

A. Recknagel **PHYSIK**

Mechanik

Prof. em. Dr. Alfred Recknagel

PHYSIK

Mechanik

14., bearbeitete Auflage



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Copyright by VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
Bearbeitete Auflage: © VEB Verlag Technik, Berlin, 1980
Lizenz 201 · 370/40/80
DK 531 (0. 75. 8). LSV 1124 · VT 3/4620-14
Lektor: Doris Netz
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Offizin Andersen Nexö, Graphischer Großbetrieb, Leipzig III/18/38
Bestellnummer: 5528335
DDR 18,- M

Vorwort

Zur 14. Auflage

Diese neue Auflage der Mechanik unterscheidet sich von den vorhergehenden dadurch, daß weitere SI-fremde Einheiten entfernt wurden und einige neue Standards berücksichtigt sind, die z. B. die Verwendung des Wortes „Gewicht“ nicht zulassen. Insbesondere sind die Vektoren jetzt den international üblichen Gepflogenheiten entsprechend mit fetten lateinischen Buchstaben bezeichnet. Für die Mitarbeit bei dieser Änderung bedanke ich mich bei Frau Netz.

Der Autor

Zur 9. bis 13. Auflage

Die neue Auflage der Mechanik unterscheidet sich von den vorhergehenden insofern, als die von der Internationalen Union für reine und angewandte Physik (IUPAP) empfohlenen Buchstabensymbole eingeführt wurden. Herrn Dr. *F. Zimmer*, der diese Arbeit durchführte, danke ich herzlich für seine Mühe.

A. Recknagel

Zur 1. Auflage

Das Fernstudium, das für einige technische und naturwissenschaftliche Fächer eingerichtet worden ist, stellt auch dem Physikunterricht Aufgaben, die an deutschen Hochschulen bisher nicht aufgetreten sind. Die Arbeit des Fernstudenten läuft wesentlich anders ab als die des Direktstudenten und erfordert ganz spezifisches Lehrmaterial. Wie uns die Erfahrungen der abgeschlossenen Studienjahre zu zeigen scheinen, kann nur ein eigens für das Fernstudium verfaßtes Lehrbuch die berechtigten Wünsche der Studenten befriedigen. Aus dieser Erkenntnis entstand der vorliegende Leitfad. Manche Eigenart des Buches dürfte eine Rechtfertigung nötig haben; daher sollen die wichtigsten Gesichtspunkte erläutert werden, unter denen es entstanden ist.

An der Hochschule braucht der Student ein Lehrbuch *neben* den Vorlesungen, Übungen und Seminaren. Der Fernstudent dagegen hat während langer Zeiträume *nur* das Lehrbuch. Diesem Unterschied muß sich die Darstellung anpassen. Sie braucht für das Direktstudium nicht allzu ausführlich zu sein; denn bei größeren Schwierigkeiten sind Rat und Hilfe leicht zu finden. Für das Fernstudium dagegen kann man nicht klar und ausführlich genug schreiben; denn jeder zu kurz gefaßte Satz, jeder nicht sorgfältig überlegte Ausdruck macht unter Umständen die weitere Arbeit unmöglich. So erklärt es sich, daß grundsätzlich lieber zehn Worte zuviel gesagt wurden als eines zuwenig.

An der Hochschule sieht der Student in der Experimentalvorlesung sehr viele Schauversuche, die eine eindringliche Beweiskraft besitzen und das Gedächtnis außerordentlich

unterstützen. Dem Fernstudenten dagegen werden nur einige wenige Versuche durchgeführt. Demzufolge braucht ein Lehrbuch üblicherweise die Experimentalvorlesung *nicht* in allen Einzelheiten wiederzugeben. Für den Fernstudenten aber muß es jedenfalls *auch* die Experimentalvorlesung enthalten. Daher sind in diesem Buch viele Versuche ausführlich beschrieben und außerdem durch Zeichnungen anschaulich gemacht worden. Gewiß kann man auch so nicht den Eindruck eines fesselnden Versuches erzeugen. Die Hilfe, die das Gedächtnis erhält, ist aber vielleicht angesichts des gedruckten, immer wieder zur Verfügung stehenden Bildes nachhaltiger als bei der schnell abrollenden Vorlesung.

