

Zum Buch:  
das Abiturlpaket bei  
[www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de)  
**FÜR  
NUR 1,-EURO**

- Originalprüfungen
- Lernkartensets
- Schülerlexikon

# DUDEN

BASISWISSEN  
SCHULE

## ABITUR

# Physik



BUCH

WEB

APP

Das Standardwerk für Abiturienten

# Duden

**BASISWISSEN SCHULE**

# Physik

ABITUR

4., aktualisierte Auflage

Dudenverlag  
Berlin

**Herausgeber**

Prof. Dr. habil. Lothar Meyer, Dr. Gerd-Dietrich Schmidt

**Autoren**

Prof. Detlef Hoche, Dr. Josef Küblbeck, Prof. Dr. habil. Lothar Meyer,  
Dr. Rainer Reichwald, Dr. Gerd-Dietrich Schmidt, Prof. Dr. habil. Oliver Schwarz,  
Dr. Christian Spitz

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbiografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Wort **Duden** und der Reihentitel **Basiswissen Schule** sind für den Verlag Bibliographisches Institut GmbH als Marke geschützt.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Für die Inhalte der im Buch genannten Internetlinks, deren Verknüpfungen zu anderen Internetangeboten und Änderungen der Internetadresse übernimmt der Verlag keine Verantwortung und macht sich diese Inhalte nicht zu eigen.

Ein Anspruch auf Nennung besteht nicht.

Für die Nutzung des Internetportals [www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de) gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) des Internetportals, die jederzeit unter dem entsprechenden Eintrag abgerufen werden können.

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

© Duden 2015

D C B A

Bibliographisches Institut GmbH, Mecklenburgische Straße 53, 14197 Berlin

<b>Redaktionelle Leitung</b>	David Harvie
<b>Redaktion</b>	Prof. Dr. Lothar Meyer, Loop Redaktionsgruppe
<b>Illustrationen</b>	Christine Gebreyes, Jens Prockat
<b>Herstellung</b>	Ursula Fürst
<b>Layout</b>	Britta Scharffenberg
<b>Umschlaggestaltung</b>	Büroeco, Augsburg
<b>Satz</b>	DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg
<b>Grafiken</b>	Simone Felgentreu, Nina Geist, Claudia Kilian, Dieter Ruhmke, Walther-Maria Scheid, Sybille Storch
<b>Druck und Bindung</b>	Těšinská tiskárna, Český Těšín
Printed in Czech Republic	

ISBN 978-3-411-71754-5

[www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Physik – eine Naturwissenschaft</b>	<b>7</b>	
1.1	Die Entwicklung der Physik als Wissenschaft	8	
1.2	Denk- und Arbeitsweisen in der Physik	15	
1.2.1	Begriffe und Größen in der Physik	15	
1.2.2	Gesetze, Modelle und Theorien in der Physik	19	
1.2.3	Das Erkennen physikalischer Gesetze	23	
1.2.4	Experimente in der Physik	28	
1.2.5	Tätigkeiten in der Physik	32	
1.2.6	Lösen physikalisch-mathematischer Aufgaben	39	
1.2.7	Fehler bei physikalischen Messungen	44	
<b>2</b>	<b>Mechanik</b>	<b>49</b>	
2.1	Eigenschaften von Körpern und Stoffen	50	
2.1.1	Volumen, Masse und Dichte	50	
2.1.2	Teilchenanzahl, Stoffmenge und Aufbau der Stoffe	51	■ Überblick 56
2.2	Kinematik	57	
2.2.1	Beschreibung von Bewegungen	57	
2.2.2	Gleichförmige geradlinige Bewegungen	62	
2.2.3	Gleichförmige Kreisbewegungen	63	
2.2.4	Gleichmäßig beschleunigte geradlinige Bewegungen	65	
2.2.5	Der freie Fall	67	
2.2.6	Überlagerung von Bewegungen	68	■ Überblick 72
2.3	Dynamik	73	
2.3.1	Kräfte und ihre Wirkungen	73	
2.3.2	Die newtonschen Gesetze	78	
2.3.3	Arten von Kräften	82	■ Überblick 86
2.4	Energie, mechanische Arbeit und Leistung	87	
2.4.1	Energie und Energieerhaltung	87	
2.4.2	Die mechanische Arbeit	91	
2.4.3	Die mechanische Leistung	94	
2.4.4	Der Wirkungsgrad	95	■ Überblick 96
2.5	Mechanik starrer Körper	97	
2.5.1	Statik starrer Körper	97	
2.5.2	Kinematik rotierender starrer Körper	99	
2.5.3	Dynamik rotierender starrer Körper	102	■ Überblick 106
2.6	Impuls und Drehimpuls von Körpern	107	
2.6.1	Kraftstoß, Impuls und Impulserhaltungssatz	107	
2.6.2	Unelastische und elastische Stöße	114	
2.6.3	Der Drehimpuls und seine Erhaltung	118	■ Überblick 120
2.7	Gravitation	121	
2.7.1	Das Gravitationsgesetz	121	
2.7.2	Gravitationsfelder	125	■ Überblick 132
2.8	Mechanische Schwingungen und Wellen	133	
2.8.1	Entstehung und Beschreibung mechanischer Schwingungen	133	
2.8.2	Überlagerung von Schwingungen	142	
2.8.3	Entstehung und Beschreibung mechanischer Wellen	143	
2.8.4	Ausbreitung und Eigenschaften mechanischer Wellen	147	
2.8.5	Akustik	152	
2.8.6	Chaotische Vorgänge	154	■ Überblick 158

	<b>3</b>	<b>Thermodynamik</b>	<b>159</b>
	<b>3.1</b>	<b>Betrachtungsweisen und Modelle in der Thermodynamik</b>	<b>160</b>
	3.1.1	Die phänomenologische Betrachtungsweise	160
	3.1.2	Die kinetisch-statistische Betrachtungsweise	161
	<b>3.2</b>	<b>Thermisches Verhalten von Körpern und Stoffen</b>	<b>163</b>
	3.2.1	Temperatur, innere Energie und Wärme	163
	3.2.2	Wärmeübertragung	166
	3.2.3	Volumen- und Längenänderung von Körpern	170
	3.2.4	Aggregatzustände und ihre Änderungen	172
	3.2.5	Die Gasgesetze	175
	<b>3.3</b>	<b>Kinetische Theorie der Wärme</b>	<b>180</b>
	3.3.1	Der atomare Aufbau der Stoffe	180
	3.3.2	Kinetische Gastheorie	183
	<b>3.4</b>	<b>Hauptsätze der Thermodynamik</b>	<b>193</b>
	3.4.1	Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	193
	3.4.2	Kreisprozesse	204
	3.4.3	Der 2. und 3. Hauptsatz der Thermodynamik	211
	<b>3.5</b>	<b>Temperaturstrahlung und Strahlungsgesetze</b>	<b>218</b>
	<b>4</b>	<b>Elektrizitätslehre und Magnetismus</b>	<b>223</b>
	<b>4.1</b>	<b>Elektrische Felder</b>	<b>224</b>
	4.1.1	Elektrische Ladungen	224
	4.1.2	Elektrische Felder	230
	4.1.3	Geladene Teilchen in elektrischen Feldern	242
	<b>4.2</b>	<b>Magnetische Felder</b>	<b>246</b>
	4.2.1	Magnetische Felder von Dauer- und Elektromagneten	246
	4.2.2	Beschreibung magnetischer Felder durch Feldgrößen	249
	4.2.3	Geladene Teilchen und Stoffe in magnetischen Feldern	252
	<b>4.3</b>	<b>Elektromagnetische Induktion</b>	<b>260</b>
	4.3.1	Grundlagen der elektromagnetischen Induktion	260
	4.3.2	Das Induktionsgesetz	264
	4.3.3	Lenzsches Gesetz und Selbstinduktion	266
	4.3.4	Generatoren	270
	4.3.5	Transformatoren	272
	<b>4.4</b>	<b>Gleichstromkreis und Wechselstromkreis</b>	<b>276</b>
	4.4.1	Der Gleichstromkreis	276
	4.4.2	Der Wechselstromkreis	281
	4.4.3	Ohmsche, induktive und kapazitive Widerstände	284
	4.4.4	Zusammenwirken von Widerständen im Wechselstromkreis	288
	<b>4.5</b>	<b>Elektrische Leitungsvorgänge</b>	<b>293</b>
	4.5.1	Elektrische Leitungsvorgänge in Metallen	293
	4.5.2	Elektrische Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten	298
	4.5.3	Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen	299
	4.5.4	Elektrische Leitungsvorgänge im Vakuum	301
	4.5.5	Elektrische Leitungsvorgänge in Halbleitern	302
	4.5.6	Analoge und digitale Signalverarbeitung	310
	<b>4.6</b>	<b>Elektromagnetische Schwingungen und Wellen</b>	<b>314</b>
	4.6.1	Elektromagnetische Felder	314
	4.6.2	Elektromagnetische Schwingungen	318
	4.6.3	Hertzsche Wellen	322
	4.6.4	Das Spektrum elektromagnetischer Wellen	330
■ Überblick	179		
■ Überblick	192		
■ Überblick	217		
■ Überblick	222		
■ Überblick	245		
■ Überblick	259		
■ Überblick	275		
■ Überblick	292		
■ Überblick	313		
■ Überblick	332		

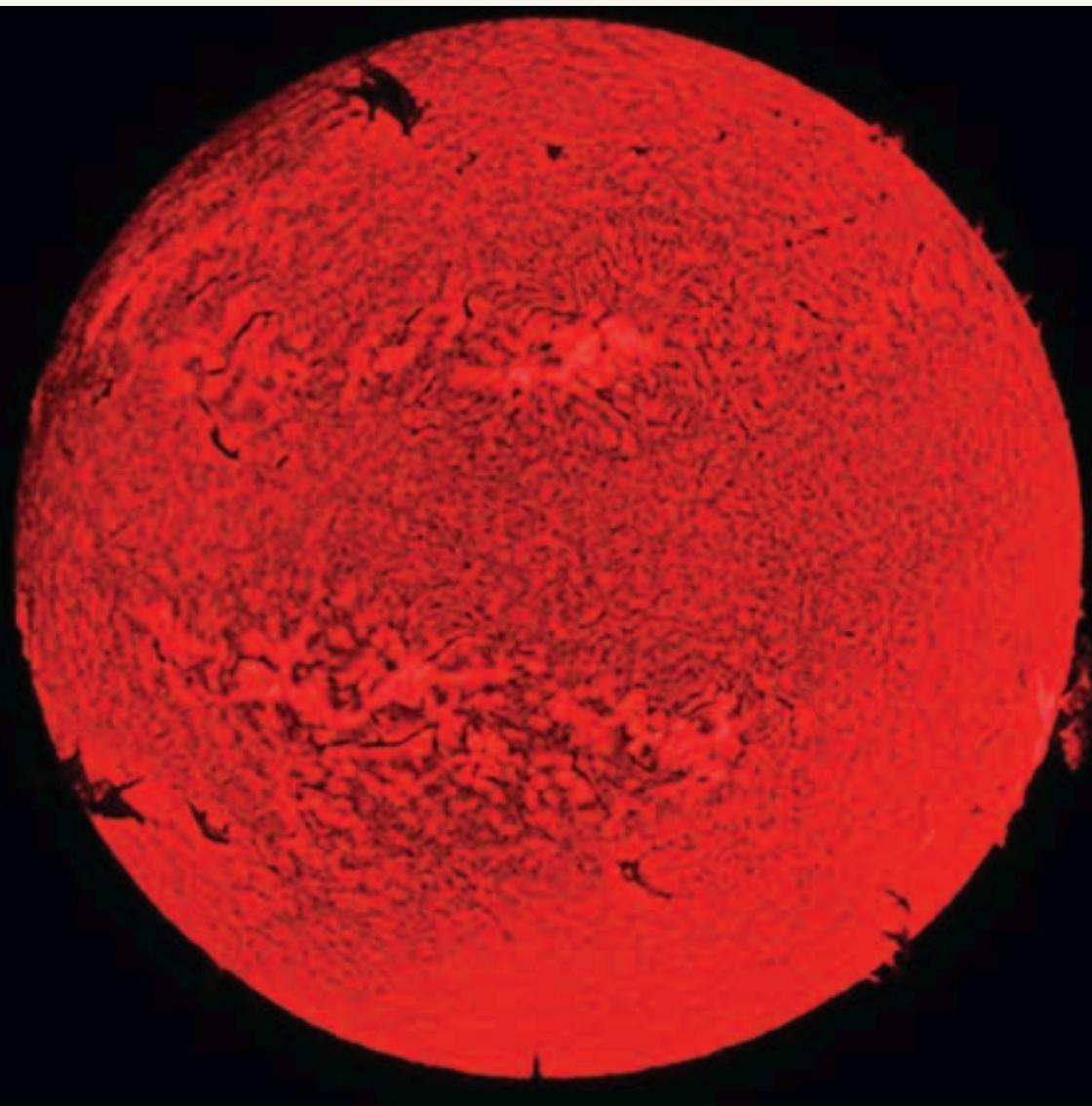
<b>5</b>	<b>Optik</b>	<b>333</b>	
<b>5.1</b>	<b>Modelle für das Licht</b>	<b>334</b>	
5.1.1	Das Modell Lichtstrahl	334	
5.1.2	Das Modell Lichtwelle	335	
<b>5.2</b>	<b>Ausbreitung von Licht und Wechselwirkung mit Stoffen</b>	<b>336</b>	
5.2.1	Die Lichtgeschwindigkeit	336	
5.2.2	Reflexion und Brechung von Licht	337	
5.2.3	Streuung und Absorption von Licht	346	■ Überblick 347
<b>5.3</b>	<b>Bilder und optische Geräte</b>	<b>348</b>	
5.3.1	Bildentstehung an Spiegeln und Linsen	348	
5.3.2	Optische Geräte	356	■ Überblick 359
<b>5.4</b>	<b>Beugung und Interferenz von Licht</b>	<b>360</b>	
<b>5.5</b>	<b>Polarisation von Licht</b>	<b>371</b>	
<b>5.6</b>	<b>Licht und Farben</b>	<b>375</b>	
5.6.1	Spektren und Spektralanalyse	375	
5.6.2	Mischung von Farben	377	■ Überblick 380
<b>6</b>	<b>Quantenphysik</b>	<b>381</b>	
<b>6.1</b>	<b>Quanteneffekte bei elektromagnetischer Strahlung</b>	<b>382</b>	
6.1.1	Der äußere lichtelektrische Effekt	382	
6.1.2	Energie, Masse und Impuls von Photonen	386	
6.1.3	Röntgenstrahlung	388	
<b>6.2</b>	<b>Interferenz von Quantenobjekten</b>	<b>396</b>	
<b>6.3</b>	<b>Komplementarität und Unbestimmtheit</b>	<b>402</b>	
6.3.1	Komplementarität bei Doppelspalt-Experimenten	402	■ Überblick 411, 412
6.3.2	Unbestimmtheit von Ort und Impuls	407	
<b>7</b>	<b>Atom- und Kernphysik</b>	<b>413</b>	
<b>7.1</b>	<b>Physik der Atomhülle</b>	<b>414</b>	
7.1.1	Grundexperimente der Atomphysik	414	
7.1.2	Atommodelle	417	
7.1.3	Die Energieniveaus der Atomhülle im physikalischen Experiment	427	
7.1.4	Spontane und induzierte Emission	429	■ Überblick 431
<b>7.2</b>	<b>Physik des Atomkerns</b>	<b>432</b>	
7.2.1	Atomkerne, Radioaktivität und Kernstrahlung	432	
7.2.2	Kernmodelle	445	
7.2.3	Kernenergie	448	
7.2.4	Elementarteilchen	451	■ Überblick 456
<b>8</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	<b>457</b>	
<b>8.1</b>	<b>Von der klassischen Physik zur Relativitätstheorie</b>	<b>458</b>	
8.1.1	Die klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit	458	
8.1.2	Inertialsysteme und das galileische Relativitätsprinzip	459	
8.1.3	Das Michelson-Morley-Experiment	462	
<b>8.2</b>	<b>Grundaussagen der speziellen Relativitätstheorie</b>	<b>464</b>	
<b>8.3</b>	<b>Relativistische Kinematik</b>	<b>466</b>	
<b>8.4</b>	<b>Relativistische Dynamik</b>	<b>473</b>	
<b>8.5</b>	<b>Hinweise zur allgemeinen Relativitätstheorie</b>	<b>478</b>	■ Überblick 480
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>481</b>	

