

# Einführung in die Technische Mechanik

Nach Vorlesungen

Von

**Dr.-Ing. István Szabó**

o. Professor der Mechanik  
an der Technischen Universität Berlin

Vierte verbesserte und erweiterte Auflage

Mit 525 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,  
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege  
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

ISBN 978-3-662-01311-3      ISBN 978-3-662-01310-6 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-01310-6

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1956, 1958 and 1959.

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959.  
Softcover reprint of the hardcover 4th edition 1959

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche 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.

**Dem Andenken meiner Mutter**

**özvegy Szabó Józsefné**

**geb. Pusztai Éva**

**(1876—1956)**

## Aus den Vorworten zur ersten und zweiten Auflage.

Dieses Buch umfaßt etwa die erste Hälfte meiner viersemestrigen Vorlesungen und Übungen über Technische Mechanik. Die Stoffeinteilung und der Aufbau sind in erster Linie durch die Notwendigkeit bestimmt, dem Studierenden zunächst diejenigen Begriffe und Gesetze darzulegen, die er in den parallellaufenden Vorlesungen und zu seinen Konstruktionsaufgaben benötigt.

In diesem Buch befinden sich zahlreiche historische Bemerkungen, da ich beobachtet habe, daß der Studierende solche Ausführungen mit großem Interesse aufnimmt. Es wurde in diesem Zusammenhang auch nicht versäumt, auf manche Fehler bei der Entwicklung der Mechanik hinzuweisen: Der Anfänger soll wissen, daß die Schwierigkeiten, mit denen erfahrungsgemäß jeder zu tun hat, wirklich in der Natur der Sache liegen, und daß er sich um das Verständnis des schon Feststehenden genau so bemühen muß, wie es die schöpferischen Geister um die richtigen Erkenntnisse getan haben.

Die Darstellung ist knapp, und obwohl ich bestrebt war, das wirklich Wesentliche in der notwendigen Ausführlichkeit zu erläutern, wird der Leser doch, wenn er von diesem Buch wirklichen Nutzen haben will, mit Papier und Bleistift „mitrechnen“ müssen. Trotzdem wird er jedoch bei dem Versuch, eine Aufgabe selbständig zu lösen, gewöhnlich die Feststellung machen müssen, daß er die als verstanden gemeinten Sätze nicht gleich in ihrer Tiefe und ihren Konsequenzen erfaßt hat. Um hier eine Brücke zu schlagen, sind hinter den einzelnen Paragraphen sieben- und siebenzig Übungsaufgaben eingestreut; sie — zunächst ohne Zuhilfenahme der Lösungen — zu meistern, sei jedem Lernenden dringend angeraten.

Durch die nach zwei Jahren notwendig gewordene Neuauflage bot sich die Gelegenheit, einerseits die bemerkten Druckfehler zu korrigieren, andererseits durch kleine Änderungen und umfangreichere Einfügungen dem Buch einen umfassenderen und abgeschlossenen Charakter zu geben. So wurden die HOOKESchen Gesetze in voller Allgemeinheit formuliert; die BREDTSchen Formeln ohne Zuhilfenahme einer unbewiesenen Formel hergeleitet; das Inertialsystem näher erläutert und der Momentensatz sauber entwickelt. Neu aufgenommen wurden die Ausführungen über Maßsysteme, das ballistische Problem, nichtlineare Schwingungen und in der Hydromechanik die CARNOTSche Gleichung. Einige neue Übungsaufgaben sind ebenfalls hinzugekommen.

Berlin-Charlottenburg, im Sommer 1954 und im Sommer 1956.

István Szabó.