Die wichtigste Aufgabe war es zu zeigen, daß die Physik nicht aus einem Nebeneinander vieler isolierter Beobachtungen besteht, sondern daß einige wenige Prinzipien die Fülle des Stoffes ordnen und die Einzelheiten verbinden. Ohne die einfachsten, dem mathematischen Verständnis des Anfängers angepaßten theoretischen Betrachtungen glaubte ich hier nicht auskommen zu können. Mathematische Schwierigkeiten habe ich dabei in Kauf genommen gegen den großen Vorteil, die Einsicht in die Probleme entscheidend vertiefen zu können. Im ganzen hat das Buch dadurch eine Form angenommen, die es rechtfertigen dürfte, daß der allgemeinere Titel „Physik“ gewählt wurde und nicht der speziellere „Experimentalphysik“.

Die Mehrzahl der Leser werden Ingenieurstudenten sein. Ihr Beruf verlangt, daß sie die Physik *anwenden* können. Sie müssen also physikalische Probleme in mathematische Form bringen und als mathematische Probleme lösen können. Um diese Fähigkeit zu üben, sind zahlreiche Aufgaben über das ganze Buch verstreut. Hier ist Gelegenheit gegeben, mit dem Stoff zu kämpfen. Daher sind die Lösungen nicht zu den Aufgaben gedruckt, sondern am Schluß zusammengestellt; auch nicht unwillkürlich soll das Auge auf den Lösungstext fallen.

In den Rechnungen ist nicht mehr vorausgesetzt als die Differential- und Integralrechnung, die in der Oberschule gelehrt wird. Wenn trotzdem der eine oder andere Student den theoretischen Schlüssen nicht folgen kann, dann sollte er sich nicht durch *mathematische* Überlegungen aufhalten lassen. Er kann die nicht verstandenen Rechnungen nachholen, wenn seine Kenntnisse der Mathematik im Laufe seines Studiums weit genug fortgeschritten sind. Aus demselben Grund sind Abschnitte oder Aufgaben, die Schwierigkeiten bieten könnten, durch Sterne gekennzeichnet. Diese dürfen ohne Schaden überschlagen und gegebenenfalls später nachgeholt werden.

Für verständnisvolle Mitarbeit habe ich Herrn *J. Schubert* und Herrn *Dr. Alkier* von der Hauptabteilung Fernstudium der Technischen Hochschule Dresden zu danken. Beide haben mich insbesondere durch zahlreiche Hinweise auf Stellen unterstützt, bei denen die Fernstudenten erfahrungsgemäß Schwierigkeiten haben. Herr *Schubert* hat außerdem die Ausführung der Zeichnungen mit liebevoller Sorgfalt geleitet.