## Bildquellenverzeichnis

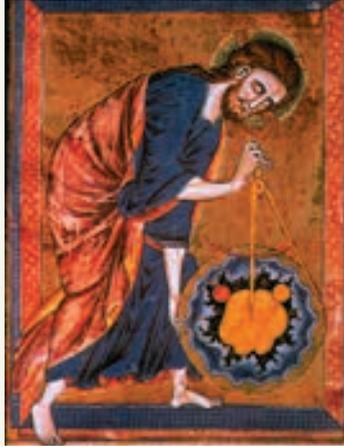
Adam Opel AG 60/1, 78/1, 78/2, 80/1, 232/2; AEG Alotherm Remscheid 267/2; ALZ Augenklinik München 430/2; Archiv der Archenhold-Sternwarte Berlin 8/1, 264/1; Bibliographisches Institut GmbH, Berlin 194/1, 462/1; BMW Rolls-Royce GmbH 204/2; H. Braun 84/1, 84/2; bridgeman-art.com 10/1; Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin 444/1; Canon Deutschland GmbH 241/1; C.E.R.N., Genf 14/1, 474/1; CNES – D. Ducros 457/1; CORBIS/Royalty-Free 7/1, 111/1, 346/2; Corel Photos Inc. 81/2, 89/6, 98/1, 108/1, 114/2, 119/1, 345/1; Cornelsen Experimenta 22/1, 373/1, 474/1; Cornelsen Schulverlage GmbH 11/1, 79/1, 124/1, 134/1, 148/1, 150/1, 195/1, 256/1, 371/1, 393/1, 435/2, 438/3, 458/5, 478/1; NASA EADS 40/1; Deutsche BP, Hamburg 218/2; Deutscher Teeverband e.V. 211/2; ESA/ESOC, Darmstadt 112/1; Euro Speedway Lausitz 211/1; Forschungszentrum Karlsruhe 297/1; © pat\_hastings – Fotolia.com 223/1; © Sashkin – Fotolia.com 49/1; © Smileus – Fotolia.com 133/1; © Thomas Jüngling – Fotolia.com 481/1; Prof. W. Fritz, Köln 73/3; Groupe SEB, Deutschland 51/1; Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft e.V. (IZE) 274/1; Dr. V. Janicke, München 63/1; Kyocera 312/6; LD Systeme AG & Co. KG 15/1, 143/1, 148/2, 149/1, 149/2, 151/1, 239/1, 249/1, 267/3, 272/1, 341/1, 364/1, 373/2, 377/2, 428/1, 438/2; G. Liesenberg, Berlin 232/1, 346/3; Lufthansa Bildarchiv 89/2; B. Mahler, Fotograf, Berlin 153/4, 372/1, 372/2; H. Mahler, Fotograf, Berlin 32/1, 346/1, 349/1; Mannesmann Dematic AG 89/8; Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie/Jürgen Berger 399/1; Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Abteilung Quantendynamik 381/1; Max-Planck-Institut für Radioastronomie 331/1; MEKRUPHY GmbH, Pfaffenhofen 29/1; Messe Berlin GmbH und BDLI 89/3; MEV Verlag, Augsburg 50/1, 113/1, 348/1, 374/1, 449/1, 449/2; L. Meyer, Potsdam 33/1, 58/1, 73/5, 153/3, 164/1, 171/1, 204/1, 229/1, 247/1, 247/2, 247/3, 248/1, 253/1, 259/1, 259/2, 267/1, 277/1, 306/1, 307/1, 312/1, 312/2, 312/3, 312/4, 312/5, 312/7, 312/8, 334/1, 343/1, 351/1, 351/2, 371/2, 393/2; NASA 218/1, 218/3, 430/4, 475/1, 479/1; NASA/JPL/RPIF/DLR 331/2, 331/3; NTL Austria 27/1, 140/1, 153/1, 155/1, 157/1; ÖAMTC 107/1; Osram GmbH 270/1; Photo Disc Inc. 39/1, 73/1, 73/2, 73/6, 81/1, 89/4, 89/5, 153/2, 159/1, 327/1, 333/1, 342/1, 367/1, 391/1; PHYWE SYSTEME GmbH & Co. KG, Göttingen 50/2, 51/2, 56/1, 147/1, 182/1, 206/1, 254/1, 300/1, 373/3, 430/1, 438/1, 438/2; picture-alliance/dpa 443/1; B. Raum, Neuenhagen 89/1; Siemens AG 73/4, 89/7, 271/1, 342/2, 449/3, 480/1; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 344/1; The ATLAS Experiment at CERN, <http://atlas.ch> 452/1; Transport Research Laboratory, Berkshire, Großbritannien 114/1; P. Vogt, Landau 187/1, 202/1, 246/1, 325/1; Volkswagen AG 299/1

Die Physik –  
eine Naturwissenschaft

1



## 1.1 Die Entwicklung der Physik als Wissenschaft



Die Geschichte der Wissenschaft Physik reicht zurück bis in die griechische Antike. Bereits vor der Antike haben die Menschen allerdings Erfahrungen und Erkenntnisse gesammelt und systematisiert, deren wissenschaftliche Aufarbeitung und Weiterentwicklung heute in die Wissenschaft Physik einzuordnen ist. So kannten die Menschen in Ägypten zum Beispiel bereits im dritten Jahrtausend vor unserer Zeitrechnung Geräte zum Messen von Entfernungen und Zeiten, wie Sonnen-, Wasser- und Sanduhren, Volumen-, Gewichts- und Längemaße, sowie kraftumformende Einrichtungen, wie Rollen, Walzen,

Hebel und Räder. Die Menschen begannen, die Gestirne und ihren Lauf zu beobachten sowie den Jahres- und Tagesablauf nach periodischen Bewegungen der Sonne und des Mondes einzuteilen. Etwa 2000 Jahre vor unserer Zeitrechnung entstand in Babylon bereits ein Verzeichnis von Sternbildern und Fixsternen. Die zahlreichen Einzelkenntnisse gewannen die Menschen mehr durch unmittelbare und zufällige Erfahrungen mit der Natur als durch systematisches und zielstrebiges Erforschen von Naturerscheinungen.

Mit diesem Einzelwissen gaben sich die Gelehrten der Antike nicht mehr zufrieden. Sie suchten nach den tiefsten Geheimnissen der Natur, nach den „Urstoffen“ und „Urkräften“, aus denen die ganze Welt aufgebaut ist und die überall wirken. Sie wollten eine einheitliche und systematische Wissenschaft betreiben und ganze Weltbilder erschaffen.

Eine Blüte erlebten die Naturwissenschaften im antiken Griechenland vom 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung an. Als einer der Ersten versuchte **THALES VON MILET** (um 624 bis um 546 v. Chr.) alle Erscheinungen auf ein gemeinsames Prinzip zurückzuführen. Wasser sollte der Urstoff für alle Körper sein. Außerdem führte er alle Erscheinungen auf zwei Urkräfte zurück: das Zusammenziehen und das Ausdehnen.

**PYTHAGORAS** (um 560 bis um 480 v. Chr.) war Mathematiker und Philosoph und gründete eine ganze Schule mit Gelehrten, die Pythagoräer. Sie sahen in den mathematischen Beziehungen die Verbindungen zwischen den Gegenständen der Wirklichkeit. Die Pythagoräer gelangten zu beachtlichen mathematischen Erkenntnissen. **PYTHAGORAS** experimentierte außerdem mit einer gespannten Saite – einem **Monochord** – und fand mathematische Zusammenhänge zwischen der Länge der schwingenden Saite und der Tonhöhe.

Dabei ist beachtenswert, dass die Pythagoräer auf ähnliche Weise zu Erkenntnissen gelangten, wie dies erst wieder zu Zeiten von **GALILEI** im

► Die griechischen Gelehrten der Antike gingen davon aus, dass viele Erscheinungen in der Natur nicht von Göttern, sondern von der Natur selbst verursacht sind und dass sich der Mensch diese Naturerscheinungen nutzbar machen kann.

► In Griechenland hatten sich mächtige Stadtstaaten herausgebildet, die ihren Reichtum vor allem der Arbeit von Sklaven verdankten. Die freien Bürger hatten Zeit und Muße, sich mit Wissenschaft, Medizin, Geschichte und Kunst zu beschäftigen.

17. Jahrhundert üblich wurde, nämlich durch Beobachtung von Einzelerscheinungen, vor allem im Experiment, und deren Verallgemeinerung.

Einer der größten Gelehrten der Antike war **ARISTOTELES** (384–322 v. Chr., Bild rechts). Er beschäftigte sich mit fast allen Gebieten der Wissenschaft seiner Zeit und brachte sie in ein umfassendes System. Seine Werke wurden ins Lateinische übersetzt und von der Kirche und vielen Wissenschaftlern bis ins Mittelalter als unumstößlich betrachtet. Er prägte die Begriffe „**Physik**“ und „**Botanik**“. Besonderen Einfluss auf die Naturwissenschaften seiner Zeit und der Jahrhunderte danach hatten seine Ansichten zu Raum, Zeit, den Bewegungen und dem Leeren (Vakuum). ARISTOTELES beschäftigte sich auch mit dem Aufbau der Erde und des Weltalls. In seiner Physik nahm er eine Trennung zwischen Himmel und Erde vor. Himmelskörper und himmlische Bewegungen (Kreisbewegungen) waren gleichbleibend. Die Bewegungen auf der Erde teilte er in natürliche und erzwungene Bewegungen ein.

Ein großer Gelehrter seiner Zeit war **ARCHIMEDES** (um 287–212 v. Chr.). Er verband die Physik mit der Mathematik und der Technik. Physikalische Gesetze wurden bereits mathematisch formuliert und zum Bau von technischen Geräten und Maschinen genutzt. Er formulierte Gesetze für den Hebel, den Auftrieb, die Dichte und Teilbereiche der Optik, baute ein Planetarium und erfand etwa 40 Maschinen, darunter Kräne, die endlose Schraube und den Flaschenzug. Besonders bemerkenswert ist die Tatsache, dass physikalische Erkenntnisse bewusst zur Lösung von praktischen Problemen genutzt wurden. Mit ARCHIMEDES und seinen Zeitgenossen erlebten die Mathematik und Physik der Antike ihren Höhepunkt. Zu dieser Zeit begannen sich erstmals Teilgebiete der Physik herauszubilden.

Eine Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse der astronomischen Forschung nahm **CLAUDIUS PTOLEMÄUS** (um 100 bis um 170 n. Chr.) vor. Er sah die Erde im Mittelpunkt der Welt, um die sich alle Himmelskörper bewegten. So formte er das **geozentrische Weltbild**. Sein Buch wurde 827 ins Arabische und später ins Lateinische übersetzt. Das geozentrische Weltbild war – auch durch die Unterstützung der Kirche – bis ins Mittelalter bestimmend. Im ersten Jahrhundert unserer Zeitrechnung übernahm das römische Kaiserreich die führende Stellung in der Welt. In der römischen Antike wurden zwar die wissenschaftlichen Leistungen der griechischen Gelehrten bewahrt und angewendet, jedoch kaum weiterentwickelt. Eine Weiterentwicklung der Physik gab es danach vor allem in der arabischen Welt durch die Völker des Islam.

Die Physik als Naturwissenschaft bildete sich in der griechischen Antike heraus, war aber in dieser Zeit insgesamt eher eine Naturphilosophie. Die Physik beschrieb die Natur in erster Linie, wie sie sich unmittelbar und augenscheinlich darbot. Vereinzelt wurden jedoch auch bereits Experimente durchgeführt. Insbesondere durch ARCHIMEDES kam es zu einer ersten Verbindung von Mathematik und Physik sowie zu einer bewussten technischen Nutzung von physikalischen Erkenntnissen.



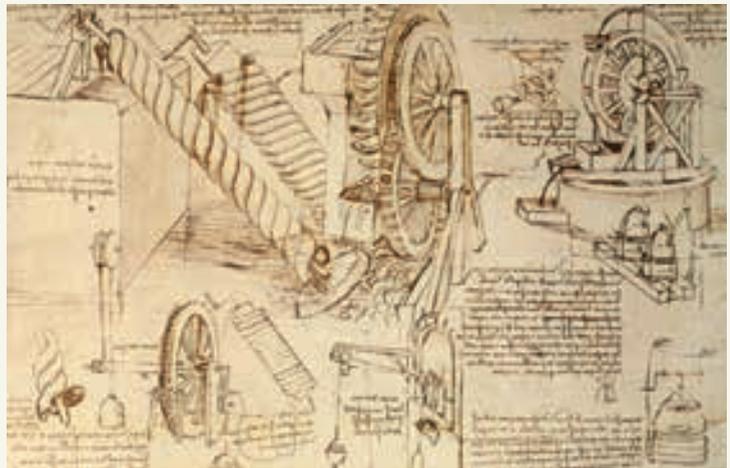
► Das Wort **Physik** kommt vom griechischen Wort *physis* und bedeutet Natur. Der Begriff Physik umfasste damit ursprünglich das gesamte Naturgeschehen und war die umfassende Wissenschaft von der Natur. Die Wissenschaftler nannten sich Physiker oder Physiologen.



► **CLAUDIUS PTOLEMÄUS** stellte sein Weltbild in dem Werk „*Syntaxis mathematica*“ (Mathematische Zusammenstellung), arabisch auch *Almagest* genannt, vor.

► Das Wort *Renaissance* kommt aus dem Lateinischen und bedeutet Wiedergeburt. Es sollte damit das Besinnen auf die Erkenntnisse und Leistungen der Antike zum Ausdruck gebracht werden.

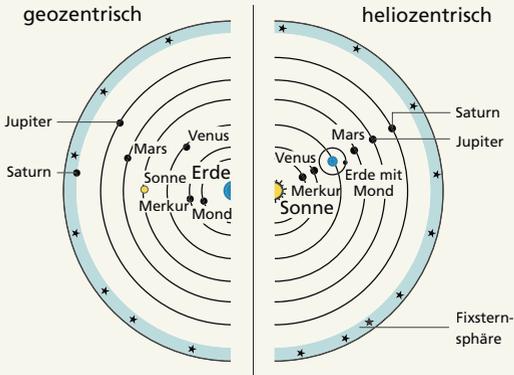
Neues Interesse an der Entwicklung der Physik kam im Frühkapitalismus, insbesondere durch das Interesse der Handwerker und des Bürgertums an praktischen Erkenntnissen, auf. Auch die großen geografischen Entdeckungen im 15. und 16. Jahrhundert und die Hochseeschifffahrt brachten neue Anforderungen an die Kartografie, Astronomie, Zeitmessung und den Kalender. Zunächst kam es in der **Renaissance** zu einer Wiederentdeckung und Aneignung der Kultur und der Wissenschaften der Antike. **LEONARDO DA VINCI** (1452–1519) war ein typischer Vertreter dieser Zeit. Neben seinen Leistungen als Maler war er vor allem als Naturforscher und Techniker erfolgreich. Die Verbindung von Wissenschaft und Praxis war für ihn von großer Bedeutung, wollte er doch praktische Probleme lösen. Er konstruierte und baute Geräte und Maschinen. Das Bild zeigt einige Beispiele von Originalzeichnungen. Eine systematische Weiterentwicklung der Naturwissenschaft betrieb er nicht.



► **GALILEO GALILEI** war einer der bedeutendsten Naturwissenschaftler des späten Mittelalters.

Zu einer solch gravierenden Weiterentwicklung der Physik kam es erst im 16. Jahrhundert durch **GALILEO GALILEI** (1564–1642) und **JOHANNES KEPLER** (1571–1630) sowie später durch **ISAAC NEWTON** (1643–1727). Diese Weiterentwicklung ging einher mit der Überwindung des geozentrischen Weltbildes des **PTOLEMÄUS** durch die Erkenntnisse von **NIKOLAUS KOPERNIKUS** (1473–1543) sowie **GALILEI**, **KEPLER** und **NEWTON**. Das in der Antike bereits vorhandene **heliozentrische Weltbild**, in dem die Sonne im Zentrum unseres Planetensystems steht, wurde wiederbelebt und von **NIKOLAUS KOPERNIKUS** in einem geschlossenen System dargestellt.

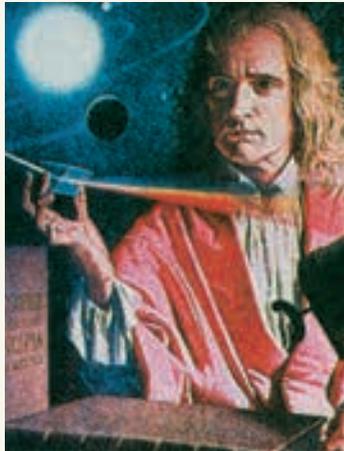
Von besonderer Bedeutung für seine Weiterentwicklung und Verbreitung waren die Arbeiten von **JOHANNES KEPLER** und **GALILEO GALILEI**. **JOHANNES KEPLER** fand die heute nach ihm benannten drei Gesetze der Planetenbewegung (keplersche Gesetze). **GALILEI** entdeckte u. a. das Trägheitsgesetz und die Gesetze für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen. Beide überwandten die Trennung von himmlischer und irdischer Physik und fanden Gesetze, nach denen sich sowohl himmlische Körper (die Planeten) als auch Körper auf der Erde bewegen.



Das **heliozentrische Weltbild** unterschied sich grundsätzlich vom **geozentrischen Weltbild** durch die zentrale Stellung der Sonne. Die Skizze zeigt beide Weltbilder stark vereinfacht.

GALILEO GALILEI führte auch neue Denk- und Arbeitsweisen in die Wissenschaft Physik ein. So wollte er nicht nur die Erscheinungen in der Natur beschreiben, sondern fragte nach dem Wesentlichen in diesen Erscheinungen. Von besonderer Bedeutung war, dass GALILEI versuchte, sowohl der Mathematik als auch dem Experiment einen neuen gewichtigen Stellenwert in der Physik einzuräumen. Das **Experiment** als eine **zielgerichtete Frage an die Natur** bekam eine zentrale Stellung im Erkenntnisprozess und die Physik wurde zu einer Experimentalwissenschaft. Mithilfe der Mathematik konnten physikalische Gesetze exakter erfasst werden und gleichzeitig besser in Experimenten und zur Lösung praktischer Probleme genutzt werden. Damit erhielt auch die Praxis durch GALILEI wieder einen neuen Stellenwert in der Wissenschaft Physik.

Eine vorläufige Vollendung erfuhr die klassische Mechanik im 17. bzw. 18. Jahrhundert vor allem durch ISAAC NEWTON (1643–1727). NEWTON griff die Erkenntnisse von GALILEI, KEPLER und anderen Wissenschaftlern zu mechanischen Bewegungen auf und formulierte mithilfe der Mathematik die allgemeinen Bewegungsgesetze für beliebige Körper in Raum und Zeit. Darüber hinaus entdeckte er die Gravitation als universelle Wechselwirkung zwischen Körpern, die die Bewegung von Himmelskörpern bestimmt. Ferner wandte er die Bewegungsgesetze für Körper auf der Erde auch für Bewegungen



von Himmelskörpern an und überwand damit die Unterscheidung zwischen einer Physik des Himmels und einer der Erde. Seine Erkenntnisse stellte NEWTON in einem geschlossenen System von Axiomen (Gesetzen) dar, das als Theorie bezeichnet werden kann. Die **newtonsche Mechanik** war somit die erste Teildisziplin der Physik, die als in sich geschlossene

Nicht nur durch das **Experiment**, sondern auch durch die Nutzung des Fernrohres als Beobachtungsinstrument zur Erforschung des Himmels zeigte **GALILEI** die Verbindung von Theorie und Praxis. Er fand mit dem Fernrohr vier Jupitermonde (galileische Monde).

