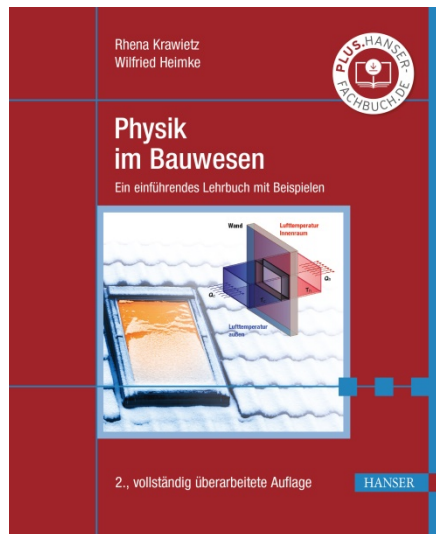


HANSER



Leseprobe

zu

„Physik im Bauwesen“

von Rhenia Krawietz & Wilfried Heimke

ISBN (Buch): 978-3-446-46487-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-46682-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446464872>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Die „Physik im Bauwesen“ umfasst zum einen physikalische Grundgesetze, deren bautechnische Anwendungen in technischen Disziplinen ausführlich behandelt werden. Zum anderen werden bauspezifische Teilgebiete detaillierter dargestellt, um den (zukünftigen) Bauingenieur und Architekten zur Anwendung naturwissenschaftlichen Grundwissens im Fachgebiet „Bauphysik“ zu befähigen.

In seinem ersten Teil stellt das vorliegende Lehrbuch deshalb die physikalischen Grundgesetze für das Bauwesen in der Form eines Kompendiums systematisch dar. Die Teilgebiete Mechanik, Felder, Schwingungen und Wellen, Thermodynamik, Strahlung und Materie wurden dabei so ausgewählt und durch einen Abschnitt Fehlerrechnung bei physikalischen Experimenten ergänzt, dass sie auch von Studierenden anderer ingenieurtechnischer Studienrichtungen genutzt werden können. In seinem zweiten Teil werden die Gesetze der Bauphysik ausführlich behandelt. Die für den Bauingenieur und Architekten wichtigen Phänomene werden hier nicht nur beschrieben, sondern deren Gemeinsamkeiten und Verallgemeinerungsmöglichkeiten durch die Aufdeckung der physikalischen, logischen Struktur gezeigt. Dabei kann die „Physik im Bauwesen“ kein Ersatz für die in der Baukonstruktionslehre zu behandelnden bauphysikalischen Forderungen und deren Realisierung sein; sie soll vielmehr dem Bauingenieur und Architekten helfen, die physikalischen Grundregeln in seinem Fach fortdauernd anzuwenden und damit zu seiner Disponibilität beitragen.

Die physikalischen Phänomene werden weitgehend unabhängig von bestehenden Normenwerken (die sich in einer fortschreitenden Entwicklung befinden) dargestellt, für die Anwendung in der Praxis ist aber deren Kenntnis zusätzlich erforderlich. Den mittlerweile klassischen Gebieten der Bauphysik (Wärme, Feuchte, Schall, Licht und Brand) wurden die Kapitel Elektrizität und Materialprüfung hinzugefügt, um die Grundkenntnisse auf wichtige Teilgebiete, mit denen der Bauingenieur und Architekt in Berührung kommt, auszudehnen.

Das Buch ist aus Vorlesungen hervorgegangen, die die Autoren an der Hochschule für Technik und Wirtschaft

Dresden für Architekten und Bauingenieure gehalten haben bzw. halten. Es wendet sich deshalb an Studierende dieser Grundstudienrichtungen. Darüber hinaus kann es in der Praxis tätigen Bauingenieuren und Architekten als Nachschlagewerk dienen. Die Beschreibungen von Demonstrations-Experimenten, Aufgaben am Ende jedes Abschnitts (mit ausführlichen Lösungen im Anhang) und eingefügte Anwendungsbeispiele entsprechen dem Lehrbuchcharakter. Eine (innerhalb der Abschnitte fortlaufende) Nummerierung wichtiger Formeln und Tabellen, die Hervorhebung der Sachwörter sowie ein Verzeichnis dieser Sachwörter und der verwendeten Formelzeichen sollen das Nachschlagen erleichtern.

