

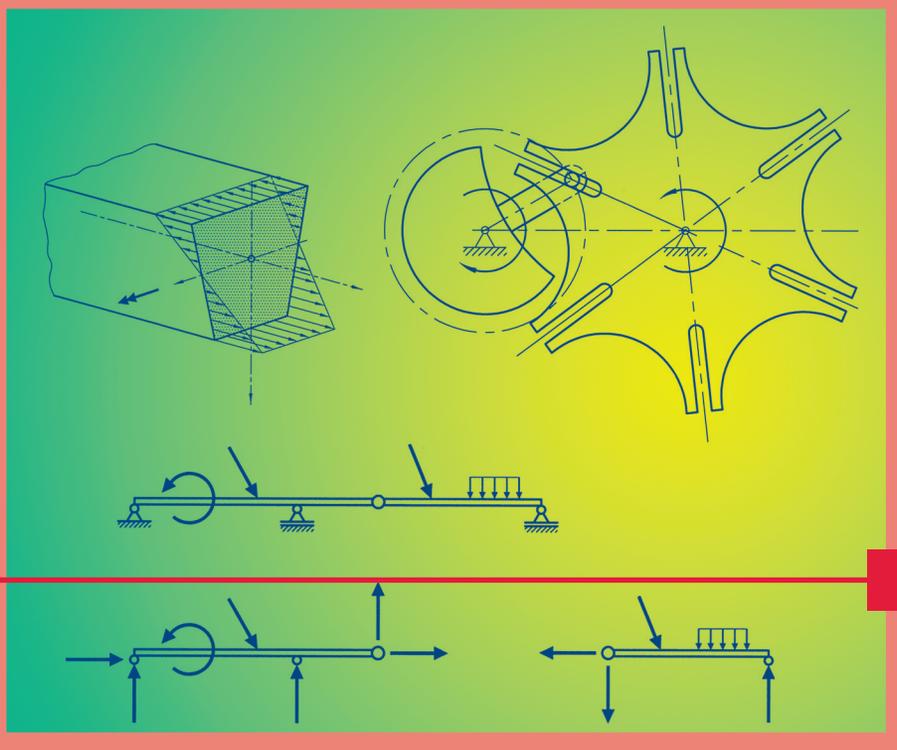
Martin Mayr

Technische Mechanik

Statik

Kinematik – Kinetik – Schwingungen

Festigkeitslehre



8. Auflage

HANSER



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

Martin Mayr

Technische Mechanik

Statik

Kinematik – Kinetik – Schwingungen

Festigkeitslehre

8. Auflage,
mit 474 Abbildungen

HANSER

Der Autor:

Professor Dr. Martin Mayr, Hochschule Augsburg, Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik



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 978-3-446-44570-3

E-Book-ISBN 978-3-446-44618-2

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 Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

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 Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München Wien

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, München

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, Rebranding, München, Germany

Titelillustration: Atelier Frank Wohlgemuth, Hamburg

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

Printed in Germany

Meiner Tochter Andrea gewidmet

Ein aufrichtiges Dankeschön meinen Mechaniklehrern

*Prof. Dr. Hans Georg Hahn
Prof. Dr. Dr. h. c. Horst Lippmann
Prof. Dr. Dr. h. c. Kurt Magnus
Prof. Dr. Dr. h. c. Heinz Neuber*

Allgemeines Vorwort

Dieses Lehrbuch beinhaltet den Stoff der Vorlesung „Technische Mechanik“ im Studium des Maschinenbaus an Fachhochschulen. Es besteht aus drei selbständigen Teilen: Statik – Kinematik, Kinetik, Schwingungen – Festigkeitslehre. Jeder Teil kann unabhängig vom anderen benutzt werden. Einheitlicher Aufbau, Querverweise und ein gemeinsamer Anhang fügen die drei Teile jedoch zu einem Ganzen zusammen. Der umfangreiche Anhang ist zum bequemen Nachschlagen in einem Beiheft untergebracht.

Bei der Darstellung ließ ich mich vor allem von didaktischen Gesichtspunkten leiten: optische Hervorhebung der Endformeln und Merksätze, 474 Bilder, 275 Fragen zum Verständnis, 104 vollständig gelöste Beispiele, 116 themenbezogene Übungsaufgaben, 43 „Prüfungsaufgaben“ (nach vier Schwierigkeitsgraden geordnet).

