

# 1 Einführung

## 1.1 Physik und Bauphysik

Die Physik ist eine **empirische** Wissenschaft. Sie beruht auf der Beobachtung der Natur und der von uns selbst geschaffenen Umwelt, zu welcher wir z. B. auch Baustellen, Ingenieurbauten und Gebäude mit ihrer Ausstattung zählen. Als Resultate physikalischer Forschung werden **Gesetzmäßigkeiten** im Verhalten der Untersuchungsobjekte formuliert, z. B. die Abhängigkeit der Durchbiegung eines Balkens von der auf ihn wirkenden Last. Die Darstellung dieser Gesetzmäßigkeiten erfolgt bevorzugt mathematisch durch die funktionale Verknüpfung physikalischer Größen, welche in unserem Beispiel die Durchbiegung und die Last beschreiben.

Die technischen Disziplinen des Bauwesens beruhen auf physikalischen Grundlagen. In Tabelle 1.1 sind einige Beispiele dafür angegeben.

Die Hauptgebiete der sogenannten **Bauphysik** befassen sich mit der Ausbreitung von Wärme, Feuchtigkeit und Schall in Bauwerken und leiten daraus Maßnahmen für effektiven **Wärme-, Feuchte- und Schallschutz** ab.

**Tabelle 1.1** Physikalische Grundlagen für wichtige Teilgebiete des Bauwesens

Gebiet des Bauwesens	Physikalische Grundlagen
Baumechanik	Mechanik starrer und deformierbarer Körper
Baustoffe	Festkörperphysik
Schallschutz	Akustik (mechanische Schwingungen und Wellen)
Beleuchtungstechnik	Optik (elektromagnetische Wellen)
Bauklimatik	Thermodynamik (Wärmetransport und Feuchtigkeitstransport)
Blitzschutz	Elektrostatik

Damit ist unter Bauphysik **angewandte Physik** zu verstehen, d.h. ein Wissensgebiet, in dem natur- und ingenieurwissenschaftliche Aspekte vereint werden.

Im weiteren Sinne gehören zur Bauphysik die Beleuchtungstechnik, elektrostatische und elektrokinetische Erscheinungen sowie der Brandschutz. Im Bild 1.1 sind die Verknüpfungen zwischen den physikalischen Grundlagen und den Teilgebieten der Bauphysik dargestellt.

Zahlreiche Kenngrößen und Berechnungsverfahren, z. B. Nachweisverfahren zur Energieeinsparung betreffend, haben Eingang in das deutsche, europäische und internationale Normenwerk gefunden und unterliegen ständiger Überarbeitung. In den folgenden Kapiteln wird darauf beispielhaft eingegangen.

## 1.2 Physikalische Größen

### 1.2.1 Symbolik

Eine **physikalische Größe** kennzeichnet eine Eigenschaft oder den Zustand eines Objektes, z. B. die Geschwindigkeit, mit der sich ein Baufahrzeug vorwärtsbewegt. Sie kann aber auch Prozesse beschreiben, die mit einzelnen Objekten geschehen. Ein Beispiel dafür ist die mechanische Arbeit, welche ein Kran beim Anheben eines Betonteils verrichtet.

Jede physikalische Größe wird mit einem **Symbol** bezeichnet, z. B.  $\ell$  für die Länge eines Bausteins. Sie wird als Produkt einer **Maßzahl** mit einer **Maßeinheit** dargestellt:

$$\ell = \{\ell\} \cdot [\ell]. \quad (1.1)$$

$\{\ell\}$  bedeutet die Maßzahl und  $[\ell]$  die Maßeinheit von  $\ell$ .

#### Beispiel 1.1 Steinhöhe

In der Baukonstruktion werden Baurichtmaße verwendet, z. B. für die Steinhöhe  $h$ :

$$h = 25 \text{ cm, d. h. } \{h\} = 25 \text{ und } [h] = \text{cm.}$$

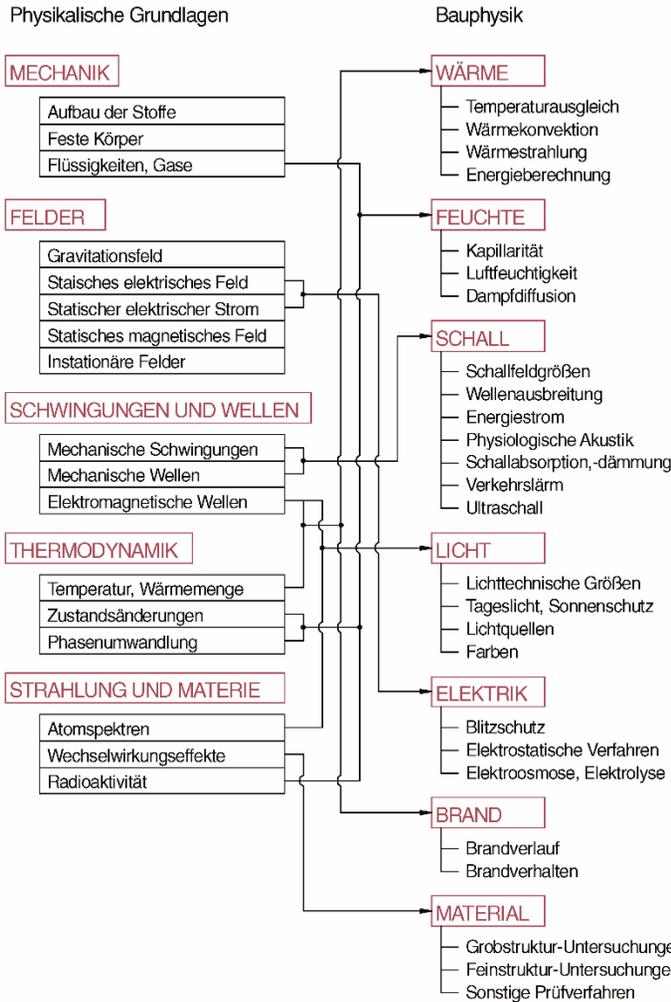


Bild 1.1 Beziehungen Grundlagen ↔ Bauphysik

1.2.2 Maßeinheiten

Die Physik ist eine messende Wissenschaft. **Messen** bedeutet, eine Größe mit einer Maßeinheit zu vergleichen. Die für uns verbindlichen Maßeinheiten sind im internationalen Einheitensystem (Système International d' Unité - **SI** [1]) festgelegt. Insgesamt sieben **Basiseinheiten** (siehe Tabelle 1.2) werden über Naturkonstanten, z. B. die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_{L,0}$ , definiert.

Die Zahlenwerte der Naturkonstanten sind festgelegt, z. B.  $c_{L,0} = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ .

Tabelle 1.2 Basiseinheiten des SI-Systems

Größe	Maßeinheit	Symbol der Maßeinheit
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Die SI-Einheiten dürfen mit **Vorsätzen** versehen werden, welche der Multiplikation der Einheit mit einer Zehnerpotenz entsprechen (Tabelle 1.3).

**Tabelle 1.3** Vorsätze für SI-Einheiten (Auswahl)

Name	Symbol	Potenz	Beispiel
Femto	f	$10^{-15}$	fs
Pico	p	$10^{-12}$	ps
Nano	n	$10^{-9}$	nm
Mikro	$\mu$	$10^{-6}$	$\mu\text{m}$
Milli	m	$10^{-3}$	mm
Zenti	c	$10^{-2}$	cm
Dezi	d	$10^{-1}$	dm
Deka	da	$10^1$	daPa
Hekto	h	$10^2$	hPa
Kilo	k	$10^3$	km
Mega	M	$10^6$	MPa
Giga	G	$10^9$	GPa
Tera	T	$10^{12}$	TByte

**Beispiel 1.2** Einheitenvorsätze

$$8 \text{ nm} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ m}, \quad 2 \mu\text{m} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m},$$

$$275 \text{ MPa} = 275 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 2,75 \cdot 10^8 \text{ Pa}.$$

Darüber hinaus sind noch einige Einheiten zulässig, die nicht zum SI-System gehören, aber gebräuchlich sind, z. B. Minute und Stunde für die Zeit oder  $^{\circ}\text{C}$  für Temperaturangaben in der Celsius-Skala (Tabelle 1.4).

**Tabelle 1.4** SI-fremde, aber zulässige Einheiten (Auswahl)

Größe	Maßeinheit	Symbol und Umrechnung
Volumen	Liter	l $1\text{l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
Masse	Tonne	t $1\text{t} = 1000 \text{ kg}$
Zeit	Minute	min $1\text{min} = 60 \text{ s}$
	Stunde	h $1\text{h} = 3600 \text{ s}$
ebener Winkel	Grad	$^{\circ}$ $1^{\circ} = \frac{180^{\circ}}{\pi} \text{ rad}$
Temperatur	Grad Celsius	$^{\circ}\text{C}$ $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$
Energie	Elektronenvolt	eV $1\text{eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
	Kilowattstunde	kWh $1\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
Pegel	Neper	Np
	Dezibel	dB $1\text{dB} = 0,05 \cdot \ln 10 \text{ Np}$

Aus den Basiseinheiten werden alle anderen Einheiten abgeleitet. Eine Übersicht über die wichtigsten **abgeleiteten** Einheiten gibt Tabelle 1.5.