Beim Leser werden Kenntnisse aus den Fächern Mathematik und Physik, wie sie der Hochschulreife der allgemeinbildenden Schule entsprechen, vorausgesetzt. Bei der Darstellung der Formeln für technische Berechnungsverfahren wurde bewusst nicht auf eine Herleitung verzichtet, um dabei auch typische Methoden der physikalischen Erkenntnisgewinnung demonstrieren zu können und gleichzeitig die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit zu zeigen. Beim informatorischen Lesen können diese Ableitungen übergangen werden; die Standardformeln lassen sich auch mit geringem mathematischen Aufwand anwenden. Die verwendeten Formelzeichen entsprechen weitgehend Beispielen aus der weiterführenden Literatur (einschl. Normen und Nachschlagewerke). Sie bezeichnen ausnahmslos physikalische Größen, deren SI-Einheiten jeweils beim erstmaligen Auftauchen im Text gesondert angegeben sind.

Bei der technischen Fertigstellung des satzfertigen Manuskripts leisteten Frau Annett Lossau, Frau Nicole Baude sowie die Herren Dipl.-Ing. (FH) Michael Starke, Dipl.-Ing. (FH) Maik Rentzsch und Fritz Thomas wertvolle Hilfe. Ihnen gebührt der herzliche Dank der Autoren ebenso wie dem Verlag und insbesondere Frau Christine Fritzsche, Frau Franziska Kaufmann und Frau Heidi Bornemann.

Dresden, Sommer 2007

Wilfried Heimke,
Rhena Krawietz

Vorwort zur 2. Auflage

Seit dem Erscheinen von „Physik im Bauwesen“ wurde dieses Lehrbuch u. a. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden in den Studiengängen Bauingenieurwesen, Architektur (bis 2014) sowie Wirtschaftsingenieurwesen intensiv genutzt.

Die seitdem erfolgten neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Bauphysik und auch veränderte Lernmethoden der Studierenden erforderten sowohl eine inhaltliche Überarbeitung als auch methodische Veränderungen.

Um die Verbindung zwischen den physikalischen Grundlagen und den bauphysikalischen Anwendungen deutlicher aufzuzeigen, wurde die bisherige Trennung aufgehoben.

So sind jetzt im Kapitel „Wärmetransport und Wärmeschutz von Gebäuden“ die thermodynamischen und fluidmechanischen Grundlagen sowie die Betrachtungen zu elektromagnetischen Wellen und Strahlungsgesetzen mit der bauphysikalischen Betrachtungsweise von Wärmetransportvorgängen sowie mit den Berechnungen von Energiebilanzen für Gebäude vereint.

Das Kapitel „Feuchtigkeitstransport und Feuchteschutz von Gebäuden“ beginnt ebenfalls mit thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten, insbesondere zur Theorie des idealen Gases, und leitet davon ausgehend über zu Wasserdampftransportprozessen und daraus abzuleitenden Erfordernissen des Tauwasserschutzes.

Da mechanische Schwingungen von Bauteilen einerseits in unmittelbarem Zusammenhang mit der Ausbreitung von Schall und der Schalldämmung stehen, andererseits aber von genereller Bedeutung im Bauwesen sind, enthält das Kapitel „Schallausbreitung und Schalldämmung“ eine Einführung in die Physik von Schwingungen und Wellen. Daraus abgeleitet werden dann die Besonderheiten von Schall und deren Auswirkungen auf den baulichen Lärmschutz.

Die bauphysikalische Praxis besteht insbesondere auch aus experimentellen Prüfungen. Im Kapitel „Einführung“ befinden sich deshalb neben der Erläuterung der allgemeingültigen physikalischen Symbolik Ausführungen zur Fehlerrechnung.

Ohne direkten bauphysikalischen Bezug wurde das Kapitel „Grundlagen der Mechanik“ belassen, da es zum ingenieurwissenschaftlichen Grundwissen gehört und in allen vorgenannten bauphysikalischen Gebieten benötigt wird.