Dresden, 1954

A. Recknagel

Die wichtigsten Buchstabensymbole

A	Fläche	i	Trägheitsradius
A	physikalische Größe	J	Trägheitsmoment
\vec{A}, \vec{A}	Vektorgröße	J_A	Trägheitsmoment für die Achse A
A_x, A_y, A_z	Koordinaten der Vektorgröße	J	Joule
$ \vec{A} , \vec{A} $	Absolutbetrag von \vec{A} bzw. \vec{A}	J_I, J_{II}, J_{III}	Hauptträgheitsmomente
$[A]$	Maßeinheit von A	k	Federkonstante
$\{A\}$	Maßzahl von A	kg	Kilogramm
A_r	relative Atommasse	kp	Kilopond
a, \vec{a}, \vec{a}	Beschleunigung	kWh	Kilowattstunde
a_x, a_y, a_z	Koordinaten der Beschleunigung	K	Kompressionsmodul
a_r	Radialbeschleunigung	l	Länge
a_t	Tangentialbeschleunigung	l^*	reduzierte Pendellänge
b	Breite	L, \mathbf{L}	Drehimpuls
c	Konstante	L_x, L_y, L_z	Koordinaten des Drehimpulses
c	Schallgeschwindigkeit	L_1, L_2, L_3	Koordinaten des Drehimpulses für die Hauptträgheitsachsen
d	Strecke, Durchmesser	\mathbf{M}	Drehmoment
d	Differentiationszeichen	M_a	Koordinate des Drehmomentes in bezug auf die Koordinatenrichtung a
D	Richtmoment	M_r	Molekulargewicht
E	Elastizitätsmodul	m	Meter
F, \vec{F}, \vec{F}	Kraft	m	Masse
F_x, F_y, F_z	Koordinaten der Kraft	min	Minute
F_s	Kraftkoordinate in Wegrichtung	N	Newton
F_r	Radialkraft	N	Anzahl, Anzahl der Moleküle
$F^{(a)}$	äußere Kraft	N_A	Avogadro-Konstante
$F^{(i)}$	innere Kraft	N'_A	spezifische Molekülzahl
F_C	Corioliskraft	P	Leistung
F_G	Gewichtskraft	p	Pond
F_Z	Zentrifugalkraft	p, \mathbf{p}	Impuls
F_R	Reibungskraft	p_x, p_y, p_z	Koordinaten des Impulses
f	Frequenz	p	Druck
g	Gramm	\mathbf{r}	Ortsvektor
g	Fallbeschleunigung	\mathbf{R}	Ortsvektor des Massenmittelpunktes
g_n	normale Fallbeschleunigung	Pa	Pascal
G	Schubmodul		
h	Stunde		
h	Höhe, Strecke		
I	Stromstärke		
i	Stromdichte		

r	Radius	x_m	Amplitude
\bar{r}	senkrechter Abstand von einer Achse	x_M, y_M, z_M	Ortskoordinaten des Massenzentrums
Re	<i>Reynoldssche</i> Zahl	Z	Zwangskraft
s	Sekunde	α	Winkel, Nullphasenwinkel
s	Weg	β	Winkel
	senkrechter Abstand von der Schwerpunktsachse	δ	Strecke
		Δ	Differenz
t	Zeit	η	Zähigkeit
T	Schwingungsdauer	φ	Winkel
V	Volumen	γ	Gravitationskonstante
V, \vec{V}	Geschwindigkeit des Schwerpunktes	\varkappa	Summationsindex
v, \vec{v}, \vec{v}	Geschwindigkeit	μ_0	Koeffizient der Haftreibung
v_x, v_y, v_z	Koordinaten der Geschwindigkeit	μ	Koeffizient der Gleitreibung
		μ	<i>Poissonsche</i> Zahl
		μ	Molekülmasse
W	Watt	ρ	Dichte
W_s	Wattsekunde	σ	Zugspannung
W	Arbeit, Energie	σ	Oberflächenspannung
W'	Verschiebungsarbeit	τ	Schubspannung
W_k	kinetische Energie	ω	Kreisfrequenz
W_p	potentielle Energie	$\omega, \vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit
W_g	Gesamtenergie	$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Koordinaten der Winkelgeschwindigkeit
x, y, z	Ortskoordinaten		

Form der Zitate

Hinweis auf Textstelle: [2.10].

Das bedeutet: Kapitel 2 (Bewegungslehre),

Abschnitt 2.10 (Koordinatendarstellung der krummlinigen Bewegung)

Hinweis auf Formel: (2.10).

Das bedeutet: Kapitel 2, Formelnummer (2.10).

