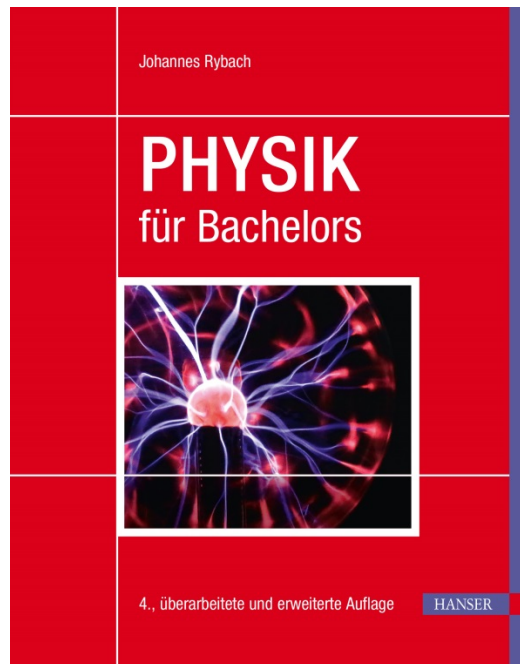


# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Physik für Bachelors“

von Johannes Rybach

Print-ISBN: 978-3-446-45843-7  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46072-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45843-7>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# VORWORT ZUR 1. AUFLAGE

Weil Physik die grundlegende Naturwissenschaft ist, gehört sie in vielen Studiengängen zu den Basisfächern. Manchen Studierenden flößt ihre thematische Breite und theoretische Tiefe allerdings großen Respekt ein – verständlich bei dem oft lückenhaften Physikunterricht in der Schule.

Zusätzlich hat sich das Studium geändert: Die kompakte Bachelor-Ausbildung verlangt ein intensives Selbststudium, und in den spezialisierten Master-Studiengängen werden anschließend auch an Fachhochschulen wissenschaftliche Grundlagenkenntnisse vorausgesetzt. Darum sind selbsterklärende, also anschauliche und verständliche Lehrbücher immer wichtiger geworden.

Dieses Buch unterstützt Sie, liebe Leserin und lieber Leser, auf vielfältige Weise beim Studium der Physik:

- Die Darstellung ist sprachlich lebendig und begrifflich prägnant. Natürlich gehören auch Gleichungen und Formeln dazu, die jeweils sorgfältig eingeführt und verständlich erläutert werden. Die übersichtliche Gestaltung der Buchseiten und ihr zweifarbiger Druck sollen die Lesbarkeit noch erhöhen.
- Der Stoff ist sinnvoll ausgewählt – auch im Hinblick auf Prüfungen – und übersichtlich strukturiert. Viele rot markierte Verweise (**Abschnitt X**) betonen außerdem Zusammenhänge und Analogien zwischen den Kapiteln: Diese Verbindungen gehören ja gerade zu den Stärken der Physik.
- Die sogenannte moderne Physik wird in dieser elementaren Darstellung nicht ausgeklammert, denn viele technische Anwendungen nutzen bereits Quanteneffekte oder benötigen die Relativitätstheorie. Der wachsenden Bedeutung optischer Technologien wurde ebenfalls durch ein eigenes Kapitel Rechnung getragen.

## Beispiele, Infos und Übungsaufgaben

In solchen Kästen finden Sie vollständig durchgerechnete Beispiele zur Erläuterung der Gesetze und Gleichungen, und zwar unmittelbar nach ihrer Einführung.

Am Ende jedes Kapitels stehen Testfragen und exemplarische Übungsaufgaben. Sie sollen wichtige Anwendungen der Gesetze demonstrieren und das Verständnis prüfen sowie vertiefen. Die ausführlichen Musterlösungen (im Anhang) vermitteln die typischen Lösungsansätze, Lösungsstrategien und Lösungswege für solche Probleme.

In weiteren Kästen finden Sie zusätzliche Infos. Eilige Leser könnten sie übergehen, aber vielleicht wäre das schade: Sie ergänzen spezielle Aspekte, erläutern bestimmte Anwendungen, und manche sind einfach nur interessant ...

Dieses Buch ist vollständig in dem Sinne, dass alle wesentlichen Informationen für Studierende mit Physik im Nebenfach darin zu finden sind. Vieles muss aber gerafft oder als Übersicht dargestellt werden; dann verweisen Zitate auf die [Quellen], zum Beispiel Lehr- und Handbücher der Mathematik, Technik oder Chemie. Außerdem sind ergänzende Physikbücher und Aufgabensammlungen im Anhang zusammengestellt.



## Hinweise

In der Randspalte finden Sie die Bezeichnungen der wichtigen Gesetze und Gleichungen. An manchen Stellen steht wie hier zusätzlicher Text, sozusagen Klartext: Klassische Missverständnisse, häufige Denkfehler und typische Verständnisprobleme werden dort unmittelbar klargestellt.

## VI VORWORT ZUR 1. AUFLAGE

In kleinerem Druck finden Sie Anmerkungen im Text. Sie können, sollten aber nicht überlesen werden, so wie diese: Mein Dank gilt vor allem meiner Familie, aber auch meinem Lehrer Prof. Dr. Gernot Decker. Ich danke dem Verlag und namentlich Herrn Jochen Horn für die sehr gute Zusammenarbeit. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Studenten, die mich seit vielen Jahren durch Stirnrunzeln, Fragen und Rückmeldungen bei der Lehre unterstützen.

