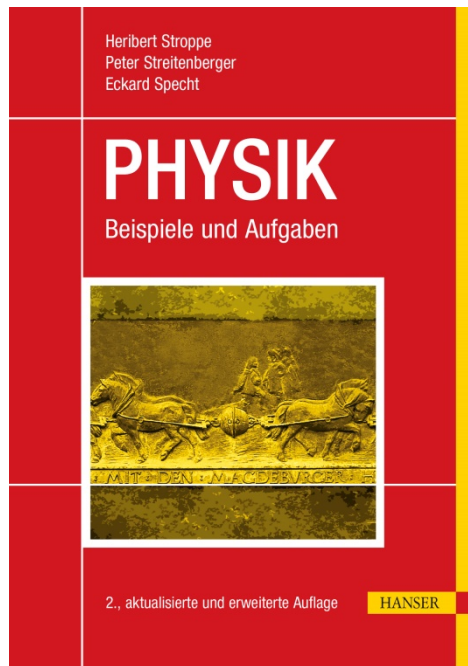


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Physik

von Heribert Stroppe et al.

Print-ISBN: 978-3-446-46406-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-46800-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46406-3>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist ein Arbeits- und Übungsbuch für die physikalische Grundlagenausbildung von Studierenden natur- und ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge an Universitäten, Hoch- und Fachhochschulen. Es schließt in Inhalt, Darstellung und Niveau eng an das im gleichen Verlag erschienene Lehrbuch STROPPE „PHYSIK für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften“ an, ist aber unabhängig von diesem und in Verbindung auch mit jedem anderen Physiklehrbuch verwendbar.

Das Buch unterscheidet sich in mancherlei Hinsicht von anderen Aufgabensammlungen zur Physik: Gegliedert und didaktisch aufbereitet nach Art eines Lehrbuches wird hier der in einer Anfängervorlesung üblicherweise behandelte Stoff aus dem Gesamtgebiet der Physik anhand von gezielt ausgewählten Beispielen (als Aufgaben formuliert) wiederholt, gefestigt und vertieft, wobei jeweils der gesamte Lösungsweg und vollständige Rechengang – vom Ansatz bis zum allgemeinen und zahlenmäßigen Ergebnis – sowie die einschlägigen physikalischen Gesetze ausführlich dargestellt und erläutert werden.

Dabei war es nicht unser Bestreben, möglichst viele (und spektakuläre) Beispiele anzubieten, sondern es wurde vielmehr versucht, in der gebotenen Kürze die jeweils zu einem Abschnitt bzw. Kapitel gehörigen wesentlichen Inhalte möglichst abzudecken und dabei das Grundsätzliche zu betonen. Aus diesem Grunde erscheinen nicht vordergründig nur unmittelbar praxisbezogene Aufgaben und aktuelle Beispiele, sondern auch solche mit im Laufe der Zeit „klassisch“ gewordener, aber das formale Denken fördernder Fragestellung. Zur Selbstkontrolle werden in jedem Abschnitt Zusatzaufgaben gestellt, für die entweder nur das Endergebnis oder – bei etwas schwierigeren Aufgaben – zusätzlich der Lösungsweg angegeben ist.

Der Schwierigkeitsgrad ist bewusst unterschiedlich gewählt; neben sehr einfachen Aufgaben finden sich mitunter recht anspruchsvolle. Erfahrungsgemäß sind die Schwierigkeiten, mit denen Studierende (und somit indirekt auch Dozierende) anfänglich zu kämpfen haben, neben physikalischer vor allem mathematischer Natur. Dies betrifft hauptsächlich die für viele Aufgaben unerlässliche Differenzial- und Integralrechnung, die Vektorrechnung und das Rechnen mit komplexen Zahlen. Zwar hat hier die Schule eine gewisse Vorarbeit geleistet, aber häufig reichen die Kenntnisse und die Übung in der praktischen Handhabung des mathematischen Rüstzeuges nicht aus. Dies war für uns ein wesentlicher Grund, weshalb der Rechengang ausführlich dargestellt wurde. Vor allem aber wird dadurch ein besseres Verständnis und ein tieferer Einblick in den theoretischen Gehalt der physikalischen Gesetzmäßigkeiten erreicht.

Die Studierenden sollen sich aber keinesfalls entmutigen lassen, wenn sie eine Aufgabe nicht oder nur unter Zuhilfenahme der kompletten Lösung meistern können; auch diese muss erst einmal „verarbeitet“ werden, und wenn ihnen das gelingt, ist eigentlich das Anliegen schon erreicht.

Ein Buch mit so viel Formeln und Zahlen ist a priori nie frei von Fehlern. Für Hinweise auf solche – zahlenmäßiger wie grundsätzlicher Art – sowie für Anregungen zur Verbesserung des Werkes sind die Verfasser stets dankbar.

Neu in der vorliegenden 2. Auflage ist die kapitelweise Nummerierung der Aufgaben und die Angabe der Kapitel als Zwischenüberschriften auch im Lösungsteil. Dies dient einer besseren Sichtbarkeit der Themengebiete und höheren Flexibilität bei einer künftigen Erweiterung. So wurde auch eine Reihe neuer Aufgaben, vorwiegend in der Mechanik, aufgenommen. Diese Veränderungen erfolgten ganz im Sinne des Hauptautors, Prof. Dr. HERIBERT STROPPE, der 2017 verstorben ist.

Dem Carl Hanser Verlag München danken wir an dieser Stelle für über drei Jahrzehnte geidlicher Zusammenarbeit.

Magdeburg, Oktober 2020

Die Autoren

## Hinweise

In diesem Buch werden ausschließlich die gesetzlich vorgeschriebenen SI-Einheiten sowie gültige SI-fremde Einheiten verwendet (vgl. die Tabellen auf der hinteren Einband-Innenseite). Die Verwendung von SI-Einheiten bietet den Vorteil, dass alle Größengleichungen auch als Zahlenwertgleichungen benutzt werden können, sofern alle Größen in *kohärenten* SI-Einheiten (welche aus den Basiseinheiten des SI ohne Zahlenfaktoren gebildet sind) in die entsprechenden Beziehungen eingesetzt werden. Auch darf nicht vergessen werden, alle *Vorsätze* von Einheiten, wie z. B. beim km, mA oder GJ, in die entsprechenden dezimalen Vielfachen oder Teile zu „übersetzen“, also in  $10^3$  m,  $10^{-3}$  A und  $10^9$  J (außer beim kg als Basiseinheit). Ist also z. B. die Geschwindigkeit  $v = 90$  km/h gegeben, so ist dafür der Wert  $(90/3,6)$  m/s = 25 m/s einzusetzen, oder anstelle von  $\rho = 7,8$  g/cm<sup>3</sup> für die Dichte von Eisen der Wert  $7,8 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, anstelle von  $p_0 = 1,013\,25$  bar für den Normluftdruck  $1,013\,25 \cdot 10^5$  Pa (Pascal) usw. Wird dies alles beachtet, erhält man auch die Ergebnisgröße automatisch in der ihr zukommenden kohärenten SI-Einheit.

Für die Zahlenrechnungen genügt ein einfacher Taschenrechner mit den wichtigsten mathematischen Funktionen. Sind im Lösungstext gerundete numerische Zwischenergebnisse angegeben, werden zur weiteren Rechnung dennoch die exakten Zahlenwerte im Rahmen der Taschenrechner-Genauigkeit verwendet.

Die Aufgabenstellungen sind so abgefasst, dass sie keine überflüssigen Angaben enthalten. Manchmal sind bestimmte Konstanten wie Gravitationskonstante, Gaskonstante usw. mit angegeben, in der Regel zu Beginn des Abschnittes, in dem sie erstmals auftreten. Fehlen solche Angaben, so bedeutet das nicht, dass diese für die Lösung nicht benötigt werden. Auf der vorderen Einband-Innenseite sind alle vorkommenden Konstanten nochmals zusammengestellt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>KINEMATIK</b>	9
1.1	Geradlinige Bewegung. Geschwindigkeit und Beschleunigung	9
1.2	Fall- und Steigbewegung. Senkrechter Wurf	11
1.3	Überlagerung von Bewegungen. Schiefer Wurf	12
1.4	Kreisbewegung	15
<b>2</b>	<b>DYNAMIK</b>	17
2.1	NEWTONsche Bewegungsgesetze	17
2.2	Reibung	20
2.3	Trägheitskräfte	21
2.4	Inertialsysteme. Relativistische Mechanik	23
2.5	Arbeit, Energie, Leistung	25
2.6	Gravitationsgesetz. KEPLERsche Gesetze	28
2.7	Impuls und Stoß	30
<b>3</b>	<b>STATIK UND DYNAMIK DES STARREN KÖRPERS</b>	33
3.1	Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften. Kräftegleichgewicht	33
3.2	Drehmoment. Statisches Gleichgewicht	35
3.3	Schwerpunkt (Massenmittelpunkt). Gleichgewichtsarten	37
3.4	Massenträgheitsmoment. Rotationsbewegung	38
3.5	Arbeit, Energie und Leistung bei Rotation	41
3.6	Kreiselbewegungen	42
<b>4</b>	<b>ELASTIZITÄT FESTER KÖRPER</b>	42
4.1	Spannung, Dehnung, Scherung. HOOKEsches Gesetz	42
4.2	Dehnungsarbeit. Volumenelastizität	44
<b>5</b>	<b>MECHANIK DER FLÜSSIGKEITEN UND GASE</b>	45
5.1	Druck in Flüssigkeiten und Gasen	45
5.2	Auftrieb	47
5.3	Oberflächenspannung, Oberflächenenergie, Kapillarität	48
5.4	Strömung idealer Fluide	50
5.5	Strömung realer Fluide	52
<b>6</b>	<b>TEMPERATUR UND WÄRME</b>	53
6.1	Temperatur, Thermometrie	53
6.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	54
6.3	Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	55
6.4	Wärme. Spezifische Wärmekapazität. Kalorimetrie	58
<b>7</b>	<b>HAUPTSÄTZE DER THERMODYNAMIK</b>	60
7.1	I. Hauptsatz. Zustandsänderungen der Gase	60
7.2	Kreisprozesse, Energieumwandlungen	62
7.3	II. Hauptsatz. Entropie	65
<b>8</b>	<b>REALE GASE. PHASENUMWANDLUNGEN</b>	68
8.1	VAN-DER-WAALSsche Zustandsgleichung	68
8.2	Phasenumwandlungen	69
8.3	Lösungen	71

