



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für elektrotechnische Berufe

Elektrotechnik

für Fachoberschulen, berufliche Gymnasien
und Fachschulen für Technik

Bearbeitet von Lehrern an beruflichen Schulen und Ingenieuren
(siehe Rückseite)

Leitung des Arbeitskreises und Lektorat: Dieter Sternkopf

Verlag Europa-Lehrmittel · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 36322

Autoren:

Hasenohr, Roland
Postl, Dr. Dieter
Quast, Jan
Schmitt, Michael

76571 Gaggenau
76275 Ettlingen
13357 Berlin
68163 Mannheim

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises:

Dieter Sternkopf

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, Ostfildern

1. Auflage 2018, korrigierter Nachdruck 2020
Druck 5 4 3 (keine Änderung seit der 2. Druckquote)

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-8085-3632-2

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

© 2018 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Satz+Layout Werkstatt Kluth GmbH, 50374 Erftstadt
Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Umschlagmotive: Autoren
Druck: ITC Print, LV-1035 Riga, Lettland

So ist das Buch zu lesen!

Das hier vorliegende Buch soll „mehrere Fliegen mit einer Klappe schlagen“. Es geht uns darum, ein Fachbuch zu den Grundlagen der Elektrotechnik für Schularten zu schaffen, die im Schulbuchbereich oft vernachlässigt werden. Es sind dies zum Beispiel die Fachoberschulen, die Technischen Gymnasien und die Fachschulen für Technik. An diesen Schulen werden auch Anteile der höheren Mathematik unterrichtet, die wir in diesem Buch auch an ausgewählten Stellen zur Lösungsfindung anwenden. Werden komplexe Aufgaben gelöst, ist es durchaus zeitgemäß, diese Lösung auch durch eine Schaltungssimulation mit einem professionellen System zu verifizieren. Hierzu arbeiten wir mit Cadence OrCAD (mit PSpice), das Schülern und Studenten auch kostenfrei zur Verfügung steht.

Viele Phänomene der Elektrotechnik lassen sich auch im Unterricht sehr gut durch die Anwendung von Standardsoftware nachvollziehen. Wir verwenden hier an vielen Stellen ein Tabellenkalkulationsprogramm.

Im Buch werden einige Symbole verwendet, deren Aussagen hier kurz zusammengefasst sind:



Alle Projekte, die mit Cadence OrCAD oder einem Tabellenkalkulationsprogramm erstellt wurden, stehen auch zum Download zur Verfügung. Die QR-Codes an den jeweiligen Stellen leiten Sie auf die Download-Site des Verlages.



Wir lösen eine Problem- oder Aufgabenstellung von Hand. Unseres Erachtens immer noch eine ganz wesentliche Kompetenz um so auch Simulationsergebnisse auf Plausibilität hin zu prüfen.



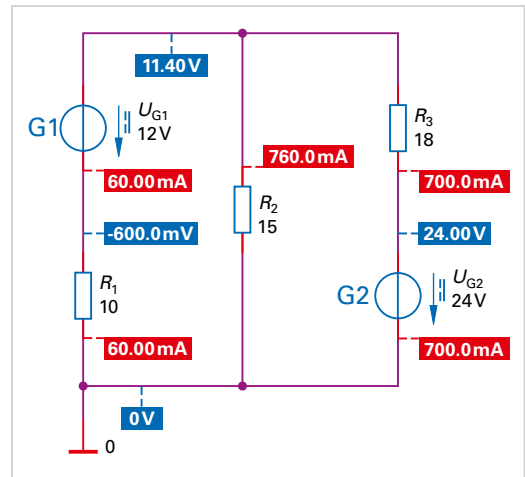
Wir lösen eine Problem- oder Aufgabenstellung unter Zuhilfenahme moderner Datentechnik. Dies können Tools sein, die uns gewisse Berechnung vereinfachen oder komplexe Simulationsprogramme, die höchstkomplexe Simulationen und Berechnungen durchführen und die Ergebnisse sehr ansprechend visualisieren.

Ein Softwaretool kann z.B. eine Datei des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel sein, das uns u.U. wiederkehrende Berechnungen abnimmt. Diese Dateien stehen zum Download zur Verfügung, einen Screenshot der Ergebnisse binden wir aber gleich an die passende Stelle im Buch ein:

Gleichungssystem			
3 Unbekannte 3 Gleichungen			
Gleichungsmatrix			Lösungsvektor
x	y	z	
1	-1	1	0
-10	-15	0	-12
0	-15	-18	-24
Lösung			
x	0,06		
y	0,76		
z	0,7		

Mit Cadence OrCAD (PSpice) werden komplexe Netzwerke simuliert und die Ergebnisse visualisiert.

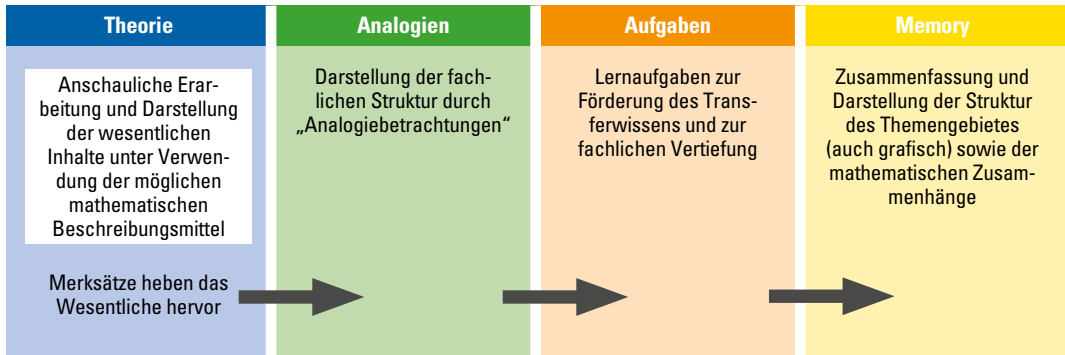
Es stehen hierzu diverse Simulationsverfahren zur Verfügung. Eine einfaches Verfahren ist die Arbeitspunktberechnung (BIAS-Point). Hier werden in Netzwerken zum Beispiel alle Ströme und Spannungen (im eingeschwungenen Zustand) berechnet und direkt im Schaltplan dargestellt.



Bitte beachten Sie hierbei:

- Die Widerstandswerte werden ohne Einheit angegeben. Es handelt sich direkt um die Ohmwerte. Die Zehnerpotenzen werden durch die entsprechenden Vorsätze dargestellt (k für kilo für 10^3 , m für milli für 10^{-3} usw.)
- Die Spannungen werden als Potentiale gegenüber der Bezugsgröße (Masse) angegeben.
- Die Ströme werden mit den Labels dort angezeigt, wo der Strom IN das jeweilige Bauteil fließt. Somit wird die Stromrichtung angegeben.

Die Kapitel des Buches sind wie nachfolgend gezeigt aufgebaut. Die farbige Auszeichnung gewährleistet eine schnelle und gute Orientierung.



Verlag und Autoren danken allen, die dieses Buch durch Informationen und Bilder unterstützt haben. Hinweise oder Ergänzungen, die zur Verbesserung des Buches beitragen, sind immer willkommen. Diese nehmen wir per E-Mail an lektorat@europa-lehrmittel.de entgegen. Ebenso interessiert es uns, welche Erfahrungen Sie bei der Nutzung dieses Buches machen.

Besonderer Dank gilt den Firmen:

- Microsoft <https://msdn.microsoft.com> (Microsoft Excel 2016)
- IGE+XAO <http://www.ige-xao.com/de/> (SEE Electrical)
- FlowCAD www.FlowCAD.de (OrCAD und PSpice)

für die Bereitstellung der genannten Software-Tools.

OrCAD® und PSpice® sind Produkte und eingetragene Warenzeichen von Cadence Design Systems, Inc. und werden in Zentraleuropa von FlowCAD vertrieben.

