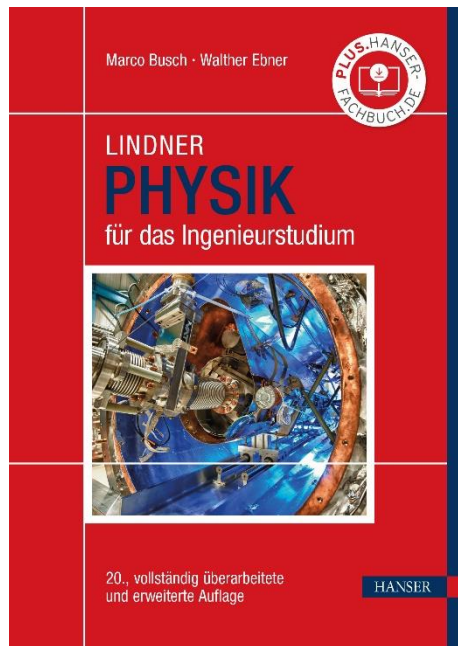


HANSER



Leseprobe

zu

Lindner Physik für das Ingenieurstudium

von Marco Busch und Walther Ebner

Print-ISBN: 978-3-446-45882-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46180-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446458826>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorwort	XI
1 Einführung	1
1.1 Physikalische Größen und Gleichungen	1
1.2 Internationales Einheitensystem	3
1.2.1 Basisgrößen und Basiseinheiten des SI	3
1.2.2 Arbeiten mit Einheiten	7
1.3 Messgrößen und Messfehler	9
1.3.1 Messunsicherheiten	9
1.3.2 Messreihen	10
1.3.3 Fehlerfortpflanzung	13
1.3.4 Regression	14
2 Mechanik	18
2.1 Kinematik des Massepunktes	19
2.1.1 Bezugssysteme	19
2.1.2 Kinematische Größen	22
2.1.3 Freier Fall	30
2.1.4 Senkrechter Wurf	32
2.1.5 Waagerechter und schräger Wurf	32
2.1.6 Kreisbewegung	35
2.2 Dynamik des Massepunktes	39
2.2.1 Newton'sche Gesetze	40
2.2.2 Drehimpuls und Drehmoment	43
2.2.3 Gravitation und Planetenbewegung	46
2.2.4 Trägheitskräfte	58
2.2.5 Arbeit, Leistung und Energie	63
2.2.6 Erhaltungssätze der Mechanik	73
2.3 Stoßprozesse	78
2.3.1 Zentrale Stöße	81
2.3.2 Schiefe Stöße	86
2.4 Dynamik des starren Körpers	87
2.4.1 Translation und Rotation	92

2.4.2	Trägheitsmoment und Trägheitstensor	95
2.4.3	Kreiselbewegung	106
2.4.4	Gleichgewichtsbedingungen	113
2.4.5	Reibung	120
2.5	Grundlagen der Festigkeitslehre	125
2.5.1	Elastische Grundgrößen	126
2.5.2	Hooke'sches Gesetz	132
2.5.3	Biegung	138
2.5.4	Scherung	141
2.5.5	Torsion	142
3	Strömungsmechanik	144
3.1	Hydrostatik	145
3.1.1	Hydrostatischer Druck	145
3.1.2	Oberflächenspannung	151
3.1.3	Hydrostatischer Auftrieb	157
3.2	Hydrodynamik	160
3.2.1	Bernoulli-Gleichung	163
3.2.2	Strömungen mit innerer Reibung	175
3.2.3	Turbulente Strömungen	185
4	Schwingungen und Wellen	192
4.1	Kinematik schwingender Körper	193
4.1.1	Die harmonische Schwingung	194
4.1.2	Superposition von zwei Schwingungen	196
4.1.3	Allgemeine periodische Schwingungen	198
4.1.4	Drehschwingung	205
4.2	Dynamik schwingender Körper	206
4.2.1	Der ungedämpfte harmonische Oszillator	206
4.2.2	Linear gedämpfte Schwingungen	220
4.2.3	Erzwungene Schwingungen	224
4.2.4	Schwingungen gekoppelter Oszillatoren	231
4.2.5	Schwingungen ausgedehnter Körper	241
4.3	Wellen	247
4.3.1	Grundlagen der Wellenausbreitung	247
4.3.2	Harmonische Wellen	252
4.3.3	Überlagerung von Wellen	255
4.3.4	Reflexion, Brechung und Beugung von Wellen	264
4.4	Grundlagen der physikalischen Akustik	272
4.4.1	Schallausbreitung	273
4.4.2	Ultraschall	288
4.4.3	Akustischer Doppler-Effekt	291

5	Thermodynamik	296
5.1	Thermodynamische Grundlagen	297
5.1.1	Temperatur und Temperaturmessung	297
5.1.2	Thermodynamische Zustandsgrößen	300
5.1.3	Thermische Ausdehnung von Festkörpern	309
5.2	Kinetische Gastheorie	314
5.2.1	Maxwell-Boltzmann-Verteilung	314
5.2.2	Verhalten des idealen Gases bei Volumen-, Druck- und Temperatur- änderung	319
5.2.3	Zustandsgleichung des idealen Gases	322
5.3	Hauptsätze der Thermodynamik	324
5.3.1	Wärme und Wärmekapazität	324
5.3.2	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	332
5.3.3	Reversible und irreversible Zustandsänderungen	334
5.3.4	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	336
5.3.5	Dritter Hauptsatz der Thermodynamik	340
5.4	Zustandsänderungen des idealen Gases	341
5.4.1	Isochore Zustandsänderung	342
5.4.2	Isobare Zustandsänderung	343
5.4.3	Isotherme Zustandsänderung	344
5.4.4	Adiabatische Zustandsänderung	346
5.4.5	Polytrope Zustandsänderung	349
5.5	Kreisprozesse	350
5.5.1	Wirkungsweise einer Wärmekraftmaschine	351
5.5.2	Kältemaschine und Wärmepumpe	353
5.5.3	Carnot-Kreisprozess	355
5.5.4	Otto-Kreisprozess	358
5.5.5	Diesel-Kreisprozess	361
5.5.6	Seiliger-Kreisprozess	364
5.5.7	Stirling-Kreisprozess	366
5.6	Reale Gase und Phasenübergänge	369
5.6.1	Die Van-der-Waals-Zustandsgleichung	371
5.6.2	Verflüssigung von realen Gasen	377
5.6.3	Phasenübergänge reiner Stoffe	379
5.7	Wärmetransportvorgänge	394
5.7.1	Wärmeströmung	394
5.7.2	Wärmeleitung	395
5.7.3	Wärmestrahlung	399

6	Elektrodynamik	411
6.1	Grundbausteine	411
6.2	Das statische elektrische Feld	412
6.2.1	Grunderscheinungen der Elektrostatik	412
6.2.2	Elektrische Feldgrößen	415
6.2.3	Kraftwirkungen im elektrostatischen Feld	419
6.2.4	Materie im elektrischen Feld	432
6.3	Das statische magnetische Feld	441
6.3.1	Grunderscheinungen der Magnetostatik	441
6.3.2	Magnetische Feldgrößen	444
6.3.3	Durchflutungsgesetz	447
6.3.4	Biot-Savart'sches Gesetz	449
6.3.5	Kraftwirkungen im statischen Magnetfeld	451
6.3.6	Materie im magnetostatischen Feld	455
6.4	Elektromagnetismus	463
6.4.1	Faraday'sches Induktionsgesetz	463
6.4.2	Induktionsvorgänge in bewegten Leitern	467
6.4.3	Selbstinduktion	469
6.4.4	Energie und Energiedichte des magnetischen Feldes	471
6.4.5	Maxwell'sche Gleichungen	473
6.5	Der Gleichstromkreis	475
6.5.1	Elektrische Spannung	475
6.5.2	Elektrischer Widerstand und Ohm'sches Gesetz	477
6.5.3	Elektrische Leistung und Energie	480
6.5.4	Kirchhoff'sche Gesetze	481
6.5.5	Schaltvorgänge im Gleichstromkreis	482
6.6	Der Wechselstromkreis	485
6.6.1	Grundlagen des Wechselstroms	486
6.6.2	Widerstände im Wechselstromkreis	489
6.6.3	Berechnungen von Wechselstromkreisen mit komplexen Zahlen	492
6.6.4	Leistung im Wechselstromkreis	495
6.6.5	Transformator	498
6.7	Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	499
6.7.1	Elektromagnetischer Schwingkreis	499
6.7.2	Freie elektromagnetische Wellen	503
6.7.3	Geführte elektromagnetische Wellen	512
6.8	Elektrische Leitung	514
6.8.1	Elektrische Leitung im Vakuum	514
6.8.2	Driftgeschwindigkeit und Beweglichkeit von Ladungsträgern	519
6.8.3	Elektrische Leitung in Gasen	520
6.8.4	Elektrische Leitung in Elektrolyten	523

7	Optik	530
7.1	Ausbreitung, Erzeugung und Nachweis von Licht	530
7.2	Strahlenoptik	534
7.2.1	Reflexion und Brechung an Grenzflächen	534
7.2.2	Spiegel	542
7.2.3	Prisma	549
7.2.4	Linsen und Linsensysteme	550
7.2.5	Optische Instrumente	565
7.3	Wellenoptik	574
7.3.1	Intensität bei Reflexion und Transmission	575
7.3.2	Polarisation des Lichtes	577
7.3.3	Interferenz des Lichtes	583
7.3.4	Beugung	595
7.4	Strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen	606
7.4.1	Radiometrische (strahlungsphysikalische) Größen	606
7.4.2	Photometrische (lichttechnische) Größen	610
8	Quantenphysik	615
8.1	Grundlagen der Quantenphysik	615
8.1.1	Hohlraumstrahlung und Planck'sches Strahlungsgesetz	615
8.1.2	Quanteneigenschaften der elektromagnetischen Strahlung	617
8.1.3	Welleneigenschaften der Materie: Materiewellen	622
8.1.4	Schrödinger-Gleichung und Wellenfunktion	626
8.1.5	Heisenberg'sche Unschärferelation	628
8.1.6	Quantenphysikalische Phänomene	630
8.2	Atomphysik	639
8.2.1	Bestandteile der Atome	640
8.2.2	Quantenphysik des Atoms	642
8.2.3	Das Wasserstoffatom und das Bohr'sche Atommodell	650
8.2.4	Aufbau der Atomhüllen der Elemente	656
8.2.5	Strahlungs- und Absorptionsprozesse	661
8.2.6	Moderne Anwendungen und Experimente der Atomphysik	668
8.3	Kernphysik	676
8.3.1	Der Atomkern	677
8.3.2	Kernmodelle	685
8.3.3	Radioaktivität	689
8.3.4	Zerfallsarten und Zerfallsreihen	696
8.3.5	Kernreaktionen	709
8.3.6	Wechselwirkung radioaktiver Strahlung mit Materie	719
8.3.7	Strahlungsmessung und Dosimetrie	731
8.3.8	Energiegewinnung	742
8.4	Elementarteilchenphysik	748
8.4.1	Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	749
8.4.2	Teilchenbeschleuniger	755

9	Festkörperphysik	760
9.1	Aufbau von Festkörpern	760
9.1.1	Bindungen im Festkörper	760
9.1.2	Kristallgitter und Symmetrien	765
9.1.3	Fehlordnung in Kristallen	772
9.1.4	Festkörperoberflächen	775
9.1.5	Kristallwachstum	778
9.2	Thermische und elektronische Eigenschaften	780
9.2.1	Gitterschwingungen und Phononen	780
9.2.2	Bandstruktur der Elektronenenergie	786
9.2.3	Elektronen in Metallen	791
9.2.4	Elektronen in Halbleitern	795
9.2.5	Thermoelektrische Erscheinungen	803
9.2.6	Supraleitung	806
9.3	Physikalische Grundlagen der Halbleiterelektronik	811
9.3.1	Halbleiter-Kontakte und -Schalter	811
9.3.2	Optoelektronische Bauelemente	824
9.3.3	Integrierte Schaltungen	833
9.4	Magnetismus in Festkörpern	838
9.4.1	Dia- und Paramagnetismus	839
9.4.2	Gekoppelte magnetische Momente	841
9.4.3	Spin und elektrische Leitung	845
10	Relativitätstheorie	850
10.1	Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie	851
10.1.1	Galilei-Transformation	852
10.1.2	Michelson-Morley-Experiment	854
10.1.3	Spezielles Relativitätsprinzip und Lorentz-Transformation	857
10.1.4	Relativistische Effekte	867
10.2	Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie	880
10.2.1	Einstein'sche Feldgleichungen	881
10.2.2	Experimentelle Tests	884
	Fundamentale Konstanten	888
	Einheiten	891
	Basisgrößen und -einheiten des SI	891
	Abgeleitete Einheiten	892
	Größen und ihre Einheiten	894
	Stichwortverzeichnis	902

Vorwort

Die Physik ist integraler Bestandteil aller ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge an den Universitäten und Hochschulen für Angewandte Wissenschaften. Das hat gute Gründe. Alle technischen Disziplinen entstanden aus der Physik heraus. Daher bildet eine fundierte Kenntnis physikalischer Grundlagen die Basis für das Verständnis technischer Zusammenhänge und damit für die Entwicklung innovativer Technologien und Lösungen. Darüber hinaus ermöglicht das Studium der Physik die Entwicklung des methodischen Denkens und Vorgehens, die bei der Bearbeitung technisch komplexer Fragestellungen unabdingbar sind. Dabei ist es nicht entscheidend, sämtliche Details in den einzelnen physikalischen Teildisziplinen zu kennen. Wichtiger sind vielmehr ein umfassender Überblick und ein grundsätzliches Verständnis der physikalischen Zusammenhänge. Bei speziellen technischen Fragestellungen wird damit der physikalische Hintergrund sichtbar, auf den dann bei Bedarf näher eingegangen werden kann. Dieses Ziel verfolgt seit der ersten Auflage aus dem Jahre 1953 das Lehrbuch „Lindner - Physik für Ingenieure“, das aufgrund seiner großen Verbreitung inzwischen als Klassiker unter den einführenden Physik-Lehrbüchern gilt. Allerdings erfordert die fortschreitende Entwicklung in Forschung, Technik und auch in der Lehre die kontinuierliche, teilweise grundlegende Anpassung von Inhalt und Darstellung. Um dem Wandel zum aktuellen Stand in Wissenschaft und Technik gerecht zu werden, wurde das Werk für diese 20. Auflage daher völlig neu bearbeitet und strukturiert.