**NEWTON** legte seine Mechanik in dem Werk „Mathematische Prinzipien der Naturlehre“ (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica) dar, das 1687 in drei Teilen erschien.

Theorie dargestellt wurde. NEWTON war damit in gewisser Weise der Begründer der theoretischen Physik bzw. der Formulierung einer naturwissenschaftlichen Theorie.

► Das **Kausalitätsprinzip** bei NEWTON besagt, dass Kräfte die Ursache für entsprechende Wirkungen (Bewegungsänderungen) sind. Das **Fernwirkungsprinzip** von NEWTON bedeutet, dass auch in sehr großen Entfernungen die Wirkungen sofort eintreten. Das setzt eine unendlich große Ausbreitungsgeschwindigkeit voraus, die es aber nicht gibt.

► An der Pariser Polytechnischen Schule, der „École Polytechnique“, lehrten viele berühmte französische Mathematiker und Physiker, wie LAGRANGE, LAPLACE, POISSON, AMPÈRE, FRESNEL, CARNOT UND GAY-LUSSAC.

Die newtonschen Bewegungsgesetze beziehen sich auf Körper, die sich in Raum und Zeit bewegen, wobei Raum und Zeit unabhängig von diesen Körpern existieren. Außerdem wurde von NEWTON ein **Kausalitätsprinzip** eingeführt, das jeder Wirkung eine Ursache zuschreibt, wobei die Wirkung auch über sehr große Entfernungen (**Fernwirkungsprinzip**) unmittelbar eintritt. Diese Annahmen sind jedoch nur unter bestimmten Bedingungen gültig, sodass die newtonsche Mechanik ihre Weiterentwicklung bereits in der Elektrodynamik und später vor allem in der Relativitäts- und Quantentheorie erfuhr.

Mit der newtonschen Mechanik entstand die erste abgeschlossene physikalische Theorie. Sie hatte entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der gesamten Physik, die durch eine Mechanisierung gekennzeichnet war. Die dominierende mechanische Naturauffassung wurde erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts erschüttert.

Die industrielle Revolution Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts begann zunächst noch weitgehend unabhängig von der zielgerichteten Nutzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und wurde im Wesentlichen von Handwerkern und Technikern betrieben. Mit der Weiterentwicklung der Industrie erkannte man jedoch bald, wie nützlich die bewusste und direkte Nutzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse für die Produktion war. Es entstanden polytechnische Schulen, die wie die „École Polytechnique“ in Paris zum Zentrum der Entwicklung von Mathematik und Naturwissenschaften wurden.

Verstärkt wurden mathematische Verfahren bei der Behandlung physikalischer Probleme angewendet, sodass es im 19. Jahrhundert zu einer Ausprägung der theoretischen Physik kam.

Gleichzeitig wurde schrittweise erkannt, dass die newtonsche Mechanik nicht auf alle physikalischen Problemstellungen anwendbar war. Zunehmend entwickelten sich dynamische Betrachtungsweisen, die die Erscheinungen in ihrer Veränderung, Umwandlung und Entwicklung sahen, wie z. B. die Thermodynamik, die Wellenoptik, die Elektrodynamik und die Energetik. Vor allem entstand im 19. Jahrhundert die Theorie des elektromagnetischen Feldes durch MICHAEL FARADAY (1791–1867), JAMES CLERK MAXWELL (1831–1879) und HEINRICH HERTZ (1857–1894), die eindeutig nicht mehr auf die newtonsche Mechanik zurückführbar waren.

Bis etwa 1880 hatten sich alle Teilgebiete der Physik so weit entwickelt, dass sie als wissenschaftliche Theorien vollendet erschienen und offenbar nur noch wenige Lücken aufwiesen. In der Produktion wurden nicht nur einzelne wissenschaftliche Erkenntnisse genutzt, sondern ganze physikalisch-technische Bereiche wurden Grundlage für einzelne Industriezweige. Dazu gehört zum Beispiel die Starkstrom-Elektrotechnik, die drahtlose Nachrichtenübertragung durch elektromagnetische Wellen, der optische Gerätebau, aber auch die Weiterentwicklung von Verbren-

nungsmotoren durch die Nutzung von Erkenntnissen aus der Thermodynamik. Die Physik nahm so zu Beginn des 20. Jahrhunderts die dominierende Stellung unter den Naturwissenschaften ein.

Zu dieser Zeit gab es eine Reihe von neuen Entdeckungen, aber auch theoretischen Unzulänglichkeiten und Widersprüchen, die in das Gesamtsystem der klassischen Physik nicht einzuordnen waren. Mit der Wellenoptik kamen Zweifel an den von NEWTON eingeführten Begriffen des absoluten Raumes, der absoluten Zeit und der absoluten Bewegung auf. Durch die Versuche von ALBERT ABRAHAM MICHELSON (1852–1931) und EDWARD WILLIAMS MORLEY (1838–1923) in den Jahren 1881 und 1887 wurde festgestellt, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Bewegung des Beobachters immer gleich groß ist. Diese und weitere Erkenntnisse mündeten schließlich in die **Relativitätstheorie** von ALBERT EINSTEIN (1879–1955).



► Der 14.12.1900, an dem **MAX PLANCK** seine Strahlungsformel in einer Sitzung der Berliner Physikalischen Gesellschaft vortrug, gilt als Geburtstag der Quantentheorie.

Angeregt durch die Glühlampenindustrie, wurde die elektromagnetische Strahlung Ende des 19. Jahrhunderts genauer untersucht. Dabei stellte **MAX PLANCK** (1858–1947) fest, dass Strahlung ihre Energie nicht kontinuierlich, sondern in kleinen diskreten Portionen, den sogenannten Quanten, abgibt. Mit der Interpretation dieser Erkenntnis durch EINSTEIN entstand die **Quantentheorie**. Diese Theorie machte Schluss mit der jahrhundertlang vertretenen Auffassung, dass die Natur kontinuierlich ist, also keine Sprünge macht.

Mit der Entdeckung der Röntgenstrahlung 1895 durch **WILHELM CONRAD RÖNTGEN** (1845–1923) sowie der radioaktiven Strahlung 1896 durch **HENRI BECQUEREL** (1852–1908), **MARIE CURIE** (1867–1934) und **PIERRE CURIE** (1859–1906) wurden zwei neue Strahlungsarten bekannt, deren Ursache im atomaren Bereich lag. Von da führte dann ein direkter Weg zur Entwicklung erster Vorstellungen über den Aufbau der kleinsten Teilchen der Materie, der Atome, durch **ERNEST RUTHERFORD** (1871–1937) und **NIELS BOHR** (1885–1962).

Gerade in der Atom-, Kern- und Quantenphysik entdeckte man zunehmend physikalische Gesetze, die statistischen Charakter tragen. Außerdem wurden in diesen Teilgebieten der Physik Erscheinungen entdeckt, die mit den mechanischen Kausalitätsauffassungen von NEWTON nicht in Übereinstimmung zu bringen waren. Damit wurde der mechanische Determinismus erschüttert und es setzten sich zunehmend Ansichten über ein deterministisches Chaos durch. Da chaotische Systeme durch nichtlineare Gleichungen beschrieben werden, entstand ein neues Teilgebiet, die „**nichtlineare Physik**“.

Ab 1900 entwickelte sich neben der klassischen Physik die moderne Physik, zu der solche Teilgebiete wie die Atom- und Kernphysik, die Quantenphysik, die Relativitätstheorie und die nichtlineare Physik gehören.

► Der mechanische Determinismus geht von einer **STARKEN KAUSALITÄT** aus und vertritt die Auffassung, dass gleiche oder ähnliche Ursachen auch gleiche oder ähnliche Wirkungen haben. Beim deterministischen Chaos dagegen wird von einer **SCHWACHEN KAUSALITÄT** ausgegangen, bei der ähnliche Ursachen zu unterschiedlichen Wirkungen führen können.

Die Entwicklung der Wissenschaft Physik ist bis heute nicht abgeschlossen und wird es auch in Zukunft nicht sein.

► Die **kepler-schen Gesetze** der Planetenbewegung ergeben sich z. B. als mathematische Schlussfolgerung aus der newtonschen Mechanik. Diese wiederum ist ein Grenzfall der speziellen Relativitätstheorie für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der **Vakuumlichtgeschwindigkeit** sind.

► Das Foto zeigt einen Detektor für Elementarteilchen.



► Andere Naturwissenschaften sind die **Biologie**, die **Chemie**, die **Astronomie** und die **physische Geografie**. Zwischen diesen Naturwissenschaften gibt es vielfältige Wechselbeziehungen. Darüber hinaus existieren zahlreiche Grenzwissenschaften, z. B. die Biophysik, die Biochemie, die Astrophysik oder die Biogeografie.

Neuere Erkenntnisse führen immer wieder zu einer Präzisierung, Umdeutung und Einschränkung der Anwendbarkeit bisheriger Gesetze und Theorien. Ältere Erkenntnisse werden verworfen, präzisiert oder in neue Theorien eingebaut und so besser verstanden. Häufig erscheinen sie auch als Grenzfälle von umfassenderen Theorien.

Die Physik ist eine Naturwissenschaft. Sie beschäftigt sich mit den grundlegenden Erscheinungen und Gesetzen in unserer natürlichen Umwelt und ermöglicht die Erklärung und Voraussage vieler Erscheinungen in der Natur und der Technik.

Die Physik ist auch eine wichtige **Grundlage der Technik** und der Produktion. Dabei werden physikalische Erkenntnisse zum einen bewusst genutzt, um technische Geräte und Anlagen zu bauen und zu optimieren. Zum anderen ermöglichen neue und bessere technische Geräte und Anlagen auch weitergehende experimentelle Untersuchungen. Viele Anstöße für physikalische Forschungen ka-

men und kommen aus Wirtschaft, Praxis und Produktion, wie die Geschichte der Physik, aber auch die Gegenwart zeigen.

Naturwissenschaften und Technik haben komplexe Auswirkungen auf das persönliche und gesellschaftliche Leben. Damit haben die Naturwissenschaftler aber auch eine **besondere Verantwortung**, die vor allem darin besteht,

- die Öffentlichkeit über den aktuellen Stand der Forschungen und deren Anwendung sowie über mögliche Auswirkungen auf die Umwelt und das Leben der Menschen aufzuklären und damit fundierte Entscheidungen zu ermöglichen,
- möglichst komplex und fachübergreifend alle Auswirkungen ihrer Forschungen und deren Anwendungen zu untersuchen und zu veröffentlichen,
- ihre Autorität als Wissenschaftler für eine ökologisch verantwortbare, humane und zukunftsfähige Anwendung ihrer Erkenntnisse einzusetzen,
- nur Forschungen zu betreiben und zuzulassen, die das Leben von Menschen und Tieren sowie die Umwelt schonen und ökologischen Anforderungen entsprechen,
- die Anwendungen ihrer Erkenntnisse in der Praxis zu beeinflussen und auf mögliche schädliche Folgen für den Menschen und die Umwelt mit Nachdruck aufmerksam zu machen.

Auch für die Physik und die Physiker gilt: Wissenschaft und Technik sollten genutzt werden für all das, was das Leben der Menschen und die Natur insgesamt bewahrt, verbessert, sicherer macht.

## 1.2 Denk- und Arbeitsweisen in der Physik

### 1.2.1 Begriffe und Größen in der Physik

#### Begriffe in der Physik

Die Wissenschaft Physik hat das Ziel, in der Natur Zusammenhänge und Gesetze zu erkennen und mithilfe dieser Gesetze Erscheinungen zu *erklären* oder *vorherzusagen*, die man in der lebenden oder nicht lebenden Natur beobachten kann. Körper, Stoffe und Vorgänge in der Natur werden miteinander *verglichen*, um Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Regelmäßigkeiten zu erkennen.

Objekte mit gemeinsamen und wesentlichen Eigenschaften werden gedanklich zu einer Klasse oder Gruppe zusammengefasst. Diese Gruppe von Objekten erhält in der Regel einen eigenen Namen. Die gedankliche Zuordnung einer Gruppe bzw. einer Klasse von Objekten zu einem Wort nennt man **Begriff**.

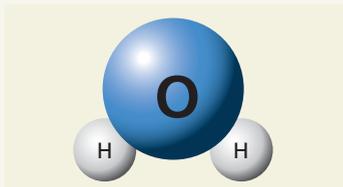
Ein Begriff ist die gedankliche Widerspiegelung einer Klasse von Objekten (Körper, Stoffe, Vorgänge usw.) aufgrund ihrer wesentlichen und gemeinsamen Merkmale.

Damit in den Naturwissenschaften auch alle unter einem Begriff dieselben Objekte mit wesentlichen und gemeinsamen Merkmalen verstehen, werden Begriffe in den Naturwissenschaften eindeutig *definiert*. Beim **Definieren** wird ein Begriff durch die Festlegung wesentlicher, gemeinsamer Merkmale eindeutig bestimmt und von anderen Begriffen unterschieden. Häufig werden dazu ein Oberbegriff und artbildende Merkmale angegeben, wie beim Begriff „Ausbreitungsgeschwindigkeit“. Manchmal legt man einfach fest, was unter einem Begriff zu verstehen ist, wie z. B. beim Begriff „Schwingung“. In einigen Fällen kann man einen Begriff definieren, indem man alle Objekte (Körper, Stoffe, Vorgänge) aufzählt, die zu diesem Begriff gehören. Dies ist z. B. beim Begriff „Teilchen“ der Fall.

Eine **Schwingung** ist eine zeitlich periodische Änderung einer physikalischen Größe. Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** einer Welle ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Schwingungszustand im Raum ausbreitet.



**Teilchen** sind Atome, Ionen und Moleküle. Ein Wassermolekül ist ein Beispiel für ein Teilchen. Ein **chemisches Element** ist eine Atomart, deren Atome die gleiche Anzahl Protonen im Kern enthalten.



Die **Definition** eines Begriffes ist eine willkürliche Sache. Deshalb können Fachbegriffe in verschiedenen Naturwissenschaften auch unterschiedlich definiert werden. Manchmal hat sich im Laufe der Geschichte auch die Definition eines Begriffes geändert, wie das z. B. bei den Begriffen Kraft und Energie der Fall war.

Der Teilchenbegriff wird unterschiedlich verwendet. Manchmal zählt man auch Elementarteilchen wie Elektronen und Protonen zu den Teilchen.

Auch im Alltag benutzt man Begriffe, um sich zu verständigen. Alltagsbegriffe werden nicht exakt definiert, sondern auf der Grundlage von Erfahrungen im Umgang mit Objekten und Wörtern gebildet. Deshalb stimmen **Alltagsbegriffe** und naturwissenschaftliche **Fachbegriffe** häufig nicht bzw. nicht vollständig überein, obwohl dasselbe Wort verwendet wird.

Der Begriff **Arbeit** wird im Alltag für alle Tätigkeiten benutzt, bei denen sich Menschen anstrengen und verausgaben oder Maschinen und Anlagen etwas fertigen. Auch das Lernen in der Schule ist für den Schüler Arbeit. In der Mechanik wird der Begriff **mechanische Arbeit** exakt definiert: *Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn ein Körper bzw. ein System durch eine Kraft bewegt oder verformt wird* (↗ S. 88). Deshalb darf man in der Physik den Begriff mechanische Arbeit nur für Vorgänge verwenden, bei denen Körper durch Kräfte bewegt oder verformt werden. Dazu zählen u. a. auch Tätigkeiten (z. B. das Dehnen eines Expanders oder das Aufschichten von Steinen), für die man im Alltag ebenfalls den Begriff Arbeit benutzt.

► In der Wissenschaft, so auch in der Physik, bedient man sich in der Regel der Fachsprache.

Fachbegriffe knüpfen oft an Alltagsbegriffe an, werden aber dann exakt definiert und schränken meist die Anwendbarkeit des Begriffs ein. Deshalb muss man bei der Anwendung von Begriffen stets beachten, ob es sich um naturwissenschaftliche Fachbegriffe oder um Alltagsbegriffe handelt. In der Wissenschaft werden manchmal Begriffe auch unterschiedlich definiert. Das geschieht z. B., wenn ein bereits eingeführter Begriff für eine größere Klasse von Objekten verallgemeinert wird.

Der oben genannte Begriff **mechanische Arbeit** kann z. B. für beliebige, auch nichtmechanische Vorgänge verallgemeinert werden. **Arbeit** wird verrichtet, wenn Energie übertragen oder umgewandelt wird.

► Solche Wörter bezeichnet man auch als **Synonyme**.

Manchmal wird ein Wort für verschiedene Begriffe benutzt.

In der Physik versteht man unter **Feld** den *Zustand eines Raumes um einen Körper, in dem auf andere Körper Kräfte wirken*. In der Biologie ist ein Feld eine Ackerfläche, auf der Kulturpflanzen angebaut werden.

Eine **Welle** ist in der Physik *eine zeitlich und räumlich periodische Änderung einer physikalischen Größe*. In der Technik versteht man darunter einen Teil einer Maschine, mit dessen Hilfe Kräfte bzw. Drehmomente übertragen werden.

Zum Teil werden auch für ein und denselben Begriff verschiedene Wörter benutzt.

Die Dauer einer vollen Schwingung wird als **Schwingungsdauer** oder als **Periodendauer** bezeichnet. Statt **Wärme** nutzt man auch den Begriff **Wärmemenge**.

## Größen in der Physik

Einen speziellen Teil naturwissenschaftlicher Fachbegriffe bezeichnet man als **physikalische Größen**. Dabei handelt es sich um Begriffe, die man quantitativ erfassen kann. So kann beispielsweise die Temperatur unterschiedlich groß sein, weil Körper unterschiedlich kalt oder warm sein können. Die Temperatur kann also unterschiedliche Werte haben, für die man eine Skala festlegen kann. Die Temperatur ist deshalb eine physikalische Größe. Solche Größen beschreiben messbare Eigenschaften von Objekten.