## Vorwort zur dritten Auflage.

Ein Jahr nach Erscheinen der zweiten Auflage ist die dritte notwendig geworden. Die aus dieser Tatsache zu folgernde günstige Aufnahme bekräftigte mich in dem Glauben, an dem Buch nichts Wesentliches zu ändern. Dementsprechend wurden auf den ersten 390 Seiten (d. i. der Umfang der zweiten Auflage) nur an einigen Stellen stilistische Änderungen vorgenommen, festgestellte Druckfehler und kleinere Versehen beseitigt. Der neu hinzugekommene *Anhang* enthält 15 Aufgaben, die ich aus didaktischen und sachlichen Gründen für notwendig erachtet habe. So wurden u. a. behandelt die allgemeinen Schnittlasten eines gekrümmten Balkens, die reine Biegung eines stark gekrümmten (kreisförmigen) Stabes, ein Raketenproblem, das Potential anziehender Massen und die Bahn eines künstlichen Satelliten.

Auch anlässlich dieser Auflage habe ich meinen Mitarbeitern, Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. TROSTEL, Herrn Dr.-Ing. G. RUMPEL, Herrn Dipl.-Math. K. ANDRÉ und Herrn Dipl.-Ing. H. SANDER für ihre Unterstützung und dem Springer-Verlag für erfreuliche Zusammenarbeit und für die gute Ausstattung des Buches zu danken.

Berlin-Charlottenburg, im Oktober 1957.

**István Szabó.**

## Vorwort zur vierten Auflage.

Neben der Beseitigung von Druckfehlern und einigen kleinen Änderungen unterscheidet sich diese Auflage von der vorangehenden durch ein neues, abschließendes Kapitel, in dem die auf dem Energiebegriff fußenden Sätze der Mechanik kurz behandelt werden. Dies geschah, um auch denjenigen Lesern gerecht zu werden, für die einerseits die „*Höhere Technische Mechanik*“ nicht in Betracht kommt, andererseits die Kenntnis dieser Sätze wünschenswert oder notwendig ist.

Berlin-Charlottenburg, im Januar 1959.

**István Szabó.**

# Inhaltsverzeichnis.

## I. Die Statik des starren Körpers.

	Seite
§ 1. Einleitung . . . . .	1
1. Die Aufgabe der Mechanik . . . . .	1
2. Der Aufbau der Mechanik. . . . .	2
3. Einteilung der Mechanik . . . . .	3
4. Geschichtliche Bemerkungen . . . . .	3
§ 2. Die Elemente der Vektorrechnung . . . . .	8
1. Erklärungen . . . . .	8
2. Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar . . . . .	9
3. Addition und Subtraktion von Vektoren . . . . .	10
4. Komponentendarstellung eines Vektors . . . . .	10
5. Inneres oder skalares Produkt zweier Vektoren . . . . .	13
6. Projektion eines Vektors in Richtung eines anderen . . . . .	14
7. Äußeres oder Vektorprodukt zweier Vektoren . . . . .	15
8. Skalares Produkt dreier Vektoren (Spatprodukt) . . . . .	17
9. Das dreifache Vektorprodukt . . . . .	18
10. Zerlegung eines Vektors nach drei Richtungen . . . . .	19
11. Die Gleichung der Geraden im Raume . . . . .	19
12. Differentiation eines Vektors . . . . .	20
Übungen zu § 2 . . . . .	22
§ 3. Über die Kraft . . . . .	26
1. Der statische Kraftbegriff . . . . .	26
2. Räumlich und flächenhaft verteilte Kräfte . . . . .	27
3. Über den Begriff der Einzelkraft. Linienflüchtigkeit der Kraft am starren Körper . . . . .	30
4. Die Einteilung der Kräfte . . . . .	32
5. Gleichwertigkeit von Kräftesystemen am starren Körper . . . . .	32
§ 4. Kräfte mit gemeinsamem Angriffspunkt . . . . .	32
1. Zusammensetzung von Kräften . . . . .	32
2. Gleichgewichtsbedingung . . . . .	33
3. Kräftezerlegung . . . . .	34
4. Zeichnerische (graphische) Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften in der Ebene . . . . .	36
a) Die graphische Bestimmung der Resultierenden . . . . .	36
b) Die graphische Zerlegung einer Kraft . . . . .	36
5. Fäden (Seile) und Stäbe . . . . .	36
§ 5. Ebene Kräftegruppen am starren Körper mit nicht gemeinsamem Angriffspunkt . . . . .	39
1. Zusammensetzung von zwei Kräften . . . . .	39
a) Nicht parallele Kräfte . . . . .	39
b) Parallele Kräfte mit gleicher Wirkungslinie . . . . .	39
c) Parallele und gleichgerichtete Kräfte mit verschiedener Angriffslinie . . . . .	39
d) Zwei entgegengesetzt gerichtete Kräfte mit verschiedener Angriffslinie. Das Kräftepaar . . . . .	40
2. Zusammensetzung von mehreren Kräften. Das Seileck ( <i>Seilpolygon</i> ) . . . . .	41
3. Gleichgewichtsbedingung . . . . .	42
§ 6. Über Kräftepaar und Moment . . . . .	43
1. Das Kräftepaar . . . . .	43
2. Zusammensetzung von Einzelkraft und Kräftepaar in derselben Ebene. Das Versetzungsmoment . . . . .	45