Die Gliederung der vorliegenden 20., vollständig überarbeiteten und erweiterten Auflage folgt den klassischen Bereichen der Physik, angefangen bei der Mechanik über die Thermodynamik und Elektrodynamik bis hin zur Quantenphysik und Festkörperphysik. Diese Struktur ermöglicht es den Leserinnen und Lesern, sich systematisch durch die verschiedenen physikalischen Disziplinen zu bewegen und gleichzeitig die Verbindungen zwischen ihnen zu erkennen. Ein Ziel des vorliegenden Buches ist es, dass die Physik als grundlegende Naturwissenschaft in ihren Zusammenhängen verstanden und nicht als bloße Aneinanderreihung spezieller physikalischer Gesetze fehlinterpretiert wird. Zahlreiche Rechenbeispiele helfen, das physikalische Verständnis zu vertiefen. An mathematischen Kenntnissen werden die Differential- und Integralrechnung sowie die Grundlagen der Vektorrechnung vorausgesetzt. Das vorliegende Buch wurde so konzipiert, dass es sowohl als Lehrbuch im Studium als auch als Nachschlagewerk in der beruflichen Praxis dienen kann. Sachliche Kritik und Verbesserungsvorschläge nehmen wir Autoren und der Hanser-Verlag dankend entgegen.

Wir als Autoren möchten uns bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hanser-Verlags, insbesondere bei unserer Lektorin Frau Natalia Silakova-Herzberg für ihre Geduld und Unterstützung bei der Fertigstellung des Buches, gerade auch unter den schwierigen Bedingungen der letzten Jahre, herzlich bedanken. Ein großer Dank gilt darüber hinaus unseren Familien für die uns entgegengebrachte große Unterstützung und das Verständnis für das Buchprojekt.

Ampere

Grundlagen sind der festgelegte Wert der Elementarladung e sowie die Definition der Sekunde.

Ein Stromstärke von 1 A entspricht einem Fluss von $\frac{1}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}} \approx 6,2 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen pro Sekunde.

Für die messtechnische Realisierung kann das Ohm'sche Gesetz $I = \frac{U}{R}$ (Gl. (6.95)) genutzt werden. Die zurzeit höchste Präzision bei der Messung von Spannung und Widerstand erreicht man wieder unter Nutzung des Quanten-Hall- und des Josephson-Effektes.

Eine sehr direkte Methode, nämlich das Zählen einzelner Elektronen mit einer mikroelektronischen sogenannten Ein-Elektron-Pumpe, ist in der Entwicklung. Ihre Genauigkeit leidet aber zurzeit noch an der begrenzten reproduzierbaren Zählrate von etwa 10^9 Elektronen pro Sekunde entsprechend einem Strom von ca. 100 pA.

Kelvin

Grundlagen sind der festgelegte Wert der Boltzmann-Konstanten k sowie die Definitionen von Sekunde, Meter und Kilogramm.

Das Kelvin als Einheit der absoluten Temperaturskala ist damit gegeben durch $1\text{ K} = \frac{1,380\,694 \cdot 10^{-23}}{k} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$.

Der bisherige Fixpunkt der Temperaturskala, die Temperatur des Tripelpunktes von Wasser $T = 273,16\text{ K} = 0,01\text{ }^\circ\text{C}$ (siehe Abschnitt 5.1) bleibt dabei erhalten, und auch die Celsius-Skala ist weiterhin gültig.

Eine sehr präzise Methode zur Messung der absoluten Temperatur und zur messtechnischen Realisierung der Einheit Kelvin beruht auf der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit eines idealen, monoatomaren Gases (sehr gut angenähert durch z. B. Helium unter Normalbedingungen) $c = \sqrt{\frac{5}{3} \frac{k}{m} T}$ (Gl. (4.117)) mit $\kappa = \frac{5}{3}$, $R_i = \frac{k}{m}$ (m : mittlere Masse der Atome des Gases, R_i : spezifische Gaskonstante, κ : Isentropenkoeffizient). Zur Messung der Temperatur wird die Frequenz f einer stehenden Welle in einem gasgefüllten Hohlraum gemessen, dessen Abmessungen die Wellenlänge λ vorgeben (siehe Abschnitt 4.4.1). Mit $c = \lambda f$ (Gl. (4.98)) kann die Schallgeschwindigkeit und damit die Temperatur bestimmt werden.

Mol

Grundlage ist der festgelegte Wert der Avogadro-Konstanten N_A .

Die Einheit mol dient zur Angabe der Stoffmenge, d. h. zur Angabe der Anzahl der Teilchen eines Stoffes, z. B. der Atome, Moleküle, Ionen usw.

Ein Mol entspricht einer Stoffmenge von exakt $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

Mit dieser neuen Festlegung orientiert man sich an der bisherigen Definition, nämlich, dass ein Mol der Anzahl der ^{12}C -Atome in 0,012 kg, der molaren Masse von ^{12}C entspricht. Da das aber nur im Rahmen der Messgenauigkeit gilt, ist nun die Anzahl der ^{12}C -Atome eine Messgröße.

Die bisher genaueste Bestimmung der Avogadro-Konstanten wurde mit einer ^{28}Si (Silicium)-Kugel durchgeführt, die bei einem Durchmesser von 93,7 mm nur um maximal 30 nm von der

Kugelgestalt abweicht, sodass das Kugelvolumen sehr genau berechnet werden kann. Mit der Kenntnis der Kristallstruktur von Silicium und des Atomabstands, die mit Röntgenstrukturanalysen bestimmt werden (siehe Abschnitt 9.1.2), kann man daraus die Anzahl N der Atome in der Kugel berechnen. Aus der Masse der Kugel und der molaren Masse von 0,028 kg von ^{28}Si ergibt sich die Stoffmenge n in mol und damit die Avogadro-Konstante nach $N_A = \frac{N}{n}$.

Candela

Die Einheit Candela bezieht sich als einzige der SI-Basiseinheiten direkt auf die Physiologie des Menschen. Sie dient als Maß für die Lichtstärke, wobei hier Licht im engeren Sinne als der mit dem menschlichen Auge und seiner spektralen Empfindlichkeit sichtbare Teil der elektromagnetischen Strahlung gemeint ist. Die Lichtstärke ist bei einer bestimmten Frequenz proportional zur Strahlstärke, d. h. der Strahlungsleistung pro Raumwinkeleinheit in eine bestimmte Richtung mit der Einheit $\frac{\text{W}}{\text{sr}}$ (Watt pro Steradian): $1 \text{ cd} = K_{\text{cd}} \cdot 1 \frac{\text{W}}{\text{sr}} = K_{\text{cd}} \cdot 1 \frac{\text{kg m}^2 \text{ s}^{-3}}{\text{sr}}$.

Die Proportionalitätskonstante ist auf den Wert $K_{\text{cd}} = 683 \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{W}}$ bei der Frequenz $5,40 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (grünes Licht) festgelegt. Dieser Wert wurde so gewählt, damit der Anschluss an frühere Definitionen der Einheit Candela gegeben ist.

Die Messung der Lichtstärke wird damit zurückgeführt auf die Messung der Strahlstärke. Will man die Lichtstärke einer Lichtquelle mit einem breiten Spektrum aus der Strahlstärke berechnen, muss man allerdings die spektrale Empfindlichkeitskurve des Auges einbeziehen (siehe Abschnitt 7.4.2).

1.2.2 Arbeiten mit Einheiten

Alle in den Naturwissenschaften und der Technik auftretenden Größen können als Produkte von Potenzen der SI-Basiseinheiten ausgedrückt werden. Diese Kombinationen werden als abgeleitete kohärente SI-Einheiten bezeichnet, wenn keine zusätzlichen Zahlenfaktoren darin vorkommen, ansonsten als abgeleitete, nicht kohärente. So ist die abgeleitete kohärente SI-Einheit für die Geschwindigkeit $\frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, nicht kohärent ist dagegen für die Massendichte $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 10^{-3} \text{ kg} \cdot (10^{-2} \text{ m})^{-3}$.

Viele abgeleitete Einheiten haben aus praktischen Gründen eigene Bezeichnungen erhalten. Zum Beispiel wird die Kraft in der Einheit Newton mit $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ angegeben, die elektrische Spannung in der Einheit Volt mit $\text{V} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$.

Zu den abgeleiteten Einheiten zählen auch die Winkeleinheiten:

Radian ($\text{rad} = \text{m} \cdot \text{m}^{-1} = 1$) für den ebenen Winkel $\alpha = \frac{\text{Bogenlänge}}{\text{Radius}} \text{ rad}$.

Steradian ($\text{sr} = \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = 1$) für den Raumwinkel $\alpha = \frac{\text{Fläche der Kugelkappe}}{\text{Radius}^2} \text{ sr}$.

Da sie dimensionslos sind, brauchen sie eigentlich nicht mitgeschrieben zu werden. Sie dienen aber zur Kennzeichnung einer Zahl als Winkel.

Es gibt darüber hinaus viele Einheiten, die zwar keine SI-Einheiten sind, aber wegen der häufigen Verwendung vom SI zugelassen sind. Dazu gehören Minute (min), Stunde (h), Tag (d), Liter (l), Tonne (t), Elektronvolt (eV) usw.

Schließlich stößt man auch häufig noch auf Nicht-SI-Einheiten, die aber in einigen Ländern gesetzlich zugelassen sind, wie Bar (bar), Kilowattstunde (kWh), Zoll (") usw.

Oft kommt es vor, dass Einheiten für den praktischen Umgang zu groß oder zu klein sind. Das SI erlaubt dafür die Verwendung von Vorsätzen (Präfixen), die dezimale Teile oder Vielfache einer Einheit kennzeichnen. Tabelle 1.3 führt die gebräuchlichsten Präfixe auf.

Tabelle 1.3 SI-Präfixe

Symbol	Name	Faktor	Symbol	Name	Faktor
da	Deka	10^1	d	Dezi	10^{-1}
h	Hekto	10^2	c	Zenti	10^{-2}
k	kilo	10^3	m	Milli	10^{-3}
M	Mega	10^6	μ	Mikro	10^{-6}
G	Giga	10^9	n	Nano	10^{-9}
T	Tera	10^{12}	p	Piko	10^{-12}
P	Peta	10^{15}	f	Femto	10^{-15}
E	Exa	10^{18}	a	Atto	10^{-18}

Einer Einheit dürfen nicht mehrere Präfixe vorangestellt werden. Insbesondere muss man sich beim Kilogramm dabei an der eigentlich abgeleiteten SI-Einheit Gramm oder an der zugelassenen Einheit Tonne orientieren, z. B.: $50\,000\text{ kg} = 50\text{ t} = 50\text{ t}$.

Häufig sind die Eingangswerte bei Berechnungen nicht als SI-Einheiten gegeben. Hier empfiehlt es sich, die Werte vor der Berechnung in SI-Einheiten umzurechnen. Das Ergebnis erhält man dann ebenfalls in SI-Einheiten, die dann bei Bedarf wieder in eventuell praktischere Einheiten umgerechnet werden können.



Beispiel

Welche Zeit braucht ein Schiff bei einer Geschwindigkeit von 15 kn, um die Strecke von 4 000 km zurückzulegen?

Gerechnet wird nach der Gleichung $t = \frac{l}{v}$

$$\text{mit } v = 15 \text{ kn} = 15 \left(1\,852 \frac{\text{m}}{\text{h}} \right) = 15 \left(1\,852 \frac{\text{m}}{3\,600 \text{ s}} \right) = 7,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und $l = 4\,000 \text{ km} = 4\,000 \cdot 10^3 \text{ m}$. Damit ergibt sich

$$t = \frac{4 \cdot 10^6 \text{ m}}{7,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 5,18 \cdot 10^5 \text{ s} = 6,00 \text{ d}$$

Grundsätzlich gilt also:



Merke

Werden in einer Größengleichung die gegebenen Größen in SI-Einheiten eingesetzt, so ergibt sich die zu berechnende Größe auch in ihrer SI-Einheit.

■ 1.3 Messgrößen und Messfehler

Die Physik ist eine empirische Wissenschaft, d. h. ihre Aussagen beruhen, wie schon mehrfach erwähnt, auf Experimenten, also der Beobachtung von Vorgängen unter natürlichen oder auch künstlich hergestellten Bedingungen. Erst die durch Messungen gewonnenen Daten ermöglichen die Aufstellung und Überprüfung von Theorien oder die technische Umsetzung physikalischer Erkenntnisse. Ein großer Teil der Alltagsarbeit in der Physik (wie auch in anderen Naturwissenschaften) besteht in der Auswertung von Messdaten, insbesondere auch in Bezug auf ihre Gültigkeit und Zuverlässigkeit hin. Das mathematische Handwerkszeug dazu ist sehr umfangreich. Im Folgenden können daher nur einige Grundzüge der Vorgehensweise bei der Auswertung von Messdaten erläutert werden.

1.3.1 Messunsicherheiten

Jede Messung ist mit Unsicherheiten behaftet. Mit erhöhtem Aufwand kann man die Unsicherheit zwar verringern, man kann sie aber grundsätzlich nicht beseitigen. Ein Messergebnis ist daher immer nur ein Schätzwert für den *Erwartungswert*, den „wahren“ Wert der jeweiligen Messgröße. Zur vollständigen Angabe eines Messergebnisses gehört deshalb auch die Angabe der Messunsicherheit, mit deren Wert sich ein Intervall um den Schätzwert, der sogenannte *Vertrauensbereich*, festlegen lässt.

Zur Messunsicherheit tragen systematische und zufällige Ursachen bei. Als *systematische Unsicherheiten* werden Messabweichungen bezeichnet, die durch Unvollkommenheiten des Mess- und Auswertungsverfahrens, der Messgeräte, durch nicht erfasste Umwelteinflüsse (z. B. die Temperaturabhängigkeit eines Messwiderstandes bei der Strommessung) und auch durch persönliche Fehler des Beobachters verursacht werden. Sie können zeitlich sowohl konstant als auch veränderlich sein und sind allein durch Wiederholung der Messung nicht zu erfassen. Sind die Werte der systematischen Abweichungen bekannt, lassen sie sich durch rechnerische Korrektur der Messwerte berücksichtigen. Bei Messgeräten werden mögliche systematische Fehler in der Regel als Toleranz (z. B. wie „1,5 % vom Endwert“) angegeben, bei digitalen Anzeigen entspricht der minimale systematische Fehler dem Wert der letzten angezeigten Stelle. In vielen Fällen können sie nur abgeschätzt werden.

Mit statistischen Methoden kann man dagegen die *zufälligen, statistischen Unsicherheiten* erfassen, die sich in einer Streuung von Messwerten bei der Wiederholung von Messungen unter sonst unveränderten Bedingungen äußern. Ihre Ursachen reichen vom begrenzten Auflösungsvermögen des Auges beim Ablesen eines Längenmaßstabs bis zur mikroskopisch ungeordneten Bewegung von Elektronen bei einer Spannungsmessung. Der Umgang mit Unsicherheiten dieser Art soll im Folgenden erläutert werden.

1.3.2 Messreihen

Zur verlässlichen Bestimmung des „wahren“ Wertes einer Größe x (z. B. eine Geschwindigkeit, Spannung, Zeit usw.) reicht eine einzelne Messung wegen der oben erwähnten Unsicherheiten nicht aus. Es muss eine *Messreihe* mit mehrfachen Messungen unter möglichst konstanten Bedingungen durchgeführt werden. Trägt man die Häufigkeit, mit der eine Messung im Rahmen der Messreihe einen Wert innerhalb eines bestimmten Intervalls ergibt, gegen den Gesamtbereich der Werte auf, ergibt sich in der Regel ein Bild ähnlich wie in Bild 1.1.

