Kerle/Pittschellis
Einführung in die Getriebelehre

Einführung in die Getriebelehre

Von Akad. Oberrat Dr.-Ing. Hanfried Kerle
Lehrbeauftragter für Getriebelehre an der
Technischen Universität Braunschweig
und Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Reinhard Pittschellis
Technische Universität Braunschweig

Mit 180 Bildern und 14 Tafeln

B. G. Teubner Stuttgart 1998

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Kerle, Hanfried:

Einführung in die Getriebelehre / von Hanfried Kerle und Reinhard

Pittschellis. – Stuttgart : Teubner, 1998

ISBN 978-3-519-06362-9

ISBN 978-3-322-96738-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-96738-1

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

© B. G. Teubner Stuttgart 1998

Gesamtherstellung: Präzis-Druck GmbH, Karlsruhe

Umschlaggestaltung: Peter Pfitz, Stuttgart

Vorwort

Als mit dem raschen Fortschreiten der Elektronik und der Datenverarbeitung das Zeitalter der Automatisierung anbrach, glaubten viele Ingenieure in der ersten Euphorie, daß der gesteuerte Antrieb und die Leistungen der Rechentechnik die Getriebelehre und ihre Grundlagen überflüssig machen würden wie die mechanische Uhr oder Schreibmaschine. Inzwischen ist man zu einer nüchternen Betrachtung der Dinge zurückgekehrt und hat erkannt, daß der Getriebelehre ein gleichrangiger Platz zwischen der Antriebstechnik und der Konstruktion gebührt. Dies wird auch häufig mit dem Begriff Mechatronik umschrieben.

Der Begriff Getriebelehre mag manchem erneuerungsbedürftig erscheinen. Wir haben uns jedoch bewußt an diesen Begriff gehalten, weil er in einer langen Braunschweiger Tradition steht, die eng verknüpft ist mit den Namen Bekir Dizioglu und Kurt Hain und ihren Lehrbüchern „Getriebelehre“ und „Angewandte Getriebelehre“.

Genau genommen existiert zum Fach „Getriebelehre“ bereits eine Reihe guter Lehrbücher. Wir sind dennoch der Meinung, daß für das vorliegende Buch ein Bedarf besteht. Im Zuge der allgemeinen Entwicklung von Rechnern, Rechnerleistung und Rechenprogrammen hat es in den letzten Jahren einen starken Wandel von den zeichnerisch-rechnerischen Methoden und Hilfsmitteln zur vorwiegend rechnergestützten Auswertung mit zusätzlicher grafischer Visualisierung der theoretischen Aussagen und Gleichungen der Getriebelehre gegeben. Diesem Wandel wurde in deutschen Lehrbüchern nur ansatzweise entsprochen. Wir haben deshalb ein ganzes Kapitel dieses Buches den numerischen Methoden gewidmet und begleitend zum Buch ein Programm für die kinematische Analyse ebener Getriebe entwickelt, das gegen eine geringe Versandgebühr auf dem Postweg oder kostenlos über das Internet zu beziehen ist.

Es genügt für ein Lehrbuch aber nicht, nur auf die Produktion numerischer Ergebnisse in Form von Tabellen oder Grafiken hinzuwirken; der Student oder die Studentin müssen erkennen und beurteilen können, ob ihre erreichten Ergebnisse nicht nur plausibel sind, sondern auch mit den Gesetzen der Mechanik übereinstimmen. Daher werden auch in diesem Buch die theoretischen Grundlagen ausführlich dargestellt, jedoch mußten wir einige klassische Verfahren der Getriebelehre auslassen, die heute weitestgehend durch numerische Verfahren abgelöst werden können.

Diese Beschränkung ermöglicht eine kompakte Darstellung der wichtigsten Grundlagen der Getriebelehre zu einem günstigen Preis. Der Inhalt dieses Buches bildet unserer

Meinung nach den Grundstock für die Ausbildung im Fach „Getriebelehre“ an Fachhochschulen und Universitäten.

Das Buch ist in 7 Kapitel gegliedert; jedes Kapitel enthält am Anfang eine Übersicht, die den Leser oder die Leserin auf den zu erwartenden Lernstoff vorbereiten soll. Die Kapitel 2 bis 6 enden mit einer Reihe von Übungsaufgaben, die der Lernkontrolle dienen. Die Lösungen zu den Übungsaufgaben finden sich im Anhang; dabei ist der erläuternde Text bewußt knapp gehalten, da die entsprechenden Lösungswege durch eingestreute Lehrbeispiele pro Kapitel bereits ausführlich beschrieben werden.