**Tabelle 1.5** Wichtige zusammengesetzte Einheiten des SI-Systems

Größe	Maßeinheit	Symbol der Maßeinheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
ebener Winkel	Radian	rad	$\text{rad} = \text{m m}^{-1}$
Raumwinkel	Steradian	sr	$\text{sr} = \text{m}^2 \text{ m}^{-2}$
Frequenz	Hertz	Hz	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$
Kraft	Newton	N	$\text{N} = \text{kgms}^{-2}$
Druck, mechanische Spannung	Pascal	Pa	$\text{Pa} = \text{Nm}^{-2} = \text{kgm}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Energie, Arbeit	Joule	J	$\text{J} = \text{Nm} = \text{Ws} = \text{kgm}^2 \text{ s}^{-2}$
Leistung	Watt	W	$\text{W} = \text{Js}^{-1} = \text{kgm}^2 \text{ s}^{-3}$
Ladung	Coulomb	C	$\text{C} = \text{As}$
elektrische Spannung	Volt	V	$\text{V} = \text{W A}^{-1} = \text{kgm}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-1}$
elektrische Kapazität	Farad	F	$\text{F} = \text{As V}^{-1} = \text{A}^2 \text{ s}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$
elektrischer Widerstand	Ohm	$\Omega$	$\Omega = \text{V A}^{-1} = \text{kgm}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-2}$
Lichtstrom	Lumen	lm	$\text{lm} = \text{cdsr}$
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	$\text{lx} = \text{lm m}^{-2} = \text{cd sr m}^{-2}$

### 1.2.3 Größen- und Zahlenwertgleichungen

**Größengleichungen** sind mathematische Beziehungen zwischen physikalischen Größen, in denen für jedes Symbol entsprechend Gleichung (1.1) Zahlenwert und Einheit einzusetzen sind. Auf beiden Seiten der Größengleichung müssen dann die Zahlenwerte und die Einheiten übereinstimmen. Deshalb ermöglicht der Vergleich der Einheiten, grobe Fehler bei der Aufstellung einer Gleichung zu finden.

#### Beispiel 1.3 Größengleichung

Mittlere Geschwindigkeit einer Planierdraupe auf einem 200 m langen Straßenabschnitt:

$$\bar{v} = \frac{x}{t} = \frac{200 \text{ m}}{144 \text{ s}} = 1,39 \cdot 3,6 \text{ kmh}^{-1} = 5,0 \text{ kmh}^{-1}.$$

Die Schreibweise  $x/\text{m} = 200$ ,  $t/\text{s} = 144$ ,  $\bar{v}/\text{kmh}^{-1} = 5,0$  eignet sich für Angaben im Kopf von Tabellen, z. B. in Messprotokollen oder an den Achsen graphischer Darstellungen.

Für praktische Zwecke, z. B. bei Aufnahme von Messreihen, kann es nützlich sein, eine Größengleichung für eine bestimmte Einheitenkombination zuzuschneiden und so in eine **Zahlenwertgleichung** zu überführen, in der nur Zahlenwerte miteinander verknüpft sind. Bei Verwendung von SI-fremden Einheiten kann dabei ein Zahlenfaktor verschieden von 1 entstehen, welcher aus der Umrechnung der Einheiten ineinander resultiert.

#### Beispiel 1.4 Zahlenwertgleichung

$$\text{Zahlenwertgleichung} \quad \frac{\bar{v}}{\text{kmh}^{-1}} = 3,6 \cdot \frac{x/\text{m}}{t/\text{s}}$$

## 1.3 Fehlerrechnung

### 1.3.1 Fehlerarten

Werden physikalische Größen gemessen, z. B. die Länge eines Mauervorsprungs, oder aus gemessenen Werten errechnet, z. B. die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes, muss die Genauigkeit des Endergebnisses immer durch Angabe eines Fehlers gekennzeichnet werden. Die Größenordnung des Fehlers bestimmt dabei,

welche Dezimalstellen des Ergebnisses noch sinnvoll angegeben werden können.

#### Beispiel 1.5 Länge eines Mauervorsprungs

Die gemessene Länge eines Mauervorsprungs beträgt  $\ell = (63,63 \pm 0,08) \text{ cm}$ .

Das bedeutet  $63,55 \text{ cm} \leq \ell \leq 63,71 \text{ cm}$ .

Aufgabe der Fehlerrechnung ist es, aus den streuenden Ergebnissen wiederholter Messungen einer physikalischen Größe einen Bestwert zu ermitteln und die Abweichung dieses Bestwertes vom wahren Wert, auch Erwartungswert genannt, zu schätzen. Dabei bleiben **grobe Fehler**, die auf eine Unachtsamkeit beim Experimentieren zurückzuführen, leicht erkennbar und korrigierbar sind, unberücksichtigt.

**Systematische Fehler** ( $\Delta x_{\text{sys}}$ ) werden durch Ungenauigkeiten der Messinstrumente oder Messverfahren hervorgerufen. Sie sind an der asymmetrischen Häufung von Messwerten bei Wiederholungsmessungen erkennbar, d. h. wenn z. B. größere Messwerte häufiger auftreten als kleinere.

**Zufällige oder statistische Fehler** ( $\Delta x$ ) sind vom Experimentator (d. h. von der Leistungsfähigkeit seiner Sinnesorgane und von seiner Geschicklichkeit) und den augenblicklichen Umwelteinflüssen (Erschütterungen, Temperaturschwankungen u. Ä.) abhängige Abweichungen. Die Messwerte zeigen in diesem Fall eine symmetrische Häufung um einen häufigsten Wert, den Bestwert.

Systematische und zufällige Fehler können durch Addition in einem **Gesamtfehler**  $\Delta x_{\text{ges}}$  berücksichtigt werden:

$$\Delta x_{\text{ges}} = |\Delta x_{\text{sys}}| + |\Delta x|. \quad (1.2)$$

Die Ermittlung des Bestwertes einer Messreihe und dessen Abweichung vom Erwartungswert sind der eigentliche Gegenstand der Fehlerrechnung [2]. Hierfür wird eine auf C. F. Gauss zurückgehende Fehlertheorie (einschließlich der Symbolik) verwendet.

**Beispiel 1.6 Gesamtfehler**

Wenn der systematische Fehler des Längenmessgerätes aus Beispiel 1.5  $\Delta l_{\text{sys}} = 0,05 \text{ cm}$  und der zufällige Fehler der Messreihe  $\Delta l = 0,03 \text{ cm}$  beträgt, ergibt sich für den Gesamtfehler  $\Delta l_{\text{ges}}$  dann:

$$\Delta l_{\text{ges}} = |\Delta l_{\text{sys}}| + |\Delta l|, \quad \Delta l_{\text{ges}} = 0,08 \text{ cm.}$$

**1.3.2 Fehler einer Messreihe**

Zur Berechnung des Bestwertes (**Mittelwert**) und seiner **Fehler** aus einer Reihe wiederholter Einzelmessungen werden die in Tabelle 1.6 angegebenen Beziehungen benutzt. Das Beispiel 1.7 zeigt 10 Messwerte einer Längenmessung, welche mit einem Stahlbandmaß an einem Mauervorsprung ausgeführt wurde, sowie die Berechnung des Mittelwertes (1.4), der scheinbaren Fehler (1.5) und der minimalen Fehlersumme (1.6) in tabellarischer Form. Neben den Standardabweichungen der Einzelmessungen (1.7) und des Mittelwertes (1.8) sind der relative bzw. prozentuale Fehler (1.9) und das vollständige Messergebnis angegeben.

**Tabelle 1.6** Fehlerrechnung für eine Messreihe aus  $n$  Einzelmesswerten

Kennwert	Beziehung	Symbolik nach Gauss
arithmetisches Mittel (Bestwert)	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ (1.4)	$\bar{x} = \frac{1}{n} [x]$
scheinbarer Fehler des Messwertes $x_i$	$v_i = x_i - \bar{x}$ mit $\sum_{i=1}^n v_i = 0$ (1.5)	$[v] = 0$
minimale Fehlersumme	$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \text{Min!}$ (1.6)	$[vv] = \text{Min!}$
mittlerer Fehler der Einzelmessung (Standardabweichung des Messwertes)	$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \equiv \sigma_{n-1}$ (1.7)	$\Delta x = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$
mittlerer Fehler des Mittelwertes (Standardabweichung des arithmetischen Mittels)	$\overline{\Delta x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}} = \frac{\Delta x}{\sqrt{n}} \equiv \sigma_n$ (1.8)	$\overline{\Delta x} = \sqrt{\frac{[vv]}{n(n-1)}}$
relativer oder prozentualer Fehler	$\frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}}$ oder $\frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \cdot 100\%$ (1.9)	
Zufallskomponente der Messunsicherheit ( $t$ -Faktor nach Gosset)	$\overline{\Delta x_z} = t \cdot \overline{\Delta x}$ (1.10)	

In Bild 1.2 sind über den Einzelmesswerten  $x$  aus Beispiel 1.7 deren Häufigkeiten  $\varphi(x)$  balkenförmig aufgetragen.

Wird die Anzahl der Messungen stark erhöht ( $n > 100$ ), dann geht die Häufigkeitsverteilung in eine glockenförmige **Normalverteilung** der Messwerte über, deren Werte der Verteilungsfunktion nach C. F. Gauss

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3)$$

entsprechen, mit  $\mu = \bar{x}$  als Erwartungswert und  $\sigma = \Delta x$  als Standardabweichung.

In Bild 1.2 ist die „Glockenkurve“ für die Werte aus Beispiel 1.7 eingetragen.

Integriert man (1.3) in den Grenzen  $\mu - \sigma \leq x \leq \mu + \sigma$ , so erhält man  $\Phi(x) = \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} \varphi(x) dx = 0,683$  als **statistische**

**Sicherheit** dafür, dass sich der Messwert innerhalb der Standardabweichung befindet (schraffierter Bereich in Bild 1.2). Die Wahrscheinlichkeit von 68,3% ist eine für physikalische Messungen übliche Sicherheit.