---

<b>9</b>	<b>GASKINETIK. AUSGLEICHSVORGÄNGE</b> . . . . .	72
9.1	Kinetische Gastheorie . . . . .	72
9.2	Wärmeübertragung . . . . .	75
9.3	Diffusion . . . . .	77
<b>10</b>	<b>ELEKTRISCHES FELD</b> . . . . .	79
10.1	Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Feldstärke, Potenzial, Spannung . . . . .	79
10.2	Elektrischer Fluss, Flussdichte . . . . .	81
10.3	Elektrisches Feld in Stoffen. Feldenergie . . . . .	82
10.4	Kapazität, Kondensatoren . . . . .	83
<b>11</b>	<b>GLEICHSTROMKREIS</b> . . . . .	86
11.1	Einfacher Stromkreis. OHMSches Gesetz . . . . .	86
11.2	Widerstände und Netzwerke . . . . .	87
11.3	Energie, Wärme und Leistung von Gleichströmen . . . . .	91
11.4	Elektrische Leitungsvorgänge. Elektrolyse . . . . .	92
<b>12</b>	<b>MAGNETISCHES FELD</b> . . . . .	94
12.1	Magnetfeld von Dipolen und Gleichströmen . . . . .	94
12.2	Kraftwirkungen des Magnetfeldes auf Stromleiter und bewegte Ladungsträger . . . . .	97
12.3	Magnetisches Feld in Stoffen . . . . .	99
<b>13</b>	<b>ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION. WECHSELSTROMKREIS</b> . . . . .	102
13.1	Induktionsgesetz. Selbstinduktion . . . . .	102
13.2	Wechselstrom . . . . .	105
<b>14</b>	<b>SCHWINGUNGEN UND WELLEN</b> . . . . .	108
14.1	Mechanische Schwingungen . . . . .	108
14.2	Elektrische Schwingungen . . . . .	114
14.3	Allgemeine Wellenlehre . . . . .	116
14.4	Schallwellen. Akustik . . . . .	120
14.5	Elektromagnetische Wellen . . . . .	122
<b>15</b>	<b>OPTIK</b> . . . . .	124
15.1	Strahlenoptik (Geometrische Optik) . . . . .	124
15.2	Wellenoptik . . . . .	129
15.3	Temperaturstrahlung . . . . .	132
15.4	Photometrie . . . . .	133
<b>16</b>	<b>ATOME UND ATOMKERNE</b> . . . . .	135
16.1	Welle-Teilchen-Dualismus . . . . .	135
16.2	Atomhülle . . . . .	138
16.3	Quantenmechanik . . . . .	140
16.4	Atomkern . . . . .	143
	<b>Lösungen der Aufgaben</b> . . . . .	147
	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	319

# 1 KINEMATIK

## 1.1 Geradlinige Bewegung. Geschwindigkeit und Beschleunigung

### 1.1.1 Mittlere Geschwindigkeit

Ein Fahrzeug legt die erste Hälfte a) seiner Fahrzeit, b) seines Weges mit der Geschwindigkeit 40 km/h zurück, die zweite Hälfte mit 60 km/h. Wie groß ist im Fall a) und im Fall b) die mittlere Geschwindigkeit?

### 1.1.2 Anfangs- und Endgeschwindigkeit

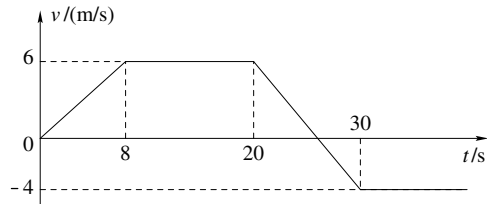
Auf einem Streckenabschnitt von 300 m verdoppelt ein Fahrzeug bei gleichmäßiger Beschleunigung innerhalb von 20 Sekunden seine Geschwindigkeit. Wie groß sind Anfangs- und Endgeschwindigkeit?

### 1.1.3 Gleichmäßig verzögerte Bewegung

Mit welcher Anfangsgeschwindigkeit fährt ein Kraftfahrer, der vom Zeitpunkt des Erkennens eines Hindernisses und anschließender Notbremsung noch insgesamt 35 m zurücklegt, wenn die Reaktionszeit 0,8 s und die Bremsverzögerung  $-6,5 \text{ m/s}^2$  beträgt? Wie lange dauert der Anhaltevorgang?

### 1.1.4 Bewegungsdiagramme

Ein Fahrzeug bewegt sich entsprechend dem im Bild dargestellten Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm. a) Nennen Sie die vom Fahrzeug in den einzelnen Zeitabschnitten ausgeführten Bewegungsarten! b) Berechnen Sie den Ort des Fahrzeugs nach  $t = 30 \text{ s}$  und ermitteln Sie den vom Fahrzeug bis zu diesem Zeitpunkt zurückgelegten Weg! c) Nach welcher Zeit erreicht das Fahrzeug wieder den Ausgangspunkt? d) Skizzieren Sie das Beschleunigung-Zeit- und Ort-Zeit-Diagramm des Fahrzeugs im Zeitintervall von 0 bis 60 s!



### 1.1.5 Kürzeste Fahrzeit

Ein Personenkraftwagen soll aus dem Stand einen 518 m entfernten Zielpunkt in kürzester Zeit erreichen und dort wieder zum Stillstand kommen. Die maximale Startbeschleunigung beträgt  $a_1 = 2,4 \text{ m/s}^2$ , die maximale Bremsverzögerung  $a_2 = -5,0 \text{ m/s}^2$ . a) Welche Höchstgeschwindigkeit  $v_1$  erreicht das Fahrzeug? b) Wie groß sind Beschleunigungsstrecke und Bremsweg? c) Welche Zeit wird für die gesamte Strecke mindestens benötigt? d) Was erhält man, wenn der PKW nur 130 km/h schafft?

### 1.1.6 Beschleunigungsstrecken

Wie groß sind Anfangsgeschwindigkeit und Beschleunigung eines Körpers, der in der sechsten Sekunde 6 m und in der elften Sekunde 8 m zurücklegt?

### 1.1.7 Einholvorgang

Ein Fahrzeug A startet mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_{0A} = 2 \text{ m/s}$  und einer konstanten Beschleunigung  $a$ . 10 Sekunden danach startet vom gleichen Punkt aus ein zweites Fahrzeug B mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_{0B} = 12 \text{ m/s}$  und der gleichen Beschleunigung. a) Wie weit

ist bei einer Beschleunigung von  $a = 0,5 \text{ m/s}^2$  A von B schon entfernt, wenn B startet? b) Welche Zeit  $t_1$  benötigt B bei der gleichen Beschleunigung, um A einzuholen? c) Welche Strecke haben die beiden Fahrzeuge bis dahin zurückgelegt? d) Wie groß darf die Beschleunigung  $a$  der beiden Fahrzeuge maximal sein, damit A von B überhaupt eingeholt werden kann?

### 1.1.8 Weg-Zeit-Gesetz

Die Abhängigkeit des von einem Körper durchlaufenen Weges  $s$  von der Zeit  $t$  ist durch  $s = A + Bt + Ct^2$  gegeben, wobei  $B = 2 \text{ m/s}$  und  $C = 1 \text{ m/s}^2$  ist. Gesucht sind a) die mittlere Geschwindigkeit und b) die mittlere Beschleunigung des Körpers für die erste, zweite und dritte Sekunde seiner Bewegung.

### 1.1.9 Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung (1)

Ein Wagen fährt auf einen mit Pufferfedern versehenen Prellbock auf. Die momentane Bremsverzögerung  $a$  ist der momentanen Stauchung  $x$  der Pufferfedern proportional:  $a = -\beta x$  mit  $\beta = 2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-2}$ . a) Um welchen maximalen Betrag  $x_1$  werden die Federn zusammengedrückt, wenn der Wagen mit der Geschwindigkeit  $v_0 = 16,2 \text{ km/h}$  auf den Prellbock auffährt? b) Wie groß ist die Bremsverzögerung am Ende der Stauchung?

### 1.1.10 Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung (2)

Ein Flugzeug wird nach dem Aufsetzen auf der Landebahn durch Bremsfallschirme abgebremst. Die durch den Luftwiderstand hervorgerufene Bremsverzögerung sei dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional:  $a = -kv^2$  mit  $k = 0,04 \text{ m}^{-1}$ . a) In welcher Zeit  $t_1$  verringert sich die Geschwindigkeit des Flugzeuges von anfänglich  $v_0 = 50 \text{ m/s}$  auf  $v_1 = 1 \text{ m/s}$  (Schrittempo), wenn der Bremsvorgang ausschließlich durch den Luftwiderstand bewirkt wird? b) Welche Strecke  $s_1$  legt es in dieser Zeit zurück?

## ZUSATZAUFGABEN

1.1.11 Eine Minute nach Abfahrt eines Fahrzeuges A mit der konstanten Geschwindigkeit  $v_1 = 54 \text{ km/h}$  startet am gleichen Ort ein zweites Fahrzeug B, welches mit der konstanten Geschwindigkeit  $v_2 = 72 \text{ km/h}$  dem Fahrzeug A hinterherfährt. a) Nach welcher Zeit und b) in welcher Entfernung vom Ausgangsort wird A von B eingeholt?