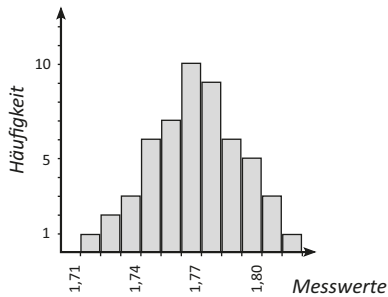


Bild 1.1

Häufigkeitsverteilung bei einer Messreihe

Viele der Messwerte liegen in der Nähe eines „mittleren“ Wertes, mit zunehmendem Abstand davon nimmt ihre Häufigkeit ab. Anders ausgedrückt: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Messwert in der Nähe dieses mittleren Wertes liegt, ist hoch und nimmt mit zunehmendem Abstand davon ab. Mathematisch wird dies durch die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ ausgedrückt, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Messwert in ein Intervall $x \pm dx$ fällt. Ein bei Messungen in der Praxis häufig auftretender Fall ist die *Gauß-Verteilung* (C. F. Gauß, 1777–1855), die deshalb auch als *Normalverteilung* bezeichnet wird. Die Funktion der Wahrscheinlichkeitsdichte bei der Gauß-Verteilung lautet

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (1.1)$$

$$-\infty < x < +\infty$$

Ihre Kurve, die wegen ihrer Gestalt auch als Gauß'sche Glockenkurve bezeichnet wird, zeigt Bild 1.2.

Der Parameter μ ist der Erwartungswert der Verteilung. Er gibt die Position des Maximums der Kurve an, d. h. den Messwert, der mit der höchsten Wahrscheinlichkeit auftritt. Die *Standardabweichung* σ bestimmt die Breite der Verteilung der Messwerte um den Erwartungswert.

Die Gesamtfläche unter der Kurve ist 1, entsprechend der (trivialen) Aussage, dass ein Messwert mit der Wahrscheinlichkeit 100 % irgendwo im Definitionsintervall von x liegt. Zwischen den Grenzen $x = \mu - \sigma$ und $x = \mu + \sigma$ liegen ca. 68,3 % der Fläche. Eine Messung ergibt also mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % einen Messwert innerhalb dieser Grenzen. Für die Grenzen $\mu \pm 2\sigma$ liegt der Wert bei 95,4 %.

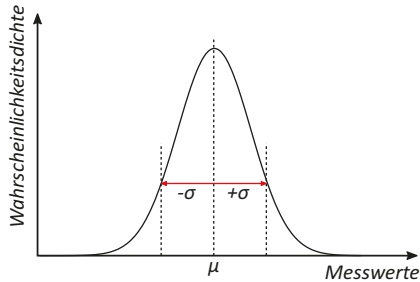


Bild 1.2
Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung

Allerdings wird die Verteilung der Messwerte nur für den theoretischen Fall unendlich vieler Messwerte exakt durch Gl. (1.1) und Bild 1.2 beschrieben. Bei einer Messreihe mit nur endlich vielen Messwerten muss man sich daher mit Näherungen bzw. Schätzwerten für den Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ begnügen. Für normalverteilte Messwerte x_1, x_2, \dots, x_n ist der beste Schätzwert für μ der

Mittelwert der Messreihe¹

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2)$$

Als Schätzwert für σ gilt die Standardabweichung der Messreihe

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.3)$$

Eine Messung ist im Sinne der Statistik eine *Stichprobe*. Die Anzahl der Messungen n wird daher auch als Umfang der Stichprobe bezeichnet.

Je größer die Anzahl der Messwerte ist, desto genauer gibt der Mittelwert den Erwartungswert der gemessenen Größe wieder, als desto schmaler kann deshalb auch der Vertrauensbereich angegeben werden. Allerdings kann bei einer realen Messreihe mit endlich vielen Messwerten nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dem *Vertrauensniveau*, davon ausgegangen werden, dass der Erwartungswert tatsächlich innerhalb des Vertrauensbereiches liegt. Beides drückt sich aus in der Berechnung der

Messunsicherheit des Mittelwertes

$$u_p = \frac{t_p}{\sqrt{n}} s_x \quad (1.4)$$

¹ Zu den meist recht „aufwendigen“ Gleichungen zur Berechnung der statistischen Kennwerte sei angemerkt, dass sie in entsprechender Anwendungssoftware oft vorprogrammiert enthalten sind.

Wie man unmittelbar sieht, wird die Messunsicherheit u mit zunehmendem n kleiner. Der Student'sche t-Faktor t_p (W. S. Gosset, Pseudonym „Student“, 1876–1937) berücksichtigt außerdem neben dem Stichprobenumfang n das Vertrauensniveau p . Der t-Faktor folgt aus der Theorie der Fehlerrechnung, einige Werte für zwei häufig benutzte Vertrauensniveaus sind in Tabelle 1.4 angeführt.

Tabelle 1.4 Student'scher t-Faktor

n		2	3	4	6	8	10	20	50	100
t_p	$p = 68,3\%$	1,84	1,32	1,20	1,11	1,08	1,06	1,03	1,01	1,01
	$p = 95,4\%$	13,8	4,50	3,29	2,64	2,42	2,31	2,14	2,05	2,02

Für die Begrenzung des Vertrauensbereichs ergibt sich damit

$$\Delta x_p = u_p + w \quad (1.5)$$

Dabei steht w für den systematischer Fehler, der, wie oben erwähnt, eventuell abgeschätzt werden muss. Streng genommen gilt Gl. (1.5) unter der Bedingung, dass w deutlich kleiner ist als u_p .

Das aus der Messreihe folgende Messergebnis wird damit so angegeben

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_p \quad (1.6)$$

mit dem Vertrauensniveau p .

Das Resultat einer Messreihe ist nur zusammen mit der Nennung des Vertrauensbereiches und des Vertrauensniveaus sinnvoll.

Der Wert von Δx_p ist unabhängig vom Wert von \bar{x} und wird deshalb als *absolute Unsicherheit* bezeichnet. Oft gibt eine Angabe der *relativen Unsicherheit* einer Größe einen besseren Eindruck von der Qualität einer Messreihe. Dabei wird die absolute Unsicherheit auf den Mittelwert bezogen, d. h. die relative Unsicherheit ist $\frac{\Delta x_p}{\bar{x}}$. Damit lautet das Resultat einer Messreihe

$$x = \bar{x}, \quad \text{rel. Unsicherheit } \frac{\Delta x_p}{\bar{x}} \quad (1.7)$$

mit dem Vertrauensniveau p .

Bei der praktischen Berechnung wird die Anzahl der signifikanten Stellen der Zahlenwerte des Mittelwertes und der Unsicherheit häufig nur durch das dafür verwendete Rechengerät (Computer) bestimmt. Dabei werden als signifikante Stellen einer Zahl die Stellen ohne führende Nullen bis zur Rundungsstelle bezeichnet. Deutlich wird dies bei der Notierung als Fließkommazahl. Die Zahl $1\,234 = 1,234 \cdot 10^3$ hat vier signifikante Stellen, die Zahl $0,001\,2 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ nur zwei. Auch eine folgende Null kann signifikant sein: $0,129\,6$ ist gerundet $0,130 = 1,30 \cdot 10^{-1}$ mit drei signifikanten Stellen.

Für die Angabe von Δx_p ist nur eine Stelle real signifikant, also physikalisch sinnvoll. Die real signifikanten Stellen von \bar{x} ergeben sich aus dem Wert von Δx_p . Nur die Stellen, die sich im Bereich $\bar{x} \pm \Delta x_p$ um weniger als 10 Werte ändern, können als real signifikant gelten. Als Ergebnis der Messreihe dürfen nur diese real signifikanten Stellen angegeben werden.



Beispiel

Die Schwingungsperiode eines Pendels soll bestimmt werden. Dazu werden fünf Messungen der Periodendauer durchgeführt. Die Auflösung bzw. die Messunsicherheit der Stoppuhr beträgt $w = 0,01$ s. Die Messwerte sind

i	1	2	3	4	5	6
T_i/s	1,92	1,95	1,91	1,89	1,93	1,88

Es ergibt sich

nach Gl. (1.2) für den Mittelwert: $\bar{T} = 1,9167$ s,

nach Gl. (1.3) für die Standardabweichung: $s_T = 0,0320$ s.

(jeweils auf die 4. Nachkommastelle gerundet)

Bei einem Vertrauensniveau von 95,4 % und einem Stichprobenumfang von 6 ist der t-Faktor $t_{95} = 2,64$. Für die Messunsicherheit des Mittelwertes erhält man damit nach Gl. (1.4): $u_{95} = 0,0345$.

Die Begrenzung des Vertrauensbereichs beträgt damit nach Gl. (1.5) rechnerisch: $\Delta x_{95} = 0,0445$ bzw. mit real signifikanten Stellen $\Delta x_{95} = 0,04$. Mit diesem Wert ist die zweite Nachkommastelle des Mittelwertes noch real signifikant. Das Resultat der Messreihe lautet daher nach Gl. (1.6):

$T = (1,92 \pm 0,04)$ s, Vertrauensniveau $p = 95,4$ %

bzw. mit der relativen Unsicherheit nach Gl. (1.7):

$T = 1,92$ s, rel. Unsicherheit 0,021 oder 2,1 %, $p = 95,4$ %.

1.3.3 Fehlerfortpflanzung

Oft kann man eine gesuchte physikalische Größe y nicht direkt messen, sondern muss ihren Wert mithilfe einer physikalischen Gleichung aus anderen Größen x_1, x_2, x_3, \dots bestimmen, die ihrerseits direkt gemessen werden können. Es besteht also der Zusammenhang $y = y(x_1, x_2, x_3, \dots)$. In diesem Fall geht man folgendermaßen vor.

Den Schätzwert \bar{y} der Zielgröße y berechnet man mit den Mittelwerten der gemessenen Größen $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots$:

$$\bar{y} = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots) \quad (1.8)$$

Für die Unsicherheit in y gilt das

Gauß'sche Gesetz der Fehlerfortpflanzung

$$\Delta y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \Big|_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots} \Delta x_i \right)^2} \quad (1.9)$$

(mit derselben Einschränkung wie für Gl. (1.5), dass nämlich die systematischen Fehler der x_i deutlich kleiner sind als die statistischen Unsicherheiten)

Der Ausdruck $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ bezeichnet eine partielle Ableitung. Beispielweise wird für den ersten Summanden $\frac{\partial y}{\partial x_i} |_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots}$ zunächst y nach x_1 abgeleitet, wobei die anderen x_i als Konstanten betrachtet werden. Anschließend werden in diese Ableitung die Mittelwerte $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots$ eingesetzt und so der Wert berechnet.

In der Praxis braucht man in vielen Fällen nicht von der allgemeinen Grundform (Gl. (1.9)) auszugehen, da die Zusammenhänge $y = y(x_1, x_2, x_3, \dots)$ speziellen Sonderformen entsprechen. Ist die Zielgröße y linear abhängig von den Messgrößen, so ergibt sich für die Unsicherheit in y :

Fehlerfortpflanzung für $y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots$

$$\Delta y = \sqrt{(a_1 \Delta x_1)^2 + (a_2 \Delta x_2)^2 + \dots} \quad (1.10)$$

Ist die Zielgröße y ein Produkt von Potenzen der Messgrößen, so erhält man für die Unsicherheit in y :

Fehlerfortpflanzung für $y = a \cdot x_1^{n_1} \cdot x_2^{n_2} \cdot \dots$

$$\Delta y = \bar{y} \sqrt{\left(n_1 \frac{\Delta x_1}{\bar{x}_1} \right)^2 + \left(n_2 \frac{\Delta x_2}{\bar{x}_2} \right)^2 + \dots} \quad (1.11)$$



Beispiel

Durch eine Serienschaltung von zwei Widerständen $R_1 = (3,9 \pm 0,2) \Omega$ und $R_2 = (7,1 \pm 0,1) \Omega$ fließt ein Strom von $I = (45 \pm 0,5) \text{ A}$. (Diese Werte wurden in vorherigen Messreihen ermittelt.)

Wie groß ist der Gesamtwiderstand $R = R_1 + R_2$?

Als Mittelwert ergibt sich $\bar{R} = \bar{R}_1 + \bar{R}_2 = 11,0 \Omega$, als Unsicherheit nach Gl. (1.10)

$\Delta R = \sqrt{(0,2 \Omega)^2 + (0,1 \Omega)^2} = 0,224 \Omega$. Der Gesamtwiderstand ist also $R = (11,0 \pm 0,2) \Omega$.

Welche Leistung $P = I^2 R$ wird umgesetzt?

Als Mittelwert ergibt sich $\bar{P} = \bar{I}^2 \bar{R} = 22,28 \cdot 10^3 \text{ W}$, als Unsicherheit nach Gl. (1.11)

$\Delta P = 22,28 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \sqrt{\left(2 \frac{0,5 \text{ A}}{45 \text{ A}} \right)^2 + \left(\frac{0,2 \Omega}{11 \Omega} \right)^2} = 0,639 \cdot 10^3 \text{ W}$. Die Leistung ist also $P = (22 \pm 0,6) \cdot 10^3 \text{ W}$.

1.3.4 Regression

Oft kommt es vor, dass zwischen zwei Messgrößen ein funktionaler Zusammenhang vorliegt oder zumindest vermutet wird, z. B. zwischen Ort x und Zeit t : $x(t) = x_0 + vt$ oder zwischen Spannung U und Widerstand R : $U(R) = IR$. Mit Messungen soll dann ein solcher

Zusammenhang bestätigt werden, oder Parameter der Funktion sollen bestimmt werden, wie oben z. B. x_0 und v . Wegen der Messunsicherheiten bilden die Messwerte im Allgemeinen allerdings den Funktionsverlauf nicht exakt ab, wie Bild 1.3 zeigt. *Regression* heißt dann, die Parameter so zu wählen, dass die Funktionswerte die Messwerte möglichst genau wiedergeben. Ein mathematisches Verfahren dazu beruht auf der Methode der Minimierung der Fehlerquadratsumme

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2 \quad \text{minimal} \quad (1.12)$$

(x_i, y_i) sind dabei die n Paare der Messwerte, $y(x_i)$ ist der dem funktionalen Zusammenhang entsprechende Wert von y zum Wert x_i .

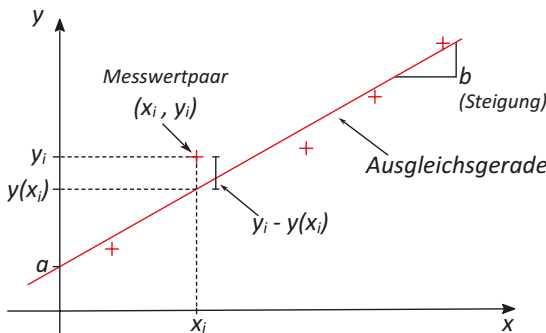


Bild 1.3

Messwertpaare (+) und Ausgleichsgerade bei einem angenommenen linearen Zusammenhang $y(x) = a + b x$

Speziell für den Fall eines linearen Zusammenhangs $y = a + b x$ lässt sich die dann sogenannte *lineare Regression* relativ einfach durchführen.