Neben den „klassischen“ Themen der Bauphysik (Wärme, Feuchte, Schall) spielt auch die „Elektrodynamik im Bauwesen“ eine Rolle. In diesem Kapitel wird wiederum vom Grundwissen zu konkreten Anwendungen wie z. B. dem Blitzschutz übergeleitet.

Besonders an auf dem Gebiet der Architektur Lernende und Tätige richtet sich das Kapitel „Optik und Beleuchtung“, in welchem Grundlagen der Strahlen- und Wellenoptik sowie damit in Zusammenhang stehende ingenieurwissenschaftliche Disziplinen wie Beleuchtungstechnik, Tageslicht und Farben erläutert werden.

In den letzten Jahren stärker in den Fokus gerückt ist die radioaktive Belastung von Gebäuden, hauptsächlich durch Radon. Dazu befinden sich Informationen im Kapitel „Strahlung und Bauwerke“.

Zu den bauphysikalischen Themen im weiteren Sinne gehört der „Brandschutz“, zu dessen baulichen Aspekten eine Einführung gegeben wird.

Viele bauphysikalische Nachweise sind in Normen geregelt, welche in der vorliegenden Neuauflage auch Eingang gefunden haben. Zwar unterliegen diese einem ständigen Wandel, ausgehend von den zitierten Normen können aber jederzeit die aktuell gültigen Ausgaben ermittelt werden.

Viele Abschnitte des Lehrbuches enthalten Übungsaufgaben. Auf **plus.hanser-fachbuch.de** finden Sie die **Lösungen der Aufgaben**.

Die Autoren freuen sich sehr, dass der Hanser-Verlag das neue Buchprojekt ermöglicht hat und danken Herrn Frank Katzenmayer, Frau Christina Kubiak, Frau Anne Kurth und Frau Carina Ries herzlich für die gute Zusammenarbeit und freundliche Unterstützung.

Dresden, Herbst 2020

Rhena Krawietz

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	13
1.1	Physik und Bauphysik	13
1.2	Physikalische Größen	13
1.2.1	Symbolik.....	13
1.2.2	Maßeinheiten	14
1.2.3	Größen- und Zahlenwertgleichungen	16
1.3	Fehlerrechnung	16
1.3.1	Fehlerarten.....	16
1.3.2	Fehler einer Messreihe.....	17
1.3.3	Fehlerfortpflanzung	18
1.3.4	Lineare Regression (Ausgleichsgerade).....	20
2	Grundlagen der Mechanik	23
2.1	Kinematik und Dynamik.....	23
2.1.1	Punktmasse, starrer und elastischer Körper.....	23
2.1.2	Eindimensionale Bewegung	24
2.1.3	Bewegung im Raum	25
2.1.4	Newtonsche Axiome.....	27
2.1.5	Arbeit, Leistung und Energie	30
2.2	Erhaltungssätze	32
2.2.1	Impulssatz	32
2.2.2	Energiesatz	32
2.3	Bewegte Bezugssysteme	33
2.3.1	Inertialsystem	33
2.3.2	Translatorisch beschleunigte Bezugssysteme.....	33
2.3.3	Gleichförmig rotierendes Bezugssystem	34
2.4	Aufbau der Stoffe	35
2.4.1	Atome, Moleküle, Ionen.....	35
2.4.2	Bindungskräfte und -arten, Aggregatzustände	37
2.4.3	Kontinuum.....	38
2.5	Feste Körper	41
2.5.1	Starrer Körper	41
2.5.2	Kräfte am starren Körper	41
2.5.3	Statik.....	43
2.5.4	Starrer Rotator	45
2.5.5	Äußere Reibung	46
2.5.6	Elastische Stoffe	47
2.6	Flüssigkeiten und Gase	50
2.6.1	Kennzeichen der Flüssigkeiten und Gase	50
2.6.2	Druck in Flüssigkeiten und Gasen.....	50
2.6.3	Flüssigkeiten und Gase im Schwerfeld.....	51