Eine physikalische Größe beschreibt eine Eigenschaft bzw. ein Merkmal einer Klasse von Objekten, die man quantitativ erfassen kann.

Wie jeder Begriff ist auch eine Größe durch ihre Bedeutung gekennzeichnet. Die **Bedeutung einer Größe** gibt an, welche Eigenschaft bzw. welches Merkmal der Objekte beschrieben wird. Für ein konkretes Objekt kann der Ausprägungsgrad dieser Eigenschaft angegeben werden. Man nennt diesen Ausprägungsgrad **Wert einer Größe**.

- Das **Volumen** gibt an, wie viel Raum ein Körper einnimmt.
- Die **Induktivität** einer Spule gibt an, wie stark ein Wechselstrom durch sie behindert wird. Die **Frequenz** gibt an, wie viele Schwingungen je Sekunde ausgeführt werden.

Um den Wert einer Größe anzugeben, muss eine **Einheit** festgelegt sein. Der Wert der Größe ist dann das Produkt aus Zahlenwert und Einheit, wobei man den Malpunkt weglässt.

- $5 \text{ m}^3$  bedeutet  $5 \cdot 1 \text{ m}^3$ .
- $10 \text{ l}$  bedeutet  $10 \cdot 1 \text{ l}$ .

Für jede Größe ist ein **Formelzeichen** (manchmal auch mehrere) als Abkürzung festgelegt. Mithilfe von Formelzeichen kann man naturwissenschaftliche Gesetze schneller in mathematischer Form formulieren und anwenden.

Zur vollständigen Charakterisierung einer Größe gehört darüber hinaus die Angabe eines **Messgerätes** oder die Beschreibung eines **Messverfahrens** zur Bestimmung des Wertes der Größe oder die Angabe einer **Gleichung zur Berechnung** der Größe.

Größe	Bedeutung	Formelzeichen	Einheit	Messgerät	Berechnung
elektrischer Widerstand	Der elektrische Widerstand gibt an, wie stark der elektrische Strom behindert wird.	$R$	$1 \text{ Ohm (1 } \Omega)$ $1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$	Widerstandsmesser (Ohmmeter)	$R = \frac{U}{I}$

► Für die Größe **Temperatur** wurden im Laufe der Geschichte unterschiedliche Skalen eingeführt (**celsiuskala, Fahrenheitskala, Réaumurskala, Kelvinskala**), die auch heute noch genutzt werden.

► Im **Internationalen Einheitensystem**, auch SI genannt, sind sieben Basiseinheiten festgelegt, aus denen die meisten anderen Einheiten abgeleitet werden können.

► Bei zusammengesetzten Einheiten wird zwischen den Einheiten meist ein Malpunkt gesetzt, z. B. bei der Einheit Newtonmeter für die mechanische Arbeit:  $\text{N} \cdot \text{m}$ . Zulässig ist auch die Schreibweise  $\text{Nm}$ .

► Einige Größen haben in der Natur einen bestimmten Wert. Man nennt sie auch **Naturkonstanten**. Beispiele dafür sind die **Elementarladung** oder die **Gravitationskonstante**.

► Der Betrag eines Vektors ist nie negativ. Dagegen kann der Wert einer Reihe von skalaren Größen positiv oder negativ sein. Das Vorzeichen wird mitunter auch genutzt, um die Richtung einer Bewegung oder einer Energieübertragung zu kennzeichnen.

► Dieses Verfahren nennt man auch **Superpositionsprinzip** vektorieller Größen.

► **Erhaltungsgrößen** sind die **Energie**, die **elektrische Ladung**, der **Impuls** und der **Drehimpuls**. Nur Zustandsgrößen können Erhaltungsgrößen sein.

Man kann in der Physik Größen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten in verschiedene Arten einteilen. So kann man skalare und vektorielle Größen unterscheiden. **Skalare (ungerichtete) Größen** sind Größen, bei denen die Eigenschaft bzw. das Merkmal nicht von der Richtung abhängig ist und nur durch einen **Wert** gekennzeichnet wird.

■ Temperatur, Ladung, Masse und Dichte sind z. B. skalare Größen.

Andere Größen sind von der Richtung abhängig. Solche Größen nennt man **gerichtete** oder **vektorielle Größen**. Man kennzeichnet sie mit einem Pfeil über dem Formelzeichen und stellt sie grafisch als Pfeil dar. Die Länge des Pfeils gibt dann den Betrag an.

■ Beispiele für vektorielle Größen sind die Geschwindigkeit  $\vec{v}$ , die Beschleunigung  $\vec{a}$  und die Kraft  $\vec{F}$ .

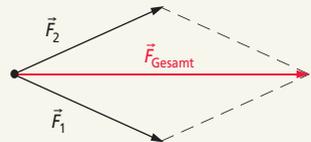
Bei der **Addition von Größen** muss man beachten, ob es sich um skalare oder vektorielle Größen handelt.

Bei skalaren Größen kann man die Beträge der Größen addieren.

■ Eine Masse  $m_1 = 100$  g Mehl und  $m_2 = 50$  g Zucker werden zusammengeschüttet. Die Gesamtmasse des Gemisches beträgt  $m = m_1 + m_2 = 150$  g.

Bei der Addition vektorieller Größen sind die Richtungen der einzelnen Größen zu beachten.

■ Ein Schlitten wird von zwei Kindern mit den beiden Kräften  $F_1 = 100$  N und  $F_2 = 100$  N in unterschiedlicher Richtung gezogen. Die resultierende Gesamtkraft ergibt sich aus einem maßstäblichen Kräfteparallelogramm.



Physikalische Größen kann man danach unterscheiden, ob sie den Zustand eines Körpers oder Systems oder ob sie einen Vorgang oder Prozess beschreiben. Größen, die den Zustand eines Körpers bzw. eines Systems kennzeichnen, nennt man **Zustandsgrößen**. Größen, die einen Vorgang oder Prozess beschreiben, bezeichnet man als **Prozessgrößen**.

■ Energie, Temperatur, Druck, Impuls und Drehimpuls sind Zustandsgrößen; Wärme, Arbeit und Kraftstoß Prozessgrößen.

Darüber hinaus gibt es **Wechselwirkungsgrößen**, die die Wechselwirkung zwischen Körpern bzw. Systemen beschreiben, und **Erhaltungsgrößen**, die in einem abgeschlossenen physikalischen System konstant sind.

■ Beispiele für Wechselwirkungsgrößen sind die Kraft, die Arbeit und die Wärme.

## 1.2.2 Gesetze, Modelle und Theorien in der Physik

In Erscheinungen der Natur kann man mithilfe von Beobachtungen und Experimenten Zusammenhänge zwischen einzelnen Eigenschaften von Körpern, Stoffen oder Vorgängen erkennen.

- So kann man für einen Kupferdraht durch Messungen feststellen, dass die elektrische Stromstärke im Kupferdraht umso größer ist, je größer die angelegte Spannung ist. Genauere Untersuchungen an diesem Draht führen zu dem Ergebnis, dass in einem bestimmten Bereich  $I \sim U$  gilt.

Wenn sich Zusammenhänge in der Natur unter bestimmten Bedingungen immer wieder einstellen und damit für eine ganze Gruppe oder Klasse von Objekten gelten, dann spricht man von gesetzmäßigen Zusammenhängen, Gesetzmäßigkeiten oder **Gesetzen**.

Ein Gesetz in den Naturwissenschaften ist ein allgemeiner und wesentlicher Zusammenhang in der Natur, der unter bestimmten Bedingungen stets gilt.

▶ Gesetze bestehen in der Regel aus Bedingungs- und Gesetzesaussagen.

Die Bedingungen, unter denen ein Zusammenhang stets gilt, nennt man auch **Gültigkeitsbedingungen**.

- So haben Untersuchungen gezeigt, dass der oben beschriebene Zusammenhang  $I \sim U$ , der an einem konkreten Kupferkabel gefunden wurde, für alle metallischen Leiter gilt, wenn deren Temperatur konstant bleibt. Dies wird im *ohmschen* Gesetz beschrieben:

Für alle metallischen Leiter gilt unter der Bedingung einer konstanten Temperatur ( $\vartheta = \text{konstant}$ ):  $I \sim U$ .

Dieses physikalische Gesetz gilt für die Klasse aller metallischen Leiter unter der Bedingung  $\vartheta = \text{konstant}$ . „Metallischer Leiter“ und „ $\vartheta = \text{konstant}$ “ sind die Bedingungsaussagen, „ $I \sim U$ “ ist die Gesetzesaussage.

Nicht immer sind Gesetze so vollständig durch Bedingungs- und Gesetzesaussagen beschrieben. Zum Teil muss man die Bedingungsaussagen auch aus dem Zusammenhang erschließen bzw. sind die Gültigkeitsbedingungen noch nicht vollständig bekannt.

▶ Die Entscheidung, ob eine Aussage (z. B.  $F = m \cdot a$ ) eine Gesetzesaussage oder die Definition einer Größe ist, kann oft nur innerhalb einer vollständigen Theorie getroffen werden.

- So gilt z. B. für den Widerstand eines metallischen Leiters die Gleichung  $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$ . Die in Tabellenwerken ausgewiesene Stoffkonstante  $\varrho$  ist aber für die meisten Stoffe temperaturabhängig und in der Regel für 20 °C angegeben. Nutzt man diesen Wert, so gilt der berechnete Widerstand  $R$  nur unter der Bedingung  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ .

Gesetze gelten stets für eine Klasse von Objekten. Zu ihrer Formulierung werden physikalische Fachbegriffe und Größen genutzt.

Äquivalenz von Energie und Masse bedeutet, dass jeder Form von Energie eine Masse zuzuordnen ist und umgekehrt jeder Masse eine Energie zugeordnet werden kann. Daraus ergibt sich:

- In jedem abgeschlossenen System ist die Erhaltung der Energie gleichbedeutend mit der Erhaltung der Masse. In relativistischer Betrachtungsweise umfasst somit der allgemeine Energieerhaltungssatz den Satz von der Erhaltung der Masse. Dieser wiederum wäre einem Satz von der Erhaltung der dynamischen Masse äquivalent. In der Physik ist es aber üblich, den Energieerhaltungssatz in den Vordergrund zu stellen.
- Der Zusammenhang zwischen Energie und Masse ist nicht auf mechanische Vorgänge beschränkt, sondern gilt für beliebige Vorgänge in der Makrophysik und in der Mikrophysik.

▶ In der klassischen Physik gibt es dagegen zwei voneinander unabhängige Erhaltungssätze, den **Energieerhaltungssatz** und den **Satz von der Erhaltung der Masse**.

▶ Im Alltag spielen solche Veränderungen der Masse keine Rolle. Sie bleiben unbemerkt.

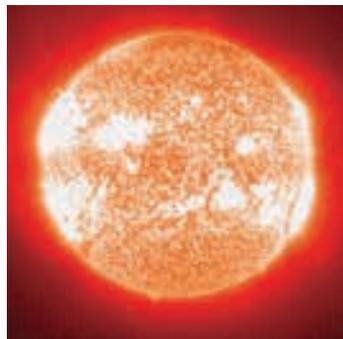
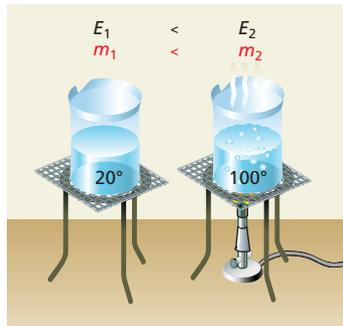
Wird einem Körper Wärme zugeführt, so erhöht sich seine thermische Energie. Das führt zu einem entsprechenden Zuwachs an Masse.

Wird z.B. 1 Liter Wasser von 20°C auf 100°C erhitzt, so muss ihm eine Energie von 335 kJ zugeführt werden. Das entspricht einer Masse von  $\Delta m = \frac{E}{c^2} \approx 3,7 \cdot 10^{-12}$  kg. Abkühlung eines Körpers bedeutet Verringerung seiner Energie und damit Verkleinerung der dazu äquivalenten Masse. Die Sonne gibt Energie in Form von Strahlung an ihre Umgebung ab. Ihre **Leuchtkraft** beträgt  $3,85 \cdot 10^{26}$  W. In jeder Sekunde verschmelzen 567 Mio. Tonnen Wasserstoff zu 562,7 Mio. Tonnen Helium. Der **Massendefekt** beträgt in jeder Sekunde 4,3 Mio. Tonnen. Dem entspricht eine Energie von  $3,85 \cdot 10^{26}$  J.

Bei der Kernspaltung haben die Bruchstücke zusammen eine kleinere Masse als der ursprüngliche Kern. Dem Massendefekt äquivalent ist die kinetische Energie der Bruchstücke.

- Ein ruhender Körper mit bestimmter Masse besitzt aufgrund der Beziehung  $E = m \cdot c^2$  eine bestimmte Energie. Analog zur Ruhemasse  $m_0$  wird diese Energie als **Ruheenergie** bezeichnet. Es gilt:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$



▶ Die Strahlungsleistung eines Sterns wird als **Leuchtkraft** bezeichnet.

▶ Der Verlust an Masse, der bei verschiedenen Vorgängen auftritt, wird in der Physik als **Massendefekt** bezeichnet. Dieser Massendefekt bestimmt die Energiebilanz bei **Kernspaltung** und **Kernfusion**, aber auch bei der **Paarzerstrahlung** und der **Paarbildung**.

- Ein bewegter Körper verändert mit der Geschwindigkeit seine Masse und damit seine Energie. Der Energiezuwachs beträgt  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ . Die relativistische kinetische Energie ergibt sich dann als:

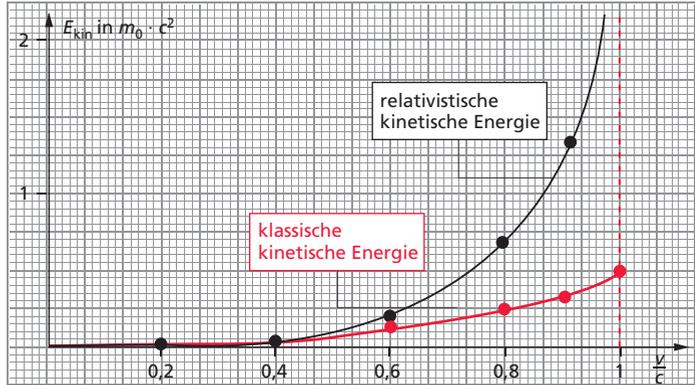
$$E_{\text{kin}} = (m - m_0) c^2 = m_0 \cdot c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = m_0 \cdot c^2 (k - 1)$$

Zusammenfassend gilt für die verschiedenen Energien:

► Statt von relativistischer kinetischer Energie spricht man meist einfach von **kinetischer Energie**. Dabei ist zu beachten: Die kinetische Energie in der Relativitätstheorie ist nicht gleich der kinetischen Energie in der klassischen Physik (S. 88).

In der speziellen Relativitätstheorie ist zu unterscheiden zwischen der **Ruheenergie**  $E_0 = m_0 \cdot c^2$ , der **relativistischen kinetischen Energie**  $E_{\text{kin}} = (m - m_0) c^2$  und der **Gesamtenergie**  $E = E_0 + E_{\text{kin}} = m \cdot c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot c^2 = k \cdot m_0 \cdot c^2$ .

Die relativistische kinetische Energie vergrößert sich mit der Geschwindigkeit, so wie es unten dargestellt ist.



■ Für ein Elektron, das sich mit 90 % der Lichtgeschwindigkeit bewegt, gilt:

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{9,109 \cdot \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ m}^2}{10^{31} \cdot \text{s}^2 \sqrt{1 - \left(\frac{0,9 \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^8}\right)^2}} = 1,88 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Als Ruheenergie erhält man:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Die kinetische Energie hat demzufolge einen Wert von

$$E_{\text{kin}} = 10,6 \cdot 10^{-14} \text{ J} \text{ (57 \% der Gesamtenergie)}$$

- Objekten, die keine Ruhemasse haben (Photonen, Neutrinos), kann eine Masse zugeordnet werden, die man auch als **Impulsmasse** bezeichnet.

## Der relativistische Impuls

Mit der relativistischen Deutung der Masse (↗ S. 473) ist es auch möglich, den relativistischen Impuls zu definieren.

Der relativistische Impuls kann berechnet werden mit der Gleichung:

$$\vec{p} = m(v) \cdot \vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \vec{v} = k \cdot m_0 \cdot \vec{v}$$

$m_0$	Ruhemasse	$c$	Lichtgeschwindigkeit
$v$	Geschwindigkeit	$k$	$k$ -Faktor

▶ In der klassischen Physik ist der **Impuls** als Produkt aus konstanter **Masse** und **Geschwindigkeit** definiert:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Für die **Kraft** gilt auch in der Relativitätstheorie:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

## Erhaltungssätze in der Relativitätstheorie

**Erhaltungssätze** als grundlegende Erfahrungssätze müssen insbesondere aufgrund der Äquivalenz von Energie und Masse für die spezielle Relativitätstheorie neu gefasst bzw. in ihren Formulierungen der Theorie angepasst werden.

Wegen der Äquivalenz von Masse und Energie sind die Gesetze von der Erhaltung der Energie und der Erhaltung der (dynamischen) Masse gleichwertig. Masse und Energie sind zwei verschiedene Erscheinungsformen der Materie, die ineinander umwandelbar sind. Deshalb kann man beide Erhaltungssätze zusammenfassen.

In einem abgeschlossenen physikalischen System ist die Gesamtenergie konstant. Es gilt:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \text{konst.}$$

$E$	Gesamtenergie	$E_i$	Energie der einzelnen Objekte
-----	---------------	-------	-------------------------------

▶ **Erhaltungssätze** der klassischen Physik sind der **Energieerhaltungssatz** (↗ S. 87), der **Satz von der Erhaltung der Masse**, der **Impulserhaltungssatz** (↗ S. 111) und der **Drehimpulserhaltungssatz** (↗ S. 119).