1.1.12 Ein Projektil wird mit einer Mündungsgeschwindigkeit von  $600 \text{ m/s}$  abgefeuert. Man bestimme die Durchschnittsbeschleunigung im Geschützrohr, wenn dieses eine Länge von  $150 \text{ cm}$  hat!

1.1.13 Die Entfernung zwischen zwei U-Bahn-Stationen beträgt  $1,5 \text{ km}$ . In der ersten Hälfte dieses Weges fährt der Zug gleichmäßig beschleunigt, in der zweiten Hälfte gleichmäßig verzögert, wobei die Verzögerung betragsmäßig gleich der Größe der Beschleunigung ist. Die Maximalgeschwindigkeit des Zuges beträgt  $50 \text{ km/h}$ . Gesucht sind a) die Größe der Beschleunigung bzw. Verzögerung, b) die Dauer der Fahrt zwischen den Stationen.

1.1.14 Ein Fahrzeug habe die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 36 \text{ km/h}$  und legt innerhalb der nächsten 5 Sekunden die Strecke  $67,5 \text{ m}$  zurück. a) Wie groß ist die Beschleunigung? b) Welche Geschwindigkeit hat das Fahrzeug dann?

1.1.15 Ein Personenkraftwagen, der mit  $72 \text{ km/h}$  fährt, bremst vor einer Gefahrenstelle und verringert innerhalb von 5 Sekunden seine Geschwindigkeit gleichmäßig auf  $18 \text{ km/h}$ . Man

bestimme a) die Verzögerung, b) die Strecke, die das Fahrzeug während der fünften Sekunde zurücklegt!

1.1.16 Bevor es den Erdboden verlässt, legt ein Flugzeug auf der Startbahn nach dem Start in 12 s einen Weg von 720 m mit konstanter Beschleunigung zurück. Gesucht sind a) die Beschleunigung, b) die Geschwindigkeit, mit der es den Erdboden verlässt, c) der in der ersten und in der zwölften Sekunde zurückgelegte Weg.

1.1.17 Das Weg-Zeit-Gesetz einer Bewegung ist durch die Gleichung  $s = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$  gegeben, wobei  $C = 0,14 \text{ m/s}^2$  und  $D = 0,01 \text{ m/s}^3$  ist. a) Wie viel Sekunden nach Beginn der Bewegung beträgt die Beschleunigung  $1 \text{ m/s}^2$ ? b) Wie groß ist die mittlere Beschleunigung bis zu diesem Zeitpunkt?

1.1.18 Ein elektrischer Triebwagen fährt mit gleichförmig zunehmender (zeitproportionaler) Beschleunigung an. Nach  $t_1 = 100 \text{ s}$  beträgt diese  $a_1 = 0,6 \text{ m/s}^2$ . Wie groß sind zu diesem Zeitpunkt die Geschwindigkeit des Triebwagens und der zurückgelegte Weg?

1.1.19 a) Man ermittle das Ort-Zeit-Gesetz für die Ortskoordinate  $x(t)$  in Aufgabe 1.1.4. *Hinweis:* Man beachte die Stetigkeit von  $x(t)$  und ihrer ersten Ableitung  $dx(t)/dt$  an den Übergängen von einem Zeitabschnitt zum anderen. b) Wie groß ist die maximale Entfernung vom Ausgangspunkt?

## 1.2 Fall- und Steigbewegung. Senkrechter Wurf

### 1.2.1 Freier Fall (1)

An einer senkrecht hängenden Schnur sind in bestimmten Abständen Kugeln befestigt, wobei sich die unterste Kugel in der Höhe  $h_1$  über dem Boden befindet. Wie groß sind die Abstände benachbarter Kugeln, wenn die Kugeln in gleichen Zeitabständen  $\Delta t$  auf dem Boden auftreffen, nachdem die Schnur losgelassen wurde?

### 1.2.2 Freier Fall (2)

Ein frei fallender Körper passiert zwei 10 m untereinander liegende Messstellen im zeitlichen Abstand von 0,7 s. Aus welcher Höhe über dem oberen Messpunkt wurde der Körper losgelassen, und welche Geschwindigkeit hat er in den beiden Messpunkten? Luftwiderstand wird vernachlässigt.

### 1.2.3 Senkrechter Wurf nach oben

Eine ballistische Rakete wird mit einer Geschwindigkeit von 490 m/s senkrecht nach oben abgefeuert. Man berechne a) die Steigzeit der Rakete bis zur maximal erreichten Höhe, b) die maximale Höhe, c) die Momentangeschwindigkeit nach 40 s und nach 60 s, d) die Zeit, in der die Rakete eine Höhe von 7840 m erreicht! Die Rakete wird von Beginn ihrer Steigbewegung an als Wurfgeschoss betrachtet. Luftwiderstand wird vernachlässigt.

### 1.2.4 Steigbewegung auf der schiefen Ebene

Ein Skispringer fährt nach dem Aufsetzen mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 72 km/h einen Hang hinauf, der eine Steigung von  $30^\circ$  hat. a) Welchen Weg legt er bis zum obersten erreichten Punkt auf der schiefen Ebene zurück? b) Welche Zeit benötigt er dazu? Reibung wird vernachlässigt.



## ZUSATZAUFGABEN

1.2.5 Ein Personenkraftwagen fährt mit 36 km/h gegen eine Mauer. Aus welcher Höhe müsste er fallen, damit der Aufprall genauso stark wird?

1.2.6 Zum Zeitpunkt null wird ein Körper 1 aus einer Höhe von 800 m fallengelassen. Zum gleichen Zeitpunkt wird ein zweiter Körper 2 vom Boden aus mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 200$  m/s nach oben geschossen. Nach welcher Zeit und in welcher Höhe begegnen sich die Körper? Luftreibung wird vernachlässigt.

1.2.7 Aus einem Ballon, der sich in 300 m Höhe befindet, wird Ballast abgeworfen. Nach welcher Zeit erreicht dieser den Erdboden, wenn der Ballon mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s a) sinkt, b) steigt? Luftwiderstand wird vernachlässigt.

1.2.8 Ein Schlitten gleitet reibungsfrei einen Hang hinab, der ein Gefälle von  $30^\circ$  hat. a) Man berechne die Geschwindigkeit des Schlittens, nachdem dieser aus dem Stand eine Strecke von 20 m zurückgelegt hat! b) Wie lange dauert die Fahrt bis dorthin?

1.2.9 Ein von einem Turm mit  $v_0 = 10$  m/s senkrecht nach unten geworfener Gegenstand trifft nach 2 s auf dem Erdboden auf. Gesucht sind die Auftreffgeschwindigkeit  $v$  und die Höhe des Turmes  $h$ .

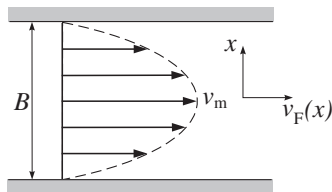
## 1.3 Überlagerung von Bewegungen. Schiefer Wurf

## 1.3.1 Superpositionsprinzip (1)

Ein Boot setzt mit der Geschwindigkeit 2 m/s senkrecht zum Ufer über einen Fluss von 210 m Breite. Die Strömung treibt es dabei 63 m ab. a) Gesucht ist die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses, die Geschwindigkeit des Bootes gegenüber dem Ufer nach Größe und Richtung sowie die Zeit zum Übersetzen. b) Unter welchem Winkel muss gegengesteuert werden, um auf kürzestem Wege das gegenüber liegende Ufer zu erreichen? Wie lange dauert die Überfahrt? c) Unter welchem Winkel muss man steuern, um in der kürzesten Zeit das andere Ufer zu erreichen? Wie lange dauert dann die Überfahrt?

## 1.3.2 Superpositionsprinzip (2)

(Bild) Man berechne den Abtrieb  $s$  eines Bootes beim senkrechten Überqueren eines Flusses der Breite  $B = 210$  m bei einer Geschwindigkeit des Bootes von  $v_B = 2$  m/s! Im Unterschied zu Aufgabe 1.3.1 ist jetzt die Strömungsgeschwindigkeit nicht über die gesamte Flussbreite konstant, sondern fällt nach



$$v_F(x) = v_m \left( 1 - \frac{4x^2}{B^2} \right)$$

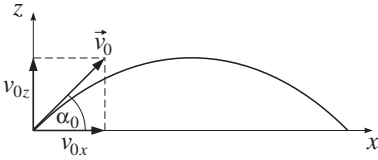
vom Maximalwert  $v_m = 0,6$  m/s in Flussmitte ( $x = 0$ ) auf null am Ufer ( $x = \pm B/2$ ) ab.

## 1.3.3 Horizontaler Wurf

Ein Wasserstrahl, der horizontal aus einer Rohrleitung ausströmt, trifft 2 m unterhalb und 4 m entfernt von der Austrittsöffnung gegen eine senkrechte Wand. a) Wie groß ist die Ausströmgeschwindigkeit aus der Rohröffnung? b) Mit welcher Geschwindigkeit und unter welchem Winkel trifft der Strahl auf die Wand?

### 1.3.4 Gleichung der Wurfparabel

(Bild) Man leite die Gleichung der Bahnkurve  $z = z(x)$  für den schiefen Wurf eines Körpers mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  und dem Abwurfwinkel  $\alpha_0$  her! Man stelle zunächst für jede der beiden Teilbewegungen in horizontaler Richtung ( $x$ ) und vertikaler Richtung ( $z$ ), welche



sich zur resultierenden Bewegung des Körpers überlagern, das zugehörige Weg-Zeit-Gesetz  $x = x(t)$  bzw.  $z = z(t)$  auf und eliminiere daraus die Zeit  $t$ . Die Komponenten von  $v_0$ ,  $v_{0,x}$  und  $v_{0,z}$ , drücke man durch  $v_0$  und  $\alpha_0$  aus.

