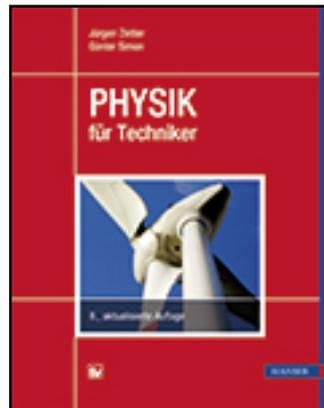


# HANSER



Leseprobe

Jürgen Zeitler, Günter Simon

Physik für Techniker

ISBN (Buch): 978-3-446-44953-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-44955-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44953-4>

sowie im Buchhandel.

# VORWORT

Die Aus- und Fortbildung in einem technischen Beruf macht es erforderlich, die Schulkenntnisse in Physik aufzufrischen, zu erweitern und zu vertiefen. Das vorliegende Buch soll dafür eine Hilfe darstellen. Es soll aber auch den Lesern als Grundlage dienen, die sich zusätzlich während und nach der Schulzeit mit physikalischen Erscheinungen und Gesetzen beschäftigen wollen oder müssen.

Die Autoren haben versucht, wichtige physikalische Gesetzmäßigkeiten im Hinblick auf technische Anwendungen in anschaulicher, leicht verständlicher Weise zu vermitteln. Dieses Anliegen wird durch viele Bilder und Beispiele unterstützt. Anstelle umfangreicher Ableitungen werden die in „Formeln“ zum Ausdruck kommenden physikalischen Inhalte ausführlich erläutert sowie die Abhängigkeiten und Zusammenhänge diskutiert, die in ihnen enthalten sind. Dabei konnte auf Erfahrungen aus 35-jähriger Lehrtätigkeit in der Ingenieurausbildung zurückgegriffen werden.

Dem Leser dieses Buches bieten sich umfangreiche Übungsmöglichkeiten durch zahlreiche Aufgaben mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad. Zu jeder Aufgabe werden die allgemeinen und die speziellen Lösungen, deren Zahlenwerte sinnvoll gerundet wurden, angegeben. Anleitung zum Lösen von physikalischen Aufgaben geben die Beispiele im Text. Diese zeigen, wie die in einer Aufgabe gestellten Probleme erkannt, Lösungsansätze aufgestellt und Ergebnisse gefunden werden.

Für Anregungen zur Verbesserung des Buches sind wir dankbar. Allen Leserinnen und Lesern des Buches wünschen wir Erfolg bei der beruflichen Entwicklung. Möge dabei „Physik für Techniker“ von Nutzen sein.

Autoren und Verlag



## Hinweise

In der Randspalte finden Sie neben vielen Abbildungen und Tabellen auch die Bezeichnungen der wichtigen Gesetze und Gleichungen. An manchen Stellen steht wie hier zusätzlicher Text.

### Beispiele und Aufgaben:

In solchen Kästen finden Sie vollständig durchgerechnete *Beispiele* zur Erläuterung der Gesetze und Gleichungen. Die ausführlichen *Musterlösungen* vermitteln dabei die typischen Lösungsideen, Lösungsstrategien und Lösungswege für solche Probleme.

Im Anhang finden Sie Aufgaben zum Üben, in deren Lösungsteil zur Kontrolle jeweils Ansatz, allgemeine und spezielle Lösung angegeben sind.

Am Anfang jedes Kapitels stehen Fragen und Probleme zum nachfolgenden Text, am Ende jedes Kapitels stehen *Zusammenfassungen*. Sie sollen das Verständnis prüfen sowie vertiefen.

# INHALTSVERZEICHNIS

## TECHNIK UND PHYSIK

<b>1</b>	<b>Physikalische Größen und Einheiten</b>	11
1.1	Größenarten und Größen	11
1.2	Einheiten und Internationales Einheitensystem (SI)	12
1.3	Größengleichungen	13
1.4	Länge, Fläche und Volumen	14
1.5	Zeit	15

## MECHANIK

<b>2</b>	<b>Kinematik</b>	16
2.1	Kinematik der Punktmasse	17
2.1.1	Bewegung auf gerader Bahn	18
2.1.1.1	Geschwindigkeit und Beschleunigung	18
2.1.1.2	Gleichförmige Bewegung	22
2.1.1.3	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	24
2.1.1.4	Freier Fall	28
2.1.1.5	Relativität der Bewegung und Überlagerung von Bewegungen	29
2.1.2	Bewegung auf der Kreisbahn	32
2.1.2.1	Periodendauer und Frequenz	32
2.1.2.2	Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung	33
2.1.2.3	Radialbeschleunigung	34
2.2	Kinematik des starren Körpers	35
2.2.1	Translation und Rotation	36
2.2.2	Kinematik der Rotation	37
2.2.3	Drehzahlmessung	39
<b>3</b>	<b>Dynamik der Punktmasse</b>	40
3.1	Kräfte	40
3.1.1	Wirkungen von Kräften	40
3.1.2	Wechselwirkung	41
3.1.3	Kraftmessung	42
3.1.4	Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften	44
3.1.5	Trägheit der Körper	46
3.1.6	Grundgesetz der Dynamik	47
3.1.7	Schwere der Körper	50

3.1.8	Reibungskräfte	51
3.1.9	Anwendungen des Grundgesetzes der Dynamik	53
3.1.10	Trägheitskräfte	56
3.1.11	Radialkraft und Zentrifugalkraft	57
3.2	Arbeit, Energie und Leistung	59
3.2.1	Mechanische Arbeit	59
3.2.1.1	Beschleunigungsarbeit	60
3.2.1.2	Hubarbeit	61
3.2.1.3	Federspannarbeit	62
3.2.1.4	Reibungsarbeit	63
3.2.2	Energie	64
3.2.2.1	Kinetische Energie	64
3.2.2.2	Potenzielle Energie	65
3.2.3	Energieerhaltungssatz	66
3.2.4	Leistung und Wirkungsgrad	70
3.2.4.1	Leistung	70
3.2.4.2	Wirkungsgrad	71
3.3	Impuls	74
3.3.1	Kraftstoß und Impuls	74
3.3.2	Impulserhaltungssatz	75
3.3.3	Stoßvorgänge	76
3.3.3.1	Elastischer Stoß	76
3.3.3.2	Unelastischer Stoß	78
3.3.4	Raketenantrieb	79
<b>4</b>	<b>Dynamik der Rotation</b>	81
4.1	Drehmoment	82
4.2	Rotationsenergie und Massenträgheitsmoment	86
4.2.1	Rotationsenergie	86
4.2.2	Massenträgheitsmoment	86
4.3	Analogie zwischen Translation und Rotation	89
4.4	Grundgesetz der Dynamik der Rotation	89
4.5	Arbeit und Leistung bei der Rotation	91
4.6	Drehimpulserhaltungssatz	92
<b>5</b>	<b>Statik und Verformung</b>	95
5.1	Gleichgewicht starrer Körper	95



8.4.2	Wärmepumpe und Kältemaschine . . .	164
8.4.3	CARNOT-Prozess . . . . .	165
8.5	2. Hauptsatz der Thermodynamik . . .	166
8.5.1	Thermodynamischer Wirkungsgrad reversibler Kreisprozesse . . . . .	166
8.5.2	Irreversible Prozesse . . . . .	167
8.5.3	Entropie . . . . .	167
8.6	Reale Gase und Dämpfe . . . . .	168
8.6.1	Isothermen eines realen Gases . . . . .	168
8.6.2	Dämpfe . . . . .	169
8.6.3	Luftfeuchte . . . . .	170
<b>9</b>	<b>Wärmetransport</b> . . . . .	171
9.1	Wärmetransportprozesse . . . . .	171
9.2	Wärmedurchgang . . . . .	172
9.3	Temperaturstrahlung . . . . .	175

## ELEKTRIK

<b>10</b>	<b>Gleichstrom</b> . . . . .	178
10.1	Elektrische Ladungen und Ströme . . .	178
10.2	Elektrische Spannung . . . . .	180
10.3	OHMSches Gesetz . . . . .	183
10.4	Elektrischer Widerstand . . . . .	184
10.5	Schaltung von Widerständen . . . . .	187
10.5.1	Parallelschaltung . . . . .	187
10.5.2	Reihenschaltung . . . . .	189
10.6	Elektrische Energie und Leistung . . .	193
10.7	Reale Stromkreise . . . . .	194
10.7.1	Verhalten realer Spannungsquellen . .	194
10.7.2	Schaltung von Spannungsquellen . . .	196
10.7.3	Einfluss von Leitungswiderständen . .	197
10.7.4	Knoten- und Maschensatz zur Berechnung elektrischer Netze . . . . .	198
10.8	Messung elektrischer Größen . . . . .	198
10.8.1	Strom- und Spannungsmessung . . . . .	199
10.8.2	Digitale Messverfahren . . . . .	199
10.8.3	Spannungskompensation . . . . .	200
10.8.4	Messbrücken . . . . .	201