3	Wärmetransport und Wärmeschutz von Gebäuden	53
3.1	Temperatur und Wärmemenge	53
3.1.1	Temperaturskalen	53
3.1.2	Thermische Ausdehnung	53
3.1.3	Temperaturmessung	54
3.1.4	Wärmekapazität	56
3.2	Temperaturausgleich.....	58
3.2.1	Nullter Hauptsatz der Thermodynamik	58
3.2.2	Arten des Wärmetransportes.....	58
3.2.3	Wärmestrom und Wärmestromdichte	59
3.3	Wärmeleitung	59
3.3.1	Stationärer Wärmestrom	59
3.3.2	Messverfahren für die Wärmeleitfähigkeit	61
3.3.3	Wärmedurchlass	61
3.3.4	Wärmeübergang	63
3.3.5	Wärmedurchgang.....	63
3.3.6	Temperaturverlauf in einer Wand	64
3.3.7	Komplexe Bauteile	66
3.3.8	Wärmebrücken.....	68
3.3.9	Wärmediffusion	70
3.3.10	Temperaturwellen.....	72
3.3.11	Kurzzeitige Wärmeableitung.....	76
3.4	Wärmekonvektion.....	78
3.4.1	Bewegte Flüssigkeiten und Gase	78
3.4.2	Luftdichtheit und Lüftung von Gebäuden	81
3.4.3	Konvektionsstromdichte	83
3.4.4	Lüftungswärmeverlust	85
3.5	Wärmestrahlung	85
3.5.1	Energietransport durch elektromagnetische Wellen	85
3.5.2	Strahlungsgesetze.....	86
3.5.3	Strahlungsabsorption, -reflexion und -transmission.....	87
3.5.4	Solare Wärmegewinne	90
3.6	Energieberechnungen	92
3.6.1	Energieeinsparverordnung	92
3.6.2	Berechnungen des Nutzenergiebedarfs für Heizen und Kühlen nach DIN V 18599-2	95
3.6.3	Mindestwärmeschutz.....	100
3.6.4	Sommerlicher Wärmeschutz	101
3.6.5	Energieausweise	101
4	Feuchtigkeitstransport	103
4.1	Das Phasendiagramm von Wasser	103
4.2	Zustandsänderungen von Gasen	105
4.2.1	Zustandsgrößen	105
4.2.2	Zustandsgleichungen	106
4.2.3	Thermodynamische Prozesse	107
4.3	Mechanismen des Wassertransportes in Baustoffen.....	109

4.4	Kapillarer Wassertransport	110
4.4.1	Oberflächenspannung	110
4.4.2	Kapillarität	111
4.4.3	Maßnahmen gegen kapillaren Wassertransport	112
4.5	Luftfeuchtigkeit	113
4.5.1	Absolute und relative Luftfeuchtigkeit	113
4.5.2	Taupunkt	116
4.5.3	Messverfahren für die Luftfeuchtigkeit	116
4.6	Wasserdampfdiffusion	117
4.6.1	Wasserdampfdiffusion in Luft	117
4.6.2	Wasserdampfdiffusion in Bauteilen	119
4.6.3	Wasserdampfdurchgang durch eine Wand	120
4.6.4	Maßnahmen zum Tauwasserschutz	125
5	Schallausbreitung	126
5.1	Schwingungen	126
5.1.1	Harmonische Schwingungen	126
5.1.2	Gedämpfte harmonische Schwingungen	127
5.1.3	Erzwungene harmonische Schwingungen	129
5.1.4	Überlagerung von Schwingungen	131
5.2	Wellen	133
5.2.1	Wellengleichung	133
5.2.2	Wellenarten	135
5.2.3	Reflexion, Brechung und Beugung	136
5.2.4	Stehende Wellen	137
5.2.5	Doppler-Effekt	139
5.2.6	Elektromagnetische Wellen	139
5.3	Schwingungen von Bauteilen	141
5.3.1	Eigenschwingungen homogener, einschaliger Bauteile	141
5.3.2	Eigenschwingungen mehrschaliger Bauteile	142
5.4	Schallwellen und Schallfeldgrößen	144
5.4.1	Wellengleichung von Schallwellen	144
5.4.2	Schallgeschwindigkeit	146
5.4.3	Schalldruck und Schallschnelle	146
5.4.4	Stehende Schallwellen	148
5.4.5	Klanganalyse	149
5.5	Schallpegel	150
5.5.1	Energie- und Stromdichte einer Welle	150
5.5.2	Schallstärke und Schallpegel	152
5.5.3	Überlagerung von Schallfeldern	153
5.6	Ultraschall	154
5.7	Physiologische Akustik	155
5.7.1	Hörfläche	155
5.7.2	Lautheit	156
5.7.3	Bewertete Schallpegel	157
5.7.4	Trägheit der Gehörempfindung	158

