

Zum Buch:
das Abitورpaket bei
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 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

Redaktionelle Leitung David Harvie

Redaktion Prof. Dr. Lothar Meyer, Loop Redaktionsgruppe

Illustrationen Christine Gebreyes, Jens Prockat

Herstellung Ursula Fürst

Layout Britta Scharffenberg

Umschlaggestaltung Büroeco, Augsburg

Satz DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Grafiken Simone Felgentreu, Nina Geist, Claudia Kilian,
Dieter Ruhmke, Walther-Maria Scheid, Sybille Storch

Druck und Bindung Těšinská tiskárna, Český Těšín

Printed in Czech Republic

ISBN 978-3-411-71754-5

www.lernhelfer.de

Inhaltsverzeichnis

1	Die Physik – eine Naturwissenschaft	7	
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	
2	Mechanik	49	
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

	3	Thermodynamik	159
	3.1	Betrachtungsweisen und Modelle in der Thermodynamik	160
	3.1.1	Die phänomenologische Betrachtungsweise	160
	3.1.2	Die kinetisch-statistische Betrachtungsweise	161
	3.2	Thermisches Verhalten von Körpern und Stoffen	163
	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
	3.3	Kinetische Theorie der Wärme	180
	3.3.1	Der atomare Aufbau der Stoffe.	180
	3.3.2	Kinetische Gastheorie	183
	3.4	Hauptsätze der Thermodynamik	193
	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
	3.5	Temperaturstrahlung und Strahlungsgesetze	218
	4	Elektrizitätslehre und Magnetismus	223
	4.1	Elektrische Felder	224
	4.1.1	Elektrische Ladungen	224
	4.1.2	Elektrische Felder	230
	4.1.3	Geladene Teilchen in elektrischen Feldern	242
	4.2	Magnetische Felder	246
	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
	4.3	Elektromagnetische Induktion	260
	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
	4.4	Gleichstromkreis und Wechselstromkreis	276
	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
	4.5	Elektrische Leitungsvorgänge	293
	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
	4.6	Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	314
	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		