3.	Das Moment einer Kraft in bezug auf einen Punkt und in bezug auf eine Achse . . . . .	47
4.	Das Moment einer ebenen Kräftegruppe . . . . .	47
	a) Moment einer Einzelkraft . . . . .	48
	b) Mehrere parallele Kräfte . . . . .	48
	c) Kräfte beliebiger Richtung . . . . .	49
§ 7.	Kräftezusammensetzung im Raume . . . . .	49
	1. Reduktion einer Kräftegruppe in bezug auf einen Punkt . . . . .	49
	2. Kraftschraube (Dynam) und Zentralachse . . . . .	50
	3. Gleichgewichtsbedingungen . . . . .	53
§ 8.	Ebene Statik des starren Körpers . . . . .	53
	1. Auflagerkräfte. Beispiele . . . . .	53
	a) Das Gelenk . . . . .	54
	b) Führung oder Gleitlager . . . . .	54
	c) Einspannung . . . . .	54
	2. Bestimmung der Auflagerkräfte aus dem Seilpolygon . . . . .	55
	Übungen zu § 3 bis § 8 . . . . .	57
§ 9.	Über den Schwerpunkt . . . . .	62
	1. Der Schwerpunkt . . . . .	62
	2. Sätze über den Schwerpunkt . . . . .	64
	3. Der Massenmittelpunkt . . . . .	64
	4. Beispiele . . . . .	65
	a) Das Dreieck . . . . .	65
	b) Der Schwerpunkt des Vierecks . . . . .	66
	c) Das Trapez . . . . .	66
	d) Der Kreiskegel . . . . .	67
	5. Die Regeln von GULDIN . . . . .	67
	a) Die erste GULDINSche Regel . . . . .	68
	b) Die zweite GULDINSche Regel . . . . .	68
§ 10.	Die Schnittlasten des Balkens . . . . .	69
	1. Grundsätzliche Bemerkungen . . . . .	69
	2. Querkraft, Längskraft und Biegemoment . . . . .	69
	a) Die Querkraft . . . . .	71
	b) Die Längs- oder Normalkraft . . . . .	71
	c) Das Biegemoment . . . . .	71
	3. Ermittlung der Schnittlasten . . . . .	72
	4. Beispiele . . . . .	74
	a) Der an den Enden gestützte durch vertikale Einzelkräfte belastete Balken . . . . .	74
	b) Balken an den Enden frei gestützt und gleichmäßig belastet . . . . .	74
	c) Balken mit überstehendem Ende durch Vertikalkräfte belastet . . . . .	75
	Übungen zu § 9 und § 10 . . . . .	75