<b>11</b>	<b>Elektrische und magnetische Felder</b> . . .	202
11.1	Elektrische Felder . . . . .	203
11.1.1	Kräfte zwischen elektrischen Ladungen	203
11.1.2	Elektrische Felder im Vakuum . . . . .	204
11.1.2.1	Elektrische Flussdichte und elektrische Feldstärke . . . . .	204
11.1.2.2	Kapazität . . . . .	204
11.1.2.3	Elektrische Feldenergie . . . . .	205
11.1.3	Stoffe im elektrischen Feld . . . . .	206
11.1.3.1	Influenz . . . . .	206
11.1.3.2	Dielektrische Polarisation . . . . .	206
11.1.4	Kondensatoren . . . . .	208
11.2	Magnetische Felder . . . . .	209
11.2.1	Magnetische Felder stromdurch- flossener Leiter . . . . .	209
11.2.2	Magnetische Felder im Vakuum . . . . .	210
11.2.2.1	Magnetische Feldstärke und magnetische Flussdichte . . . . .	210
11.2.2.2	Induktivität und magnetische Feldenergie . . . . .	211
11.2.3	Stoffe im magnetischen Feld . . . . .	211
11.2.4	Kraftwirkungen auf stromdurch- flossene Leiter im magnetischen Feld	213
11.3	Bewegung von Elektronen in elek- trischen und magnetischen Feldern . .	215
11.3.1	Erzeugung von Elektronenstrahlen . .	215
11.3.2	Ablenkung von Elektronen im elek- trischen Querfeld . . . . .	216
11.3.3	Elektronen in magnetischen Feldern . .	217
11.3.4	Gasentladungen . . . . .	218
11.4	Elektromagnetische Induktion . . . . .	220
11.4.1	Induktionsgesetz . . . . .	221
11.4.2	Transformator- und Generatorprinzip	222
11.4.2.1	Transformatorprinzip . . . . .	223
11.4.2.2	Generatorprinzip . . . . .	223
11.4.2.3	Elektrische Maschinen . . . . .	224
11.4.3	Wirbelströme . . . . .	225
11.4.4	Selbstinduktion . . . . .	225
<b>12</b>	<b>Wechselstrom</b> . . . . .	228
12.1	Wechselspannungen und Wechsel- ströme . . . . .	228
12.1.1	Bestimmungsgrößen . . . . .	228
12.1.2	Elektronische Messung der Bestimmungsgrößen . . . . .	229

12.2	Einfache Wechselstromkreise . . . . .	231	14.1.2	Freie gedämpfte Schwingungen . . . . .	270
12.2.1	Wirkwiderstände . . . . .	231	14.1.3	Erzwungene Schwingungen . . . . .	272
12.2.2	Blindwiderstände . . . . .	232	14.2	Elektrische Schwingungen . . . . .	273
12.2.2.1	Induktiver Blindwiderstand . . . . .	232	14.2.1	Elektrischer Schwingkreis . . . . .	273
12.2.2.2	Kapazitiver Blindwiderstand . . . . .	233	14.2.2	Analogie zwischen mechanischen und elektrischen Schwingungen . . . . .	274
12.3	Zusammengesetzte Wechselstromkreise . . . . .	235	14.2.3	Erzwungene elektrische Schwingungen	275
12.3.1	Reihenschaltung von $R$ und $L$ . . . . .	236	14.2.3.1	Reihenresonanz . . . . .	275
12.3.2	Reihenschaltung von $R$ , $L$ und $C$ . . . . .	237	14.2.3.2	Parallelresonanz . . . . .	276
12.3.3	Parallelschaltung von $R$ , $L$ und $C$ . . . . .	239	14.3	Überlagerung von Schwingungen . . . . .	276
12.4	Leistung des Wechselstroms . . . . .	240	14.3.1	Überlagerung in gleicher Richtung . . . . .	277
12.4.1	Momentanleistung und Wirkleistung	240	14.3.1.1	Schwingungen gleicher Frequenz . . . . .	277
12.4.2	Messung von Energieumsatz und Wirkleistung . . . . .	240	14.3.1.2	Schwebungen . . . . .	278
12.4.3	Wirk-, Blind- und Scheinleistung . . . . .	241	14.3.2	Überlagerung senkrecht zueinander . . . . .	279
12.4.4	Blindleistungskompensation . . . . .	242	14.3.3	Anharmonische Schwingungen . . . . .	279
12.5	Transformatoren . . . . .	243	<b>15</b>	<b>Wellen</b> . . . . .	281
12.6	Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)	246	15.1	Wellenausbreitung . . . . .	281
12.7	Schutz vor elektrischen Unfällen . . . . .	249	15.1.1	Arten von Wellen . . . . .	281
<b>13</b>	<b>Halbleiter</b> . . . . .	251	15.1.2	Frequenz und DOPPLER-Effekt . . . . .	283
13.1	Leitungsmechanismen in Halbleitern	251	15.1.3	Wellenlänge und Phasengeschwindigkeit . . . . .	283
13.1.1	Eigenleitung . . . . .	251	15.1.4	Energiestrom und Amplitude . . . . .	284
13.1.2	Störstellenleitung . . . . .	253	15.1.5	HUYGENSSches Prinzip . . . . .	284
13.1.2.1	$n$ -Leitung . . . . .	253	15.2	Reflexion und Brechung . . . . .	285
13.1.2.2	$p$ -Leitung . . . . .	254	15.2.1	Reflexion . . . . .	285
13.2	$pn$ -Übergang . . . . .	254	15.2.2	Brechung . . . . .	286
13.3	Halbleiterdioden . . . . .	256	15.2.3	Totalreflexion . . . . .	287
13.4	Transistoren . . . . .	258	15.3	Beugung und Interferenz . . . . .	288
13.4.1	Bipolartransistoren . . . . .	258	15.3.1	Beugung . . . . .	288
13.4.2	Elementarer Spannungsverstärker . . . . .	259	15.3.2	Interferenz . . . . .	289
13.4.3	Feldeffekttransistoren . . . . .	261	15.3.3	Stehende Wellen . . . . .	291
13.4.4	Integrierte Schaltkreise . . . . .	262	15.3.4	Beugung und Interferenz am Doppelspalt . . . . .	292
<b>SCHWINGUNGEN UND WELLEN</b>			15.4	Polarisation . . . . .	294
<b>14</b>	<b>Schwingungen</b> . . . . .	263	15.5	Optische Abbildung . . . . .	295
14.1	Mechanische Schwingungen . . . . .	263	15.5.1	Bildkonstruktion . . . . .	296
14.1.1	Freie ungedämpfte Schwingungen . . . . .	263	15.5.2	Bildentstehung an gekrümmten Spiegeln und Linsen . . . . .	297
14.1.1.1	Kinematik der Sinusschwingung . . . . .	264	15.5.3	Abbildungsgleichung und Abbildungsmaßstab . . . . .	299
14.1.1.2	Dynamik der Sinusschwingung . . . . .	266	15.5.4	Vergößerung durch Fernrohr und Mikroskop . . . . .	300
14.1.1.3	Dreh- und Pendelschwingungen . . . . .	268	15.6	Energieübertragung durch Wellen . . . . .	302

15.6.1	Physikalische Strahlungsgrößen . . .	302
15.6.2	Physiologische Schall- und Lichtempfindungen . . . . .	304
15.6.2.1	Schallstärke und Lautstärke . . . . .	304
15.6.2.2	Lichttechnische Größen . . . . .	306
15.7	Elektromagnetische Strahlung . . . . .	308
15.7.1	HERTZsche Wellen . . . . .	309
15.7.2	Mikrowellen . . . . .	309

## QUANTEN UND ATOME

<b>16</b>	<b>Atom- und Kernphysik . . . . .</b>	<b>313</b>
16.1	Quanten . . . . .	314
16.1.1	Energiequantelung . . . . .	314
16.1.2	Welle-Teilchen-Dualismus . . . . .	315
16.1.3	Äußerer Fotoeffekt . . . . .	315
16.1.4	HEISENBERGsche Unschärferelation . . . . .	316
16.1.5	Masse und Energie . . . . .	317
16.2	Photonen . . . . .	318
16.2.1	BOHRsches Atommodell . . . . .	318
16.2.2	Absorption und Emission von Photonen . . . . .	319