**Impulserhaltungssatz** und **Drehimpulserhaltungssatz** gelten auch in der speziellen Relativitätstheorie. Es ist aber zu beachten, dass die Masse von der Geschwindigkeit abhängt.

In einem abgeschlossenen physikalischen System ist der Gesamtimpuls konstant. Es gilt:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_{0,i} \cdot \vec{v}_i}{\sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}}} = \text{konstant}$$

$\vec{p}$	Gesamtimpuls	$\vec{v}_i$	Geschwindigkeiten
$\vec{p}_i$	Impulse der einzelnen Objekte	$m_{0,i}$	Ruhmassen der einzelnen Objekte

▶ Relativistischer Impuls und relativistische Energie sind folgendermaßen miteinander verknüpft:  

$$p^2 \cdot c^2 = E^2 - E_0^2$$
 Damit sind auch **Energie** und **Impuls** miteinander verknüpft.

In analoger Weise kann auch der Drehimpulserhaltungssatz (↗ S. 119) allgemeingültig formuliert werden.

## 8.5 Hinweise zur allgemeinen Relativitätstheorie

► Ebenso wie die **spezielle Relativitätstheorie** ist auch die **allgemeine Relativitätstheorie** grundlegend für das physikalische Weltbild. **EINSTEIN** ging es mit seiner Theorie wie vielen Erfindern und Entdeckern: „Die **allgemeine Relativitätstheorie** wurde in ihrer frühen **Entwicklungsphase** von den zeitgenössischen Physikern völlig ignoriert, wenig verstanden und von niemandem anerkannt“. (LEOPOLD INFELD, Erinnerungen an EINSTEIN)

Wie jede physikalische Theorie besitzt auch die spezielle Relativitätstheorie einen bestimmten Gültigkeitsbereich:

- Alle Betrachtungen beziehen sich auf Inertialsysteme. Beschleunigte Bezugssysteme werden nicht betrachtet.
- Der Einfluss der Gravitation (↗ S. 121 ff.) auf Vorgänge wird ausgeblendet.

Seit 1907 arbeitete A. EINSTEIN an einer Verallgemeinerung seiner speziellen Relativitätstheorie. In Zusammenfassung seiner langjährigen Untersuchungen zu Trägheit und Gravitation veröffentlichte er 1916 die Arbeit „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“. EINSTEIN ging dabei von zwei grundlegenden Prinzipien aus:

### äquivalenzprinzip:

In hinreichend kleinen Raum-Zeit-Gebieten lassen sich Trägheit und Schwere experimentell nicht voneinander unterscheiden.

- In einem abgeschlossenen Kasten befindet sich ein Beobachter sowie ein Federkraftmesser, an dem ein Massestück befestigt ist. Der Beobachter kann nicht unterscheiden, ob die Auslenkung der Feder durch eine Gravitationskraft (Schwere) oder durch eine beschleunigte Bewegung des Kastens (Trägheit) zustande kommt.

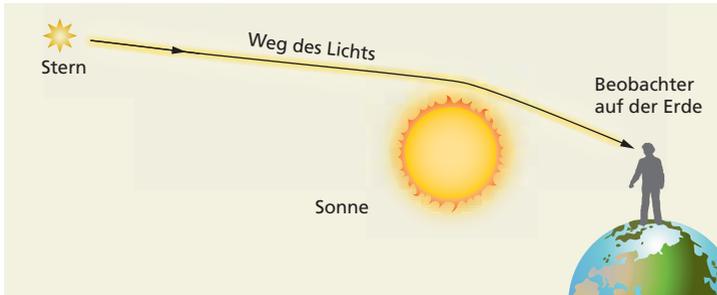
### Allgemeines Relativitätsprinzip:

Alle Naturgesetze lassen sich so formulieren, dass sie in allen lokalen Bezugssystemen (also auch in beschleunigten oder einem Gravitationsfeld ausgesetzten) gleich lauten.

EINSTEIN selbst nannte zunächst drei astronomische Erscheinungen, an denen sich die Gültigkeit der neuen Theorie nachweisen ließ: Der **erste Effekt** ist die **Periheldrehung des Merkurs**. Das Perihel ist der sonnennächste Punkt auf der elliptischen Bahn eines Planeten. Es war schon seit langem bekannt, dass sich das Perihel des Planeten Merkur im Laufe eines Jahrhunderts um etwa 43 Bogen Sekunden mehr verschiebt, als es nach dem Gravitationsgesetz erfolgen müsste. Mithilfe der allgemeinen Relativitätstheorie konnte die Periheldrehung des Merkurs erklärt werden.



Der **zweite Effekt** ist die Krümmung des Wegs von Licht, das von Sternen ausgeht, im Schwerfeld der Sonne.

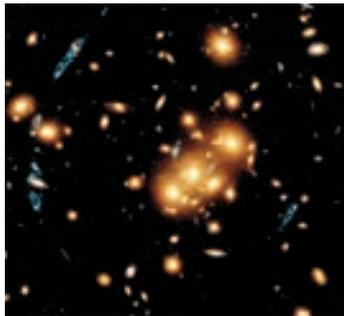


EINSTEIN berechnete eine maximale Ablenkung von 1,7 Bogensekunden. 1919 wurde der Effekt von einer englischen Sonnenfinsternis-Expedition unter Leitung des Astrophysikers EDDINGTON erstmals bestätigt. Eine Bestätigung für die Ablenkung von Licht durch eine große Masse sind die 1979 entdeckten **Gravitationslinsen**. Das sind massereiche Objekte (z. B. Galaxien), die das Licht eines dahinter befindlichen Objektes ablenken und dadurch Mehrfachbilder oder ringförmige Strukturen hervorrufen.

► Die Bestätigung dieser Vorhersage erregte großes Aufsehen und trug entscheidend zum Weltruhm **A. EINSTEINS** bei.

So wirkt z. B. der extrem massereiche Galaxienhaufen ABELL 2218 als Gravitationslinse für Objekte, die sich von der Erde aus betrachtet hinter ihm befinden. Dadurch kommen die ringförmigen Strukturen zustande, die auf dem Bild zu erkennen sind.

Inzwischen kennt man eine Reihe kosmischer Objekte, die als **Gravitationslinsen** wirken.



Ein weiterer Beleg für den genannten Effekt ist die Existenz **schwarzer Löcher**. Das sind extrem massereiche Gebilde, deren Gravitationswirkung so groß ist, dass Licht den betreffenden Bereich nicht verlassen kann. Auch im Zentrum unserer Galaxis, dem Milchstraßensystem, wird ein solches schwarzes Loch vermutet.

Der **dritte Effekt**, den EINSTEIN nannte, ist die **relativistische Rotverschiebung**. Auch dieser Effekt ist inzwischen nachgewiesen. So wurde z. B. eine solche relativistische Rotverschiebung bei einem weißen Zwerg (etwa erdgroße Sterne mit einer Dichte von  $10^5$  bis  $10^6$  g/cm<sup>3</sup>) gefunden. Im Unterschied zur speziellen Relativitätstheorie hat die allgemeine Relativitätstheorie noch keine direkten Auswirkungen auf unser Leben. Ihre Bedeutung liegt auch nicht in den genannten Effekten, sondern in der Vereinfachung der theoretischen Grundlagen der gesamten Physik und in der Vertiefung des Verständnisses der uns umgebenden Welt.

► Die Existenz von schwarzen Löchern lässt sich nur indirekt belegen, z. B. dadurch, dass ein anderes kosmisches Objekt verschwindet.

## Spezielle Relativitätstheorie (SRT)

Die klassische Physik geht von einem absoluten Raum und einer davon unabhängigen absoluten Zeit aus. Die auf diesen Vorstellungen basierende **newtonsche Mechanik** galt bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts als Kernstück der klassischen Physik.

In der speziellen Relativitätstheorie formulierte A. EINSTEIN 1905 zwei Postulate.

### Relativitätsprinzip:

Alle Inertialsysteme sind bezüglich physikalischer Gesetze gleichberechtigt.

### Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist in allen Inertialsystemen stets gleich groß. Sie ist unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle und des Beobachters bei der Messung.

Ihr Wert beträgt  $c = 299\,792,458 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .

Aus diesen Postulaten ergeben sich wichtige Folgerungen und neue Vorstellungen über Raum und Zeit. Insbesondere sind Raum und Zeit nicht unabhängig voneinander und auch nicht absolut.

### Relativität der Gleichzeitigkeit

Zwei Ereignisse, die in einem Inertialsystem  $S$  gleichzeitig stattfinden, erfolgen in einem dazu bewegten Inertialsystem  $S'$  nicht gleichzeitig.

### Relativität der Zeitmessung

In seinem Ruhesystem dauert ein physikalischer Vorgang am kürzesten (Eigenzeit). Von einem dazu bewegten System aus wird die Zeitdauer größer gemessen. Für die **Zeitdilatation** gilt:

$$t = t' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = t' \cdot k$$

### Relativität der Längenmessung

In seinem Ruhesystem hat ein Körper seine größte Länge (Eigenlänge). In einem dazu bewegten System ist die Länge geringer. Für die **Längenkontraktion** gilt:

$$l = l' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l'}{k}$$

Die **Masse von Körpern** bzw. **Teilchen** nimmt mit der Geschwindigkeit zu. Es gilt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = k \cdot m_0$$

Die **Gesamtenergie**  $E$  eines Körpers und seine **dynamische Masse**  $m$  sind zueinander proportional. Es gilt:

$$E = m \cdot c^2$$

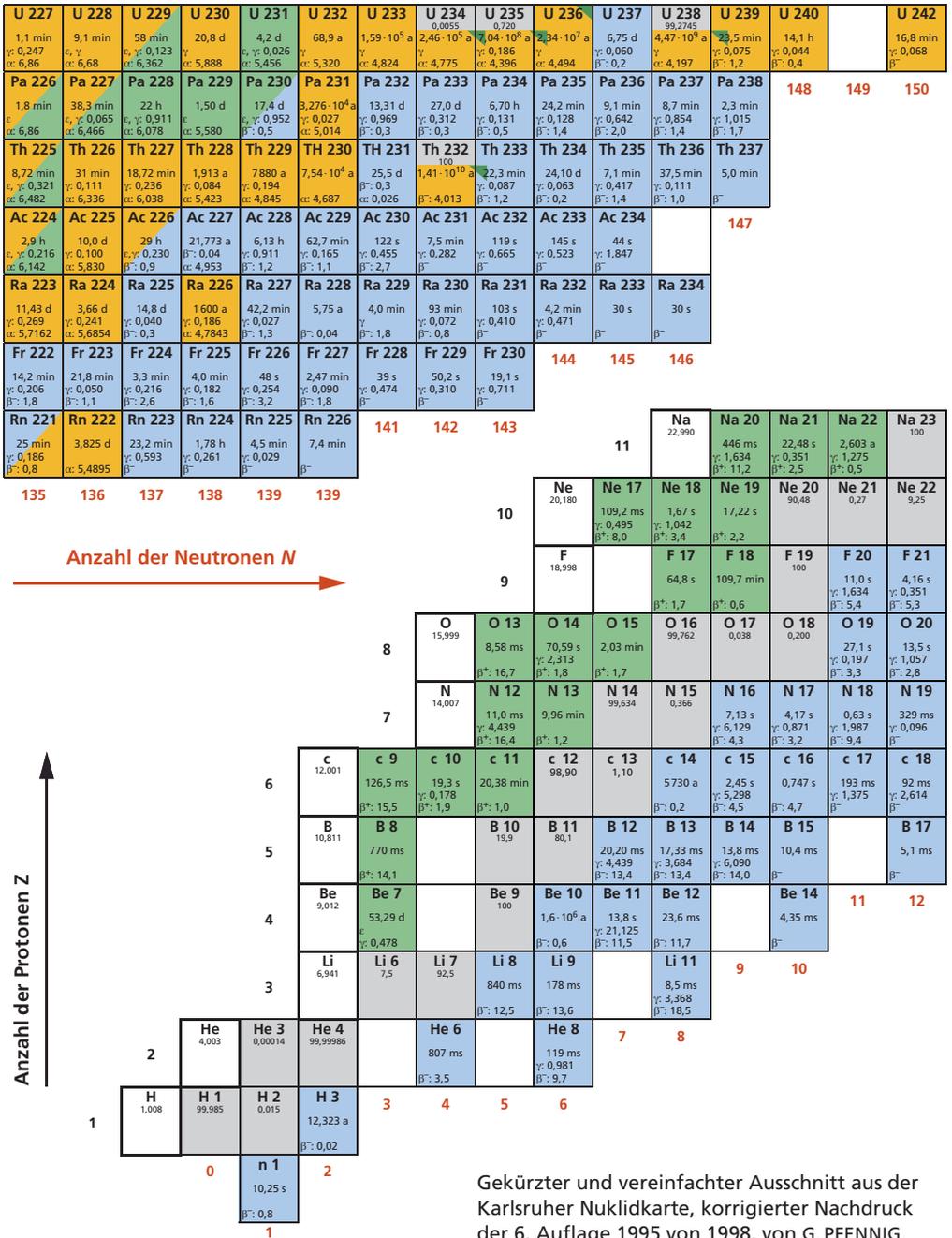
$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = k \cdot m_0 \cdot c^2$$

Anhang

A







Gekürzter und vereinfachter Ausschnitt aus der Karlsruher Nuklidkarte, korrigierter Nachdruck der 6. Auflage 1995 von 1998, von G. PFENNIG, H. KLEWE-NEBENIUS, W. SEELMANN-EGGEBERT †

## Register

- A**
- Abbildungsgleichung 353, 359
  - Abbildungsmaßstab 357, 359
  - Abklingkoeffizient 320
  - Ablöseenergie 383
  - absolute Fehler 46
  - absoluter Nullpunkt 163
  - absoluter Raum 458
  - absolute Temperatur 163
  - absolute Zeit 458
  - Absorption 150, 337, 347, 418, 431
  - Absorptionsgrad 219
  - Abstimmkreis 321, 329
  - actio = reactio 80
  - Addition von Größen 18
  - additive Farbmischung 378
  - Adhäsion 54
  - Adhäsionskräfte 54
  - Adiabatexponent 200
  - adiabatische Zustandsänderung 176, 198, 202
  - AD-Wandler 310
  - Aggregatzustand 172, 173
    - fest 172
    - flüssig 172
    - gasförmig 172
  - Akkumulatoren 224, 299
  - Aktivität 439
  - akustischer Doppler-Effekt 151
  - Alltagsbegriffe 16
  - Altersbestimmung 443
  - AMONTONS, GUILLAUME 175
  - AMPÈRE, A. M. 12, 260
  - Amperemeter 278
  - Amplitude 135, 145, 146
  - Amplitudenmodulation 328
  - Analog-Digital-Wandler 310
  - analoge Größen 104
  - analoges Signal 310
  - Analogie 27
  - Anomalie des Wassers 170
  - Anpresskraft 83
  - Antenne 324
  - anthropogener Treibhauseffekt 220
  - Antiteilchen 451
  - Äquipotenzialfläche 127, 237
  - Äquipotenziallinie 237
  - Äquivalentdosis 456
  - Äquivalenzprinzip 478
  - Äräometer 51
  - Arbeit 16, 126, 127, 161, 165, 195, 236
    - elektrische 277
    - mechanische 16, 193, 195, 198, 236
  - ARCHIMEDES 9
  - ARISTOTELES 31
  - ASTON, FRANCIS WILLIAM 257
  - Astronomie 14, 331
  - Äther 325, 459, 463
  - Ätherhypothese 325, 459
  - Äthersphäre 345
  - atomare Masseinheit 53
  - Atombindung 302
  - Atome 161, 180, 181, 360, 376, 383, 414, 431
    - Abstand 181
    - Durchmesser 181
    - Masse 181
  - Atomhülle 431, 432
  - Atomkern 416, 431, 432, 446, 447
  - Atommasse
    - relative 181
  - Atommodell
    - bohrsches 417
    - quantenphysikalisches 422
    - rutherfordisches 417
  - Atomradius 416
  - Attraktoren 156
  - Aufenthaltswahrscheinlichkeit 422
    - räumliche 407
  - Auflösungsvermögen 357, 366
  - Auftrieb 164
  - Auge 356
    - Auflösungsvermögen 357
  - Augenblicksbeschleunigung 61
  - Augenblicksgeschwindigkeit 60
  - Augenblicksleistung 95
  - Ausbreitungsgeschwindigkeit 15, 145, 323, 158
  - Auslenkung 135
  - Außenpolmaschine 270
  - äußerer Fotoeffekt 382
  - äußerer lichtelektrischer Effekt 382
  - Austauschteilchen 454
  - Austrittsarbeit 383
  - AVOGADRO, AMADEO 52
  - Avogadro-Konstante 52
- B**
- Bahn 58
  - Bahnbeschleunigung 61
  - Bahnform 58
  - ballistische Kurven 71
  - Bändermodell 296, 303, 313
  - BARDEEN, JOHN 297, 307
  - BASSOW, NIKOLAI G. 430
  - Batterie 299
  - BCS-Theorie 297
  - BECQUEREL, HENRI 435
  - BENZ, CARL 209
  - BERNOULLI, DANIEL 186
  - Beschleuniger 242, 324, 474
  - Beschleunigung 59, 60, 61, 65, 137, 461
    - mittlere 61
  - Beschleunigungsmesser 61
  - Beschleunigung-Zeit-Gesetz 137
  - besselsche Methode 355
  - Bestrahlungsstärke 335
  - Bestrahlungsverfahren 444
  - Betrachtungsweise
    - kinetisch-statistische 160, 161, 162, 183
    - phänomenologische 160, 161, 183
  - Beugung 147, 149, 326, 332
  - Beugungsspektren 364
  - Beweglichkeit 294, 295, 298, 302
  - Bewegung
    - brownsche 182, 415
    - gleichförmige 72
    - gleichförmige geradlinige 62