Oft werden deshalb andere funktionale Zusammenhänge zunächst mathematisch in eine lineare Form gebracht, um dann die lineare Regression anwenden zu können. Beispielsweise wird aus dem Zusammenhang zwischen der Länge l und der Schwingungsperiode T eines

Pendels $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ (siehe Abschnitt 4.2.1) durch Quadrieren der in l lineare Ausdruck $T^2 = \frac{(2\pi)^2}{g} l$. Exponentielle Zusammenhänge können durch Logarithmieren linearisiert

werden, wie z. B. beim radioaktiven Zerfallsgesetz: Aus $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ wird der in t lineare Ausdruck $\ln N(t) = \ln N_0 - \lambda t$.

Bei der linearen Regression gilt für die Steigung der Ausgleichsgeraden

$$b = r \frac{s_y}{s_x} \quad (1.13)$$

Der Faktor r ist der Korrelationskoeffizient

$$r = \frac{1}{(n-1) s_x s_y} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (1.14)$$

Stichwortverzeichnis

Symbole

^{14}C -Methode 693

90°-Winkelspiegel 543

A

Abbe-Kriterium 605

Abbe-Zahl 541

Abbild

– reelles 545, 554

– virtuelles 542, 546, 554

Abbildungsfehler 550, 561

– Astigmatismus 562

– Koma 563

– Verzeichnung 563

Abbildungsgleichung 547

Abbildungsmaßstab 547, 553

Aberration

– chromatische 564

– sphärische 562

Abflussziffer 166

Abklingkoeffizient 222

Abklingkonstante 222

Abklingzeit 222

Abrasion 123

Absorption, fundamentale 824

Absorptionsgesetz 725

Absorptionsgrad 401

Absorptionskoeffizient 727, 824

– linearer 725

Achromat 564

achsferne Strahlen 544

achsnahe Strahlen 544

Adhäsion 121, 154

Adiabatexponent 330

Aerodynamik 144

Aerostatik 144

Aggregatzustand 379

Ähnlichkeitssatz der Strömungen 190

Akkumulator 528

Aktionsprinzip 41

Aktivität 690, 692

– spezifische 693

Akzeptor 799

Amontons'sche Gesetze 122

Amplitude 194

Amplitudenmodulation 234

Amplitudenresonanz 227

Amplitudenspektrum 199

Anastigmat 562

Anfangs-Randwert-Problem 244

Anfangswertproblem 208

Anionen 523

Annihilation 703

Anregung, parametrische 225

Anstellwinkel 171

Antiferromagnet 841, 844

Antireflexschicht 588

aperiodischer Grenzfall 223

Apertur, numerische 606

Aphel 49

Aphelabstand 49

Aplanat 562

Apsidenlinie 54

Äquipotentialfläche 422

Äquivalentdosis 739

Äquivalentdosisleistung 739

Äquivalenzprinzip

– schwaches 47, 881

– starkes 47, 881

Arbeit 64

Archimedische Schraube 144

Archimedisches Prinzip 158

Arrhenius-Andrade-Beziehung 180

Aspirations-Psychrometer 393

α -Strahlung 720

– Körper 722

– Spektrum 697

Äther 854

- Ätherwind 854
 - Atom 640
 - Atomkern 640
 - Elektronenhülle 640
 - Grundzustand 647
 - Orbital 647
 - Atominterferometer 260
 - Atomkern
 - Kernradius 681
 - Ladungsverteilung 680
 - Massendefekt 681
 - Massendichte 681
 - Atomradien 657
 - Atomuhr 673
 - Caesium-Strahl- 674
 - Fontänen- 675
 - optische 676
 - Auflösungsvermögen
 - Fernrohr, Auge 603
 - Mikroskop 605
 - spektrales 599
 - Auftrieb
 - aerostatischer 157
 - dynamischer 170
 - hydrostatischer 157
 - statischer 157
 - Auftriebsbeiwert 170
 - Auge 565
 - Akkommodation 566
 - Auflösungsvermögen 567
 - Augenlinse 566
 - deutliche Sehweite 566
 - Farbsehen 566
 - Fehlsichtigkeit 566
 - Netzhaut 565
 - Tagsehen, Nachtsehen 610
 - Zapfen-, Stäbchenzellen 565
 - Ausfallwinkel 535
 - Ausflussbeiwert 166
 - Ausflussgeschwindigkeit 165
 - Auslenkung 193
 - Auslenkungsbäuche 238
 - Auslenkungsknoten 238
 - Auslösezählrohr 733
 - Austauschreaktion 710
 - Austauschwechselwirkung 761
 - Austrittsarbeit 618
 - Auswahlregeln 652
 - Avalanche-Diode 819
 - Avogadro-Konstante 6, 154
 - axiales Flächenträgheitsmoment 140
 - axiales Widerstandsmoment 140
 - azentrischer Faktor 377
 - Azimutwinkel 36
 - Azimutwinkel-Zeit-Gesetz 36
- B**
- β^+ -Zerfall 697
 - Energiespektrum 702
 - Zerfallsenergie 702
 - Bahndrehimpuls 43, 653
 - Bahnparameter 50
 - Bändchenmikrofon 273
 - Bandstruktur
 - Bloch-Modell 787
 - Elektronenenergie 786
 - Energieband 787
 - Energielücke 787
 - Leitungsband 788
 - Silicium (100) 788
 - Valenzband 788
 - barometrische Höhenformel 302
 - internationale 302
 - isotherme 302
 - Baryonen 750
 - Basiseinheit 3
 - Basisgröße 1, 3
 - Basisvektor
 - kartesischer 21
 - orthonormierter 21
 - Beleuchtungsstärke 613
 - Bell'sches Raumschiffparadoxon 871
 - Bernoulli-Effekt 167
 - Bernoulli-Energiegleichung 164
 - Bernoulli-Gleichung 164
 - Bernoulli-Höhengleichung 165
 - Bernoulli-Konstante 164
 - Berührungsebene 79
 - Beschleuniger
 - Speicherring 758
 - Synchrotron 757
 - Teilchen-Kollision 758
 - Beschleunigungsarbeit 66
 - Bestrahlungsstärke 609
 - Betriebsdruck 146
 - Beugung 264, 268, 595
 - am Draht 598
 - Lochblende 601
 - Spalt 596
 - Beugungsbild 603

- Beugungsgitter 598
 – Gitterkonstante 598
 Beugungsmaximum 596
 Beugungsminimum 597
 Beugungsmuster 269
 Beugungsscheibchen 603
 Beweglichkeit 519
 Bewegung
 – gleichförmige 22
 – gleichmäßig beschleunigte 27
 – ungleichförmige 22
 Bewegungsenergie 71
 Bewegungsreibung 121
 Bewegungsreibungszahl 122
 Bezugsschalldruck 279
 Bezugssystem 19
 Biegefeder 217
 Biegeschwingung 245
 Biegewelle 248, 272
 Biegung 138
 – gerade 139
 – Querkraft- 138
 – reine 138
 – schiefe 139
 biharmonische Schwingungsgleichung 246
 Bildfeldwölbung 562
 Bildgröße 547, 553
 Bildpunkt 545
 Bildweite 545, 553
 Bindung
 – Dipol-Wechselwirkung 765
 – Gleichgewichtsabstand 763
 – Ionen- 762
 – kovalente 760
 – metallische 764
 – Van-der-Waals-Wechselwirkung 765
 Bindungsenergie 762, 763, 764
 – pro Nukleon 681
 Bingham-Fluide 179
 Binodale 388
 Biot-Savart'sches Gesetz 449
 Blaskammer 736
 Blauverschiebung 886
 Bleiakkumulator 528
 Blindleistung 230
 Blindwiderstand
 – induktiver 489
 – kapazitiver 491
 Bloch'sches $T^{3/2}$ -Gesetz 844
 Bloch-Wände 842
 Bogenentladung 523
 Bohrreibung 123
 Bohr'scher Radius 649, 655
 Bohr'sches Atommodell 655
 – 1. Postulat 655
 – 2. Postulat 655
 – 3. Postulat 655
 Bohr'sches Magneton 654
 Boltzmann-Konstante 154, 182
 Boltzmann-Verteilung 668
 Bose-Einstein-Verteilung 782
 Boson 646, 750
 Bouguer-Lambert'sches Gesetz 512
 Boyle-Mariotte'sches Gesetz 319
 Bragg-Bedingung 772
 Bragg-Gleichung 770
 Brechkraft 553
 Brechung 264, 267, 536
 – Grenzfläche 534
 Brechungsindex 511, 534
 Brechungswinkel 536
 Bremsstrahlung 725
 Bremsvermögen 720
 – Bragg-Peak 722
 Brennpunkt 544, 551
 Brennstoffzelle 529
 Brennstrahl 545, 553
 Brennweite 544, 545, 551
 Brewster-Fenster 580
 Brewster-Winkel 578
 Brown'sche Bewegung 181
 Bruchspannung 137
 β -Strahlung 722
 Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 3
 β^- -Zerfall, Energiespektrum 700
- C**
- Caloricum 325
 Candela 612
 Carnot-Kreisprozess 355
 – thermischer Wirkungsgrad 357
 Cavendish-Experiment 219
 Celsius-Temperatur 298
 Charakteristik 250
 Charles'sches Gesetz 320
 Chladni'sche Klangfiguren 246
 Clausius-Clapeyron-Gleichung 375
 Compound-Kern 710
 Compton-Streuung 620

- Cooper-Paare 636
- Coriolis-Beschleunigung 62
- Coriolis-Kraft 61
- Coulomb'sches Gesetz 419
- Coulomb'sches Reibungsgesetz 122
- Curie-Gesetz 840
- Curie-Temperatur 439, 461, 843
- Curie-Weiss-Gesetz 843
- Czochralski(CZ)-Verfahren 779

- D**
- D'Alembert-Gleichung 243
- D'Alembert-Lösung 250
- Dalton'sches Gesetz 384
- Dampfdruck 150
- Dampfdruckkurve 385
- Dampftabelle 385
 - für Wasser 389
- Dämpfung 220
 - hydrodynamische 221
 - hydrostatische 221
 - kritische 223
 - schwache 222
 - starke 223
 - überkritische 223
 - viskose 221
- Dämpfungskoeffizient 222
- Dämpfungskonstante 222
- de-Broglie-Wellenlänge 623
- Debye-Frequenz 783
- Debye-Scherrer-Verfahren 771
- Debye-Temperatur 784
- Deviationsmomente 101
- Dezibel (dB) 279
- Diamagnet 839
 - elementarer 839
- Diamagnetismus 457
- Diamant 761
- Diamant-Gitter 768
- Dichteanomalie 312
- Dichtesprung 381
- dicke Linse
 - Hauptebenen 560
 - Linsenmacherformel 560
- Dielektrikum 434
- Diesel-Kreisprozess 361
- Differentialquotient 23
- Differenzenquotient 23
- Diffraction 268
- Diffusionskapazität 820

- Dimension 3
- Diode 815
 - Flussspannung 818
 - ideale Dioden-Gleichung 818
 - reale Kennlinie 819
 - Sperrsättigungsstrom 818
 - Temperatur 819
 - Sperrschichtkapazität 820
 - Sperrspannung 818
 - Tunneldurchbruch 820
- Dioptrie 553
- Dipol
 - elektrischer 421
 - magnetischer 442
- Dipolmoment
 - Atomkern 688
 - elektrisches 421
 - Elektronenbahn 653
 - Elektronen-Spin 654
 - magnetisches
 - Ampère 446
 - Coulomb 446
 - Neutron 689
- Dipolstrahlung 508
 - Fernbereich 505
 - Nahbereich 505
- Direktionsmoment 218
- Dispersion 540
 - Abbildungsfehler 541
 - anomale 251, 541
 - normale 251, 541
 - relative 541
- Dispersionsrelation 251, 780
- Dissoziation
 - Ionen 524
 - Moleküle 524
- Divergenz Lichtstrahl 602
- Divergenzwinkel 602
- Donator 798
- Doppelbrechung 580
 - zirkulare 582
- Doppelleitung 512
 - Spannungs-, Stromwellen 513
 - Wellenwiderstand 513
- Doppelpendel 238
- Doppelspalt 269
- Doppelspalt-Experiment 269
- Doppler-Effekt 291
 - relativistischer 877
- Doppler-Verschiebung, spektroskopische 292

- Dosimeter 741
 Dosimetrie 737
 Dosisleistungskonstante 740
 Dotierung 798
 Drehachse 38
 Drehfrequenz 37
 Drehimpulserhaltung 76
 Drehkristallverfahren 666, 771
 Drehmoment 44
 Drehpendel 217
 Drehschwingung 205
 Drehsinn 44
 Drehspiegelmethode 531
 Drehzahl 37
 Dreikantprisma 549
 Drei-Körper-Problem, restringiertes 57
 Drei-Kräfte-Regel 117
 Driftgeschwindigkeit 519, 791
 Druck 146, 301
 - dynamischer 164
 - geodätischer 164
 - hydrostatischer 146, 302
 - kritischer 373
 - statischer 164
 Druckpunkt 170
 Drude-Sommerfeld-Theorie 397
 Dulong-Petit-Gesetz 327
 Dulong-Petit'sche Regel 784
 dunkle Materie/Energie 754
 Durchflutungsgesetz 447, 448
 Dynamik 18
 - schwingender Körper 206
 dynamisches Gleichgewicht 118
- E**
- ebene Polarkoordinaten 35
 ebullioskopische Konstante 383
 Echogenität 290
 Echografie 290
 Effektivwerte, Spannung, Strom 488
 Effekt, piezoelektrischer 290
 Ehrenfest'sches Paradoxon 871
 Eigenfrequenz 208
 Eigenzeit 868
 Eigenzeitelement 868
 Eimer-Experiment 851
 Ein-Elektron-Pumpe 6
 Einfallslot 267, 535
 Einfallswinkel 535
 Einfangreaktion 710
 Einheit 1
 - Ampere 6
 - atomare Masseneinheit u 641
 - Candela 7
 - Farad F 429
 - Henry H 470
 - Kelvin 6
 - Kilogramm 5
 - Meter 5
 - mol 6
 - Ohm Ω 477
 - Radiant 7
 - Sekunde 5
 - Siemens S 477
 - Steradian 7
 - Tesla 444
 - var (voltampère réactif) 496
 - Voltampere VA 497
 - Volt V 416, 476
 - Weber Wb 446
 Einheitensystem, International (SI) 4
 Einschwingvorgang 225, 226
 Einstein-Konstante 883
 Einstein'sche Feldgleichungen 881
 Einstein'sche Gravitationskonstante 883
 Elastizitätsgesetz 132
 Elastizitätsgrenze 136
 Elastizitätsmatrix 133
 Elastizitätsmodul 134, 181, 275
 Elastizitätstensor 132
 Elastomer 137
 Elastostatik 125
 elektrische Leitung
 - bipolare 519
 - Elektrolyte 523
 - Gase 520
 - unipolare 519
 - Vakuum 514
 elektrischer Feuchtemesser 393
 elektrischer Leiter 432
 elektrisches Feld 413
 elektrochemisches Äquivalent 526
 elektrochemische Spannungsreihe 527
 Elektrolyse 525
 elektrolytische Leitung 523
 Elektrolytkondensator 435
 Elektrolyt, Wertigkeit 524
 elektromagnetischer Schwingkreis 499
 - Eigenfrequenz 501
 - Meißner-Schaltung 502