## Beispiel 1.7 Längenmessung (Ermittlung des zufälligen Fehlers für Beispiel 1.5)

$n$	$x / \text{cm}$	$10^2 \cdot v / \text{cm}$		$10^4 \cdot vv / \text{cm}^2$ nach (1.6)
		nach (1.5)	nach (1.6)	
		-	+	
1	63,6	3		9
2	63,7		7	49
3	63,5	13		169
4	63,6	3		9
5	63,6	3		9
6	63,8		17	289
7	63,6	3		9
8	63,5	13		169
9	63,7		7	49
10	63,7		7	49
[ ]	636,3	38	38	810

$$\bar{x} = 63,63 \text{ cm} \quad \text{nach (1.4)}$$

$$\Delta x = \sqrt{\frac{0,0810}{9}} \text{ cm} = 0,095 \text{ cm} \quad \text{nach (1.7)}$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{0,095 \text{ cm}}{\sqrt{10}} = 0,03 \text{ cm} \quad \text{nach (1.8)}$$

$$\frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} = 4,7 \cdot 10^{-4} \approx 0,5 \cdot 10^{-3} \approx 0,5 \text{ ‰} \quad \text{nach (1.9)}$$

Ergebnis:  $\bar{x} = (63,63 \pm 0,03) \text{ cm}$

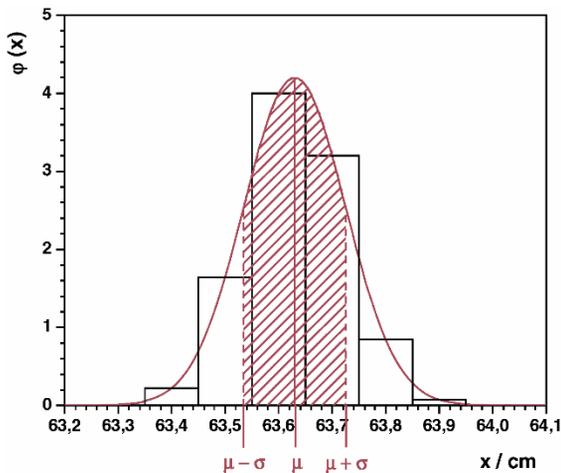


Bild 1.2 Häufigkeitsverteilung einer Messreihe

Wenn allerdings die Zahl der Wiederholungsmessungen klein ist ( $n < 10$ ) wird eine Normalverteilung der Messwerte entsprechend Bild 1.2 nicht erreicht (vgl. „Glockenkurve“ und Balkendiagramm). Die Vertrauensgrenzen für den Erwartungswert werden dann abhängig von der Anzahl der Messungen und der Standardabweichung.

W. S. Gosset hat für die Sicherheit von 68,3% einen Korrekturfaktor (**t-Faktor**, siehe Tabelle 1.7) in Abhängigkeit

von der Anzahl  $n$  der Messungen angegeben. Die statistische Messunsicherheit berechnet sich in diesen Fällen nach Gleichung (1.10) aus Tabelle 1.6.

**Tabelle 1.7** Abhängigkeit des t-Faktors von der Anzahl der Messwerte  $n$  (Wahrscheinlichkeit 68%)

$n$	1	2	3	4	5
$t_{68}$	1,84	1,32	1,20	1,15	1,11
$n$	7	10	20	50	> 100
$t_{68}$	1,08	1,06	1,03	1,01	1,00

## Beispiel 1.8

Für Beispiel 1.7 ergibt sich somit:

$$\overline{\Delta x_z} = 1,06 \cdot \overline{\Delta x} = 0,032 \text{ cm}.$$

## 1.3.3 Fehlerfortpflanzung

Wird eine physikalische Größe nicht direkt gemessen, sondern indirekt aus Messungen von Teilgrößen bestimmt, dann lassen sich mit dem **Fehlerfortpflanzungsgesetz** nach Gauss aus den bekannten Kennwerten der Teilgrößen (Mittelwerte, Standardabweichungen) der wahrscheinlichste Wert (1.11) der indirekt bestimmten Größe und seine Standardabweichung (1.14) entsprechend Tabelle 1.8 ermitteln.

Tabelle 1.8 Fehlerfortpflanzung

Kennwert	Berechnung
wahrscheinlichster Wert der indirekt gemessenen Größe $z$	$\bar{z} = z(\bar{x}, \bar{y}, \bar{w}, \dots)$ (1.11)
absoluter Größtfehler von $z$	$\Delta z = \left  \frac{\partial z}{\partial x} \cdot \Delta x \right  + \left  \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \Delta y \right  + \left  \frac{\partial z}{\partial w} \cdot \Delta w \right  + \dots$ (1.12)
relativer Größtfehler von $z$ , wenn $z = x^\alpha \cdot y^\beta \cdot w^\gamma \dots$ (Potenzprodukt)	$\frac{\Delta z}{z} = \left  \alpha \cdot \frac{\Delta x}{x} \right  + \left  \beta \cdot \frac{\Delta y}{y} \right  + \left  \gamma \cdot \frac{\Delta w}{w} \right  + \dots$ (1.13)
Standardabweichung von $z$ bei indirekter Messung	$\overline{\Delta z} = \sqrt{\left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 (\Delta x)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 (\Delta y)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial w} \right)^2 (\Delta w)^2 + \dots}$ (1.14)

Häufig erfolgt eine Fehlerabschätzung mit Hilfe des absoluten **Größtfehlers**, wobei für die Standardabweichungen der Teilgrößen entsprechend (1.14) aus Tabelle 1.8 auch geschätzte Fehler  $\Delta \bar{x}$ ,  $\Delta \bar{y} \dots$  eingesetzt werden können.

Die Standardabweichung berechnet man sinnvoll nur, wenn für die Teilgrößen Messreihen entsprechend Tabelle 1.6 vorliegen und die Fehlerfortpflanzung für eine große Zahl von Messwerten erfolgt.

### Beispiel 1.9 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Baustoffen kann im Plattengerät-Verfahren aus dem Wärmestrom  $\dot{Q}$  durch die Platte, deren geometrischen Abmessungen (Kantenlängen  $a$  und  $b$ , Plattendicke  $d$ ) und den Oberflächentemperaturen  $\theta_1$  und  $\theta_2$  auf der Kalt- und Warmseite der Platte bestimmt werden:  $\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot d}{a \cdot b \cdot (\theta_2 - \theta_1)}$ , vgl. (1.11).

Es wurden folgende Größen gemessen:  $\dot{Q} = (16,0 \pm 0,1) \text{ W}$ ,  $a = (500 \pm 1) \text{ mm}$ ,  $b = (495 \pm 1) \text{ mm}$ ,  $d = (80 \pm 1) \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = 6,0 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ K}$ ,  $\theta_2 = 15,0 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ K}$ . Daraus erhält man entsprechend (1.11):

$$\lambda = \frac{\bar{Q} \cdot \bar{d}}{\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)} = \frac{16 \cdot 0,08}{0,5 \cdot 0,495 \cdot (15 - 6)} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} = 0,575 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

Für den Größtfehler ergibt sich nach Gleichung (1.12) aus Tabelle 1.8:

$$\Delta \lambda = \left| \frac{d}{a \cdot b \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \cdot \Delta \dot{Q} \right| + \left| \frac{\dot{Q}}{a \cdot b \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \cdot \Delta d \right| + \left| -\frac{\dot{Q} \cdot d}{a^2 \cdot b \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \cdot \Delta a \right| + \left| -\frac{\dot{Q} \cdot d}{a \cdot b^2 \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \cdot \Delta b \right| + \left| \frac{\dot{Q} \cdot d}{a \cdot b \cdot (\theta_2 - \theta_1)^2} \cdot \Delta \theta_1 \right| + \left| -\frac{\dot{Q} \cdot d}{a \cdot b \cdot (\theta_2 - \theta_1)^2} \cdot \Delta \theta_2 \right|,$$

$$\Delta \lambda = \left( \frac{0,08}{0,5 \cdot 0,495 \cdot 9} \cdot 0,1 + \frac{16}{0,5 \cdot 0,495 \cdot 9} \cdot 10^{-3} + \frac{16 \cdot 0,08}{0,5^2 \cdot 0,495 \cdot 9} \cdot 10^{-3} + \frac{16 \cdot 0,08}{0,5 \cdot 0,495^2 \cdot 9} \cdot 10^{-3} + 2 \cdot \frac{16 \cdot 0,08}{0,5 \cdot 0,495 \cdot 9^2} \cdot 0,1 \right) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$= (3,59 + 7,18 + 1,15 + 1,16 + 12,77) \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$= 25,85 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$\Delta \lambda = 0,026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ bzw. } \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{0,026}{0,575} = 0,045 = 4,5 \text{ \%}.$$

Die Rechnung wird einfacher, wenn man  $D = |\theta_2 - \theta_1| = 9 \text{ K}$  mit  $\Delta D = |1 \cdot \Delta \theta_2| + |-1 \cdot \Delta \theta_1| = 0,2 \text{ K}$  setzt und für

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot d}{a \cdot b \cdot D} = 0,575 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ den relativen Fehler nach Gleichung (1.13) berechnet:}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \left| \frac{\Delta \dot{Q}}{\dot{Q}} \right| + \left| \frac{\Delta d}{d} \right| + \left| \frac{\Delta a}{a} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| + \left| \frac{\Delta D}{D} \right| = (6,25 + 12,50 + 2,00 + 2,02 + 22,20) \cdot 10^{-3},$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 44,97 \cdot 10^{-3} = 0,045 = 4,5 \% \text{ bzw. } \Delta \lambda = 0,045 \cdot \lambda = 0,026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

Ergebnis:  $\lambda = (0,575 \pm 0,026) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

### 1.3.4 Lineare Regression (Ausgleichsgerade)

Existiert zwischen zwei Größen  $y$  und  $x$  ein linearer Zusammenhang oder lässt sich die Beziehung durch geeignete Umformung linearisieren, dann können durch Anwendung der linearen Regression die Parameter einer

Geraden, welche den (linearisierten) funktionalen Zusammenhang bestmöglich beschreibt, berechnet werden. Diese Gerade heißt **Ausgleichsgerade**.

Die Fehler der Geradenparameter können ebenfalls berechnet werden.

