

# Physik - Der Grundkurs

Bearbeitet von

Steffen Bohrmann, Rudolf Pitka, Horst Stöcker, Georg Terlecki, Hartmut Zetsche

1. Auflage 2013. Taschenbuch. 480 S. Paperback

ISBN 978 3 8085 5621 4

Gewicht: 716 g

[Weitere Fachgebiete > Physik, Astronomie > Physik Allgemein](#)

schnell und portofrei erhältlich bei



Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

**Physik**  
**Der Grundkurs**





Edition  
Harri   
Deutsch

# Physik

## Der Grundkurs

von

Rudolf Pitka  
Steffen Bohrmann  
Horst Stöcker  
Georg Terlecki  
Hartmut Zetsche

**5., korrigierte Auflage**

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 56207**

**Autoren:**

Prof. Dr. Rudolf Pitka, Fachhochschule Frankfurt am Main  
Prof. Dr. Steffen Bohrmann, Fachhochschule Mannheim  
Prof. Dr. Horst Stöcker, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main  
Prof. Dr. Georg Terlecki, Fachhochschule Kaiserslautern  
Dr. Hartmut Zetsche, Richard Fehrenbach-Gewerbeschule Freiburg im Breisgau

5., korrigierte Auflage 2013

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5621-4

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2013 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten  
<http://www.europa-lehrmittel.de>  
Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf  
Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald  
Druck: Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

# **Vorwort**

Dieses Lehr- und Lernbuch wendet sich an Studienanfänger der Ingenieur- und Naturwissenschaften an Fachhochschulen und Universitäten. Die Erfahrungen mit den Vorauflagen zeigen, dass das Buch gerade auch für jene Studierenden eine erfolgversprechende Alternative ist, die sich von den „dicken Brocken“, den sehr umfassenden Lehrbüchern überfordert fühlen.

Die in der Lehre erfahrenen Autoren bieten den für das Studium notwendigen Stoff der Standardgebiete – von der elementaren Basis bis zu fortgeschrittenen Anwendungen – so ausführlich wie nötig in verständlicher Weise dar. Sie orientieren sich an den Anwendungsbereichen der Ingenieurpraxis.

Großen Wert legen die Autoren auf viele durchgerechnete Beispiele mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad sowie auf Hunderte von erprobten Klausuraufgaben mit Lösungen und Übungsaufgaben mit hohem Praxisbezug. Diese erleichtern das Verständnis, das Üben und die effiziente Vorbereitung auf Prüfungen. Die Herleitung der Ergebnisse im Haupttext und in den Beispielen ist so ausführlich gehalten, dass sie mit allen Zwischenrechnungen rasch verstanden und nachvollzogen werden können. Hilfreich sind auch die Zusammenfassungen der einzelnen Kapitel.

Auch wenn sich das Buch in erster Linie an Studierende wendet, können es diejenigen Ingenieure, die bereits in der Berufspraxis stehen, mit Gewinn zur Einarbeitung in neue Arbeitsgebiete und zur eigenen Weiterbildung nutzen. Deshalb sind neben dem Grundlagenwissen zusätzlich anwendungsbezogene und weiterführende Kapitel der klassischen Physik aufgenommen.

Kritik, Anregungen und Verbesserungsvorschläge an [lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de) sind Autoren und Verlag auch für diese Ausgabe hochwillkommen.

Frankfurt, im Herbst 2013

Autoren und Verlag



# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Beispiele</b> . . . . .	XII
<b>Verzeichnis der Tabellen</b> . . . . .	XV
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	1
1.1 Physikalische Größen . . . . .	1
1.2 Messfehler . . . . .	3
<b>I Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers</b> . . . . .	7
<b>2 Vorbemerkungen</b> . . . . .	8
2.1 Bezugssysteme . . . . .	8
2.2 Gegenüberstellung Translation–Rotation . . . . .	8
<b>3 Kinematik der geradlinigen Bewegung</b> . . . . .	10
3.1 Orts-Zeit-Diagramme . . . . .	10
3.2 Geschwindigkeit . . . . .	11
3.3 Beschleunigung . . . . .	13
3.4 Bestimmung der Wegstrecke $\Delta x$ und der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v$ . . . . .	15
3.5 Spezielle Bewegungen . . . . .	17
3.6 Senkrechter Wurf . . . . .	19
3.7 Bewegung auf beliebigen Bahnen . . . . .	22
3.8 Zusammenfassung . . . . .	22
3.9 Aufgaben . . . . .	23
<b>4 Bewegung in einer Ebene</b> . . . . .	27
4.1 Vektoren – Grundbegriffe . . . . .	27
4.2 Die Vektoren $\vec{r}$ , $\vec{v}$ und $\vec{a}$ . . . . .	29
4.3 Das Superpositionsprinzip . . . . .	31
4.4 Spezielle Bewegungen . . . . .	32
4.5 Kreisbewegungen . . . . .	37
4.6 Überlagerung von Translations- und Drehbewegung . . . . .	42
4.7 Zusammenfassung . . . . .	43
4.8 Aufgaben . . . . .	44
<b>5 Bewegung und Kraft</b> . . . . .	48
5.1 Newtons Gesetze . . . . .	48
5.2 Federkräfte und Reibungskräfte . . . . .	53
5.3 Wechsel des Bezugssystems . . . . .	57
5.4 Zusammenfassung . . . . .	60
5.5 Aufgaben . . . . .	61
<b>6 Arbeit, Energie und Leistung</b> . . . . .	63
6.1 Arbeit . . . . .	63
6.2 Arbeit und Energie . . . . .	67
6.3 Leistung und Wirkungsgrad . . . . .	75
6.4 Zusammenfassung . . . . .	76
6.5 Aufgaben . . . . .	78