Inhaltsverzeichnis

■ So ist das Buch zu lesen!	3
1 ■ Physikalische Größen und deren Einheiten	11
1.1 Das Internationale Einheitensystem (SI)	11
1.2 Größengleichungen: Rechnen mit Größen	12
1.3 Dimensionen physikalischer Größen	13
1.4 Einstieg in den Feldbegriff – Gravitation: Das Schwerefeld der Erde	14
1.5 Arbeit und potenzielle Energie im Gravitationsfeld	15
2 ■ Elektrische Grundgrößen	19
2.1 Reibungselektrizität und elektrische Ladung: die Anfänge der Elektrotechnik	19
2.2 Der Aufbau der Materie: eine atomistische Deutung mit dem bohrschen Atommodell	21
2.3 Der Transport von Ladungsträgern: Leiter und Nichtleiter	23
2.4 Die elektrische Spannung	25
2.4.1 Messung von Spannungen – Spannung als Potenzialdifferenz	29
2.5 Die elektrische Stromstärke	31
2.5.1 Die Stromrichtung	32
2.5.2 Die Messung der Stromstärke	33
2.5.3 Die Stromdichte	33
2.6 Der elektrische Widerstand	35
2.6.1 Das ohmsche Gesetz	35
2.6.2 Leiterwiderstand	36
2.6.3 Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands	38
2.6.4 Nichtlineare Widerstände	40
2.7 Elektrische Arbeit und Leistung	42
2.7.1 Die elektrische Arbeit	42
2.7.2 Die elektrische Leistung	42
2.7.3 Umwandlung elektrischer Energie und Wirkungsgrad	43

3	■ Einfache Netzwerke an Gleichspannung (DC)	46
3.1	Stromkreis	46
3.2	Kirchhoffsche Gesetze	47
3.3	Ohmsches Gesetz	48
3.4	Reihenschaltung	49
3.5	Parallelschaltung	52
3.6	Gemischte Schaltungen	54
3.7	Anwendungsbeispiele	55
3.7.1	Unbelasteter Spannungsteiler	55
3.7.2	Belasteter Spannungsteiler	56
3.7.3	Erweitern des Strom- und Spannungsmessbereichs	57
3.7.4	Brückenschaltung	58
4	■ Komplexe Widerstandsnetzwerke an Gleichspannung	60
4.1	Umwandlung von Dreieck- in Sternschaltung und umgekehrt	60
4.2	Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle	60
4.2.1	Ersatzspannungsquelle	61
4.2.2	Ersatzstromquelle	62
4.2.3	Vergleich von Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle	63
4.3	Netzwerke mit mehreren Quellen: Lösung mithilfe der kirchhoffschen Gesetze	63
4.3.1	Lösung des Gleichungssystems „von Hand“	65
4.3.2	Rechnergestützte Lösung des Gleichungssystems	65
4.3.3	Überprüfung der Lösung per Simulation	66
4.3.4	Wie lassen sich Gleichungen finden, die voneinander unabhängig sind?	67
4.4	Netzwerke mit mehreren Quellen: Lösung durch Anwenden des Überlagerungssatzes	68
4.4.1	Berechnung eines Netzwerks mit Ersatzquelle und Überlagerungssatz	70
4.5	Netzwerke mit mehreren Quellen: Lösung durch Anwenden der Maschenstromanalyse	74
5	■ Reale Gleichspannungsquellen	82
5.1	Das Verhalten idealer Quellen	82
5.2	Die reale Spannungsquelle	82
5.3	Anpassung	84
5.4	Die ideale und die reale Stromquelle	86

6	■ Das elektrische Feld	89
6.1	Polarisation und Influenz	89
6.2	Definition und Nachweis des elektrischen Feldes	90
6.3	Das coulombsche Kraftgesetz	92
6.4	Die elektrische Feldstärke	96
6.5	Feldlinien	98
6.6	Arbeit und potenzielle Energie einer Ladung q im elektrischen Feld	102
6.6.1	Elektrische Arbeit im homogenen Feld	102
6.6.2	Elektrische Arbeit im Radialfeld einer Punktladung	104
6.7	Potenzielle Energie und Potenzial	106
6.8	Erregung des elektrischen Feldes und die elektrische Flussdichte $\vec{D}$	109
6.9	Materie im elektrischen Feld	111
6.9.1	Nichtleiter im elektrischen Feld	111
6.9.2	Leiter im elektrischen Feld	112
6.10	Kondensatoren	114
6.10.1	Die Kapazität eines Kondensators	114
6.10.2	Energie des aufgeladenen Kondensators und des elektrischen Feldes	115
7	■ Magnetische Felder	118
7.1	Experimentelle Befunde	118
7.2	Beschreibung magnetischer Felder durch ihre Grundgrößen	121
7.2.1	Die magnetische Feldstärke und die Durchflutung	121
7.2.2	Der magnetische Fluss	123
7.2.3	Die magnetische Flussdichte	123
7.2.4	Zusammenhang zwischen der Ursachengröße θ und Wirkung ϕ beim magnetischen Feld: das ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises	125
7.2.5	Magnetische Kreise mit Eisenkern – Materie im magnetischen Feld	127
7.2.6	Hysterese	128
7.2.7	Magnetwerkstoffe	129
7.3	Kraftwirkungen zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern sowie zwischen Magnetfeld und stromdurchflossenem Leiter	130
7.3.1	Das Motorprinzip	131
7.3.2	Kraft auf bewegte Ladungsträger (Lorentzkraft)	133
7.4	Induktionsgesetz	134
7.4.1	Magnetischer Fluss	134
7.4.2	Der Induktionsvorgang	134
7.4.3	Lenzsche Regel	137

7.5	Selbstinduktion und Induktivität	138
7.6	Wirbelströme	139
7.7	Die Energie des magnetischen Feldes	140
8	■ Kondensator und Spule an Gleichspannung (DC)	143
8.1	Aufbau von Kondensatoren	143
8.2	Aufbau von Spulen	144
8.3	Reihenschaltung von Kondensatoren und Spulen	145
8.3.1	Reihenschaltung von Kondensatoren	145
8.3.2	Reihenschaltung von Spulen	146
8.4	Parallelschaltung von Kondensatoren und Spulen	147
8.4.1	Parallelschaltung von Kondensatoren	147
8.4.2	Parallelschaltung von Spulen	148
8.5	Lade- und Entladevorgang an einem Kondensator	149
8.6	Lade- und Entladevorgang an einer Spule	153
9	■ Grundlagen der Wechselstromtechnik	161
9.1	Darstellungen und Beschreibung von sinusförmigen Spannungen und Strömen	161
9.1.1	Beschreibungsmittel Liniendiagramm	162
9.1.2	Beschreibungsmittel Zeigerdiagramm	162
9.1.3	Beschreibungsmittel Funktionsgleichung	163
9.2	Mittelwerte von periodisch zeitabhängigen Größen	167
9.2.1	Effektivwert	167
9.2.2	Arithmetischer Mittelwert	170
9.2.3	Gleichrichtwert	172
9.2.4	Scheitelfaktor (Crestfaktor)	172
9.2.5	Formfaktor	173
9.3	Addition und Subtraktion von frequenzgleichen Wechselgrößen	176
9.3.1	Addition von zwei sinusförmigen Wechselspannungen mit gleicher Phasenlage	176
9.3.2	Addition von zwei sinusförmigen Wechselspannungen mit unterschiedlicher Phasenlage	178
9.3.3	Subtraktion von zwei sinusförmigen Wechselspannungen	179
9.4	Einführung in die komplexe Rechnung	180
9.4.1	Komplexe Darstellung sinusförmiger Größen	181
9.4.2	Beschreibung von Bauelementen mithilfe der komplexen Rechnung	184
9.4.3	Komplexe Leistung	186

10	Kondensator und Spule an Wechselspannung (AC)	189
10.1	Kondensator im Wechselstromkreis	189
10.1.1	Blindwiderstand und Phasenverschiebung beim Kondensator	189
10.1.2	Frequenzverhalten des Kondensators	190
10.1.3	Komplexe Darstellung	191
10.2	Spule im Wechselstromkreis	192
10.2.1	Blindwiderstand und Phasenverschiebung bei der Spule	192
10.2.2	Frequenzverhalten der Spule	194
10.2.3	Komplexe Darstellung	194
10.3	Grundschaltungen von Spule, Kondensator und Widerstand	195
10.3.1	Reihenschaltung von ohmschem Widerstand und Kondensator	195
10.3.2	Reihenschaltung von ohmschem Widerstand und Spule	198
10.3.3	Reihenschaltung von ohmschem Widerstand, Kondensator und Spule	200
10.3.4	Parallelschaltung von ohmschem Widerstand und Kondensator	202
10.3.5	Parallelschaltungen von ohmschem Widerstand und Spule	204
10.3.6	Parallelschaltungen von ohmschem Widerstand, Spule und Kondensator	205
10.4	Frequenzverhalten von RC- und RL-Schaltungen	207
10.4.1	Frequenzverhalten von RC-Reihenschaltungen	208
10.4.2	Frequenzverhalten von RL-Reihenschaltungen	213
10.4.3	Frequenzverhalten von RC- und RL-Parallelschaltungen	216
10.5	Ortskurven von RL- und RC-Schaltungen	216
10.5.1	Ortskurven für RC-Schaltungen	217
10.5.2	Ortskurven für RL-Schaltungen	218
11	Filter und Schwingkreise	222
11.1	Filtertypen	222
11.2	Der RC-Tiefpass – Verhalten im Frequenzbereich	223
11.2.1	Die Grenzfrequenz f_g	223
11.2.2	Logarithmische Darstellung des Betragsfrequenzgangs	224
11.2.3	Verhalten der RC-Schaltung im Zeitbereich – Ansteuerung mit einem Spannungssprung	229
11.3	Der RC-Hochpass	230
11.3.1	Beschreibung im Frequenzbereich	230
11.3.2	Beschreibung des CR-Gliedes im Zeitbereich – Ansteuerung mit einem Spannungssprung	231
11.4	Der Bandpass	232
11.5	Schwingkreise – Resonanzkreise	233
11.5.1	Freie und erzwungene Schwingungen	233
11.5.2	Der Reihenschwingkreis	235
11.5.3	Der Parallelschwingkreis	238

