

Herbert Balke

Einführung in die Technische Mechanik

Kinetik

Mit 93 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. habil. Herbert Balke
Technische Universität Dresden
Insitut für Festkörpermechanik
01062 Dresden
E-Mail: balke@mfk.mw.tu-dresden.de

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.

ISBN-10 3-540-26552-X Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN-13 978-3-540-26552-8 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
Printed in Germany

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 Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz: Digitale Druckvorlage des Autors
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Umschlaggestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 7/3100/YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Die „Einführung in die Technische Mechanik/Kinetik“ schließt an den vorliegenden Band „Einführung in die Technische Mechanik/Statik“ an. In der Statik wurden die Gleichgewichtsbedingungen belasteter starrer Körper untersucht. Der Inhalt der Kinetik besteht darin, unter Beachtung der Kinetik, d.h. der geometrisch-zeitlichen Beschreibung der Körperbewegungen, den Zusammenhang zwischen den Bewegungen und den damit verbundenen Lasten aufzuklären.

Inhalt und Umfang des Buches entsprechen im Wesentlichen meiner einsemestrigen Vorlesung für den Studiengang „Mechatronik“ an der Technischen Universität Dresden, orientieren sich aber auch stark am traditionellen Lehrstoff der Technischen Mechanik im Grundstudium für Maschinenbauingenieure an technischen Hochschulen und Universitäten.

Konzeptionell beruht die Kinetik in diesem Buch auf den beiden für beliebige Körper und Körperteile gültigen Grundgesetzen der Mechanik, der Impulsbilanz und der Drehimpulsbilanz. Dieses Konzept, das widerspruchsfrei die Gleichgewichtsbedingungen der Statik als Sonderfall einschließt, erlaubt es, beispielunterstützt von einfachen Situationen allmählich auf kompliziertere Probleme überzugehen und so die Fähigkeit zur mechanischen Modellbildung zu entwickeln. Bei paralleler Aneignung des erforderlichen mathematischen Wissens wird damit ein direkter Weg zum Verständnis der modernen Kontinuumsmechanik als Grundlage computergestützter Berechnungsmethoden eröffnet. Darüberhinaus unterstützt die gewählte Vorgehensweise die Bereitstellung der Grundlagen für den anschließenden Aufbau einer Feldtheorie, die es gestattet, zusammen mit den mechanischen Phänomenen auch thermodynamische und elektromagnetische Erscheinungen zu analysieren. Eine solche Theorie gewinnt zunehmend an Bedeutung, da immer häufiger technische Strukturen aus Werkstoffen mit physikalisch gekoppelten Eigenschaften, so genannte smarte oder intelligente Materialien, zum Einsatz kommen.

Die für das Verständnis der Kinetik erforderlichen Voraussetzungen umfassen außer den schon in der Statik benötigten Hilfsmitteln Kenntnisse in folgenden mathematischen Teilgebieten: Vektorrechnung, Kurvengeometrie, Linien- und Mehrfachintegrale, gewöhnliche lineare Differenzialgleichungen, Transformation kartesischer Koordinaten und homogene Gleichungssysteme einschließlich Eigenwertprobleme symmetrischer Matrizen.

Ein tieferes Eindringen in die Technische Mechanik ist nur durch das selbstständige Lösen entsprechender Übungsaufgaben möglich. Deshalb wird dem Leser empfohlen, die ausgeführten Beispiele zunächst ohne Zuhilfenahme der angegebenen Ergebnisse zu lösen.

Meinen verehrten Lehrern, den Herren Professoren H. Göldner, F. Holzweilig, G. Landgraf und A. Weigand, bin ich dafür verpflichtet, dass sie meine Begeisterung für das Fach „Technische Mechanik“ geweckt haben. Besonderer Dank gilt den Herren Dr.-Ing. J. Brummund, Prof. P. Haupt (Universität Kassel) und Prof. V. Ulbricht, mit denen die in den einführenden Lehrbüchern zum Teil vorhandenen Widersprüche bei der Darlegung der Grundlagen von Statik und Kinetik ausdiskutiert werden konnten. In dieser Entstehungsphase des Lehrbuchprojektes waren für mich auch die häufigen Gespräche mit Herrn Prof. R. Kreißig (Technische Universität Chemnitz) und Herrn Prof. H. Theilig (Hochschule Zittau/Görlitz) hilfreich. Herr Prof. S. Liebig hat mir freundlicherweise zahlreiche Diskussionen gewährt, die mich in meinen Entscheidungen über die Stoffauswahl bestärkten. Zur Aufnahme eines separaten Abschnittes über die Kinematik von Mehrkörpersystemen wurde ich von Herrn Dr.-Ing. S. Marburg angeregt. Das gesamte Kapitel zur Kinematik habe ich in Abstimmung mit dem Fachvertreter für Bewegungs- und Mechanismen-technik, Herrn Prof. K.-H. Modler, formuliert. Mit der Wahl des Beispiels zur Kinetik von Mehrkörpersystemen bin ich einem Wunsch von Herrn Prof. K. Reinschke (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie) gefolgt. Für zahlreiche Detailhinweise bedanke ich mich bei Frau Dr.rer.nat. E. Junkert, Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. R. Schmidt und Herrn Doz. Dr.-Ing. habil. D. Weber. Bei der Korrekturlesung der letzten Manuskriptversion wurde ich von den Herren Dipl.-Ing. C. Häusler, Dipl.-Ing. M. Hofmann, Dipl.-Ing. A. Liskowsky, Dipl.-Ing. P. Neumeister und Dr.-Ing. V.B. Pham unterstützt. Besonders Herr Dipl.-Ing. C. Häusler hat mich mit seiner kritischen Hinterfragung aller Zusammenhänge zu manchen Verbesserungen der Textabfassung veranlasst.