Krefeld, im September 2007

*Johannes Rybach*

## VORWORT ZUR 4. AUFLAGE

Vor etwa einem Jahrzehnt ist dieses erste Physik-Lehrbuch für die damals neuen Bachelor-Studiengänge erschienen. Nach drei stetig verbesserten Auflagen darf es als Standardwerk für die Physiklehre im Nebenfach gelten, vor allem im Grundstudium der Ingenieurwissenschaften.

Für das „digitale Studium“ mit unterschiedlichen elektronischen Medien – ergänzend oder alternativ zum weiterhin „modernen“ gedruckten Buch – wurde das Werk ins E-Book-Format übertragen. Sowohl Layout als auch Inhalt erfuhren dabei eine gründliche Modernisierung. Für den ungewöhnlichen Aufwand danke ich dem Hanser-Verlag sehr, namentlich Frau Natalia Silakova und Frau Christina Kubiak.

Unverändert geblieben ist die konsequente Ausrichtung des Lehrbuches auf Studierende, die ohne Vorkenntnisse in Physik einsteigen müssen, aber motiviert dabei bleiben sollen – im besten Fall sogar mit Freude an neuen Erkenntnissen und Zusammenhängen. Ihnen allen wünsche ich viel Erfolg bei der Arbeit mit der vierten Auflage von „Physik für Bachelors“.

Langenfeld, im August 2019

*Johannes Rybach*

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINSTIEG</b>			
1.1	Motivation .....	1		
1.2	Physikalische Größen .....	1		
1.3	Maßsystem und Standards .....	2		
1.4	Größenordnungen .....	5		
1.5	Messgenauigkeit .....	7		
1.6	Vektoren und Koordinaten .....	9		
	Zusammenfassung: Einstieg .....	12		
	Testfragen zu Kapitel 1 .....	12		
	Übungsaufgaben zu Kapitel 1 .....	13		
<b>2</b>	<b>MECHANIK</b>			
<b>2.1</b>	<b>Kinematik</b> .....	<b>14</b>		
2.1.1	Eindimensionale Bewegungen .....	14		
2.1.1.1	Geschwindigkeit .....	14		
2.1.1.2	Beschleunigung .....	16		
2.1.1.3	Bewegungsgleichung .....	17		
2.1.1.4	Der freie Fall .....	18		
2.1.2	Bewegungen in zwei und drei Dimensionen .....	19		
2.1.2.1	Überlagerung eindimensionaler Bewegungen .....	20		
2.1.2.2	Bezugssysteme und Transformationen .....	22		
	Zusammenfassung: Kinematik .....	23		
<b>2.2</b>	<b>Dynamik</b> .....	<b>23</b>		
2.2.1	NEWTONSche Axiome .....	24		
2.2.1.1	Trägheitsgesetz .....	24		
2.2.1.2	Aktionsgesetz .....	25		
2.2.1.3	Reaktionsgesetz .....	25		
2.2.2	Folgerungen aus den NEWTONSchen Axiomen .....	26		
2.2.2.1	Kraft und Impuls .....	26		
2.2.2.2	Abgeschlossenes System und Impulserhaltungssatz .....	26		
2.2.3	Mechanische Kräfte .....	28		
2.2.3.1	Trägheitskraft .....	28		
2.2.3.2	Gewichtskraft .....	28		
2.2.3.3	Federkraft und HOOKESches Gesetz ..	31		
2.2.3.4	Reibungskraft .....	31		
	Zusammenfassung: Dynamik .....	32		
<b>2.3</b>	<b>Arbeit, Energie und Leistung</b> .....	<b>33</b>		
2.3.1	Mechanische Arbeit .....	33		
2.3.2	Potenzielle Energie .....	34		
2.3.3	Kinetische Energie .....	35		
2.3.4	Energieerhaltungssatz der Mechanik .....	35		
2.3.5	Stoßgesetze .....	36		
2.3.6	Leistung und Wirkungsgrad .....	38		
	Zusammenfassung:			
	Arbeit, Energie und Leistung .....	39		
<b>2.4</b>	<b>Kinematik und Dynamik der Kreisbewegung</b> .....	<b>40</b>		
2.4.1	Grundbegriffe der Kreisbewegung ..	40		
2.4.2	Radialbeschleunigung .....	41		
2.4.3	Radialkräfte .....	43		
2.4.4	CORIOLIS-Beschleunigung und -Kraft ..	44		
	Zusammenfassung: Kreisbewegung .....	47		
<b>2.5</b>	<b>Rotation starrer Körper</b> .....	<b>47</b>		
2.5.1	Drehmoment .....	47		
2.5.2	Schwerpunkt, Gleichgewicht und Statik .....	49		
2.5.3	Trägheitsmoment .....	51		
2.5.4	Rotationsenergie und Drehimpuls ..	53		
	Zusammenfassung: Rotation starrer Körper ...	55		
<b>2.6</b>	<b>Schwingungen und Wellen</b> .....	<b>55</b>		
2.6.1	Freie ungedämpfte Schwingungen ..	56		
2.6.2	Freie gedämpfte Schwingungen ....	59		
2.6.3	Erzwungene Schwingungen .....	60		
2.6.4	Überlagerung von Schwingungen ..	62		
2.6.4.1	Räumliche Überlagerung .....	62		
2.6.4.2	Zeitliche Überlagerung .....	64		
2.6.4.3	Gekoppelte Schwingungen .....	65		
2.6.5	Harmonische Wellen .....	66		
	Zusammenfassung: Schwingungen und Wellen .	68		
<b>2.7</b>	<b>Gravitation und Himmelsmechanik</b> .....	<b>69</b>		
2.7.1	KEPLERSche Gesetze .....	69		
2.7.2	NEWTONSches Gravitationsgesetz ...	71		
2.7.3	Gravitationsfeld .....	73		
2.7.4	Ergebnisse der EINSTEINSchen Relativitätstheorien .....	75		
2.7.4.1	Spezielle Relativitätstheorie .....	75		

