisch fundierte Formulierung eines kontinuumsmechanischen Problems. Damit wird z.B. eine Voraussetzung für das erfolgreiche Arbeiten mit der heute so verbreiteten Methode der Finiten Elemente geschaffen. Die Stoffgleichungen sind weiterhin ein aktives Forschungsgebiet der Kontinuumsmechanik, vor allem wenn es um grosse Deformationen, höhere Temperaturen und komplexe Materialien geht. Als Beispiel für fortgeschrittenere Themen im Zusammenhang mit Stoffgleichungen wird kurz auf das Verhalten von Faserverbundwerkstoffen eingegangen, welche anisotrope Eigenschaften besitzen.

Die folgenden Kapitel beschränken sich vorwiegend auf Balken und Stäbe. Diese sind ein geeignetes Beispiel, um schwierige kontinuumsmechanische Konzepte an konkreten und technisch wichtigen Elementen zu veranschaulichen. Die bekannten analytischen Näherungslösungen erlauben die einfache Lösung von Problemen für viele Belastungsarten. Für die Torsion ermöglicht die Membrananalogie ein anschauliches Verständnis für das Verhalten von komplizierteren Querschnitten. Die Näherungslösungen werden ergänzt zuerst durch eine einfache Behandlung mittels Finiter Elemente, dann durch Energiesätze und -verfahren. Letztere basieren auf dem Theorem der virtuellen Arbeiten, welches seinerseits auf dem Prinzip der virtuellen Leistungen beruht, das im Band Ingenieurmechanik I eingeführt wurde. Energieverfahren, wie die Arbeitsgleichungen oder der Satz von Castigliano erlauben in vielen Fällen eine elegante Berechnung der gesuchten Grössen.

Kapitel zu Stabilitätsproblemen (Knicken), Plastizität, bruchmechanischen Grundlagen und zeitabhängigem Materialverhalten runden das Buch ab. Dabei stehen die Grundkonzepte im Zentrum. Es ist nicht zu erwarten, dass bereits in diesem frühen Stadium der Ausbildung alle diese fortgeschrittenen Themen in einer Vorlesung behandelt werden können. Aber es wird dem Leser später leichter fallen, wenn er mit bekannter Terminologie in spezialisierte Literatur einsteigen kann. Das Buch ist darum auch geeignet als Ausgangspunkt bei Problemstellungen, welche mit den elementaren Methoden nicht gelöst werden können.

Dank der Festigkeitslehre, d.h. der kontinuumsmechanischen Theorie deformierbarer Körper, verfügt der Ingenieur über starke theoretische Mittel zur Lösung seiner konstruktiven Probleme. Damit ist er imstande, nicht nur die Festigkeit vorhandener Strukturen zu analysieren und vorauszuberechnen, sondern auch neue und elegantere konstruktive Lösungen zu finden. Dazu muss er sich bemühen, die Voraussetzungen, welche zur passenden Approximation, zur anwendungsfreundlichen Lösung, zur sinnvollen Modellbildung geführt haben, sorgfältig zu verstehen. Manche schwierige Stelle des vorliegenden Buchs dient dem Zweck, den Leser zu ermuntern, sich selbst Fragen zu stellen, um über die Suche nach der passenden Antwort seine Fähigkeiten zur Modellierung auszubauen.

Auch dieses Buch enthält am Schluss jedes Kapitels eine Anzahl von Aufgaben. Die Lösungen sowie weitere aktuelle Informationen zum Buch können auf der folgenden Website eingesehen werden: <http://www.zfm.ethz.ch/mechanik-buecher>

Viele haben durch Fragen, Korrekturen und Anregungen zu diesem Buch beigetragen. Wir danken vor allem Studierenden und Assistierenden, aber auch dem Teubner Verlag für die wiederum sorgfältige Herausgabe. Wir wünschen dem Leser viel Freude bei der Lektüre und hoffen, dass dieses Buch ihm als Grundlage und Anregung dient, anstehende Probleme in Beruf und Alltag kreativ mit fundierten Modellen anzupacken.