### 1.3.5 Schiefer Wurf (1)

Eine ballistische Interkontinentalrakete mit einer Reichweite von 8000 km werde aus dieser Entfernung abgefeuert. Sie kann vom Zielpunkt aus erst registriert werden, nachdem sie die halbe Entfernung zurückgelegt hat. (Näherungsweise Behandlung als Wurfgeschoss; Erdkrümmung und Luftwiderstand werden vernachlässigt.) a) Mit welcher Geschwindigkeit fliegt die Rakete, nachdem sie registriert wurde? b) Wie groß ist die verbleibende Vorwarnzeit? c) Mit welcher Geschwindigkeit würde sie ihr Ziel erreichen? d) Wie groß ist die maximale Höhe? Gleichung der Bahnkurve s. Aufgabe 1.3.4 (Lösung).

### 1.3.6 Schiefer Wurf (2)

a) Wie groß muss der Abschusswinkel  $\alpha_0$  eines Wurfgeschosses bei vorgegebener (hinreichend großer) Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  sein, wenn ein bestimmter Zielpunkt mit der horizontalen Entfernung  $x_1$  und der Höhe  $z_1$  erreicht werden soll? Gleichung der Flugbahn s. Aufgabe 1.3.4 (Lösung). – *Anleitung:* Leiten Sie einen allgemeinen Ausdruck für  $\tan \alpha_0$  her. Benutzen Sie dazu die Umformung  $1/\cos^2 \alpha_0 = 1 + \tan^2 \alpha_0$ !

b) Stellen Sie fest, ob mit  $v_0 = 110$  m/s und einem geeigneten Abschusswinkel  $\alpha_0$  ein Ziel mit den Koordinaten  $x_1 = 995$  m,  $z_1 = 450$  m erreicht werden kann. Das Geschütz befindet sich im Koordinatenursprung. – *Anleitung:* Diskutieren Sie das unter a) erhaltene Ergebnis hinsichtlich reeller Lösungen für  $\tan \alpha_0$ !

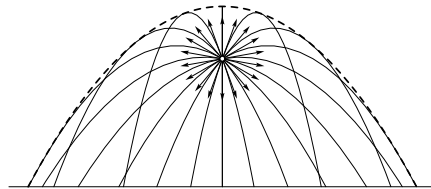
c) Berechnen Sie die erforderliche Mindest-Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses und den zugehörigen Abschusswinkel für die unter b) angegebenen Zielkoordinaten! Wird das Ziel bei dieser Geschosseschwindigkeit vor oder nach Überschreiten des Gipfels der Flugbahn erreicht? Luftwiderstand wird vernachlässigt.

### 1.3.7 Schiefer Wurf (3)

Welche Weite kann eine Kugel, die von einer Kugelstoßerin aus 1,70 m Höhe über dem Erdboden mit der Geschwindigkeit 13,5 m/s fortgeschleudert wird, maximal erreichen? Unter welchem Winkel gegenüber der Horizontalen muss die Kugel gestoßen werden?

### 1.3.8 Hüllkurve

(Bild) Die Bahnkurven der Wasserstrahlen eines Wassersprengers können bei Vernachlässigung der Luftreibung durch Wurfparabeln beschrieben werden, die von einem sich in der Höhe  $h$  über dem Erdboden befindlichen Punkt mit der gleichen Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  radial in alle Richtungen ausgehen. a) Man berechne die sog. Hüllkurve aller Bahnkurven, die die Grenze zwischen dem mit Wasserstrahlen erfüllten und dem trocken bleibenden Raumbereich beschreibt. b) Man ermittle daraus den maximalen



Ausbreitungsradius der Wasserstrahlen am Erdboden und ihre maximale Höhe für  $h = 1,5$  m und  $v_0 = 6$  m/s. c) Bleibt ein punktförmiges Objekt, das sich in einem horizontalen Abstand von 3 m zur Quelle und in einer Höhe von 2,5 m über dem Erdboden befindet, trocken?

### ZUSATZAUFGABEN

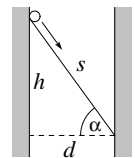
1.3.9 Ein Flugzeug legt eine Entfernung von 300 km in Richtung Osten zurück. Die Windgeschwindigkeit beträgt 20 m/s, die Geschwindigkeit des Flugzeuges relativ zur Luft 600 km/h. Wie lange dauert der Flug, wenn der Wind a) von Osten nach Westen, b) von Süden nach Norden, c) von Westen nach Osten weht?

1.3.10 In einem Gewässer nimmt die Strömungsgeschwindigkeit linear mit der Entfernung  $x$  vom Ufer zu. Bei  $x_1 = 50$  m beträgt sie  $v_1 = 3,6$  km/h. Ein Boot fährt senkrecht zum Ufer mit der Geschwindigkeit  $v_B = 9,0$  km/h. a) Wie groß ist die Abdrift des Bootes in 40 m und in 50 m Entfernung vom Ufer? b) Wie lange dauert jeweils die Fahrt vom Ufer bis dorthin?

1.3.11 Von einem Flugzeug wird ein Gegenstand abgeworfen, welcher nach 14,28 s in einer horizontalen Entfernung von 3,57 km vom Ort des Abwurfs die Erde erreicht. a) Welche Höhe, b) welche Geschwindigkeit hatte das Flugzeug zum Zeitpunkt des Abwurfs? c) Mit welcher Geschwindigkeit und d) unter welchem Winkel gegenüber der Horizontalen trifft der Gegenstand auf der Erde auf? e) Über welchem Punkt der Erde befindet sich dann das Flugzeug? Luftwiderstand wird vernachlässigt.

1.3.12 Von einem 25 m hohen Turm wird ein Stein mit  $v_0 = 15$  m/s unter dem Winkel  $\alpha_0 = 30^\circ$  gegenüber der Horizontalen geworfen. a) Nach welcher Zeit, b) in welcher Entfernung vom Turm, c) mit welcher Geschwindigkeit, d) unter welchem Winkel trifft er auf dem Erdboden auf? Luftwiderstand wird vernachlässigt.

1.3.13 (Bild) Ein Punkt gleitet reibungsfrei auf einer schiefen Ebene variabler Höhe  $h$ , aber fester Breite  $d$  hinab. Mit zunehmender Höhe bzw. Neigung  $\alpha$  der Ebene wird zwar die Beschleunigung größer, der zurückzulegende Weg  $s$  jedoch länger, mit abnehmender Höhe ist es genau umgekehrt. Bei welcher Höhe  $h$  benötigt die Punktmasse die kürzeste Zeit?



1.3.14 Ein Hochspringer, dessen Schwerpunkt 1,10 m über dem Boden liegt und der eine Absprunggeschwindigkeit von 4,3 m/s schafft, will mit einem Rollsprung 1,80 m überspringen. a) Wie weit vor der Latte und b) unter welchem Winkel gegenüber der Horizontalen muss er abspringen?

1.3.15 a) Man ermittle für die Kurvenschar der Wurfparabeln  $z = z(x, \alpha)$  der Aufgabe 1.3.4 (mit dem Abwurfwinkel  $\alpha$  als Scharparameter zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  und konstanter Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ ) die maximale Wurfhöhe  $z_m$  in Abhängigkeit von ihrer Lage  $x = x_m$  und stelle den erhaltenen Zusammenhang  $z_m = z_m(x)$  gemeinsam mit  $z = z(x, \alpha)$  für ausgewählte  $\alpha$  graphisch dar. b) Stellen Sie fest, ob ein Körper mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 100$  m/s ein Ziel mit den Koordinaten  $x_1 = 400$  m,  $z_1 = 300$  m erreichen kann und, wenn ja, ob das Ziel im aufsteigenden Ast der Flugbahn getroffen wird.

## 1.4 Kreisbewegung

### 1.4.1 Grad- und Bogenmaß

Der an einem Fadenpendel der Länge 1 m hängende kleine Pendelkörper beschreibt bei seinen Schwingungen einen 20 cm langen Bogen. Man gebe den vom Faden überstrichenen Winkel  $\varphi$  im Bogen- und im Gradmaß an!

### 1.4.2 Drehzahl und Winkelgeschwindigkeit

Um die Geschwindigkeit  $v$  eines Geschosses zu bestimmen, wird dieses durch zwei Pappscheiben geschossen, die im Abstand von 50 cm auf gemeinsamer Welle mit 1600 Umdrehungen je Minute rotieren. Das Geschoss, das parallel zur Drehachse fliegt, durchschlägt beide Scheiben, wobei das Loch in der zweiten Scheibe um den Drehwinkel  $15^\circ$  gegenüber dem Loch in der ersten Scheibe versetzt ist. Wie groß ist  $v$ ?

### 1.4.3 Umlaufzeit

Nach jeweils welcher Zeit decken sich Minuten- und Stundenzeiger der Uhr?

### 1.4.4 Drehzahl und Umfangsgeschwindigkeit

Zwei auf gemeinsamer Welle einer Transmission sitzende, fest miteinander verbundene Riemenscheiben unterscheiden sich in ihrem Durchmesser um  $\Delta D = 15$  cm. Die Geschwindigkeit des Treibriemens auf der großen Scheibe beträgt  $v_1 = 8$  m/s, die Drehzahl ist  $n = 382$  min<sup>-1</sup>. Wie groß ist die Geschwindigkeit  $v_2$  des Riemens auf der kleineren Scheibe, und welche Durchmesser haben die Scheiben?

