

Wolfgang H. Müller
Ferdinand Ferber

Technische Mechanik für Ingenieure

Mit zahlreichen Bildern sowie einer Multimedia-CD-ROM
Technische Mechanik mit mechANIma^{teach}

Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Inhaltsverzeichnis

1	Einordnung und Gliederung der Mechanik.....	1
2	Grundbegriffe.....	2
2.1	Zum Kraftbegriff.....	2
2.2	Einteilung der Kräfte, das Schnitt- und das Wechselwirkungsprinzip.....	5
3	Kräfte in einem Angriffspunkt.....	8
3.1	Zusammensetzen von Kräften.....	8
3.2	Zerlegen von Kräften in der Ebene: Komponentendarstellung.....	10
3.3	Gleichgewicht von Kräften in einem Angriffspunkt.....	13
3.4	Zentrale Kräftegruppe im Gleichgewicht: Haltekraft auf schiefer Ebene. . .	15
3.4.1	Lösung im kartesischen Koordinatensystem.....	15
3.4.2	Vektorielle Berechnung der Haltekraft.....	16
3.5	Zentrale Kräftegruppe im Gleichgewicht: Verkettete Pendelstäbe.....	17
3.5.1	Lösung im kartesischen Koordinatensystem.....	17
3.5.2	Stabkräfte vektoriell berechnet.....	18
3.6	Zentrale Kräftegruppen im Raum und Vergleich mit zwei Dimensionen. . .	19
4	Allgemeine Kräftesysteme: Gleichgewicht des starren Körpers.....	21
4.1	Moment beliebig verteilter Kräftegruppen in der Ebene.....	21
4.1.1	Zwei zueinander parallele Kräfte.....	21
4.1.2	Definition des Momentes einer Kraft.....	23
4.1.3	Zum Gesamtmoment ebener Kräftesysteme.....	24
4.1.4	Kräfte an einer Sechseckscheibe.....	25
4.1.5	Beispiel: Das Moment eines Kräftepaares.....	26
4.2	Gleichgewichtsbedingungen für beliebige Kräftesysteme in der Ebene. . .	27
4.3	Gleichgewicht illustriert an einem System von Pendelstäben.....	29
4.4	Vektorielle Deutung des Momentes.....	30
4.4.1	Definition des Momentenvektors.....	30
4.4.2	Bemerkungen zum Kreuzprodukt von Vektoren.....	31

4.4.3	Ein Quader unter dem Einfluss äußerer Kräfte.....	34
4.5	Allgemeine Kräftegruppen im Raum.....	35
4.5.1	Zusammenfassung der Gleichgewichtsbedingungen.....	35
4.5.2	Rahmen im Raum.....	36
4.6	Grafische Verfahren zur Behandlung allgemeiner 2-D-Kräftegruppen.....	37
4.6.1	Die CuLMANNsche Gerade.....	37
4.6.2	Das Seileck.....	39
5	Der Schwerpunkt.....	42
5.1	Schwerpunkt einer Gruppe paralleler Kräfte.....	42
5.2	Spezielle Linienkräfte (Streckenlasten): Gleichstrecken- und Dreieckslast..	44
5.3	Massenschwerpunkt eines Volumens.....	45
5.4	Zum Flächenschwerpunkt.....	48
5.4.1	Flächenschwerpunkt eines Dreiecks.....	50
5.4.2	Flächenschwerpunkt einer Parabel.....	52
5.4.3	Flächenschwerpunkt eines Kreises.....	53
5.5	Zum Linienschwerpunkt.....	54
6	Lager, Trag- und Fachwerke.....	57
6.1	Freiheitsgrade eines Körpers in der Ebene.....	57
6.2	Einwertige Lager.....	57
6.3	Zweiwertige Lager.....	58
6.4	Dreiwertige Lager.....	59
6.5	Tragwerke.....	59
6.6	Fachwerke.....	61
6.6.1	Definition des idealen Fachwerks.....	61
6.6.2	Prinzipielle Berechnung der Stabkräfte: Knotenpunktverfahren...	63
6.6.3	Der RiTTERsche Schnitt.....	64
6.6.4	Der CREMONAplan.....	66
7	Der biegesteife Träger.....	67
7.1	Schnittgrößen - Begriffsbildung.....	67
7.2	Zur Berechnung von Schnittgrößen am geraden Balken.....	69
7.2.1	Gerader Balken unter Einzellasten.....	69
7.2.2	Balken auf zwei Stützen unter Einzellast (Dreipunktbiegeprobe)...	71