## X INHALTSVERZEICHNIS

2.7.4.2	Allgemeine Relativitätstheorie	78	3.4.3	Zustandsänderungen	125
<i>Zusammenfassung:</i>			3.4.3.1	Isotherme Zustandsänderung	125
<i>Gravitation und Himmelsmechanik</i>		80	3.4.3.2	Isochore Zustandsänderung	126
<b>2.8</b>	<b>Flüssigkeiten und Gase</b>	<b>80</b>	3.4.3.3	Isobare Zustandsänderung	127
2.8.1	Druck	80	3.4.3.4	Adiabatische Zustandsänderung	128
2.8.1.1	Kolbendruck	80	<i>Zusammenfassung: Zustandsänderungen</i>		
2.8.1.2	Schweredruck	81	<i>und erster Hauptsatz</i>		130
2.8.1.3	Luftdruck	82	<b>3.5</b>	<b>Kreisprozesse und</b>	
2.8.1.4	Auftrieb	83	<b>zweiter Hauptsatz</b>		<b>130</b>
2.8.2	Oberflächenspannung	85	3.5.1	Kreisprozess von CARNOT	131
2.8.3	Strömungen	85	3.5.2	Reversibilität und Wirkungsgrad	133
2.8.3.1	Reibungsfreie Strömungen	85	3.5.3	Kreisprozesse bei Motoren	135
2.8.3.2	Viskose Strömungen	87	3.5.4	Zweiter Hauptsatz	136
<i>Zusammenfassung: Flüssigkeiten und Gase</i>		90	3.5.5	Entropie	137
<i>Testfragen zu Kapitel 2</i>		90	<i>Zusammenfassung:</i>		
<i>Übungsaufgaben zu Kapitel 2</i>		91	<i>Kreisprozesse und zweiter Hauptsatz</i>		141
			<i>Testfragen zu Kapitel 3</i>		142
			<i>Übungsaufgaben zu Kapitel 3</i>		143
<b>3</b>	<b>THERMODYNAMIK</b>		<b>4</b>	<b>ELEKTRIZITÄT UND</b>	
<b>3.1</b>	<b>Temperatur</b>	<b>96</b>	<b>MAGNETISMUS</b>		
3.1.1	Skalen und Fixpunkte	96	<b>4.1</b>	<b>Elektrostatik</b>	<b>145</b>
3.1.2	Thermische Ausdehnung	98	4.1.1	Elektrische Ladungen und	
3.1.3	Temperaturmessung	100	die COULOMB-Kraft		145
<i>Zusammenfassung: Temperatur</i>		102	4.1.2	Elektrisches Feld	148
<b>3.2</b>	<b>Wärme</b>	<b>102</b>	4.1.3	Potenzial und Spannung	150
3.2.1	Wärmekapazität	102	4.1.4	Kondensator und Kapazität	152
3.2.2	Aggregatzustände	103	4.1.4.1	Plattenkondensator	153
3.2.3	Wärmetransport	108	4.1.4.2	Dielektrikum im Kondensator	154
3.2.3.1	Konvektion	108	4.1.4.3	Kondensator als Energiespeicher	156
3.2.3.2	Wärmeleitung	109	<i>Zusammenfassung: Elektrostatik</i>		157
3.2.3.3	Wärmestrahlung	111	<b>4.2</b>	<b>Strom und Widerstand</b>	<b>158</b>
<i>Zusammenfassung: Wärme</i>		115	4.2.1	Stromstärke und Stromdichte	158
<b>3.3</b>	<b>Ideale Gase</b>	<b>116</b>	4.2.2	Widerstand	159
3.3.1	Molare Größen	116	4.2.3	Stromkreise und	
3.3.2	Zustandsgleichung	117	Stromverzweigungen		163
3.3.3	Kinetische Gastheorie	119	<i>Zusammenfassung: Strom und Widerstand</i>		168
3.3.3.1	Druck	119	<b>4.3</b>	<b>Magnetfeld</b>	<b>169</b>
3.3.3.2	Temperatur und Energie	121	4.3.1	Magnetische Phänomene	169
3.3.3.3	MAXWELLSche Geschwindigkeits- verteilung und BOLTZMANN-Faktor	121	4.3.2	Strom und Magnetfeld	170
<i>Zusammenfassung: Ideale Gase</i>		123	4.3.3	Materie im Magnetfeld	173
<b>3.4</b>	<b>Zustandsänderungen</b>		4.3.4	Strom und magnetische Kraft	175
<b>und erster Hauptsatz</b>		<b>123</b>	4.3.5	LORENTZ-Kraft	177
3.4.1	Volumenänderungsarbeit	123	<i>Zusammenfassung: Magnetfeld</i>		181
3.4.2	Erster Hauptsatz	124			