<b>7</b>	<b>Impuls und Mehrkörperprobleme . . . . .</b>	79
7.1	Impuls . . . . .	79
7.2	Impulserhaltung bei Zweikörpersystemen . . . . .	80
7.3	Stöße . . . . .	83
7.4	Zusammenfassung . . . . .	87
7.5	Aufgaben . . . . .	88
<b>8</b>	<b>Dynamik der Drehbewegung des starren Körpers . . . . .</b>	90
8.1	Winkelgrößen als Vektoren . . . . .	90
8.2	Grundgesetz der Dynamik für Drehungen . . . . .	95
8.3	Arbeit, Energie und Leistung . . . . .	102
8.4	Trägheitskräfte in rotierenden Bezugssystemen . . . . .	106
8.5	Statisches Gleichgewicht . . . . .	110
8.6	Drehimpulserhaltungssatz . . . . .	112
8.7	Die Hauptachsen starrer Körper . . . . .	113
8.8	Kreisel . . . . .	115
8.9	Zusammenfassung . . . . .	118
8.10	Aufgaben . . . . .	119
<b>9</b>	<b>Gravitation . . . . .</b>	122
9.1	Kepler'sche Gesetze . . . . .	122
9.2	Newton's Gravitationsgesetz . . . . .	123
9.3	Herleitung der Kepler'schen Gesetze . . . . .	124
9.4	Gravitationsfeld . . . . .	125
9.5	Zusammenfassung . . . . .	127
9.6	Aufgaben . . . . .	127
<b>II</b>	<b>Elastomechanik und Hydrodynamik</b>	<b>129</b>
<b>10</b>	<b>Elastizität fester Körper . . . . .</b>	<b>130</b>
10.1	Grundbegriffe . . . . .	130
10.2	Einfache Verformungen . . . . .	131
10.3	Zusammenfassung . . . . .	139
10.4	Aufgaben . . . . .	140
<b>11</b>	<b>Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen . . . . .</b>	<b>141</b>
11.1	Grundbegriffe . . . . .	141
11.2	Ruhende Flüssigkeiten und Gase: Hydrostatik . . . . .	141
11.3	Stationäre Strömungen: Hydrodynamik . . . . .	147
11.4	Stationäre Strömungen mit Reibung . . . . .	155
11.5	Zusammenfassung . . . . .	158
11.6	Aufgaben . . . . .	159
<b>III</b>	<b>Schwingungen und Wellen</b>	<b>163</b>
<b>12</b>	<b>Schwingungen . . . . .</b>	<b>164</b>
12.1	Periodische Zustandsänderungen, insbesondere harmonische Schwingungen . . . . .	164
12.2	Harmonische Oszillatoren . . . . .	166
12.3	Viskos gedämpfte Schwingungen . . . . .	173
12.4	Erzwungene Schwingungen, Resonanz . . . . .	176
12.5	Überlagerung von Schwingungen und gekoppelte Schwingungen . . . . .	180
12.6	Zusammenfassung . . . . .	182
12.7	Aufgaben . . . . .	185