### 1.4.5 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor

a) Für die gleichförmige Kreisbewegung berechne man in allgemeiner Form die  $x$ - und  $y$ -Komponente des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektors in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  sowie den Betrag beider Vektoren! b) Der Radius der Kreisbahn sei  $r = 1$  m und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 1$  rad/s. Geben Sie die Komponenten beider Vektoren für die Zeitpunkte  $t = 0$  (entsprechend  $\varphi = 0$ ),  $T/4$ ,  $T/2$  und  $3T/4$  ( $T$  Umlaufzeit) zahlenmäßig an, und treffen Sie eine allgemeine Aussage über die Richtung der Vektoren!

### 1.4.6 Radial- und Tangentialbeschleunigung

Ein Fahrzeug fährt mit der Geschwindigkeit  $v_0 = 30$  km/h in eine 90-Grad-Kurve vom Radius  $R = 50$  m ein und beschleunigt beim Durchfahren der Kurve gleichmäßig. Die größte Radialbeschleunigung ist  $a_r = 3,86$  m/s<sup>2</sup>. a) Mit welcher Geschwindigkeit  $v_1$  verlässt es die Kurve? b) Geben Sie Größe und Richtung der maximalen Beschleunigung  $a$  an!

### 1.4.7 Winkelbeschleunigung

Ein mit der Drehzahl 3600 min<sup>-1</sup> laufender Elektromotor kommt nach dem Abschalten innerhalb von 10 s zum Stillstand. a) Wie groß ist die Winkelbeschleunigung beim Auslaufen? b) Wie viel Umdrehungen führt der Motor nach dem Abschalten noch aus?

### 1.4.8 Winkel-, Radial- und Tangentialbeschleunigung

Eine Zentrifuge soll aus dem Stillstand bei der Winkelbeschleunigung  $\alpha = 31,6$  rad/s<sup>2</sup> eine solche Drehzahl erreichen, dass auf ein 10 cm von der Drehachse entferntes Teilchen eine Zentrifugalbeschleunigung vom 1000-fachen der Fallbeschleunigung  $g$  wirkt. a) Wie groß ist die erforderliche Drehzahl? b) Wie groß sind dann Bahngeschwindigkeit und Bahnbeschleunigung des Teilchens? c) Wie lange dauert der Beschleunigungsvorgang? d) Wie viel Umdrehungen sind bis zum Erreichen der geforderten Drehzahl notwendig?

#### 1.4.9 Drehwinkel-Zeit-Gesetz (1)

Ein Teilchen rotiert auf einer Kreisbahn vom Radius  $r = 0,1$  m. Die Abhängigkeit des Drehwinkels von der Zeit ist durch die Gleichung  $\varphi = A + Bt + Ct^3$  gegeben, wobei  $B = 2$  rad/s und  $C = 1$  rad/s<sup>3</sup> ist. Gesucht sind für den Zeitpunkt  $t = 2$  s nach Beginn der Bewegung a) die Winkelgeschwindigkeit, b) die Bahngeschwindigkeit, c) die Winkelbeschleunigung, d) die Bahnbeschleunigung (Tangentialbeschleunigung), e) die Radialbeschleunigung.

#### 1.4.10 Drehwinkel-Zeit-Gesetz (2)

Ein Punkt bewegt sich mit der konstanten Geschwindigkeit  $v = 0,2$  m/s auf einer Kugel entlang eines Meridians vom Nordpol zum Südpol. Dabei wächst der Kugelradius gemäß  $r(t) = ut + r_0$  mit  $u = 1$  m/s; zum Zeitpunkt  $t = 0$ , wenn der Punkt am Nordpol startet, beträgt er  $r_0 = 1$  m. a) Nach welcher Zeit  $t_1$  erreicht der Punkt den Südpol? b) Zur Zeit  $t = 0$  startet auch am Südpol ein Punkt, der sich mit der gleichen Geschwindigkeit  $v$  auf demselben Meridian in Richtung Nordpol bewegt. Nach welcher Zeit  $t_2$  begegnen sich beide Punkte?

### ZUSATZAUFGABEN

1.4.11 Welchen Wert haben die Winkel a) 1 rad und 1,571 rad im Gradmaß, b) 30°, 45° und 60° im Bogenmaß (ausgedrückt in Teilen von  $\pi$ )?

1.4.12 Ein Rad mit dem Radius 0,5 m macht 300 Umdrehungen je Minute. Man bestimme a) die Winkelgeschwindigkeit, b) die Umfangsgeschwindigkeit!

1.4.13 Die Pedalen eines Fahrrades werden mit einer Drehzahl von  $n = 120$  min<sup>-1</sup> getreten. a) Welche Winkelgeschwindigkeit ergibt sich für das Hinterrad, wenn das Kettenrad 44 und der Zahnkranz 20 Zähne hat? b) Wie viel Kilometer legt der Fahrer in einer Stunde zurück? Der Raddurchmesser beträgt 70 cm.

1.4.14 Mit welcher Geschwindigkeit muss ein Flugzeug über dem Äquator von Ost nach West fliegen, wenn den Passagieren die Sonne am Himmel als feststehend erscheinen soll? Erdradius  $R = 6378$  km.

1.4.15 Der Transmissionsriemen auf einem Rad vom Durchmesser 1,2 m hat 5 s nach dem Anlaufen eine Geschwindigkeit von 30 m/s. Wie viel Umdrehungen hat das Rad in dieser Zeit ausgeführt?

1.4.16 Innerhalb von 5 Sekunden, während 120 Umdrehungen stattfinden, wächst die Drehzahl eines Rotors gleichmäßig auf das Doppelte ihres anfänglichen Wertes. Wie groß ist die Drehzahl zu Beginn?

1.4.17 Ein Punkt läuft auf einer Kreisbahn vom Radius  $R = 50$  cm mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2$  rad/s um. Man berechne die  $x$ - und  $y$ -Komponente sowie den Betrag des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektors für einen Drehwinkel gegenüber der  $x$ -Achse von 60°!

## 2 DYNAMIK

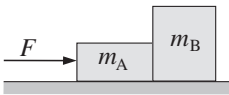
### 2.1 Newtonsche Bewegungsgesetze

#### 2.1.1 1. newtonsches Axiom

Wie groß ist die an einem Körper der Masse  $m$  angreifende resultierende Kraft, wenn sich dieser mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  auf gerader Bahn bewegt?

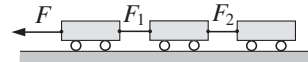
#### 2.1.2 2. und 3. newtonsches Axiom

(Bild) Auf einer reibungsfreien Unterlage liegen dicht aneinander zwei Blöcke A und B mit den Massen  $m_A$  und  $m_B$ . Auf Block A wirkt eine Kraft  $F$ , die über ihn auf Block B übertragen wird. Nach dem 3. NEWTONschen Axiom übt Block B eine gleich große, aber entgegengerichtete Kraft  $-F$  auf Block A aus. Die Gesamtkraft auf A wäre also  $F_{\text{ges}} = F + (-F) = 0$ , und nach dem 2. NEWTONschen Axiom wäre demzufolge auch seine Beschleunigung  $a = F_{\text{ges}}/m_A = 0$ . Hieraus wäre zu schließen, dass Block A nicht beschleunigt werden kann, unabhängig davon, wie groß  $F$  auch sei. Worin liegt der Fehler? Wie groß ist die Beschleunigung wirklich, und wie groß ist die Gesamtkraft auf Block A und auf Block B, wenn  $F = 10\text{ N}$ ,  $m_A = 2\text{ kg}$  und  $m_B = 3\text{ kg}$ ?



#### 2.1.3 Grundgesetz der Dynamik (2. newtonsches Axiom)

(Bild) Die Lok eines aus insgesamt drei Wagen von je  $m = 15\text{ t}$  Masse bestehenden Güterzuges entwickelt gegenüber den Schienen eine Antriebskraft von  $F = 45\text{ kN}$ . Die Reibung wirkt auf jeden Wagen als Bremskraft von  $F_R = 700\text{ N}$ . Wie groß ist a) die Beschleunigung des Zuges, b) die Zugkraft  $F_1$  zwischen den beiden ersten Wagen, c) die Zugkraft  $F_2$  zwischen dem zweiten und dem dritten Wagen?



#### 2.1.4 Beschleunigung gegen die Schwerkraft

Welche Kraft muss auf eine Masse von  $2\text{ kg}$  senkrecht nach oben ausgeübt werden, damit diese a) mit einer Beschleunigung von (nur)  $3\text{ m/s}^2$  fällt, b) sich mit der Beschleunigung  $3\text{ m/s}^2$  nach oben bewegt?

#### 2.1.5 Bremskraft

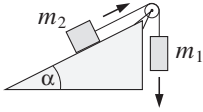
Ein Truck mit einer Masse von  $20\text{ t}$  und einer Geschwindigkeit von  $54\text{ km/h}$  wird mit  $0,3\text{ m/s}^2$  Verzögerung gleichmäßig bis zum Stillstand abgebremst. a) Wie groß ist die Bremskraft zwischen Truck und Fahrbahn? b) Nach welcher Zeit bleibt der Truck stehen? c) Welchen Weg legt er bis zum Stillstand zurück? Reibungswiderstände werden vernachlässigt.

#### 2.1.6 Druckkraft

Ein aus einem Rohr horizontal austretender Wasserstrahl trifft auf eine unmittelbar hinter der Austrittsöffnung senkrecht zum Strahl aufgestellte ebene Druckplatte und übt auf diese eine Kraft von  $30\text{ N}$  aus. Die Wassermenge, die je Sekunde aus dem Rohr ausströmt, wird zu  $1,5\text{ l}$  ermittelt. Man bestimme die Ausströmgeschwindigkeit des Strahls! Dichte von Wasser  $\rho = 10^3\text{ kg/m}^3$ .