<p><b>4.4 Elektromagnetische Induktion ... 181</b></p> <p>4.4.1 Induktion durch Bewegung ..... 181</p> <p>4.4.2 Induktionsgesetz ..... 182</p> <p>4.4.3 LENZsche Regel ..... 183</p> <p>4.4.4 Selbstinduktion ..... 185</p> <p>4.4.5 Energie des Magnetfeldes ..... 186</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Elektromagnetische Induktion</i> ..... 187</p> <p><b>4.5 Wechselstrom ..... 188</b></p> <p>4.5.1 Generator und Transformator ..... 188</p> <p>4.5.2 Wechselstromwiderstand ..... 190</p> <p>4.5.3 Phasenbeziehungen im Wechselstromkreis ..... 193</p> <p><i>Zusammenfassung: Wechselstrom</i> ..... 195</p> <p><b>4.6 Elektromagnetische Schwingungen und Wellen ..... 196</b></p> <p>4.6.1 Schwingkreis ..... 196</p> <p>4.6.2 MAXWELLSche Gleichungen ..... 198</p> <p>4.6.3 Elektromagnetische Wellen ..... 200</p> <p>4.6.3.1 Abstrahlung ..... 200</p> <p>4.6.3.2 Ausbreitung ..... 201</p> <p>4.6.3.3 Eigenschaften ..... 202</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Elektromagnetische Schwingungen und Wellen</i> . 205</p> <p><b>4.7 Grundlagen der Elektronik ..... 205</b></p> <p>4.7.1 Elektronen im Vakuum ..... 205</p> <p>4.7.1.1 Glühelektrischer Effekt ..... 206</p> <p>4.7.1.2 Beschleunigung im elektrischen Feld ..... 207</p> <p>4.7.1.3 Ablenkung im magnetischen Feld ... 209</p> <p>4.7.2 Elektronen in Gasen ..... 209</p> <p>4.7.3 Ladungen in Flüssigkeiten ..... 210</p> <p>4.7.4 Elektronen in Metallen ..... 213</p> <p>4.7.5 Ladungsträger in Halbleitern ..... 214</p> <p>4.7.5.1 Eigenleitung ..... 214</p> <p>4.7.5.2 Störstellenleitung ..... 215</p> <p>4.7.5.3 pn-Übergang ..... 215</p> <p>4.7.5.4 Halbleiterdioden ..... 217</p> <p>4.7.5.5 Transistoren ..... 218</p> <p><i>Zusammenfassung: Grundlagen der Elektronik</i> . 219</p> <p><i>Testfragen zu Kapitel 4</i> ..... 220</p> <p><i>Übungsaufgaben zu Kapitel 4</i> ..... 222</p>	<p><b>5 OPTIK</b></p> <p><b>5.1 Grundlagen der Strahlenoptik ... 225</b></p> <p>5.1.1 Lichtausbreitung ..... 225</p> <p>5.1.2 Reflexion ..... 227</p> <p>5.1.3 Brechung und Totalreflexion ..... 229</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Grundlagen der Strahlenoptik</i> ..... 233</p> <p><b>5.2 Strahlenoptische Abbildungen ... 234</b></p> <p>5.2.1 Eigenschaften von Linsen ..... 234</p> <p>5.2.2 Abbildungen mit Linsen ..... 235</p> <p>5.2.3 Linsensysteme und Abbildungsfehler 238</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Strahlenoptische Abbildungen</i> ..... 239</p> <p><b>5.3 Strahlenoptische Instrumente ... 240</b></p> <p>5.3.1 Kamera und Auge ..... 240</p> <p>5.3.2 Fernrohre ..... 242</p> <p>5.3.3 Mikroskop ..... 244</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Strahlenoptische Instrumente</i> ..... 246</p> <p><b>5.4 Grundlagen der Wellenoptik ..... 246</b></p> <p>5.4.1 Interferenz und Kohärenz ..... 246</p> <p>5.4.2 Wellenausbreitung ..... 249</p> <p>5.4.3 Beugung ..... 250</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Grundlagen der Wellenoptik</i> ..... 252</p> <p><b>5.5 Anwendungen der Wellenoptik .. 252</b></p> <p>5.5.1 Beugungsbegrenztes Auflösungsvermögen ..... 252</p> <p>5.5.2 Beugungsgitter ..... 254</p> <p>5.5.3 Holografie ..... 256</p> <p>5.5.4 Interferometrie ..... 259</p> <p><i>Zusammenfassung:</i></p> <p><i>Anwendungen der Wellenoptik</i> ..... 260</p> <p><b>5.6 Polarisationsoptik ..... 261</b></p> <p>5.6.1 Grundbegriffe ..... 261</p> <p>5.6.2 Erzeugung polarisierten Lichtes .... 262</p> <p>5.6.3 Anwendungen polarisierten Lichtes . 264</p> <p><i>Zusammenfassung: Polarisationsoptik</i> ..... 265</p> <p><i>Testfragen zu Kapitel 5</i> ..... 265</p> <p><i>Übungsaufgaben zu Kapitel 5</i> ..... 266</p>
---	---