---

<b>13</b>	<b>Mechanische Wellen und Akustik</b>	190
13.1	Wellengleichung; Ausbreitung von Störungen	190
13.2	Harmonische Wellen	196
13.3	Energietransport in Schallwellen	200
13.4	Reflexion von Wellen	204
13.5	Stehende Wellen in einseitig begrenzten Medien	206
13.6	Tonhöhe und Lautstärke	209
13.7	Doppler-Effekt, Mach-Welle	210
13.8	Interferenz von Wellen	214
13.9	Beugung und Huygens'sches Prinzip	221
13.10	Reflexion und Brechung von Wellen	227
13.11	Ultraschall	229
13.12	Zusammenfassung	230
13.13	Aufgaben	234
<b>14</b>	<b>Lichtwellen und Optik</b>	239
14.1	Elektromagnetische Wellen und Licht	239
14.2	Reflexion und Transmission elektromagnetischer Wellen	242
14.3	Dispersion und Absorption elektromagnetischer Wellen	245
14.4	Spektralzerlegung durch Prisma und Beugungsgitter	246
14.5	Interferometrie	247
14.6	Lichtleiter	248
14.7	Linsen	250
14.8	Zusammenfassung	254
14.9	Aufgaben	256
<b>IV</b>	<b>Elektrodynamik</b>	<b>259</b>
<b>15</b>	<b>Elektrostatik</b>	260
15.1	Elektrische Ladung	260
15.2	Coulomb'sches Gesetz und Elektrische Feldstärke	262
15.3	Elektrische Spannung und elektrisches Potenzial	265
15.4	Ladungsverteilung	271
15.5	Verschiebungsdichte und Verschiebungsfuss	272
15.6	Influenz	279
15.7	Kapazität	280
15.8	Dielektrikum im elektrischen Feld	283
15.9	Energie im elektrischen Feld	288
15.10	Zusammenfassung	290
15.11	Aufgaben	291
<b>16</b>	<b>Das stationäre elektrische Strömungsfeld</b>	294
16.1	Elektrischer Strom	294
16.2	Ohm'sches Gesetz	297
16.3	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	299
16.4	Leistung und Arbeit	301
16.5	Einführung in die Gleichstromtechnik	302
16.6	Zusammenfassung	310
16.7	Aufgaben	312
<b>17</b>	<b>Magnetostatik</b>	314
17.1	Grundlegende Erscheinungen	314
17.2	Magnetische Induktion und magnetischer Fluss	316

17.3	Magnetische Feldstärke und Durchflutungssatz . . . . .	317
17.4	Magnetisches Moment . . . . .	320
17.5	Kraftwirkung auf bewegte Ladungen im magnetischen Feld . . . . .	322
17.6	Magnetische Polarisation . . . . .	326
17.7	Zusammenfassung . . . . .	328
17.8	Aufgaben . . . . .	329
<b>18</b>	<b>Instationäre elektromagnetische Felder . . . . .</b>	<b>331</b>
18.1	Induktionsgesetz . . . . .	331
18.2	Selbstinduktion und Selbstinduktivität . . . . .	337
18.3	Der magnetische Kreis . . . . .	339
18.4	Energie des magnetischen Feldes . . . . .	342
18.5	Maxwell'sche Gleichungen . . . . .	344
18.6	Zusammenfassung . . . . .	345
18.7	Aufgaben . . . . .	346
<b>V</b>	<b>Thermodynamik</b>	<b>349</b>
<b>19</b>	<b>Gleichgewicht und Zustandsgrößen . . . . .</b>	<b>350</b>
19.1	Überblick . . . . .	350
19.2	Systeme, Phasen und Zustandsgrößen . . . . .	352
19.3	Gleichgewicht und Temperatur – Nullter Hauptsatz . . . . .	354
19.4	Absolute Temperatur, Kelvin- und Celsius-Skala . . . . .	357
19.5	Druck . . . . .	359
19.6	Ideales Gas . . . . .	360
19.7	Stoffmenge und Avogadrokonstante . . . . .	363
19.8	Kinetische Theorie des idealen Gases . . . . .	367
19.9	Zustandsgleichung realer Gase . . . . .	370
19.10	Zustandsgleichung für Flüssigkeiten und Festkörper . . . . .	372
19.11	Zusammenfassung . . . . .	375
19.12	Aufgaben . . . . .	376
<b>20</b>	<b>Energieformen und Zustandsänderungen . . . . .</b>	<b>378</b>
20.1	Arbeit . . . . .	378
20.2	Wärme und Wärmekapazität . . . . .	379
20.3	Erzeugung von Wärme . . . . .	387
20.4	Reversible und irreversible Prozesse . . . . .	391
20.5	Spezielle Zustandsänderungen . . . . .	393
20.6	Zusammenfassung . . . . .	394
20.7	Aufgaben . . . . .	396
<b>21</b>	<b>Thermodynamische Hauptsätze . . . . .</b>	<b>397</b>
21.1	Nullter Hauptsatz . . . . .	397
21.2	Erster Hauptsatz . . . . .	397
21.3	Carnot'scher Kreisprozess und Entropie . . . . .	402
21.4	Zweiter Hauptsatz . . . . .	409
21.5	Entropie – mikroskopisch betrachtet . . . . .	410
21.6	Abgeschlossenes System im Gleichgewicht . . . . .	411
21.7	Thermodynamische Maschinen . . . . .	413
21.8	Zusammenfassung . . . . .	418
21.9	Aufgaben . . . . .	419