**II. Einige elementare Probleme der Elastizitätstheorie.**

§ 11.	Allgemeine Bemerkungen und Gesetze zur Elastizitätstheorie und Festigkeitslehre . . . . .	80
	1. Einleitung . . . . .	80
	2. Das HOOKESche Gesetz . . . . .	82
	a) Dehnung . . . . .	82
	b) Gleitung . . . . .	85
	3. Der Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul, Poissonscher Zahl und Schubmodul . . . . .	86
	a) Der einachsige Spannungszustand und MOHRSche Spannungskreis . . . . .	86
	b) Der zweiachsige Spannungszustand . . . . .	87
	c) Der Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten . . . . .	88
	4. Geschichtliche Bemerkungen . . . . .	89

	Seite
§ 12. Die elementare Theorie der Balkenbiegung . . . . .	91
1. Voraussetzungen und ihre Folgerungen . . . . .	91
2. Verteilung der Spannungen und die Differentialgleichung der elastischen Linie . . . . .	93
§ 13. Flächenmomente zweiten Grades . . . . .	98
1. Definitionen . . . . .	98
a) Das axiale Moment . . . . .	98
b) Das polare Moment . . . . .	99
c) Das Zentrifugalmoment . . . . .	99
d) Der Trägheitsradius . . . . .	99
2. Allgemeine Sätze . . . . .	99
a) Der Satz von STEINER für parallele Achsen . . . . .	99
b) Drehung des Koordinatensystems . . . . .	101
3. Hauptträgheitsachsen und Hauptträgheitsmomente . . . . .	102
4. Die Trägheitsellipse . . . . .	103
5. Der Trägheitskreis . . . . .	104
§ 14. Die elastische Linie des Balkens . . . . .	105
1. Die vereinfachte Form der Differentialgleichung der elastischen Linie und ihre Integration . . . . .	105
2. Beispiele für den Balken konstanten Querschnittes . . . . .	107
a) Einseitig eingespannter Balken mit Einzellast . . . . .	107
b) Einseitig eingespannter Balken mit gleichmäßiger Last . . . . .	108
c) An den Enden frei gestützter Balken mit Einzellast . . . . .	109
d) An den Enden frei gestützter Balken mit gleichmäßiger Belastung . . . . .	111
3. Bezüglich der Reaktionskräfte statisch unbestimmte Aufgaben . . . . .	111
a) Der kontinuierlich und gleichmäßig belastete Balken auf drei gleich entfernten Stützen . . . . .	112
b) Der an den Enden eingespannte und gleichmäßig belastete Balken . . . . .	113
4. Eine Korrektur für brettförmige Balken (Platten) . . . . .	114
5. Einflußzahl und Einflußlinie . . . . .	115
§ 15. Ergänzungen zur Theorie des Balkens . . . . .	116
1. Das Prinzip von DE SAINT-VENANT . . . . .	116
2. Die schiefe Biegung des Balkens . . . . .	117
3. Die Abschätzung der von der Querkraft herrührenden Schubspannungen und ihres Einflusses auf die Durchbiegung eines Balkens zylindrischen (konstanten) Querschnittes . . . . .	120
a) Der Satz von den zugeordneten Schubspannungen . . . . .	120
b) Eine erste Abschätzung der Schubspannungen . . . . .	122
c) Näherungsweise Bestimmung der Schubspannungsverteilung über dem Querschnitt . . . . .	122
d) Abschätzung des Einflusses der Schubspannungen auf die Durchbiegung . . . . .	124
4. Der auf Zug oder Druck und Biegung beanspruchte Balken. Knickung . . . . .	125
5. Der Balken auf nachgiebiger Unterlage . . . . .	130
6. Biegung eines dünnwandigen kreiszylindrischen Balkens (Kreiszyklinderschale) durch achsensymmetrische Belastung . . . . .	133
7. Torsion eines kreiszylindrischen Stabes . . . . .	135
8. Drillung dünnwandiger Hohlquerschnitte . . . . .	138
9. Torsion schmaler Rechteckstäbe . . . . .	139
10. Der Schubmittelpunkt . . . . .	142
Übungen zu § 11 bis § 15 . . . . .	145