**6 QUANTEN UND ATOME**

**6.1 Welle-Teilchen-Dualismus ..... 269**

6.1.1 Quantenoptik ..... 269

6.1.1.1 Fotoeffekt ..... 269

6.1.1.2 Eigenschaften von Photonen ..... 272

6.1.1.3 COMPTON-Effekt ..... 273

6.1.2 Materiewellen ..... 274

6.1.3 HEISENBERGSche Unschärferelation .. 275

*Zusammenfassung: Welle-Teilchen-Dualismus .. 278*

**6.2 Atomhülle ..... 278**

6.2.1 RUTHERFORDSches Planetenmodell ... 278

6.2.2 BOHRsches Atommodell ..... 279

6.2.3 Quantenzahlen und  
das PAULI-Prinzip ..... 281

6.2.4 Wellenmodell und  
Quantenmechanik ..... 285

*Zusammenfassung: Atomhülle ..... 289*

**6.3 Quanten-Emission und  
-Absorption ..... 289**

6.3.1 Atomspektren ..... 290

6.3.2 Laser ..... 292

6.3.2.1 Stimulierte Emission ..... 292

6.3.2.2 Besetzungsumkehr ..... 294

6.3.2.3 Resonator ..... 294

6.3.2.4 Rubin- und Helium-Neon-Laser .... 295

6.3.2.5 Eigenschaften und Anwendungen .. 296

6.3.3 Röntgenstrahlung ..... 298

6.3.3.1 Bremsspektrum ..... 298

6.3.3.2 Charakteristisches  
Röntgenspektrum ..... 299

6.3.3.3 Anwendungen ..... 299

*Zusammenfassung:  
Quanten-Emission und -Absorption ..... 301*

**6.4 Festkörper ..... 301**

6.4.1 Bindung und Struktur ..... 301

6.4.2 Bändermodell ..... 303

6.4.3 FERMI-Energie ..... 304

6.4.4 Elektronen- und Löcherleitung ..... 305

6.4.5 Halbleiter-Bauelemente ..... 307

*Zusammenfassung: Festkörper ..... 309*

**6.5 Atomkern ..... 310**

6.5.1 Nukleonen ..... 310

6.5.2 Masse und Massendefekt ..... 312

6.5.3 Radioaktivität ..... 314

6.5.3.1 Strahlungen ..... 314

6.5.3.2 Kernumwandlungen ..... 316

6.5.3.3 Aktivität und Dosis ..... 318

6.5.3.4 Strahlungsnachweis ..... 320

6.5.4 Kernenergie ..... 321

6.5.4.1 Kernspaltung ..... 321

6.5.4.2 Kernfusion ..... 324

*Zusammenfassung: Atomkern ..... 326*

*Testfragen zu Kapitel 6 ..... 327*

*Übungsaufgaben zu Kapitel 6 ..... 328*

**ANHANG**

- Antworten zu den Testfragen und  
Musterlösungen der Übungsaufgaben .... 330

- Nützliche mathematische Beziehungen ... 366

- Quellen- und Literaturverzeichnis ..... 370

- Verzeichnis der Bildquellen ..... 372

- Sachwortverzeichnis ..... 373



## 1.4 Größenordnungen

Der Zahlenwert einer physikalischen Größe kann in der Natur extrem klein oder enorm groß auftreten. Man unterscheidet – relativ grob, aber in einer sinnvollen Stufung – **Größenordnungen** von Zahlenwerten als Potenzen von zehn ( $10^n$ ). Statt der klassischen Schreibweise oder der Exponentialschreibweise können auch *Vorsätze* (bzw. *Vorsilben*) verwendet werden, wie etwa beim *Kilogramm*:

$$1000 \text{ g} = 10^3 \text{ g} = 1 \text{ kg}$$

Die gebräuchlichsten Vorsätze mit ihren Abkürzungen sind in Tabelle 1.3 zusammengestellt.

**Tabelle 1.3** Vorsätze und Vorsatzzeichen für dezimale Vielfache und Teile

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

Häufig sind **Abschätzungen** oder *Überschlagsrechnungen* mit der Genauigkeit einer Größenordnung, also bis auf einen Faktor 10, ausreichend und sinnvoll. Das gilt zum einen für die Kontrolle einer Berechnung, die mit Taschenrechner oder Computer durchgeführt wird: Mit einem kleinen Vorzeichenfehler beim Exponenten liefert die Maschine völlig sinnlose Ergebnisse! Zum anderen kann man oft mit einigen groben Schätzwerten eine Information gewinnen, die sich der exakten Berechnung völlig entzieht.

### Info 1.2: FERMI-Probleme

Solche „unmöglichen“ Fragestellungen werden auch als „FERMI-Probleme“ bezeichnet: Der berühmte italienisch-amerikanische Physiker FERMI hat die Sprengkraft der ersten Atombombe (im Juli 1945) offenbar lediglich mithilfe einiger Papierschnipsel abgeschätzt. Er warf sie nach der Explosion (natürlich in sicherer Entfernung) einfach in die Höhe und beobachtete, dass sie von der Druckwelle einige Meter fortgeweht wurden. Das Ergebnis seiner darauf basierenden Überschlagsrechnung stimmte gut – nämlich zumindest in der Größenordnung – überein mit den Resultaten der langwierigen Auswertungen von vielen komplizierten Messapparaturen.

## WICHTIGE KONSTANTEN

Bezeichnung	Symbol	Wert	
		genau [CODATA] (Standardabweichung in Klammern, andernfalls exakte Konstante)	gerundet (wie in den Beispielen und Übungsaufgaben)
Atomare Masseneinheit	$u$	$1,660\,539\,066\,60\,(50) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
AVOGADRO-Konstante	$N_A$	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$	$6 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$
BOLTZMANN-Konstante	$k$	$1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0$	$8,854\,187\,812\,8\,(13) \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4 / (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$
Elementarladung	$e$	$1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$
Fallbeschleunigung (Normwert)	$g_n$	$9,806\,65 \text{ m/s}^2$	$9,81 \text{ m/s}^2$
Gaskonstante (universelle)	$R$	$8,314\,462\,618\,153\,24 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$8,314\,5 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
Gravitationskonstante	$\gamma$	$6,674\,30\,(15) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum)	$c_0$	$2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0$	$12,566\,370\,621\,2(19) \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s}/(\text{A} \cdot \text{m})$ (exakt)
PLANCKSches Wirkungsquantum	$h$	$6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Ruhmasse des Elektrons	$m_e$	$9,109\,383\,7015 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
STEFAN-BOLTZMANN-Konstante	$\sigma$	$5,670\,374\,419 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Die absolute Standardabweichung in runden Klammern bezieht sich auf die letzten beiden Dezimalstellen. Zum Beispiel wird für die atomare Masseneinheit einschließlich des Vertrauensbereiches (für ein Vertrauensniveau von 68,3 %, [Abschnitt 1.5](#)) folgender Wert angegeben:  $(1,660\,539\,066\,60 \pm 0,000\,000\,00050) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