12	■ Drehstromsystem	242
12.1	Prinzipieller Aufbau eines Drehstromgenerators und die Drehstromerzeugung	242
12.2	Verkettung	243
12.3	Zeigerdiagramm des Vierleiter-Dreiphasensystems	245
12.4	Elektrische Drehstromverbraucher am Vierleiter-Dreiphasensystem	246
12.4.1	Symmetrische und unsymmetrische Drehstromverbraucher in Sternschaltung	246
12.4.2	Symmetrische und unsymmetrische Drehstromverbraucher in Dreieckschaltung	251
12.5	Die Leistung im Drehstromnetz	254
12.5.1	Bestimmung der Drehstromleistung bei symmetrischer Last	254
	■ Sachwortverzeichnis	259
	■ Bildquellenverzeichnis	263

1 ■ Physikalische Größen und deren Einheiten

Wozu benötigt man Größen?

Wenn man Naturerscheinungen erforschen, in Begriffe und Modelle fassen und Theorien darüber aufstellen will, so sind dazu messbare Größen notwendig, mit denen man die gezielt beobachteten Abläufe beschreiben, in Experimenten darstellen und charakterisieren oder in einer Hypothese formulieren kann. Solche Größen nennt man in Technik und Naturwissenschaften „**physikalische Größen**“. Die verschiedenen Größenarten werden mithilfe von (kursiven) Formelzeichen eindeutig gekennzeichnet: die Zeit mit t , die Länge mit l , die Geschwindigkeit mit v , die Masse mit m , die Kraft mit F , die Temperatur mit T etc. Als Formelzeichen werden Groß- und Kleinbuchstaben aus dem lateinischen und dem griechischen Alphabet verwendet, wobei die Formelzeichen für viele physikalische Größen genormt und in der DIN EN 1304 festgelegt sind.

In diesem Buch nutzen wir natürlich ebenfalls physikalische Größen, um die elektrotechnischen Zusammenhänge sowie die technischen Anwendungen elektrischer und magnetischer Phänomene exakt formulieren zu können.

Physikalische Größen

Die Messung einer physikalischen Größe erfordert einen Vergleich mit einem zuvor definierten Einheitswert dieser Größe. Der gemessene Zahlenwert gibt dann an, wie oft die Einheit in der gemessenen Größe enthalten ist. Eine physikalische Größe kann somit durch das Produkt aus Zahlenwert und Einheit dargestellt werden.

Beispiel

Die Längenmessung eines Kabels ergibt 10 Meter. Daraus folgt, dass wir einen Standardmeterstab der Einheit 1 Meter (1 m) 10-mal aneinanderlegen müssten, um die Länge des Kabels auszumessen. In der übersichtlichen Formelschreibweise stellt man das Ergebnis der Messung für die physikalische Größe Länge mit dem Formelzeichen l als Produkt aus Zahlenwert (10) und der Einheit Meter (m) folgendermaßen dar (wobei der Punkt für die Multiplikation von Zahlenwert und Einheit nicht gesetzt wird):

$$\begin{aligned} \text{Physikalische Größe} &= \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit} \\ l &= 10 \text{ m} \end{aligned} \quad (1-1)$$

Will man diesen Zusammenhang allgemein formulieren, so können der Zahlenwert und die Einheit einer beliebigen physikalischen Größe G durch spezielle Klammern dargestellt werden. Das Symbol der Größe in geschweiften Klammern steht für den Zahlenwert; das in eckige Klammern gesetzte Symbol steht für die Einheit.

$$\begin{aligned} \text{Physikalische Größe} &= \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit} \\ G &= \{G\} \cdot [G] \end{aligned} \quad (1-2)$$

Für das Beispiel (1-1) der physikalischen Größe l : $\{l\} = 10$ heißt das: Der Zahlenwert der Länge ist 10; und $[l] = \text{m}$ bedeutet, dass Meter die Einheit der Länge ist.

Weil das gleiche Symbol manchmal sowohl als Formelzeichen wie auch als Einheit auftreten kann, werden alle *Formelzeichen*, die für physikalische Größen stehen, kursiv dargestellt (DIN 1338).

Beispiel

Masse $m = 5 \text{ kg}$, aber Länge $l = 5 \text{ m}$

In den Naturwissenschaften kann man im Prinzip beliebig viele physikalische Größen definieren; viele lassen sich jedoch durch mathematische Verknüpfungen anderer Größen ableiten. So ist beispielsweise die Geschwindigkeit v definiert als Weglänge l (oder Wegstrecke s) dividiert durch die Zeit t ; und die Kraft F ergibt sich aus dem Produkt von Masse m und Beschleunigung a , wobei die Beschleunigung a selbst wieder als Quotient aus Geschwindigkeitsänderung Δv und Zeitdauer t berechnet wird. Führt man diese Überlegung für weitere Größen wie Arbeit W und Leistung P fort, so zeigt sich, dass alle physikalischen Größen aus einer kleinen Zahl von Basisgrößen ableitbar sind. Diese wenigen Basisgrößen sind voneinander unabhängig. Welche Basisgrößen für das Maß-System gewählt werden, zum Beispiel beim SI, ist zwar willkürlich, aber es hat sich bewährt, möglichst alltagsnahe Größen zu verwenden, die anschaulich und gut messbar sind. Mit der Wahl der Basisgrößen sind auch die Basiseinheiten festgelegt.

1.1 ■ Das Internationale Einheitensystem (SI)

Das allgemein übliche Einheitensystem ist das sogenannte **Internationale Einheitensystem**, abgekürzt SI für **Système International d'Unités**. Es benutzt sieben Basisgrößen, die in Tabelle 1-1 samt ihren Formelzeichen sowie den Namen und Einheitensymbolen der entsprechenden Basiseinheiten aufgeführt sind.

Tabelle 1-1: Basisgrößen und Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems

Basisgröße	Formelzeichen	Basiseinheit	Einheitensymbol
Länge (Weg)	l (s)	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	I	Ampere	A
absolute Temperatur	T	Kelvin	K
Lichtstärke	I_v	Candela	cd
Stoffmenge	n	Mol	mol

Da sich die Einheiten aller anderen Größen aus diesen Basisgrößen ableiten lassen, müssen diese international verbindlich und reproduzierbar sein. Im folgenden Abschnitt werden die heute gültigen Definitionen der Basisgrößen (nach **DIN 1301**) kurz vorgestellt; sie haben sich für die meisten Einheiten im Laufe der technischen Entwicklung verändert.

1 Meter ist über die Lichtgeschwindigkeit definiert; es ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum in einem Zeitraum von 1/299 792 458 Sekunden zurücklegt. Von 1889 bis 1960 war das Urmeter in Gebrauch: das Normal eines Metallkörpers von $l = 102$ cm Länge aus einer Legierung aus 90 % Platin und 10 % Iridium, auf dem die Länge von $l = 1$ Meter zwischen Strichgruppen festgelegt war.

1 Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps – und heute die einzige der sieben Basiseinheiten, die nicht durch Naturkonstanten, sondern durch einen Gegenstand, das Urkilogramm, definiert wird. Das ist ein Zylinder aus Platin-Iridium, der in Paris aufbewahrt wird.

1 Sekunde ist das 9 192 163 770-Fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids¹³³ Cs entsprechenden Strahlung. Damit wird also das Vielfache einer Lichtwellenlänge als Ausgangsgröße für die hochgenaue Zeiteinheit verwendet.