- Resonanz 502
- Spannung, Stromstärke 501
- elektromagnetische Welle 503, 505
 - Ausbreitungs-/Phasengeschwindigkeit
 - im Vakuum 506
 - in Materie 511
 - Dipolschwingungen 503
 - Feldstärken 506
 - Intensität 507
 - Polarisation 505
 - sichtbares Licht 503
- Elektrometer 413
- Elektron 748
 - Durchmesser 642
 - im Atom
 - Bahndrehimpuls 644
 - Bahndrehimpuls Betrag 644
 - Bahndrehimpuls Richtung 645
 - Elektronenverteilung 647
 - Energieniveaus 643
 - potentielle Energie 642
 - Spin Richtung 646
 - Wahrscheinlichkeitsdichte 648
 - Wellenfunktion 646
 - Ladung 641
 - Masse 641
 - Spin 645
 - Zustandsdichte 789
- Elektronenaffinität 762
- Elektronenbahn
 - im elektrischen Feld 516
 - im magnetischen Feld 517
 - Bahnradius 518
 - Zyklotronfrequenz 518
- Elektronenbeugung 623
- Elektronen-Dispersionsrelation 251
- Elektronengas, freies 790
 - Leiter, Metalle, Halbmetalle 790
- Elektronenkonfiguration 657, 659
 - Notation 658
 - Schale 658
 - Unterschale 658
- Elektronenmikroskop 624
 - Auflösungsvermögen 625
- Elektronen-See 764
- Elektron-Loch-Paar
 - Generation 795
 - Rekombination 795
- Elektronvolt 64, 514
- Elementarladung 6, 411
- Elementarwelle 264
- Elemente 656
 - Alkali-Metalle 660
 - chemische Eigenschaften 660
 - Edelgase 661
 - Halogene 661
 - Übergangselemente 661
- Elongation 193
- Emission, stimuliert 662, 668
- Energie
 - freie 301
 - kinetische 71
 - Lageenergie 71
 - potentielle 71
- Energiebänder 787
- Energiedosis 738
- Energiedosisleistung 738
- Energieerhaltung 77
- Energie-Impuls-Relation, relativistische 874
- Energie-Impuls-Tensor 883
- Energielücken 787
- Energieniveau 632, 633
- Energiequanten 406, 616
- Energietopfmodell 618
- Engler-Grad 180
- Entartungsdruck 763
- Enthalpie 301
 - freie 152, 301
- Entropie 301, 304
- Entspiegelung 588
- Eötvös
 - Experiment 880
 - Verhältnis 880
- Eötvös-Konstante 154
- Eötvös'sche Regel 153
- Erdbebenwelle 247
- Ereignishorizont 866, 887
- Erhaltungssatz 753
 - Baryonenzahl 754
 - des Gesamtimpulses 74
 - Leptonenzahl 754
- Erregerkreisfrequenz 226
- Erstarrungspunkt 380
- Erstarrungsverzug 381
- Erstarrungswärme 380
- Euler-Bernoulli-Balken 140
- Euler-Gleichung 175
- Euler-Kraft 62
- Euler-Kreisel 106

- Euler'sche Kreiselgleichung 107
- Expansionsdüse 162
- Exzentrizität
 - lineare 48
 - numerische 49
- Exzentrizitätsvektor 54
- Exzessgeschwindigkeit 52

- F**
- Fabry-Pérot-Interferometer 260, 592
- Fadenpendel 209
- Fallbeschleunigung 30
- Fall, freier 30
- Faraday-Effekt 582
- Faraday-Käfig 433
- Faraday-Konstante 526
- Faraday'sche Gesetze 525, 526
- Farbtemperatur 409
- Feder-Masse-Oszillator 206
- Federpendel 206
- Federschwinger 206
- Fehlerfortpflanzung 13
- Fehlstellen 772
- Feinstruktur 654
- Feld 415
 - elektrisches 416
 - magnetisches 442
 - wirbelfreies 426
- Feld drift 519
- Feldemission 515
- Feldenergie
 - elektrische 431
 - magnetische 471
- Feldimpedanz, akustische 278
- Feldkonstante
 - elektrische 417
 - magnetische 445
- Feldlinien 414
- Feldstärke 416
 - Metallspitze 434
- Feldteilchen 750
- Fermi-Energie 789
- Fermion 646, 750
- Fermi-Verteilung 789
- Fernfeldnäherung 270
- Fernrohr 571
 - astronomisches, Kepler 572
 - Galilei 571
 - Spiegelteleskop 572
- Fernwirkung 637
- Ferrimagnet 841, 845
- Ferriten 845
- Ferroelektrizität 439
- Ferromagnet 841, 842
- Ferromagnetismus 458
 - hartmagnetischer 460
 - weichmagnetischer 460
- Festkörper 760
 - Bindung 760
 - Kristallgitter 765
- Festkörperreibung 120
- Festkörperstruktur
 - amorphe 766
 - monokristalline 765
 - polykristalline 765
- Feynman-Diagramm 752
- Figurenachse 106
- Filmdosimeter 741
- Fitzgerald-Lorentz'sche Kontraktionshypothese 856
- Fizeau-Interferometer 260
- Flächenausdehnungskoeffizient 311
- Flächendefekt 774
- Flächenladungsdichte 416
- Flächenschwerpunkt 90
- Flachwasserwelle 252
- Flettner-Rotor 169
- Flettner-Ventilator 170
- Fliehkraft 60
- Fließgrenze 179
- Fließzone 136
- Float Zone (FZ)-Verfahren 779
- Fluchtgeschwindigkeit 51, 72
- Fluid 144
 - dilatantes 179
 - Newton'sches 179
 - nicht-Newton'sches 179
 - scherverdickendes 179
 - scherverdünnendes 179
 - strukturviskoses 179
 - thixotropes 179
 - viskoelastisches 179
- Fluidmechanik 144
- Fluoreszenz 662
- Fluss
 - elektrischer 417
 - magnetischer 445
- Flussdichte
 - elektrische 417
 - magnetische 444

- Flüssigkeit
 - ideale 160
 - Newton'sche 160, 179
 - Flüssigkeitsreibung 120
 - Flüssigkeitsthermometer 300
 - Flussspannung 814
 - Fontänen-Effekt 176
 - Foucault'sches Pendel 212
 - Fourier-Analyse 199
 - Fourier-Koeffizienten 199
 - Fourier-Reihe 198
 - Fourier'sches Gesetz 396
 - Fourier-Summe 199
 - Fourier-Synthese 198
 - Fourier-Transformation 201
 - Fourier-Zerlegung 199
 - Fraunhofer-Beugung 596
 - Fraunhofer-Linien 664
 - Freiheitsgrade 87
 - Frequenzbewertungskurve 282
 - Frequenzgang
 - Auslenkungsamplitude 227
 - Nullphasenwinkels 227
 - Fresnel-Beugung 596
 - Fresnel-Linse 551
 - Fresnel'scher Spiegel-Versuch 585
 - Fresnel'sche Zonenplatte 594
 - Frontgeschwindigkeit 256
 - Froude-Zahl 187
 - Fundamentalkreisfrequenzen 233
 - Fundamentalschwingung 199, 233
 - Fusionsreaktor
 - Brennstoff 746
 - Lawson-Kriterium 747
 - magnetischer Einschluss 747
 - Trägheitseinschluss 747
- G**
- Galilei-Gruppe 852
 - Galilei'sches Hemmungspendel 213
 - Galilei'sches Relativitätsprinzip 293, 851
 - Galilei-Transformation 26, 852
 - Galton-Pfeife 288
 - Galvani'sche Elemente 527, 528
 - Galvanisieren 525
 - Gangpolkegel 108
 - Gangunterschied 259
 - Garagenparadoxon 871
 - Gasentladung
 - Lawineneffekt 522
 - Plasma 522
 - Sättigungsstrom 521
 - selbständig 521
 - Stoßionisation 522
 - unselbständige 521
 - Gasionisationsdetektor 731
 - Strahlungsart 733
 - Gastheorie 314
 - Gauß'sche Glockenkurve 10
 - Gauß'scher Satz 418, 473
 - Gauß'sches Wellenpaket 256
 - Gauß-Verteilung 10
 - gebundener Vektor 20
 - Gefrierpunktserniedrigung 380, 383
 - Gegenstandsgröße 547, 553
 - Gegenstandsweite 545, 553
 - Gegenwartshyperfläche 865
 - Geiger-Müller-Zählrohr 733
 - Geodäte 869
 - Geodätengleichung 884
 - geodätische Linie 869
 - geodätischer Weg 869
 - geodätische Saughöhe 150
 - geostationäre Umlaufbahn 51
 - Gesamtwirkungsquerschnitt 727
 - Geschwindigkeit, kosmische 51
 - Geschwindigkeitsbeiwert 167
 - Geschwindigkeitsfeld 160
 - Gesetz der Homogenität 321
 - Gesetz von Amontons 321
 - Gesetz von Avogadro 321
 - Gesetz von Bernoulli 164
 - Gesetz von Boyle-Mariotte 319
 - Gesetz von Charles 320
 - Gesetz von Gay-Lussac
 - Erstes 320
 - Zweites 321
 - Gesetz von Stokes 184
 - Gewichtskraft 46
 - Gibbs-Energie 301
 - Gibbs'sche Fundamentalgleichung 307
 - Gibbs'sches Phänomen 200
 - Gibbs-Thomson-Effekt 390
 - Gitter, holografisch 601
 - Gitterschwingung 780
 - Dispersionsrelation 780
 - lineare Kette 780
 - longitudinale, transversale Schwingungsmoden 780
 - minimale Wellenlänge 780

- Phonon 782
 - thermische Ausdehnung 785
 - thermische Energie 783
 - Zustandsdichte 783
 - Glan-Thompson-Prisma 581
 - Gleichgewicht, lokales 160
 - Gleichgewichtsgruppe 114
 - Gleichmaßdehnung 137
 - gleichphasig 194
 - Gleichung
 - Einheitsgleichung 3
 - Größengleichung 2
 - Glimmentladung 522
 - Glühemission 515
 - Richardson-Gleichung 515
 - Glühfadenpyrometer 408
 - Gluon 750
 - Gradientenfelder 78
 - Gravitation 46
 - Gravitationsdrehwaage 219
 - Gravitationskonstante 31, 48
 - Gravitationslinseneffekt 886
 - Gravitations-Rotverschiebung 886
 - Gravitationswelle 247
 - gravitative Rotverschiebung 886
 - gravitative Zeitdilatation 886
 - Grenzfall, nicht-relativistischer 859
 - Grenzflächenspannung 151, 154
 - Grenzschicht 120, 177, 186
 - Größe
 - physikalische 1
 - skalare 2
 - vektorielle 2
 - Grundschiwingung 199
 - Grundton 199
 - Gruppe, eigentliche euklidische 852
 - Gruppengeschwindigkeit 256, 541
 - γ -Strahlung 704, 725
 - γ -Strahlungsquelle 716
 - Gütefaktor 222
 - gyromagnetischer Faktor 654
- H**
- Haar-Hygrometer 393
 - Haftreibungswinkel 122
 - Halbachse
 - große 48
 - kleine 48
 - Halbleiter 762, 791
 - Defektelektronen, Löcher 795
 - dotiert, Temperatur 800
 - Dotierung 798
 - Elektronen 795
 - entartet dotiert 800
 - intrinsisch 795
 - intrinsische Elektronendichte 796
 - intrinsische Löcherdichte 796
 - n-dotiert, n-leitend 798
 - p-dotiert, p-leitend 799
 - Halbleiterdetektor 734
 - Energieauflösung 734
 - Strahlungsart 734
 - Halbleiter-Dosimeter 742
 - Halbleiter-Halbleiter-Kontakt 815
 - Halbmetall 790
 - Halbwertszeit 692
 - Hall
 - -Effekt 801
 - -Feld 801
 - -Konstante 801
 - Quanten-Hall-Effekt 802
 - -Sensoren 802
 - -Spannung 802
 - -Widerstand 802
 - harmonische Analyse 199
 - harmonische Synthese 198
 - Harmonographen 204
 - Härtung 774
 - Hauptachse 96
 - Hauptachsensystem 101
 - Hauptachsentransformation 102
 - Hauptdehnung 132
 - Hauptdehnungsrichtung 132
 - Hauptebene 557
 - dicke Linse 560
 - Konstruktion des Abbildes 557
 - Position 557, 558
 - Hauptsatz der Thermodynamik, Nullter 299
 - Hauptschnitt 580
 - Hauptträgheitsachse 96
 - Hauptträgheitsmoment 96
 - Hauptträgheitssystem 101
 - Heaviside-Ellipsoid 857
 - Heberleitung 149
 - Heisenberg'sche Unschärferelation
 - Ort, Impuls 629
 - Zeit, Energie 630
 - heliocentrisches Weltbild 18
 - Hellempfindlichkeitsgrad, spektraler 610
 - Herpolhodiekegel 108

- Hertz'scher Dipol 502
 Higgs-Boson 750
 Hill-Radius 52
 Hill'sche Gleichungen 53
 Hill-Sphäre 52
 Hitzdrahtsonde 274
 Hitzemauer 277
 Hohlleiter 514
 Hohlraumstrahler 402, 616
 Hohlspiegel, sphärisch 544
 Hohmann-Bahn 52
 Hohmann-Transfer 52
 Holografie 593
 – Objekt-, Referenz-, Rekonstruktionswelle 593
 Hologramm 593
 Hooke'sche Gerade 136
 Hooke'sches Gesetz 132, 153, 255
 Hörfläche 280
 Hörgrenze 273
 Hörschall 273
 Hörschwelle 280
 Hotopp'scher Heber 149
 Hubarbeit 67
 Hüllkurvenverlauf 197
 Huygens-Fresnel'sches Prinzip 265
 Huygens'sches Prinzip 264, 595
 Hybrid-Orbitale 761
 Hydratisierung 524
 Hydrodynamik 144, 160
 Hydrostatik 144, 145
 hydrostatische Waage 158
 Hyperfeinstruktur 673
 Hyperschall 273
 Hyperschallgeschwindigkeit 276
 Hystereseschleife 460, 843
 Hystereseverluste 460
- I**
- IC
 – CMOS 835
 – CVD 838
 – DRAM 834
 – Elektromigration 836
 – Ionenimplantation 837
 – Ionenstrahlätzen 838
 – Moore'sche Regel 833
 – MOSFET 834
 – Photolithografie 837
 – Schaltverluste 836
 – Sputtering 837
 – Tunneleffekt 834
 Immersionsmikroskopie 605
 Impedanz, spezifische akustische 278
 Impulserhaltung 73
 Impulssatz 78
 Induktion 463
 Induktionsgesetz von Faraday 463
 Induktionsspannung 463, 468
 Induktionsstrom 465, 467
 Induktivität 469
 – Zylinderspule 470
 Inertialsystem 20, 40
 Influenz 432
 Infrarotfotografie 400
 Infraschall 272
 Integrabilitätsbedingung 78
 Intensität 607
 – ebene Welle, Kugelwelle 607
 Interferenz 257, 583
 – destruktive 257
 – dünne Schichten 586
 – Farben dünner Schichten 587
 – gleicher Dicke 589
 – gleicher Neigung 587
 – konstruktive 257
 – konstruktive, destruktive 583
 – Newton'sche Ringe 589
 Interferenzmuster 269
 Interferometrie 590
 Inversion 669
 Inversionstemperatur 378
 Ionenbeweglichkeit 525
 Ionen-Doppelschicht 527
 Ionendosis 737
 Ionendosisleistung 737
 Ionenkristall 762
 Ionenleitfähigkeit 763
 Ionisationsdosimeter 741
 Ionisationskammer 731
 Ionisierungsenergie 644, 657, 762
 Isentropenexponent 330
 Isobare 322, 678
 Isochore 322
 Isolator 434, 762, 791, 796
 Isomere 678
 Isotherme 322
 Isotone 678
 Isotop 677
 – Gemisch 678
 – reines 678