Die Antworten zu den Fragen sowie die Ergebnisse der Übungs- und Prüfungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten) befinden sich am Schluss des jeweiligen Buchteils. Aus Platzgründen konnten nicht die vollständigen Lösungen wiedergegeben werden. Lehrende erhalten sie auf Anfrage.

Weitere themenbezogene Beispiele und Prüfungsaufgaben sind in meinem Übungsbuch „Mechanik-Training“ zusammengestellt (mit ausführlichen Lösungen).

Der Gepflogenheit im Maschinenbau folgend sind die Bilder, falls nichts anderes vereinbart ist, in der Einheit mm bemaßt. In den Zahlenwertgleichungen wird fast ausschließlich mit kohärenten Einheiten gearbeitet, um langwierige Umrechnungen zu vermeiden. Die Berechnungen werden mit dem Taschenrechner ohne ein Zwischenrunden ausgeführt, das Endergebnis wird meist auf eine praktisch sinnvolle Stellenzahl gerundet wiedergegeben. Graphische Lösungen werden mit CAD erstellt und sind deshalb so genau wie analytische Lösungen.

Ich möchte allen, die mich bei der Arbeit zu diesem Buch unterstützt haben, ganz herzlich danken.

Hier sind in erster Linie Prof. Ulrich Thalsofer (Numerische Verfahren) und Prof. Ernst Schatz (Maschinenelemente, Thermische Strömungsmaschinen) zu nennen.

Wertvolle Unterstützung erhielt ich auch von Prof. Helmut Hiekel (Mechanik), Prof. Dr. Wolfgang Käser und Prof. Wilhelm Ruckdeschel (beide Fördertechnik, Maschinenelemente) sowie Prof. Dr. Peter Tautzenberger (Werkstofftechnik).

Korrektur lasen Prof. Dr. Werner Drexler (Mechanik, FH Kempten), Prof. Dr. Johann Fuchs (Mechanik), Prof. Dr. Frank Gießner (Feinwerktechnik, Mechanik), Dipl.-Ing. Hubert Keim (Konstruktion, Pfister GmbH Augsburg) und wiederum Prof. Ernst Schatz.

Übungsaufgaben und fachlichen Rat steuerten bei Prof. Dr. Ingo Bolling (Hydraulik-Pneumatik), Dipl.-Ing. Hubert Breyer (Unfallverhütung, GUV), Prof. Rudolf Bretzel (Mechanik, Luft- und Raumfahrt), Prof. Dr. Dieter Janasch (Maschinenelemente), Prof. Dr. Winfried Kochem (Konstruktion, FH Köln), Prof. Klaus Martin (Verbrennungsmotoren, Maschinendynamik), StD Georg Mühlbauer (Mathematik, Physik, Max-Reger-Gymnasium Amberg), Prof. Dr. Franz Obinger (Getriebetechnik, CAD), Prof. Hans Rebinger (Verbrennungsmotoren, Maschinendynamik), Prof. Dr. Willi Rößner (Werkzeugmaschinen), Prof. Dr. Joachim Voßiek (Maschinenelemente, Mechanik), Prof. Dr. Rainer Wieler (Verbrennungsmotoren, Fahrzeugtechnik) und Prof. Dr. Rolf Ziegler (Regelungstechnik).

Dipl.-Ing. Daniel Dierig, Dipl.-Ing. Oliver Herrmann, Dipl.-Ing. Jürgen Möller, Dipl.-Ing. Marco Vasciarelli, Dipl.-Ing. Eugen Weber und Dipl.-Ing. Stefan Wolf zeichneten mit großer Sorgfalt die Bilder. Herr Otto Reiser baute die Modelle, Herr Erber machte die Fotos. Die schlimmsten sprachlichen Ausrutscher verhinderten meine Frau Lydia und meine Tochter Andrea.

Mit Informationen unterstützten mich die Firmen KUKA, LIEBHERR, MAN und VON ROLL.

Allen Genannten nochmals herzlichen Dank.