16.2.3	LASER . . . . .	321
16.2.4	Röntgenstrahlen . . . . .	323
16.3	Atomkern . . . . .	325
16.3.1	Aufbau des Atomkerns . . . . .	325
16.3.2	Radioaktivität . . . . .	327
16.3.2.1	$\alpha$ -Umwandlung . . . . .	327
16.3.2.2	$\beta$ -Umwandlung . . . . .	328
16.3.2.3	$\gamma$ -Strahlung . . . . .	329
16.3.2.4	Gesetz der radioaktiven Umwandlung . . . . .	329
16.3.2.5	Absorption von ionisierender Strahlung . . . . .	331
16.3.2.6	Nachweis von Kernstrahlung . . . . .	333
16.3.2.7	Biologische Wirkungen und Strahlen- schutz . . . . .	335
16.3.3	Kernenergie . . . . .	336
16.3.3.1	Kernspaltung . . . . .	337
16.3.3.2	Kernsynthese . . . . .	339
	<b>Aufgaben . . . . .</b>	<b>341</b>
	<b>Lösungen . . . . .</b>	<b>364</b>
	<b>Bildquellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>394</b>
	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>395</b>

## 4 Dynamik der Rotation

---

**Fragen und Probleme:** Was versteht man unter einem Drehmoment, wovon hängt es ab? Was bewirkt ein auf einen Körper einwirkendes Drehmoment? Welche Bedeutung hat das Massenträgheitsmoment eines Körpers? Wovon hängt das Massenträgheitsmoment eines Körpers bezüglich der Lage seiner Drehachse ab? Welche Analogiebeziehungen bestehen zwischen Translation und Rotation? Was besagt der Drehimpulserhaltungssatz? Welche typischen Beispiele für die Drehimpulserhaltung lassen sich angeben?

---

Durchlaufen alle Punkte eines Körpers bei dessen Bewegung kongruente, also deckungsgleiche Bahnen, so handelt es sich um eine fortschreitende Bewegung. Wir sprechen von einer Translation des Körpers und können dabei den Körper als Punktmasse auffassen. Es gelten Begriffe und Gesetze, wie wir sie in 2.1 Kinematik der Punktmasse und 3 Dynamik der Punktmasse dargelegt haben.

In der Technik spielen Körper, die um eine Achse rotieren, als Teile von Maschinen, Geräten und Anlagen eine besonders wichtige Rolle. Bezeichnungen wie Rad, Rolle, Zentrifuge, Kreiselpumpe, Drehbank, Karussell und rotierende elektrische Maschinen weisen darauf hin. Rotierende Körper wollen wir als starre Körper behandeln. Mögliche geringfügige Verformungen der Körper sollen vernachlässigbar sein. Wir denken uns starre Körper aus Punktmassen aufgebaut, die ihre relative Lage zueinander im Körper nicht ändern können. Diese Punktmassen beschreiben bei der **Rotation** des starren Körpers *konzentrische Kreise* um die Drehachse (s. 2.2.1).

Die Mechanik der Rotation starrer Körper weist gegenüber der Bewegung einzelner Punktmassen Besonderheiten auf, die es nahelegen, dafür besonders geeignete Begriffe einzuführen:

1. Die *Wirkung einer Kraft* auf einen um eine Achse drehbaren Körper hängt *nicht allein* von Betrag und Richtung der Kraft ab. Wesentlich ist der Abstand der Wirkungslinie der Kraft von der Drehachse. Dies führt uns auf den **Begriff des Drehmomentes** einer Kraft (s. 4.1).
2. Punkte eines rotierenden Körpers haben um so größere Bahngeschwindigkeiten, je weiter sie von der Drehachse entfernt sind. Eine *einheitliche* Beschreibung der Rotation des Körpers als Ganzes ist durch **Winkelgrößen** möglich. Wiederholen Sie deshalb, bevor Sie die weiteren Teile des Abschnittes 4 durcharbeiten, unbedingt die Abschnitte über die Bewegung auf der Kreisbahn (s. 2.1.2) und die Kinematik der Rotation (s. 2.2.2).
3. Wenn wir einen Körper in beschleunigte Rotation versetzen, müssen Teile, die weit von der Drehachse entfernt sind, auf höhere Geschwindigkeiten gebracht werden als achsnahe Teile des Körpers. Die *Trägheit* eines Körpers gegenüber einer Änderung seiner Drehzahl hängt deshalb *nicht allein* von seiner Masse ab. Sie wird wesentlich davon bestimmt, wie seine Masse in bezug auf die Drehachse räumlich angeordnet ist. Dies führt uns auf den **Begriff des Massenträgheitsmomentes** (s. 4.2 und 4.3).

## 4.1 Drehmoment

Sie sollen die Mutter einer Schraubverbindung mit einem Schraubenschlüssel festschrauben (Bild 4.1a). Wie fest Sie die Mutter anziehen können, hängt nicht allein von der Kraft ab, mit der Sie auf den Schraubenschlüssel einwirken, sondern auch von der Länge des Schraubenschlüssels. Lassen Sie Ihre Kraft senkrecht am Ende des Schraubenschlüssels angreifen, so stellt die Länge des Schraubenschlüssels den **Hebelarm** dar. Verlängern Sie den Hebelarm durch ein aufgestecktes Rohr, dann können Sie mit der gleichen Kraft eine größere Wirkung erzielen (Bild 4.1b). Die Wirkung hängt vom Produkt aus der Kraft  $F$  und der Länge  $l$  des Hebelarms ab. Dieses Produkt heißt **Drehmoment**  $M$ :

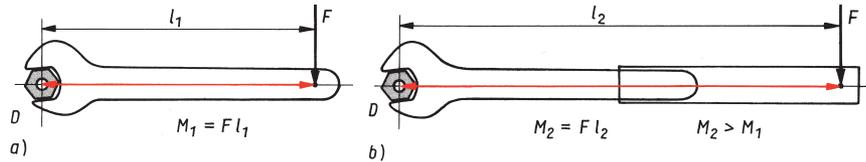


Bild 4.1: Drehmomente am Schraubenschlüssel  
a) ohne; b) mit aufgestecktem Rohr

### Drehmoment

$$M = Fl \quad (4.1)$$

$$[M] = \text{N} \cdot \text{m}$$

Greift z.B. eine Gewichtskraft von 1 N am Ende eines waagrecht stehenden Hebels von 1 m Länge an, so versucht die Gewichtskraft mit einem Drehmoment von 1 N · m den Hebel nach unten zu drehen. Drehmomente haben die gleiche Einheit Newtonmeter wie die Arbeit, obwohl es sich um völlig verschiedene Größen handelt. Das Drehmoment ist eine gerichtete Größe, also ein Vektor. In der Ebene erhalten rechtsdrehende Drehmomente ein negatives und linksdrehende ein positives Vorzeichen. Die Arbeit dagegen ist ungerichtet, ein Skalar. Beachten Sie deshalb: Sie dürfen niemals die Arbeitseinheiten Joule und Wattsekunde für Drehmomente benutzen.

Verlängern Sie den Hebelarm immer weiter, dann könnten Sie mit einer gegebenen Kraft theoretisch beliebig große Drehmomente erzielen. Schon ARCHIMEDES erkannte das und meinte: „Man gebe mir einen festen Punkt in der Luft, und ich werde die Erde aus den Angeln heben.“ Es kann passieren, dass Sie beim Anziehen einer Mutter mit einem auf den Schraubenschlüssel aufgesteckten Rohr ein so großes Drehmoment bewirken, dass Sie den Gewindebolzen abscheren. Um eine Mutter mit einem vorgegebenen Drehmoment anzuziehen, verwendet man Drehmomentenschlüssel, an denen das aufgewendete Drehmoment ablesbar oder einstellbar ist (Bild 4.2).



Bild 4.2: Drehmomentenschlüssel mit Anzeige

In Bild 4.3a stimmt der Hebelarm  $l$  mit der Länge  $r$  des Schraubenschlüssels überein. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn die Kraft  $F$  senkrecht zur Strecke  $r$  wirkt. Greift die Kraft  $F$  wie in Bild 4.3b unter einem Winkel  $\alpha < 90^\circ$  an, so verkürzt sich der Hebelarm  $l < r$ . Aus Bild 4.3b entnehmen Sie dafür die Beziehung  $l = r \sin \alpha$ .