J

Josephson-Effekt
 – Gleichstrom- 810
 – Wechselstrom- 810
 Joule 64
 Joule-Thomson-Effekt 377
 Joule-Thomson-Koeffizient 377

K

Kalkspat 580
 Kalorimeter 328
 Kalorische Theorie 325
 Kammerton 199
 kanonisch-konjugierte Größen 630
 Kapazität 428, 429
 Kapazitätsdiode 820
 Kapillaraszension 155
 Kapillardepression 155
 Kapillareffekt 149, 154
 kapillare Steighöhe 156
 Kapillarität 154
 Kapillarmethode 154
 Kapillarwelle 251
 Kármán'sche Wirbelstraße 186
 Kathodenstrahlen 516
 Kationen 523
 Kaufmann-Bucherer-Experimente 857
 Kavitation 288
 Kelvin-Temperatur 298
 Kepler'sche Gesetze 47
 Keramik-Kondensator 435
 Kerma 738
 Kernbrennstoff 743
 – Uran-Anreicherung 744
 Kerne, gg, ug/gu, uu 688
 Kernemulsion 735
 Kernfusion 742, 745, 876
 – Stern 746
 Kernkraft 677, 685
 Kernkraftwerk 744
 Kernladungszahl 641, 677
 Kernmagneton 688
 Kern-Photoeffekt 710
 Kernreaktionen 709
 Kernreaktor 711, 744
 – Brennstab 744
 – Brüter 745
 – Endlagerung 745
 – Moderator 744
 – Sicherheit 745

– Steuerstab 744
 Kernspaltung 711, 712, 742, 743, 876
 – spontane 697
 Kernspin 688
 Kerr-Metrik 883
 Kerr-Newman-Metrik 883
 Kerr- und Pockels-Effekt 582
 Kettenreaktion 743
 – Multiplikationsfaktor 743
 Kibble-Waage 5
 Kilowattstunde 64
 Kinematik 18
 – schwingende Körper 193
 Kinetik 18
 Kirchhoff'sche Beugungsintegrale 264
 Kirchhoff'sche Gesetze
 – Knotensatz 481
 – Maschensatz 481
 Kirchhoff'sche Plattentheorie 246
 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz 403, 615
 Kleinwinkelnäherung 210
 Knotensatz 481
 Koaxialleitung 512
 Koerzitivfeldstärke 460, 843
 Koexistenzkurve 387
 kohärente Photonen 668
 Kohärenz 584
 Kohärenzlänge 257, 584
 Kohärenzzeit 257, 584
 Kohäsion 154
 Kohäsionsdruck 372
 Kohäsionsdruckparameter 372
 Kolbendruck 146
 kommunizierende Röhren 149
 komplexe Zahlen 492
 Kompressibilität 147
 Kompressibilitätsfaktor 370, 374
 Kompressibilitätskoeffizient 147
 Kompressionskältemaschine 354
 Kompressionsmodul 147
 Kondensator, elektrische Energie 431
 Kondensstreifen 393
 Konkavlinse 551
 Konstante 4
 Kontaktspannung Metalle 804
 Kontaktwinkel 155
 Kontinuitätsgleichung 162
 Kontraktionsbeiwert 167
 kontravariante Darstellung 874
 Konvektion 394

- Konversion, innere 705
 - Konvexlinse 551
 - Konvexspiegel 548
 - Koordinatenachsen 20
 - Koordinatensystem 19
 - kartesisches 20
 - Kopplungsschwingung 234
 - Korngrenze 765
 - Kleinwinkel-, Kipp-, Dreh- 774
 - Körper
 - grauer 402
 - nichtschwarzer 402
 - schwarzer 401
 - Körperschall 272
 - Korpuskeltheorie 269
 - Korrespondenzparameter 376
 - Korrespondenzprinzip 850
 - kosmischer Mikrowellen-Hintergrund 617
 - kosmische Strahlung 748
 - kosmologische Konstante 882
 - kovariante Darstellung 874
 - Kovolumen 372
 - Kowalewskaja-Kreisel 106
 - Kraft
 - dissipative 78
 - konservative 50, 77
 - Kraftarm 46
 - Krafterreger 225
 - Kraftstoß 74
 - Kraftsystem
 - nichtzentrales 118
 - zentrales 118
 - Kraftwärmemaschine 351
 - Kreisbewegung 35
 - Kreisel
 - drehmomentfreier 106
 - kräftefreier 106
 - oblater 103
 - prolater 103
 - sphärischer 103
 - symmetrischer 103
 - unsymmetrischer 103
 - Kreiselkompass 111
 - Kreiseltheorie 106
 - Kreisfrequenz 194
 - Kreisprozess 350
 - linkslaufender 351
 - rechtslaufender 351
 - Kreiswelle 248
 - Kreiswellenzahl 250
 - Kriechfall 223
 - Kristallgitter 766
 - Basis 766
 - Bravais-Gitter 767
 - Elementarzelle 766
 - flächen-, basis-, raumzentrierte E.-Z. 767
 - Gitter-/Netzebenen 769
 - Gitterparameter 767
 - Gittervektoren 769
 - Kristallrichtung 769
 - Kristallherstellung 779
 - Kristallit 765
 - Kristallkeim 778
 - Kristalloberfläche 775
 - Rekonstruktion 776
 - Relaxation 776
 - kritische Masse 743
 - kritischer Punkt 388
 - kritische Temperatur 373
 - Krümmungsmittelpunkt 548
 - Krümmungsradius 545
 - Kugelkondensator 429
 - Kugelkreisel 103
 - Kugelpackung, dichteste
 - hexagonale 766
 - kubische 766
 - Kugelstoßpendel 82
 - Kugelwelle 248, 507
 - Kuipergürtel 52
 - Kundt'sche Röhre 262
 - Kundt'sches Staubrohr 262
- L**
- Ladung 411
 - Ladungsdichte 412
 - Ladungsträgerdichte, Temperaturabhängigkeit 800
 - Lagerdämpfung 220
 - Lagrange-Formalismus 239
 - Lagrange-Kreisel 109
 - Lagrange-Punkte 57
 - Lambda-Punkt 176, 388
 - Lambert-Strahler 403
 - Lamé-Konstante, Erste 181
 - Landauer-Prinzip 340
 - Längenausdehnungskoeffizient 309
 - Längenkontraktion 867
 - Langrange-Kreisel 106
 - Längswelle 248
 - Laplace-Runge-Lenz-Vektor 54, 884

- Laser 662, 669
 - Helium-Neon 671
 - Resonator 670
 - Rubin 669
- Laser-Diode 832
 - Besetzungsinversion 832
 - Linienbreite 833
 - optischer Resonator 832
 - P(I)-Kennlinie 833
- Laserkühlung 675
- Lastarm 46
- Laue-Verfahren 771
- Lautheit 281
- Lautstärkepegel 281
- Laval-Düse 162
- Lawinendurchbruch 819
- Lawson-Kriterium 747
- LCD (Liquid Crystal Display) 582
- LED (Licht emittierende Diode) 831
 - Spektrum 831
- LEED (low energy electron diffraction) 777
- Lehr'sches Dämpfungsmaß 222
- Leidenfrost-Effekt 395
- Leistung 69
 - elektrische 480
 - mittlere 69
 - momentane 70
- Leistungsresonanz 230
- Leitfähigkeit 792
 - elektrische 477
- Leitungsband 788, 790
- Leitwert, elektrischer 477
- Lennard-Jones-Potential 151, 370
- Lenz'sche Regel 466, 473
- Lenz'scher Vektor 54, 884
- Leptonen 749
- Leslie-Würfel 402
- Leuchtröhre, Natriumdampf 663
- Liberationspunkte 57
- Licht
 - Ausbreitung 531
 - Erzeugung 532
 - Nachweis 532
- Lichtablenkung, gravitative 884
- Lichtausbeute 612
- Lichtgeschwindigkeit 530
- Lichtkegel 865
- Lichtstärke 7, 612
- Lichtstrom 611
- Lichtwellenleiter 538
 - Akzeptanzwinkel 539
 - Gradientenfaser 538
 - Monomode-Fasern 539
 - Stufenindexfaser 538
- Linde-Verfahren 377
- lineare Oszillatorkette 237
- linearisierter Verzerrungstensor 131
- Linielement 863
- Linienschwerpunkt 90
- Linksschraube 20
- Linse
 - dicke 559
 - dünne 551
 - sphärische 550
 - Typen 551
 - Vorzeichenregeln 565
- Linsenformel 554
- Linsenmacherformel 552
 - dicke Linse 560
- Linsensystem 556
 - Abbildungsgleichungen 558
 - Brechkraft 556
 - Brennweite 556, 558
 - Hauptebenen 557
- Lissajous-Figuren 203
- Lissajous-Orbit 58
- Ljapunow-Exponent 239
- Ljapunow-Spektrum 239
- Ljapunow-stabil 57
- logarithmisches Dekrement 223
- Longitudinalwelle 248
- Lorentz-Boost 860, 862
- Lorentz-Faktor 855, 859
- Lorentz-Fitzgerald-Kontraktion 867
- Lorentz-Gruppe 862
- Lorentz-Invariante 863
- Lorentz-Kontraktion 856, 867
- Lorentz-Kraft 444, 451
- Lorentz-Matrix 860
- Lorentz'sche Äthertheorie 857
- Lorentz-Skalar 863
- Lorentz-Transformation 26, 858
 - eigentliche 862
 - orthochrone 862
 - spezielle 860, 862
- Lorenz-Zahl 397, 794
- Loschmidt-Konstante 304
- Luftdruck 146
- Luftfeuchtigkeit 389
 - absolute 389

- maximale 389
- relative 390
- Luftschall 272
- Luftspiegelung 539
- Luftwiderstand 68
- Lumen 611
- Lumineszenz-Dosimeter 741
- Lupe 568
 - Normalvergrößerung 568
- Lux 613

- M**
- Mach'scher Kegel 276
- Mach'scher Winkel 276
- Mach'sches Prinzip 881
- Mach-Zahl 276
- Mach-Zehnder-Interferometer 260
- Madelung-Konstante 763
- magische Nukleonenzahlen 687
- Magnetfeld 442
- magnetische Domänen 842
- magnetische Feldstärke 444
- magnetischer Dipol, Drehmoment 455
- magnetischer Kreis 461
- Magnetisierung 456
- Magnetisierungskurve 459
- Magnetit 845
- Magnetkraft 472
- Magnetowiderstand
 - anisotroper (AMR) 846
 - negativer 847
 - positiver 846
 - Riesen-(GMR) 847
 - Spin-Valves 848
- Magnus-Effekt 168
- Magnus-Formel 390
- Majoritätsladungsträger 798
- Makrozustand 305
- Maschensatz 481
- Masse
 - aktive schwere 880
 - passive schwere 880
 - schwere 46
 - träge 41
- Masse-Energie-Äquivalenz 876
- Masse-Energie-Beziehung 876
- Massenabsorptionskoeffizient 728
- Massenreichweite 721
 - β -Strahlung 724
- Massenschwächungskoeffizient 724
- Massenschwerpunkt 88
- Massenspektrometer 682
- Massenstromdichtefeld 160
- Massenwirkungsgesetz der
 - Ladungsträgerdichten 796
- Massenzahl 677
- Massepunkt 19
- Masse, relativistische 875
- Maßstabparadoxon 871
- Materialdämpfung 220
- Material, dispersives 252
- Materiewelle 247
 - stehende 631
- Materiewellenlänge 623
 - Elektron 624
 - Neutron 625
- Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung
 - 316
- Maxwell-Gleichungen 264
- Maxwell-Konstruktion 375
- Maxwell'sche Gleichungen 473
- Maxwell'scher Dämon 338
- Mayer'sche Gleichung 330
- mechanisches Wärmeäquivalent 325
- mechanische Theorie der Wärme 326
- Meißner-Ochsenfeld-Effekt 808
- Mesonen 750
- Messreihe 10
- Messunsicherheit 9
- Metall 790
- Metall-Halbleiter-Kontakt 811, 813
 - Bandverbiegung 812
 - Ohm'scher Kontakt 813
 - Raumladungszone 812
 - Schottky-Barriere 812
- metallischer Glanz 510
- Metall-Isolator-Halbleiter-Struktur (MIS/MOS)
 - 822
- Metrik 883
- Metriktensor 882
- Michelson-Interferometer 260, 590, 854
- Michelson-Morley-Experiment 854
- Mikroskop 570
- Mikrozustand 305
- Miller'sche Indizes 769
- Millikan-Versuch 420
- Minkowski-Abstand 863
- Minkowski-Diagramm 863
- Minkowski-Kraft 874
- Minkowski-Vektorraum 862