Vorwort zur 8. Auflage

Der Inhalt der 7. Auflage wurde sorgfältig geprüft. Es konnten keine Unstimmigkeiten festgestellt werden; deshalb wurden für die 8. Auflage auch keine Änderungen vorgenommen. Es wurden lediglich ein paar Druckfehler korrigiert.

Ich danke allen Lesern für die aufmunternden Zuschriften und wertvollen Anregungen, die in kommenden Auflagen Berücksichtigung finden werden. Dem Carl Hanser Verlag danke ich für die stets gute Zusammenarbeit.

Augsburg, Mai 2015

Martin Mayr

Inhaltsverzeichnis

TEIL 1: Statik

1	Begriffe, Grundgesetze, Grundaufgaben	1
1.1	Die Kraft	1
1.2	Masse und Gewichtskraft	2
1.3	Das Gleichgewichtsaxiom	3
1.4	Das Wechselwirkungsgesetz	4
1.5	Die Verschiebbarkeit der Kraft längs ihrer Wirkungslinie	5
1.6	Kräfteparallelogramm und Krafteck	5
1.7	Die Zerlegung einer Kraft nach zwei nichtparallelen Wirkungslinien	5
1.8	Das Hebelgesetz von ARISTOTELES und ARCHIMEDES	6
2	Die resultierende Kraft eines zentralen ebenen Kräftesystems	8
2.1	Graphische Lösung	8
2.2	Analytische Lösung	8
3	Kräftepaar und Moment einer Kraft	10
3.1	Das Kräftepaar	10
3.2	Das Gleichgewicht zweier Kräftepaare	11
3.3	Parallelverschiebung einer Kraft	11
3.4	Das Moment einer Kraft bezüglich eines Punktes	11
3.5	Darstellung und Eigenschaften des Moments	12
3.6	Das Moment einer Kraft in Bezug auf den Koordinatenursprung	13
4	Die resultierende Kraft eines nicht zentralen ebenen Kräftesystems	14
4.1	Parallele Kräfte	14
4.2	Beliebige Kräfte	15
5	Lagerung von Körpern	16
5.1	Freimachen eines Körpers	16
5.2	Lagerungsarten ebener Körper	16
6	Ebene Kräftesysteme im Gleichgewicht	19
6.1	Drei nichtparallele Kräfte	19
6.2	Zerlegung einer Kraft nach drei Wirkungslinien	22
6.3	Beliebiges ebenes Kräftesystem (einschließlich Einzelmomente)	24
7	Lagerreaktionen von typischen ebenen Tragwerken	29
7.1	Balken auf zwei Stützen	29
7.2	Der eingespannte Balken	29
7.3	GERBER-Träger	30
7.4	Dreigelenkbogen	32
8	Das räumliche Kräftesystem	33
8.1	Komponenten einer Kraft im kartesischen Koordinatensystem	33
8.2	Das Moment einer Kraft und seine kartesischen Komponenten	34
8.3	Resultierende Kraft und resultierendes Moment	36
8.4	Lagerung räumlicher Körper	37
8.5	Räumliche Kräftesysteme im Gleichgewicht	37

9	Der Schwerpunkt	46
9.1	Körperschwerpunkt	46
9.2	Flächenschwerpunkt	49
9.3	Die GULDIN'schen Regeln	51
10	Innere Kräfte und Momente	54
10.1	Gerader Balken auf zwei Stützen mit Belastung quer zur Balkenachse	54
10.2	Der eingespannte Balken	62
10.3	GERBER-Träger	63
10.4	Bogenträger	64
10.5	Ebene Rahmen ohne Verzweigung	65
10.6	Ebene Rahmen mit Verzweigung	67
10.7	Wellen	69
10.8	Beliebige räumliche Träger	71
11	Ebene, statisch bestimmte Fachwerke	74
12	Reibung	77
12.1	Haft- und Gleitreibung	77
12.2	Seil- und Riemenreibung	80
12.3	Rollreibung (Rollwiderstand)	83
	Prüfungsaufgaben	85
	Antworten zu den Fragen	90
	Ergebnisse der Übungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten)	92
	Ergebnisse der Prüfungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten)	99