### III. Statik der Systeme starrer Körper.

§ 16. Systeme aus einer endlichen Anzahl starrer Körper . . . . .	171
1. Das Gleichgewichtsprinzip . . . . .	171
2. Der Dreigelenkträger . . . . .	172
3. Die Brückenwaage . . . . .	173



	Seite
§ 17. Ebene Fachwerke . . . . .	174
1. Grundsätzliche Bemerkungen . . . . .	174
2. Bestimmung der Stabkräfte in einem ebenen Fachwerk . . . . .	176
a) Der CREMONASche Kräfteplan . . . . .	177
b) Die RITTERSche Schnittmethode . . . . .	178
§ 18. Statik der Systeme aus unendlich vielen starren Körpern (Statik der Seile und Ketten) . . . . .	179
1. Einleitende Bemerkungen . . . . .	179
2. Die Grundgleichungen der Statik der Seile und Ketten . . . . .	179
3. Das homogene, durch das Eigengewicht belastete Seil gleichen Quer- schnittes . . . . .	181
4. Das durch beliebige Streckenlasten in Vertikalrichtung belastete Seil . . . . .	183
5. Die Analogie zwischen Seilkurve und elastischer Linie. Zeichnerische Ermittlung der Durchbiegung nach MOHR . . . . .	184
a) Stabpolygon und Seillinie . . . . .	185
b) Der an den Enden frei gelagerte Balken gleichen Querschnittes . . . . .	186
c) Der an den Enden frei gelagerte Balken veränderlichen Quer- schnittes . . . . .	187
d) Der frei gelagerte Balken mit überragenden Enden . . . . .	187
e) Der einseitig eingespannte Träger . . . . .	188
Übungen zu § 16 bis § 18 . . . . .	189

**IV. Einführung in die Dynamik.**

§ 19. Kinematische Betrachtungen . . . . .	199
1. Einleitende Bemerkungen über Bewegung, Raum und Zeit . . . . .	199
2. Die Darstellung der Bewegung eines Punktes . . . . .	201
a) Durch Vorgabe der Projektionen des Punktes auf die Koordinaten- achsen . . . . .	201
b) Die Vorgabe der Bahnkurve und Weg—Zeit-Funktion . . . . .	201
3. Die Geschwindigkeit . . . . .	202
a) Die geradlinige Bewegung . . . . .	202
b) Die allgemeine (krümmelige) Bewegung . . . . .	203
4. Die Beschleunigung . . . . .	204
5. Geschwindigkeit und Beschleunigung in ebenen Polarkoordinaten . . . . .	206
6. Umfangsgeschwindigkeit und Vektor der Winkelgeschwindigkeit . . . . .	209
7. Die Bewegung eines starren Körpers . . . . .	209
8. Ebene Bewegung von starren Scheiben. Der Satz vom Momentan- zentrum . . . . .	210
9. Relativbewegung . . . . .	212
§ 20. Das NEWTONSche Grundgesetz und seine Folgerungen. . . . .	214
1. Über die Kraft. . . . .	214
2. Das dynamische Grundgesetz . . . . .	215
a) Einleitende Bemerkungen . . . . .	215
b) Mathematische Formulierung und physikalische Folgerungen des Grundgesetzes . . . . .	217
3. Der Schwerpunktsatz . . . . .	219
4. Der Drall- oder Momentensatz . . . . .	220
5. Ein Beispiel . . . . .	223
6. Das Massenträgheitsmoment . . . . .	228
a) Dünner Stab . . . . .	229
b) Kreiszyylinder . . . . .	229
c) Kugel. . . . .	229
7. Die ebene Bewegung eines starren Körpers . . . . .	230
a) Reine Translation . . . . .	231
b) Drehung um eine feste Achse. . . . .	231
c) Die kinetische Energie . . . . .	232
$\alpha$ ) Rotation um eine feste Achse . . . . .	232
$\beta$ ) Allgemeine ebene Bewegung . . . . .	233
8. Maßsysteme . . . . .	234