Das Buch ist nach einigen Jahren Lehr- und Übungserfahrung am Institut für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik (IFH) der TU Braunschweig aus einem Vorlesungsskript entstanden. Wir danken dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Hesselbach, für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung.

Eine engagierte Schar von Studenten hat die Bürde der Arbeit beim Schreiben und Zeichnen sowie bei der Entwicklung des Rechenprogramms mitgetragen: Yannick Bastian, Peter Bohnenstengel, Christoph Herrmann, Nikolai Hille, Uwe Jürgens, Stefan Scholz, Sven Olaf Siems und Gerald Männer als Koordinator. Ihnen allen gilt unser herzlicher Dank für ihre Motivation und Ausdauer.

Dem Teubner-Verlag, vertreten durch Herrn Dr. rer. nat. J. Schlembach, gebührt unser besonderer Dank für die angenehme Zusammenarbeit und gute Ausstattung des Buches.

Braunschweig, im November 1997

Hanfried Kerle

Reinhard Pittschellis

Inhalt

1 Einführung.....	1
1.1 Aufgaben und Inhalt der Getriebelehre	1
1.2 Anwendungsgebiete der Getriebelehre.....	3
1.3 Beispiel einer getriebetechnischen Aufgabe.....	10
1.4 Hilfsmittel	11
1.4.1 VDI-Richtlinien.....	11
1.4.2 Arbeitsblätter (Kurzrichtlinien).....	12
1.4.3 Getriebeprogramme.....	12
2 Getriebesystematik.....	13
2.1 Grundbegriffe.....	13
2.1.1 Übertragungsgetriebe	14
2.1.2 Führungsgetriebe.....	16
2.1.3 Lage der Drehachsen.....	16
2.2 Aufbau der Getriebe	18
2.2.1 Getriebeglieder.....	18
2.2.2 Gelenke	19
2.3 Getriebefreiheitsgrad (Laufgrad).....	23
2.4 Struktursystematik.....	29
2.4.1 Kinematische Ketten	30
2.4.2 Ebene Getriebe.....	35
2.4.2.1 Getriebe der Viergelenkkette	35
2.4.2.2 Kurvengetriebe.....	44
2.4.2.3 Räumliche Getriebe.....	47
2.5 Übungsaufgaben.....	50

3 Geometrisch-kinematische Analyse ebener Getriebe	55
3.1 Grundlagen der Kinematik	56
3.1.1 Bewegung eines Punktes	56
3.1.2 Bewegung einer Ebene	58
3.1.2.1 Geschwindigkeitszustand	59
3.1.2.2 Momentan- oder Geschwindigkeitspol	61
3.1.2.3 Beschleunigungszustand	62
3.1.2.4 Beschleunigungspol	64
3.1.3 Graphische Getriebeanalyse	66
3.1.3.1 Maßstäbe	66
3.1.3.2 Geschwindigkeitsermittlung	68
3.1.3.3 Beschleunigungsermittlung	71
3.1.3.4 Rastpolbahn und Gangpolbahn	72
3.2 Relativkinematik	74
3.2.1 Geschwindigkeitszustand	75
3.2.2 Beschleunigungszustand	78
3.3 Übungsaufgaben	82
4 Numerische Getriebeanalyse	85
4.1 Analytisch-vektorielle Methode	86
4.1.1 Iterative Lösung der Lagegleichungen	88
4.1.2 Erweiterung auf den mehrdimensionalen Fall	89
4.1.3 Berechnung der Geschwindigkeiten	90
4.1.4 Berechnung der Beschleunigungen	92
4.1.5 Berechnung von Koppel- und Vektorkurven	95
4.1.6 Die Bedeutung der JACOBI-Matrix	96
4.2 Modulmethode	98
4.3 Übungsaufgaben	106
5 Kinetostatische Analyse ebener Getriebe	110
5.1 Einteilung der Kräfte	110
5.1.1 Trägheitskräfte	112