---

<b>22 Nichtgleichgewichtsprozesse . . . . .</b>	421
22.1 Temperaturausgleich . . . . .	421
22.2 Wärmeübertragung . . . . .	424
22.3 Zusammengesetzte Wärmeübertragung . . . . .	430
22.4 Zusammenfassung . . . . .	433
22.5 Aufgaben . . . . .	434
<b>23 Phasenumwandlungen . . . . .</b>	436
23.1 Aggregatzustände und Phasenübergänge . . . . .	436
23.2 Klassifikation von Phasenübergängen . . . . .	439
23.3 Phasengleichgewicht . . . . .	441
23.4 Beispiele für Phasenübergänge . . . . .	442
23.5 Zusammenfassung . . . . .	444
23.6 Aufgaben . . . . .	444
<b>Lösungen der Aufgaben . . . . .</b>	445
<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	452

# Verzeichnis der Beispiele

1.1	Rechnen mit Größengleichungen . . . . .	3
1.2	Standardabweichung des Mittelwertes . . . . .	4
3.1	Durchschnittsgeschwindigkeit eines ICE . . . . .	11
3.2	Durchschnittsbeschleunigung eines ICE . . . . .	14
3.3	Berechnung von $\Delta x$ aus der Fläche unter $v(t)$ . . . . .	16
3.4	Überholen von Fahrzeugen . . . . .	17
3.5	Bremsweg und Verzögerung eines PKW . . . . .	19
3.6	Hochspringer . . . . .	21
4.1	Weitspringer . . . . .	36
4.2	Kugelstoßer . . . . .	36
4.3	Bahnkurve eines Wasserstrahls . . . . .	36
4.4	Radialbeschleunigung bei einer Langspielplatte . . . . .	40
4.5	Drehbewegung mit verschiedenen Winkelbeschleunigungen . . . . .	41
4.6	Geschwindigkeit eines Randpunktes beim rollenden Rad . . . . .	43
5.1	Gleiter auf Luftkissenbahn . . . . .	49
5.2	Aufprall gegen ein Hindernis . . . . .	49
5.3	Gewichtheber . . . . .	51
5.4	Bewegung auf der schiefen Ebene . . . . .	52
5.5	3. Newton'sches Gesetz . . . . .	53
5.6	Verknüpfung von zwei Federn . . . . .	54
5.7	Reibung auf der schiefen Ebene . . . . .	56
5.8	Gehen . . . . .	56
5.9	Antriebskraft bei Radfahrzeugen . . . . .	56
5.10	Trägheitskraft beim Anfahren . . . . .	59
5.11	Kräftegleichgewicht im beschleunigten System . . . . .	59
5.12	Atwood-Maschine mit trägeitsloser Rolle . . . . .	59
6.1	Reibungsarbeit . . . . .	64
6.2	Hubarbeit . . . . .	64
6.3	Verformungsarbeit . . . . .	65
6.4	Fall eines Balls mit Reflexion am Boden . . . . .	68
6.5	Beschleunigungsarbeit . . . . .	70
6.6	Federkraft . . . . .	72
6.7	Energieerhaltung bei Federn . . . . .	73
6.8	Rutschen eines Schlittens auf einer schiefen Ebene mit Reibung . . . . .	75
6.9	Leistung eines PKW . . . . .	76
7.1	Zwei Gleiter auf der Luftkissenfahrbahn . . . . .	82
7.2	Der steinschleudernde Astronaut . . . . .	82
7.3	Fall mit anschließendem Stoß von zwei Kugeln . . . . .	84
7.4	Ballistisches Pendel . . . . .	86
8.1	Rad auf Kreisbahn . . . . .	92
8.2	Fortsetzung – Rad auf Kreisbahn . . . . .	94
8.3	Kräftepaar . . . . .	96
8.4	Massenträgheitsmoment einer halbkreisförmigen Scheibe . . . . .	100
8.5	Trägheitsmoment einer Hantel . . . . .	101
8.6	Atwood-Maschine . . . . .	102
8.7	Bestimmung von Drehmoment und Leistung mit dem Prony'schen Zaum . . . . .	103
8.8	Energie eines Schwungrades . . . . .	104
8.9	Rollende Körper auf einer schiefen Ebene . . . . .	105