	Seite
§ 21. Kinetik des Schwerpunktes . . . . .	234
1. Erläuterungen . . . . .	234
2. Der Flächensatz . . . . .	236
3. Der Impulssatz . . . . .	236
4. Der Arbeitssatz . . . . .	238
5. Grundsätzliches und Geschichtliches zum Erhaltungssatz der Energie	241
6. Die KEPLERSchen Gesetze und die allgemeine Massenanziehungstheorie von NEWTON . . . . .	242
7. Freie und geführte Bewegungen . . . . .	246
a) Bewegung auf der Erde in Richtung eines Meridians . . . . .	247
b) Bewegung eines Rades in der Kurve. Kreiselwirkung . . . . .	248
§ 22. Über Bewegungswiderstände (Reibung) . . . . .	250
1. Grundsätzliche Bemerkungen . . . . .	250
2. Bewegungswiderstand fester Körper im flüssigen und gasförmigen Medium . . . . .	251
3. Reibungswiderstände zwischen festen Körpern . . . . .	254
4. Haftreibung oder Reibung der Ruhe . . . . .	254
5. Gleitreibung . . . . .	256
6. Beispiele zur Haftreibung . . . . .	258
a) Die schiefe Ebene . . . . .	258
b) Der Keil . . . . .	259
c) Die Schraube . . . . .	259
$\alpha$ ) Flachgängige Schraube . . . . .	260
$\beta$ ) Scharfgängige Schraube . . . . .	260
7. Seilreibung . . . . .	261
8. Seilsteifigkeit und Lagerreibung . . . . .	263
9. Rollen von Rädern auf einer Ebene . . . . .	264
a) Rotationssymmetrischer Körper auf der schiefen Ebene . . . . .	264
$\alpha$ ) Reines Rollen . . . . .	265
$\beta$ ) Kein reines Rollen . . . . .	266
b) Bewegung eines Fahrzeuges . . . . .	266
$\alpha$ ) Triebräder . . . . .	266
$\beta$ ) Laufräder . . . . .	266
$\gamma$ ) Wagenkasten . . . . .	267
c) Rollwiderstand . . . . .	267
10. Das ballistische Problem . . . . .	268
Übungen zu § 19 bis § 22 . . . . .	270
§ 23. Die einfachsten Schwingungsprobleme der Mechanik . . . . .	291
1. Die harmonische Schwingung . . . . .	291
2. Longitudinalschwingungen . . . . .	293
a) Schraubenfeder mit Einzelmasse . . . . .	293
b) Stab konstanten Querschnitts mit Einzelmasse . . . . .	294
c) Näherungsweise Berücksichtigung der Federmasse . . . . .	295
3. Transversal schwingende Stäbe mit Einzelmasse . . . . .	296
a) Einseitig eingespannter Stab . . . . .	296
b) An beiden Enden gelenkig gestützter Stab . . . . .	297
c) An beiden Enden eingespannter Stab . . . . .	297
d) An dem einen Ende eingespannter, am anderen freigelagerter Stab	298
e) Näherungsweise Berücksichtigung der Stabmasse . . . . .	298
4. Torsionsschwingungen eines Stabes . . . . .	299
5. Zusammengesetzte Federn . . . . .	300
a) Hintereinanderschaltung . . . . .	300
b) Parallelschaltung . . . . .	300
6. Dämpfung durch Bewegungswiderstände . . . . .	301
a) Dämpfung in Gasen und Flüssigkeiten . . . . .	301
b) Trockenreibung oder Dämpfungskraft konstanten Betrages . . . . .	302