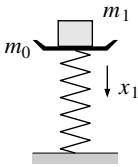
### 2.1.7 Bewegung einer Masse auf schiefer Ebene

(Bild) Bei der Anordnung zweier über Seil und Rolle miteinander verbundener Massen  $m_1 = 2 \text{ kg}$  und  $m_2 = 3 \text{ kg}$  wird eine Abwärtsbewegung von  $m_1$  beobachtet. Der Neigungswinkel der schiefen Ebene beträgt  $\alpha = 30^\circ$ . a) Mit welcher Beschleunigung bewegen sich die Massen? Wie müssen b)  $m_1$  verkleinert, c)  $\alpha$  vergrößert werden, damit sich das System mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, nachdem es einmal in Bewegung gekommen ist? Massen von Rolle und Seil sowie Reibung werden vernachlässigt. Vgl. Aufgaben 2.2.9 und 2.3.9.



### 2.1.8 Federkraft

(Bild) Wird auf die leere Schale einer Tellerfederwaage (Masse der Waagschale  $m_0 = 200 \text{ g}$ ) ein Massenstück  $m_1 = 5 \text{ kg}$  gelegt, so erfährt sie eine Auslenkung aus der Ruhelage um  $x_1 = 100 \text{ mm}$ . Nach Herunternehmen von  $m_1$  und Auflegen einer zweiten Masse  $m_2 = 400 \text{ g}$  beträgt die Auslenkung  $x_2$ . Um welche Strecke  $\Delta x$  darf man die Schale dann noch niederdrücken, wenn  $m_2$  nach dem Loslassen während der anschließenden Schwingung im oberen Umkehrpunkt gerade noch nicht von der Waagschale abheben soll?



### 2.1.9 Beschleunigung bei konstanter Kraft und veränderlicher Masse

Ein Tankfahrzeug mit der Anfangsmasse  $m_0 = 10 \text{ t}$ , welches (nach Abzug aller Reibungs- und Fahrwiderstände) durch eine konstante Kraft  $F_0 = 500 \text{ N}$  angetrieben wird und bei der Geschwindigkeit null startet, verliert stetig an Flüssigkeit (Loch im Boden des Tankwagens). Der zeitlich konstante und mit Beginn der Bewegung einsetzende Masseverlust beträgt  $\mu = 15 \text{ kg/s}$ . a) Welche Geschwindigkeit hat das Fahrzeug nach  $t_1 = 5 \text{ min}$  Fahrt? b) Welche Geschwindigkeit wäre ohne Masseverlust erreicht worden?

### 2.1.10 Bewegung mit geschwindigkeitsproportionaler Bremskraft

Man stelle die Bewegungsgleichung für ein Sandkorn auf, welches in Wasser unter dem Einfluss der Schwerkraft, der Auftriebskraft und einer zur Geschwindigkeit  $v$  proportionalen Reibungskraft  $F_R = 6\pi\eta Rv$  zu Boden sinkt! Dabei ist  $\eta = 0,001 \text{ N s/m}^2$  die dynamische Viskosität des Wassers. Der Radius der kugelförmig angenommenen Sandkörner sei  $R = 100 \mu\text{m}$ , ihre Dichte  $\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; Dichte von Wasser  $\rho_W = 10^3 \text{ kg/m}^3$ . a) Wie groß ist die sich einstellende konstante (maximale) Sinkgeschwindigkeit  $v_S$ ? b) Welche Abhängigkeit besteht zwischen der momentanen Sinkgeschwindigkeit  $v$  und der Zeit  $t$ ? Nach welcher Zeit wird  $v_S$  praktisch erreicht? c) Wie groß ist die anfängliche Sinkbeschleunigung?

### 2.1.11 Harmonische Schwingung

Wie viel Schwingungen je Sekunde führt die leere Tellerfederwaage von Aufgabe 2.1.8 aus, wenn sie niedergedrückt und dann wieder losgelassen wird?

## ZUSATZAUFGABEN

2.1.12 Ein D-Zug (Masse  $400 \text{ t}$ ) fährt mit einer Geschwindigkeit von  $108 \text{ km/h}$ . Er wird auf einer Strecke von  $360 \text{ m}$  mit konstanter Verzögerung zum Stehen gebracht. Welche Bremskraft zwischen Zug und Schiene tritt auf?

2.1.13 (Bild) Drei dicht aneinanderliegende gleiche Blöcke A, B und C (Masse  $m$ ) werden längs einer reibungsfreien Unterlage durch eine Kraft  $F$ , die am Block A angreift, fortgeschoben.

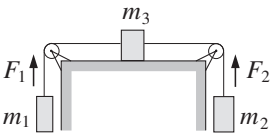


ben. a) Welche Gesamtkraft wirkt auf Block A in vertikaler Richtung? b) Welche Gesamtkraft wirkt auf Block A längs der Unterlage? c) Wie groß ist die Beschleunigung von Block C? d) Wie groß ist die Kraft von Block A auf Block B?

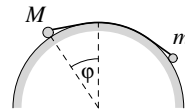


2.1.14 Welche Zeitspanne muss ein Wagen von 12 t Masse aus dem Stand auf horizontaler Strecke angeschoben werden, damit er bei einer Schubkraft von 1,5 kN eine Geschwindigkeit von 7,2 km/h erreicht, a) ohne Berücksichtigung von Reibung, b) bei einer Fahrwiderstandszahl  $\mu_F = 0,01$  (= Reibungskraft/Normalkraft auf die Schiene)?

2.1.15 (Bild) Auf die drei Massen, von denen  $m_3$  auf einer waagrechten Ebene reibungsfrei gleiten kann, wirken zum einen die Gewichtskräfte von  $m_1$  und  $m_2$ , zum anderen (in entgegengesetzter Richtung) die Seilkräfte  $F_1$  und  $F_2$ . Es sei  $m_2 \neq m_1$ . a) Wie groß sind die an  $m_1$  und an  $m_2$  angreifenden Kräfte? b) Wie groß ist die auf  $m_3$  wirkende Kraft, wenn diese mit der Hand festgehalten wird? Wie groß ist in diesem Falle  $F_1$ ? c) Wie groß ist  $F_1$ , wenn  $m_1$  festgehalten wird? d) Was ergibt sich für  $F_1$  und  $F_2$ , wenn  $m_1 = m_2 = m$ ? Wie groß ist dann die Kraft auf  $m_3$ ? e) Es sei  $m_1 = 3$  kg,  $m_2 = 5$  kg und  $m_3 = 2$  kg. Wie groß ist die Beschleunigung der Massen, wenn sie sich frei bewegen können?



2.1.16 (Bild) Zwei Punktmassen  $M$  und  $m$  sind durch ein dünnes, nicht dehnbares Seil miteinander verbunden, welches über eine zylindrische Oberfläche gelegt ist. Man ermittle den Winkel  $\varphi$  zwischen dem Radius zu  $M$  und der Senkrechten für den Fall, dass sich beide Massen in Ruhe befinden und die Länge des Seiles ein Viertel des Zylinderumfangs beträgt. Reibung wird vernachlässigt.



2.1.17 Wasserkraftwerke nutzen die potenzielle Energie des Wassers zum Antrieb ihrer Turbinen. Man berechne die auf die Schaufeln des Turbinenlaufrades ausgeübte Kraft, wenn durch das Fallrohr mit einem Höhenunterschied von 18 m je Sekunde  $50 \text{ m}^3$  Wasser zur Turbine gelangen! Umlenkverluste werden vernachlässigt. Dichte von Wasser:  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

2.1.18 Bei dem historischen Versuch OTTO VON GUERICQUES (1659) mit den „Magdeburger Halbkugeln“ zum Nachweis des atmosphärischen Luftdruckes wurden zwei Halbkugelschalen luftdicht aneinander gelegt und nahezu luftleer gepumpt, wodurch diese mit einer Kraft von 12 kN aneinander gepresst wurden. Durch die Zugkraft von zwei Gruppen von Pferden, je eine Gruppe an jeder Halbkugel, sollten sie voneinander getrennt werden. Wie viel Pferde in jeder Gruppe werden dazu benötigt, wenn jedes Pferd eine durchschnittliche Zugkraft von 1,5 kN entwickelt und alle Pferde gleichzeitig anziehen?

2.1.19 Ein zylindrischer Körper (Masse  $m = 200$  g, Durchmesser  $d = 10$  cm) schwimmt auf einer Flüssigkeit. Taucht man ihn tiefer in die Flüssigkeit ein und lässt ihn dann wieder los, führt er je Sekunde 3 Schwingungen um seine Schwimmgleichgewichtslage aus. Wie groß ist die Dichte  $\rho$  der Flüssigkeit?