- Minoritätsladungsträger 798
 Mischtemperatur 328
 Mittelpunktstrahl 545, 553
 Mittenfrequenz 234
 Mittenkreisfrequenz 198
 mittlere freie Weglänge 318
 mittlere Lebensdauer 692
 mittlere skalare Geschwindigkeit 22
 Modell des idealen Gases 314
 Moderation 729
 Moderator 744
 Molalität 381, 383
 molare Wärmekapazität 326
 Molekül, Dipolmoment 422
 Molvolumen, kritisches 373
 Momentenunwucht 96
 Moseley'sches Gesetz 666
 MOS-Feldeffekt-Transistor (MOSFET) 822
 MOSFET
 – Gate, Source, Drain 822
 – Inversionsschicht 822
 – I(U)-Kennlinie, Sättigungsbereich 823
 – n-Kanal, p-Kanal 823
 – unipolar 823
 Mößbauer-Effekt 887
- N**
- Nachzerfallswärme 713, 745
 Naturkonstante 4
 natürliche Variable 307
 Navier-Stokes-Gleichungen 175
 Nebelkammer 720, 735
 – Diffusions- 736
 – Expansions- 736
 Néel-Temperatur 844
 Nernst-Theorem 340
 Neuber'sche Schale 142, 143
 neutrale Faser 139
 Neutrino 700, 748, 750, 752
 – Anti-Elektron 700
 Neutron 641, 748, 751
 – Durchmesser 642
 – Masse 641, 684
 – thermisches 711, 729, 743
 – Zerfallsgleichung 700
 Neutronenaktivierung 714
 – Aktivität 715
 Neutronenaktivierungsanalyse 718
 Neutronen-Strahlung 729
 Neutronenüberschuss 687
 Neutronenzahl 641, 677
 Newton-Reibung 221
 Newton'sche Gesetze 40
 Newton'sches Gravitationsgesetz 47, 48
 Newton'sches Pendel 82
 Newton'sches Reibungsgesetz
 – für Flüssigkeiten 178
 – für Gase 181
 Noether-Theorem 853
 Normalkraft 121
 Normalluftdruck 302
 Normalspannung 126
 Normalverteilung 10
 Normfallbeschleunigung 31
 Normierungsbedingung 627
 Nukleon 641
 Nukleosynthese 690
 Nuklid 678
 – primordiales 690
 Nuklidkarte 678
 Nullauftriebskraft 172
 Nullphasenwinkel 194
 Nullpunktenergie 633
 Nutationsbewegung 107
 Nutationskegel 108
 Nutzschaal 272
- O**
- obere Hörgrenze 273
 Oberflächenenergie 155
 Oberflächenspannung 151
 Oberflächenzustände 811
 Oberschwingung 199
 Objektpunkt 545
 Oganessum 719
 Ohm'sches Gesetz 478, 791
 Onnes-Effekt 176
 optisch anisotrop 580
 optisch dichter 534
 optisch dünner 534
 optische Achse 544, 551, 580
 optische Aktivität 583
 optische Weglänge 535
 ordentlicher, außerordentlicher Strahl 580
 Ordnungszahl 641
 Orientierungspolarisation 437
 Ortsvektor 20
 Oszillator 192
 Oszillograph 204
 Oszilloskop 204

Otto-Kreisprozess, idealisiert 358

P

Paarbildung 705, 727

– Teilchen-Antiteilchen 701

Panzerparadoxon 871

Paradoxon

– d'Alembert'sches 171

– hydrodynamisches 167

– hydrostatisches 148

– Pascal'sches 148

Parallelstrahl 545, 553

Paralleltransport 882

Paramagnet

– elementarer 839

– Langevin- 839

Paramagnetismus 457

– Pauli- 840

Partialdrücke 384

Partialwelle 255

Pascal'sches Gesetz 150

Pascal'sches Prinzip 302

Pauli-Prinzip 789

Pauli'sches Ausschließungsprinzip 656

Peltier-Effekt 806

Peltier-Koeffizient 806

Pendel

– ebenes 209

– mathematisches 209

– physikalisches 214

Pendellänge, reduzierte 215

Peng-Robinson-Zustandsgleichung 376

Periastrondrehung 55

Perigäumsdrehung 55

Perihel 49

Perihelabstand 49

Periheldrehung 54, 884

Periodendauer 192

Periodensystem der Elemente

– Gruppen 657

– Perioden 657

Permanentmagnet 460

Permeabilität, relative 456

Permeabilitätszahl 456

Permittivität, relative 434

Permittivitätszahl 434

Phasendiagramm 389

Phasendifferenz 583

Phasengeschwindigkeit 243, 251, 253, 541

Phasengrenzlinie 387

Phasenverschiebung 490, 491, 493, 495

Phasenwinkel 194

Phasenwinkelspektrum 199

Phonon 782

– Energie 782

– Impuls 782

– Quasiteilchen 782

Phononen-Dispersionsrelation 251

Phononen-Gas 784

Phosphoreszenz 662

Photodiode 825

– pin-Diode 825

– Quanteneffizienz 825

Photoeffekt 516, 617, 725

photoelektrischer Effekt 662

Photometrie 606

Photomultiplier 734

Photon 618, 750

– Energie 618

– Impuls 619

Photon-Absorption/-Emission, resonante,
spontane 661

Photonen-Spin 652

Photonenstromdichte 619

piezoelektrisch 777

Piezoelektrizität 440

– direkter/reziproker Effekt 440

– piezoelektrischer Koeffizient 441

Pitot-Rohr 173

Planck-Einheiten 851

Planck-Konstante 851

– reduzierte 851

Planck-Ladung 851

Planck-Länge 851

Planck-Masse 851

Planck'sches Strahlungsgesetz 406, 616

Planck'sche Strahlungshypothese 616, 618

Planck'sches Wirkungsquantum 5, 406, 616,
851

– Bestimmung 619

– reduziertes 616

Planck-Skala 851

Planck-Temperatur 851

Planck-Zeit 851

Planetengesetze 47

Plasma 747

plastische Verformbarkeit 774

Plastizitätstheorie 125

Platonisches Jahr 112

Plattenkondensator 435

- Plattensatzpolarisator 579
 - pn-Kontakt 815
 - Diffusionsspannung 817
 - Diffusionsströme 815
 - Diode 815
 - Feldströme 816
 - Raumladungszone (RLZ) 816
 - Breite 817
 - relative Breite 816
 - Pockels-Zelle 582
 - Poisson'sche Gleichungen 348
 - Poisson'sches Gesetz 274, 348
 - Poisson-Verteilung 695
 - Poisson-Zahl 275
 - Polarimeter 578
 - Polarisation 248, 577
 - elektrische 436
 - Himmelslicht 509
 - lineare, zirkulare 577
 - magnetische 456
 - Polarisationsfilter 578, 581
 - Polarisationsrichtung 577
 - Polhodiekegel 108
 - Polytrophenexponent 349
 - Positron 748
 - Positronen-Emissions-Tomografie 718
 - Potential
 - Dipol 428
 - elektrisches 476
 - elektrostatisches 422
 - Punktladung 425
 - Potentialdifferenz 423
 - Potentialtopf
 - Coulomb, Atom 634
 - harmonisch, Molekül, Festkörper 634
 - Potentialtopfmodell 686
 - Potentialwall 634
 - Pound-Rebka-Experiment 887
 - Poynting-Vektor 507
 - Präfixe 8
 - Prandtl-Glauert-Kondensationswolke 277
 - Prandtl'sches Staurohr 173
 - Prandtl-Sonde 173
 - Präzession 110
 - Zyklus 112
 - Primärelemente 528
 - Primärwelle 265
 - Prisma 549
 - Ablenkwinkel 549
 - Basis 549
 - brechender Winkel 549
 - Porro-Prisma 538
 - spektrale Zerlegung 540
 - Umkehrprisma 538
 - Umlenkprisma 538
 - Proportionalzählrohr 732
 - Proton 641, 748, 751
 - Durchmesser 642
 - Ladung 641
 - Lebensdauer 701
 - Masse 641
 - Protonenaktivierung 718
 - Puls-Echo-Verfahren 290
 - Punktdefekt
 - Frenkel-Paar 773
 - Leerstelle, Schottky-Defekt 772
 - Substitutionsdefekt 773
 - Zwischengitterplatz 772
 - Pyrometer, fotoelektrisches 408
- Q**
- Quantenchromodynamik 748, 751
 - Quantencomputer 639
 - Quanten-Kohärenz 639
 - Quanten-Kryptographie 638
 - Quantenzahl 632, 633
 - Drehimpuls 645
 - Haupt 643
 - magnetische 645
 - Quark-Modell 748
 - Quarks 750
 - Farb-Confinement 751
 - Farb-Ladung 750
 - Quarz-Thermometer 300
 - Qubit 639
 - Quecksilberbarometer 146
 - Quellenfeld 415
 - Quellenspannung 475
 - Querdehnungszahl 275
 - Querkontraktionszahl 134, 181, 275
- R**
- Radar-Interferometrie 260
 - Radialbeschleunigung 39
 - radioaktiver Zerfall
 - Isotopengemisch 694
 - Zerfallskanäle 694
 - Zerfallsreihe 695
 - Radioaktivität 690
 - künstliche 690

- natürliche 690
- Radiografie 717
- Radiometrie 606
- Radionuklidbatterie 805
- Radiusvektor 36
- Rapidität 861
- Raster-Tunnel-Mikroskopie 777
- Rastpolkegel 108
- Raumladungszone (RLZ) 812
- Raumwinkel 608
- Raum-Zeit 862
- Raum-Zeit-Kontinuum 862
- Rayleigh-Brace-Experimente 857
- Rayleigh-Jeans-Gesetz 616
- Rayleigh-Jeans'sches Strahlungsgesetz 406
- Rayleigh-Kriterium 603
- Rayleigh'sche Beziehung 256
- Rayleigh-Scheibe 274
- Rayleigh-Streuung 509
- RC-Glied 484
- Reaktion
 - endotherme 711
 - exotherme 711
- Reaktionsenergie 710
- Reaktionsprinzip 42
- Rechte-Hand-Regel 38
- Rechtsschraube 20
- Rechtsschraubenregel 443
- Rechtssystem 20
- Reflexion 84, 264, 266, 535
 - Grenzfläche 534
 - Phasensprung 576
- Reflexionsgesetz 267
- Reflexionsgrad 401
- Reflexionskoeffizient 575
- Refraktion 267
- Regression 14
- Reibung
 - äußere 120
 - innere 120, 175
- Reibungsarbeit 68
- Reibungszahl 122
- Reichweite
 - α -Strahlung 720, 721
 - β -Strahlung 723
 - empirische Formel 721
- Reissner-Nordstrom-Metrik 883
- relative Atommasse 641
- relativistische Effekte 867
- relativistischer Faktor 855
- relativistisches Additionstheorem 873
- Relativitätsprinzip, spezielles 857
- Relativitätstheorie 850
 - allgemeine 47, 880
 - spezielle 851
- Remanenzflussdichte 460, 843
- Repetenz 250
- Resonanz 225, 227, 729
- Resonanzbedingung 241
- Resonanzfrequenz 227
- Resonanzkatastrophe 227
- Resonanzkurve 227
- Resonator 227
- Restitutionskoeffizient 84
- Restwiderstand 792
- Reversionspendel 215
 - symmetrisches 217
- Reynolds'scher Transportsatz 175
- Reynolds'sches Turbulenzkriterium 183
- Reynolds'sche Zahl 183
- Reynolds-Transport-Theorem 175
- Reynolds-Zahl 183
- reziprokes Gitter 771
- Rheologie 144
- Ricci-Krümmungsskalar 882
- Ricci-Krümmungstensor 882
- Richardson-Konstante 813
- Richmann'sche Mischungsregel 328
- Richtmoment 218
- Riemann'scher Krümmungstensor 882
- Rollin-Film 176
- Rollreibung 124
- Rollwiderstand 124
- Röntgenfluoreszenzanalyse 666
- Röntgenstrahlung
 - Bremsstrahlung 665
 - charakteristische 665
 - Halbwertsdicke 667
 - Schwächungsgesetz 667
 - Schwächungskoeffizient 667
- Rotation 18, 92
- Rubens'sches Flammenrohr 263
- Rückstellkraft 206
- Rückstellmoment 218
- Ruheenergie 702, 876
- Ruhemasse 875
- Ruhereibung 121, 122
- Ruhereibungszahl 122
- Runge-Lenz-Vektor 54, 884
- Rydberg-Energie 643, 650

S

- Sabin 285
- Saccharimeter 583
- Sagnac-Interferometer 260
- Saint-Venant'sche Torsion 142
- Sammellinse 551
- Sättigungsdampfdruck 375
- Sättigungsflussdichte 460, 843
- Sättigungsluftfeuchtigkeit 389
- Sättigungspolarisation 843
- Satz von Steiner 98
- Saugheberprinzip 149
- Schalenmodell 687
- Schall 272
- Schallabsorptionsgrad 283
- Schallabsorptionsvermögen 285
- Schalldissipationsgrad 283
- Schalldruck 277
- Schalldruckpegel 279
- Schallenergiedichte 279
- Schallfeld 272
- Schallgeschwindigkeit 252
- schallhart 284
- Schallintensität 279
- Schallkennimpedanz 278
- Schallkopf 290
- Schalleistung 279
- Schalleistungsdichte 279
- Schallreflexionsgrad 283
- Schallschnelle 273
- Schallschnellepegel 273
- Schalltransmissionsgrad 283
- Schallwechseldruck 277
- schallweich 284
- Schallwelle 247, 272
- Schallwellenwiderstand 278
- Schallwiderstand 278
- Scheinkräfte 59
- Scheinleitwert 494
- Scheinwiderstand 493
- Scheitelstrahl 545
- Schergeschwindigkeit 178
- Scherrate 178
- Scherspannung 179
- Scherturbulenz 185
- Scherung 141
- Scheunenparadoxon 871
- Schichtenströmung 182
- schiefe Ebene 93, 122
- Schmelzdruckkurve 389
- Schmelzwärme, spezifische 380, 382
- Schneckenfeder 217
- Schottky-Barriere 812
- Schottky-Defekt 772
- Schottky-Diode 814
- Schottky-Kontakt 813
 - I(U)-Kennlinie 814
 - Sperrsättigungsstrom 814
- Schraubenbahn 35
- Schrödinger-Gleichung 626
 - Randbedingung 632
 - Teilchen im Potentialtopf 630
 - zeitunabhängige 631
- Schubmodul 134
- Schubspannung 126, 179
- schwaches Äquivalenzprinzip 30
- Schwächungsgesetz 724
- Schwächungskoeffizient 724
- Schwarzer Körper 615
- schwarzes Loch 883
- Schwarzschild-Metrik 883
- Schwarzschild-Radius 56, 887
- Schwebung 197, 260
 - maximale 234
 - unreine 198
- Schwebungsdauer 197
- Schwebungsfrequenz 198
- Schwebungsschwingung 234
- Schwerebeschleunigung 30
- Schweredruck 146, 148, 164
- Schwerewelle 252
- Schwerkraft 46
- Schwerpunkt 88
 - geometrischer 90
- Schwerpunktsystem 89
- Schwingfall 222
- Schwingkreis, Dipol 502
- Schwingung
 - Drehschwingung 205
 - gegensinnige 234
 - gleichsinnige 233
 - harmonische 194
 - longitudinale 235
 - modulierte 197
 - parametererregte 225
 - periodische 198
 - rheolineare 225
 - stationäre 225
 - transversale 235
 - zirkulare 204