Inhaltsverzeichnis

Die wichtigsten Buchstabensymbole	7
1. Einleitung	13
1.1. Aufgabe der Physik	13
1.2. Darstellung physikalischer Größen	14
1.3. Grundgrößen und abgeleitete Größen	17
1.4. Größengleichungen	19
1.5. Vektorgrößen	21
1.6. Koordinatendarstellung der Vektoren	25
1.7. Produkte von Vektoren	28
1.8. Differentiation eines Vektors nach einem Parameter	33
1.9. Die Längeneinheit	33
1.10. Die Zeiteinheit	35
1.11. Kurzzeitmessung	37
1.12. Ebener und räumlicher Winkel	40
Mechanik	
2. Bewegungslehre	44
2.1. Die geradlinige gleichförmige Bewegung	44
2.2. Die Geschwindigkeit der geradlinigen ungleichförmigen Bewegung	46
2.3. Physikalische Differentiale	48
2.4. Die Geschwindigkeit beim freien Fall	50
2.5. Die Beschleunigung	52
2.6. Der freie Fall	54
2.7. Die harmonische Schwingung	57
2.8. Zusammensetzen von Geschwindigkeiten	61
2.9. Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der krummlinigen Bewegung	62
2.10. Koordinatendarstellung der krummlinigen Bewegung	65
2.11. Die Bewegung auf dem Kreis	66
3. Dynamik der Punktmasse	72
3.1. Grundlagen des Kraftbegriffs	72
3.2. Definition der Kraft aus statischen Wirkungen	74
3.3. Das Kräfteparallelogramm	77
3.4. Das Trägheitsgesetz	78
3.5. Das Gegenwirkungsprinzip	80
3.6. Das Grundgesetz der Mechanik	82
3.7. Die Maßeinheiten von Kraft und Masse	86
3.8. Die Bewegung bei konstanter Kraft	87
3.9. Die allgemeine Form des <i>Newtonschen</i> Grundgesetzes	89
3.10. Die Federschwingung	91
3.11. Der Wurf	93

3.12. Die gleichförmige Kreisbewegung	96
3.13. Die Zentralbewegung	98
3.14. Die Massenanziehung	102
3.15. Zwangskräfte	105
3.16. Das mathematische Pendel	107
4. Energie	109
4.1. Die Arbeit	109
4.2. Beispiele und Ergänzungen	112
4.3. Die Leistung	115
4.4. Die kinetische Energie	117
4.5. Die potentielle Energie	118
4.6. Der Energiesatz	121
4.7. Beispiele zum Energiesatz	122
4.8. Der Energiesatz bei Schwingungen	125
4.9.* Der Energiesatz bei mehreren Kräften	128
5. Systeme von Punktmassen	130
5.1. Kraftstoß und Impuls	130
5.2. Der Impulssatz	133
5.3. Der Massenmittelpunkt	134
5.4. Beispiele	135
5.5. Der Energiesatz	137
5.6. Die Wirkung äußerer Kräfte	138
5.7. Der Stoß	141
5.8. Der elastische gerade Stoß	143
5.9. Der unelastische gerade Stoß	145
5.10. Verallgemeinerungen	146
5.11.* Der elastische schiefe Stoß	149
6. Statik starrer Körper	152
6.1. Übergang von der Punktmasse zum starren Körper	152
6.2. Dichte und Wichte	153
6.3. Der Massenmittelpunkt	154
6.4. Elementare Umformungen von Kräften	156
6.5. Ebene Kraftsysteme	157
6.6. Kräftepaare	160
6.7. Das allgemeine Kraftsystem am starren Körper	164
6.8. Das Drehmoment für die Drehung um eine feste Achse	165
6.9. Das Drehmoment bei der Drehung um einen festen Punkt	167
6.10. Gleichgewicht am starren Körper	170
6.11.* Empfindlichkeit der Waage	172
7. Dynamik starrer Körper	175
7.1. Freiheitsgrade des starren Körpers	175
7.2. Drehung um eine Achse	176
7.3. Winkelgeschwindigkeit als Vektor	178
7.4. Energie bei der Drehbewegung	181
7.5. Das Trägheitsellipsoid	184
7.6. Der Satz von <i>Steiner</i>	187
7.7. Drehung um eine feste Achse	189
7.8. Drehschwingungen	193