# Sachwortverzeichnis

- Abbildung, optische
  - durch Linsen, 126–128
  - durch Spiegel, 125–127
- Abbildungsgleichung, 290–292
- Abklingkonstante, 110, 113, 114
- Abkühlungskurve, 69
- Ablenkung von Ladungsträgern, 80, 97–99
- Abschirmfaktor, 316
- Abschirmkonstante, 139
- absolute Temperatur, 53, 54
- Absorptionsgrad, 132, 137
- Additionstheorem der Geschwindigkeiten (relativistisches), 24, 25
- Adiabatexponent, 62, 75
- Admittanz, 267
- Ähnlichkeit, hydrodynamische, 52, 53
- Akkumulator, 86, 87, 91, 92
- Aktivität, spezifische Aktivität, 144–146
- Alkalispektrum, 305
- $\alpha$ -Umwandlung, 143, 145
- Altersbestimmung (radioaktive), 144
- angeregtes Kernniveau, 138
- aperiodischer Grenzfall, 110, 113
- Apertur, numerische, 130, 132, 300
- Aperturwinkel, 295
- Äquivalenzdosis(leistung), 145, 146
- Arbeit
  - im elektrischen Feld, 80–82, 84
  - im magnetischen Feld, 95, 97
  - mechanische, 27, 28, 41, 44, 45, 47, 49, 52
- ARCHIMEDISches Prinzip, s. Auftrieb(skraft)
- ARRHENIUS-Beziehung, 77
- Atmosphärendruck, s. Luftdruck
- Atommodell, 39, 96, 138, 139
- ATWOODSche Fallmaschine, 22
- Aufenthaltswahrscheinlichkeit, s. Wahrscheinlichkeit
- Auflagerkraft, 33, 36, 38, 44
- Auflösungsvermögen
  - eines Elektronenmikroskops, 136
  - eines Fernrohres, 130
  - eines Gitterspektrometers, 130
  - eines Mikroskops, 130, 132
  - eines Raster-Tunnel-Mikroskops, 143
- Auftrieb(skraft), 18, 47, 55
- Auge, 128, 130
- Ausdehnungsarbeit, 26, 61
- Ausdehnungskoeffizient, 54, 55
- Ausfluss(ström)geschwindigkeit, 50, 51, 56
- Austrittsarbeit, 135, 143
- Austrittsrate (eines Gases), 73
- AVOGADRO-Konstante, 72
- Bahngeschwindigkeit, 15, 16, 28–30
- Bahnkurve, 12, 13, 25, 29, 153, 163, 275
- Balkenbiegung, 43, 44
- ballistischer Flug, 29
- ballistisches Pendel, 31
- Ballon(aufstieg), 12, 46, 47, 56
- BALMER-Serie, 136, 304
- barometrische Höhenformel, 46, 71, 78, 236
- Beleuchtungsstärke, 133, 134
- Benetzung, 48, 49
- BERNOULLISche Gleichung, 56
- Beschleunigung, 9–11, 17, 18, 26
- Beschleunigungsspannung, 80, 97, 136
- BESSELSches Verfahren, 126
- Bestrahlungsstärke, 132
- $\beta$ -Stabilität, Linie der, 313
- $\beta$ -Umwandlung, 143, 145
- BETHE-WEIZSÄCKER-Formel, 143, 145
- Beugung
  - am Spalt, 130
  - am Strichgitter, 130–132
  - an einer kreisförmigen Öffnung, 130, 132
  - von Elektronen am Doppelspalt, 140
- Beweglichkeit von Ladungsträgern, 92, 94
- Bewegungsdiagramm, 9
- Bewegungsgleichung, 17, 18
  - einer Schwingung, 18, 108, 110
  - mit Reibung, 18
  - relativistische, 24
- Biegung (elastische), s. Balkenbiegung
- Bimetallstreifen, 54
- Bindungsenergie, 143, 145
- BIOT-SAVARTSches Gesetz, 95
- Blauverschiebung von Spektrallinien, 119
- Blindleistung, 107

- Blindleistungskompensation, 107  
 Blindstromkompensation, 114  
 Blindwiderstand, s. Widerstand, elektrischer  
 BOHRsches Atommodell, 39, 79, 96, 138, 139, 142, 300  
 BOLTZMANN-Konstante, 72  
 BOLTZMANN-Statistik, 137  
 BOLTZMANN-Verteilung, 73  
 BOYLE-MARIOTTESches Gesetz, 46, 47, 55, 56  
 BRAGGsche Reflexion, 136, 137  
 Brechung, 125  
 – elektronenoptische, 136  
 – von Licht, 124, 125, 129  
 – von Materiewellen, 136  
 – von elektrischen Feldlinien, 83  
 Bremsstrahlung, 138  
 BREWSTERScher Winkel, 129  
 Brille, 126, 128  
 BROWNsche Molekularbewegung, 73  
 Brückenabgleich, 88, 106  
 Brutreaktion, 144  
 BUNSENSches Ausströmungsgesetz, 51, 56
- CARNOT-Prozess, 62–65, 67, 71  
 CELSIUS-Temperatur, 53, 54  
 charakteristische Gleichung, 271  
 CLAUDIUS-CLAPEYRONsche Gleichung, 69–71  
 CLEMÉNT-DESORMES-Methode, 62  
 COMPTON-Effekt, 135, 137  
 CORIOLIS-Kraft, 22, 23  
 COULOMB-Gesetz, 79, 81, 237  
 CURZON-AHLBORNscher Wirkungsgrad, 62  
 $c_w$ -Wert, s. Strömungswiderstand
- Dampfdruck(kurve), 46, 68, 69, 71  
 Dampfdruckpunkt, 53  
 Dampftabelle, 70  
 Dämpfungskonstante, 110  
 DANIELL-Element, 89  
 DE-BROGLIE-Beziehung, 300  
 DE-BROGLIE-Wellenlänge, 136–138  
 Dehnung, elastische, 26, 43–45, 54, 55  
 deutliche Sehweite, 126–128  
 Dichte, 19, 45–47, 55, 56, 68, 73  
 Dielektrikum im elektrischen Feld, 82–85, 115, 122, 123  
 DIESEL-Prozess, 64  
 Diffusion(sgleichung), 78  
 – instationäre, 77, 78  
 – stationäre, 77  
 Dipolmoment  
 – elektrisches, 79  
 – magnetisches, 94–96, 101  
 Dispersion, 117, 119, 138  
 Doppelleitung, 88, 91, 95, 98, 105, 122  
 Doppelspalt, 140, 142  
 Doppelsternsystem, 28
- DOPPLER-Effekt, 117–119  
 Dosis (Äquivalentdosis), 145, 146  
 Drehimpuls(erhaltung), 28, 39–41  
 Drehmoment, 39, 58, 95  
 – eines Stromleiters im Magnetfeld, 97, 99  
 – eines elektrischen Dipols, 79  
 – eines magnetischen Dipols, 94, 96  
 Drehschwingung, s. Schwingung(en)  
 Drehspulgalvanometer, 88, 89, 99  
 Drehwinkel-Zeit-Gesetz, 15, 16  
 Drehzahl, 15, 16, 39, 41, 42  
 Dreieck-Schaltung von Widerständen, 90  
 Driftdiffusion, 78  
 Driftgeschwindigkeit, 78, 92  
 Dublettaufspaltung, 130, 132, 139, 306  
 DULONG-PETITSche Regel, 301  
 Durchflutung  
 – elektrische, 81  
 – magnetische, 95, 102  
 Durchflutungsgesetz, 95, 96  
 Durchschlagspannung, 84  
 dynamischer Druck, s. Staudruck
- Echolot, 121  
 Effektivwert  
 – der elektrischen und magnetischen Feldstärke, 123, 124  
 – von Wechselspannungen und -strömen, 105, 107  
 Eigenfrequenz, 108–115, 119, 122, 137  
 Eigenfunktion(en), 140, 141, 143  
 Eigenzeit, 23, 25  
 EINSTEINsche Gleichung, 135  
 Eisenkern (magnetischer), 100–104, 115  
 Eispunkt, 53, 90  
 Elastizitätsmodul, 44, 45  
 elektrisches Feld  
 – atmosphärisches, 81  
 – einer Punktladung, 79, 80  
 – eines geladenen Drahtes, 81, 82  
 – in Stoffen (Dielektrika), 82, 83  
 – zwischen zwei Punktladungen, 81  
 elektrochemisches Äquivalent, 93  
 Elektrolyse, 93, 94  
 Elektromagnet, 100, 102  
 Elektronenbeugung, 136, 137  
 Elektronendichte, 92, 93  
 Elektronenleitung, 92, 93  
 Elektronenmikroskop, 136  
 Elektronenstrahlröhre, 97  
 Elementarladung, 79, 80  
 Emissionsgrad, 132, 133  
 Energie(erhaltung), 27, 28, 31, 32, 41, 42, 50  
 Energiedichte  
 – des elektrischen Feldes, 82, 83  
 – des magnetischen Feldes, 95, 100, 103  
 – elektromagnetischer Wellen, 124  
 – von Schallwellen, 122