- gleichmäßig beschleunigte 72
  - gleichmäßig beschleunigte geradlinige 65
  - thermische 182
  - Bewegungsänderung 74
  - Bewegungsart 58
  - Bewegungsgröße 107
  - Bewegungslehre 72
  - Bezugssystem 57, 461
    - beschleunigtes 459
    - mitbewegtes 84
    - ruhendes 84
    - unbeschleunigtes 57
  - Bilder
    - reelle 348
    - virtuelle 348
  - Bildkonstruktion 350
  - Bildpunkt 351
  - Bimetallstreifen 171
  - Bimetallthermometer 164
  - Bindungsenergie 445, 446
  - Blasenkammer 438
  - Blindleistung 291
  - Blindwiderstand 285, 286, 288
  - Blitze 224, 228, 300
  - Blockschaltbilder 280
  - BOHR, NIELS 418
  - bohorsche Postulate 417
  - bohorsche Radius 419
  - bohorsch Atommodell 417
  - BOLTZMANN, LUDWIG 178, 183, 214, 222
  - Bose-Einstein-Kondensat 50, 172
  - BOYLE, ROBERT 175
  - Bragg-Gleichung 392
  - BRAGG, WILLIAM HENRY 392
  - BRAGG, WILLIAM LAWRENCE 392
  - BRATTAIN, WALTER HOUSER 307
  - BRAUN, CARL FERDINAND 244
  - braunsche Röhre 244
  - Brechkraft 356
  - Brechung 147, 148, 149, 326, 345, 351, 332
  - Brechungsgesetz 326, 338, 339, 341
  - Brechzahl 338, 369
  - Bremsspektrum 390, 391
  - Bremsstrahlung 389
  - Brennpunkt 350
  - Brennpunktstrahlen 352
  - Brennweite 350
  - BREWSTER, DAVID 372
  - brewstersches Gesetz 372
  - BROWN, ROBERT 53
  - brownsche Bewegung 53, 182, 415
  - BUNSEN, ROBERT WILHELM 377
- c**
- C-14-Methode 443
  - CARNOT, SADI 12, 204
  - carnotscher Kreisprozess 204
  - CELSIUS, ANDERS 164
  - Celsiuskala 17, 163
  - CHADWICK, JAMES 432
  - Chaos
    - deterministisches 141
  - Chaostheorie 156
  - chaotische Systeme 155
  - charakteristisches Spektrum 390, 391
  - CLAUSIUS, RUDOLF 194, 212
  - COMPTON, ARTHUR HOLLY 394
  - Compton-Effekt 394
  - Compton-Wellenlänge 394
  - coulombsches Gesetz 227
  - CURIE, MARIE 435
  - CURIE, PIERRE 435
- D**
- DAIMLER, GOTTLIEB 209
  - DALTON, JOHN 180
  - Dampfmaschine 204, 210
  - Dampfturbinen 204
  - Dauermagnet 246
  - DA VINCI, LEONARDO 10
  - DE BROGLIE, LOUIS 398
  - de-Broglie-Wellenlänge 398, 411
  - Debye-Scherrer-Verfahren 393
  - Defektelektron 303
  - Definition 15
  - Dehnungsmessstreifen 75
  - Demodulation 329
  - DEMOKRIT 414
  - Denkmodelle 22
  - DESCARTES 28
  - Determinismus
    - klassischer 141
  - deterministisches Chaos 141, 154
  - Dichte 50, 51, 56, 445
    - der Kernmaterie 445
    - mittlere 51
  - Dickmessung 444
  - Dielektrikum 239
  - dielektrische Polarisierung 228
  - dielektrische Verschiebung 234
  - Dielektrizitätszahl 240
  - Dieselmotor 202, 210
  - Differenzmethode 50
  - Diffusion 215
  - Diffusionsfeld 305
  - Digital-Analog-Wandler 310
  - Digitaltechnik 276, 310, 328
  - Diode 306, 313
  - Dipole 322, 324
    - elektrische 228
  - DIRAC, P. A. M. 422
  - Dispersion 150, 339, 347
  - Dissoziation 224
  - Doppelbrechung 372
  - Doppelspalt-Experiment 396
  - DOPPLER, CHRISTIAN JOHANN 151
  - Dopplereffekt
    - akustischer 151
    - optischer 151, 472
    - relativistischer 472
  - Dosimeter 437
  - Drehbewegung 63, 109
  - Dreheisenmessgerät 267
  - Drehimpuls 18, 118, 120
  - Drehimpulserhaltungssatz 119, 120, 477
  - Drehkristallverfahren 393
  - Drehmoment 102, 104, 119
  - Drehpulsmessgerät 267
  - Drehwinkel 99
  - Drehzahl 63, 100
  - Driftgeschwindigkeit 294, 295

Druck 161, 188, 189  
 Druckwasserreaktor 449  
 Durchdringungsvermögen 436  
 Durchschnittsgeschwindigkeit 60  
 Durchschnittsleistung 95  
 Durchstrahlungsverfahren 444  
 Dynamik 73  
 dynamische Gesetze 21  
 dynamoelektrisches Prinzip 271  
 Dynamomaschine 271

## E

Ebbe 124  
 ebene Spiegel 349  
 Echo 148  
 Echolot 153  
 EDISON, THOMAS ALVA 301  
 Effekt 478, 479  
 – äußerer lichtelektrischer 382  
 – glühelektrischer 301  
 – innerer lichtelektrischer 382  
 – lichtelektrischer 301  
 Effektivwerte 284, 292  
 Eigenfunktionen 422  
 Eigenlänge 470  
 Eigenleitung 302, 303  
 Eigenschwingungen 321  
 Eigenzeit 468  
 Einheitensystem  
 – internationales 50, 52, 337  
 EINSTEIN, ALBERT 301, 384, 386, 415, 464, 471, 478, 479, 480  
 Einstein-Gerade 384  
 einsteinsche Gleichung 384  
 Einteilung von Bewegungen 58  
 Elektrizitätszähler 277  
 Elektrode 265  
 Elektrolyse 298  
 – Gesetze 298  
 Elektrolyte 265, 298  
 Elektromagnet 246  
 Elektrometer 229

Elektromotor 267  
 elektromotorisches Prinzip 260  
 Elektronen 224, 242, 432, 451  
 Elektronenmikroskop 256, 399  
 Elektronenröhre 301, 306, 321  
 Elektronenspin 425  
 Elektronenstrahlröhre 242, 244, 301  
 Elektronenvolt 244  
 Elektroraffination 299  
 Elektroskop 229  
 Elektrotauchlackierung 299  
 Elementarladung 18, 225, 299  
 Elementarmagnet 246  
 Elementarteilchen 451  
 Elementarwellen 148  
 Elemente  
 – galvanische 224  
 Elongation 135, 145  
 Emission 300, 431  
 – induzierte 429  
 – spontane 429  
 Emission eines Photons 418  
 Emissionsgrad 219  
 Empfangsdipole 328, 329  
 Endoskop 342  
 Energie 18, 127, 128, 166, 189, 238, 244, 384, 436, 477  
 – chemische 89  
 – innere 161, 165, 179, 186, 193  
 – kinetische 89, 161  
 – magnetische 89  
 – mittlere kinetische 192  
 – potenzielle 89, 126, 128, 129, 237  
 – relativistische kinetische 476  
 – thermische 89, 165  
 Energiebilanz 114  
 Energiedosis 456  
 Energieerhaltungssatz 87, 96, 194, 266, 275, 475  
 Energieerhaltungssatz der Mechanik 88  
 Energieniveau  
 – diskretes 420

Energieniveauschema 424, 431  
 Energieverteilung 186  
 Entladestrom 239  
 Entropie 161, 212, 213, 214  
 Entspiegelung 368  
 Erdanziehungskraft 121  
 Erdbebenwellen 144  
 Erdmagnetfeld 248  
 Ereigniskegel 471  
 Erhaltungsgrößen 18  
 Erhaltungssatz 41, 111, 229, 477  
 Ersatzschaltung 280  
 Erstarrungstemperatur 172  
 Erstarrungswärme 173  
 Expansion  
 – adiabatische 202  
 Experiment 28, 29

## F

Fachbegriffe 16  
 Fadenpendel 139  
 FAHRENHEIT, DANIEL 164  
 Fahrenheitskala 17  
 Fahrraddynamo 271  
 Fallbeschleunigung 67, 125, 139  
 Fallgesetze 67  
 Faraday-Effekt 371  
 FARADAY, MICHAEL 125, 230, 239, 265, 298, 314  
 faradaysche Gesetze 298  
 faradayscher Käfig 232  
 faradaysches Induktionsgesetz 265  
 Farben 364  
 Farbenkreis 378  
 Farbenlehre 375  
 Farbmischung  
 – additive 378  
 – subtraktive 378  
 Farbstofflaser 430  
 Fata Morgana 345  
 Federkraftmesser 75  
 Federschwinger 138  
 Fehler  
 – absolute 46  
 – prozentuale 46  
 – relative 46  
 Fehlerbalken 48

- Fehlerbetrachtung 45  
   – nach der Messung 48  
   – vor der Messung 48  
 Fehlerfortpflanzung 47  
 Fehlerkästchen 48  
 Fehlerrechnung 48  
 FEIGENBAUM, MITCHELL 157  
 Feld 16, 265  
   – elektrisches 125, 230  
   – elektromagnetisches 316  
   – homogenes 230  
   – homogenes magnetisches 259  
   – inhomogenes 230  
   – magnetisches 125, 231, 247  
   – radialsymmetrisches 231  
   – statisches 230  
 Feldeffekttransistor 309  
 Feldenergie 240  
 Feldkraft 233  
 Feldlinienbild 125, 230, 247  
 Feldstärke 233  
   – elektrische 232, 238, 316, 318  
   – magnetische 250  
 Feldtheorie 125  
   – elektromagnetische 314  
 Fenster  
   – optisches 331  
 FERMAT 28  
 fermatisches Prinzip 335, 338  
 Fermienergie 296  
 FERMI, ENRICO 296  
 Fernfeld 323  
 Fernrohr 353, 359  
   – keplersches 358  
 Fernsehbiröhre 244, 256  
 Fernwirkungsprinzip 12  
 Fernwirkungstheorie 230  
 ferromagnetische Stoffe 246  
 Festkörperlaser 430  
 Festkörperphysik 302  
 Feuerzeug  
   – pneumatisches 202  
 Filmdosimeter 437  
 Filter 289  
 Fixpunkte 163  
 Fläche  
   – wirksame 262  
 Flächenladungsdichte 234  
 Flaschen  
   – magnetische 256  
 Flaschenzüge 74  
 Fluss  
   – magnetischer 263, 273  
 Flusssdichte  
   – elektrische 234  
   – magnetische 249, 250, 254, 316, 318  
 Flüssigkeitsthermometer 171  
 Flüssigkristallanzeige 374  
 Fotoapparat 353  
 Fotoeffekt  
   – äußerer 382, 411  
 Fotoemission 301  
 Fotowiderstand 304  
 FOUCAULT, LEON 85, 336  
 Franck-Hertz-Versuch 427  
 FRANCK, JAMES 427, 428  
 FRANKLIN, BENJAMIN 224  
 fraunhoferische Linien 363, 376  
 Freiheitsgrade 190  
 Frequenz 17, 63, 135, 142, 145, 281, 323, 326  
 Frequenzmodulation 328  
 FRESNEL, AUGUSTIN JEAN 12, 148  
 Fresnellinsen 351  
 FRIEDRICH, WALTHER 392  
 Fullereine 397  
 Füllstandsmessung 444  
 Funkenentladung 300  
 Fusionsreaktoren 450
- G**
- GALILEI, GALILEO 10, 67, 28, 31  
 galileisches Relativitätsprinzip 459  
 Galilei-Transformation 57, 460, 465  
 galvanische Elemente 224  
 Gammastrahlung 330  
 Gangunterschied 150, 361  
 Gas 415  
   – ideales 165, 179, 189, 197, 200, 201  
 Gasentladung  
   – selbstständige 300  
 Gasgleichung  
   – allgemeine 175  
 Gaskonstante 178  
   – allgemeine 177  
   – spezifische 178, 200  
 Gaslaser 430  
 Gastheorie  
   – kinetische 162  
 Gasturbinen 204  
 Gasturbinenprozess 206  
 GAU 450  
 GAUSS, CARL FRIEDRICH 264  
 GAY-LUSSAC, JOSEPH LOUIS 12, 170, 175  
 Gedankenexperiment 31, 403, 466  
 Gegenfeldmethode 384  
 Gegenstandspunkt 351  
 GEIGER, HANS 438  
 Geiger-Müller-Zählrohr 438  
 GELL-MANN, M. 453  
 geneigte Ebene 74  
 Generator 263, 267, 270  
 Generatorprinzip 260  
 genetische Schäden 440  
 geometrische Optik 334  
 Gesamtenergie 186, 480  
 Gesamtkraft 86  
 Gesamtwirkungsgrad 95  
 Geschütze  
   – rückstoßfreie 112  
 Geschwindigkeit 59, 60, 115, 117, 137, 161, 186, 188, 461, 471, 473, 477  
   – Änderung 461  
   – mittlere 184, 192  
   – wahrscheinlichste 184  
 Geschwindigkeitsfilter 257  
 Geschwindigkeitsverteilung 162  
   – maxwellsche 184  
 Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz 62, 65, 137  
 Gesetz  
   – 1. faradaysches 298  
   – 2. faradaysches 299  
   – brewstersches 372  
   – coulombsches 227  
   – hookesches 138  
   – keplersches 132  
   – lenzsches 264, 266  
 Gesetz der Erhaltung der Masse 51

- Gesetz der konstanten Proportionen 180  
 Gesetze 19  
   – dynamische 21  
   – faradaysche 298  
   – keplersche 121  
   – kirchhoffsche 279, 280  
   – physikalische 193  
   – statistische 21  
 Gesetze der Elektrolyse 298  
 Gesetz von der Erhaltung der Energie 87, 96  
 Gesetz von der Erhaltung der Masse 180  
 gesteuerte Kettenreaktion 449  
 Gewichtskraft 73, 76, 82  
 Gitter 363, 376  
 Gitterkonstante 364  
 Gitterspektren 364  
 Glasfaserkabel 342  
 Gleichgewicht  
   – indifferentes 97  
   – labiles 97, 98  
   – stabiles 97, 98  
 Gleichrichter 306  
 Gleichrichterschaltung 281  
 Gleichstrom 281, 292  
 Gleichstromgenerator 270  
 Gleichstromkreis 276, 284  
 Gleichung  
   – einsteinsche 384  
 Gleichverteilung 183  
 Gleichzeitigkeit 464, 466, 480  
   – Definition 466  
   – Relativität 467  
 Glimmlampe 270, 300  
 Glimmlicht 300  
 Glockenzählrohr 438  
 glühelektrischer Effekt 301  
 Glühemission 301  
 Glühlampe 429  
 Gravitation 121, 123  
 Gravitationsfeld 126, 132  
 Gravitationsfeldstärke 132  
 Gravitationsgesetz 123, 132  
 Gravitationskonstante 123  
 Gravitationskräfte 132  
 Gravitationslinsen 479  
 Graviton 454  
 Grenzfrequenz 385, 389  
 Grenzschiicht 305  
 Grenzwinkel 341  
 Größen  
   – feldbeschreibende 258  
   – gerichtete 18, 74  
   – physikalische 17  
   – skalare (ungerichtete) 18  
   – vektorielle 18, 59, 74, 107, 109, 118  
 Größtfehler 46  
 Grundfarben 375, 378  
 Grundgesetz  
   – newtonsches 86  
 Grundgesetz der Dynamik der Rotation 104, 106  
 Grundgesetz des Wärmeaustauschs 167  
 Grundgesetze der Dynamik 78  
 Grundgleichung der kinetischen Gastheorie 187, 188, 192  
 Grundgleichung der Wärmelehre 166, 179  
 Grundschiingung 324
- H**
- Hadron 451  
 Hafele-Keating-Experiment 469  
 HAHN, OTTO 448  
 Halbleiter 302, 304  
 Halbleiter-Elektronik 307  
 Halbwertsdicke 437  
 Halbwertszeit 441  
 HALL, EDWIN HERBERT 255  
 Hall-Effekt 255  
 Hall-Sonde 254, 315  
 Hall-Spannung 255, 256  
 HALLWACHS, WILHELM 301, 382  
 Halogenlampe 274, 429  
 Hangabtriebskraft 76  
 harmonische Schwiingung 135  
 Härte der Feder 75  
 Hauptquantenzahl 418  
 Hauptsätze der Thermodynamik 217  
 Hebel 74  
 HEISENBERG, WERNER 407  
 Heißeleiter 304  
 Heißebluftmotor 206, 210  
 Heliumsynthese 450  
 HELMHOLTZ, HERMANN VON 251  
 HENRY, JOSEPH 269  
 HERTZ, GUSTAV 427, 428  
 HERTZ, HEINRICH 63, 135, 322  
 hertzische Wellen 316, 322, 325, 326, 330  
 HF-Schwiingungen 328  
 Hochfrequenz-Schwiingungen 328  
 Hochpass 289  
 Hochtemperatur-Supraleiter 296  
 Hohlspiegel 349, 350  
 Holografie 367  
 Hologramme 367  
 HOOKE, ROBERT 75, 357, 358  
 hookesches Gesetz 75, 138  
 Hörbereich 152  
 Hörfläche 152  
 HUYGENS, CHRISTIAAN 147, 372  
 huygens-fresnelsches Prinzip 148  
 huygenssches Prinzip 147, 335  
 Hyperon 451  
 Hypothese 23, 28
- I**
- ideales Gas 165, 179, 189, 197, 200, 201  
   – Modell 162  
   – Zustandsgleichung 189, 199  
 Idealisierung 21  
 ideale Modelle 22  
 Impuls 18, 107, 108, 109, 110, 118, 120, 188, 477  
 Impulsänderung 108  
 Impulserhaltung 113  
 Impulserhaltungssatz 110, 111, 120, 473, 477  
 Impuls laser 430  
 Impuls masse 476  
 indifferentes Gleichgewicht 97