7.2.3	Kragträger unter Einzellast und Momentenwirkung.....	72
7.2.4	Zusammenhang zwischen Belastung und Schnittgrößen.....	73
7.2.5	Integration der Differentialgleichungen für Querkraft- und Momentenfläche.....	74
7.2.6	Randbedingungen für die Querkraft- und für die Momentenfläche	74
7.2.7	Übergangsbedingungen für die Querkraft- und für die Momentenfläche.....	76
7.2.8	Momentenfläche bei komplizierteren Belastungen.....	77
7.2.9	Ein vergleichendes Beispiel.....	79
7.3	Zur Berechnung von Schnittgrößen am Rahmentragwerk.....	82
7.3.1	Der rechtwinklige Rahmen.....	82
7.3.2	Beliebiger gerader Träger.....	83
7.3.3	Der stetig gekrümmte Träger - Theorie.....	84
7.3.4	Der stetig gekrümmte Träger - ein Halbkreisbogen.....	86
8	Reibungsphänomene.....	87
8.1	Gleitreibung und Haftreibung.....	87
8.2	Reibung an der schiefen Ebene.....	91
8.3	Spezielle Anwendungen des Reibungsphänomens.....	93
8.3.1	Der PRONYsche Zaum (Reibungsbremse).....	93
8.3.2	Schraube.....	95
8.3.3	Umschlingungsreibung.....	99
8.3.4	Seilbremse.....	101
8.3.5	Reibung am Keil.....	103
9	Zum Arbeitssatz der Mechanik.....	104
9.1	Das Prinzip der virtuellen Arbeiten.....	104
9.2	Berechnung von Kräften und Momenten.....	106
9.3	Berechnung von stabilen Lagen.....	108
10	Festigkeitslehre.....	109
10.1	Einführung; Begriffe.....	109
10.1.1	Aufgabe der Festigkeitslehre.....	109
10.1.2	Beanspruchungsarten.....	110
10.1.3	Begriff der Spannung.....	111
10.2	Zug- und Druckbeanspruchung.....	113

10.2.1	Zug- und Druckspannung in Bauteilen.....	11;
10.2.2	Beispiel: Spannungsverteilung in einem sich konisch verjüngenden Stab.....	11'
10.2.3	Beispiel: Stab gleicher Festigkeit.....	11f
10.2.4	Die Längenänderung des Zug- oder Druckstabes.....	11<
10.2.5	Die Querdehnung des Zug- oder Druckstabes.....	12(
10.2.6	Verformung statisch bestimmter Stabsysteme.....	12
10.2.7	Statisch unbestimmte Stabsysteme.....	12:
10.2.8	Behinderte Wärmeausdehnung.....	12:
10.3	Schubbeanspruchung.....	12'
10.3.1	Spannungen infolge Schublast.....	12'
10.3.2	Verformung infolge Schublast.....	12'
10.4	Biegebeanspruchung des Balkens.....	12:
10.4.1	Trägheits- und Widerstandsmomente für einfache Querschnittsformen.....	12I
10.4.2	Trägheits- und Widerstandsmomente bei beliebigen, zusammengesetzten Querschnittsformen.....	13i
10.4.3	Die Normalspannungen im Balken infolge Querkraftbiegung.....	13:
10.5	Schub infolge Querkraft beim Biegeträger.....	13
10.5.1	Zur Berechnung der Schubspannungen.....	13
10.5.2	Berechnung der Schubspannungen für spezielle Trägerformen....	13
10.5.3	Schubspannungen im geschweißten, geklebten und genieteten Träger.....	13
10.5.4	Schubmittelpunkt.....	14
10.6	Die elastische Linie des Biegeträgers (Biegelinie).....	14
10.6.1	Die Differentialgleichung der Biegelinie.....	14
10.6.2	Beispiel: Der eingespannte Balken.....	14
10.6.3	Beispiel: Träger auf zwei Stützen.....	14
10.6.4	Anwendung auf statisch unbestimmte Systeme.....	14
10.6.5	MoHRsche Analogie; eine praktische, rechnerisch- zeichnerische Methode zur Ermittlung der Biegelinie.....	14
10.6.6	Wahre Auflager und Ersatzlager sind identisch.....	14
10.6.7	Schlusslinie als geneigte Gerade.....	14
10.6.8	Ein Zahlenbeispiel.....	15