5.8	Ausbreitung von Schallwellen.....	159
5.8.1	Reflexion und Brechung	159
5.8.2	Beugung.....	160
5.8.3	Schallausbreitung im Freifeld, Entfernungsgesetz.....	161
5.9	Schallabsorption und Raumakustik	163
5.9.1	Schallabsorptionsgrad.....	163
5.9.2	Schallabsorber	164
5.9.3	Nachhall	166
5.10	Schalldämmung	170
5.10.1	Lärm.....	170
5.10.2	Verkehrslärm.....	170
5.10.3	Luftschalldämm-Maß.....	171
5.10.4	Messung der Luftschalldämmung.....	175
5.10.5	Trittschalldämmung.....	178
5.10.6	Anforderungen an die Schalldämmung	179
6	Elektrodynamik im Bauwesen	181
6.1	Felder.....	181
6.1.1	Feldstärke	181
6.1.2	Potenzial	181
6.2	Statisches elektrisches Feld.....	182
6.2.1	Elektrostatik.....	182
6.2.2	Elektrostatik der Metalle	184
6.2.3	Nichtleiter im elektrischen Feld.....	185
6.3	Stationärer elektrischer Strom.....	186
6.3.1	Gleichstrom in Metallen und Flüssigkeiten	186
6.3.2	Gesetze des Ladungstransportes.....	186
6.4	Statisches magnetisches Feld.....	188
6.4.1	Magnetostatik.....	188
6.4.2	Stoffe im Magnetfeld	189
6.4.3	Magnetische Wirkungen elektrischer Ströme	190
6.4.4	Kräfte im Magnetfeld	192
6.5	Instationäre Felder	192
6.5.1	Elektromagnetische Induktion	192
6.5.2	Wechselstrom	193
6.6	Blitzerscheinungen	194
6.6.1	Elektrostatische Grundlagen	194
6.6.2	Feldstärke und Entladungsmechanismus.....	196
6.6.3	Entladungsdauer und -strom, Blitzableiter.....	197
6.7	Elektrostatische Verfahren	198
6.7.1	Elektrofilter, elektrische Sortierung.....	198
6.7.2	Beschichtungsverfahren.....	199
6.8	Elektrosmose	200
6.8.1	Unipolare Stromleitung.....	200
6.8.2	Aktive und passive Elektrosmose.....	200
6.9	Elektrolytische Erscheinungen	201

6.9.1	Elektrolytische Verfahren.....	201
6.9.2	Dissoziation.....	201
6.9.3	Elektrochemisches Entsalzen.....	201
7	Optik und Beleuchtung.....	202
7.1	Strahlenoptik.....	202
7.2	Wellenoptik.....	205
7.3	Lichttechnische Grundbegriffe.....	207
7.3.1	Lichtstrom, Lichtstärke, Wirkungsgrad.....	207
7.3.2	Beleuchtungsstärke.....	209
7.3.3	Leuchtdichte, Leuchtdichtefaktor.....	210
7.3.4	Messung lichttechnischer Größen.....	211
7.4	Tageslicht.....	211
7.4.1	Natürliche Beleuchtung.....	211
7.4.2	Tageslichtquotient.....	212
7.5	Künstliches Licht.....	215
7.5.1	Lichterzeugung.....	215
7.5.2	Temperaturstrahler.....	215
7.5.3	Lumineszenzstrahler.....	216
7.6	Farben.....	220
7.6.1	Farbreize.....	220
7.6.2	Farbvalenzen.....	221
7.6.3	Farbempfindungen.....	227
8	Strahlung und Bauwerke.....	229
8.1	Strahlung und Materie.....	229
8.1.1	Quantelung der Energie.....	229
8.1.2	Induzierte Emission.....	230
8.1.3	Photo- und Compton-Effekt.....	231
8.1.4	Bremsstrahlung.....	232
8.1.5	Paarbildung.....	232
8.2	Radioaktivität.....	233
8.2.1	Instabile Kerne.....	233
8.2.2	Zerfallsgesetz.....	233
8.2.3	Radioaktive Belastung von Bauwerken.....	234
8.2.4	Radon und radongeschütztes Bauen.....	235
9	Brandschutz.....	237
9.1	Anforderungen.....	237
9.2	Brandverlauf.....	237
9.3	Brandverhalten.....	239
9.3.1	Stahlkonstruktionen.....	239
9.3.2	Betonkonstruktionen.....	240
9.3.3	Holzkonstruktionen.....	241
9.4	Nachweisverfahren.....	241