8.10 Ultrazentrifuge . . . . .	107
8.11 Überhöhte Eisenbahnkurve . . . . .	108
8.12 Kugel in einer rotierenden Kreisrinne . . . . .	108
8.13 Gleichgewicht einer Hantel . . . . .	111
8.14 Drehstuhlexperiment 1 . . . . .	112
8.15 Drehstuhlexperiment 2 . . . . .	113
8.16 Scheibe auf einer Kreisbahn . . . . .	117
9.1 Masse der Sonne . . . . .	124
9.2 Fluchtgeschwindigkeit . . . . .	126
10.1 Dehnung eines Drahtes . . . . .	133
10.2 Deformation eines Gummiwürfels . . . . .	135
10.3 Torsion eines Drahtes . . . . .	137
11.1 Wasser im Schwerefeld an der Erdoberfläche . . . . .	144
11.2 Füllstandsanzeiger und U-Rohr-Manometer . . . . .	145
11.3 Senkwaage . . . . .	146
11.4 Geschwindigkeitsbestimmung mit dem Prandtl'schen Staurohr . . . . .	152
11.5 Schmierung . . . . .	157
12.1 Die Dreh- oder Torsionsschwingung (Unruh einer Uhr) . . . . .	170
12.2 Das (mathematische) Schwerependel . . . . .	170
12.3 Das physikalische Pendel . . . . .	171
12.4 Zeigerinstrument . . . . .	176
12.5 Erzwungene Schwingungen in der Technik . . . . .	177
13.1 Transversale Welle auf einem elastischen Seil . . . . .	195
13.2 Longitudinale Welle längs eines elastischen Stabes . . . . .	196
13.3 Schallwelle in einer Gas- oder Flüssigkeitssäule . . . . .	196
13.4 Phasendifferenz bei einer harmonischen Welle . . . . .	198
13.5 Auslenkungsamplitude von Luftmolekülen in einer Schallwelle . . . . .	203
13.6 Schallpegel einer Schallwelle . . . . .	210
13.7 Dopplereffekt eines hupenden, fahrenden Fahrzeuges . . . . .	213
13.8 Richtung der Auslöschung, Verstärkung . . . . .	220
15.1 Elektrische Feldstärke als Gradient der Potenzialfunktion einer Punktladung . . . . .	270
15.2 Verschiebungsdichte und elektrische Feldstärke einer leitenden Kugel . . . . .	276
15.3 Verschiebungsdichte und elektrische Feldstärke einer Koaxialleitung . . . . .	277
15.4 Influenz im Plattenkondensator . . . . .	280
15.5 Kapazität eines Kugelkondensators mit konzentrischen Kugelelektroden . . . . .	286
15.6 Kapazität einer Koaxialleitung . . . . .	288
16.1 Driftgeschwindigkeit der Elektronen in einem Metalldraht . . . . .	296
16.2 Widerstand und Temperaturkoeffizient eines Metallwiderstandes bei verschiedenen Temperaturen . . . . .	300
16.3 Ströme und Spannungen in einem Gleichstromkreis . . . . .	308
16.4 Leistungen in einem Gleichstromkreis mit realer Spannungsquelle . . . . .	309
17.1 Toroidspule mit Materiefüllung . . . . .	319
17.2 Magnetische Induktion einer langen Zylinderspule . . . . .	320
17.3 Magnetisches Moment einer langen Zylinderspule . . . . .	322
17.4 Zeigerausschlag eines Drehspulmesswerkes . . . . .	324
17.5 Kraft zwischen den Drähten einer zweiadrigen Leitung . . . . .	325
18.1 Rotierende Leiterschleife im homogenen Magnetfeld . . . . .	336
18.2 Einschaltstrom bei Spulen . . . . .	338
18.3 Induktivität einer langen Zylinderspule . . . . .	341
18.4 Toroidspule mit zwei Wicklungen als Transformator . . . . .	341
18.5 Magnetische Energie einer Toroidspule . . . . .	343

19.1	Bestimmung von Stoffmengen . . . . .	364
19.2	Abhängigkeit der Dichte von Temperatur und Druck . . . . .	365
19.3	Dichte von Helium bei Normbedingungen . . . . .	365
19.4	Barometrische Höhenformel und Boltzmannfaktor . . . . .	365
19.5	Mittlere quadratische Geschwindigkeit von H <sub>2</sub> . . . . .	370
19.6	Plasmaphase von H <sub>2</sub> . . . . .	370
20.1	Wärmeerzeugung mit einem Tauchsieder . . . . .	388
20.2	Abwärme eines Widerstandes . . . . .	388
20.3	Abstoppen einer Kugel im Sandsack . . . . .	388
20.4	Kohlefeuerung . . . . .	390
20.5	Aufwärmung einer Platte in der Sonne . . . . .	390
20.6	Isotherme Expansion . . . . .	392
20.7	Arbeit eines idealen Gases . . . . .	394
21.1	Innere Energie und geleistete Arbeit bei Zustandsänderung des idealen Gases . . . . .	399
21.2	Adiabatengleichung eines idealen Gases . . . . .	400
21.3	Entropie eines idealen Gases . . . . .	406
21.4	Zimmerheizung . . . . .	417
22.1	Mischungstemperatur bei kleinem $\Delta T$ . . . . .	423
22.2	Abkühlung eines Metallwerkstucks in Luft . . . . .	427
22.3	Wärmedurchgang . . . . .	432
22.4	Wärmeleitung durch eine Wand mit mehreren Schichten . . . . .	432
23.1	Erwärmung eines Eisblocks . . . . .	436