1 Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stroms, der – durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von einem Meter voneinander angeordneten Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigem Querschnitt fließend – zwischen diesen Leitern mit

je einem Meter Leiterlänge die Kraft $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.

1 Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunkts des Wassers. Temperaturdifferenzen können auch in Grad Celsius mit der Einheit °C angegeben werden.

1 Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus so vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Kohlenstoffmoleküls ¹²C enthalten sind.

1 Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $f = 540 \cdot 10^{12}$ Hz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt durch Steradian (siehe nächster Absatz) beträgt.

Für die Elektrotechnik sind üblicherweise nur die ersten fünf von Interesse. Zwei ergänzende Einheiten werden allerdings noch eingeführt: die Winkeldarstellung im Bogenmaß mit der Einheit Radiant (Symbol: rad) und der Raumwinkel mit der Einheit Steradian (Symbol: sr).

Da sich die SI-Einheiten aller übrigen für technische Anwendungen benötigten physikalischen Größen aus den sieben Basiseinheiten ableiten lassen, werden diese als **abgeleitete Größen** bezeichnet. Zudem ist das SI ein **kohärentes Einheitensystem**. Das bedeutet, dass die Einheit jeder aus den Basiseinheiten abgeleiteten physikalischen Größe den Zahlenwert 1 hat. Einige der Einheiten tragen die Namen berühmter Wissenschaftler und werden großgeschrieben: Die Einheit der Kraft wird 1 Newton (1 N) genannt, die Einheit der Ladung heißt 1 Coulomb (1 C), die Einheit der Spannung ist 1 Volt (1 V), und die Einheit der Leistung nennt man 1 Watt (1 W). Die beteiligten Basiseinheiten sind dann allerdings nicht mehr zu erkennen (vgl. Formel (1-5), Seite 14).

1.2 ■ Größengleichungen: Rechnen mit Größen

Die meisten physikalischen Größen sind also *nicht* unabhängig voneinander, sondern hängen über Größengleichungen miteinander zusammen. In einer Größengleichung ist ein physikalisches Gesetz durch die entsprechenden physikalischen Größen dargestellt. Setzt man in die Größengleichung jeweils die SI-Basiseinheiten ein, so erhält man die korrespondierende Einheitengleichung. Die Zahlenwerte sind dabei jeweils gleich 1, da die SI-Einheiten kohärent sind.



Beispiel

Wird die Einheit der Kraft F aus der Größengleichung $F = m \cdot a$ abgeleitet, wobei m die Masse ist und a die Beschleunigung, so ergibt sich als Einheitengleichung für die Kraft F :

$$[F] = [m] \cdot [a],$$

$$\text{mit } [m] = 1 \text{ kg und } [a] = \frac{[v]}{[t]} = 1 \text{ m/s}^2$$

Daraus folgt

$$[F] = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ N} \quad (1-3)$$

Die Einheit der Kraft F ist also 1 kg m/s^2 , und dieses Einheitenprodukt hat den Namen 1 Newton.

Für die Geschwindigkeit v eines Körpers gilt die Größengleichung $v = l/t$ oder $v = \Delta l / \Delta t$ mit l als Länge oder Strecke oder zurückgelegter Weg sowie t als die dazu benötigte Zeit. Damit ergibt sich die Einheitengleichung $[v] = [l]/[t]$, sodass mit $[l] = 1 \text{ m}$ und $[t] = 1 \text{ s}$ folgt:

Die Einheit der Geschwindigkeit v ist

$$[v] = 1 \text{ m/s}. \quad (1-4)$$

Üblicherweise verwenden wir bei der Berechnung physikalischer Größen die angegebenen SI-Einheiten. Je nach Anwendungsbereich können die berechneten Ergebnisse in ihren Zahlenwerten jedoch ungünstig ausfallen, also sehr groß oder sehr klein werden. Für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zum Beispiel erhalten wir aus den SI-Einheiten durch Umstellen der Größengleichung $l = v \cdot t$ in $v = l/t$ den sehr großen Zahlenwert

$$v = \frac{1 \text{ m}}{\left(\frac{1}{299\,792\,458}\right) \text{ s}} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$\approx 300\,000\,000 \text{ m/s}.$$

Wir können diesen riesigen Zahlenwert handlicher machen, indem wir die Einheit Meter durch Kilometer oder den Zahlenwert 300 000 000 durch die Schreibweise mit Zehnerpotenzen ersetzen: $300\,000\,000 = 3 \cdot 10^8$

$$\text{Also: } v = \frac{300\,000\,000 \left(\frac{1 \text{ km}}{1000}\right)}{1 \text{ s}} = 300\,000 \text{ km/s}$$

$$\text{oder } v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Die SI-Einheit für Zeit t ist die Sekunde, im Alltag verwenden wir aber auch die Minute (1 min = 60 s) oder die Stunde (1 h = 60 min = 3600 s). Wegen der von 1 abweichenden Zahlenfaktoren sind die

Minute ebenso wie die Stunde jedoch keine SI-Einheiten. Auch die Verwendung von dezimalen Vielfachen oder Teilen wie 10^8 oder 10^{-3} führt dazu, dass keine SI-Einheiten mehr vorliegen!

Beispiel

Die Geschwindigkeit im Auto wird in Kilometer (km) pro Stunde (h) angezeigt. Wie groß ist die Geschwindigkeit in der SI-Einheit m/s, wenn die angezeigte Geschwindigkeit 120 km/h beträgt?

$$1 \text{ km} = 1000 \text{ m und } 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$\text{Also gilt: } 120 \text{ km/h} = 120 \cdot \left(\frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}\right)$$

$$= 33,33 \text{ m/s}$$

Wir sehen an dem Beispiel, dass das Ergebnis für die Geschwindigkeit v sowohl mit 120 km/h als auch mit 33,33 m/s korrekt angegeben werden kann, da man beide Einheiten ineinander umrechnen kann.

Merke

Eine Größengleichung gilt unabhängig von der Wahl der Einheiten

Beispiel

Den Weltrekord im 100-Meter-Lauf hält derzeit Usain Bolt aus Jamaika. Er lief die Strecke am 16. August 2009 in 9,58 Sekunden. Berechnen Sie, wie groß seine Durchschnittsgeschwindigkeit v in km/h war.

Aus den Daten berechnet sich die Durchschnittsgeschwindigkeit

$$v = \frac{100 \text{ m}}{9,58 \text{ s}} = 10,438 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Daraus erhalten wir mit

$$\frac{1 \text{ m}}{1 \text{ s}} = \frac{\frac{1000}{3600} \text{ km}}{1 \text{ h}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} :$$

$$v = 10,438 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s/h}}{1000 \text{ m/km}} = 37,576 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

1.3 Dimensionen physikalischer Größen

Um aus den sieben Basiseinheiten abgeleitete Einheiten darzustellen, verwendet man physikalische Gesetze, die diese mit den Basiseinheiten verknüpfen. Die Verknüpfung der Basiseinheiten erfolgt durch Produkt- oder Quotientenbildung,

wodurch die Basiseinheiten in den abgeleiteten Einheiten sowohl mit dem Exponenten „1“ als auch mit ganzzahligen Exponenten größer als 1 (mit positivem oder negativem Vorzeichen) auftreten können. Die Darstellung einer physikalischen Größe durch die Basisgrößen des SI bezeichnet man als **Dimension** der physikalischen Größe. Für die Einheit der Kraft F ergab sich aus dem physikalischen Gesetz $F = m \cdot a$:

$$[F] = N = \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

sodass wir für die Dimension der Kraft folgenden Ausdruck finden:

$$\text{Dim } [F] = ([\text{Masse}] \cdot [\text{Länge}]) / ([\text{Zeit}])^2$$

Ebenso erhalten wir für die Dimension der Geschwindigkeit v aus dem Gesetz $v = l/t$ die Dimension der Geschwindigkeit: $\text{Dim } [v] = [\text{Länge}] / [\text{Zeit}]$.

Merke

Die beiden Seiten einer physikalischen Gleichung müssen nicht nur in den Zahlenwerten, sondern auch in den Dimensionen übereinstimmen! Und natürlich können nur physikalische Größen gleicher Dimension addiert oder miteinander verglichen werden.