- Induktion  
   – elektromagnetische 261  
   – magnetische 249  
 Induktionsgesetz 262, 263, 275  
   – faradaysches 265  
 Induktionshärten 267  
 Induktionsherd 267  
 Induktionskanone 268  
 Induktionsspannung 261, 262  
 Induktionsstrom 261  
 Induktionszähler 267  
 induktiver Widerstand 285, 288, 292  
 Induktivität 17, 322  
 induzierte Emission 429  
 Inertialsysteme 57, 78, 459, 460, 467  
 Influenz 228  
 Informationsübertragung 342  
 infrarotes Licht 330  
 Infrarotfotografie 218  
 Infrarotfall 152  
 Innenpolmaschine 270, 271  
 innere Energie 161, 165, 179, 186, 193  
 innerer lichtelektrischer Effekt 382  
 Interferenz 147, 149, 326, 345, 360, 361, 363, 364, 366, 388, 380, 332  
 Interferenz am Doppelspalt 412  
 Interferenzfarben 368  
 Interferenzmuster 150, 408, 409  
 Interferometer 370, 403  
 Internationales Einheiten-system 17, 50, 52, 337  
 Ionen 265, 298  
 Ionenmasse 257  
 Ionenquelle 257  
 Ionisation 299, 300  
 Ionisationskammer 438  
 Ionisierung 431  
 Ionisierungsenergie 420  
 irreversible Vorgänge 211, 213  
 isobare Zustandsänderung 201  
 isochore Zustandsänderung 200  
 isotherme Zustandsänderung 198, 200  
 Isotope 433  
 Isotopentrennung 434
- J**  
 JOHN, JOSEPH 257  
 JÖNSSON, CLAUS 396  
 JOSEPHSON, BRIAN DAVID 297  
 JOULE, JAMES PRESCOTT 87, 195, 196
- K**  
 Käfig  
   – faradayscher 232  
 Kalkspat 372  
 Kalorimeter 169  
 kalorimetrische Messung 168  
 Kaltleiter 304  
 KAMERLINGH-ONNES, HEIKE 296  
 Kaon 451  
 Kapazität 239, 329  
 kapazitiver Widerstand 286, 288, 292  
 Kapillarität 54  
 Kationen 298  
 Katode 265  
 Kausalität 154  
 Kausalitätsprinzip 12, 154  
 KELVIN, Lord 163, 164  
 Kelvinskala 17, 163  
 Kennlinienfeld 308  
 KEPLER, JOHANNES 121, 358  
 keplersche Gesetze 14, 121, 132  
 keplersches Fernrohr 358  
 Kernbausteine 456  
 Kernenergie 89  
 Kernfusion 256, 435, 446, 450, 456  
 Kernkraft 445  
 Kernkraftwerke 449  
 Kernladungszahl 432  
 Kernmasse 445  
 Kernmaterie  
   – Dichte 445  
 Kernradius 416, 445  
 Kernreaktion 435  
 Kernspaltung 435, 446, 448, 456  
 Kernstrahlung 435, 436  
 Kernumwandlungen 435  
   – künstliche 442  
 Kerr-Effekt 373  
 KERR, JOHN 373  
 Kettenreaktion  
   – gesteuerte 449  
*k*-Faktor 465  
 Kinematik 72  
 kinetische Energie 89, 161  
 kinetische Gastheorie 162  
   – Grundgleichung 187, 188, 189, 192  
 kinetisch-statische  
   Beschreibung von Gasen 192  
 kinetisch-statistische  
   Betrachtungsweise 160, 161, 162, 183  
 KIRCHHOFF, GUSTAV ROBERT 219, 279, 377  
 kirchhoffsche Gesetze 279, 280  
 kirchhoffsche Regeln 280  
 kirchhoffsches Strahlungsgesetz 219  
 klassischer Determinismus 141  
 Klemmenspannung 279  
 KNIPPING, PAUL 392  
 Knotenpunktsatz 280  
 kohärentes Licht 361  
 Kohärenz 150  
 Kohäsion 54  
 Kohäsionskräfte 54  
 Komplementärfarben 375, 377  
 Komplementarität 404, 405  
 Komplementaritätsprinzip 404, 405  
 Kondensationstemperatur 173  
 Kondensationswärme 174  
 Kondensator 239  
 Konkavlinse 351  
 Konkavspiegel 349  
 Konstantspannungsquelle 306

- Konvektion 166  
 Konkavlinse 351  
 Konvexspiegel 349  
 KOPERNIKUS, NIKOLAUS 121  
 Körper  
   – elastischer 56  
   – geladener 227  
   – ideal elastischer 55  
   – ideal unelastischer 55  
   – schwarzer 219  
   – starrer 55, 56, 97  
   – unelastischer 56  
 Körperfarbe 377  
 Korpuskulartheorie 334  
 kosmische Strahlung 330  
 Kraft 102, 110, 461, 477  
   – resultierende 86  
 Kraftarm 102  
 Kräftegleichgewicht 81  
 Kräfteparallelogramm 76  
 Kraftmessung  
   – dynamische 75  
   – elektrische 75  
   – statische 75  
 Kraftmoment 102  
 Kraftstoß 108, 109  
 kraftumformende Einrich-  
   tungen 74  
 Kreisbahngeschwindigkeit  
   – minimale 130  
 Kreisbewegung 63, 85  
   – gleichförmige 136  
 Kreisel 105, 119  
 Kreisfrequenz 136, 137, 145,  
   282  
 Kreisprozess 217  
   – carnotscher 204  
   – stirlingscher 206  
 kristalline Stoffe 172  
 kritische Masse 449  
 Kühlmaschinen 204  
 Kühlschränke 208  
 künstliche Kernumwand-  
   lungen 442  
 künstliche Radioaktivität 442
- L**
- labiles Gleichgewicht 97, 98  
 Ladestrom 239  
 Ladung  
   – bewegte 226  
   – elektrische 225  
   – spezifische 242, 254, 257  
 Ladungsausgleich 227  
 Ladungsmessung 229  
 Ladungsteilung 227  
 Ladungsträgerdichte 294,  
   302  
 Ladungstrennung 224, 227  
 Ladungsverschiebung 227  
 Längenkontraktion 470, 480  
 Längenmessung 470, 480  
 Längsfeld  
   – homogenes 242  
 Lärm 152  
 Laser 361, 429  
   – kontinuierliche 430  
 Laserlicht 371, 387  
 Lasermedium 430  
 Laserstrahlung 430  
 Laue-Diagramm 393  
 Laue-Verfahren 393  
 Lautstärke 153  
 LCD 374  
 Leerlaufspannung 279  
 Leistung 226  
   – elektrische 277  
   – mechanische 94, 96  
 Leistungsfaktor 291  
 Leistungsmesser 277  
 Leistungsumsatz 284  
 Leitfähigkeit  
   – spezifische elektrische 295  
 Leitungsband 296  
 Leitungsverluste 274  
 Leitungsvorgang 313  
   – elektrischer 293  
 LENARD, PHILIPP 415  
 LENZ, HEINRICH FRIEDRICH  
   EMIL 266  
 lenzsches Gesetz 264, 266  
 Lepton 451, 456  
 Leuchtdiode 361  
 Leuchtröhre 300  
 Leuchtstofflampe 270, 300,  
   429  
 Licht  
   – infrarotes 330  
   – kohärentes 361  
   – monochromatisches 361  
   – sichtbares 330  
   – ultraviolette 330  
 Lichtbündel 334  
 lichtelektrischer Effekt 301  
 Lichtenergie 89  
 Lichtgeschwindigkeit 336,  
   337, 338, 370, 463, 464, 473  
   – Konstanz 464  
 Lichtmikroskop 358  
 Lichtquanten 411  
 Lichtquellen 371  
 Lichtstrahl  
   – Modell 334  
 Lichtuhr 31  
 Linien  
   – fraunhofersche 363, 376  
 Linke-Hand-Regel 249, 253,  
   255  
 Linsen 351  
   – magnetische 256  
 Linsensysteme 353  
 Loch  
   – schwarzes 479  
 Lochkamera 348  
 Longitudinalwellen 144  
 Lord KELVIN 320  
 Lord RAYLEIGH 346  
 Lorentz-Faktor 465  
 LORENTZ, HENDRIK ANTOON  
   252, 465  
 Lorentzkraft 259  
 Lorentz-Transformation 465,  
   467, 468, 470, 471  
 Luftspiegelungen 339, 345  
 Luftwiderstandskraft 83  
 Lupe 356, 359
- M**
- Magnetfeld 258, 297  
   – homogenes 251  
   – zeitlich konstantes 263  
   – zeitlich veränderliches  
   263  
 magnetische Energie 89  
 magnetische Feldstärke 250  
 magnetische Flaschen 256  
 magnetische Flussdichte 249,  
   250, 254, 316, 259  
 magnetische Induktion 249  
 magnetische Linsen 256  
 magnetischer Fluss 263, 273  
 magnetisches Feld 125, 231,  
   247

- Magnetpendel 141  
 Magnetpole 246  
 Magnetron 324  
 MARIOTTE, EDME 175  
 Markierungsverfahren 444  
 Maschensatz 280  
 Masse 50, 56, 108, 254, 461, 473, 477  
   – dynamische 473  
   – kritische 449  
   – relativistische 473  
   – Satz von der Erhaltung 475, 477  
 Massendefekt 446, 456  
 Massenmittelpunkt 97  
 Massenpunkt 55  
 Massenspektrograf 181, 257, 432, 434  
 Massenspektroskopie 257  
 Massenzahl 432  
 Massepunkt 55, 56, 63, 109, 139  
 Masse von Atomen 181  
 Masse von Körpern 480  
 Materiewellen 398  
 MAXWELL, JAMES CLERK 183, 184, 314, 316, 322, 464  
 maxwellische Geschwindigkeitsverteilung 184  
 MAYBACH, WILHELM 209  
 MAYER, JULIUS ROBERT 87  
 Mechanik  
   – newtonsche 459, 480  
 mechanische Arbeit 16, 96, 193, 195, 197, 198, 236  
 mechanische Leistung 94  
 mechanische Schwingung 133  
 mechanisches Wärmeäquivalent 195, 196  
 MEISSNER, ALEXANDER 321  
 Meissner-Ochsenfeld-Effekt 297  
 meißnersche Rückkopplungsschaltung 321  
 MEITNER, LISE 448  
 menschliches Auge 359  
 Merkur 478  
 Meson 451  
 Messbereich 38  
 Messbereichserweiterung 278  
 Messfehler 38  
 Messgenauigkeit 38, 355  
 Messgerätefehler 45  
 Messschaltung 278  
 Messung  
   – kalorimetrische 168  
 Messwert 44  
 Messzylinder 50, 56  
 Metallbindung 293  
 Meteore 128  
 Meteoroiden 128  
 Meter  
   – Definition 337  
 Methode  
   – besselsche 355  
   – experimentelle 28  
   – galileische 28  
   – heuristische 26  
 MICHELSON, ALBERT ABRAHAM 336, 370, 462, 463  
 Michelson-Interferometer 462  
 Michelson-Morley-Experiment 465  
 MIE, ADOLF 346  
 Mikrofonverstärker 309  
 Mikroskop 353, 356, 359  
 Mikrowellen 325, 330  
 Mikrowellengerät 324  
 Mikrowellensender 325  
 Millikan-Versuch 242  
 minimale Kreisbahngeschwindigkeit 130  
 Minkowski-Diagramme 460  
 MINKOWSKI, HERMANN 460, 471  
 Mischfarbe 377  
 Mischungsregel  
   – richmannsche 168  
 Mischungstemperatur 167  
 Mittelpunktstrahlen 352  
 mittlere Beschleunigung 61  
 mittlere Dichte 51  
 mittlere freie Weglänge 415  
 mittlere Geschwindigkeit 184, 192  
 mittlere kinetische Energie 192  
 Modelle 21, 55, 97  
   – ideelle 22  
   – materielle 22  
   – physikalische 417  
 Modellexperimente 22  
 Modell Feldlinienbild 259  
 Modell ideales Gas 162  
 Modell Lichtstrahl 334, 347  
 Modell Lichtwelle 347  
 Modell Massepunkt 58, 107  
 Modell starrer Körper 106  
 Moderatoren 449  
 Modulation 328  
 Molekularbewegung 182, 186  
 Moleküle 161  
 Momentangeschwindigkeit 60  
 Mondrechnung 122  
 monochromatisches Licht 361  
 Morgenrot 346  
 Motoren 204  
 MÜLLER, WALTHER 438  
 Musik 152  
 Myon 451, 469
- N**
- Nachrichtentechnik 342  
 Nachweismethoden 437  
 Nahfeld 323  
 Nahwirkungstheorie 230  
 Natriumdampfampe 300  
 Naturkonstanten 18  
 natürlicher Treibhauseffekt 220  
 natürliche Strahlenbelastung 440  
 natürliche Zerfallsreihen 442  
 Nebelkammer 438  
 Nebenregenbogen 344, 345  
 NERNST, WALTHER 216  
 Netzgerät 274  
 Netzwerke 280  
 Neutrino 447  
 Neutronen 442, 451, 456  
   – thermische 449  
 NEWTON, ISAAC 11, 12, 22, 74, 78, 79, 123, 130, 334, 369, 375, 458, 459

newtonsche Mechanik 459, 480  
 newtonsche Ringe 369  
 newtonsches Grundgesetz 79, 86  
 Newtons Mondrechnung 122  
 NF-Schwingungen 328  
 nichtlineare Physik 13  
 Niederfrequenz-Schwingungen 328  
 n-Leitung 304  
 Nordpol 247  
 Normalkraft 76, 83  
 Normalvergrößerung 357  
 Normfarbtafel 379  
 npn-Transistor 307  
 Nukleonen 432  
 Nukleonenzahl 432  
 Nuklide 433, 441, 448  
 – radioaktive 435  
 Nuklidkarte 433, 482, 483  
 Nulleffekt 438  
 Nullpunkt 163  
 – absoluter 163

**O**

Oberflächenvergütung 368  
 Oberflächenwellen 144  
 Objekte  
 – makroskopische 408  
 Objektiv 358  
 OERSTED, HANS CHRISTIAN 246  
 OHM, GEORG SIMON 284  
 ohmscher Widerstand 288, 292  
 Okular 358  
 Ölfleckmethode 181  
 Ölfleckversuch 415  
 Operationsverstärker 310  
 Optik  
 – geometrische 334  
 optischer Dopplereffekt 151, 472  
 optisches Fenster 331  
 optisches Gerät 357  
 optisches Gitter 380  
 Orbitale 422  
 Ordnungszahl 432  
 Ort eines Körpers 57

Ortsfaktor 67, 82, 125  
 Ortsmessung 403  
 Ortsvektor 59  
 Ortsveränderung 59  
 Oszillograf 244  
 Oszillografenbildröhre 244  
 Ottomotor 209

**P**

Paarbildung 303, 452  
 Paarerzeugung 452  
 Paazerstrahlung 452  
 Packungsmodell 302  
 Parabolspiegel 349  
 Parallelstrahlen 352  
 Pauli-Prinzip 425, 426, 447  
 PAULI, WOLFGANG 426  
 Pendel  
 – mathematisches 139  
 – physisches 139  
 Periheldrehung 478  
 Periodendauer 16, 135  
 Periodensystem der Elemente 426, 432, 433, 434, 446  
 Permanentmagnet 246  
 Permeabilitätszahl 251  
 Permittivitätszahl 240  
 Perpetuum mobile 88, 194  
 – 1. Art 194  
 – 2. Art 216  
 phänomenologische Betrachtungsweise 160, 161, 183  
 Phase 136, 173  
 Phasengeschwindigkeit 145  
 Phasensprung 369  
 Phasenumwandlung 173  
 Phasenverschiebung 282, 286, 289, 291  
 Phasenwinkel 136  
 Photon 411, 451  
 – Absorption 418  
 – Emission 418  
 Photonentheorie 334  
 Pion 451  
 Pix II, HIPPOLYTE 271  
 Planartechnik 53, 309  
 Planck-Konstante 384  
 PLANCK, MAX 13, 221, 382  
 plancksches Strahlungsgesetz 221

plancksches Wirkungs-quantum 383, 384, 409  
 Planetenmodell 417  
 Plasma 50, 172, 256  
 Plattenkondensator 245  
 p-Leitung 304  
 pnp-Transistor 307  
 pn-Übergang 305  
 Polarisierung 150, 332  
 – dielektrische 228  
 Polarisationsfilter 371  
 Polarlichter 256  
 Positron 442, 447, 451  
 Postulate  
 – bohrsche 417  
 Potenzial 128, 129, 237  
 Potenzialtopf 422  
 – linearer 431  
 Potenzialtopfmodell 446, 447  
 Potenzialwall 446  
 potenzielle Energie 89, 126, 128, 129, 237  
 Potenziometerschaltung 278  
 Prinzip  
 – dynamoelektrisches 271  
 – elektromotorisches 260  
 – fermatsches 335, 338  
 – huygens-fresnelsches 148  
 – huygenssches 147, 335  
 Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 480  
 Prismen 343  
 PROCHOROW, ALEXANDER M. 430  
 Proton 451, 456  
 Proton-Proton-Reaktion 450  
 Prozessgrößen 109, 160, 161, 165  
 PTOLEMÄUS, CLAUDIUS 9

**Q**

Quantenobjekte 396, 397, 398, 402, 419  
 – einzelne 412  
 Quantenphysik 382, 403, 418  
 quantenphysikalisches Atommodell 422  
 Quantentheorie 13, 221, 382, 395, 400  
 Quarks 453  
 Quasare 472