10.6.9	Zusammenfassung: Auffinden der Biegelinie mit Hilfe der MOHRschen Analogie.....	151
10.6.10	Ermittlung von Verformungen mit Hilfe des Superpositionsprinzips.....	152
10.6.11	Schiefe Biegung (Begriff der Hauptträgheitsachsen).....	153
10.7	Axiale Verdrehung / Torsion.....	159
10.7.1	Schubspannungen am Kreisquerschnitt.....	159
10.7.2	Polares Trägheitsmoment für Kreisprofile.....	161
10.7.3	Dünnwandige geschlossene Hohlprofile.....	162
10.7.4	Beliebige offene Profile.....	166
10.7.5	Verformung infolge Torsion, Verdrehwinkel.....	167
10.7.6	Spezifischer Winkel, Drehfederkonstante.....	169
10.7.7	Darstellung des Torsionsmomentes (M_T -Fläche).....	170
10.8	Zusammengesetzte Beanspruchung.....	170
10.8.1	Einführung.....	170
10.8.2	Normalspannungen aus Normalkräften und Biegung.....	171
10.8.3	Schubspannungen aus Querkraft und Torsion.....	173
10.8.4	Begriff des Spannungstensors im ebenen Fall.....	174
10.8.5	Begriff des Spannungstensors im räumlichen Fall.....	178
10.8.6	Der MOHRsche Kreis.....	180
10.8.7	Vergleichsspannungen.....	185
11	Stabilitätsprobleme.....	186
11.1	Einführung.....	186
11.2	Ein erstes Stabilitätsproblem.....	187
11.3	Zur Phänomenologie von Stabilitätsproblemen.....	188
11.4	Die EuLERSche Knickgleichung - Gelenkige Lagerung.....	188
11.5	Die vier EuLERSchen Knicktypen.....	191
12	Die Dynamik einer einzelnen punktförmigen Masse.....	194
12.1	Kinematik eines einzelnen Massenpunktes.....	194
12.1.1	Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Eindimensionalen.....	194
12.1.2	Beispiele zur eindimensionalen Bewegung.....	198
12.1.3	Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Raum.....	202

12.1.4	Koordinatensysteme.....	20
12.2	Kinetik des Massenpunktes.....	20
12.2.1	Die NEWTONschen Gesetze.....	20
12.2.2	Dynamik des freien Massenpunktes.....	20
12.2.3	Geführte Bewegungen.....	21
12.2.4	Bewegungen unter dem Einfluss von Reibungskräften.....	21
12.3	Der Impulssatz.....<	21
12.4	Der Energiesatz der Mechanik..... T <	
12.5	Drehimpuls und Momentensatz.....;	2;
13	Die Dynamik von Massenpunktsystemen.....	2:
13.1	Kinematik.....	2:
13.2	Kinetik.....	2:
13.3	Impuls- und Schwerpunktsatz für Massenpunktsysteme.....	2
13.4	Drehimpulssatz für Massenpunktsysteme.....	2
13.5	Der Energie- und Arbeitssatz für Massenpunktsysteme.....	2
13.6	Eine Anwendung des Impuls- und des Energiesatzes: zentrische Stöße zwischen kugelförmigen Massen.....	2
13.7	Körper mit zeitveränderlicher Masse..... I	I
14	Die Dynamik des starren Körpers.....	I
14.1	Starrkörperkinematik.....<	<
14.1.1	Freiheitsgrade des starren Körpers.....!	!
14.1.2	Translation des starren Körpers.....:	:
14.1.3	Rotation des starren Körpers um eine feste Achse.....:	:
14.1.4	Allgemeine Bewegung des starren Körpers in der Ebene.....	
14.1.5	Zwei Beispiele zur Kinematik des starren Körpers.....	
14.1.6	Der Momentanpol.....	
14.2	Starrkörperkinetik.....	
14.2.1	Einleitende Bemerkungen.....	
14.2.2	Rotation eines starren Körpers um eine feste Achse.....	
14.2.3	Ein Beispiel zur Aufstellung der Bewegungsgleichung von um eine feste Achse rotierenden Körpern.....	
14.2.4	Energie- und Arbeitssatz bei Rotation um eine feste Achse.....	