7.9.	Das physische Pendel	194
7.10.	Der Drehimpuls	198
7.11.	Der Drehimpulssatz	201
7.12.	Freie Achsen	205
7.13.	Der kräftefreie Kreisel	207
7.14.	Der Kreisel unter Zwang	210
7.15.	Der Kreisel mit zwei Freiheitsgraden	216
8.	Bewegung im beschleunigten Bezugssystem	220
8.1.	Gleichförmig geradlinig bewegtes Bezugssystem	220
8.2.	Geradlinig beschleunigtes Bezugssystem	222
8.3.	Die Zentrifugalkraft	225
8.4.	Die Zentrifugalkraft auf der rotierenden Erde	229
8.5.	Die <i>Corioliskraft</i>	230
8.6.	Berechnung der <i>Corioliskraft</i>	232
8.7.	<i>Corioliskräfte</i> auf der rotierenden Erde	233
8.8.	Das Inertialsystem	237
9.	Eigenschaften fester Körper	238
9.1.	Grundbegriffe der Atomtheorie	238
9.2.	Die Aggregatzustände	241
9.3.	Die Haftreibung	244
9.4.	Die Gleitreibung	249
9.5.	Reibung am rollenden Rad	252
9.6.	Spannungen im festen Körper	253
9.7.	Das <i>Hookesche</i> Gesetz	256
9.8.	Drillung	258
9.9.	Dehnung, Biegung, Knickung	260
9.10.*	Zusammenhang der Elastizitätskonstanten	263
9.11.	Erweiterung der Elastizitätsgesetze	266
10.	Ruhende Flüssigkeiten und Gase	269
10.1.	Der Druck	269
10.2.	Der Schweredruck der Flüssigkeiten	272
10.3.	Der Schweredruck der Gase	275
10.4.	Der Auftrieb	277
10.5.	Schwimmen	281
10.6.	Das <i>Boylesche</i> Gesetz für Gase	282
10.7.	Ableitung des <i>Boyleschen</i> Gesetzes aus der Atomvorstellung	286
10.8.	Die barometrische Höhenformel	289
10.9.	Flüssigkeiten und Gase im rotierenden Bezugssystem	291
10.10.	Wirkungen der zwischenmolekularen Anziehungskräfte	293
10.11.	Oberflächenspannung	295
10.12.	Grenzflächenspannung	300
11.	Strömende Flüssigkeiten und Gase	304
11.1.	Allgemeine Kennzeichen der Strömungsvorgänge	304
11.2.	Die Kontinuitätsgleichung bei inkompressiblen Flüssigkeiten	309
11.3.	Innere Reibung der Flüssigkeiten und Gase	310
11.4.	Die <i>Bernouillische</i> Gleichung	315
11.5.	Beispiele und Anwendungen	317
11.6.	Quellen-, Wirbel-, Zirkulationsströmung	321

11.7. Wirbelentstehung	324
11.8. Widerstand in Strömungen	326
11.9. Der Quertrieb in Strömungen	330
11.10. Ähnlichkeitsgesetze	332
11.11. Turbulenz der Strömung in einem Rohr	334
Lösungen der Aufgaben	337
Anhang	381
Sachverzeichnis	383

1. Einleitung

1.1. Aufgabe der Physik

Dem ursprünglichen Sinne nach bedeutet Physik die Lehre von der Natur schlechthin. In dieser umfassenden Bedeutung wird das Wort heute jedoch nicht mehr verstanden. Der Grund liegt darin, daß sich die naturwissenschaftliche Forschung in ungeheurem Maße ausgeweitet hat. Infolgedessen hat sich die Naturwissenschaft in zahlreiche Einzelfächer aufgespalten, und nur noch eines dieser Teilgebiete heißt heute Physik. Deren Inhalt erschließt sich uns sehr einfach, wenn man zuerst fragt, was Physik *nicht* ist. Zu ihrem Arbeitsgebiet gehören vor allem nicht die Lebensvorgänge, d. h. die Vorgänge, die typisch für die lebende Materie sind. Vielmehr beschäftigt sich die Physik mit den Eigenschaften der nichtlebenden Materie oder mit denjenigen, die an Belebtem und Unbelebtem in gleicher Weise auftreten. Aber auch der Bereich der unbelebten Natur ist noch mit anderen Wissenschaften zu teilen. Diese sind zum Teil weitgehend unabhängig von der Physik. Hierher gehören die Chemie, das ist die Lehre von den stofflichen Veränderungen der Materie, die Mineralogie und die Geologie. Zum anderen Teil handelt es sich aber auch um Wissenschaften, die insofern von der Physik abhängen, als sie die physikalischen Gesetze in engbegrenzten Bereichen der Naturforschung anwenden, und die nur ihres großen Umfanges wegen zu Sonderwissenschaften geworden sind. Hierhin rechnen Astrophysik, Geophysik, aber auch Astronomie.