# Verzeichnis der Tabellen

1.1	Basisgrößen und Basiseinheiten im SI-System . . . . .	1
1.2	Vorsätze für Maßeinheiten . . . . .	2
1.3	Fehlerfortpflanzung . . . . .	5
4.1	Vergleich der kinematischen Größen von Translation und Rotation . . . . .	44
5.1	Reibungskoeffizienten . . . . .	57
8.1	Translation–Rotation . . . . .	90
8.2	Massenträgheitsmomente . . . . .	99
8.3	Gegenüberstellung der Größen für Translation und Rotation . . . . .	106
9.1	Daten von Himmelskörpern . . . . .	123
10.1	Einige Werte für den Elastizitätsmodul . . . . .	132
11.1	Vergleich von Kompressibilitäten . . . . .	142
11.2	Dichte verschiedener Materialien . . . . .	142
11.3	Zähigkeitswerte bei 20 °C . . . . .	157
14.1	Frequenzspektrum . . . . .	241
14.2	Wellenlängen der einzelnen Farbbereiche . . . . .	242
15.1	Dielektrizitätszahlen verschiedener Dielektrika . . . . .	286
19.1	Verschiedene Thermometer . . . . .	357
19.2	Ausdehnungskoeffizienten . . . . .	374
20.1	Spezifische Wärmekapazität . . . . .	381
20.2	Molare Wärmekapazität $C_{V,\text{mol}}$ von Gasen bei $T = 0^\circ\text{C}$ . . . . .	385
20.3	Molare Wärmekapazität bei Zimmertemperatur und Atmosphärendruck . . . . .	387
20.4	Heizwerte einiger fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe . . . . .	389
22.1	Verschiedene Werte des Wärmeübergangskoeffizienten in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . . . . .	427
22.2	Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Stoffe in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . . . . .	429
23.1	Spezifische Schmelz- und Verdampfungswärme einiger Stoffe . . . . .	437



# 1 Einleitung

## 1.1 Physische Größen

Die Physik beschäftigt sich mit Erscheinungen, die durch **messbare** Eigenschaften erfasst werden können. Solche Eigenschaften nennt man **physische Größen**. Beispiele dafür sind Zeit, Länge, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft und Volumen.

Man unterscheidet zwischen Basisgrößen und abgeleiteten Größen. **Basisgrößen** wie Länge, Zeit und Masse sind alleine durch Messvorschriften, ohne Bezug auf andere physikalische Größen definiert. **Abgeleitete Größen** werden mit Hilfe mathematischer Ausdrücke aus den Basisgrößen errechnet. So erhält man z. B. die abgeleitete Größe Geschwindigkeit  $v$  aus der gefahrenen Strecke  $\Delta x$  und der benötigten Zeit  $\Delta t$  durch die Formel

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.1)$$

### Einheiten

Alle physikalischen Größen  $G$  werden als Produkt eines Zahlenwertes  $\{G\}$  und einer **Einheit**  $[G]$  geschrieben:

$$G = \{G\} \cdot [G] \quad (1.2)$$

z. B.: Länge  $l = 3 \text{ m}$

Die zu den Basisgrößen gehörenden **Basiseinheiten** sind im SI-Einheitensystem (Système Internationale d'Unités) definiert. Tabelle 1.1 gibt die sieben Basiseinheiten an, die seit 1969 gesetzlicher Standard sind.

Tabelle 1.1 Basisgrößen und Basiseinheiten im SI-System

Basisgröße	Größenzeichen	Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	$l$	Meter	m
Masse	$m$	Kilogramm	kg
Zeit	$t$	Sekunde	s
El. Stromstärke	$I$	Ampere	A
Temperatur	$T$	Kelvin	K
Lichtstärke	$I$	Candela	cd
Stoffmenge	$n$	Mol	mol

Man kennzeichnet die um den Faktor  $10^n$  vergrößerte oder verkleinerte Einheit durch Hinzufügen der in der Tabelle 1.2 genannten Vorsätze.

Beispiel: 1 Kilometer = 1 km = 1000 m

Damit ergeben sich einfache Schreibweisen für ansonsten unhandlich große oder kleine Messgrößen.

Tabelle 1.2 Vorsätze für Maßeinheiten

$10^{18}$	Exa	E	$10^{-1}$	Dezi	d
$10^{15}$	Peta	P	$10^{-2}$	Zenti	c
$10^{12}$	Tera	T	$10^{-3}$	Milli	m
$10^9$	Giga	G	$10^{-6}$	Mikro	$\mu$
$10^6$	Mega	M	$10^{-9}$	Nano	n
$10^3$	Kilo	k	$10^{-12}$	Piko	p
$10^2$	Hekto	h	$10^{-15}$	Femto	f
$10^1$	Deka	da	$10^{-18}$	Atto	a

Für abgeleitete Größen verwendet man die Einheit, die sich aus der Definitionsgleichung der Größe ergibt. Für die Geschwindigkeit ergibt sich z. B. aus der Gleichung (1.1):

$$[v] = \frac{[\Delta x]}{[\Delta t]} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.3)$$

### Definition der Basiseinheiten

Am Beispiel der in der Mechanik verwendeten Basiseinheiten Meter, Kilogramm und Sekunde sieht man besonders deutlich, dass die Definition der Basiseinheiten einem geschichtlichen Wandel unterliegt, der durch die Fortschritte in der Messtechnik bedingt ist.