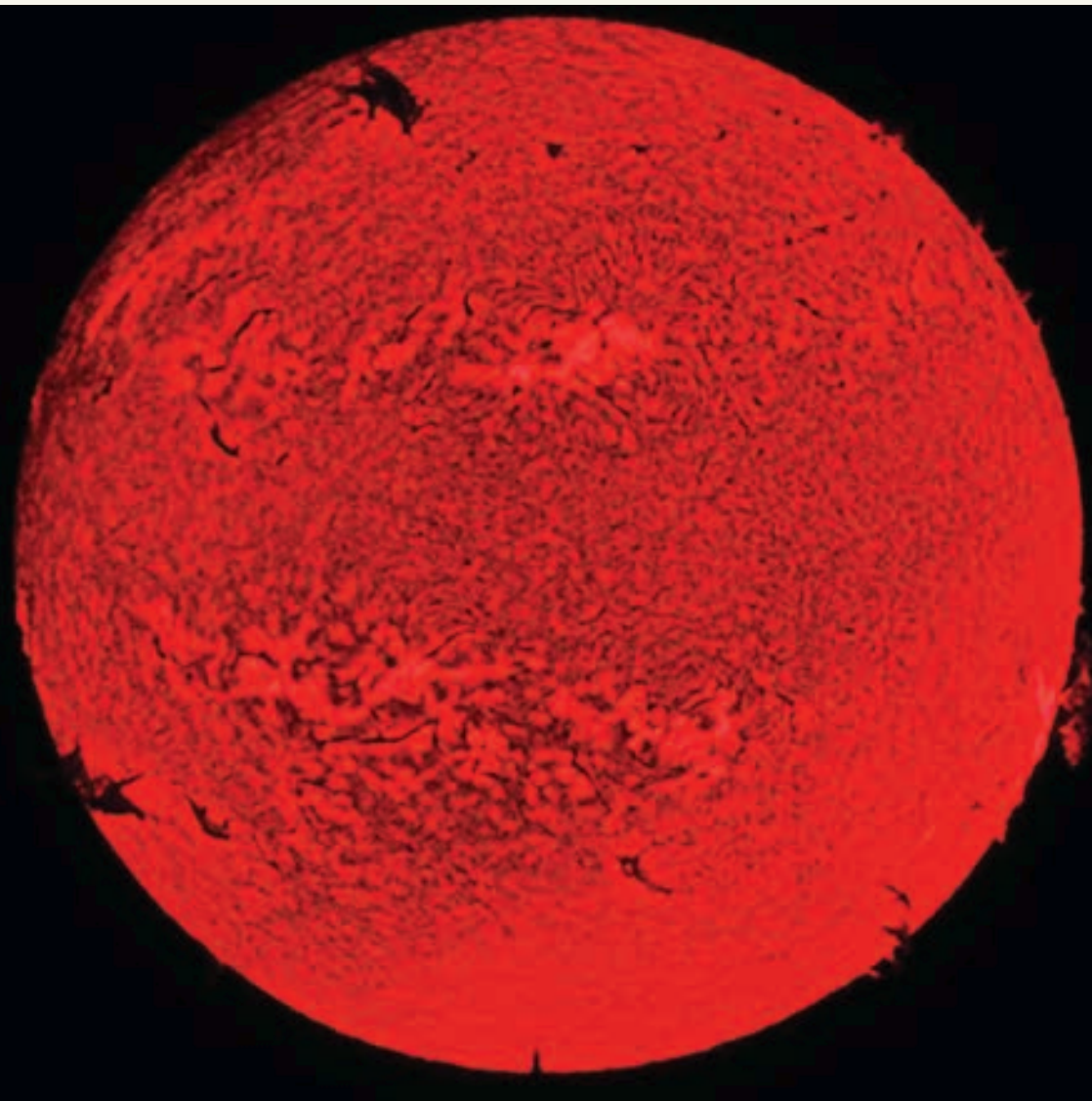
5	Optik	333	
5.1	Modelle für das Licht	334	
5.1.1	Das Modell Lichtstrahl	334	
5.1.2	Das Modell Lichtwelle	335	
5.2	Ausbreitung von Licht und Wechselwirkung mit Stoffen	336	
5.2.1	Die Lichtgeschwindigkeit	336	
5.2.2	Reflexion und Brechung von Licht	337	
5.2.3	Streuung und Absorption von Licht	346	■ Überblick 347
5.3	Bilder und optische Geräte	348	
5.3.1	Bildentstehung an Spiegeln und Linsen	348	
5.3.2	Optische Geräte	356	■ Überblick 359
5.4	Beugung und Interferenz von Licht	360	
5.5	Polarisation von Licht	371	
5.6	Licht und Farben	375	
5.6.1	Spektren und Spektralanalyse	375	
5.6.2	Mischung von Farben	377	■ Überblick 380
6	Quantenphysik	381	
6.1	Quanteneffekte bei elektromagnetischer Strahlung	382	
6.1.1	Der äußere lichtelektrische Effekt	382	
6.1.2	Energie, Masse und Impuls von Photonen	386	
6.1.3	Röntgenstrahlung	388	
6.2	Interferenz von Quantenobjekten	396	
6.3	Komplementarität und Unbestimmtheit	402	
6.3.1	Komplementarität bei Doppelspalt-Experimenten	402	■ Überblick 411, 412
6.3.2	Unbestimmtheit von Ort und Impuls	407	
7	Atom- und Kernphysik	413	
7.1	Physik der Atomhülle	414	
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
7.2	Physik des Atomkerns	432	
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
8	Spezielle Relativitätstheorie	457	
8.1	Von der klassischen Physik zur Relativitätstheorie	458	
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	
8.2	Grundaussagen der speziellen Relativitätstheorie	464	
8.3	Relativistische Kinematik	466	
8.4	Relativistische Dynamik	473	
8.5	Hinweise zur allgemeinen Relativitätstheorie	478	■ Überblick 480
A	Anhang	481	

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.

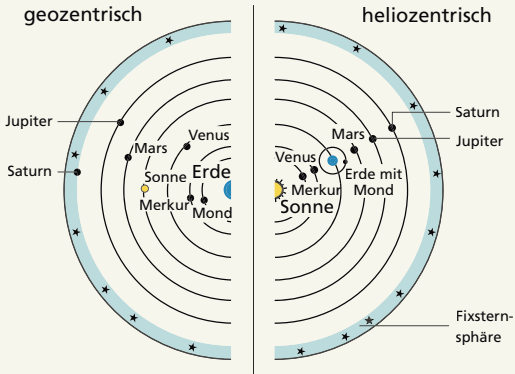
Neues Interesse an der Entwicklung der Physik kam im Frühkapitalismus, insbesondere durch das Interesse der Handwerker und des Bürgertums an praktischen Erkenntnissen, auf. Auch die großen geografischen Entdeckungen im 15. und 16. Jahrhundert und die Hochseeschifffahrt brachten neue Anforderungen an 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 überwand 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.

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.

► 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.

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.

► 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 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**.