Die Dimension einer physikalischen Größe darf nicht mit der Einheit dieser Größe verwechselt werden. So haben zum Beispiel die Größen Länge, Breite, Höhe und Durchmesser eines Gegenstands alle die Dimension „Länge“ und die SI-Einheit Meter. Und für die Größe „Fläche“ berechnet man als Dimension „Länge mal Länge“, also $(\text{Länge})^2$, doch die Einheit der Fläche ist Quadratmeter.

1.4 ■ Einstieg in den Feldbegriff – Gravitation: Das Schwerfeld der Erde

Infolge seiner Masse erzeugt jeder Körper ein Gravitations- oder Schwerfeld in seiner Umgebung. Mit dem Begriff **Gravitationsfeld** drückt man in der Physik aus, dass der Raum um einen Körper aufgrund seiner Masse verändert ist. Diese Veränderung des Raumes ist aber für die menschlichen Sinne nicht wahrnehmbar, sondern nur durch die Anziehungskraft zwischen Massen erkennbar. Diese Anziehungskraft wiederum ist nicht abschirmbar, ist also auch im Vakuum vorhanden. Bringt man nun einen massebehafteten Körper in diesen Raum, so wird auf ihn durch das Gravitationsfeld eine Anziehungskraft ausgeübt. Die Kraftwirkung erfolgt ohne Berührung der Körper; und die Richtung der Anziehungskraft entspricht der Verbindungslinie

der Massenmittelpunkte. Für zwei punktförmige Massen m_1 und m_2 , deren Massenmittelpunkte den Abstand r haben, berechnet sich der Betrag der Anziehungskraft nach dem newtonschen Gravitationsgesetz, wobei $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$ die für alle Stoffarten geltende Gravitationskonstante darstellt.

$$F_G = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad [F_G] = \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg}^2}{\text{m}^2} = \text{N} \quad (1-5)$$

Man erkennt aus dem Gesetz, dass die Gravitationskraft eine ortsabhängige Kraft ist, die proportional zum Produkt der beiden Massen und umgekehrt proportional zum Abstandsquadrat der Massen ist. Dabei macht der sehr kleine Wert der Gravitationskonstanten deutlich, dass eine der beiden Massen schon astronomische Ausmaße haben müsste, damit die Gravitationskraft spürbar wird. Doch genau diese Konstellation ist auf der Erde gegeben: Beim Umgang mit den Gegenständen des täglichen Lebens ist zwischen diesen oder zwischen diesen und uns keine Anziehungskraft zu spüren. Stellen wir uns aber auf eine Waage, können wir dort die Wirkung der Gravitation der Erde mit ihrer riesigen Masse M_E auf unseren Körper ablesen: als Gewichtskraft oder umgangssprachlich als unser Gewicht. Ebenso eine Wirkung der Erdanziehung ist die Tatsache, dass Gegenstände, die uns aus der Hand oder vom Tisch fallen, immer auf dem Erdboden oder Teppich landen. Das heißt: Das Gravitationsfeld der Erde bewirkt, dass auf jeden „Probekörper“ der Masse m eine Kraft F_G in Richtung zum Erdmittelpunkt wirkt. Wir können diese Kraft entweder aus dem Gravitationsgesetz oder dem allgemeinen Kraftgesetz $F_G = m \cdot g$ berechnen (statt a setzen wir hier also g für die Erdbeschleunigung) und beide Ausdrücke gleichsetzen:

$$F_G = \gamma \cdot m \cdot M_E \cdot \frac{1}{r^2} = m \cdot g \quad (1-6)$$

Dabei gilt: γ = Gravitationskonstante, m = Masse des Probekörpers, M_E = Masse der Erde, g = Beschleunigung durch die Gravitationskraft, r = Abstand der Massenmittelpunkte.

Dividieren wir in dieser Gleichung die Gravitationskraft F_G durch die Masse des Probekörpers m , der sich auf der Erdoberfläche befinden möge ($r_E = 6370 \text{ km}$), so folgt für die Gravitationsfeldstärke g , die vereinfachend meist Gravitations- oder Erdbeschleunigung genannt wird:

$$\frac{F_G}{m} = \gamma \cdot M_E \cdot \frac{1}{r_E^2} = g \quad (1-7)$$

Setzen wir $M_E = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ als Erdmasse, $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$ und für den Erdradius $r_E = 6370 \text{ km}$ ein, so folgt: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ als Erdbeschleunigung.

nigung an der Erdoberfläche. Der Wert der Erdbeschleunigung g nimmt allerdings ab, je weiter die Probemasse sich vom Erdmittelpunkt entfernt.

Um uns ein Bild von der Struktur dieses Gravitationsfeldes zu machen, können wir die Erde als annähernd kugelförmig ansehen. Da die Gravitationskraft F_G der Erde auf eine „Probemasse“ m , die man aus einer Höhe h fallen lässt, stets zum Erdmittelpunkt gerichtet ist, ergibt sich als Feldstruktur näherungsweise ein Radialfeld. Um die Kraftwirkung der felderzeugenden Masse zu veranschaulichen, zeichnet man sogenannte **Feldlinien**, deren Verlauf der Kraftwirkung auf die Probemasse entspricht. Will man ein starkes Feld darstellen, so zeichnet man viele Feldlinien pro Flächeneinheit, bei einem schwachen Feld entsprechend wenige. Aus großer Entfernung vom Erdmittelpunkt betrachtet, ergibt sich damit für das Gravitationsfeld der Erde ein symmetrisches Feldlinienbild, wie es in Bild 1-1 (ebener Schnitt) dargestellt ist.

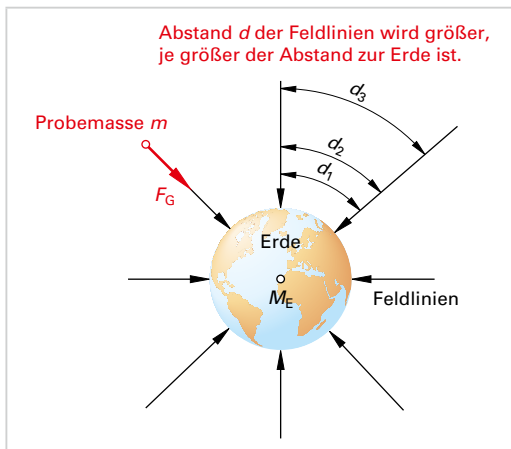


Bild 1-1: Struktur des Gravitationsfeldes der Erde (ebener Schnitt), Radialfeld

Es ist zu erkennen, dass die Abstände zwischen den Feldlinien bei dieser Radialstruktur immer größer werden, je weiter man sich von der felderzeugenden Erdmasse entfernt. Das bedeutet wiederum, dass die Kraftwirkung mit größerer Entfernung r vom Erdmittelpunkt nachlässt. Das Radialfeld ist demnach inhomogen. Und die Feldlinien treffen stets senkrecht auf die Erdoberfläche auf.

Da wir auf der Erdoberfläche leben und uns normalerweise nur im Flugzeug in größeren Abständen von der Erde bewegen, ist vor allem die Struktur des Gravitationsfeldes in der Umgebung der Erdoberfläche von Interesse. Unseren Arbeitsbereich können wir im Vergleich zur Erdoberfläche als Ebene betrachten, in der sich das Gravitations-

feld als homogenes Feld mit senkrecht auftretenden Feldlinien darstellen lässt.

Merke

In einem homogenen Feld ist die Feldstärke nach Betrag und Richtung überall gleich.

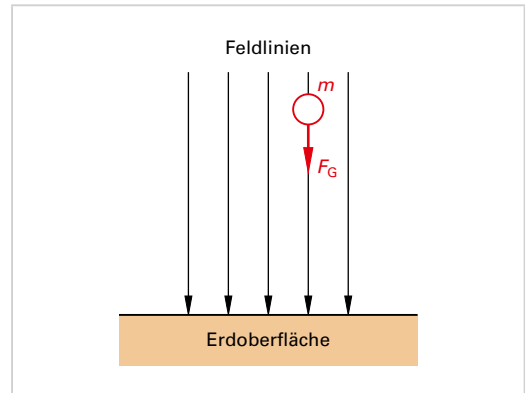


Bild 1-2: Gravitationsfeld in Erdnähe als annähernd homogenes Feld

1.5 Arbeit und potenzielle Energie im Gravitationsfeld

Infolge der Erdanziehung (Gravitation) wirkt auf jede Masse auf der Erde die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ in Richtung Erdmittelpunkt, wobei $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ die Erdbeschleunigung ist. Ein Körper der Masse m , der am Boden liegt, wird also mit dieser Gewichtskraft F_G auf den Erdboden gepresst. Da aber der Erdboden durch seine stabile Beschaffenheit (nach dem Prinzip *actio = reactio*) eine zu F_G gleich große, aber entgegengesetzte Kraft F_R auf den Körper ausübt, bleibt dieser an seinem Platz. Diese Lage am Erdboden nennen wir die Ruhelage des Körpers. Um den Körper aus dieser Ruhelage gegen die Gravitationskraft anzuheben und eine bestimmte Wegstrecke s nach oben zu transportieren, muss „Arbeit“ verrichtet werden. Was bedeutet das genau?