So wurde die Einheit der Längenmessung, das Meter, im Jahre 1795 von der französischen Nationalversammlung eingeführt. Es sollte ein 40 Millionstel des Erdumfangs darstellen. Bis in neuere Zeit wurde das Urmeter an einem Platinbarren genommen, der in der Nähe von Paris aufbewahrt wurde. Heute wird das **Meter** definiert über die Strecke, die das Licht während der Zeit von  $(299\,792\,458)^{-1}$  s im Vakuum zurücklegt. Die erreichbare relative Genauigkeit liegt bei  $10^{-14}$ .

Die Einheit der Massenbestimmung war in früheren Zeiten die Masse von 1 cm<sup>3</sup> Wasser. Sie ist jedoch nicht genügend reproduzierbar, sodass heute das **Kilogramm** durch die Masse eines Zylinders aus einer Platin-Iridium-Legierung mit einer relativen Genauigkeit von  $10^{-9}$  definiert ist.

Die Zeiteinheit Sekunde war früher so definiert, dass die mittlere Tageslänge 86 400 (=  $24 \cdot 60 \cdot 60$ ) Sekunden betrug. Infolge der Fortschritte der Messgenauigkeit wurde festgestellt, dass die Tageslänge nicht hinreichend konstant ist, um als Bezugsnormale zu dienen. Daher wird heute die Basiseinheit **Sekunde** über die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung definiert, die beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Cäsium 133 auftritt. Die relative Genauigkeit beträgt wie bei der Basiseinheit Meter  $10^{-14}$ .

Die restlichen Basiseinheiten sind wie folgt definiert (in Klammern die relative Genauigkeit):

- 1 **Ampère** ist die Stärke eines konstanten Stroms, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 Meter angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigen Querschnitt fließt und zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton hervorruft ( $10^{-6}$ ).
- 1 **Kelvin** ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser ( $10^{-6}$ ).
- 1 **Candela** ist die Lichtstärke in eine bestimmte Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung ( $1/683$ ) W/sr beträgt ( $5 \cdot 10^{-3}$ ).
- 1 **Mol** ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht, wie Atome in  $12 \cdot 10^{-3}$  Kilogramm des Kohlenstoffnuklids <sup>12</sup>C enthalten sind ( $10^{-6}$ ).

## Skalare, Vektoren und Tensoren

Alle physikalischen Größen können nach ihrem Verhalten beim Übergang von einem räumlichen Koordinatensystem auf ein anderes klassifiziert werden. Größen, die zu ihrer Bestimmung nur die Angabe von Maßzahl und Einheit benötigen, verhalten sich dabei anders als Größen, die zusätzlich noch die Angabe der Richtung benötigen. Größen, die durch Maßzahl und Einheit eindeutig gekennzeichnet sind, heißen **Skalare**: z. B. Masse, Zeit und Energie. Diejenigen Größen, die zu ihrer Charakterisierung noch der **Richtung** bedürfen, werden **Vektoren** genannt: z. B. Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft. Daneben gibt es noch Größen, die sich beim Wechsel des Koordinatensystems noch komplizierter verhalten. Sie werden **Tensoren** genannt, z. B. Spannungstensor, elektromagnetischer Feldstärkentensor.

## Größengleichungen

Gesetzmäßigkeiten der Physik werden durch Gleichungen formuliert, in denen als Variable physikalische Größen stehen. Der Vorteil dieser **Größengleichungen** ist, dass ihre Gültigkeit unabhängig von den verwendeten Einheiten ist.

Beispiel 1.1 ▼

### Rechnen mit Größengleichungen

Ein Auto fährt mit der Geschwindigkeit  $v = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$ . Wie weit kommt es in der Beobachtungszeit  $\Delta t = 36 \text{ s} = 0,01 \text{ h}$ ?

**Lösung:**

$$\Delta x = v \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta x = 10 \text{ m/s} \cdot 36 \text{ s} = 360 \text{ m} \quad (2)$$

$$\Delta x = 36 \text{ km/h} \cdot 0,01 \text{ h} = 0,36 \text{ km} = 360 \text{ m} \quad (3)$$

Beispiel 1.1 ▲

## 1.2 Messfehler

Jeder durch Messung gewonnene Wert einer physikalischen Größe ist mit Fehlern behaftet. Man unterscheidet zwischen zufälligen und systematischen Fehlern. Ein **systematischer Fehler** bleibt gleich groß, wenn man die Messung unter gleichen Bedingungen wiederholt; ein **zufälliger Fehler** ändert dabei seine Größe nach den Regeln des Zufalls. Misst man z. B. die Schwingungsdauer eines Fadenpendels mithilfe einer Handstoppuhr, so kann ein systematischer Fehler dadurch entstehen, dass die Uhr zu schnell läuft; einen zufälligen Fehler erzeugt man dadurch, dass man den Null-durchgang des Pendels nicht genau trifft, und die Uhr bei einer Messung etwas zu früh, bei einer anderen dagegen etwas zu spät startet.