TEIL 2: Kinematik, Kinetik, Schwingungen

1	Einleitung	101
2	Ebene Punktbewegung	103
2.1	Bahn, Geschwindigkeit, Beschleunigung	103
2.2	Weg-Zeit-Diagramm	107
2.3	Grundaufgaben der Kinematik	108
2.4	Tangential- und Normalbeschleunigung (bzw. Bahn- und Zentripetalbeschleunigung)	110
2.5	Drehbewegung – lineare Bewegung	112
2.5.1	Kreisbahn	112
2.5.2	Umwandlung einer Drehbewegung in eine lineare Bewegung	113
2.6	Beschreibung der Bewegung in Polarkoordinaten	116
3	Räumliche Punktbewegung	120

Inhaltsverzeichnis	XI
4 Ebene Bewegung des starren Körpers (mit Hinweisen auf die räumliche Bewegung)	123
4.1 Translation (Parallelverschiebung)	123
4.2 Rotation (Drehung)	123
4.3 Beliebige Bewegung	123
4.3.1 Geschwindigkeit	124
4.3.2 Beschleunigung	125
4.4 Drehpol (Momentan-, Geschwindigkeitspol)	127
5 Relativbewegung	131
5.1 Translatorisch bewegtes Bezugssystem	131
5.2 Geschwindigkeit bei translatorisch und rotatorisch bewegtem Bezugssystem	132
5.3 Beschleunigung bei translatorisch und rotatorisch bewegtem Bezugssystem	134
6 Überlagerte Drehbewegungen	139
7 Arbeit, potentielle Energie, Leistung, Wirkungsgrad	141
7.1 Arbeit und potentielle Energie	141
7.2 Leistung	143
7.3 Wirkungsgrad	143
8 Die NEWTONschen Grundgesetze, D'ALEMBERTsche Trägheitskraft	145
9 Impulssatz und Schwerpunktsatz	151
10 Energiesatz	157
11 Trägheitsmomente	161
12 Kinetik der ebenen Bewegung des starren Körpers	164
12.1 Translation mit der Schwerpunktgeschwindigkeit	164
12.2 Rotation um eine Trägheitshauptachse durch den Schwerpunkt	165
12.2.1 Drehimpulssatz (Drallsatz)	165
12.2.2 Kinetische Energie	167
12.3 Analogie zwischen Translation und Rotation	168
12.4 Drehung um eine feste Achse oder um eine Achse durch den Momentanpol	170
12.5 Reduziertes Trägheitsmoment	171
12.6 Allgemeine ebene Bewegung	174
12.7 Gekoppelte Körper	177
13 Kinetik der Relativbewegung	180
14 Stoßvorgänge	183
14.1 Gerader zentraler Stoß	183
14.2 Schiefer zentraler Stoß	189
14.3 Gerader exzentrischer Stoß	190
14.4 Drehstoß	191
15 Schwingungen	192
15.1 Freie ungedämpfte Schwingung	193
15.2 Freie gedämpfte Schwingung	198

15.3	Erzwungene Schwingung	205
15.4	Maßnahmen gegen Resonanzerscheinungen	209
15.4.1	Verlagerung der Eigenfrequenz	209
15.4.2	Dämpfung und Schwingungsstörung	210
15.4.3	Schwingungsisolierung.	210
15.4.3.1	Aktive Isolierung	210
15.4.3.2	Passive Isolierung	213
15.4.4	Schwingungstilgung mittels Hilfsmasse.	214
	Prüfungsaufgaben	217
	Antworten zu den Fragen	221
	Ergebnisse der Übungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten).	225
	Ergebnisse der Prüfungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten).	231
 TEIL 3: Festigkeitslehre		
1	Aufgaben der Festigkeitslehre	233
2	Beanspruchungsarten	236
3	Spannungen	239
3.1	Normalspannung und Schubspannung.	239
3.2	Zugstab – einachsiger Spannungszustand	240
3.3	Räumlicher (dreiachsiger) Spannungszustand	242
3.4	Ebener (zweiachsiger) Spannungszustand (ESZ)	244
3.4.1	Spannungen für gedrehte Schnittflächen	245
3.4.2	Größe und kleinste Normalspannung sowie größte Schubspannung.	247
3.4.3	MOHRscher Spannungskreis	253
3.5	Spannungsoptik	256
4	Verformungen und Verzerrungen	262
4.1	Dehnung und Querdehnung	262
4.2	Schubverzerrung	263
4.3	Allgemeiner Verzerrungszustand.	263
5	Stoffgesetze	264
5.1	Zugversuch, Spannungs-Dehnungs-Diagramm, HOOKEsches Gesetz	264
5.2	Schubspannung und Schubwinkel	267
5.3	Elastizitätsgesetz für den ebenen Spannungszustand.	267
5.4	Wärmedehnungen und Wärmespannungen.	269
5.5	Anwendung der einachsigen Stoffgesetze auf statisch bestimmte und statisch unbestimmte Stabwerke	271
5.5.1	Spannungen und Verformungen in einem statisch bestimmten Stabwerk	271
5.5.2	Spannungen und Verformungen in einem statisch unbestimmten Stabwerk	273
6	Arbeit und elastische Energie.	276