**Tabelle 1.9** Lineare Regression, Ausgleichsgerade

Kennwert	Beziehung	Symbolik nach Gauss
linearer Zusammenhang der Messwerte $x_i, y_i$ ( $\Delta x_i \ll \Delta y_i$ )	$y_i = a + b \cdot x_i$ (1.15)	
Ordinatenabschnitt der Ausgleichsgeraden	$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$ (1.16)	$a = \frac{[y][xx] - [x][xy]}{n[xx] - [x]^2}$
Anstieg der Ausgleichsgeraden	$b = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$ (1.17)	$b = \frac{n[xy] - [x][y]}{n[xx] - [x]^2}$
Abweichung der Messpunkte von der Ausgleichsgeraden	$w_i = y_i - (a + b \cdot x_i)$ (1.18)	$w = y - (a + bx)$
Fehler des Ordinatenabschnittes	$\Delta a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i^2}{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}$ (1.19)	$\Delta a = \sqrt{\frac{[ww]}{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{[xx]}{n[xx] - [x]^2}}$
Fehler des Anstieges der Ausgleichsgeraden	$\Delta b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i^2}{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{n}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}$ (1.20)	$\Delta b = \sqrt{\frac{[ww]}{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{n}{n[xx] - [x]^2}}$

Die in Tabelle 1.9 angegebenen Beziehungen sind nach der Gaußschen Fehlertheorie so gebildet, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen zwischen den Messwerten für  $y$  und den entsprechenden Werten der Gerade ein Minimum ergeben, analog zu (1.6). Hierbei

wird allerdings vorausgesetzt, dass die Fehler  $\Delta x_i$  klein gegen die Fehler  $\Delta y_i$  und demzufolge vernachlässigbar sind. Für die Beziehungen in Tabelle 1.9 existieren z. B. in Taschenrechnern entsprechende Programme.

### Beispiel 1.10 Optische Durchlässigkeit

Bringt man in den Strahlengang vor einem Luxmeter nacheinander bis zu  $z=10$  Glasplatten ein, dann nimmt die mit einem Fotoelement gemessene Beleuchtungsstärke  $E$  von einem Startwert  $E_0$  ausgehend kontinuierlich ab. Für die optische Durchlässigkeit  $\varrho$  des Glases kann man schreiben  $E = E_0 \cdot \varrho^{2z}$  mit den Wertepaaren

$z$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E/lx$	191	175	156	143	131	122	110	104	97	89	82

Linearisierung:  $\lg E = \lg E_0 + (2 \cdot \lg \varrho) \cdot z$   $y = a + b \cdot x$  vgl. (1.15). Für die Berechnung des Geradenanstiegs gemäß (1.17)  $b = 2 \cdot \lg \varrho$  eignet sich folgende Tabelle:

$x = z$	$y = \lg E$	$x^2$	$x \cdot y$	$a + b \cdot x$	$[y - (a + b \cdot x)]^2 \cdot 10^4$
0	2,2810	0	0	2,2705	0,3600
1	2,2430	1	2,2430	2,2343	0,7570
2	2,1931	4	4,3862	2,1981	0,2500
3	2,1553	9	6,4659	2,1619	0,4360
4	2,1173	16	8,4692	2,1257	0,7060
5	2,0864	25	10,4320	2,0895	0,0960
6	2,0414	36	12,2484	2,0533	1,4160
7	2,0170	49	14,1190	2,0171	0,0001
8	1,9868	64	15,8944	1,9809	0,3480
9	1,9494	81	17,5446	1,9447	0,2210
10	1,9138	100	19,1380	1,9085	0,2810

$n = 11$ ,  $\sum_{i=1}^{11} x = 55$ ,  $\left(\sum_{i=1}^{11} x\right)^2 = 3025$    
 $\sum_{i=1}^{11} y = 22,9845$    
 $\sum_{i=1}^{11} x^2 = 385$    
 $\sum_{i=1}^{11} (x \cdot y) = 110,9407$    
 $\sum_{i=1}^{11} w^2 = 4,871 \cdot 10^{-4}$

$$a = \frac{[y][xx] - [x][xy]}{n[xx] - [x]^2} = \frac{22,9845 \cdot 385 - 55 \cdot 110,9407}{1210} = \frac{2747,294}{1210}, \quad a = 2,2705$$

$$b = \frac{n[xy] - [x][y]}{n[xx] - [x]^2} = \frac{11 \cdot 110,9407 - 55 \cdot 22,9845}{11 \cdot 385 - 3025} = -\frac{43,7998}{1210}, \quad b = -0,0362$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{[ww]}{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{n}{n[xx] - [x]^2}} = \sqrt{\frac{4,871 \cdot 10^{-4}}{9}} \cdot \sqrt{\frac{11}{11 \cdot 385 - 3025}} = 7,357 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0953, \quad \Delta b = 7,011 \cdot 10^{-4}$$

$$\varrho = 10^{\frac{b}{2}} = 10^{\frac{0,0362}{2}} = 0,9592, \quad \Delta \varrho = \left| \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{b}{2}} \cdot \ln 10 \cdot \Delta b \right| = 7,74 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Ergebnis: } \varrho = 0,9592 \pm 0,0008, \quad \frac{\Delta \varrho}{\varrho} = 8,3 \cdot 10^{-4} = 0,8 \text{ ‰}$$

## Aufgaben

**1.1** Geben Sie die mechanische Spannung  $1 \text{ Nmm}^{-2}$  in der (abgeleiteten) SI-Einheit Pa an!

**1.2** Formen Sie die folgende Größengleichung  $\frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot \ell}$  in eine Zahlenwertgleichung der Form

$$\frac{V/\text{m}^3}{t/\text{h}} = \alpha \cdot \frac{(R/\text{mm})^4 \cdot \Delta p/\text{MPa}}{\eta/\text{Poise} \cdot \ell/\text{m}} \text{ um!}$$

Welchen Wert hat die Zahl  $\alpha$ ? ( $1 \text{ Poise} = 1 \text{ gcm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )

**1.3** Bei der Doppelwägung wird das Gewicht eines homogenen Körpers in Luft ( $G_L$ ) und vollständig eingetaucht in eine Flüssigkeit ( $G_{Fl}$ ) der Dichte  $\rho_{Fl}$  gemessen und daraus dessen Dichte  $\rho$  nach der Gleichung

$$\rho = \rho_{Fl} \cdot \frac{G_L}{G_L - G_{Fl}}$$
 berechnet.

Ermitteln Sie die Dichte des Körpers und ihren Größtfehler, wenn folgende Messwerte vorliegen:

$$G_L = (112,22 \pm 0,05) \text{ g}, \quad G_{Fl} = (99,68 \pm 0,05) \text{ g},$$

$$\rho_{Fl} = (0,998 \pm 0,002) \text{ gcm}^{-3}.$$

**1.4** Gegeben ist eine Ziegelwand der Dicke  $d = (0,425 \pm 0,002) \text{ m}$ . Das Material hat eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = (0,14 \pm 0,01) \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Der Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite beträgt  $R_{si} = (0,13 \pm 0,02) \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$ , auf der Außenseite

$$R_{se} = (0,04 \pm 0,02) \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}.$$

(a) Schätzen Sie den Größtfehler des Wärmedurchgangskoeffizienten ab, der aus diesen Angaben nach der

$$\text{Formel } U = \frac{1}{R_{si} + \frac{d}{\lambda} + R_{se}} \text{ errechnet werden kann!}$$

(b) Der Wärmedurchgangskoeffizient der Wand wurde durch Messung bestimmt, die Ergebnisse sind:

Nr.	1	2	3	4	5
$U / \text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$	0,291	0,307	0,286	0,289	0,359
Nr.	6	7	8	9	10
$U / \text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$	0,391	0,272	0,261	0,324	0,345

Berechnen Sie den absoluten (d. h. den mittleren Fehler des Mittelwertes), den relativen und den prozentualen Fehler des Wärmedurchgangskoeffizienten!

**1.5** Der spezifische Lüftungswärmeverlust durch ein Bauteil wird nach der Formel  $H_V = c_L \cdot \rho_L \cdot a \cdot \ell \cdot \Delta p^{\frac{2}{3}}$  berechnet.

Dabei ist  $c_L = (1000 \pm 5) \text{ Wskg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  die spezifische Wärmekapazität der Luft,  $\rho_L = (1,293 \pm 0,005) \text{ kgm}^{-3}$  die

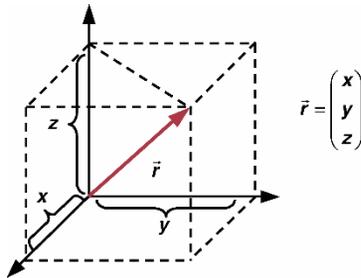
Dichte der Luft,  $a = (0,30 \pm 0,02) \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ Pa}^{-\frac{2}{3}}$  der Fugendurchlasskoeffizient und  $\ell = (9,90 \pm 0,01) \text{ m}$  die Fugenlänge des Bauteils sowie  $\Delta p = (0,65 \pm 0,01) \text{ Pa}$  die Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenluft. Berechnen Sie den Lüftungswärmeverlust und schätzen Sie seinen absoluten und relativen Größtfehler ab!

## 2 Grundlagen der Mechanik

### 2.1 Kinematik und Dynamik

#### 2.1.1 Punktmasse, starrer und elastischer Körper

Die **Kinematik** beschreibt die **Bewegung** von Körpern durch Angabe der **Ortskoordinaten** und deren **Zeitabhängigkeit**. In der **Dynamik** werden **Kräfte** eingeführt und als Ursachen für die Änderung des Bewegungszustandes von Körpern benannt. Diese Kräfte können die Körper aber auch deformieren.



**Bild 2.1** Ortskoordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  und dreidimensionaler Ortsvektor  $\vec{r}$

Die einfachsten Beschreibungen erhält man mit dem Modell der **Punktmasse**. Eine Punktmasse ist ein idealisierter Körper, bei dem die gesamte Stoffmenge in

einem Punkt konzentriert ist, ihr Ort lässt sich durch den **Ortsvektor**  $\vec{r}$  (auch Radiusvektor genannt) beschreiben.