	Seite
7. Die freie Bewegung bei geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung .	303
a) Starke Dämpfung . . . . .	304
b) Aperiodischer Grenzfall. . . . .	305
c) Schwache Dämpfung . . . . .	306
8. Erzwungene Schwingungen. Bewegung aus der Ruhelage heraus .	308
9. Periodische Erregung. Resonanz . . . . .	310
10. Nichtlineare Schwingungen. . . . .	315
§ 24. Über den Stoß . . . . .	318
1. Allgemeine und historische Bemerkungen . . . . .	318
2. Ansätze und Definitionen . . . . .	319
3. Der gerade zentrale Stoß . . . . .	321
4. Der schiefe zentrale Stoß . . . . .	324
5. Der exzentrische Stoß gegen einen drehbar gelagerten Körper. Der Stoßmittelpunkt . . . . .	324
6. Beispiele zum Stoß. . . . .	326
a) Plötzliche Fixierung . . . . .	326
b) Stoßvorgänge an Trägern mit angenäherter Berücksichtigung der Trägermasse. . . . .	326
Übungen zu § 23 und § 24 . . . . .	330
§ 25. Einblick in die Hydromechanik . . . . .	342
1. Allgemeine Eigenschaften der Flüssigkeiten . . . . .	342
2. Das Grundgesetz für ideale Flüssigkeiten . . . . .	343
3. BERNOULLISCHE Gleichung . . . . .	346
4. Folgerungen und Anwendungen der BERNOULLISCHEN Gleichung . .	349
a) Hydrostatik . . . . .	349
b) Archimedisches Prinzip . . . . .	350
c) Ausfluß aus Gefäßen . . . . .	351
d) Staudruck. . . . .	351
5. Der Impulssatz für die stationäre Bewegung längs eines Stromfadens	352
a) Druck auf eine von einem freien Strahl angeströmte Wand . .	353
b) Strahlreaktion bei Ausfluß aus Gefäßen . . . . .	353
c) Flüssigkeitsdruck auf Rohrwände . . . . .	353
d) Energieverlust bei plötzlichen Rohrerweiterungen. CARNOTSche Gleichung. . . . .	354
6. Ideale und wirkliche Flüssigkeit . . . . .	354
a) Allgemeine Bemerkungen zur EULERSCHEN Theorie . . . . .	354
b) Laminare und turbulente Strömung . . . . .	356
c) Der NEWTONSche Ansatz . . . . .	356
7. Die Strömung von zähen Flüssigkeiten in kreiszylindrischen Rohren	361
a) Laminare stationäre Strömung . . . . .	361
b) Turbulente Bewegung . . . . .	363
Übungen zu § 25 . . . . .	364
§ 26. Grundgesetze der Ähnlichkeitsmechanik . . . . .	378
1. Einführende Bemerkungen . . . . .	378
2. Mechanische Ähnlichkeit. Das NEWTONSche Ähnlichkeitsgesetz . .	379
a) Die geometrische Ähnlichkeit . . . . .	379
b) Die zeitliche Ähnlichkeit . . . . .	379
c) Die Ähnlichkeit der Kräfte . . . . .	379
3. Übertragungsgesetze für spezielle Kräfteklassen . . . . .	381
4. Die Ähnlichkeitsgesetze . . . . .	382
a) Beschleunigte Bewegungsvorgänge unter dem überwiegenden Ein- fluß von Schwerekräften. Das FROUDESche Modellgesetz . . . .	384
b) Beschleunigte Bewegungsvorgänge unter dem überwiegenden Ein- fluß von Reibungskräften. Das REYNOLDSsche Modellgesetz . .	384
c) Beschleunigte Bewegungsvorgänge unter dem überwiegenden Ein- fluß von elastischen Kräften. Das CAUCHYSche Modellgesetz . .	385
d) Die statische Ähnlichkeit . . . . .	386
Übungen zu § 26. . . . .	387

**V. Arbeitsprinzipien der Mechanik.**

§ 27. Das Prinzip der virtuellen Arbeiten . . . . .	390
1. Historische Bemerkungen . . . . .	390
2. Das Prinzip der virtuellen Arbeiten . . . . .	390
3. Bemerkungen zum Prinzip der virtuellen Arbeiten . . . . .	392
§ 28. Das Prinzip von D'ALEMBERT . . . . .	397
1. Formulierung des Prinzips . . . . .	397
2. Beispiele . . . . .	397
Anhang. Vermischte Aufgaben . . . . .	400
<b>Namen- und Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>427</b>