5.1.2 Gelenk- und Reibungskräfte.....	113
5.2 Grundlagen der Kinetostatik	116
5.2.1 Gelenkkraftverfahren	117
5.2.1.1 Kraft- und Seileckverfahren	119
5.2.1.2 CULMANN-Verfahren	120
5.2.1.3 Kräftegleichgewicht an der Elementargruppe II. Klasse	121
5.2.1.4 Kräftegleichgewicht an der Elementargruppe III. Klasse.....	122
5.2.2 Synthetische Methode (Schnittprinzip)	127
5.2.3 Prinzip der virtuellen Leistungen (Leistungssatz)	131
5.2.3.1 JOUKOWSKY-Hebel	132
5.3 Übungsaufgaben.....	135
6 Grundlagen der Synthese ebener viergliedriger Gelenkgetriebe	139
6.1 Totlagenkonstruktion nach ALT	139
6.1.1 Kurbelschwinge.....	142
6.1.2 Schubkurbel	145
6.1.3 Auswahlkriterien	147
6.1.3.1 Übertragungswinkel	147
6.1.3.2 Beschleunigungsgrad	151
6.2 Lagensynthese	154
6.2.1 Wertigkeitsbilanz	154
6.2.2 Zwei-Lagen-Synthese	156
6.2.2.1 Beispiel eines Führungsgetriebes	156
6.2.2.2 Beispiel eines Übertragungsgetriebes.....	157
6.2.3 Drei-Lagen-Synthese.....	158
6.2.3.1 Beispiel eines Drehgelenkgetriebes als Übertragungsgetriebe	159
6.2.3.2 Beispiel eines Schubkurbelgetriebes als Übertragungsgetriebe	159
6.3 Übungsaufgaben.....	161
7 Räumliche Getriebe	163
7.1 Der räumliche Geschwindigkeitszustand eines starren Körpers.....	164
7.2 Der relative Geschwindigkeitszustand dreier starrer Körper.....	167

7.3 Vektorielle Iterationsmethode	171
7.4 Koordinatentransformationen.....	176
7.4.1 Elementardrehungen.....	176
7.4.2 Verschiebungen.....	180
7.4.3 Kombination mehrerer Drehungen.....	180
7.4.4 Homogene Koordinaten	185
7.4.5 HARTENBERG-DENAVIT-Formalismus (HD-Notation).....	186
Anhang.....	193
Lösungen zu den Übungsaufgaben.....	193
Lösungen zu Kapitel 2	194
Lösungen zu Kapitel 3	201
Lösungen zu Kapitel 4	208
Lösungen zu Kapitel 5	216
Lösungen zu Kapitel 6	226
Literaturverzeichnis.....	232
Sachverzeichnis	236

Formelzeichen und Einheiten

In diesem Buch werden Vektoren als gerichtete Größen, wie z.B. Kräfte $\vec{F}$, Geschwindigkeiten $\vec{v}$ und Beschleunigungen $\vec{a}$, mit einem obenliegenden Pfeil gekennzeichnet; gelegentlich verbindet ein solcher Pfeil zwei Punkte A und B und gibt dadurch Anfangs-

und Endpunkt des Vektors an: $\overrightarrow{AB}$. Mit $\overline{AB}$ ist dann der Betrag dieses Vektors (Strecke zwischen A und B) gemeint. Matrizen werden durch Fettdruck hervorgehoben. Für Matrizen und Vektoren bedeutet ein „T“ als Hochindex, z.B. $\mathbf{J}^T$, die transponierte oder Zeilenform; mit $\mathbf{J}^{-1}$ wird die Inverse (Kehrmatrix) von $\mathbf{J}$ bezeichnet.

Die Maßeinheiten richten sich nach dem SI-Einheitensystem mit den Grundeinheiten m für die Länge, kg für die Masse und s für die Zeit; abgeleitete kohärente Einheiten sind dann z.B. $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$ für die Kraft, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ für den Druck und $1 \text{ W} = 1 \text{ Nm/s}$ für die Leistung.

Rechenprogramm „MGA“

Das unter WINDOWS lauffähige Rechenprogramm „MGA“ (Modulare Getriebeanalyse) wurde als Begleitprogramm zum Buch für die kinematische Analyse ebener Getriebe mit Dreh- und Schubgelenken entwickelt und umfaßt sowohl die Modulmethode entsprechend der Richtlinie VDI 2729 für Getriebe auf der Grundlage von „Zweischlägen“ als auch die Iterationsmethode für Getriebe komplexerer Struktur.

Das Programm kann für eine nicht kommerzielle Nutzung vom erstgenannten Autor über den Postweg (Institut für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik, TU Braunschweig, Postfach 3329, 38023 Braunschweig) als Diskette gegen eine Gebühr von DM 5,00 (in Briefmarken) oder über die Internet-Adresse <http://www.ifh.ing.tu-bs.de> kostenfrei bezogen werden. Eine Weitergabe in vollständiger bzw. unveränderter Form ist zulässig, solange die Copyright-Vermerke nicht entfernt werden. Die Autoren übernehmen keine Garantie für Fehlerfreiheit des Programms und haften nicht für eventuelle Schäden, die durch die Anwendung des Programms entstehen.