Quecksilberdampflampe 300  
 Querfeld  
 – homogenes 243

## R

Radar 327  
 Radialbeschleunigung 61,  
 64, 417  
 Radialfeld 231, 234, 236  
 Radialkraft 84, 122  
 radioaktive Nuklide 435  
 radioaktive Strahlung 435,  
 437  
 Radioaktivität 456  
 – künstliche 442  
 Radiofenster 331  
 Radiokarbonmethode 443  
 Radiokohlenstoffmethode  
 443  
 Radionuklide 435  
 Raketengrundgleichung 112  
 Randkrümmung 54  
 Randstrahlen 334  
 Raum 471  
 – absoluter 458  
 räumliche Verteilung 161  
 RC-Hochpass 289  
 RC-Tiefpass 289  
 RÉAUMUR, RÉNE-ANTOINE  
 164  
 Réaumurkala 17  
 Rechte-Hand-Regel 249, 253  
 reelle Bilder 348  
 Reflexion 147, 148, 326, 337,  
 338, 351, 372, 332  
 Reflexionsgesetz 326, 339  
 Reflexionsgitter 364  
 Regel  
 – lenzsche 266  
 – kirchhoffsche 280  
 Regenbogen 344  
 Reibungselektrizität 224  
 Reibungskräfte 73, 83  
 Reihenschaltung 288, 291  
 relative Atommasse 181  
 relative Fehler 46  
 relativistische kinetische  
 Energie 476  
 relativistische Masse 473  
 relativistischer Dopplereffekt  
 472

relativistische Rot-  
 verschiebung 479  
 Relativität der Bewegung 57  
 Relativität der Zeitmessung  
 467  
 Relativitätsprinzip 480  
 – allgemeines 478  
 – galileisches 459  
 Relativitätstheorie 13, 31  
 – allgemeine 458, 478  
 – spezielle 458, 478  
 Resonanz 140, 321, 324  
 Resonanzkurve 140  
 Restmagnetismus 258  
 Resultierende 76  
 reversible Vorgänge 211  
 RICHMANN, GEORG WILHELM  
 168  
 richmannsche Mischungs-  
 regel 168  
 Rollen 74  
 Röntgendiagnostik 391  
 Röntgensatelliten 389  
 Röntgenstrahlung 324, 330,  
 388, 390, 391, 392, 437  
 Röntgenstrukturanalyse 391,  
 393  
 Röntgentherapie 391  
 RÖNTGEN, WILHELM CONRAD  
 388  
 Rotation 101  
 Rotationsenergie 88, 89,  
 104, 106  
 Rotverschiebung 472  
 – relativistische 479  
 ROWLAND, HENRY AUGUSTUS  
 363  
 Rückkopplung 321  
 – positive 155  
 Rückkopplungsschaltung  
 – meißnersche 321  
 Rückstoß 111  
 rückstoßfreie Geschütze 112  
 Rückstoßprinzip 112  
 Rückwirkung 273  
 Ruheenergie 475, 476  
 RUTHERFORD, ERNEST 416,  
 432, 442  
 rutherfordisches Atommodell  
 417  
 Rydberg-Frequenz 416, 420

## S

Sammellinse 351, 352, 353,  
 358  
 Satz von der Erhaltung der  
 Masse 475, 477  
 Schäden  
 – genetische 440  
 – somatische 440  
 Schalenmodell 425, 426  
 Schallwellen 144, 148, 149,  
 150, 151  
 Schalter 309  
 – elektronischer 308  
 Scheinkräfte 85  
 Scheinleistung 291  
 Scheinwiderstand 288, 289  
 SCHERRER, PAUL 393  
 Schmelzenergie 173  
 Schmelzenthalpie 173  
 Schmelzflusselektrolyse 299  
 Schmelztemperatur 172  
 Schmelzwärme 173  
 Schnellkochtopf 174  
 SCHRÖDINGER, ERWIN 410,  
 422  
 Schrödingergleichung 423  
 Schrödingers Katze 410  
 Schubkraft 73  
 Schüttelapparat 187  
 Schwankung  
 – statistische 183  
 schwarze Löcher 479  
 schwarzer Körper 219  
 schwarzer Strahler 219  
 Schwebung 142  
 Schwellenspannung 306  
 Schwere 78  
 Schwerpunkt 97, 113  
 Schwerpunktsatz 113  
 Schwingkreis 332  
 Schwingung 15, 133, 143  
 – elektromagnetische 318  
 – erzwungene 140, 321  
 – freie 321  
 – gedämpfte 136, 139, 321  
 – harmonische 135  
 – lineare 134  
 – mechanische 133  
 – ungedämpfte 321  
 Schwingungsbäume 151  
 Schwingungsdämpfer 140

- Schwingungsdauer 16, 135, 145, 146, 332
- Schwingungsgleichung 158  
– thomsonsche 319, 320
- Schwingungsknoten 151
- Schwungräder 105
- Seegerkegel 164
- Sehwinkel  
– kleinster 367
- Sekundärelektronenverstärker 439
- Selbstinduktion 268, 285
- selbstständige Gasentladung 300
- senkrechter Wurf 70  
– nach oben 70  
– nach unten 70
- Sensoren 311
- Serienformeln 416
- SHOCKLEY, WILLIAM 307
- sichtbares Licht 330
- Siedetemperatur 173
- SIEMENS, WERNER VON 271
- Signal  
– analoges 310  
– digitales 310
- sinusförmige Wechselspannung 281
- skalare (ungerichtete) Größen 18
- somatische Schäden 440
- Sonne 429
- Sonnenwind 386
- Spannung 226  
– elektrische 276  
– mittlere 284
- Spannungsdoppelbrechung 373
- Spannungsoptik 373
- Spektralanalyse 380
- Spektralapparate 377
- Spektralfarben 375
- Spektren 376
- Spektrum 390  
– charakteristisches 390, 391  
– elektromagnetisches 327
- Sperrichtung 306
- Sperrschicht 305
- spezielle Relativitätstheorie 458, 478
- spezifische elektrische Leitfähigkeit 295
- spezifische Gaskonstante 178, 200
- spezifische Ladung 242, 254, 257
- spezifischer elektrischer Widerstand 295
- spezifische Wärmekapazität 166
- Spiegel 359  
– ebene 349  
– gewölbte 349
- Spintharoskop 438
- Spitzenentladung 300
- Sprungtemperatur 296
- Standardabweichung 46
- Standardmodell 453
- Standfestigkeit 98
- starrer Körper 55, 56, 97
- STEFAN, JOSEF 222
- stehende Wellen 151
- Steigzeit 71
- Stern-Gerlach-Versuch 425
- Stimmumfang 152
- Stirling-Motor 206, 210
- STIRLING, ROBERT 206
- stirlingscher Kreisprozess 206
- Stoffe  
– amorphe 172  
– ferromagnetische 246  
– kristalline 172  
– magnetisch harte 258  
– magnetisch weiche 258
- Stoffmenge 52, 178
- Störstellenleitung 303, 304
- Stoß 114 ff.
- Stoßionisation 300
- Strahlenbelastung 440, 441  
– durchschnittliche 440  
– natürliche 440
- Strahlenoptik 334
- Strahlenschäden 440
- Strahlenschutz 391
- Strahler  
– schwarzer 219
- Strahltriebwerke 204
- Strahlung  
– elektromagnetische 395  
– kosmische 330  
– radioaktive 435
- Strahlungsdruck 387
- Strahlungsenergie 89
- Strahlungsgesetz 164, 219, 222  
– kirchhoffsches 219, 222  
– plancksches 222  
– von Stefan und Boltzmann 219
- Strahlungsgleichgewicht 222
- Strahlungsgürtel 256
- Strahlungspyrometer 218
- STRASSMANN, FRITZ 448
- Streuung 150, 347
- Streuversuche 415, 452
- Stromstärke 226, 254, 284  
– Definition 226  
– elektrische 276  
– mittlere 283
- Stromverbundnetz 274
- STRUTT, JOHN WILLIAM 346
- subtraktive Farbmischung 378
- Südpol 247
- Superposition 68, 149
- Superpositionsprinzip 18, 68, 235
- Supraleitung 296
- Swing-by-Manöver 131
- Symbolschreibweise 433
- Synchrotronstrahlung 324
- Synchrozyklotron 256
- Synonyme 16
- System 87, 160, 161, 216  
– abgeschlossenes 110  
– chaotisches 155  
– thermodynamisches 160
- Systemgrenze 87
- Szintigrafie 444
- Szintillationszähler 439

## T

- Tachometer 60
- Teilchen 15, 480
- Teilchenanzahl 51, 161, 192
- Teilchenanzahldichte 183
- Teilchenbeschleuniger 256, 297, 324, 442, 474
- Teilchenbewegung 189
- Teilchengröße 162, 192
- Teilchenmodell 21, 53, 161, 398

- Teilchenzoo 451  
 Teilkräfte 76  
 Temperatur 17, 161, 163,  
   167, 179, 189, 207  
   – absolute 163  
 Temperaturausgleich 215  
 Temperaturmessung 164,  
   167  
 Temperaturskala  
   – absolute 163  
 Temperaturstrahlung 222  
 TESLA, NICOLA 249  
 Thermistor 304  
 Thermodiffusion 53, 303  
 Thermodynamik 160, 193  
 thermodynamisches System  
   160  
 thermodynamische Wahr-  
   scheinlichkeit 213  
 thermodynamische Zustands-  
   größe 163  
 Thermoelement 164  
 Thermofarben 164  
 Thermografie 218  
 Thermometer 164  
   – elektronisches 164  
 thomsonsche Schwingungs-  
   gleichung 319, 332  
 THOMSON, WILLIAM 163,  
   257, 320  
 Tiefspann 289  
 TOLMAN, RICHARD CHALE  
   294  
 Tolman-Versuch 294  
 Tongenerator 321  
 Tonhöhe 152  
 Totalreflexion 341, 347  
 TOWNES, CHARLES T. 430  
 Trägheit 78, 473  
 Trägheitsgesetz 78, 86  
 Trägheitskraft 84, 85  
 Trägheitsmoment 102, 103  
 Transformator 263, 267, 272,  
   273  
   – belasteter 272  
   – unbelasteter 272  
 Transistor 308, 309, 313, 321  
   – bipolarer 307  
   – unipolarer 309  
 Transistoreffekt 302, 307,  
   308  
 Translation 101  
 Transuran 442  
 Transversalwelle 144, 151,  
   371  
 Treibhauseffekt  
   – anthropogener 220  
   – natürlicher 220  
 Tröpfchenmodell 445
- U**  
 Überlaufmethode 50  
 Übersichtigkeit 356  
 Uhrenparadoxon 468  
 Ultraschall 152, 153  
 Ultraschalldiagnostik 153  
 Umkehrprismen 343  
 Unabhängigkeitsprinzip 68  
 Unbestimmtheit 407, 410  
   – objektive 402  
 Unbestimmtheitsrelation  
   402, 407  
 Unschärferelation 407  
 UVW-Regel 253
- V**  
 Vakuumlichtgeschwindigkeit  
   14, 464  
 Valenzband 296  
 vektorielle Größe 18, 59, 74,  
   107, 109, 118  
 Verbrennungswärme 166  
 Verdampfungswärme 174  
 Verdunsten 174  
 Verdunstungskälte 174  
 Verformung  
   – elastische 74  
   – plastische 74  
 Vergrößerung 357  
 Verschiebung  
   – dielektrische 234  
 Verschiebungsdichte  
   – elektrische 234  
 Verschiebungsgesetz  
   – wiensches 221  
 Verstärker 309  
 Versuch von Stern 184  
 Verteilung  
   – räumliche 161  
 Verwandlungswert 212  
 Viertakt-Verbrennungsmotor  
   206
- Voltmeter 278  
 Volumen 17, 50, 56, 161  
   – konstantes 199  
 Volumenarbeit 93, 197  
 Vorgänge  
   – irreversible 211, 213  
   – reversible 211  
   – umkehrbare 211
- W**  
 Waage 50, 56  
 waagerechter Wurf 243  
 wahrer Wert 44  
 Wahrscheinlichkeit 213, 400,  
   401  
   – thermodynamische 213  
 wahrscheinlichste Geschwin-  
   digkeit 184  
 WANKEL, FELIX 209  
 Wankelmotor 209  
 Wärme 16, 161, 165, 166,  
   179, 193, 195, 197, 199  
 Wärmeäquivalent  
   – mechanisches 195, 196  
 Wärmeaustausch 167, 168  
   – Grundgesetz 167  
 Wärmefluss 218  
 Wärmekapazität 168, 169  
   – spezifische 166  
 Wärmekraftmaschinen 217  
 Wärmelehre 160  
   – Grundgleichung 166,  
   179  
 Wärmeleitung 166  
 Wärmemenge 16  
 Wärmepumpe 207, 208  
 Wärmequelle 166  
 Wärmestrahlung 166, 218  
 Wärmeströmung 166  
 Wärmethorem 216  
 Wärmetod 213  
 Wasser  
   – Anomalie 170  
 Wasserkraft 73  
 Wasserwellen 144  
 WATT, JAMES 94, 204, 210,  
   277  
 WEBER, WILHELM EDUARD  
   264  
 Wechselfspannung 270  
   – sinusförmige 281

- Wechselstrom 276, 284, 292  
   – technischer 330  
   – tonfrequenter 330  
 Wechselstromgenerator 270, 271  
 Wechselstromkreis 284, 288  
 Wechselstromwiderstand 285, 288  
 Wechselwirkung 81  
 Wechselwirkungen  
   – fundamentale 454  
 Wechselwirkungsgesetz 86  
 Wechselwirkungsgröße 18, 74  
 Wechselwirkungskräfte 80  
 Weg 59, 461  
 Weglänge  
   – mittlere freie 415  
 Weg-Zeit-Gesetz 62, 65  
 WEHNELT, ARTHUR 301  
 weißsche Bereiche 258  
 Weitsichtigkeit 356  
 Wellen 16, 145, 158  
   – elektromagnetische 146, 316, 325, 332  
   – fortschreitende 151  
   – hertzsche 316, 322, 325, 326, 330  
   – stehende 151  
 Welleneigenschaften 150  
 Wellenfronten 147, 148  
 Wellengleichung 158  
   – Herleitung 146  
 Wellenlänge 145, 146, 323, 326, 346, 369  
   – de-Broglie- 411  
 wellenlängenunabhängige Eigenschaften 324  
 Wellenmodell 335, 338  
 Wellennormale 147, 335  
 Wellenoptik 335  
 Wellentheorie 148, 334  
 Weltbilder 57, 121  
 Werkstoffprüfung 153, 391  
 Widerstand  
   – elektrischer 276  
   – induktiver 285, 288, 292  
   – kapazitiver 286, 288, 292  
   – ohmscher 288, 292  
   – spezifischer elektrischer 295  
 Widerstandsthermometer 164  
 wiensches Verschiebungsgesetz 221, 222  
 WIEN, WILHELM 221  
 WILSON, C. P. R. 438  
 Windkraft 73  
 Winkelbeschleunigung 100, 104, 106  
 Winkelgeschwindigkeit 63, 64, 100, 106, 118, 137  
 Wirbelstrombremse 267  
 Wirbelströme 267  
 Wirkleistung 284, 291  
 wirksame Fläche 262  
 Wirkung 384  
 Wirkungsgrad 95, 96  
   – maximaler 207  
   – thermischer 207, 217  
 Wirkungsquantum  
   – plancksches 383, 384, 409  
 Wirkwiderstand 284, 288  
 Wölbspiegel 349, 350  
 Würfe 70f.  
 Würfe im Sport 71  
 Wurfhöhe 71  
 Wurfparabeln 71  
 Wurfweite 71
- Z**  
 Zeigerdarstellung 141, 143, 282  
 Zeigerdiagramm 141  
 Zeigermodell 335, 362, 364, 366, 400  
 Zeit 59, 461, 471  
   – absolute 458  
 Zeitdilatation 468, 480  
 zeitlich konstantes Magnetfeld 263  
 zeitlich veränderliches Magnetfeld 263  
 Zeitmessung 480  
   – Relativität 467  
 Zentralbeschleunigung 64  
 Zentralkraft 84  
 Zentrifugalkraft 84  
 Zentripetalbeschleunigung 64  
 Zentripetalkraft 84  
 Zerfall 469  
 Zerfallsgesetz 441  
 Zerfallsreihen 443  
   – natürliche 442  
 Zerstreuungslinse 351, 352, 353, 358  
 zufällige Fehler 45  
 Zugkräfte 73  
 Zündspule 270  
 Zungenfrequenzmesser 140  
 Zustandsänderung  
   – adiabatische 176, 198, 202  
   – isobare 201  
   – isochore 200  
   – isotherme 198, 200  
 Zustandsgleichung  
   – allgemeine 175, 179  
   – ideales Gas 189, 199  
 Zustandsgrößen 18, 87, 107, 118, 160, 161, 192  
   – makroskopische 161  
   – thermodynamische 163  
 ZWEIG, G. 453  
 Zweitaktmotor 209  
 Zweiweggleichrichtung 276  
 Zwillingparadoxon 468  
 Zyklotron 256

## Für alle Bundesländer geeignet

Themen und Inhalte aus dem Physikunterricht der Sekundarstufe II in Vorbereitung auf das Abitur – einzelne Kapitel zu allen relevanten Teilbereichen der Physik: Mechanik, Thermodynamik, Elektrizitätslehre, Optik sowie Quanten- und Kernphysik



Das Buch für schnelles und gezieltes Nachschlagen zur Vor- und Nachbereitung von Unterrichtsthemen der Oberstufe



Die Lernhelfer-App für unterwegs – zum mobilen Lernen mit allen Lernhelfer-Inhalten und zum Nachschlagen im Schülerlexikon



Das Webportal [www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de) mit dem Schülerlexikon und einem persönlichen Lernbereich für Lernkartensets und Downloadklausuren

**Zum Buch:** das passende **digitale Lernpaket** bei [www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de) für nur **1,- Euro!**

Für die Nutzung der angegebenen Inhalte ist die Registrierung auf [www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de) zu den dortigen allgemeinen Geschäftsbedingungen erforderlich. Die Freischaltung der Produkte ist mithilfe dieses Buches nur für einen Nutzer möglich und gilt, solange die Verfügbarkeit des Onlineangebots [www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de) besteht.



ISBN 978-3-411-71754-5  
24,99 € (D) • 25,70 € (A)

[www.lernhelfer.de](http://www.lernhelfer.de)