Literaturverzeichnis	242
Verzeichnis der Formelzeichen und wichtigen Konstanten.....	248
Sachwortverzeichnis.....	261

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. ℓ 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 ℓ .

Beispiel 1.1 Steinhöhe

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

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

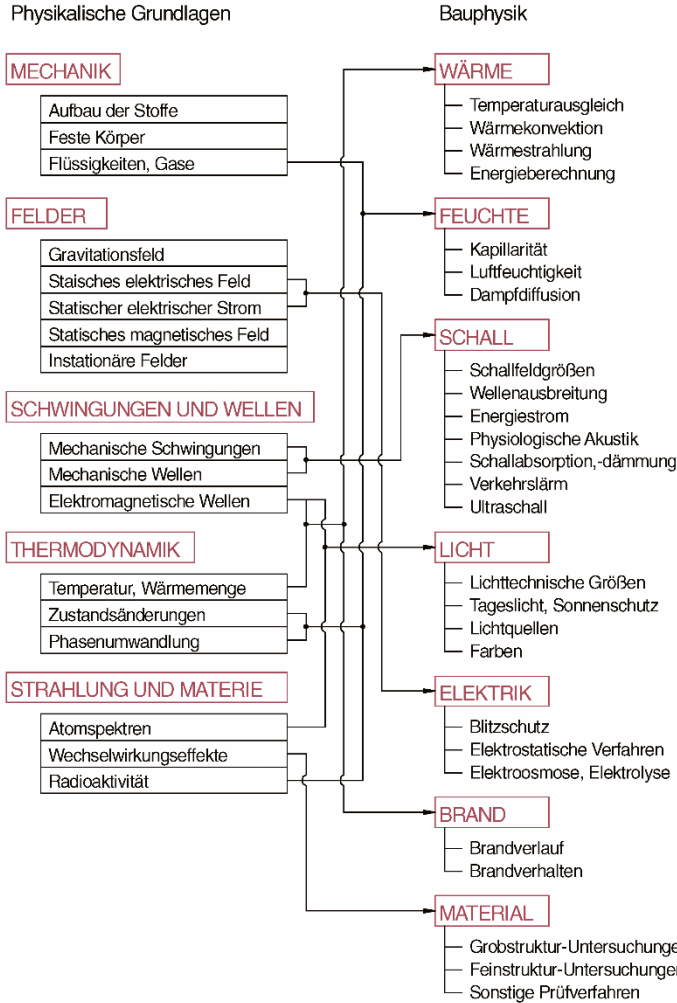


Bild 1.1 Beziehungen Grundlagen ↔ Bauphysik

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	μ	10^{-6}	μm
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	Ω	$\Omega = \text{V A}^{-1} = \text{kgm}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-2}$
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 Planierdrape 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 (Δx_{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 (Δx) 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** Δx_{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 Δl_{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 / 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: $\bar{x} = (63,63 \pm 0,03) \text{ cm}$