## HÄUFIG VERWENDETE PHYSIKALISCHE DATEN

Dichte von Luft bei 20 °C sowie 0 °C	$1,20 \text{ kg/m}^3$ bzw. $1,29 \text{ kg/m}^3$
Dichte von Wasser im Bereich 0 ... 20 °C	$1,00 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Luftdruck auf der Erdoberfläche	$1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Masse der Erde	$5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Masse des Mondes	$7,36 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
Masse der Sonne	$1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Mittlerer Erdradius	$6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$
Mittlerer Abstand Erde – Mond	$3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$
Mittlerer Abstand Erde – Sonne	$1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$

Diese gerundeten Werte werden in den Beispielen und Übungsaufgaben verwendet. Genauere Zahlen und ihre Abhängigkeiten von anderen Parametern sind in Tabellenwerken und Handbüchern zu finden ([Literatur- und Quellenverzeichnis im Anhang](#)).

## Beispiel 1.2: FERMI-Abschätzung

*Aufgabe:* Für ein irisches „Buch der Rekorde“ soll das dickste Seilknäuel der Welt aufgewickelt werden. Es muss 4 m dick werden, wobei das Seil 4 mm Durchmesser hat. Welche Seillänge muss für den Rekordversuch zur Verfügung stehen?

*Lösung:* Das Volumen des Seils kann durch einen *Zylinder* angegeben werden, dessen Höhe der gesuchten Seillänge entspricht. Dieses Volumen setzt man für eine Abschätzung der Maximallänge einfach gleich dem angestrebten *Kugelvolumen*. (Wegen der Wickel-Lücken wird der Bedarf etwas geringer sein, aber eine exakte Rechnung ist eben unmöglich.)

$$\pi r^2 l_{\max} = \frac{4}{3} \pi R^3 \Rightarrow l_{\max} = \frac{4R^3}{3r^2}$$

Mit  $r = 2 \text{ mm}$  und  $R = 2 \text{ m}$  ergibt sich:

$$l_{\max} = \frac{4 \cdot (2\text{m})^3}{3(2 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} = \frac{8\text{m}^3}{3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 2,7 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Die *Größenordnung* der Seillänge beträgt also  $10^6 \text{ m} = 1000 \text{ km}$ .

**Tabelle 1.4** Einige Größenordnungen in SI-Einheiten

Masse unserer Galaxis (Milchstraßensystem)	$10^{41} \text{ kg}$
Masse der Erde	$10^{25} \text{ kg}$
Masse eines Menschen	$10^2 \text{ kg}$
Masse des Wasserstoffatoms (H)	$10^{-27} \text{ kg}$
Durchmesser unserer Galaxis	$10^{21} \text{ m}$
Durchmesser der Erde	$10^7 \text{ m}$
Größe eines Menschen	$10^0 \text{ m}$
Durchmesser des H-Atomkerns (Proton)	$10^{-15} \text{ m}$
Alter der Erde (ca. $\frac{1}{4}$ des Universums)	$10^{17} \text{ s}$
Lebenserwartung eines Menschen	$10^9 \text{ s}$
Periode zwischen Herzschlägen	$10^0 \text{ s}$
Flugzeit des Lichtes durch ein Proton (hypothetisch)	$10^{-24} \text{ s}$
Lichtjahr (Strecke, die in 31 536 000 s mit $c_0$ zurückgelegt wird)	$10^{16} \text{ m}$

Beispiel 1.3: Rechnen mit  $c_0$ 

*Aufgaben:* Berechnen Sie die Flugzeit des Lichtes  $t_p$  für eine Strecke, die dem Durchmesser des Wasserstoff-Atoms entspricht (Tabelle 1.4)! Wie bestimmt man andererseits die Längeneinheit „Lichtjahr“, die in der letzten Zeile dieser Tabelle angegeben ist?

*Lösungen:* Mit der Definition der Geschwindigkeit aus Beispiel 1.1 und dem abgerundeten Zahlenwert für  $c_0$  aus **Abschnitt 1.3** erhält man für  $t_p$ :

$$t_p = \frac{d_p}{c_0} = \frac{10^{-15} \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$

Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Obwohl die Einheit „Lj“ bzw. „ly“ im Internationalen Einheitensystem nicht enthalten ist, wird sie in der Astronomie viel verwendet. Ihre Berechnung ergibt:

$$1\text{Lj} = c_0 t = 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \text{ s} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

## 1.5 Messgenauigkeit

Im physikalischen Laborpraktikum stößt man wie bei jeder technischen Messung auf ein scheinbar unbefriedigendes Phänomen: Wenn zum Beispiel die Fallzeit einer Kugel zehnmal mit einer Stoppuhr bestimmt wird, so sind oft alle zehn Messergebnisse verschieden. Welches ist denn nun die „richtige“ Fallzeit; welches Ergebnis ist „wahr“?