Das Vorhandensein zufälliger Fehler erkennt man daran, dass die Messergebnisse bei Messwiederholungen schwanken. Man kann sie teilweise beseitigen, indem man mehrere Messungen macht und die Ergebnisse mittelt. Systematische Fehler geben sich in den Messergebnissen nicht zu erkennen und sie können nur durch Verbesserung der Messapparatur verkleinert werden.

### Mittelwert und Standardabweichung

Wird z. B. die Länge  $x$  einer bestimmten Strecke  $N$ -mal bestimmt, und bezeichnet man die Ergebnisse der Einzelmessungen mit  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , so ist der **Mittelwert**  $\bar{x}$  definiert durch:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1.4)$$

Die Summe erstreckt sich über alle Messwerte  $x_i$ , wobei der Index  $i$  der Reihe nach die Werte  $1, 2, \dots, N$  annimmt.

Um ein Maß für die Schwankung der Einzelergebnisse und damit für das Ausmaß der zufälligen Fehler zu erhalten, geht man von den Abweichungen  $\epsilon_i$  der Einzelergebnisse vom Mittelwert aus:

$$\epsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (1.5)$$

Der Mittelwert dieser Abweichungen ist kein gutes Maß für die Schwankung der Einzelergebnisse. Denn Abweichungen nach oben ( $\epsilon > 0$ ) und Abweichungen nach unten ( $\epsilon < 0$ ) würden sich dabei gegenseitig aufheben, sodass selbst bei sehr großer Schwankung ein Mittelwert nahe 0 heraus käme. Man beseitigt das Vorzeichen der Abweichungen daher zunächst durch Quadrieren, mittelt dann, und kompensiert das Quadrieren anschließend wieder durch Ziehen der Quadratwurzel. Man erhält so die folgende Definition für die **Standardabweichung  $s$** , die das Ausmaß der Schwankung der Einzelergebnisse bei Messwiederholung beschreibt:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.6)$$

(Dass bei der Mittelung durch  $N-1$  geteilt werden muss, statt durch  $N$ , ergibt sich aus der Theorie der Fehlerrechnung und macht deutlich, dass die Berechnung der Standardabweichung nur bei einer großen Anzahl von Wiederholungsmessungen  $N \gg 1$  sinnvoll ist.)

Mithilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie lässt sich zeigen, dass bei zufälligen Fehlern und sehr großer Anzahl  $N$  der Messwiederholungen 68 % aller Einzelmessungen im Bereich  $\bar{x} \pm s$  liegen.

### Standardabweichung des Mittelwertes

Der Mittelwert einer Messreihe ist immer besser als ein einzelner Messwert, da sich die zufälligen Fehler der Einzelergebnisse bei der Mittelwertbildung teilweise ausgleichen.

Quantitativ lässt sich sagen, dass der Mittelwert  $\bar{x}$  aus  $N$  Einzelmessungen in 68 % aller Fälle nicht weiter als  $\Delta\bar{x}$  vom wahren Wert entfernt liegt. Dabei ist  $\Delta\bar{x}$  die **Standardabweichung des Mittelwertes**, die sich aus der Standardabweichung  $s$  der Einzelmesswerte nach folgender Formel errechnet:

$$\Delta\bar{x} = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (1.7)$$

Wie man sieht, wird  $\Delta\bar{x}$  und damit die **Ungenauigkeit des Mittelwertes** mit steigender Anzahl der Versuche  $N$  immer kleiner.

Was bedeutet das für die Praxis?

Beispiel 1.2 ▼

### Standardabweichung des Mittelwertes

Bestimmt ein Vermesser für den Abstand  $x$  zweier Punkte nach 100 Messungen den Mittelwert  $\bar{x} = 10,34$  m mit einer Standardabweichung  $s = 0,30$  m, so ist die Ungenauigkeit des Mittelwertes  $\Delta\bar{x} = s/\sqrt{100} = 0,03$  m. Der Vermesser wird daher seinen Messwert folgendermaßen angeben:

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x} = 10,34 \text{ m} \pm 0,03 \text{ m} \quad \text{bzw.} \quad x = 10,34 \text{ m} (\pm 0,3 \%) \quad (1)$$

bei Verwendung von relativen Fehlern.

Beispiel 1.2 ▲