- Schwingungsdämpfer 221
- Seebeck-Effekt 300, 804
- Seebeck-Koeffizient 804
- Sehwinkel 567
- Seiliger-Kreisprozess 364
- Seilreibung 123
- Sekundärelement 528
- Sekundäremission Elektronen 516
- Sekundärwelle 264
- Selbstinduktion 469
- Shockley-Gleichung 818
- Siedetemperatur 381
- Siedeverzug 382
- SI-Einheit
 - Becquerel 691
 - Gray 738
 - Sievert 739
- Signalgeschwindigkeit 256
- Skalarprodukt 70
- Skin-Effekt 510
- Snellius'sches Brechungsgesetz 268, 536
- Soave-Redlich-Kwong-Zustandsgleichung 376
- Solarkonstante 404, 610
- Solarzelle 825
 - Bandlücke/spektrale Verluste 829
 - direkte/indirekte Bandlücke 828
 - Dünnschicht- 829
 - Füllfaktor 827
 - I(U)-Kennlinie 826
 - Kurzschlussstrom 827
 - Leerlaufspannung 827
 - Tandem- 829
 - Typ cSi 826
 - Wirkungsgrad 827
 - Wirkungsgrad/Bandlücke 827
- Sonografie 290
- Spallation, nukleare 713
- Spallationsneutronenquelle 714
- Spaltbeugungsfunktion 600
- Spaltenvektor 22
- Spaltfragmente 712
- Spaltungsenergie 713
- Spannkraft 69
- Spannung
 - elektrische 423
 - magnetische 447
- Spannungsabfall 476
- Spannungsfeld 126
- Spannungstensor 127
- Spannungszustand 126
 - ebener 129
 - einachsiger 129
 - homogener 129
 - hydrostatischer 129
 - zweiachsiger 129
- spektraler Emissionsgrad 402
- Spektralfarben 540
- Spektralfilter 591
- Spektrallinien
 - Emission, Absorption 651
 - Frequenz 651
- Spektrometrie 663
- Sperrspannung 814
- spezifische Gaskonstante 322
- spezifische Wärmekapazität 326
- Spiegel 542
 - ebener 542
 - Ellipsoid 543
 - gekrümmter 543
 - Konkav-, Hohl- 543
 - Konvex-, Wölb- 543
 - Parabol- 544
 - sphärischer 544
- Spin-Bahn-Kopplung 654, 663
- Spin-Bahn-Wechselwirkung 687
- Spiralbahn 35
- Springbrunnen-Effekt 176
- Spule, ferromagnetischer Ringkern 460
- Spurdetektor 735
- Spurkegel 108
- Standardabweichung 10, 696
 - relative 696
- Standard-Elektrode 527
- Standardmodell
 - Elementarteilchenphysik 748
 - Grenzen 754
- starrer Körper 19, 87
- Statik 18
- statisches Gleichgewicht 117
- Staudruck 164, 168
- Staupunkt 168
- Staupunktsstromlinie 168
- Stefan-Boltzmann-Gesetz 404, 615
- Stefan-Boltzmann-Konstante 404
- Steighöhenmethode 154
- Steradian 608
- Stichprobe 11
- Stirling-Kreisprozess 366
- Stokes-Reibung 221
- Stokes'sche Gleichung 184

- Stokes'sche Hypothese 180
 Störschall 272
 Störstellenniveau 799
 Stoß 78
 Stoßnormale 79
 Stoßzahl 84
 Strahlantrieb 74
 Strahlaufweitung 602
 Strahl, ausgezeichneter 545, 553
 Strahlenoptik 534
 Strahlenschutzverordnung 740
 Strahlstärke 608
 Strahlungsäquivalent, photometrisches 610
 Strahlungsausbeute 612
 Strahlungsbelastung Umwelt 740
 Strahlungsdruck 621
 Strahlungsfluss 404, 606
 Strahlungsflussdichte 507, 607
 Strahlungsrekombination 824, 831
 Strahlungsthermometrie 300
 Strahlungswichtungsfaktor 739
 Streuexperimente 679
 Streuung 791
 – α -Teilchen 680
 – elastische 662
 – Elektronen 680
 – Kristallfehler, Verunreinigungen 792
 – Neutronen 680
 – Phononen 792
 Streuzeit, mittlere 791
 Stromdichte 412
 – Driftgeschwindigkeit, Beweglichkeit 520
 Stromfaden 161
 Stromkreis
 – mit Kondensator, Widerstand 482
 – mit Spule, Widerstand 484
 Stromlinie 161
 Stromlinienverengung 167
 Stromröhre 161
 Strömung
 – laminare 182
 – stationäre 161, 183
 – transsonische 188
 – turbulente 183
 Strömungsfeld 160
 Strömungslehre 144
 Strömungsmechanik 144
 Strömungswiderstand, Körper 188
 Strömungswiderstandsbeiwert 170
 Strömungswiderstandskraft 68
 Strouhal-Zahl 187
 Sublimation 383
 Sublimationsdruck 383
 Sublimationsdruckkurve 389
 Superfluidität 175
 Superposition 196
 Superpositionsprinzip 255
 Suprafluidität 175
 Supraleiter
 – 1. Art 809
 – 2. Art 809
 – Flussschläuche 809
 – Hochtemperatur- 807
 Supraleitung 636, 806
 – BCS-Theorie 808
 – Cooper-Paare 808
 – Flussquant 810
 – kritisches Magnetfeld 809
 – Meißner-Ochsenfeld-Effekt 808
 – Sprungtemperatur 806
 Suszeptibilität
 – elektrische 436
 – magnetische 456
 Synchrotron 518
 Synchrotronstrahlung 759
 System
 – abgeschlossenes 301
 – geschlossenes 301
 – offenes 301
 Systemdämpfung 220
 Szintillationszähler 733
- T**
- Target 710
 Taupunkt 391
 Taupunkt-Hygrometer 393
 Taupunkttafel 392
 Taupunkttemperatur 391
 Teilchen
 – Antiteilchen 750
 – Pion 751
 Teilchenbeschleuniger 714, 755
 Teilchenstrom 412
 Telegraphengleichungen 513
 Teleobjektiv 559
 Temperaturleitfähigkeit 397, 398
 Temperatur, schwarze 408
 Temperaturstrahlung 616
 Termschema
 – Natrium 663

- Wasserstoffatom 652
- thermische Ausdehnung 785
- thermische Kontraktion 309
- Thermodynamik
 - Hauptsätze 324
 - 1. 332
 - 2. 336
 - 3. 340
 - phänomenologische 297
 - statistische 297
 - technische 297
- thermodynamische Prozessgrößen 301
- thermodynamische Zustandsgröße 298
- Thermoelement 300, 804
- Thermometer 298
- Thermopaar 804
- Thermosäule 804
- Thermospannung 300, 804
- Tiegelziehverfahren 779
- Torricelli'sche Röhre 384
- Torricelli'sches Ausflussgesetz 165
- Torricelli'sches Theorem 165
- Torsion 142
- Torsionsdrehwaage 219
- Torsionsfeder 219
- Torsionsmoment 143
- Torsionspendel 219
- Torsionsschwingung 205
- Torsionswelle 248, 272
- Totalreflexion 268, 536, 537
 - Grenzwinkel 537
- Tracer 718
- Trägheitsellipsoid 103
- Trägheitskraft 40, 59
- Trägheitsmoment 93, 95
- Trägheitsprinzip 40
- Trägheitstensor 93, 101
- Transformator
 - Leistungsverluste 499
 - Primär-, Sekundärspannung 498
 - Stromübertragung 498
 - Übersetzungsverhältnis 498
- Transistor, bipolarer 820
 - Basisschaltung 820
 - Emitter, Basis, Kollektor 820
 - Spannungsverstärkung 821
 - Stromverstärkung 821
- Translation 18, 92
- Transmission 535
- Transmissionsgrad 400

- Transmissionskoeffizient 575
- Transurane 697
- Transversalwelle 248
- Tripellinie 388
- Tripelpunkt 388
 - Wasser 298
- Tripelspiegel 543
- Trojaner 58
- Trojanermonde 58
- Tröpfchenmodell 685
- Trouton-Noble-Experiment 857
- Tunneleffekt 634, 777, 813, 834
 - α -Zerfall 699
- Tunnel-Wahrscheinlichkeit 635
- Turbulenz 188
 - homogene 185
 - isotrope 185
- Twyman-Green-Interferometer 260

U

- überlichtschnell 638
- Überschallgeschwindigkeit 275
- Ultraschall-Lötgerät 289
- Ultraschall-Waschmaschine 289
- Umdrehungsdauer 37
- Umdrehungsfrequenz 37
- Umgebungsdämpfung 221
- Unwucht
 - dynamische 96
 - statische 96

V

- Vakuum-Lichtgeschwindigkeit 5
- Valenzband 788, 790
- Van-der-Waals-Kraft 765
- Van-der-Waals-Parameter 372
- Van-der-Waals-Zustandsgleichung 371
- Vektor, wirkungsliniengebundener 115
- Venturi-Durchflussmessung 173
- Venturi-Effekt 162
- Venturi-Rohr 172
- Verbindungshalbleiter 801
- Verdampfungstemperatur 381
- Verdampfungswärme, spezifische 382
- Verdichtungsverhältnis 359
- Verdunstungszahl 382
- Verfahren
 - magnetostriktives 289
 - piezoelektrisches 289
- Verfestigungszone 136

- Verformungsarbeit 69
 Vergrößerung 568
 Verschiebungsarbeit 66, 67
 Verschiebungspolarisation 436
 Verschiebungsstrom 473
 verschränkte Photonen 637
 verschränktes System 637
 Verschränkung 636
 Versetzung 773
 – Schrauben- 773
 – Stufen- 773
 Vertrauensbereich 9
 Vertrauensniveau 11
 Verzerrung 130
 Vielstrahlinterferenz 592
 Viererbeschleunigung 874
 Vierergeschwindigkeit 874
 Viererimpuls 874
 Viererkraft 874
 Virialentwicklung 371
 Viskosimeter 180
 – von Engler 180
 Viskosität 145, 175
 – dynamische 178
 – kinematische 179
 – Zweite 180
 Vis-Viva-Gleichung 51
 Volta-Element 528
 Volumenausdehnungskoeffizient 311
 Volumenelastizität 147
 Volumenschwerpunkt 90
 Volumenstrom 161
 Volumenviskosität 180
 Vorzeichenkonvention 547, 552
- W**
- Wahrscheinlichkeitsdichte 627, 632
 Wärmekapazität 326, 793
 – Elektronengas 793
 – Festkörper 783
 Wärme, latente 380
 Wärmeleitfähigkeit 397
 – Elektronengas 793
 – Festkörper/Isolator 784
 Wärmeleitung 394, 784
 – Isolatoren 784
 – nichtstationäre 398
 – stationäre 396
 Wärmestofftheorie 325
 Wärmestrahlung 394
 Wärmestrom 396
 Wärmeströmung 394
 Wärmeübergang 394
 Wärmeübergangskoeffizient 394
 Wärmewiderstand 395
 Wasser, schweres 745
 Wasserstoffatom 650
 – Lyman-, Balmer-, Paschen-Serie 651
 – Orbitale 652
 – Radius 652
 Wasserstoff-Brücken-Bindung 765
 Wasserwelle 247
 Weber-Fechner'sches Gesetz 280
 Wechselspannung 486
 Wechselstrom 485, 487
 Wechselstromgenerator 486, 487
 Wechselstromkreis
 – kapazitiver, induktiver Blindwiderstand 495
 – komplexe Rechnung 492
 – Ohm'scher Wirkwiderstand 495
 – Parallelschaltung R, L, C 494
 – Reihenschaltung R, L, C 493
 – Scheinleistung 496
 – Wirk-, Blindleistung 497
 – Wirk- und Blindstromstärke 496
 Wechselwirkung
 – elektromagnetische 753
 – elektroschwache 748, 753
 – Gravitation 749
 – Kernkraft 751
 – schwache 750, 752
 – starke 677, 750
 Weglänge, mittlere freie 181
 Weg-Zeit-Gesetz 23
 Weiss'sche Bezirke 842, 843
 Welle
 – ebene 248
 – einfache 249
 – elektromagnetische 247
 – kohärente 257
 – mechanische 247
 – monochromatische 256
 – seismische 247
 – stationäre 261
 – stehende 261
 Wellenfläche 248
 Wellenfront 248
 Wellenfunktion 249
 – Gesamt- 636

- Interpretation 628
- Teilchen 626
- Wellengleichung 249
- homogene 243, 249
- Wellengruppe 255
- Wellenlänge 253
- in Material 535
- Wellenleiter 513
- Wellenpaket 255, 628
- Wellentheorie 269
- Wellenvektor 250
- Wellenwiderstand, Vakuum 507
- Wellenzahl 250, 632, 780
- Wellenzug 255
- Welle-Teilchen-Dualismus 620, 623
- Weltlinie 864
- Werkstoffdämpfung 220
- Widerstand
 - Beweglichkeit 520
 - differentieller 479
 - elektrischer 477
 - elektrischer spezifischer 477
 - spezifischer 792
 - Temperaturkoeffizient 479
- Widerstandsfläche 188
- Widerstandsthermometer, elektrisch 300
- Wiedemann-Franz-Gesetz 397, 794
- Wien'scher Geschwindigkeitsfilter 683
- Wien'sches Strahlungsgesetz 405, 616
- Wien'sches Verschiebungsgesetz 407, 617
- Wien'sche Verschiebungskonstante 407
- Winkelbeschleunigung 37
- momentane 37
- Winkelgeschwindigkeit
 - mittlere 36
 - momentane 36
- Winkelrichtgröße 218
- Wirbelbildung 185
- Wirbelfeld 442
- elektrisches 467
- Wirbelstrom 468
- Wirkleistung 230, 495
- Wirkungsquerschnitt 317, 725
- Compton-Effekt 727
- Einheit barn 714
- Neutroneneinfang 714
- Paarbildung 727
- thermische Neutronen 729
- Wirkwiderstand 489
- Wölbkrafttorsion 142

- Wolkenscheibeneffekt 277
- Wurf 32
- Wurfparabel 33
- W-/Z-Boson 750

Y

- Young-Gauß-Gleichung 155
- Young-Laplace-Gleichung 153

Z

- Zähflüssigkeit 145, 175
- Zähigkeit
 - dynamische 178
 - kinematische 179
- Zahlentripel 22
- Zeilenvektor 22
- Zeitdilatation 868
- Zener-Diode 820
- Zener-Effekt 820
- Zentralgestirn 47
- Zentralkräfte 76
- Zentrifugalbeschleunigung 60
- Zentrifugalkraft 60
- Zentripetalbeschleunigung 39
- Zentripetalkraft 60
- Zerfall
 - α 696, 697
 - β 696, 699
 - β^- 699
 - β^+ 701
 - ϵ^- , Elektronen-Einfang 703
 - γ 696, 704
 - Nuklidkarte 703
- Zerfallsenergie 697
- Zerfallsgesetz 691, 692
- Zerfallskonstante 690
- Zerfallsreihe 705
- Nuklidkarte 709
- Zerfallsschema 697
- Zerfallswahrscheinlichkeit 690
- Zerstreuungslinse 551, 555
- Zonenschmelzverfahren 779
- Zufallszahlen 638
- Zugfestigkeit 137
- Zustand 633
- Zustandsänderung
 - adiabatische 346
 - irreversible 334
 - isobare 343
 - isochore 342

- isotherme 344
- polytrope 349
- reversible 334
- Zustandsdichte 783, 789
- Zustandsgleichung des idealen Gases 322
- Zustandsgröße
 - extensive 301
 - intensive 301
- zweidimensionales Elektronensystem 824
- Zwillingsparadoxon 869
- Zyklotron 755
 - Isochron- 756
- Zyklotronfrequenz 756
- Zylinderkondensator 430
- Zylinderspule 443
- Zylinderwelle 248