Richtig und wahr ist vor allem, dass jede Messung mit *Fehlern* behaftet und darum „unsicher“ ist: Dem „wahren Wert“ kann man sich prinzipiell nur so gut wie möglich annähern. Diese **Messunsicherheit** hat nichts mit *echten* Fehlern zu tun (wie dem Einsatz einer Sanduhr oder dem verzögerten Uhrenstopp nach längerer Kaffeepause). Auch bei größter Sorgfalt können *systematische Messfehler* auftreten (z. B. dass die Uhr zu schnell läuft) – diese muss man erkennen, und abstellen oder korrigieren.

Die zweite Kategorie stellen *zufällige bzw. statistische Fehler* dar (z. B. können die Reaktionszeiten bei jeder einzelnen Messung anders sein, aber rein zufällig mal kleiner und mal größer). Ihre mathematische Behandlung liefert das plausible Ergebnis, dass bei solchen „normal verteilten“ Messwerten (s. u.)  $x_i$  der arithmetische **Mittelwert**  $\bar{x}$  aus allen  $n$  Messungen dem „wahren Wert“ am nächsten kommt:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Formel 1.1}$$



### Fehlerrechnung

Die Fehlerrechnung ist besonders fehlerträchtig in Bezug auf Symbole und Definitionen – es fängt ja schon damit an, dass der Begriff „Fehler“ falsch ist. In vielen Darstellungen werden auch unterschiedliche Symbole verwendet, oder gleiche Symbole mit unterschiedlicher Bedeutung. In dieser Situation tut eine *Norm* gut (genau dazu ist sie auch da). Für die „Grundlagen der Messtechnik“ gilt DIN 1319, Teile 1–4.

Mittelwert

Aber auch Messwerte in einem Intervall um den Mittelwert herum sind „richtig“ und werden bei einer Fortsetzung der Messreihe mit einer gewissen (zu größeren Abweichungen abnehmenden) Wahrscheinlichkeit auftreten! Dieses Intervall (der „*Vertrauensbereich*“) lässt sich bestimmen, wenn man die benötigte Wahrscheinlichkeit (das „*Vertrauensniveau*“) vorgibt; üblich sind z. B. 68,3 % oder 95,0 %. Zur Berechnung benötigt man zunächst die **Standardabweichung der Einzelmessung**:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Formel 1.2}$$

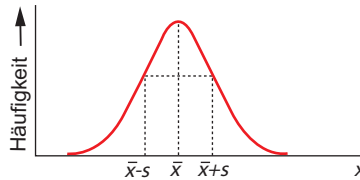
Standardabweichung der Einzelmessung

Sie kann als ein Maß für die *Streuung* der Messwerte interpretiert werden, wenn die Messung  $(n - 1)$ -mal *wiederholt* wird. Sind die Messwerte „normal verteilt“, so liegen sie symmetrisch um den Mittelwert. Die **Normalverteilung** nach C. F. GAUSS (1777–1855) für sehr viele Messungen (mathematisch formuliert:  $n \rightarrow \infty$ ) wird von der *Glockenkurve* in **Bild 1.3** beschrieben. Sie hat ihr Maximum, also den am häufigsten gemessenen Wert, beim Mittelwert  $\bar{x}$ , und in das Intervall  $\bar{x} \pm s_x$  fallen 68,3 % der Messwerte. Anders formuliert: Wenn man sehr häufig misst, ist der Vertrauensbereich für ein Vertrauensniveau von 68,3 % gerade durch die Standardabweichung  $s_x$  gegeben.

Um nun zum Vertrauensbereich für kleinere (und im Laborpraktikum zumutbare) Anzahlen  $n$  zu gelangen, wird die Standardabweichung des Mittelwertes  $\Delta\bar{x}$  gebildet und noch mit dem sogenannten *t*-Faktor multipliziert; das ergibt die **statistische Messunsicherheit**:

$$u_x = t \cdot \Delta\bar{x} = \frac{t}{\sqrt{n}} s_x \quad \text{Formel 1.3}$$

Statistische Messunsicherheit



**Bild 1.3** Die GAUSSsche Normalverteilung wird durch die Glockenkurve dargestellt.

Der  $t$ -Faktor berücksichtigt sowohl die Anzahl der Messungen  $n$  als auch das gewünschte Vertrauensniveau. Natürlich steckt dahinter wiederum mathematische Statistik, aber im Physiklabor darf man  $t$  einfach in Mathematik- oder Praktikumsbüchern nachschlagen [Schäfer, Walcher]. Anschaulich ist  $\Delta\bar{x}$  bzw.  $u_x$  ein Maß für die *Zuverlässigkeit* des Mittelwertes. Das wird vor allem deutlich, wenn in einem Diagramm das Intervall  $\bar{x} \pm s_x$  als *Fehlerbalken* symmetrisch zum Messwert eingezeichnet wird. Zahlenangaben sind oft leichter zu interpretieren, wenn man die statistische Messunsicherheit *relativ* zum Mittelwert angibt, zum Beispiel in Prozent.

#### Beispiel 1.4: Mittelwert und Vertrauensbereich

**Aufgabe:** Die Fallzeit  $t_f$  einer Kugel wird zehnmal mit einer einfachen Stoppuhr gemessen: 1,21 s; 1,20 s; 1,23 s; 1,19 s; 1,21 s; 1,22 s; 1,2 s; 1,24 s; 1,20 s; 1,18 s; dabei sollen die *systematischen* Messfehler vernachlässigbar sein. Geben Sie das Ergebnis des Experimentes für ein Vertrauensniveau von 95 % an!

