

## 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,  $\kappa$ : Isentropenkoeffizient). Zur Messung der Temperatur wird die Frequenz  $f$  einer stehenden Welle in einem gasgefüllten Hohlraum gemessen, dessen Abmessungen die Wellenlänge  $\lambda$  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  $^{12}\text{C}$ -Atome in 0,012 kg, der molaren Masse von  $^{12}\text{C}$  entspricht. Da das aber nur im Rahmen der Messgenauigkeit gilt, ist nun die Anzahl der  $^{12}\text{C}$ -Atome eine Messgröße.

Die bisher genaueste Bestimmung der Avogadro-Konstanten wurde mit einer  $^{28}\text{Si}$  (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  $^{28}\text{Si}$  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	$10^6$	$\mu$	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.:  $50\,000\text{ kg} = 50\text{ Mg} = 50\text{ t}$ .

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

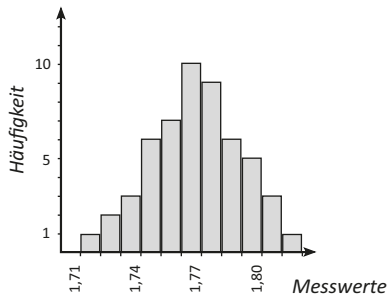
Jede Messung ist mit Unsicherheiten behaftet. Mit erhöhtem Aufwand kann man die Unsicherheit zwar verringern, man kann sie aber grundsätzlich nicht beseitigen. Ein Messergebnis ist daher immer nur ein Schätzwert für den *Erwartungswert*, den „wahren“ Wert der jeweiligen Messgröße. Zur vollständigen Angabe 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

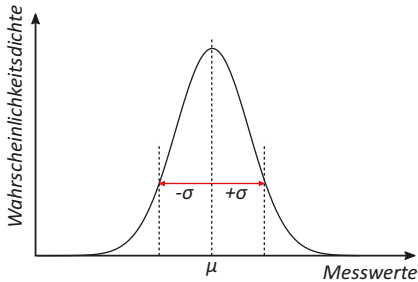
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (1.1)$$

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

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

Der Parameter  $\mu$  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*  $\sigma$  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  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  begnügen. Für normalverteilte Messwerte  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ist der beste Schätzwert für  $\mu$  der

Mittelwert der Messreihe<sup>1</sup>

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

Als Schätzwert für  $\sigma$  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

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

<sup>1</sup> 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  $\Delta x_p$  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 Rechenggerät (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  $\Delta x_p$  ist nur eine Stelle real signifikant, also physikalisch sinnvoll. Die real signifikanten Stellen von  $\bar{x}$  ergeben sich aus dem Wert von  $\Delta x_p$ . 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  $P = (22 \pm 0,6) \cdot 10^3 \text{ W}$ .

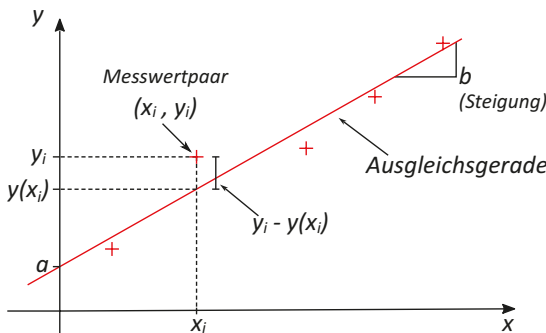
### 1.3.4 Regression

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

$^{14}\text{C}$ -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

achснаhe 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

$\alpha$ -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**
- $\beta^+$ -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  
 $\beta$ -Strahlung 722  
 Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 3  
 $\beta^-$ -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  $\Omega$  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
  - $\gamma$ -Strahlung 704, 725
  - $\gamma$ -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
  - $\beta$ -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
  - Mittelfrequenz 234
  - Mittlenkreisfrequenz 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
  - Nutzschall 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
  - $\alpha$ -Strahlung 720, 721
  - $\beta$ -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  
 –  $\alpha$ -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
  - $\alpha$ -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
  - $\alpha$  696, 697
  - $\beta$  696, 699
  - $\beta^-$  699
  - $\beta^+$  701
  - $\epsilon^-$ , Elektronen-Einfang 703
  - $\gamma$  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