Der Hebelarm  $l$  ist der kürzeste Abstand der Wirkungslinie der Kraft  $F$  von der Drehachse.

Für den Betrag des Drehmomentes gilt allgemein

$$M = Fl = Fr \sin \alpha \quad (4.2)$$

Der Betrag des Drehmomentes ist das Produkt aus Kraft und Hebelarm.

Je kleiner der Winkel  $\alpha$ , um so kleiner wird bei gleicher Kraft  $F$  und gleicher Strecke  $r$  der Hebelarm  $l$  und damit das Drehmoment  $M$ . Geht die Wirkungslinie der Kraft durch die Drehachse, so ist kein Hebelarm mehr vorhanden (Bild 4.3c). Die Kraft belastet dann nur noch die Drehachse, ohne eine Drehung bewirken zu können. Das Drehmoment ist null.

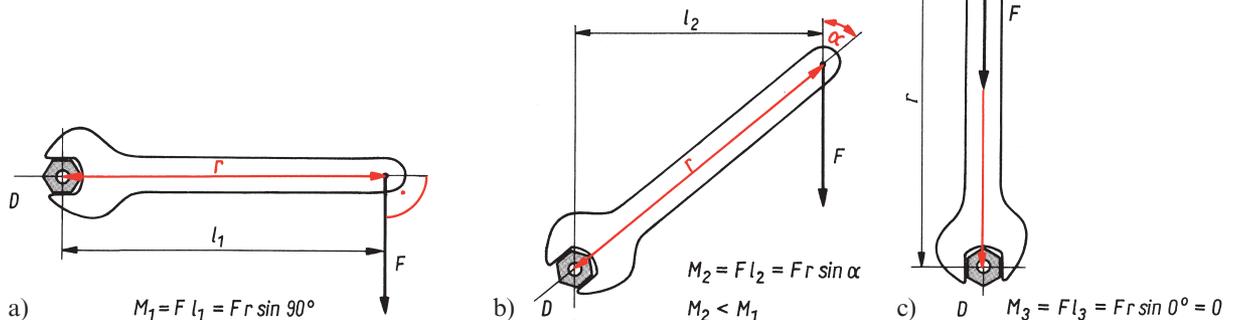


Bild 4.3: Drehmomente bei unterschiedlicher Krafrichtung zum Hebel  
a)  $\alpha = 90^\circ$ ; b)  $\alpha < 90^\circ$ ; c)  $\alpha = 0$

Drehmomente sind *vektorielle* Größen. Bei Drehung um eine Achse brauchen wir jedoch nur die beiden möglichen Richtungen zu unterscheiden, indem wir „linksdrehende Momente“ *positiv* und „rechtsdrehende Momente“ *negativ* zählen.

Sind zwei Räder mit unterschiedlichem Durchmesser *auf gleicher Drehachse* starr miteinander gekoppelt, rotieren sie mit gleicher Drehzahl:  $n_1 = n_2$  (s. 2.2.2). Auf beide Räder wirkt dabei das gleiche Drehmoment:  $M_1 = M_2$ . Wegen der Gleichheit der Drehmomente  $F_1 r_1 = F_2 r_2$  verhalten sich die Kräfte am Umfang der Räder *umgekehrt* wie ihre Radien bzw. ihre Durchmesser:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (4.3)$$

Es tritt eine Kraftwandlung auf. Bild 4.4 zeigt dies am Beispiel eines Wellrades.

Sind zwei Räder mit unterschiedlichem Durchmesser *über ihren Umfang* miteinander gekoppelt, verhalten sich ihre Drehzahlen nach Gl. (2.49) entsprechend dem Übersetzungsverhältnis  $i = n_1/n_2 = d_2/d_1$  umgekehrt wie ihre Durchmesser

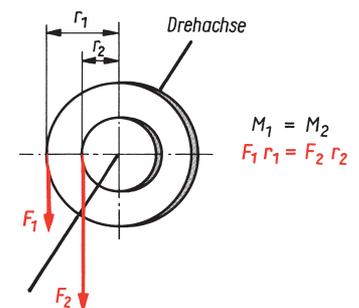


Bild 4.4: Kräfte und Drehmoment am Wellrad

Drehmoment

## Drehmomentenwandlung

(s. 2.2.2). Am Umfang beider Räder greift dabei die gleiche Kraft an:  $F_1 = F_2$ . Wegen der Gleichheit der Kräfte  $M_1/r_1 = M_2/r_2$  verhalten sich die Drehmomente beider Räder *wie* die zugehörigen Radien bzw. Durchmesser:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{i} \quad (4.4)$$

Es tritt eine Drehmomentenwandlung auf. Bild 4.5 zeigt dies am Beispiel eines Kettentriebes. Bei einer Übersetzung mit  $i < 1$  ins *Schnellere* wird das Drehmoment *verringert*. Bei einer Übersetzung mit  $i > 1$  ins *Langsamere* vergrößert sich das Drehmoment.

## Zahnradgetriebe

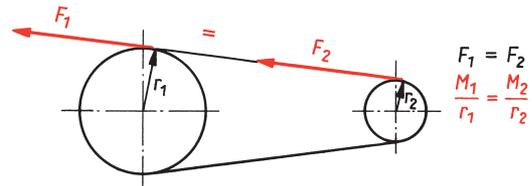
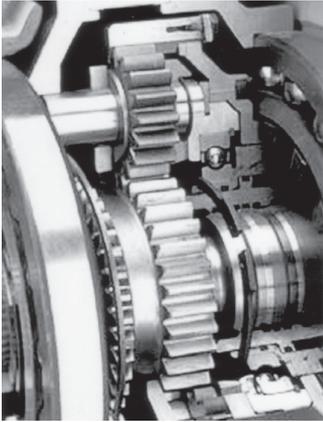


Bild 4.5: Kraft und Drehmomente am Kettentrieb

Jeder Kraftfahrer weiß, dass er im kleineren Gang bei größerem Übersetzungsverhältnis stärker beschleunigen kann oder Steigungen besser bewältigt.

Bei der Drehmomentenwandlung durch einen Zahnradtrieb ändert sich außerdem die Drehrichtung, wodurch sich die Drehmomente im Vorzeichen unterscheiden. Die Übersetzung kann als Verhältnis der Zähnezahlen ausgedrückt werden.

## Beispiel 4.1

Wie groß ist beim Fahrradfahren das erforderliche Drehmoment an den Tretkurbeln, wenn Sie am Umfang des Hinterrades eine Antriebskraft von 160 N erreichen wollen? (Durchmesser des vorderen Kettenrades  $d_1 = 20$  cm, des hinteren Kettenrades  $d_2 = 8$  cm und des Hinterrades  $d_3 = 70$  cm)

## Lösung:

Auf Hinterrad und hinteres Kettenrad wirkt das gleiche Drehmoment:  $F_3 r_3 = F_2 r_2 = 160 \text{ N} \cdot 0,35 \text{ m} = 56 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Beide Kettenräder erfahren die gleiche Umfangskraft  $F_1 = F_2 = F_3 (r_3/r_2) = 1400 \text{ N}$ . Das erforderliche Drehmoment an den Tretkurbeln ist gleich dem am vorderen Kettenrad:  $M_1 = F_1 r_1 = 1400 \text{ N} \cdot 0,1 \text{ m} = 140 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Mit welcher Kraft Sie dazu auf die Pedale treten müssen, hängt von der jeweiligen Winkelstellung von Tretkurbeln und Pedale ab. Bild 4.6 zeigt die unterschiedlichen Hebelarme bei verschiedenen Stellungen von Tretkurbeln und Pedal.

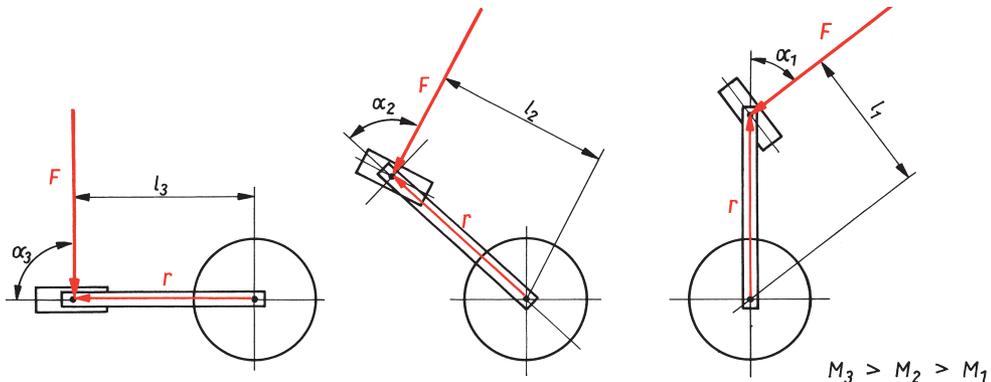


Bild 4.6: Unterschiedliche Länge der Hebelarme an der Tretkurbel eines Fahrrades

Oft lassen sich die ein Drehmoment bewirkenden Kräfte nicht ohne weiteres lokalisieren und ihre Hebelarme bestimmen. Denken Sie z. B. an die Kräfte auf die Wicklungen des Läufers eines Elektromotors oder die Reibungskräfte einer zähen Flüssigkeit auf den Rührer eines Rührwerkes. Eine Berechnung des Drehmomentes ist hier nach Gl. (4.2) nicht so einfach möglich. Dem Drehmoment kommt deshalb als physikalische Größe eine durchaus *eigenständige* Bedeutung zu.