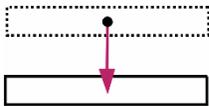
Reale Körper haben eine endliche Ausdehnung mit einer kontinuierlichen Masseverteilung, für die sich ein **Massenmittelpunkt**  $\vec{r}_s$  (siehe Abschnitt 2.5.1) definieren lässt.

Häufig erzeugen äußere, auf einen festen Körper einwirkende Kräfte nur vernachlässigbar kleine Deformationen. Der Körper kann unter dieser Voraussetzung durch das Modell des **starrten Körpers** angenähert werden. An einem starren Körper rufen beliebige äußere Kräfte keinerlei Formänderungen (Abstandsänderungen zwischen einzelnen Punkten des Körpers) hervor (siehe Abschnitt 2.5.1). Bei einer Translationsbewegung, d. h. bei einer Parallelverschiebung aller Punkte, verhält sich der starre Körper wie eine Punktmasse, angesiedelt im Massenmittelpunkt. Es ist deshalb in Sonderfällen zulässig, starre Körper als Punktmasse zu beschreiben, welche sich am Ort des Massenmittelpunktes befindet.

Körper heißen **elastisch** (siehe Abschnitt 2.5.6), wenn ihre durch äußere Kräfte hervorgerufenen **Deformationen** (Volumen- und Gestaltsänderungen) nicht mehr vernachlässigbar sind, nach Wegfall der Belastung jedoch die ursprüngliche Form und das ursprüngliche Volumen wieder eingenommen werden (**reversible Deformation**).

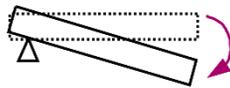
#### Beispiel 2.1 Bewegungen eines Holzbalkens

Mögliche Bewegungen eines Holzbalkens und zu deren Beschreibung geeignete Modelle



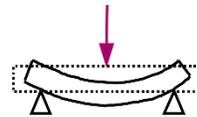
Fällt im freien Fall vom Gerüst:

→ Punktmasse



Kippt um ein Auflager:

→ Starrer Körper



Wird zusätzlich belastet:

→ Elastischer Körper

Weitere Anwendungen für die Modelle:

- Planetenbewegung um die Sonne
- Flugbahn eines Tennisballs
- Proton und Elektron im einfachen Atommodell
- Rotationsbewegung eines Betonmischers
- Durchbiegung eines Stahlträgers
- Durchbiegung einer Hängebrücke

# Sachwortverzeichnis

## A

A-Bewertung 158  
 $\alpha$ -Strahlen 233  
 $\alpha$ -Teilchen 233  
 $\alpha$ -Zerfall 233  
Abbildungsgleichung 203  
Abbildungsmaßstab 203  
Abbrandgeschwindigkeit (Holz) 241  
Abkühlphase (Brand) 237, 238  
Abminderungsfaktoren 99, 101  
Abplatzungen (Beton) 240  
Abschirmmaß 161  
Absorptionsgrad (Licht) 210, 216  
Absorptionsvermögen 87  
Achse, optische 202  
Adiabatene exponent 56  
Aggregatzustände 38, 103  
Ähnlichkeit, hydromechanische 81  
Aktivität 233  
Aktivität, optische 206  
Amplitude des Resonators 130  
Analysator 206  
Anhall 168  
Anomalie des Wassers 104  
Anpassung 164  
Äquipotenzialfläche 184, 194  
Arbeit 30  
Atombindung 38  
Atome 35  
Atomkern 35, 36  
Atommasse, äquivalente 186  
Atommasse, relative 36  
Atomradien 35  
Atomvolumina 36  
Aufheizung, Abkühlung 72  
Auftriebskraft 51  
Ausbreitungsgeschwindigkeit, Schall 146  
Ausdehnungskoeffizient 36, 53  
Ausdehnungskoeffizient, linearer 53

Ausdehnungskoeffizient, Volumen- 53  
Ausgleichsgerade 20  
Außengeräuschpegel, maßgeblicher 170  
Außenlärm 170  
Außenreflexionsanteil 213  
Axiome, Newtonsche 27

## B

$\beta$ -Strahlen 233  
 $\beta^+$ -Teilchen 233  
 $\beta^-$ -Teilchen 233  
 $\beta$ -Zerfall 233  
Bahngeschwindigkeit 26  
Balken 42  
Bandbreite 149  
Bänder, Oktav- 149  
Bänder, Terz- 149  
Bandmittenfrequenz 149  
Basiseinheiten 14  
Bauakustik 150  
Bäuche der Schwingung 137, 138, 148  
Bauphysik 13  
Bau-Schalldämmmaß 176  
Bau-Schalldämmmaß, bewertetes 176  
Beflockung, elektrostatische 199  
Belastung, innere 45  
Beleuchtungsstärke 209  
Beleuchtungsstärke, horizontal 212  
Beleuchtungsstärke, Messung der 211  
Berger-Formel 172  
Bernoulli-Gleichung 78, 79, 81  
Beschleunigung 24, 25, 27  
Beschleunigung, normal 27  
Beschleunigung, radial 27  
Beschleunigung, tangential 27  
Besetzungsinversion 230  
Betonummantelungen 240

Beugung 137, 160  
Beugung am Gitter 206  
Beurteilungspegel 170  
Bewegung, eindimensional 24  
Bewegung, geradlinig gleichförmig 28  
Bewegung, gleichförmig 24  
Bewegung im Raum 25  
Bewegung, ungleichförmig 24  
Bezugsschalleistung 152  
Bezugssystem 33  
Bezugssystem, translatorisch beschleunigtes 33  
Bezugssystem, gleichförmig rotierendes 34  
Biegemomente 45  
Biegeschwingungen 141, 173  
Biegesteifigkeit, höhenbezogene 142, 164, 174  
Bilder, reelle 203  
Bilder, virtuelle 203  
Bildkonstruktion, Spiegel 202, 203  
Bildladung 196  
Bimetallthermometer 53  
Bindungsarten 39  
Bindungskraft 37  
Blitzableiter 198  
Bogenentladungen 217  
Bolometer 55  
Böschungswinkel 47  
Brandbelastung 237  
Bravais-Gitter 38, 39, 40  
Brechung 136, 159, 160, 203  
Brechzahl 136, 140  
Bremsstrahlung 232  
Brennbarkeit (Baustoffe) 237  
Brennpunkt 202  
Brennpunktstrahl 202, 204  
Brennwert 93  
Bruttovolumen 94

**C**

Celsius-Skala 53  
 Clausius-Clapeyron, Gleichung von 103  
 Compton-Effekt 231  
 Compton-Wellenlänge 231  
 Coriolis-Kraft 34, 35  
 Coulombsches Gesetz 183

**D**

Daltonsches Gesetz 114  
 Dampfdichte 113  
 Dampfdruckkurve 103  
 Dampfdrucktabelle 113  
 Dampfdurchgang durch Wand 120  
 Dampfdurchlasswiderstand 118  
 Dampfleitfähigkeit 117, 118  
 Dampfstrom 117  
 Dampfstromdichte 117  
 Dämpfungsfaktor 127  
 Dämpfungskonstante 162, 163  
 Dampfwiderstand 118, 119  
 Dauerschallpegel, äquivalenter 158, 170  
 Debye-Gesetz 57  
 Debye-Temperatur 57  
 Deformation 23  
 Deformation, reversible 23  
 Dehnung 47  
 Dekrement, logarithmisches 128  
 Diagramm nach Zwicker 157  
 Diagramm von Redfearn 160  
 Dichte 38  
 Dichte, gemittelte 39  
 Dickenresonanz 175  
 Dielektrizitätskonstante 185  
 Diffusionskoeffizient 118  
 Diffusionswiderstandszahl 119  
 Dioptrie 203  
 Dipolmoment 189  
 Direktschall 168  
 Dispersion 135  
 Dissipation 162, 163  
 Dissipationskonstante 162  
 dissipative Strukturen 84

Dissoziation, elektrolytische 201  
 Dosis, effektive 234  
 Doppelbrechung 206  
 Doppelschalenresonanz 174  
 Doppelschicht, elektrische 200  
 Doppler-Effekt (elektromagnetische Welle) 140  
 Doppler-Effekt (Schall) 139  
 Drehimpuls 46  
 Drehimpuls-Erhaltungssatz 46  
 Drehmoment 41  
 Druck 47, 50  
 Druck, allseitiger 49  
 Dualismus Teilchen/Welle 231  
 Dulong-Petit-Gesetz 57  
 Durchflutungsgesetz 191  
 Durchschnittsgeschwindigkeit 24  
 Dynamik 27

**E**

Effektivwert (Elektrizität) 194  
 Effektivwert (Schall) 151  
 Effusion 109  
 Eigenfrequenzen 138, 144  
 Eigenschwingungen 138, 141, 142  
 Eigenwerte 138  
 Eindringtiefe (Erdboden) 73  
 Einfallslot 202  
 Einheiten, abgeleitete 15  
 Einheitstemperaturzeitkurve 238, 239  
 Einheitsvektoren 25, 26  
 Einphasengebiete 103  
 Einschwingvorgang 129  
 Elastizitätsmodul 48, 146  
 Elastizitätsmodul, dynamischer 142, 143  
 Elektrofiter 198  
 Elektrolyt 186  
 Elektron 182  
 Elektronenhülle 35  
 Elektronenmasse 36  
 Elektronenvolt 183  
 Elektrosmose 200  
 Elektrosmose, aktive 201

Elementarladung 182  
 Elementarwelle 145  
 Elementarzelle 38  
 Emission (Farbsehen) 221  
 Emissionsgrad (Licht) 216  
 Emissionsvermögen 87  
 Endenergiebedarf 93  
 Energie, innere 107  
 Energie, kinetische 32, 45  
 Energie, potenzielle 31, 32, 43, 181, 183  
 Energieaddition 156, 157  
 Energieausweis 101  
 Energiebedarfsausweis 101  
 Energiedichte (Schallwelle) 150  
 Energieeffizienzklassen 102  
 Energieeinsparungsgesetz 92  
 Energieeinsparverordnung 92  
 Energieerhaltung 32  
 Energieniveaus 229, 230  
 Energiesatz 32  
 Energieverbrauchsausweis 101  
 Energiezustände 229, 230  
 Entfernungsgesetz (Beleuchtung) 209  
 Entfernungsgesetz (Schall) 162  
 Enthalpie 107  
 Entladungsdauer (Blitz) 197  
 Entladungsstrom (Blitz) 197  
 Entmagnetisierung 191  
 Entropie 108  
 Entsalzen (Mauerwerk) 201  
 Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz 92  
 Eulersche Winkel 41