7	Einfache Beanspruchungsfälle und Festigkeitsbedingungen	279
7.1	Zug und Druck	279
7.2	Flächenpressung.	281
7.3	Schub	281
8	Dünnwandige Ringe	285
8.1	Spannung unter Innen- oder Außendruck	285
8.2	Radiusänderung und Dehnung infolge Spannung und Temperaturänderung	286
8.3	Rotierender Ring	289
9	Dünnwandige Behälter	293
9.1	Kreiszylindrischer Behälter unter Innen- oder Außendruck	293
9.2	Kugelbehälter unter Innen- oder Außendruck.	294
10	Flächenmomente	297
10.1	Flächenmoment 1. Grades (statisches Moment der Fläche)	297
10.2	Flächenmomente 2. Grades	298
10.2.1	Definitionen und Beispiele	298
10.2.2	Parallelverschiebung der Bezugsachsen	301
10.2.3	Drehung der Bezugsachsen	301
10.2.4	Flächenmomente zusammengesetzter Flächen	302
11	Biegung.	308
11.1	Reine Biegung	308
11.1.1	Gerade Biegung	308
11.1.2	Schiefe Biegung.	312
11.2	Biegung mit Querkraft und weitere Näherungen (Technische Biegelehre)	315
11.3	Durchbiegung und Biegewinkel	321
11.4	Formänderungsarbeit.	327
12	Torsion	331
12.1	Kreiszylindrische Stäbe	331
12.2	Formänderungsarbeit	336
12.3	Dünnwandige einfach geschlossene Profile	337
12.3.1	Schubspannung	337
12.3.2	Torsionswinkel	338
12.4	Dünnwandige offene Profile.	342
12.5	Sonstige Querschnittsformen	343
13	Schub bei Querkraftbiegung	346
14	Knickung	353
14.1	Elastische Knickung nach EULER	353
14.2	Spannungsabsicherung bei Druckstäben	356
15	Dauer-, Zeit- und Betriebsfestigkeit	361
16	Festigkeitshypothesen	364
16.1	Die drei wichtigsten Hypothesen	365
16.2	Anstrengungsverhältnis	367
17	Zusammengesetzte Beanspruchung von Stäben	369

17.1 Biegung mit Normalkraft	369
17.2 Biegung und Torsion	372
17.3 Beliebige Lastkombination	377
18 Bauteilfestigkeit	380
18.1 Plastische Stützwirkung.	380
18.2 Kerbwirkung	381
18.3 Oberflächeneinfluss, Randschichtverfestigung, Umgebungseinfluss	384
18.4 Größeneinfluss	385
19 Dehnungsmessstreifen-Methode (DMS-Methode)	391
20 Satz von CASTIGLIANO	398
20.1 Statisch bestimmte Systeme	400
20.2 Statisch unbestimmte Systeme	401
Prüfungsaufgaben	406
Antworten zu den Fragen	415
Ergebnisse der Übungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten).	421
Ergebnisse der Prüfungsaufgaben (meist mit Lösungshinweisen und Zwischenwerten).	426
Literaturverzeichnis (im Text zitierte und ergänzende Literatur)	429
Verwendete Symbole (mit den vorzugsweise verwendeten Einheiten).	431
Sachwortverzeichnis	435