Eine *direkte Messung von Drehmomenten* erfolgt durch die Verdrillung einer Feder. So wie die Längenänderung einer Feder der dehnenden Kraft (s. 3.1.3) ist der Verdrillungswinkel dem verdrillenden Drehmoment proportional:

$$M = k' \varphi \quad (4.5) \quad \text{Drehmoment}$$

Zur Kalibrierung einer dementsprechenden Drehmomentenwaage muss die Federkonstante (Winkelrichtgröße)  $k'$  der Feder bekannt sein.

Gl. (4.2) ergibt das Prinzip möglicher *indirekter* Verfahren zur Drehmomentenmessung an Antriebsmaschinen. Das Drehmoment eines Motors kann mittels einer Bremsvorrichtung bestimmt werden. Dabei wird das Antriebsmoment  $M_M$  des Motors durch ein gleich großes Bremsmoment  $M_W$  kompensiert, so dass der Motor mit konstanter Drehzahl läuft. Das Bremsmoment können Sie dann nach Gl. (4.2) aus der zu messenden Bremskraft und dem Hebelarm der Bremsvorrichtung berechnen. Bild 4.7 zeigt als Beispiel einer solchen Bremsvorrichtung eine Bremswaage (PRONYScher Zaum).

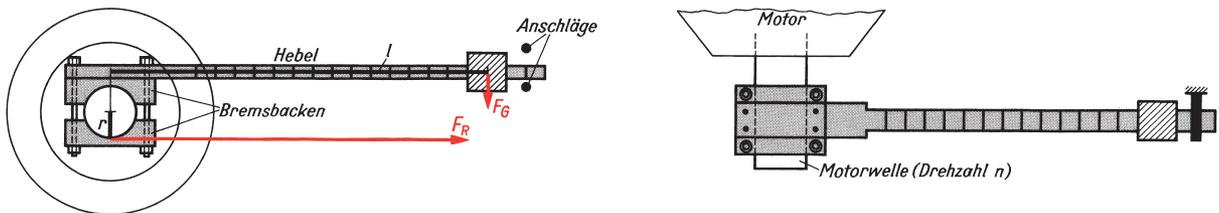


Bild 4.7: Bremswaage (PRONYScher Zaum)

Elektrische Verfahren zur Bestimmung des Drehmomentes von Antriebsmaschinen benutzen z. B. Wirbelstrombremsen, Hysteresebremsen, Drehmomentenaufnehmer mit Dehnungsmessstreifen oder Pendelgeneratoren. Bei gleichzeitiger Messung der Drehzahl ergibt sich nach Gl. (4.10) die Leistung der Antriebsmaschine (s. Beispiel 4.11).

#### Beispiel 4.2

Wie groß ist das Drehmoment eines Elektromotors, das mit einer Bremswaage durch eine Masse von 1,5 kg in 0,50 m Abstand von der Drehachse im Gleichgewicht gehalten wird (Bild 4.7)?

Lösung:

$$M_M = M_W = mgl = 1,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,50 \text{ m} \\ = 7,50 \text{ N} \cdot \text{m}$$

# SACHWORTVERZEICHNIS

- $\alpha$ -Umwandlung 327
- $\beta$ -Umwandlung 328
- $\gamma$ -Strahlung 329
- 1. Hauptsatz der Thermodynamik 143, 158
- 1. KIRCHHOFFSches Gesetz 188, 235
- 2. Hauptsatz der Thermodynamik 150, 166
- 2. KIRCHHOFFSches Gesetz 190, 235
- Abbildung, optische 295
- Abbildungsgleichung 299
- Abbildungsmaßstab 299
- Ablenkspannung 216
- Ablenkung von Elektronen 216
- Ablösearbeit 315
- Absorption 319, 331
- Abstandsgesetz, quadratisches 50, 303
- Adhäsionskräfte 110
- Adiabatexponent 162
- Aggregatzustand 147
- Akkumulator 181
- Aktivität 330
- Akzeptoren 254
- Ampere 179
- Amplitude 265, 229, 284
- Amplitudenmodulation 309
- Analog-Digital-Umsetzer 199
- Anlagen, hydraulische 112
- Anodenspannung 216
- Anomalie des Wassers 140
- Äquivalentdosis 335
- Aräometer 122
- Arbeit, elektrische 194, 205, 241
- , mechanische 59, 91
- Archimedisches Prinzip 120
- Atombombe 338
- Atome 313
- Atomemissionsspektrum 320
- Atomkern 325
- Atommasse, absolute 326
- , relative 325
- Auftrieb 119
- Auftrieb in Gasen 123
- Ausbreitungsgeschwindigkeit 281
- Ausdehnung, thermische 139
- Auslenkung (Elongation) 264, 265
- Auslösezählrohr 333
- Außenleiter 246
- Basisgrößen 12
- Becquerel 330
- Beleuchtungsstärke 306, 307
- BERNOULLISCHE Gleichung 126, 127
- Berührungsspannung 249
- Beschleunigung 18, 20, 22, 266
- Beschleunigungsarbeit 60
- Besetzungsinversion 321
- Bestrahlungsstärke 303
- Beugung 288
- Beugungsmaxima 293
- Beugungsspektren 293
- Bewegung auf gerader Bahn 18
- Bewegung, gleichförmige 18, 22
- , gleichmäßig beschleunigte 18, 24, 25
- Bewegungsdiagramme 21, 24, 25
- Bild, reelles 297
- , virtuelles 297
- Bildkonstruktion 296, 298
- Bimetallstreifen 141
- Bindungsenergie 326
- Bipolartransistoren 258
- Blasenammern 334
- Blindleistung 242
- Blindleistungskompensation 242
- Blindwiderstand 232
- , induktiver 232
- , kapazitiver 233
- BOHRSCHE Atommodell 318
- BOYLE-MARIOTTESCHE Gesetz 108, 159
- BRAUNSCHE Röhre 216
- Brechung 286
- Brechungsgesetz 286
- Brechungsindex 287
- Brechungswinkel 286
- Brechzahl 287
- Bremsswaage (PRONYSCHE Zaum) 85
- Brennpunkt 297
- Brennpunktstrahlen 297
- Brennweite 297
- Brennwert 154
- BREWSTER-Fenster 295
- Bruchgrenze 104
- Candela 306
- CARNOT-Prozess 165
- Celsius-Skala 137
- COMPTON-Streuung 332
- Coulomb 180
- COULOMBKRAFT 215
- COULOMBSCHES Gesetz 203
- Crashtest 78
- CURIE-Temperatur 212
- D'ALEMBERTSCHE Prinzip 56
- Dampfdruckkurve 169
- Dämpfe 169
- Dämpfung 270
- , elektromagnetische 270
- Defektelektronen 252
- Dehnung 103
- Dezibel 304
- Dichroismus 295
- Dichte 47
- Dichteänderung 140
- Dielektrikum 206
- Diffusionspumpen 116
- Dioptrie 298
- Dispersion 287
- Donatoren 253
- Doppelbrechung 294
- Doppelspalt 292
- Doppler-Effekt 283
- Dosisleistung 331
- Drahtwiderstände 186
- Drehbewegung (Rotation) 37
- Drehimpuls 92
- Drehimpulserhaltungssatz 92
- Drehkran 103
- Drehmoment 81, 82, 83, 85, 99, 100, 214
- Drehmomentenschlüssel 82
- Drehmomentenwandlung 84
- Drehschieberpumpen 116
- Drehschwingungen 268
- Drehstrom 246
- Drehstrommotor 247
- Drehwiderstände 187
- Drehzahl 33, 37
- Drehzahlmessung 39
- Dreieckschaltung 247
- Dreilenker-Vorderachse 272
- Drei-Niveau-Laser 322
- Dreiphasenwechselstrom 246
- Dreiphasenwechselstrom-Asynchronmotor 247, 248
- Druck 106
- , absoluter 117
- , dynamischer 126
- , statischer 111
- Druckmessung 117