14.2.5	Weitere Beispiele zur Bewegung starrer Körper: Reibungs- bremse und Walze.....	254
14.2.6	Die Analogie zwischen der geradlinigen Bewegung eines Massenpunktes und der Starrkörperrotation um eine feste Achse.	257
14.2.7	Kinetik von ebenen starren Körpern (Scheiben).....	258
14.2.8	Beispiel I zur Starrkörperbewegung von Scheiben.....	260
14.2.9	Beispiel II zur Starrkörperbewegung von Scheiben: Die ATWOODSche Fallmaschine.....	262
14.2.10	Beispiel III zur Starrkörperbewegung von Scheiben: Das Jojo... ..	263
14.2.11	Beispiel IV zur Starrkörperbewegung von Scheiben.....	264
14.2.12	Impuls-, Arbeits- und Energiesatz bei der Bewegung starrer Körper in der Ebene.....	266
14.2.13	Ein Beispiel zum Energiesatz ebener starrer Körper.....	267
15	Schwingungen.....	268
15.1	Grundbegriffe der Schwingungslehre.....	268
15.2	Freie, ungedämpfte Schwingungen mit einem Freiheitsgrad.....	271
15.2.1	Bewegungsgleichungen und ihre Lösung.....	271
15.2.2	Alternativen und ergänzende Betrachtungen mit Hilfe des Energiesatzes.....	273
15.2.3	Beispiele für die freie ungedämpfte Schwingung mit einem Freiheitsgrad.....	275
15.2.4	Federkonstanten.....	276
15.3	Freie, gedämpfte Schwingungen mit einem Freiheitsgrad.....	279
15.3.1	CoULOMBreibung.....	279
15.3.2	Geschwindigkeitsproportionale Reibung: Der lineare Dämpfer (Dashpot).....	281
15.3.3	Ein komplizierteres Beispiel für eine Schwingung mit Dämpfung.....	285
15.4	Angefachte Schwingungen.....	286
15.4.1	Angefachte Schwingungen ohne Dämpfung.....	286
15.4.2	Angefachte Schwingungen mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung.....	288
15.5	Schwingungen mit endlich vielen Freiheitsgraden.....	293
15.5.1	Motivation und Erinnerung.....	293
15.5.2	Bewegungsgleichung der freien, ungedämpften Schwingung mit zwei Freiheitsgraden.....	293

15.5.3	Erzwungene Schwingung mit zwei Freiheitsgraden.....	29S
16	Grundlagen der Kontinuumsmechanik.....	30I
16.1	Bilanzgleichungen der Masse.....	30<
16.1.1	Bilanzgleichung der Masse in globaler Form.....	30<
16.1.2	Massendichte und Umschreibung der globalen Massenbilanz	30 ¹
16.1.3	LEIBNizsche Regel zur Differentiation von Parameterintegralen und REYNOLDSsches Transportheorem.....	30
16.1.4	Lokale Massenbilanz in regulären Punkten.....	30
16.2	Bilanzgleichungen des Impulses.....	30
16.2.1	Bilanzgleichung des Impulses in globaler Form.....	30
16.2.2	Bilanzgleichung des Impulses in lokaler Form.....	30
16.3	Einfache Materialgleichungen.....	31
16.3.1	Das reibungsfreie Fluid.....	31
16.3.2	Das NAVIER-STOKES-Fluid.....	31
16.3.3	Der linear-elastische HoOKEsche Körper.....	31
16.4	Bilanzgleichungen des Drehimpulses.....	31
16.4.1	Die lokale Bilanz des Drehimpulses.....	31
16.4.2	Die globale Bilanz des Drehimpulses.....	3:
17	Einführung in die Elastodynamik.....	3:
17.1	Der eindimensionale Zugstab neu gesehen.....	3
17.2	Der axial schwingende Zugstab.....	3
17.3	Die Schwingungsgleichung der Geigensaite.....	3
17.4	Die Schwingungsgleichung einer Membran.....	3
17.5	Lösungsmethoden für Wellengleichungen.....	3
17.5.1	Das Charakteristikenverfahren nach D'ALEMBERT.....	3
17.5.2	Das Separationsverfahren nach BERNOULLI.....	3
17.5.3	Zur Äquivalenz der Lösungsverfahren nach DALEMBERT und BERNOULLI.....	3
18	Einführung in die Hydromechanik.....	3
18.1	Massenbilanz bei der Rohrströmung.....	2
18.2	Der hydrostatische Druck.....	2
18.3	Die BERNOULLIsche Gleichung.....	:
18.4	Der Auftrieb nach ARCHIMEDES.....	:

19 Energiebilanzen.....	340
19.1 Lokale und globale Bilanz der kinetischen Energie.....	340
19.2 Zum Begriff der inneren Energie.....	342
19.3 Gesamtbilanz der Energie oder Energieerhaltungssatz.....	342
19.4 Bilanz der inneren Energie.....	344
19.5 Energiebilanz bei der Rohrströmung.....	346
20 Entropiebilanz und zweiter Hauptsatz.....	347
20.1 Globale und lokale Entropiebilanz.....	347
20.2 Die GIBBSsche Gleichung.....	348
21 Elementare Energiemethoden der Mechanik	349
21.1 Formänderungsenergie und die erweiterten Sätze von CASTIGLIANO.....	349
21.2 Die Formänderungsenergie linear-elastischer Körper I.....	352
21.3 Die Formänderungsenergie im Falle von Normal- und Querkräften sowie Biegemomenten.....	353
21.4 Die Formänderungsenergie linear-elastischer Körper II.....	354
21.5 Die Sätze von MAXWELL und BETTI.....	355
21.6 Anwendung der Sätze von BETTI und MAXWELL auf statisch bestimmte und unbestimmte Systeme.....	358
21.7 Die Sätze von CASTIGLIANO für diskret belastete Systeme.....	360
21.8 Eine Anwendung der Sätze von CASTIGLIANO auf ein statisch bestimmtes System.....	362
21.9 Motivation zur Minimierung von Energieausdrücken.....	362
21.10 Das Prinzip der virtuellen Verschiebungen (PdvV) - Grundlagen.....	364
21.11 Das PdvV - Statik starrer Systeme.....	366
21.12 Das PdvV - Prinzip von TORRICELLI.....	367
21.13 Das PdvV - Berechnung von Auflagerkräften.....	367
21.14 Das PdvV - Statik deformierbarer Systeme.....	368
21.15 PdvV-Eine erste Anwendung aus der Elastostatik.....	369
21.16 PdvV - Allgemeine Belastungsfälle für HooKEsche Balken.....	371
21.17 PdvV - Die Näherungsmethoden nach RITZ und GALERKIN.....	374
21.18 Das Prinzip der virtuellen Kräfte (PdvK) - Grundlagen und Reduktion auf den Fall der Elastostatik.....	378
21.19 PdvK - Verschiebungen in einem statisch bestimmten System.....	380
21.20 PdvK - Lagerreaktionen in einem statisch unbestimmten System.....	381

21.21	Kinetische Energieprinzipien: Das D'ALEMBERTsche Prinzip in LAGRANGEscher Fassung.....	38
21.22	Ableitung der Bewegungsgleichungen des starren Körpers mit Hilfe des D'ALEMBERTschen Prinzips in LAGRANGEscher Fassung.....	38
21.23	Ein Beispiel zum D'ALEMBERTschen Prinzip in LAGRANGEscher Fassung.....	39
21.24	Das HAMILTONsche Prinzip und die LAGRANGEfunktion.....	39
21.25	Generalisierte Koordinaten.....	39
21.26	Die EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen.....	39
21.27	Beispiel I zu den EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen: Geführte Punktmasse.....	39
21.28	Beispiel II zu den EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen: Massenpunktsystem mit zwei generalisierten Koordinaten.....	39
21.29	Beispiel III zu den EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen: Mehrere Punktmassen im Verbund.....	39
21.30	Beispiel IV zu den EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen: Punktmassen und starrer Körper im Verbund.....	40
21.31	Beispiel V zu den EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen: Konservative Starrkörperbewegung.....	40
21.32	Beispiel VI zu den EULER-LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen: Ein nicht konservatives System.....	40
21.33	Die LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen 1. Art.....	40
21.34	Beispiel I zu den LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen 1. Art.....	40
21.35	Beispiel II zu den LAGRANGEschen Bewegungsgleichungen 1. Art.....	41
21.36	Klassifizierung kinematischer Bedingungen.....	41
21.37	Beispiele zu holonom rheonomen Nebenbedingungen.....	41
21.38	Die HAMILTONschen Bewegungsgleichungen.....	41
21.39	Beispiel I zu den HAMILTONschen Gleichungen: Wurf im Schwerfeld der Erde.....	41
21.40	Beispiel II zu den HAMILTONschen Gleichungen: Der 1 -D-Massenschwinger.....	41
	Stichwort- und Namensregister.....	41
	Hinweise zur beigefügten CD-ROM.....	41