Nachdem das Stoffgebiet in dieser Weise begrenzt wurde, dürfte es nun nicht mißverstanden werden, wenn wir sagen:

Physik ist die Lehre von den Stoffen und Kräften der unbelebten Natur.

Der Weg, auf dem die physikalische Forschung vorwärts schreitet, ist in vieler Hinsicht Vorbild für alle anderen Naturwissenschaften. *Physik ist eine Erfahrungswissenschaft*, d. h., aus der Beobachtung der Naturvorgänge fließt in erster Linie unser physikalisches Wissen. Dabei beschränkt sich die Physik jedoch nicht darauf, nur solche Prozesse zu untersuchen, die ohne unser Zutun ablaufen. Sie erzeugt auch Vorgänge, die von selbst niemals eintreten würden, d. h., sie stellt *Experimente* an. Allein durch das planvolle Experiment hat die Physik – ebenso übrigens auch die Chemie – ihre erstaunlichen Erfolge in der Neuzeit errungen.

Das physikalische Experiment soll eine qualitative und quantitative Kenntnis der Tatsachen liefern. Es soll also den zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen den Größen feststellen, die auf den Versuch Einfluß haben. Im praktischen Fall ist die Aufgabe des Experimentators gelöst, wenn er eine Zahlentafel aufgestellt oder eine Formel empirisch gewonnen hat.

Auf diesem Wege allein baut man allerdings keine Wissenschaft auf, man gewinnt nur eine Sammlung von Gesetzen, die ohne Zusammenhang nebeneinander stehen. Zu einer wissenschaftlichen Lehre gelangt man erst, wenn die Vielfalt der Einzeltatsachen aus einigen grundlegenden Voraussetzungen erklärt werden kann. Es werden also *Hypothesen*, das sind wissenschaftliche Annahmen, aufgestellt, als deren logische Folge die Ergebnisse

der Versuche erscheinen. Erklärt eine solche Hypothese nicht nur den Versuch, für den sie ursprünglich gedacht war, sondern bewährt sie sich in einem umfangreichen Gebiet, dann spricht man von einer *Theorie*.

Die physikalische Theorie muß die vorhandenen Experimente deuten und zu neuen, bisher noch nicht durchgeführten Versuchen anregen. Bedeutende wissenschaftliche Entdeckungen und Erfindungen sind durch die Theorie, also gewissermaßen am Schreibtisch, gewonnen und erst nachträglich im Laboratorium bestätigt worden. Neben die Erfahrung tritt also eine zweite Quelle des physikalischen Wissens, das spekulative, über die bereits gesicherte Erfahrung hinausgehende Denken. Dabei ist allerdings einschränkend hinzuzufügen: Das spekulative Denken liefert brauchbare physikalische Erkenntnisse nur, wenn es sich auf Erfahrungen gründet und seine Ergebnisse immer wieder der Kritik des Experiments unterwirft.

Die Form der physikalischen Theorie ist mathematisch, d. h., die physikalischen Gesetze werden als mathematische Gleichungen dargestellt und nach den Regeln der Mathematik umgeformt. So lassen sich in einfacher und rationeller Form alle Folgerungen gewinnen, die aus den physikalischen Gesetzen fließen; denn dabei verwerten wir die ungeheure Gedankenarbeit, die in den mathematischen Gesetzen aufgespeichert ruht.

Diejenigen Aufgaben, die aus dem Gesamtumfang der überhaupt möglichen Forschungsgebiete jeweils herausgegriffen und bearbeitet werden, sind nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewählt. Es handelt sich entweder um Vorhaben der sogenannten *Grundlagenforschung*, deren Anliegen es ist, grundlegend neue Erkenntnisse zu liefern oder den Umfang und die Genauigkeit bereits vorhandener Kenntnisse zu vergrößern. Es kann sich aber auch um Aufgaben der *Zweckforschung* handeln, die speziell in der Physik die Anwendung bekannter physikalischer Tatsachen und Gesetze für *neue* technische Ziele ermöglichen oder die Wirksamkeit *bekannter* technischer Verfahren verbessern soll. Die Zweckforschung darf im Rahmen der physikalischen Arbeit nicht gering geachtet werden. *Es ist eine wichtige Aufgabe, unsere Erkenntnisse über die Naturgesetze zum Besten aller Menschen auszunutzen.* Diese Aufgabe beschäftigt einen stetig wachsenden Anteil aller Physiker und bewirkt, daß die Physik immer mehr in andere Gebiete der Naturwissenschaft und Technik ausstrahlt und auch für Naturwissenschaftler und Ingenieure an Bedeutung gewinnt.