- Druckskalen 117  
 Druckverlust, laminarer 134  
 –, turbulenter 134  
 Druckwasserreaktor 338, 339  
 Durchlassrichtung 255  
 Durchschnittsbeschleunigung 21  
 Durchschnittsgeschwindigkeit 19, 20  
 Durchschnittsleistung 70  
 Dynamik 40  
 – der Rotation 81
- Effektivwert 230  
 Eigenfrequenz 267, 268, 270, 275  
 Eigenleitung 251  
 Einheit 11  
 Einheiten, abgeleitete 12  
 EINSTEINSche Gleichung 315  
 Elastizitätsmodul 104  
 Elektrik 178  
 Elektrolytkondensatoren 208  
 Elektromagnete 213  
 Elektronen 178  
 – in elektrischen Feldern 215  
 – in magnetischen Feldern 217  
 Elektronenmikroskop 218  
 Elektronenstrahlen 215  
 Elektronenstrahlzilloskop 217  
 Elektronenvolt 216  
 Elementarladung, elektrische 178, 180  
 Emission 319  
 –, induzierte 320  
 –, spontane 320  
 –, stimulierte 320, 321  
 Emitterschaltung 258  
 Energie 64  
 – Efficiency Ratio 164  
 –, elektrische 193  
 –, innere 137  
 –, kinetische 64  
 –, potenzielle 65  
 Energiebilanzen 67, 143, 180  
 Energiedosis 331  
 Energieerhaltungssatz 66, 68, 143  
 Energieflussschema 71  
 Energie-Frequenz-Beziehung 314  
 Energieniveau 314, 318, 324, 328  
 Energiequantelung 314  
 Energiestrom 284  
 Energieübertragung 302  
 Energieumsatz 240  
 Energieumwandlungen 153
- Energiezähler (Kilowattstunden-  
 zähler) 240  
 Entmagnetisierung 213  
 Entropie 167  
 Ersatzwiderstand 188  
 Expansionsarbeit 158
- Fahrwiderstandskraft 52  
 Fahrwiderstandszahl 52  
 Fall, freier 28  
 Fallturm 28  
 Farad 205  
 FARADAYScher Käfig 206  
 Federkonstante 43  
 Federkraft 266  
 Federkraftmessung 43  
 Federspannarbeit 62  
 Fehlerspannung 249  
 Fehlerstromschutzschalter 250  
 Feinvakuum 116  
 Feld, elektrisches 203  
 Feldeffekttransistoren 258, 261  
 Feldemission 216  
 Feldenergie, elektrische 205  
 –, magnetische 211  
 Felder, elektrische 202, 204  
 –, homogene 202  
 –, magnetische 202, 209, 210  
 Feldgrößen 202  
 Feldkonstante, elektrische 203  
 –, magnetische 210  
 Feldlinien, elektrische 203  
 Feldlinienbilder 202  
 Feldliniendichte 202  
 Feldstärke 202  
 –, elektrische 203, 204  
 –, magnetische 210  
 Fernrohr 300, 301  
 Ferromagnetismus 212  
 Festigkeit 103  
 Fläche 14  
 Fliehkräfte 57  
 Fluss, magnetischer 210  
 Flussdichte 202  
 –, elektrische 204  
 –, magnetische 210  
 Flüssigkeitsausdehnungsthermometer 141  
 Flüssigkeitsmanometer 118  
 Flüssigkeitsoberfläche 109  
 Flüssigkristall-Anzeige 295  
 Fotodioden 256
- Fotoeffekt 315, 332  
 Fotoemission 216  
 Frequenz 32, 229, 265, 283  
 Frequenzmodulation 309  
 Fusionsreaktor 339
- Gangunterschied 289, 290  
 Gas, ideales 156  
 Gase, reale 168  
 Gasentladungen 218, 219  
 Gaskonstante, molare 157  
 –, spezifische 157  
 Gebrauchsenergie 74  
 Gefäßmanometer 118  
 GEIGER-MÜLLER-Zählrohr 219, 333  
 Generatorprinzip 222, 223  
 Gesamtspannung 237  
 Gesamtwirkungsgrad 72  
 Geschwindigkeit 18, 20, 22, 265  
 Geschwindigkeitsänderung 48  
 Gesetz von BREWSTER 294  
 Getterpumpen 116  
 Gewichtskraft 50  
 Gitterkonstante 293  
 Glasfaser 287  
 Gleichgewicht starrer Körper 95  
 Gleichgewichtsarten 96  
 Gleichgewichtsbedingungen 95  
 Gleichrichtung 256  
 Gleichstrom 178, 179  
 Gleitreibungskraft 51  
 Gleitreibungszahl 51, 52  
 Glimmentladungen 219  
 Glühemission 216  
 Grad Celsius 137  
 GRAETZ-Schaltung 256  
 Gravitationsgesetz 50  
 Gravitationskonstante 50  
 Gravitationswechselwirkung 50  
 Gray 331  
 Grenzfall, aperiodischer 271  
 Grenzfrequenz 316  
 Grenzwinkel 130  
 Grenzwinkel (Oberflächenspannung) 110,  
 Grenzwinkel (Totalreflexion) 287  
 Grobvakuum 116  
 Größe 11  
 Größen, lichttechnische 306  
 –, physikalische 11  
 Größengleichungen 13

- Grundgesetz der Dynamik 47, 53, 74, 89
- Haftreibungskraft 51
- Haftreibungszahl 51, 52
- Halbleiter 251
- Halbleiterdetektoren 334
- Halbleiterdioden 256
- Halbwertsdicke 332
- Halbwertszeit 329
- Hangabtriebskraft 45, 46
- Hauptquantenzahl 318
- Hauptstrahlen 298
- Hebelarm 82
- HEISENBERGSche Unschärferelation 316
- Heißdampf 170
- Heizwert 154
- Hertz 265
- HERTZsche Wellen 308, 309
- Hochvakuum 116
- Hohlraumstrahlung 175
- Hohlspiegel 297
- HOOKESches Gesetz 43, 103
- HÖPPLER-Viskosimeter 134
- Hubarbeit 61
- Hubschrauber 93
- HUYGENSSches Prinzip 284
- Hystereseverluste 245
- Hysteresisschleife 213
- Impuls 74
- Impulserhaltungssatz 75
- Induktion, elektromagnetische 220
- Induktionsgesetz 221, 232
- Induktionsspannung 224
- Induktivität 211
- Influenz 206
- Intensität ( $\gamma$ -Strahlung) 332
- Interferenz 288, 289, 291
- Interferenzmaxima 290
- Interferenzminima 290
- Internationales Einheitensystem (SI) 12
- Ionen 178
- Ionisierungsenergie 318
- Isobare (Zustandsänderung) 161, 325
- (Nuklide) 325
- Isochore 160
- Isolatoren 179
- Isotherme 159, 168
- Isotope 325
- Joule 59, 143
- Kalorimeter 151
- Kältemaschine 164
- Kapazität 204, 205
- Kapazitätsdioden 258
- Kapillardepression 111
- Kapillare 111
- Kapillarität 110
- Kelvin 138
- Kernenergie 336
- Kernfusion 336, 339
- Kernkräfte 326
- Kernkraftwerk 338
- Kernladungszahl 325
- Kernphysik 313
- Kernreaktoren 338
- Kernspaltung 336, 337
- Kernstrahlung 327, 333
- Kernsynthese 336, 339
- Kettenreaktion 337
- Kettentrieb 84
- Kilogramm 46
- Kilowattstunde 59
- Kinematik 16, 17, 35, 37
- Kippgrenze 102
- Kippmoment 101
- Klemmenspannung 194
- Knotensatz 198
- Koerzitivfeldstärke 212
- Kohäsionskräfte 108
- Kolbendruck 111, 112
- Komponenten (Geschwindigkeit) 30
- (Kräfte) 45
- Kompressibilität 108
- Kompressionsarbeit 158
- Kondensator 204, 208
- Kontamination 335
- Kontinuitätsgleichung 125
- Konvektion 171
- Körper, schwarzer 175
- , starrer 17, 35
- Körperschluss 249
- Kräfte 40, 214
- Kraft des elektrischen Feldes 203
- , resultierende 44
- Krafteck 45
- Kräftepaar 99
- Kräfteparallelogramm 45
- Kraftfeld, elektrisches 202
- , magnetisches 202
- Kraftmessdosen, piezoelektrische 43
- Kraftmessgerät 43
- Kraftmessung 42
- Kraftmesswandler, induktiver 43
- Kraftsysteme, ebene 97
- Kraftumwandlung, hydraulische 112
- Kraftwandlung 83
- Kreisbahn 32
- Kreisbewegung 32
- Kreisfrequenz 229, 265, 266, 268
- Kreisprozesse 163
- , reversible 166
- Kreiswelle 282
- Kriechfall 271
- Kryopumpen 116
- Kugelwelle 282
- Kupferverluste 245
- Kurzschluss 195
- Kurzschlussläufermotor 247
- Kurzschlussstromstärke 195
- Laborthermometer 142
- Ladungen, elektrische 178, 180, 203
- Ladungsträgerinjektion 259
- Länge 14
- Längenausdehnungskoeffizient 139
- Längswellen 282
- Laser 321
- Laserarten 322
- Laserdiode 322
- Laserpointer 322
- LAUE-Diagramm 293
- Lautstärke 304
- Lautstärkepegel 304
- Lautstärkepegelmessgeräte 305
- Leistung, elektrische 182, 183, 193
- , mechanische 70, 91
- Leistungsfaktor 241
- Leistungspegel 304
- Leistungszahl 164
- Leiter, elektrischer 179
- , stromdurchflossener 209, 213
- Leiterspannung 247
- Leitfähigkeit, elektrische 185
- Leitungselektronen 253
- Leitwert 183
- LENTZSches Gesetz 221
- Lichtausbeute 306
- Lichtbogen 219
- Lichtemitterdioden 257
- Lichtempfindungen 304
- Lichtleiter 287