**F**

Fahrenheit-Skala 53  
 Fall, freier 25  
 Fallbeschleunigung 29  
 Fangladung 198  
 Faraday-Effekt 206  
 Faraday-Käfig 195, 196  
 Faraday-Konstante 186  
 Faradaysches Gesetz 186  
 Farbempfindungen 227

- Farbmeterik 224  
 Farbmischung, additiv 221  
 Farbmischung, subtraktiv 222, 223  
 Farbtemperatur 215  
 Farbwerte, natürliche 212  
 Federkonstante 126  
 Fehler, Gesamt- 16  
 Fehler, grobe 16  
 Fehler, systematische 16  
 Fehler, zufällige oder statistische 16  
 Fehlerarten 16  
 Fehlerfortpflanzungsgesetz 18, 19  
 Fehlerrechnung 16  
 Feldkonstante, elektrische 183  
 Feldlinien 31  
 Feldlinien an Spitze 195  
 Feldlinien, magnetische 189  
 Feldstärke (Isolatoroberfläche) 185  
 Feldstärke (Metalloberfläche) 184  
 Feldstärke, elektrische 139, 183, 196  
 Feldstärke, Gravitations- 181  
 Feldstärke, magnetische 139, 189  
 Fensterfaktor 215  
 Fernglas 205  
 Fernrohr 205  
 Ferromagnetika 189  
 Festkörper 37  
 Festkörper, kristalline 38  
 Feuerwiderstandsklassen 237, 239  
 Flächendichte der Ladung 194  
 Flächenmasse 164  
 flash-over 237, 238  
 Flimmerfrequenz 218  
 Fluss, magnetischer 192  
 Flüssigkeit 37, 38  
 Flüssigkeit, benetzende 111  
 Flüssigkeitsthermometer 54  
 Fortpflanzungsgeschwindigkeit-  
     Temperaturwelle 73  
 Fourier-Analyse 131, 149  
 Freifeld 161  
 Freiheitsgrade (starrer Körper) 41  
 Freiheitsgrade,  
     thermodynamische 103  
 Fremdatome, interstitielle 38  
 Fremdatome, substitutionelle 38  
 Frequenz 27, 126  
 Frequenz, Schall- 150  
 Frequenzbereich (Hören) 155  
 Fugendurchlässigkeit 82, 83  
 Fugendurchlasskoeffizient 82  
 Fußwärme 77
- G**
- $\gamma$ -Strahlung 233  
 Galilei-Transformation 33  
 Gas, ideales 37, 56, 106  
 Gas, reales 37, 106  
 Gasentladung  
     (Wechselspannung) 218  
 Gasentladung 216  
 Gaskonstante 56, 106  
 Gaskonstante, spezifische 106  
 Gaskonstante, universelle 56  
 Gasthermometer 53  
 Gaußsche Optik 203  
 Gaußsche Zahlenebene 127  
 Gebäudethermografie 55  
 Gegenwirkungsgesetz 28  
 Geräusch 170  
 Gesamt-Energiedurchlassgrad 90  
 Gesamt-Strahlungsleistung 207, 208  
 Geschwindigkeit 24  
 Geschwindigkeit, Durchschnitts- 24  
 Geschwindigkeit, Momentan- 24  
 Gesetz von Dalton 114  
 Gewichtskraft 29  
 Gibbssche Phasenregel 103  
 Gitter 137, 206  
 Gitterfehler 38, 40  
 Gitterfehlstellen, chemische 38  
 Gitterfehlstellen, strukturelle 38  
 Glaser-Verfahren 121  
 Gleichgewicht, radioaktives 233  
 Gleichgewicht, statisches 43, 44, 45  
 Gleichgewicht, thermodynamisches 54  
 Gleichung von Clausius-Clapeyron 103  
 Gleitreibung 47  
 Gleitreibungszahl 47  
 Glimmladung 217  
 Glimmlampen 218  
 Glühlampen 216  
 Gravimetrie 182  
 Gravitationsfeld 181  
 Gravitationskonstante 181  
 Gravitationskraft 181  
 Grenzfall, aperiodischer 128  
 Grenzflächenspannung 110  
 Grenzfrequenz (Photo-Effekt) 231  
 Größe, physikalische 13  
 Größengleichungen 16  
 Größtfehler 19  
 Grundgesetz der Mechanik 28  
 Grundgesetz, Newtonsches 29  
 Gruppengeschwindigkeit 135
- H**
- Haftreibung 47  
 Haftreibungszahl 47  
 Hagen-Poiseuillesches Gesetz 80  
 Halbleiter 54, 187, 188  
 Halbwertszeit 233  
 Hall-Effekt 192  
 Hall-Koeffizient 192  
 Hallradius 168  
 Hall-Sonde 192  
 Hall-Spannung 192  
 Hauptebene 202, 203  
 Hauptsatz der Thermodynamik (erster) 107

- Hauptsatz der Thermodynamik (nullter) 58  
 Heizgradtage 72, 73  
 Heizgrenztemperatur 72  
 Heizwärmebedarf 95, 98  
 Heizwert 93  
 Hellbezugswert 225  
 Hellempfindlichkeit, spektrale 207, 208  
 Helligkeit 226  
 Hilfsenergien 93  
 Himmelslichtanteil 213  
 Himmelslichtdiagramm 213, 214  
 Hochdrucklampe 219  
 Höchstdrucklampe 219  
 Höhenformel, barometrische 51  
 Hohlspiegel 202, 203  
 Hookesches Gesetz 48  
 Hörfläche 155  
 Hörschwelle 155  
 Huygenssches Prinzip 137  
 Hysteresis-Kurve 189, 190
- I**
- Immissionspegel 170  
 Impedanz, elektrische 194  
 Impedanzrohr 148, 167  
 Imprägnierungen 113  
 Impuls 28, 229  
 Impuls (Photon) 229  
 Impulserhaltung 32  
 Impulssatz 32  
 Induktion, magnetische 189  
 Induktionsgesetz 193  
 Induktionskonstante 139, 189  
 Inertialsystem 33  
 Influenz 196  
 Influenzkonstante 139  
 Infrarot 150, 155  
 Innenreflexionsanteil 213  
 Interferenz 137, 206  
 Ionen 35, 186  
 Ionenbindung 38  
 Ionenkristalle 201  
 Isolator 185  
 Isotherme, kritische 106
- Isothermen 106  
 Isotope 35, 233
- J**
- Jahres-Heizwärmebedarf 72  
 Jahres-Primärenergiebedarf 93
- K**
- Kalorimetrie 56  
 Kältemaschine 108  
 Kapazität, elektrische 184  
 Kapillardepression 111  
 Kapillaren 111  
 Kapillarerhebung 111  
 Kapillarleitung 109  
 Kavitation 154  
 Kelvin-Skala 53  
 Kerne, instabile 233  
 Kerne, künstlich radioaktiv 233  
 Kerne, natürlich radioaktiv 233  
 Kernzerfall 233  
 Kerr-Effekt 206  
 Kinematik 23  
 Kinematik, kartesische Koordinaten 25  
 Klang 149  
 Klangfiguren nach Chladni 138  
 Klassifizierung (Baustoffe) 237  
 Klassifizierung (Bauteile) 237  
 Knoten der Schwingung 137, 148  
 Kohärenz 205  
 Kohärenzlänge 206  
 Kohlebogenlampe 219  
 Komponenten, thermodynamische 103  
 Kompressionsmodul 49  
 Koinzidenz-Effekt 173  
 Koinzidenz-Grenzfrequenz 174  
 Komplementärfarben 221  
 Kompressibilität 38, 49, 51  
 Kompressibilität, adiabatische 107  
 Kondensator 184, 193  
 Kondenswasserbildung in Wand 120
- Konstruktionsteile, Schwächung 215  
 Kontakttemperatur 76, 77  
 Kontinuitätsgleichung 78  
 Kontinuum 38  
 Konvektion 83  
 Konvektion, erzwungene 58, 83  
 Konvektion, freie 58  
 Konvektion, natürliche 58, 83  
 Konvektionsstrom 84  
 Konvektionsstromdichte 83  
 Konvektionsstromdichte, effektive 83  
 Koronarentladungen 198  
 Körper, elastischer 23  
 Körper, homogene 39  
 Körper, isotrope 49  
 Körper, opaker 87  
 Körper, schwarzer 86  
 Körper, starrer 23, 41, 42  
 Körper, transparenter 87, 88  
 Körperfarben 223  
 Körperschall 163, 170, 178, 179  
 Kraft, eingeprägte 33  
 Kräfte 27  
 Krafteck 45  
 Kräftegleichgewicht 27  
 Kräftepaar 41  
 Kräfteparallelogramm 27  
 Kraftfeld 30  
 Kraftstoß 29  
 Kreisbewegung 26  
 Kreisbewegung, gleichförmige 27  
 Kreisfrequenz 27, 126, 127, 134  
 Kreisprozess 107  
 Kreisprozess, Carnotscher 108  
 Kriechfall 128  
 Kristalle, anisotrope 50  
 Kristalle, reale 38  
 Kristallgitter 38  
 kritischer Punkt (Wasser) 104  
 Krümmungskreis 27  
 Krümmungsradius 27  
 Kugelwelle 135, 145, 161, 162  
 Kundtsches Rohr 148