Die physikalische Definition der Arbeit im Bereich der Mechanik lautet: Wird ein beweglicher Körper mit der Masse m durch die Einwirkung einer konstanten Kraft F entlang des Weges s verschoben oder um eine Strecke $s = h$ senkrecht angehoben, so wird dabei die Arbeit W (work) verrichtet. Die Größe, also der Zahlenwert der Arbeit ist gleich dem Produkt aus Kraft F und Weg s : $W = F \cdot s$. Daher wird die Einheit der Kraft, nach Formel (1-5) $[F] = 1 \text{ N}$, mit der Einheit der Länge $[l] = 1 \text{ m}$ multipliziert, sodass die Einheit der Arbeit $[W] = \text{N} \cdot \text{m}$ wird.

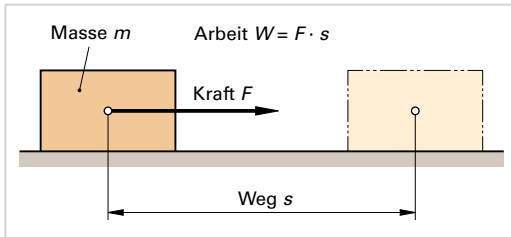


Bild 1-3: Verschiebung einer Masse m durch die Kraft F

Die Kraft F muss dabei in Wegrichtung s wirken! Haben Weg und Kraft verschiedene Richtungen, so ist nur die Kraftkomponente F_s in Wegrichtung wirksam, und die Formel für die Arbeit wird zu

$$W = F_s \cdot s = F \cdot \cos \alpha \cdot s \quad (1-8)$$

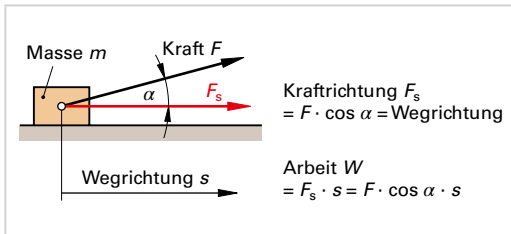


Bild 1-4: Wirksamer Anteil F_s in Wegrichtung bei gegebener Kraft F

Beispiel

Stellen wir uns den Körper als eine Palette mit 25 gefüllten Zementsäcken vor, deren Gesamtmasse (25 Säcke zu je 25 kg und die Palette mit 30 kg) 655 kg beträgt. Diese Palette soll von einem Gabelstapler vom Erdboden auf die Ladefläche eines Lkw mit der Höhe $h = 1,4$ m gehoben werden. Wie groß ist die Arbeit, die zum Anheben der Palette nötig ist?

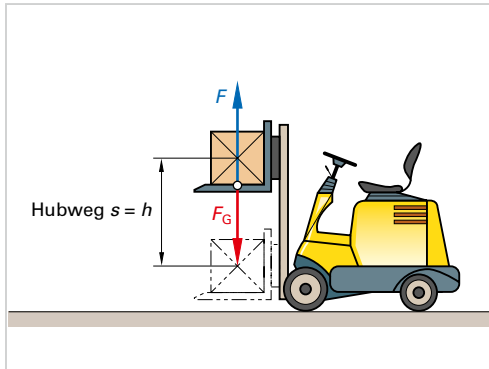


Bild 1-5: Darstellung der Hubarbeit $W = m \cdot g \cdot h$



Bild 1-6: Abrissbirne im Einsatz

Will man den Körper der Masse m vom Erdboden (Definition als Bezugshöhe = 0) auf eine bestimmte Höhe h heben, so muss die Erdanziehungskraft F_G durch eine betragsgleiche, senkrecht nach oben wirkende Kraft F kompensiert werden, die an diesem Körper eine Hubarbeit $W = F \cdot s$ verrichtet. Mit den Werten des Beispiels folgt daraus jeweils für die Beträge $F_G = m \cdot g = F = 655 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 6425,55 \text{ N}$ und $W = F \cdot s = m \cdot g \cdot h = 6425,55 \text{ N} \cdot 1,4 \text{ m}$. Damit wird die Arbeit $W = 8995,77 \text{ Nm}$. Der Gabelstapler muss diese Hubarbeit W an der Palette gegen die Erdanziehung verrichten, um sie in die geforderte Höhe von $h = 1,4$ m über der Ruhelage (dem Erdboden) zu bringen.

Da die Palette nur im angehobenen Zustand verbleibt, wenn der Gabelstapler sie festhält, können wir sagen, die verrichtete Hubarbeit W ist jetzt als Energie der Lage oder als potenzielle Energie in dem System „Schwerefeld der Erde-Palette“ gespeichert. Da die Palette in ihrer Ruhelage keine potenzielle Energie hatte, hat also die der Palette zugeführte Arbeit zur Erhöhung ihrer potenziellen Energie und damit zu Arbeitsvermögen geführt. Diese potenzielle Energie kann also auch für eine andere Arbeit eingesetzt werden. Würde die Palette nun, zum Beispiel durch eine Unachtsamkeit beim Verladen auf den Lkw, aus der Höhe von 1,4 m wieder herunterfallen, so würde nach dem Energieerhaltungssatz ihre potenzielle Energie beim Beschleunigen der Masse durch die Erdbeschleunigung in Bewegungsenergie (kinetische Energie) umgewandelt. Beim Aufprall auf den Erdboden würde die Masse allerdings eine zerstörende Wirkung entfalten, wobei die kinetische Energie schließlich in Wärmeenergie umgewandelt wird, die sich ungenutzt im Boden verteilt. Diese zerstörende Energie kommt beispielsweise

beim Abriss von Gebäuden mit der Abrissbirne zum Einsatz oder in Pumpspeicherkraftwerken, die einen hoch gelegenen Stausee (Bergsee) als Energiespeicher nutzen, aus dem durch steil abfallende Rohrleitungen bei Bedarf Wasser ins Tal fließen kann. Das herabfließende Wasser wird durch die Gewichtskraft F_G stark beschleunigt und trifft im Tal mit hoher Geschwindigkeit auf eine Turbine mit elektrischem Generator. Somit wandelt sich die ursprüngliche potenzielle Energie des Wassers $W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ aus dem Stausee in der Höhe h beim Herabfließen ins Tal mit der Geschwindigkeit v durch die Rohrleitungen in kinetische Energie $W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$ um. Diese wird dann im

Generator in elektrische Energie $W_{\text{el}} = U \cdot I \cdot t$ umgesetzt und in das Netz eingespeist. Das Wasser hat seine Energie nach dem Durchlaufen dieser Baugruppen abgegeben und fließt nun wiederum in einen Speichersee (Talsee). In Zeiten, in denen keine elektrische Energie benötigt wird, wird Wasser aus dem Talsee über Rohrleitungen mit einer elektrisch angetriebenen Pumpe nach oben in den Bergsee gepumpt. Die dazu notwendige elektrische Energie wird dem Netz entnommen. Das heißt, elektrische Energie wird via Elektromotor und Pumpe letztlich wieder in potenzielle Energie des Wassers im Bergsee umgewandelt, die wiederum bei Bedarf Arbeit verrichten kann.