Der vorliegende Lehrgang der Physik spiegelt den geschilderten Weg der physikalischen Forschung wider. In erster Linie werden die Versuche beschrieben und damit die experimentellen Grundlagen der wichtigsten physikalischen Theorien dargestellt. In den einfachsten Fällen werden diese Theorien dann mathematisch formuliert und Anwendungen der gewonnenen Gesetze geübt.

1.2. Darstellung physikalischer Größen

Wir beschreiben die Faktoren, die bei physikalischen Erscheinungen mitwirken, indem wir sogenannte *physikalische Größen* einführen. Diese soll man „messen“ können, ihr Einfluß auf die Erscheinungen soll sich „zahlenmäßig“ festlegen lassen. Längen, Zeiten, Geschwindigkeiten, Kräfte sind physikalische Größen. Zu ihrer *Messung* sind in allen Fällen grundsätzlich zwei Schritte erforderlich:

- a) Eine Größe der zu messenden Art ist als Vergleichsgröße zu wählen. Wir nennen sie die *Maßeinheit* oder einfach *Einheit*.
- b) Diejenige Zahl ist festzulegen, die angibt, wie oft die Maßeinheit in der auszumessenden Größe enthalten ist. Diese Zahl heißt *Maßzahl* oder *Zahlenwert*.

Sind Längen zu bestimmen, dann ist im ersten Schritt festzulegen, daß die Längen z. B. in der Maßeinheit *Meter* (Abkürzung: m) angegeben werden sollen. Der zweite Schritt, die eigentliche Messung, vergleicht eine Kopie des Meters, etwa ein Lineal oder ein Bandmaß, mit der unbekanntem Strecke. Die Zahl der Meter, die sich für die unbekanntem Strecke ergibt, ist die zur Maßeinheit „Meter“ gehörige Maßzahl. Sollen Zeiten bestimmt werden, so ist entsprechend zuerst die Zeiteinheit, z. B. die *Sekunde* (Abkürzung: s), zu wählen und dann festzustellen, wie oft diese Sekunde in einem auszumessenden Zeitabschnitt enthalten ist.

Soll eine Größe quantitativ gekennzeichnet werden, dann sind sowohl die Maßeinheit als auch die Maßzahl anzugeben. Bezeichnen wir beispielsweise allgemein Längen mit l , Zeiten mit t , so machen wir Angaben der Form $l = 100 \text{ m}$, $t = 2 \text{ s}$. Auch andere physikalische Größen werden in dieser Art wiedergegeben, wie sich noch an vielen Beispielen zeigen wird. Alle Angaben dieser Art werden folgendermaßen gedeutet: Definitionsgemäß gibt die Maßzahl an, wie oft die Maßeinheit in der auszumessenden Größe enthalten ist. Die Maßzahl ist also eine Verhältniszahl, nämlich das Verhältnis der auszumessenden Größe zur Maßeinheit. Dieser Behauptung kann man die Form einer mathematischen Gleichung geben:

$$\text{Maßzahl} = \frac{\text{Größe}}{\text{Maßeinheit}}.$$

Behandelt man diese Beziehung wie die üblichen mathematischen Formeln, so kann man sie umgestalten zu der grundlegenden Gleichung

$$\boxed{\text{Größe} = \text{Maßzahl} \cdot \text{Maßeinheit} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}} \quad (1.1')$$

Es sei A das Symbol der betrachteten Größe. Dann gelten folgende Bezeichnungen:

$$\boxed{[A] = \text{Maßeinheit von } A,} \quad (1.2')$$

$$\boxed{\{A\} = \text{Maßzahl von } A.} \quad (1.2'')$$

Damit können wir der Größe A die folgende Form geben:

$$\boxed{A = \{A\} \cdot [A].} \quad (1.1'')$$

Ist zum Beispiel die betrachtete Größe eine Länge l , so lautet die entsprechende Beziehung

$$l = \{l\} \cdot [l].$$

Die Maßeinheit der Länge ist das Meter.