Dank gebührt Frau C. Pellmann, die den größten Teil meiner Bildvorlagen in eine elektronische Form gebracht hat. Die Herstellung des reproduktionsreifen Manuskriptes lag in den bewährten Händen von Frau K. Wendt. Bei der Text- und Zeichenverarbeitung von Herrn Dipl.-Ing. G. Haasemann unterstützt, hat sie mit unermüdlichem Einsatz nicht nur den Satz realisiert, sondern auch meine ergänzenden Bildvorlagen in die elektronische Fassung eingearbeitet. Hierfür bedanke ich mich ganz herzlich. Nicht zuletzt bin ich dem Springer-Verlag für die erwiesene Geduld und die gute Zusammenarbeit verbunden.

Dresden, im Herbst 2005

H. Balke

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Kinematik	
1.1 Kinematik des Körperpunktes	5
1.1.1 Kartesische Koordinaten	7
1.1.2 Natürliche Koordinaten	10
1.1.3 Zylinderkoordinaten	13
1.2 Kinematik des starren Körpers	19
1.2.1 Translation	19
1.2.2 Rotation um einen raumfesten Punkt	19
1.2.3 Ebene Bewegung	22
1.2.4 Allgemeine Bewegung	28
1.3 Kinematik von Mehrkörpersystemen	32
1.4 Relativbewegung des Körperpunktes	35
2 Kinetik	
2.1 Grundlegende Begriffe	41
2.1.1 Körper und Masse	41
2.1.2 Lasten	42
2.1.3 Arbeit, Leistung, Potenzial	45
2.2 Kinetik des starren Körpers bei Translation	50
2.2.1 NEWTONs Bewegungsgleichung	51
2.2.2 Mathematische Folgerungen aus NEWTONs Bewegungs- gleichung	64
2.3 Kinetik des starren Körpers bei beliebiger Bewegung	71
2.3.1 Impuls und Drehimpuls	72
2.3.2 Impuls- und Drehimpulsbilanz	73
2.3.3 Ebene Bewegung in einer Symmetrieebene	78
2.3.4 Statische Interpretation der Impuls- und Drehimpulsbilanz	82
2.3.5 Mechanischer Arbeits- und Energiesatz für die ebene Be- wegung	86
2.3.6 Drehung um eine feste Achse	90
2.3.7 Kinetische Schnittreaktionen des Balkens	97
2.3.8 Kinetik von Mehrkörpersystemen	101
3 Schwingungen von Systemen mit dem Freiheitsgrad 1	
3.1 Grundbegriffe	107
3.2 Freie Schwingungen	108
3.2.1 Ungedämpfte freie Schwingungen	109
3.2.2 Schaltungsarten für Systemparameter	113

3.2.3	Gedämpfte freie Schwingungen	115
3.3	Erzwungene Schwingungen	118
3.3.1	Ungedämpfte erzwungene Schwingungen	118
3.3.2	Gedämpfte erzwungene Schwingungen	119
4	Schwingungen von Systemen mit dem Freiheitsgrad 2	
4.1	Ungedämpfte freie Schwingungen	127
4.2	Ungedämpfte erzwungene Schwingungen	129
5	Stoßvorgänge	
5.1	Gerader zentrischer Stoß	136
5.2	Gerader exzentrischer Stoß.....	142
5.3	Schiefer zentrischer Stoß	146
6	LAGRANGEsche Gleichungen zweiter Art	
6.1	Beispiel eines alternativen Zugangs zur Bewegungsgleichung.....	153
6.2	Ebene Bewegung von Mehrkörpersystemen.....	156
7	Anwendungen der Kinetik starrer Körper im Raum	
7.1	Kinetische Kenngrößen des starren Körpers	165
7.1.1	Kenngrößen für die Translation	165
7.1.2	Kenngrößen für die Rotation	165
7.1.3	Kinetische Energie	179
7.2	Impulsbilanzen bei Benutzung kinetischer Kenngrößen...	181
7.2.1	Rotordrehung um eine raumfeste Achse.....	185
7.2.2	Rotordrehung bei bewegter Drehachse	189
	Literatur.....	193