Kurven gleicher Lautstärke 155

## L

Lackierung, elektrostatische 199

Ladung 182

Ladung, Flächendichte der 194

Lambertsches Kosinus-Gesetz  
210

Lambert-Strahler 210

Lärm 170

Lärmpegel 170

Lärmquellen, Form der 161, 162

Lärmschutzwand 160, 161

Laser/LASER 206, 230

Lautheit 156

Lautstärke 156

Lautstärke, Kurven gleicher 155

Lautstärke, Unterschiede der  
156

Lebensdauer 233

LED 220

Leistung, elektrische 188

Leistung, mechanische 30

Leistungsdichte 71

Leistungsfaktor 194

Leitentladung 197

Leiter, metallischer 54, 60 187

Leitwert, thermischer 68

Leuchtdichte 210

Leuchtdichtefaktor 210

Leuchtdichteverteilung (Himmel)  
212

Leuchtkondensator 220

Leuchtröhren 218

Leuchtstofflampe 218

Licht, inkohärentes 230

Licht, kohärentes 230

Licht, sichtbares 207

Lichtausbeute 208

Lichtausbreitung 208

Lichtdurchlässigkeit 88

Lichtgeschwindigkeit 139

Lichtleitertechnik 203

Lichtschwächungsfaktoren 215

Lichtstärke 209

Lichtstärke, Messung der 211

Lichtstärke-Normal 209

Lichtstrahlen 202

Lichtstrom 208

Lichtweg 205

Linienschallquelle 162

Linsen, dünne 203

Lissajous-Figuren 133

Longitudinalwellen 135, 136

Lorentz-Kraft 192

Loschmidt-Zahl 186

Lösungsdiffusion 109

Luftdurchlässigkeit 82

Luftelektrizität 196

Luftfeuchtigkeit, absolute 113,  
115

Luftfeuchtigkeit, Messverfahren  
116

Luftfeuchtigkeit, relative 115

Luftschall-Dämm-Maß 176

Luftschalldämmung 170

Luftschalldämmung, Messung  
der 173, 175, 176

Luftschallübertragung 170

Luftschichtdicke, diffusions-  
äquivalente 120

Lüftungswärmestrom 85

Lüftungswärmetransferkoeffizient  
96

Lüftungswärmeverlust 85

Luftwechselrate 83

Luftwechselzahl 83

Lumineszenzstrahler 216

## M

Masse, flächenbezogene 164

Masse, träge und schwere 29

Massegesetz nach Berger 172

Massegesetz, theoretisches 172

Maßeinheit 13

Masseneinheit, atomare 36

Massenmittelpunkt 23, 41

Massenstrom 78, 83

Massenstromdichte 78

Massenzahl 35

Massetransport, elektrolytischer  
186

Massivwand 164

Maßzahl 13

Materialfeuchte, Messung der  
112

Mechanik 23

Metallbindung 38

Mindestluftwechselrate 83

Mindestschallstärke 152

Mindestwärmeschutz 100

Mittelpunktsstrahl 204

Mittelwert einer Einzelmessung  
17

Moleküle 35

Molekülmasse, äquivalente 186

Molekülmasse, relative 37

Molmasse 37

Moment, magnetisches 190

Momentangeschwindigkeit 24

Momentfläche 45

## N

Nachhall 166

Nachhallformel von Sabine 167

Nachhallzeit 166, 167

Nachhallzeit, Messung der 167

Nettogrundfläche 94

Nettovolumen 94

Neutrino 233

Neutronen 36, 233

Nicolsches Prisma 206

Normalkraft 47

Normalschall 155

Normalspannung 47

Normalverteilung 17

Normbrand 239

Normfarbtafel 225, 226

Normfarbwertanteile 225

Normfarbwerte 224

Normfarbtafel 226

Normhammerwerk 178

Normlichtarten 221

Normspektralwerte 224

Normtrittschallpegel 178

Normtrittschallpegel, bewerteter  
178

Nutzeffekt, visueller 208

Nutzenergien 93

## O

Oberflächendiffusion 109  
 Oberflächenenergie, spezifische 110  
 Oberflächenspannung 110  
 Ohmsches Gesetz 187  
 OLED 220  
 Optik, geometrische 202  
 Optimalfarben 221  
 Ordnungszahl 35  
 Ortskoordinaten 23  
 Ortsvektor 23  
 Oszillator, harmonischer 126

## P

Paarbildung 232  
 Parallelstrahl 202, 204  
 Partialdruck 114  
 Pegelkorrekturen 171  
 Periode 27  
 Periodensystem der Elemente 36  
 Permeabilität 189  
 Phase, thermodynamische 103  
 Phasen, Welle 134  
 Phasendiagramm 103  
 Phasendifferenz 130  
 Phasengeschwindigkeit 134, 150  
 Phasenverschiebung 148, 194  
 Phasenverzögerung (Temp.-Welle) 75, 76  
 Phasenwinkel 126  
 Phononen 58  
 Photo-Effekt 231  
 Photometer 211  
 Photonen 229  
 Plancksches Wirkungsquantum 229  
 Plastbeschichtung, elektrostatische 199  
 Plattenkondensator 184, 193  
 Poissonsche Zahl 48  
 Polarisation einer Welle 135  
 Polarisation, elektrische 185

Polarisation, magnetische 189  
 Polarisator 206  
 Porro-Prismen 203, 205  
 Potenzial 181, 183, 194  
 Potenzial, elektrisches 183  
 Potenzial im Gravitationsfeld 181  
 Potenzialkraft 31  
 Primärenergiefaktor 93  
 Prinzip der virtuellen Arbeit 43  
 Protonen 36, 182  
 Prozesse, adiabatische 107, 108  
 Prozesse, isobare 107  
 Prozesse, isochore 107  
 Prozesse, isotherme 107, 108  
 Punkt, kritischer (Wasser) 104  
 Punktmasse 23  
 Punktschallquelle 162  
 Purpur-Gerade 226  
 Pyrometer 55

## Q

Quanten 229  
 Quecksilberdampf-Hochdrucklampe 219  
 Querkontraktion 48

## R

radioaktiv, künstlich 233  
 radioaktiv, natürlich 233  
 Radioaktivität, natürliche 234  
 Radiusvektor 26  
 Radon 235  
 Radonschutzmaßnahmen 235, 236  
 Randwinkel 110  
 Raumkühlbedarf 95  
 Raumwinkel 86, 208  
 Raumwirkungsgrad 213  
 Realkristalle 50  
 Referenzgebäude 95  
 Referenzklima 73  
 Reflexion 136, 159  
 Reflexionsgrad (Schall) 163  
 Reflexionsvermögen 88, 210  
 Regenfeuchtigkeit 111  
 Regression, lineare 20

Reibung, äußere 46  
 Reibungsgesetz, Newtonsches 79  
 Reibungskraft 46  
 Reibungskräfte in Flüssigkeiten und Gasen 79  
 Relativitätsprinzip (Newton) 33  
 Reibungswinkel 47  
 Remission (Farbsehen) 221  
 Resonanzbreite 130  
 Resonanzfrequenz 130  
 Resonator, Helmholtzscher 164  
 Resonatoren 164  
 Reynolds-Zahl 81  
 Richtmoment 49  
 Röntgen-Strahlung 232  
 Rotator, starrer 45  
 Ruhe 28  
 Rydberg-Frequenz 229

## S

Sammellinse 204  
 Saccharimeter 206  
 Sättigungsdruck 106, 113  
 Sättigungsmenge 113  
 Satz von Steiner 45  
 Schalen, biegesteife 174  
 Schalen, biegeeweiche 174  
 Schall 144  
 Schall, stationärer 168  
 Schallabsorptionsfläche 165  
 Schallabsorptionsfläche, äquivalente 165  
 Schallabsorptionsgrad 163, 165  
 Schallausschlag 145  
 Schalldämm-Maß 171  
 Schalldämmung, Anforderungen 179  
 Schalldruckpegel 152  
 Schallemission 170  
 Schallfeld, diffuses 168  
 Schallfeldgrößen 144  
 Schallimmission 170  
 Schallintensität 151  
 Schallintensitätspegel 152  
 Schall-Kennimpedanz 146