- Lichtstärke 306  
 Lichtstrom 306  
 Linsen, dünne 297  
 LISSAJOUS-Figuren 279  
 Löcher 252  
 Longitudinalwellen 282  
 LORENTZ-Kraft 217, 218  
 Luftdruck 115  
 –, ambienter 115  
 Luftfeuchte, absolute 170  
 –, relative 170  
 Lumen 306  
 Lux 306
- Magdeburger Halbkugeln 115  
 Magnetisierungskurve 212  
 –, technische 213  
 Maschensatz 198  
 Maschinen, elektrische 224  
 Masse 46  
 –, relativistische 317  
 --Energie-Äquivalenz 317  
 --Feder-Schwinger 266  
 Massendefekt 326  
 Masseneinheit, atomare 326  
 Massenmittelpunkt 96  
 Massenträgheitsmoment 81, 86, 87  
 Massenzahl 325  
 Mechanik 16  
 – der Flüssigkeiten und Gase 106  
 – ruhender Flüssigkeiten und Gase 111  
 – strömender Flüssigkeiten und Gase 124  
 Messbrücke 201  
 Messung elektrischer Größen 198  
 – von Drehmomenten 85  
 Messverfahren, digitale 199  
 Metallausdehnungsthermometer 141  
 Metall-Oxid-Feldeffekttransistoren (MOSFET) 261  
 Mikroskop 300, 302  
 Mikrowellen 308, 309, 311  
 Mikrowellenofen 311  
 Mikrowellen-Vakuumtrockner 311  
 Mischungstemperatur 150, 151  
 Mittelpunktstrahlen 298  
 Mobilfunk 309  
 Modulation 309  
 Momentangeschwindigkeit 20, 265  
 Momentanleistung 70, 240  
 Momentanwert 229
- Motorprinzip 214  
 MP-Kondensatoren 208
- Nassdampf 170  
 Netze, elektrische 198  
 Neutralleiter 247  
 Neutrino 328  
 Neutron 325  
 Neutronenzahl 325  
 Newton 42, 48  
 NEWTONSche Axiome 48  
 n-Leitung 253  
 Normalkraft 45, 46, 51, 107  
 Normalspannungen 104  
 Nukleonen 325  
 Nuklid 325  
 Nullung 249  
 Nutzenergie 74
- Oberflächenenergie 109  
 Oberflächenspannung 109  
 Objektiv 301  
 Ohm 183  
 OHMSches Gesetz 183, 231  
 Okular 301  
 Orbitale 316  
 Ordnungszahl 325  
 Orientierungspolarisation 207  
 Oszillatoren, harmonische 264, 266  
 OTTO-Prozess 163
- Paarbildung 332  
 Parallelresonanz 276  
 Parallelschaltung 187, 196, 239  
 Pascal 107  
 Pendel, mathematisches 269  
 –, physisches 269  
 Pendelschwingungen 268  
 Periode 229  
 Periodendauer 32, 229, 265, 283  
 Permeabilitätszahl 212  
 Permittivitätszahl 207  
 Perpetuum mobile 166, 167  
 Personendosimeter 336  
 Phase 231  
 Phasengeschwindigkeit 281, 283  
 Phasenverschiebung 231, 232, 234, 237, 276  
 Phon 304  
 Photonen 315, 318, 319, 324, 327  
 Photovoltaikanlage 257  
 PLANCKSche Konstante 314
- PLANCKSches Wirkungsquantum 314  
 Plattenfedermanometer 118  
 Plattenkondensator 205  
 p-Leitung 254  
 pn-Übergang 254  
 Poissonsche Gleichung 162  
 Polarisation 294  
 –, dielektrische 206, 207  
 Polarisationsfilter 295  
 Polytropenexponenten 162  
 PRANDTLsches Staurohr 128  
 Präzisions-Schallpegelmesser 305  
 Primärenergie 74  
 Primärwicklung 244  
 Proton 325  
 Protonenzahl 325  
 Prozesse, irreversible 167  
 –, thermodynamische 136  
 Prozessgröße 159  
 Pumpspeicherwerk 72, 73  
 Punktmasse 17  
*p-V*-Diagramm 158
- Quanten 314  
 Quantenelektrodynamik 318  
 Quantenphysik 313  
 Quellen 202  
 Quellenspannung 181  
 Querwellen 282
- RADAR 310  
 Radarantenne 310  
 Radialbeschleunigung 34, 35  
 Radialkraft 57  
 Radiant 33  
 Radioaktivität 327  
 Radionuklide 327  
 Raketenantrieb 79  
 Reaktion, thermonukleare 339  
 Reflexion 285  
 Reflexionsgesetz 286  
 Reflexionswinkel 286  
 Reibung, innere 130, 270  
 –, trockene 270  
 Reibungsarbeit 63  
 Reibungskräfte 51  
 Reihenresonanz 275, 276  
 Reihenschaltung 189, 196, 236, 237, 275  
 Relativität der Bewegung 29  
 Remanenzflussdichte 212