Zürich, im September 2004

Mahir B. Sayir, Jürg Dual, Stephan Kaufmann

Inhaltsverzeichnis

III	Deformierbare Körper	11
15	Spannungen	15
15.1	Definition und Zerlegung	15
15.2	Spannungszustand und Spannungsfeld	18
15.3	Der Spannungstensor	21
15.4	Der ebene Spannungszustand	30
15.5	Der Mohrsche Spannungskreis	33
15.6	Das räumliche Hauptachsenproblem	42
15.7	Spannungsfeld, Differentialgleichungen des Gleichgewichts	45
16	Verzerrungen	49
16.1	Dehnung und Schub	50
16.2	Ebenes Verschiebungsfeld und ebener Verformungszustand	55
16.3	Dreidimensionale Verformung	62
17	Linear elastisches Stoffverhalten	68
17.1	Beobachtungen im einachsigen Spannungszustand	69
17.2	Linear elastisches Verhalten im einachsigen Spannungszustand	74
17.3	Linear elastisches Verhalten im ebenen Spannungszustand	80
17.4	Räumliche Spannungszustände	83
17.5	Problemstellung der Kontinuumsmechanik	87
17.6	Temperaturdehnung	90
17.7	Anisotropes Materialverhalten	91
18	Spezielle Biegung prismatischer Balken	99
18.1	Abschätzung der Größenordnung der Spannungen	101
18.2	Deformationsmodell und Spannungsverteilung	103
18.3	Flächenmomente 2. Grades, Hauptachsen	108
18.4	Berechnung der Durchbiegung, Biegelinie	113
18.5	Statisch unbestimmte Biegeprobleme	119
19	Numerische Methoden	126
19.1	Federmodelle und endliche Differenzen	127
19.2	Finite Elemente	138
20	Allgemeinere Biegeprobleme	151
20.1	Spezielle Biegung und Zug oder Druck	151
20.2	Schiefe Biegung	155

20.3	Schubspannungen infolge Biegung	159
21	Torsion	168
21.1	Deformation und Spannungsverteilung bei Kreisquerschnitten	170
21.2	Zusammengesetzte Beanspruchung	178
21.3	Torsion bei Querschnitten beliebiger Gestalt	181
21.4	Torsion bei dünnwandigen Querschnitten	193
22	Arbeit und Deformationsenergie	209
22.1	Zur Definition der Arbeit	209
22.2	Deformationsarbeit und -energie eines Stabes bei Zug und Druck	217
22.3	Verzerrungsarbeit und -energie im einachsigen Spannungszustand	223
22.4	Deformationsarbeit und -energie bei Biegung	224
22.5	Deformationsarbeit und -energie bei Torsion	227
22.6	Räumliche Spannungszustände und zusammengesetzte Beanspruchung	230
23	Energiesätze und -verfahren	233
23.1	Theorem der virtuellen Arbeiten für spezielle Biegung	233
23.2	Die Arbeitsgleichungen und ihre Anwendung	238
23.3	Der Satz von Castigliano und seine Anwendung	246
23.4	Der Reziprozitätssatz von Maxwell, Symmetrie der Einflussmatrix	255
24	Stabilitätsprobleme, Knickung	258
24.1	Einleitung zu den Stabilitätsproblemen	259
24.2	Knickung als Verzweigungsproblem	269
24.3	Zur Stabilität deformierter Ruhelagen, eine Synthese	273
25	Plastizität	274
25.1	Spannungs-Dehnungsdiagramme im einachsigen Spannungszustand	275
25.2	Stäbe unter Zug- oder Druckbeanspruchung	277
25.3	Statisch bestimmte Biegeprobleme	282
25.4	Statisch unbestimmte Biegeprobleme	285
25.5	Fließbedingungen im räumlichen Spannungszustand	287
26	Bruchmechanische Grundlagen	293
26.1	Spannungskonzentration um ein Kreisloch	293
26.2	Weitere Fälle von Spannungskonzentration	297
26.3	Der Spannungsintensitätsfaktor	302
26.4	Rissfortpflanzung	306
27	Zeitabhängiges Materialverhalten	309
27.1	Kriechen	310
27.2	Relaxation	313

Anhang 1: Asymptotische Herleitung der elementaren Biegetheorie	315
Anhang 2: Zur Definition der Verzerrungsarbeit	319
Anhang 3: Zum Eindeutigkeitsatz der linearen Elastizitätstheorie.....	321
Literaturverzeichnis	323
Sachwortverzeichnis	325