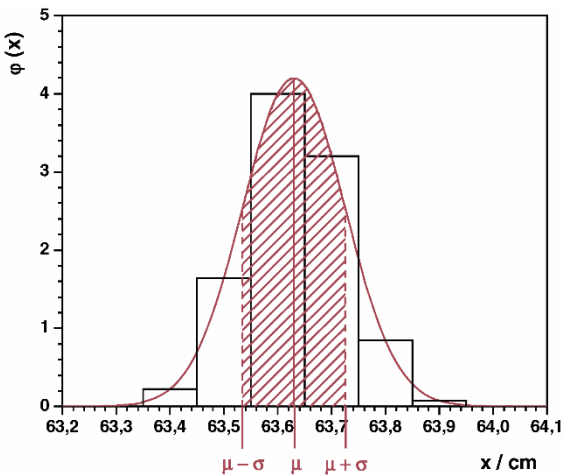


Bild 1.2 Häufigkeitsverteilung einer Messreihe

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 λ 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 θ_1 und θ_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):

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

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	$\Delta a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i^2}{n-2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}$ (1.19)	$\Delta a = \sqrt{\frac{[ww]}{n-2} \cdot \frac{[xx]}{n[xx] - [x]^2}}$
Fehler des Anstieges der Ausgleichsgeraden	$\Delta b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i^2}{n-2} \cdot \frac{n}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}$ (1.20)	$\Delta b = \sqrt{\frac{[ww]}{n-2} \cdot \frac{n}{n[xx] - [x]^2}}$

Die in Tabelle 1.9 angegebenen Beziehungen sind nach der Gauss'schen 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 Δx_i klein gegen die Fehler Δy_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 \mathcal{g} des Glases kann man schreiben $E = E_0 \cdot \mathcal{g}^{2z}$ 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: $\lg E = \lg E_0 + (2 \cdot \lg \mathcal{g}) \cdot z$ $y = a + b \cdot x$ vgl. (1.15). Für die Berechnung des Geradenanstiegs gemäß (1.17) $b = 2 \cdot \lg \mathcal{g}$ 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

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

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

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

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

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

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

Aufgaben

1.1 Geben Sie die mechanische Spannung 1 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 α ? ($1 \text{ Poise} = 1 \text{ gcm}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

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 ρ_{Fl} gemessen und daraus dessen Dichte ρ 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 $\lambda = (0,14 \pm 0,01) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

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

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

(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
$U / \text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	0,291	0,307	0,286	0,289	0,359
Nr.	6	7	8	9	10
$U / \text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	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.

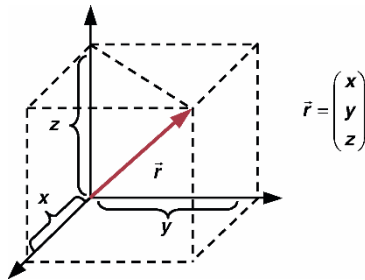


Bild 2.1 Ortskoordinaten x, y, z und dreidimensionaler Ortsvektor \vec{r}

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.

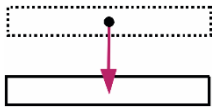
Reale Körper haben eine endliche Ausdehnung mit einer kontinuierlichen Masseverteilung, für die sich ein **Massenmittelpunkt** \vec{r}_s (siehe Abschnitt 2.5.1) definieren lässt.

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**).

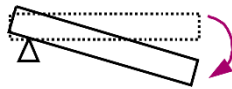
Beispiel 2.1 Bewegungen eines Holzbalkens

Mögliche Bewegungen eines Holzbalkens und zu deren Beschreibung geeignete Modelle



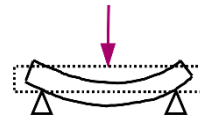
Fällt im freien Fall vom Gerüst:

→ 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
 α -Strahlen 233
 α -Teilchen 233
 α -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
Adiabatexponent 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

β -Strahlen 233
 β^+ -Teilchen 233
 β^- -Teilchen 233
 β -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**
- γ -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
 Infraschall 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 radioaktive 233
 Kerne, natürlich radioaktive 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 215

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
 Spektren, 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
 Strahllichte 216
 Strahllichte, 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 178
 Strom, elektrischer 86
 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