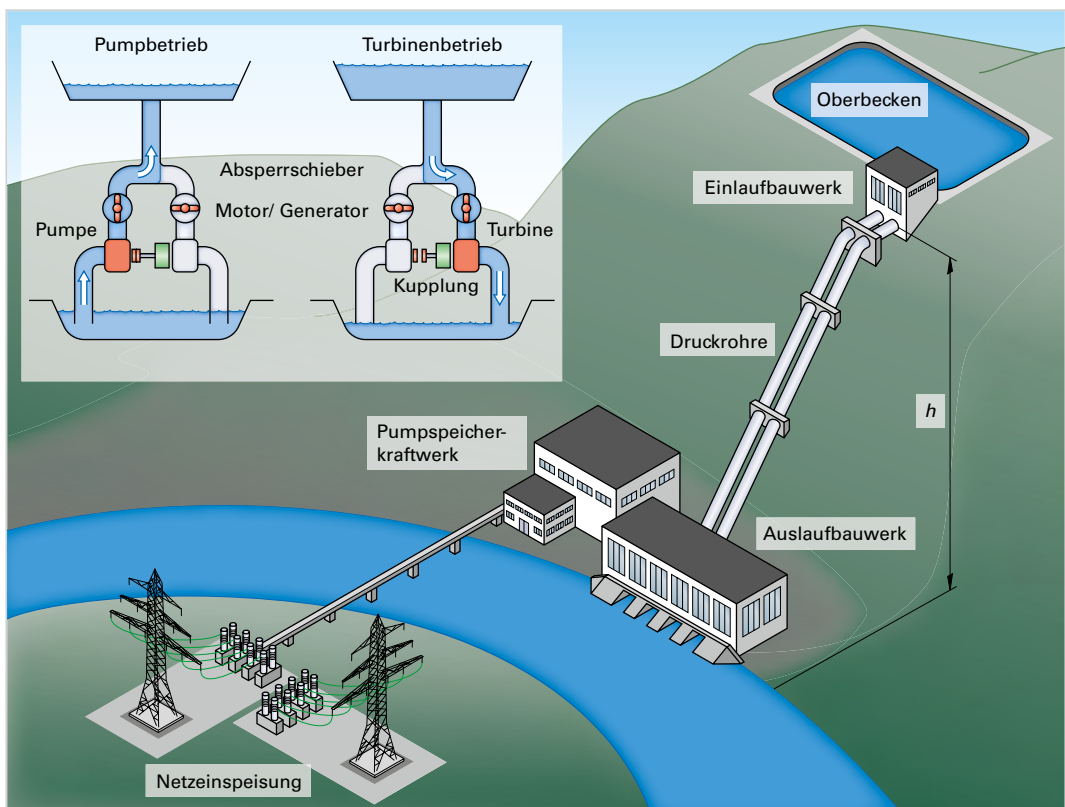


Bild 1-7: Prinzip des Pumpspeicherkraftwerks

Merke

- Verrichtet man an einem Körper mechanische Arbeit durch eine Kraft, so führt das zu einer Erhöhung der Energie des Körpers. Energie ist gespeicherte Arbeit oder Arbeitsvermögen. Die Energie kann dabei als potenzielle Energie, als kinetische Energie oder als Wärmeenergie auftreten.
- Energie kann nicht erzeugt werden. Sie lässt sich nur durch geeignete physikalische oder chemische Prozesse aus einer gegebenen Energieform gewinnen, die in eine für die Anwendung geeignetere Energieform umgewandelt wird. Das ist eine Form des Energieerhaltungssatzes.

AUFGABEN

1. Das Gravitationsgesetz lautet $F_G = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$. Bestimmen Sie die Einheit der Gravitationskonstanten γ .
2. Wie groß muss die Geschwindigkeit v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ sein, wenn man einen Körper auf dem Erdboden (Höhe $h = 0 \text{ m}$) horizontal abschießen will, um ihn in eine erdnahe Umlaufbahn zu bringen? Hinweis: Im Schwerfeld der Erde überlagern sich die horizontale Geschwindigkeit der abgeschossenen Masse und die vertikale Geschwindigkeit des von der Erde angezogenen Körpers. Die Erdbeschleunigung soll als konstant mit $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ angenommen werden.
3. Warum erreicht die punktförmige Masse eines Fadenpendels nach dem Loslassen aus der Ausgangshöhe h_0 nach einer Pendelschwingung im Idealfall ohne Reibungs- und Luftwiderstandsverluste wieder die Höhe h_0 ? Nach welcher Zeit (in $\frac{t}{T}$, mit T = Schwingungsdauer) hat die Masse die höchste Geschwindigkeit? Begründen Sie Ihre Antwort?

MEMORY

- Eine physikalische Größe wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit angegeben. Die Maßeinheiten aller physikalischen Größen lassen sich anhand von sieben Basisgrößen darstellen.
- Das Internationale Einheitensystem (SI) benutzt diese sieben Basisgrößen:

Größe	Länge l	Zeit t	Masse m	Temperatur T	Strom I	Stoffmenge	Lichtstärke I_v
Einheit	Meter m	Sekunde s	Kilogramm kg	Kelvin K	Ampere A	Mol mol	Candela cd

- Größengleichungen drücken ein physikalisches Gesetz durch die entsprechenden physikalischen Größen aus. Durch Einsetzen der jeweiligen SI-Basiseinheiten erhält man die zugehörigen Einheitsgleichungen.

Beispiel:

Kraft = Masse $\cdot$ Beschleunigung: $F = m \cdot a$

Einsetzen der Basiseinheiten liefert: $[F] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N (Newton)}$

- Definition der Arbeit: Wird ein beweglicher Körper mit der Masse m durch die Einwirkung einer konstanten Kraft F entlang des Weges s verschoben oder um eine Strecke $s = h$ senkrecht angehoben, so wird dabei die Arbeit $W = F \cdot s$ oder $W = m \cdot g \cdot h$ verrichtet. Für die Einheit der Arbeit gilt in beiden Fällen: $[W] = 1 \text{ Nm}$.
- Für die Einheit der Arbeit oder der Energie $[W]$ lässt sich durch die Größengleichungen für die Spannung U und den Strom I ableiten: Spannung $U = \text{Arbeit/Ladung} = W/Q$ und für den Strom $I = \frac{Q}{t}$. Daraus folgt: $U \cdot I \cdot t = \frac{W}{Q} \cdot \frac{Q}{t} \cdot t$ bzw. für die Einheiten: $[U] \cdot [I] \cdot [t] = \frac{\text{Nm}}{\text{As}} \cdot \frac{\text{As}}{\text{s}} \cdot \text{s} = \text{Nm}$. Weil aber auch gilt $[U] \cdot [I] \cdot [t] = V \cdot A \cdot s = W \cdot s$ ergibt sich: $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$. Dafür schreibt man auch: $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ J}$.
- Ursache für das Schwerfeld oder Gravitationsfeld ist die Masse von Körpern. Im Gravitationsfeld gibt es nur die Anziehung von massebehafteten Körpern. Die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern lässt sich nach dem newtonschen Gravitationsgesetz berechnen: $F_G = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
- Ein Feld ist ein Raum, in dem Energie gespeichert ist.
- Leistet die Gravitationskraft der Erde Arbeit an einem Körper (Anziehung des Körpers), so nimmt dessen potenzielle Energie $W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ ab. Wird dagegen ein Körper von der Erde entfernt, so muss Arbeit gegen die Gravitationskraft verrichtet werden; und die potenzielle Energie W_{pot} des Körpers nimmt zu.

2 ■ Elektrische Grundgrößen

2.1 ■ Reibungselektrizität und elektrische Ladung: die Anfänge der Elektrotechnik

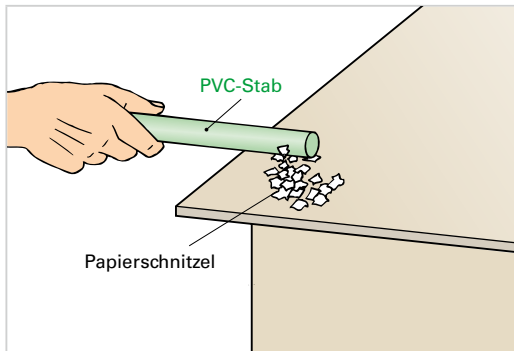


Bild 2-1: Anziehung von Papierstreifen durch einen geriebenen PVC-Stab

Um 550 v. Chr. beschrieb Thales von Milet im antiken Griechenland die Entdeckung, Bernstein (ein fossiles Harz) ziehe nach dem Reiben mit einem Wolltuch leichte Teilchen wie Papierschnitzel, Federn oder Haare schon aus einiger Entfernung und ohne vorherige Berührung an. Von dem geriebenen Bernstein ging also eine Kraftwirkung aus. Die Griechen konnten die Erscheinung dieser Kraftwirkung noch nicht erklären, gaben ihr aber einen Namen, den wir bis heute verwenden: Elektrizität. Bernstein heißt nämlich auf Griechisch „elektron“ und das Wort „Elektrizität“ wörtlich übersetzt „Bernsteinkraft besitzend“. Da diese „Elektrizität“ nur beobachtet werden konnte, wenn der Bernstein vorher gerieben worden war, sprach man von Reibungselektrizität oder davon, dass der Bernstein durch das Reiben mit dem Wolltuch „elektrisch geladen“ wurde. Was an dem Bernstein durch das Reiben mit dem Wolltuch unsichtbar verändert worden war, wieso sich dadurch eine elektrische Ladung gebildet hatte, die dann eine gewisse Zeit auf dem Bernstein „sitzen blieb“ und was genau dieses „elektrisch geladen“ war, konnte man allerdings nicht sagen. Man konnte nur die beobachtbare Wirkung der Elektrizität beschreiben: Zwischen geladenen Körpern entsteht immer eine Kraftwirkung, ohne dass diese sich berühren! Die beobachtbare Kraftwirkung war also der Hinweis auf eine unsichtbare Ladung.