$$\boxed{[l] = \text{m} = \text{Meter}.} \quad (1.3)$$

Soll eine Zeit t beschrieben werden, so gilt

$$t = \{t\} \cdot [t].$$

Die Maßeinheit der Zeit ist die Sekunde.

$$\boxed{[t] = \text{s} = \text{Sekunde}.} \quad (1.4)$$

Ist l eine Strecke von 100 m Länge, dann gilt $\{l\} = 100$. Die Größe ist also nach (1.1") anzugeben in der Form $l = 100 \cdot \text{m}$. In dieser Gleichung läßt man bei der Maßeinheit den Malpunkt weg und kommt zu der üblichen Schreibweise $l = 100 \text{ m}$.

Daraus wird klar, daß die rechte Seite dieser letzten Formel als ein Produkt aufgefaßt werden kann, dessen einer Faktor 100, dessen zweiter die Maßeinheit m ist. Bei allen Umformungen ist diese Auffassung zu beachten. Wie das zu geschehen hat, soll in aller Ausführlichkeit an Beispielen gezeigt werden. Zuerst werden Einheiten derselben Art ineinander umgerechnet.

$$\begin{aligned} l &= 100 \text{ m} = 100 \cdot \text{m} = 100 \cdot \frac{1}{1000} \text{ km} \\ &= 100 \cdot \frac{1}{1000} \cdot \text{km} = 0,1 \cdot \text{km} = 0,1 \text{ km}. \end{aligned}$$

Als zweites Beispiel wird das Verhältnis zweier Größen derselben Art gebildet. Das muß z. B. bei jeder Messung getan werden, wenn die Maßzahl festgelegt werden muß. Hier soll es sich speziell um das Verhältnis zweier Zeiten handeln.

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{4 \text{ Stunden}}{0,06 \text{ Sekunden}}.$$

Statt dessen schreibt man

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}}{\frac{6}{100} \text{ s}} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 60}{\frac{6}{100}} = 24 \cdot 10^4.$$

Die Maßeinheit tritt also in den Gleichungen wie ein gewöhnlicher Faktor auf, den man auch kürzen kann.

Selbstverständlich wäre es ein langweiliger Zopf, wenn jemand in seiner praktischen Arbeit bei einer so einfachen Rechnung alle oben angegebenen Zwischenschritte niederschreiben wollte. Jeder lasse so viel aus, daß er den Rest mit einem Blick übersehen kann, beachte aber, daß er eigentlich eine Gedankenreihe der angegebenen Form durchläuft. Da das hier Vorgetragene Anweisungen darüber geben will, wie man die formale Seite physikalischer Aufgaben rationell und sicher behandelt, hüte sich der Anfänger jedenfalls davor, das Gesagte als nutzlose Wortklauberei zu betrachten. Wir fassen zusammen: *Physikalische Größen werden in der Form*

$$\text{Größe} = \text{Maßzahl} \cdot \text{Maßeinheit} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$$

angegeben, wobei die rechte Seite als normales Produkt zweier Faktoren aufgefaßt wird.

Soll der Wertebereich einer Größe *graphisch* dargestellt werden, so ordnet man im einfachsten Fall die Punkte einer Zahlengerade den Maßzahlen der physikalischen Größe zu.

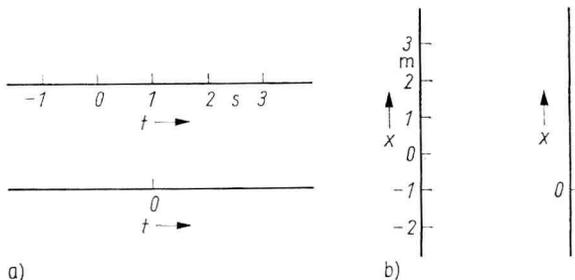


Bild 1. Graphische Darstellung physikalischer Größen