- Resonanz 272  
 Resonanzfrequenz 276  
 Resonanzkatastrophe 273  
 Resonanzkurve 272  
 Resonanzverstärkung 321  
 REYNOLDSSche Zahl 131  
 Richtungswinkel 98  
 Rohöldestillation 149  
 Röhren, kommunizierende 114  
 Röhrenfedermanometer 118  
 Rohrleitungen 134  
 Rollreibung 52  
 Rollreibungskraft 52  
 Rollreibungszahlen 52  
 Röntgenbeugung 293  
 Röntgenbremsstrahlung 324  
 Röntgenquant 324  
 Röntgenstrahlen 323  
 Röntgenstrahlung 308  
 –, charakteristische 324  
 Rotation 17, 36, 37, 81, 89, 91  
 Rotationsenergie 86  
 Rotationsviskosimeter 134  
 Rubinlaser 322  
 Ruhmasse 317  
 RUTHERFORDSches Atommodell 313  
 RYDBERG-Frequenz 318
- Sammellinsen 297  
 Sattdampf 170  
 Sättigungsdruck 169  
 Sättigungsfeldstärke 212  
 Satz von STEINER 87  
 Schallempfindungen 304  
 Schallintensität 304  
 Schallintensitätspegel 304  
 Schallstärke 304  
 Schaltkreise, integrierte 251, 262  
 Schaltung von Spannungsquellen 196  
 Schaltung von Widerständen 187  
 Scheinleistung 241  
 Scheinwiderstand 237  
 Scherung 104  
 Schichtwiderstände 186  
 Schiebewiderstände 187  
 Schlauchwaage 114  
 Schlupf 247  
 Schmelztemperatur 147  
 Schmelzwärme 147  
 –, spezifische 148  
 Schrägrohrmanometer 119
- Schubbeanspruchung 104  
 Schubkraft einer Rakete 79  
 Schubmodul 104  
 Schutzisolierung 249  
 Schutzkleinspannung 249  
 Schutztrennung 249  
 Schwächungskoeffizient 332  
 Schwebungen 278  
 Schwebungsfrequenz 278  
 Schweredruck 111, 113  
 Schwerpunkt 96  
 Schwimmen 121  
 Schwingkreis, elektrischer 273  
 Schwingung, freie ungedämpfte 267  
 Schwingungen 49, 263  
 – gleicher Frequenz 277  
 –, anharmonische 279  
 –, elektrische 273, 275  
 –, erzwungene 272  
 –, freie gedämpfte 270  
 –, freie ungedämpfte 263  
 –, mechanische 263, 275  
 Schwingungsbäuche 291  
 Schwingungsdämpfer 272  
 Schwingungsdauer 265  
 Schwingungsenergie 267  
 Schwingungsknoten 291  
 Sehinkel 300  
 Sekundärelektronenemission 216  
 Sekundärwicklung 244  
 Selbstinduktion 226  
 Selbstinduktionsspannung 226  
 Siedetemperatur 148  
 Siemens 183  
 Sievert 335  
 Sinusschwingung 264, 266  
 Solarkonstante 176  
 Solarzelle 257  
 Sorptionspumpen 116  
 Spannung, mechanische 103,  
 –, elektrische 180, 182  
 Spannungsabfall 182  
 Spannungsdoppelbrechung 295  
 Spannungskompensation 200  
 Spannungsmesser 199  
 Spannungsquellen, elektrische 181  
 Spannungsresonanz 276  
 Spannungsteilerschaltung 191  
 Spannungsteilung 190  
 Spannungsverstärker 259  
 Spektrallinien, diskrete 318  
 Spektrum, elektromagnetisches 308
- Sperrrichtung 256  
 Spiegel 297  
 Spurendetektoren 334  
 Standmoment 101  
 Standsicherheit 101, 102  
 Statik 95  
 Staudruck 127  
 STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz 176  
 Steighöhe, kapillare 111  
 Sternpunkt 246  
 Sternschaltung 247  
 Stoffe, diamagnetische 182  
 –, ferromagnetische 212  
 –, paramagnetische 212  
 STOKESSches Gesetz 132  
 Störstellenleitung 253  
 Stoß, elastischer 76  
 –, unelastischer 78  
 Stoßdämpfer 272  
 Strahlenexposition 335  
 Strahlenschutz 335  
 Strahlenschutzverordnung 335  
 Strahlpumpe 129  
 Strahlstärke 303  
 Strahlung, elektromagnetische 308  
 –, ionisierende 335  
 Strahlungsfluss 302  
 Strahlungsflussdichte 284  
 Strahlungsgrößen, physikalische 302  
 Strahlungspyrometer 142  
 Strangspannung 247  
 Strichgitter 293  
 Strom, elektrischer 178  
 Stromdichte 180  
 Stromkreise, reale 194  
 Stromlinien 124  
 Strommesser 199  
 Stromresonanz 276  
 Stromstärke, elektrische 179  
 Strömung idealer Flüssigkeiten und Gase 125  
 – realer Flüssigkeiten und Gase 130  
 Strömungen, laminare 131  
 –, turbulente 131  
 Strömungsgeschwindigkeit 124  
 Strömungsmechanik 124  
 Strömungswiderstand 132  
 Sublimation 149  
 Supraleitung 186  
 Systeme, optische 295  
 Szintillationsmesssonden 334

- Tangentialspannungen 104  
 Taupunkt 170  
 Teilspannung 237  
 Temperatur 137, 144, 145  
 –, kritische 169  
 –, thermodynamische 138  
 Temperaturabhängigkeit (elektrischer Widerstand) 185  
 Temperaturmessung 141  
 Temperaturstrahlung 172, 175, 308  
 Tenside 111  
 Termschema des Wasserstoffs 319  
 Thermistoren 187  
 Thermodynamik 136  
 Thermoelemente 142  
 Thermometerskala 137  
 Thermospannung 142  
 THOMSONSche Schwingungsgleichung 275  
 Thyristoren 256  
 Tonne 46  
 Torsion 104  
 Totalreflexion 287  
 Trägerfrequenzen 309  
 Trägheitsgesetz 46  
 Trägheitskräfte 56  
 Transformatoren 243  
 Transformatorprinzip 223  
 Transistoreffekt 258  
 Transistoren 258  
 Transistorverstärker 259, 260  
 Translation 17, 36, 89  
 Transversalwellen 282  
  
 UBBELOHDE-Viskosimeter 134  
 Überdruck 117  
 Überlagerung von Bewegungen 29  
 – von Schwingungen 276  
 Überlagerungssatz 30  
 Übersetzungsverhältnis 38, 244  
 Ultrahochvakuum 116  
 Umlauffrequenz 33  
 Umspannwerk 244  
 Umwandlung, radioaktive 329  
 Universalprüfmaschine 103  
 Unterdruck 117  
 U-Rohr-Manometer 118  
  
 Vakuum 116  
 Varistoren 187  
 Vektoraddition 30, 45  
 Vektoren 12, 44  
  
 Verbrennungswärme 154  
 Verdampfungswärme 148  
 –, spezifische 148  
 Verformung 95, 103  
 Vergrößerung 300, 301  
 Verkettungsfaktor 247  
 Verschiebungspolarisation 206  
 Vielfachmesser 199  
 Viskosität 130  
 –, dynamische 131  
 Viskositätsbestimmungen 134  
 Volt 182  
 Voltampere 241  
 Volumen 14  
 Volumenänderungsarbeit 158  
 –, adiabatische 162  
 Volumenausdehnungskoeffizient 139  
 Volumenstrom 124, 129  
 Vorsätze 13  
 Vorwiderstand 191  
  
 Waage zur Dichtebestimmung 120  
 Wärme 136, 143, 145  
 Wärmebewegung 137  
 Wärmebilanz 150  
 Wärmedurchgang 172  
 Wärmedurchgangskoeffizient 173, 174  
 Wärmekapazität 145  
 –, spezifische 145, 146  
 Wärmekraftmaschine 163  
 Wärmeleitfähigkeit 174  
 Wärmeleitung 171, 173  
 Wärmepumpe 164  
 Wärmestrom 172, 173  
 Wärmetransport 171  
 Wärmeübergang 173, 174  
 Wärmeübergangskoeffizienten 174  
 Wärmeübertragung 171  
 Wärmewiderstand 172, 173  
 Watt 182  
 Wattsekunde 59  
 Wechselspannungen 228  
 Wechselstrom 228  
 Wechselstromkreise 231, 235  
 Wechselwirkungsgesetz 41  
 Welle, ebene 282  
 Wellen 281  
 –, stehende 291  
 Wellenausbreitung 281  
 Wellenfronten 283  
 Wellenlänge 283  
  
 Wellenstrahlen 283  
 Welle-Teilchen-Dualismus 315  
 WHEATSTONESche Messbrücke 201  
 Wickelkondensatoren 208  
 Widerstand, elektrischer 181, 183, 184  
 –, innerer 194  
 –, ohmscher 183  
 –, spezifischer elektrischer 185  
 –, technischer 186  
 Widerstandsbeiwert 132  
 Widerstandsbemessungsgleichung 185  
 Widerstandsthermometer 141, 142  
 WIENScher Verschiebungssatz 176  
 Windenergieanlage 129  
 Windkanal 132  
 Winkel 33  
 Winkelbeschleunigung 34  
 Winkelgeschwindigkeit 33  
 Wirbelströme 225  
 Wirbelstromverluste 245  
 Wirkleistung 240, 241, 248  
 Wirkungsgrad 70, 71, 195  
 –, thermischer 164, 165  
 –, thermodynamischer 166  
 Wirkungslinie 44  
 Wirkwiderstände 231  
 Wölbspiegel 297  
 Wurf, waagerechter 31  
 Wurfparabel 32  
  
 Zeigerdiagramme 236  
 Zeit 15  
 Zentrifugalkraft 57  
 Zerfallskonstante 329  
 Zerstäuber 129  
 Zerstreuungslinsen 297  
 Zugspannung 103  
 Zusammensetzung von Kräften 44  
 Zustandsänderungen idealer Gase 157, 159  
 –, adiabatische 162  
 –, isobare 161  
 –, isochore 160  
 –, isotherme 159  
 Zustandsgleichung, kalorische 160  
 –, thermische 156  
 Zustandsgrößen 136, 156  
 Zweikanal-Oszilloskop 230  
 Zylinder, rollender 88