Es sollten noch viele Jahrhunderte vergehen, bevor entscheidende Erkenntnisse zur Elektrizität hinzukamen. Erst die Experimente etlicher Forscher im 17. und 18. Jahrhundert zur „Natur der elektrischen Ladung“ oder zur Elektrostatik, wie man das Forschungsgebiet nannte, ergaben,

dass auch andere Materialkombinationen, zum Beispiel ein mit einem Seidentuch geriebener Glasstab oder ein mit einem Katzenfell geriebener Siegellack-Stab, der aus einem ausgehärteten Harz bestand, elektrisch geladen werden konnten. Dabei stellte sich heraus, dass ein mit dem Katzenfell geriebener Siegellack-Stab Gegenstände anzog, die von einem geriebenen Glasstab abgestoßen wurden und umgekehrt. Es musste also zwei Arten von Elektrizität geben, denn die Ladungen hatten ja entgegengesetzte Wirkungen. Jene Ladungsart, die sich auf einem Glasstab gebildet hatte, bezeichnete man willkürlich als „positiv“, die andere als „negativ“. Charakteristisch war, dass sich zwei geriebene Glasstäbe oder zwei geriebene Hartgummistäbe abstießen, dass sich aber ein geriebener Glasstab und ein geriebener Hartgummistab anzogen!

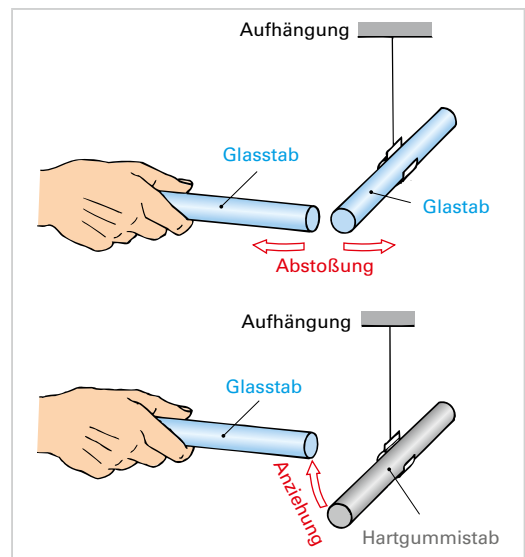


Bild 2-2: Abstoßung gleichnamig geladener bzw. Anziehung ungleichnamig geladener Körper

Der Effekt der Abstoßung gleichnamig geladener bzw. der Anziehung ungleichnamig geladener Körper ermöglichte die Konstruktion eines Messgeräts zum Nachweis einer Ladung und zur Bestimmung ihrer Polarität: das **Elektroskop**. Sein Funktionsprinzip ist sehr einfach: Das Elektroskop besteht beispielsweise aus einem isoliert befestigten geschlitzten Metallstab, in dem ein zweiter leichter Metallstab drehbar angebracht ist. Am oberen Ende des fixierten Metallstabs ist eine metallische Kontaktplatte befestigt, auf der die zu messende Ladung durch Berühren übertragen wird.

Der geschlitzte Metallstab und der Zeiger werden durch das Berühren mit einem geladenen Körper gleichnamig geladen, stoßen sich also ab – und der drehbare Zeiger schlägt aus (dargestellt in Bild 2-3b für einen negativ geladenen Hartgummistab).

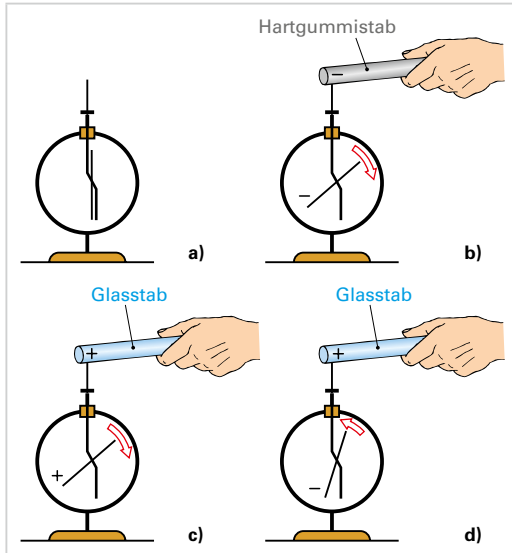


Bild 2-3: Nachweis von Ladungen mit dem Elektroskop

Aber auch wenn wir die Kontaktplatte des Elektroskops mit einem positiv geladenen Glasstab berühren, ergibt sich ein Zeigerausschlag aufgrund der Abstoßung (siehe Bild 2-3c). Insofern ist eine Bestimmung der Polarität der Ladung auf diese Art nicht möglich. Halten wir jedoch den positiv geladenen Glasstab an die Kontaktplatte des zuvor mit dem negativen Hartgummistab berührten Elektroskops, ist der Ausschlag des Zeigers deutlich kleiner oder verschwindet vollständig, wenn die negative und die positive Ladung gleich groß sind (siehe Bild 2-3d).

Was elektrische Ladung ist, können wir allerdings – selbst mehr als zweieinhalb Jahrtausende nach Thales von Milet – nicht sagen! Erscheinungen oder Auswirkungen der Elektrostatik (bei geeigneten Materialien) können wir allerdings fast täglich an uns selbst oder in der Umwelt beobachten. Hier einige Beispiele: Beim Kämmen mit einem Plastikamm stehen uns manchmal die Haare zu Berge, beim Ausziehen eines Synthetik-Pullovers knistert es heftig, und wenn man einen aufgeblasenen Luftballon an einem Wollpullover reibt, bleibt der Ballon danach am Pullover „kleben“. Ganz besonders spektakulär und gefährlich sind Blitzentladungen zwischen Wolken und Erde, die ebenfalls durch Reibungselektrizität hervorgerufen werden.



Bild 2-4: Blitzentladung bei einem Gewitter als Folge der Reibungselektrizität

Woran liegt es eigentlich, dass man nicht beantworten kann, was elektrische Ladung ist? Vor allem daran, dass Menschen kein Sinnesorgan besitzen, mit dem sie elektrische Vorgänge unmittelbar wahrnehmen können. Um elektrische Erscheinungen erkennen und ihre Gesetzmäßigkeiten untersuchen zu können, müssen die Wissenschaftler Rückschlüsse aus den *erkennbaren* Veränderungen der beteiligten materiellen Körper ziehen. Dazu formulieren sie Theorien und konstruieren Modelle, mit deren Hilfe sie dann den Zusammenhang zwischen experimentellen Ergebnissen und vermuteten Ursachen beschreiben. Wichtig: Selbst wenn ein Modell ein Experiment noch so anschaulich erklären kann, darf man es niemals als letzte Wahrheit nehmen! Es kann durchaus sein, dass weitergehende Untersuchungen neue Ergebnisse bringen, die mit dem bisherigen Modell *nicht* erklärt werden können.

Natürlich haben Wissenschaftler auch bei der Suche nach einer plausiblen Antwort auf die Fragen, warum materielle Körper durch Reibung elektrisch geladen werden und warum es nur zwei Arten von elektrischen Ladungen gibt, mehrfach neue Theorien aufgestellt, die sich dann mit dem Auftauchen neuer Erkenntnisse als falsch erwiesen. So setzte sich in der Chemie die Vorstellung, dass Atome als Bausteine der Materie fungieren, erst Anfang des 19. Jahrhunderts durch; die Physiker kämpften sogar bis in das 20. Jahrhundert darum. Dann aber sprachen immer mehr experimentelle Argumente für diese Vorstellung. 1897 entdeckte Thomson das Elektron als Elementarteilchen, dessen Ladung Millikan 1909 experimentell bestimmen konnte. 1913 stellte der dänische Physiker Nils Bohr sein Atommodell zum Aufbau der Materie vor. Er verband dazu Vorstellungen der klassischen Physik mit denen der Quantenphysik und konnte damit nicht nur die Eigenschaften ver-