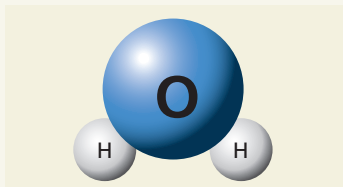
Ein Begriff ist die gedankliche Widerspiegelung einer Klasse von Objekten (Körper, Stoffe, Vorgänge usw.) aufgrund ihrer wesentlichen und gemeinsamen Merkmale.

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

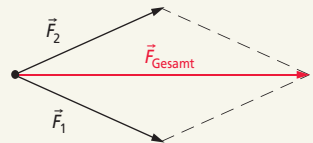
Bei der **Addition von Größen** muss man beachten, ob es sich um skalare oder vektorielle Größen handelt.

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 ungenutzt 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 ϱ 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.

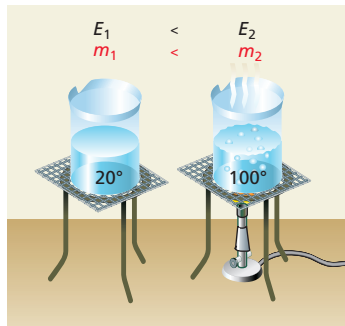
Wird einem Körper Wärme zugeführt, so erhöht sich seine thermische Energie. Das führt zu einem entsprechenden Zuwachs an Masse.

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:

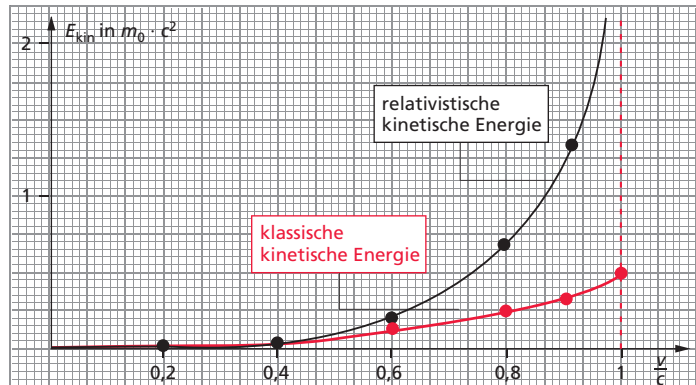
$$E_{\text{kin}} = (m - m_0) c^2 = m_0 \cdot c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = m_0 \cdot c^2 (k - 1)$$

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

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

- 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.

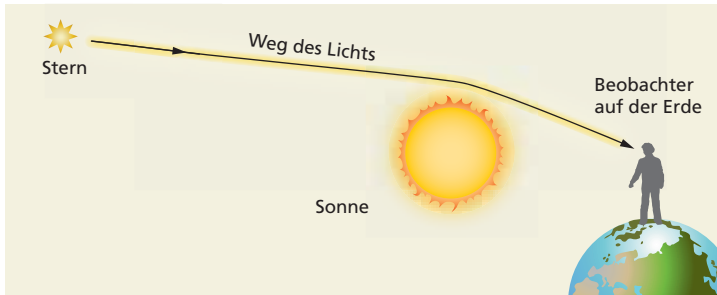
Allgemeines Relativitätsprinzip:

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

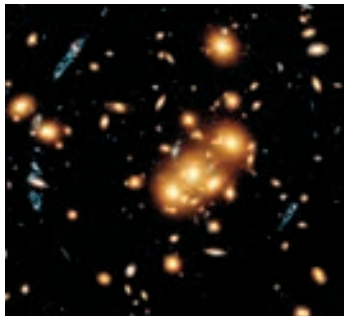


EINSTEIN berechnete eine maximale Ablenkung von 1,7 Bogensekunden. 1919 wurde der Effekt von einer englischen Sonnenfinsternis-Expedition unter Leitung des Astrophysikers EDDINGTON erstmals bestätigt. Eine Bestätigung für die Ablenkung von Licht durch eine große Masse sind die 1979 entdeckten **Gravitationslinsen**. 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/cm³) 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:

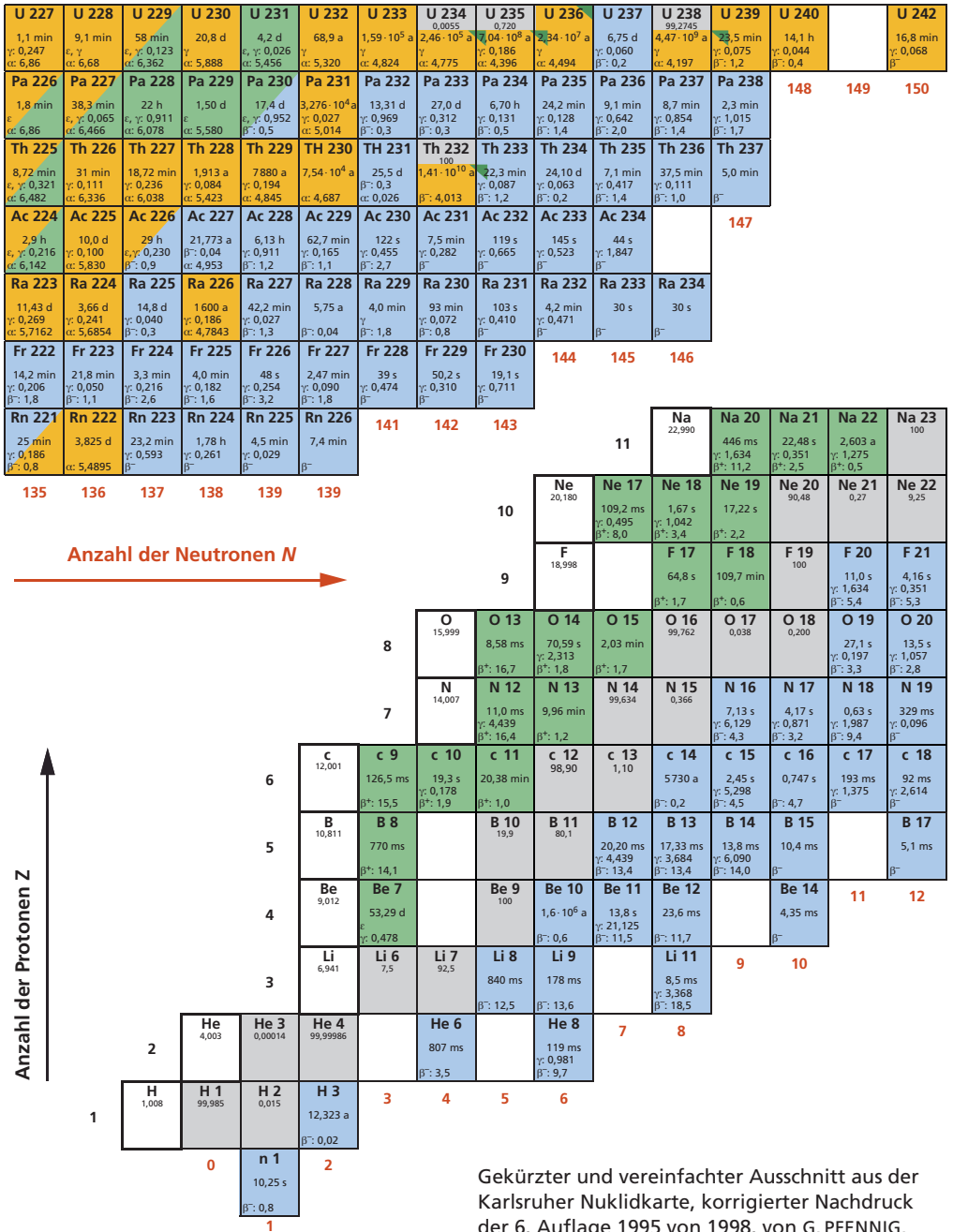
$$E = m \cdot c^2$$

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

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 Zustands-
änderung 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 Treibhaus-
effekt 220
 - Anteilchen 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
 - Aufenthaltswahrscheinlich-
keit 422
 - räumliche 407
 - Auflösungsvermögen 357, 366
 - Auftrieb 164
 - Auge 356
 - Auflösungsvermögen 357
 - Augenblicksbeschleunigung 61
 - Augenblicksgeschwindigkeit 60
 - Augenblicksleistung 95
 - Ausbreitungsgeschwindig-
keit 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
 Fulleren 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 Einrichtungen 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 Kernumwandlungen 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 Flusssdichte 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, EDMÉ 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 Wirkungsquantum 383, 384, 409
 Planetenmodell 417
 Plasma 50, 172, 256
 Plattenkondensator 245
 p-Leitung 304
 pnp-Transistor 307
 pn-Übergang 305
 Polarisation 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
- Spinthariskop 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 mit dem Schülerlexikon und einem persönlichen Lernbereich für Lernkartensets und Downloadklausuren

Zum Buch: das passende **digitale Lernpaket** bei www.lernhelfer.de für nur **1,- Euro!**

Für die Nutzung der angegebenen Inhalte ist die Registrierung auf 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 besteht.



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

www.lernhelfer.de