**Lösung:** Das wahrscheinlichste (dem „wahren“ Wert am besten entsprechende) Ergebnis ist der Mittelwert (Formel 1.1):

$$\bar{t}_f = \frac{1,21 + \dots + 1,18}{10} \text{ s} = 1,209 \text{ s}$$

Die Standardabweichung (Formel 1.2) ist hier:

$$s_t = \sqrt{\frac{(1,21 - 1,209)^2 + \dots + (1,18 - 1,209)^2}{9}} \text{ s} = 0,0179 \text{ s}$$

Bei dem geforderten Vertrauensniveau und  $n = 10$  beträgt der  $t$ -Faktor 2,23. Damit ist die Messunsicherheit (Formel 1.3):

$$u_t = \frac{2,23 \cdot 0,0179}{\sqrt{10}} \text{ s} = 0,0126 \text{ s}$$

Das Messergebnis einschließlich der sinnvoll abgerundeten statistischen Messunsicherheit lautet also:

$$t_f = (1,209 \pm 0,013) \text{ s}$$

Der relative Fehler beträgt demnach  $\pm(0,013/1,209) = \pm 0,0108 = \pm 1,08\%$ . Für ein Vertrauensniveau von 68,3 % würde sich übrigens ein nur etwa halb so großes Vertrauensintervall ergeben; dann dürfte ja auch fast ein Drittel der Messwerte außerhalb liegen.

Die Statistik bzw. Fehlerrechnung ist keine physikalische Disziplin, aber notwendiges Handwerkszeug für physikalische Messungen. Das Handwerk wird natürlich noch aufwendiger, wenn *zwei* oder mehr gemessene Größen voneinander *abhängig* sind. Das kommt häufig vor, und dann wird eine *Regressionsanalyse* erforderlich, die bei grafischer Darstellung zu einer *Ausgleichskurve* führt. Auch der Fall, dass eine gesuchte Größe aus der Mehrfach-Messung mehrerer Einzelwerte ermittelt wird und *Fehler-*

*fortpflanzung* auftritt, erfordert höheren mathematischen Aufwand (sowie ggf. Nachschlagen in den oben zitierten Büchern).

Als Konsequenz aus der begrenzten Genauigkeit physikalischer Größen ist es notwendig, Zahlenangaben auf **signifikante Stellen** zu beschränken. Auch für den Mittelwert aus wenigen, vielleicht ungenauen Messungen liefert ein Taschenrechner ja acht oder zwölf Stellen. Wenn aber schon die zweite Stelle bei jeder Einzelmessung verschieden ausfällt, darf man beim Mittelwert höchstens die dritte oder vierte angeben – je nach Vertrauensbereich. Ansonsten wird eine *Scheingenauigkeit* vorgespiegelt, die nutzlos und sogar unseriös ist. Andererseits verlangt die Konvention, dass auch „glatte Zahlen“ mit allen signifikanten Stellen angegeben werden müssen, um ihre *tatsächliche* Genauigkeit zu dokumentieren.

#### Beispiel 1.5: Signifikante Stellen

*Aufgabe:* Wie zuverlässig – also auf wie viele Stellen genau – sind die folgenden Angaben: 2574  $\mu\text{m}$ ; 1,999 kg; 5700 kg; 0,027 35 s; 20,00 mm; 0,000 855 2 s?

*Lösung:* Alle sind auf vier Stellen genau. Dies gilt auch für die letzte, denn: 0,0008552 s = 855,2  $\mu\text{s}$ . Die manchmal zitierte „Zahl der Stellen hinter dem Komma“ ist unmaßgeblich!

*Hinweis:* Bei Rechenoperationen bestimmt natürlich der ungenauere Term die signifikanten Stellen des Ergebnisses, z. B.:

$$3,9 \cdot 10^3 \text{ m} + 0,7931 \text{ m} \approx 3,9 \text{ km}$$

## 1.6 Vektoren und Koordinaten

Viele physikalische Größen haben über Zahlenwert und Einheit hinaus eine weitere wichtige Eigenschaft: eine *Richtung*. Während diese Angabe für eine Masse  $m$  offensichtlich keinen Sinn ergibt ( $m$  ist ein *Skalar*), kann z. B. ein Weg im dreidimensionalen Raum sehr unterschiedlich zurückgelegt werden. Die Strecke  $\vec{s}$  muss demnach durch einen *Vektor* beschrieben werden (meistens, wie auch in diesem Buch, mit einem Pfeil über dem Symbol gekennzeichnet). Grafisch wird  $\vec{s}$  tatsächlich durch einen Pfeil dargestellt, dessen Spitze die Richtung und dessen Länge seinen Betrag  $|\vec{s}|$  angibt (also das Produkt aus Zahlenwert und Einheit).

Für Vektoren gelten natürlich andere Rechenregeln als für Skalare. So erfolgt ihre Addition nicht arithmetisch, sondern *geometrisch*: In **Bild 1.4** sind beispielsweise zwei Strecken dargestellt, deren Länge gleich, deren Richtung jedoch senkrecht zueinander orientiert ist. Die Vektorsumme kann grafisch durch Aneinanderreihen der Pfeile und Verbinden des ersten Pfeilanfangs mit dem zweiten Pfeilende konstruiert werden. Bei Strecken wird der resultierende Vektor auch „Verschiebung“ genannt (Beispiel 1.6). Eine Alternative zur zeichnerischen Addition ist die Parallelogramm-Methode, die vor allem bei der Addition von Kräften sehr anschaulich ist (**Abschnitt 2.2.3**).