- Schalleistung 151  
Schallpegel 152  
Schallpegel, bewerteter 157  
Schallpegelmesser 153  
Schallquelle, linienförmig 161  
Schallquelle, punktförmig 161  
Schallschnelle 146  
Schallschnelle-Amplitude 146  
Schallstärke 152  
Schallstärkepegel 152  
Schallstromdichte 151  
Schallstromdichte (Ultraschall) 154  
Schallstromstärke 151  
Schallwechseldruck (Ultraschall) 154  
Schallwechseldruck 146  
Schallwelle 145  
Schallwelle, ebene harmonische 145  
Schichten, poröse 165  
Schichten, reflexionsmindernde 206  
Schienenverkehr 171  
Schimmel 108  
Schirmhöhe, effektive 160, 161  
Schluckfläche 165  
Schluckgrad 163  
Schmelzdruckkurve 103  
Schmerzschwelle 155  
Schnittverfahren, Rittersches 45  
Schubfestigkeit 50  
Schubspannung 48  
Schüttwinkel 47  
Schwächungsfaktor für  
  Konstruktionsteile 215  
Schwächungskoeffizient, linearer 162  
Schwebung 131  
Schwebungsdauer 131  
Schwelbrand 237  
Schweredruck 51  
Schwerkraft 43  
Schwerpunkt 41  
Schwingfall 128  
Schwingkreis, elektrischer 127, 128, 129  
Schwingung, eindimensional 131  
Schwingung, erzwungene 129  
Schwingung, gedämpfte 127  
Schwingung, mechanische 126  
Schwingung, stationäre 129  
Schwingung, zweidimensional 133  
Schwingungsdauer 126, 128  
Seebeck-Effekt 55  
Seil 42  
Seileck 45  
Seilmethode 45  
Sekundärstrahler 210  
Selbstinduktivität 193  
Selbstleuchter 221  
SI-System 14  
Sicherheit, statistische 17  
Simultankontrast 227  
Solardurchlässigkeit 88  
Sonneneintragskennwert 101  
Sonnenschutzgläser 88  
Sortierung, elektrische 198  
Spannung, elektrische 183  
Spannung, thermoelektrische 55  
Spannungsoptik 206  
Spannungstensor 50  
Spannungszustand, räumlich 50  
Speedmischung 223  
Speicherfähigkeit, wirksame 96  
Spektrallinien 229  
Spektralen, kontinuierliche 230  
Spektrum, elektromagnetisches 141  
Sperrschichten 112  
Spiegelteleskop 205  
Spitzenentladung 195  
Spule 191, 193  
Spuranpassung 173  
Stab 42  
Stäbchen 224  
Statik, ebene 45  
Statik, Grundaufgaben der 44  
Statik, räumliche 45  
Steifigkeit, dynamische 142  
Stoffmenge 37  
Stokessches Gesetz 80  
Stoß 29, 32  
Stoßionisation 217  
Strahl, außerordentlicher 206  
Strahl, ordentlicher 206  
Strahlendichte 216  
Strahlendichte, spektrale 86  
Strahlen 145  
Strahlen, radioaktive 223  
Strahlenexposition 234  
Strahler, grauer 87  
Strahlungsäquivalent, photo-  
  metrisches 208  
Strahlungsaustausch 89  
Strahlungsaustauschkonstante 89  
Strahlungsgesetz (Planck) 86  
Strahlungsgesetz (Kirchhoff) 87, 216  
Strahlungsgesetz (Stefan-  
  Boltzmann) 87, 216  
Strahlungsintensität 87  
Strahlungsintensität, solare 91  
Strahlungsleistung 208  
Straßenlärm 171  
Straßenverkehr 171  
Stroboskop-Effekt 218  
Strom, elektrischer 78  
Stromdichte (Ultraschall) 154  
Stromdichte der Schallwelle 151, 152  
Stromdichte, elektrische 186  
Stromleitung, unipolar 200  
Stromlinien 78  
Stromröhre 78  
Stromstärke, elektrische 186  
Strömung 78  
Strömung, freie 58  
Strömung, laminare 78, 79  
Strömung, turbulente 78, 80  
Strömungsgeschwindigkeit 78  
Sublimationsdruckkurve 103  
Sukzessivkontrast 227  
Superpositionsprinzip 131, 205  
Suszeptibilität, magnetische 189

Symbol 13  
Systeme, abgeschlossene 109

## T

t-Faktor 18  
Tageslichtquotient 213  
Tauperiode 120  
Taupunkt 116  
Taupunkt hygrometer 116  
Taupunkttemperatur 116  
Tauwasser 116, 120  
Tauwasserbildung 116  
Tauwassermasse, flächenbezogene 124  
Tauwasserschutz, Maßnahmen 125  
Temperatur 53  
Temperatur, absolute 53  
Temperatur, kritische 106  
Temperaturamplitude (Außenluft) 74  
Temperaturamplitudendämpfung 74  
Temperaturdifferenzen 53  
Temperaturfaktor 100  
Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes 53  
Temperaturleitwert 239  
Temperaturstrahler 215  
Temperaturverteilung im Boden 72  
Temperaturwellen 72  
Tensor 46  
Thermoelement 55  
Thermometer 54, 55  
Thermometer, Einsatzbereiche 156  
Ton, reiner 149  
Tonhöhe 149  
Torsion 49  
Torsionsmodul 49, 146  
Totalreflexion 137, 203  
Trägheit des Ohres 158  
Trägheit 28  
Trägheitsgesetz 28, 33  
Trägheitskraft 33

Trägheitsmoment, axiales 45  
Transmission (Farbsehen) 221  
Transmissionsgrad (Licht) 210, 215  
Transmissionsgrad 88  
Transmissionswärmefortkoeffizient 95  
Transmissionswärmeverlust, spezifischer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener 94  
Transversalwellen 135  
Transversalwellen, elektromagnetische 205  
Trennwand, biegegewichte 172  
Tripelpunkt 104  
Trittschall 178  
Trittschalldämmung 170  
Trittschalldämmung, Messung der 178  
Trittschallübertragung 170

## U

Ultraschall 154  
Ultraschall, Erzeugung von 154  
Umfassungsfläche, wärmeübertragende 94  
Umkehrprisma 203  
Umwandlungswärme, spezifische 105  
Unbuntpunkt 226

## V

Vakuum-Lichtgeschwindigkeit 139  
Van-der-Waals-Gleichung 106  
Van-der-Waals-Kräfte 38  
Verbauungsabstandswinkel 215  
Verdeckungseffekt 156  
Verdunstungsperiode 120  
Verdunstungswassermasse, flächenbezogene 124  
Verkehrslärm 170  
Verschmutzungsgrad 215  
Versetzungen 50  
Viskosität 79

Vollbrand 237  
Volumenstrom 82  
Vorsätze 15

## W

Wände, doppelschalige 174, 175  
Wärmeaustauschstrahlung 89  
Wärmebrücke, geometrische 68  
Wärmebrücke, linienförmige 68  
Wärmebrücke, punktförmige 68  
Wärmebrücke, stoffliche 68  
Wärmebrücken 68, 100  
Wärmediffusion 70  
Wärmediffusionsgleichung 70  
Wärmediffusionskonstante 70, 77  
Wärmedurchgang 63  
Wärmedurchgangskoeffizient 64  
Wärmedurchgangskoeffizient, äquivalenter 89  
Wärmedurchgangskoeffizient, linearer 69  
Wärmedurchgangskoeffizient, punktbezogener 69  
Wärmedurchgangswiderstand 64  
Wärmedurchgangswiderstand, oberer Grenzwert 67  
Wärmedurchgangswiderstand, unterer Grenzwert 67  
Wärmedurchlass 61  
Wärmedurchlasswiderstand 61, 62, 100  
Wärmeeindringkoeffizient 239  
Wärmegewinn, solarer 92  
Wärmekapazität 56  
Wärmekapazität, molare 56  
Wärmekapazität, spezifische 56  
Wärmeleitung 58, 83  
Wärmeleistungsmaschine 108  
Wärmeleitfähigkeit 59, 60  
Wärmeleitfähigkeit (Messverfahren) 61  
Wärmeleitung 58  
Wärmemenge 56  
Wärmepumpe 108  
Wärmequellen 95, 97

- Wärmerohr 84  
 Wärmeschutz, sommerlicher 101  
 Wärmeschutzgläser 88  
 Wärmesenken 95, 96  
 Wärmespeicherung 57  
 Wärmestrahlung 58, 85, 86  
 Wärmestrahlungsaustausch 88  
 Wärmestrom 59  
 Wärmestrom, Gesamt- 83  
 Wärmestrom, instationärer 70  
 Wärmestrom, solarer 91  
 Wärmestrom, stationärer 59  
 Wärmestromdichte 59, 61  
 Wärmetransport 58  
 Wärmeübergang 59, 63  
 Wärmeübergangskoeffizient 63  
 Wärmeübergangswiderstand 63  
 Wärmeübergangswiderstand,  
 bedingt durch Konvektion 84  
 Wärmeübergangswiderstand,  
 bedingt durch Strahlung 89, 90  
 Warmwasserheizungen 84  
 Wasser 103  
 Wasser, Phasendiagramm 104  
 Wasseraufnahmekoeffizient 112  
 Wasserdampfdiffusion 109  
 Wasserdampfdiffusion in  
 Bauteilen 119, 120  
 Wasserdampfdiffusion in Luft  
 117, 118  
 Wassereindringkoeffizient 112  
 Wassertransport, kapillarer 111,  
 112  
 Weber-Fechner-Gesetz 152  
 Wechsellspannung 193  
 Wechselstrom 193  
 Wechselwirkungsgesetz 28  
 Weiß- oder Unbuntpunkt 226  
 Welle 133  
 Welle, elliptisch polarisierte 135  
 Welle, harmonische 134  
 Welle, linear polarisierte 135  
 Welle, mechanische 144  
 Welle, Polarisation der 135  
 Welle, stehende 137, 138, 148  
 Wellen, elektromagnetische 85,  
 139, 140  
 Wellenflächen 135, 145  
 Wellengleichung 133, 145  
 Wellenlänge 134  
 Wellenlänge, Messung der 148  
 Wellenlänge (Schall) 150  
 Wellenlänge (Ultraschall) 154  
 Wellenwiderstand (Schall) 147  
 Wellenwiderstand, elektromagne-  
 tischer 139  
 Wellenzahl 134  
 Werkstoffprüfung (Ultraschall)  
 154  
 Wertigkeit 186  
 Widerstand, elektrischer 187  
 Widerstand, Ohmscher 187, 193  
 Widerstand, spezifischer elektri-  
 scher 178, 188  
 Widerstandskraft 80  
 Widerstandsthermometer 53  
 Widerstandszahl 81  
 Wiedemann-Franz-Gesetz 60  
 Wiensches Verschiebungsgesetz  
 86  
 Winkelbeschleunigung 46  
 Winkelgeschwindigkeit 26  
 Wirbel 78  
 Wirkleistung 194  
 Wirkungsgrad, visueller 216  
 Wirkungsgrad,  
 Wärmekraftmaschine 108  
 Wirkungslinie 41  
 Wirkungsquantum 229  
 Wölbspiegel 203  
 Wurfparabel 26
- Z**
- Zahlenebene, Gauss'sche 127  
 Zahlenwertgleichung 16  
 Zäpfchen 224  
 Zentrifugalkraft 34  
 Zerfallswahrscheinlichkeit 233  
 Zerstreuungslinse 205  
 Zug 47  
 Zündung (Brand) 237  
 Zustandsgleichung, ideales Gas  
 106  
 Zustandsgleichung, reales Gas  
 106  
 Zustandsgrößen 105  
 Zweimassenschwinger 143  
 Zweiphasengebiete 103  
 Zwicker-Diagramm 157  
 Zylinderwelle 135, 145, 161, 162