- Energieeigenwert(e), 140, 141, 311  
 Energieniveau(s), 140–143, 306  
 Energiestromdichte, s. Strahlungsintensität  
 Entmagnetisierungsfaktor, 102  
 Entmischung, 66, 75  
 Entropie(änderung), 67, 68, 74  
 Entropiezunahme, 65–67  
 Erdmagnetfeld, 94, 95, 104  
 Erregerschwingung, s. Schwingung(en)  
 Ersatzwiderstand, 90  
 Erwartungswert, 140, 142, 143  
 erzwungene Schwingung, s. Schwingung(en)  
 Exergie, 63, 65–67  
 Expansionsarbeit, 60, 62
- Fahrwiderstand, 19, 20, 26, 27  
 Fallbeschleunigung, 15, 28, 30, 32  
 FARADAYsche Gesetze, 93  
 Federkonstante, 18, 19, 26, 27, 31, 44, 108, 109  
 Federkraft, 18, 26, 27  
 Feldenergie  
 – elektrische, 80, 82, 83, 85, 91  
 – magnetische, 95, 97, 100, 101, 103  
 Feldkraft  
 – elektrische, 79–81  
 – magnetische, 94, 95  
 Feldstärke  
 – des elektrischen Feldes, 79–83  
 – des magnetischen Feldes, 94–96, 99, 100  
 FERMATsches Prinzip, 124  
 FERMI-Energie, 143  
 Fettfleckphotometer, 134  
 FICKsches Gesetz, 235  
 Flächenträgheitsmoment, 43, 44  
 Flächenladungsdichte, 81, 82, 84  
 Fliehkraft, 21–23, 29, 41  
 Flussdichte  
 – elektrische, 81, 82  
 – magnetische, 95–103  
 folgsame Rolle, 39  
 FOURIER-Analyse, 115, 116  
 FOURIERsches Wärmeleitungsgesetz, 233, 234  
 freier Fall, 11, 12  
 Freiheitsgrad, 70, 73, 75, 284  
 FRESNELsche Formeln, 129, 131, 293  
 Fundamentalschwingung(en), 109
- GALILEI-Transformation, 23, 25  
 Galvanometerspiegel, 73  
 $\gamma$ -Quant, 85, 137, 138  
 Gangunterschied, 116, 119, 129  
 Gasgemisch, 74, 75  
 Gaskonstante, 72, 74, 75  
 Gasthermometer, 53  
 GAUSS-Verteilung, 313  
 GAUSSsche Zahlenebene, 276  
 GAUSSsches Fehlerintegral, 231
- GAY-LUSSACsches Gesetz, 55  
 Gefrierpunktniedrigung, 71, 72  
 Gegenfeld, 135  
 Gegeninduktion, -induktivität, 104  
 GEIGER-MÜLLER-Zählrohr, 85, 145  
 Geschwindigkeit, 9–11  
 – bei der Kreisbewegung, 15  
 – mittlere, 9  
 Gewicht(skraft), 17, 19, 21, 28  
 Gezeitenkraft, 29  
 GIBBSsche Phasenregel, 70  
 Gitterschwingung(en), 119, 137  
 Glasfaser, 125  
 Gleichgewicht  
 – Drehmomenten-, 35–37  
 – Kräfte-, 33, 34, 110  
 – radioaktives, 144  
 – thermodynamisches, 61, 66  
 Gleichgewichtsart(en), 37, 38  
 Gleichverteilungssatz, 73, 74, 137  
 Gleitreibung, 20, 21, 39  
 Gravitation(skraft), 28–30, 79, 139  
 Grenzwellenlänge  
 – beim Photoeffekt, 135  
 – des Röntgenspektrums, 138  
 Grundgesetz der Dynamik, 17, 24, 158, 200, 239, 258,  
 270, 298  
 Grundzustand, 138–140, 142  
 Gruppengeschwindigkeit, 117–119, 138
- Haftreibung, 20, 21, 271  
 Haftspannung, -kraft, 48, 49  
 HAGEN-POISEUILLESches Gesetz, 52, 110  
 Halbwertszeit, 144–146  
 HALL-Effekt, 92  
 harmonischer Oszillator, 108, 113, 137  
 Hauptachsentransformation, 190, 275  
 Hauptträgheitsachse, 42, 191  
 Hauptträgheitsmoment, 42, 191  
 Hebel, 36, 37  
 HEISENBERGsche Unbestimmtheitsrelation, 136–138  
 Hohlspiegel, s. Abbildung, optische  
 HOHMANN-Übergang, 29  
 HOOKEsches Gesetz, 43, 44, 54, 285  
 Hörbereich, 120  
 Hörschwelle, 285  
 Hubarbeit, 60  
 Hüllkurve, 13, 14  
 Hydraulik, 45  
 hydrostatischer Druck, 45  
 Hysteresisschleife, 99
- Impedanz, 106, 266, 268  
 Impuls(erhaltung), 30–32, 50, 135, 174, 175, 298, 299,  
 301, 317  
 Impulsmasse, 24, 25  
 Induktion, elektromagnetische, 102–105

- Induktivität  
 – einer Doppelleitung, 105  
 – einer Ringspule (Toroid), 103, 104  
 – einer Zylinderspule, 104, 105  
 Induktivitätsbelag, 264  
 Inertialsystem, 23, 24, 164  
 Innenwiderstand, 86–89, 92  
 innere Energie, 60–62, 68–70  
 Intensität  
 – elektromagnetischer Wellen, 123, 124  
 – von Schallwellen, 120–122  
 Interferenz  
 – von Elektronen(wellen), 136, 137  
 – von Licht, 129, 131  
 – von Wellen allgemein, 116–119  
 Ionenleitung, 92–94  
 ionisierende Strahlung, 92  
 Ionisierungsenergie, 73, 138  
 irreversibler Prozess, 65–67  
 isentrope Zustandsänderung, 68  
 Isotop, 138, 143–145, 316  
  
 JOULE-THOMSON-Prozess, 68, 69  
  
 Kalorimetrie, 58, 59  
 Kältemaschine, 63, 65  
 Kapazität, elektrische, 83–85, 89, 90, 107, 114, 115  
 Kapillardepression, 198  
 Kapillarität, 48, 49  
 Kapillarwelle, 117  
 Kastenpotenzial, 140–143  
 KELVIN-Temperatur, 54  
 KEPLERSche Gesetze, 28–30, 305  
 KEPLERSches Fernrohr, 292  
 Kernenergie, 143, 144  
 Kernfusion, 144  
 Kernreaktion, 143–145  
 Kernspaltung (Kernfission), 143, 145  
 Kernstabilität, 143, 145  
 kinetische Energie, 26–28, 31, 39, 41, 42, 73, 80, 81,  
 110, 135, 136, 138, 139, 145  
 Kippschwingung (-spannung), 89, 115  
 KIRCHHOFFSche Gesetze, 88, 90, 246, 265  
 Klemmenspannung, 86, 87, 91, 103  
 Koaxialkabel, 84, 95, 103, 123  
 Kompassnadel, 94–96  
 Kompressibilität, 44, 45, 69, 284  
 Kompressionsmodul, s. Kompressibilität  
 Kompressor, 51, 61, 68  
 Kondensatorentladung, 89  
 Kondensatorschaltungen, 84, 85  
 konisches Pendel, 23  
 konservative Kraft, 166, 171, 239, 241  
 Kontinuitätsgleichung, 50, 51  
 Konzentration(sverteilung), 72, 77, 78  
 Korrespondenzprinzip, 307  
 kosmische Geschwindigkeit, 28, 30  
  
 Kraft, 17, 18, 27, 33, 45  
 – auf Stromleiter, 97  
 – im Magnetfeld, 95  
 – zwischen Kondensatorplatten, 84  
 Krafteck, 33  
 Kraftstoß, 308  
 Kreisel, 42  
 Kreisprozess, 65  
 Kreisstrom, 95, 96, 104  
 Kriechfall, 110  
 Kristallgitter, 55, 119, 136  
 kritische Größen, 68, 69  
 Kugelkreisel, 191  
 Kugelstoßpendel, 32  
 KUNDTSche Röhre, 120, 121  
 Kurzschluss(strom), 86, 87, 91  
  
 LAGRANGE-Punkt, 29  
 Längenkontraktion (relativistische), 23, 25  
 Laserlicht, 73, 124, 130, 132, 135, 137  
 Lautstärke(pegel), 120  
 Lebensdauer, mittlere, 136, 138  
 LE-CHATELIERsches Prinzip, 71  
 LECHER-Leitung, 122  
 LEED-Verfahren, 300  
 Leerlauf(spannung), 86, 87  
 Leistung  
 – Heiz-, 58, 59, 76, 91, 92  
 – elektrische, 91  
 – im Wechselstromkreis, 107  
 – mechanische, 26, 27, 41, 42, 51  
 Leistungsanpassung, 91, 250  
 Leistungsfaktor, 107  
 Leitfähigkeit, elektrische, 87, 89, 90, 92–94, 123  
 Leitungselektronen, 92, 93  
 Leitungsstromdichte, 124  
 Leitwert, 87  
 LENZsche Regel, 102, 103  
 Leuchtdichte, 134  
 Lichtausbeute, 133  
 Lichtausstrahlung, spezifische, 134  
 Lichtbogen, 87  
 Lichtleistung, 135  
 Lichtstärke, 133, 134  
 Lichtstrom, 133, 134  
 Linienbreite, natürliche, 136, 138  
 Linke-Hand-Regel, 263  
 LISSAJOUS-Figur, 111, 113  
 logarithmisches Dekrement, 110, 113, 115  
 Looping, 21  
 LORENTZ-Kraft, 97–99  
 LORENTZ-Schaukel, 98  
 LORENTZ-Transformation, 23, 24  
 LOSCHMIDT-Konstante, 72  
 Lösung(en), 71, 72  
 Luftdruck (atmosphärischer), 19, 46, 47, 56, 60, 61  
 Luftspaltgerade, 260

- Luftpule, 89, 99, 104  
 Lumen, 297  
 Lupe, 127, 128  
 Lux, 297
- MACHsche Kopfwelle, 117  
 Magdeburger Halbkugeln, 19, 60  
 magnetische Durchflutung, 95, 96  
 magnetische Linse, 98  
 magnetischer Fluss, 94, 96, 101  
 magnetischer Kreis, 100–102  
 magnetischer Widerstand, 100, 101  
 magnetisches Feld  
 – der Erde, 94, 96  
 – von Dipolen, 94–96  
 – von Gleichströmen, 95–97  
 Magnetisierung, 99, 100  
 Magnetron, 98  
 Masse, 17, 21, 135  
 Massendefekt, 143, 144  
 Massenmittelpunkt, s. Schwerpunkt  
 Massenspektrometer, 99  
 Massenträgheitsmoment, 38, 40, 42  
 Materiewelle(n), 136–138  
 mathematisches Pendel, 108, 113, 274  
 maximale Arbeit, 63, 66  
 MAXWELL-Brücke, 106  
 MAXWELL-Kriterium, 68  
 MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilung, 73  
 Meniskus, 48, 49  
 Messbereichserweiterung, 88, 89  
 MICHELSON-Interferometer, 129  
 Mikroskop, 125, 127, 130, 132  
 Mischgas, 66, 67  
 Mischungsentropie, 66  
 Mischungstemperatur, 58, 59  
 mittlere freie Weglänge, 74  
 mittlere quadratische Geschwindigkeit, 72–74  
 molares Volumen, 72  
 Molmasse, 72  
 Molwärme, 73  
 MOSELEYSches Gesetz, 304
- Netzwerk  
 – von Kondensatoren, 85  
 – von Widerständen, 88, 89  
 NEWTONSche Axiome, 17  
 NEWTONSche Ringe, 129, 131  
 Normalspannung, 42, 43  
 Normzustand, 57, 74  
 Nullpunktsenergie, 136–138  
 Nutzarbeit, 60, 61
- Oberflächenladungen  
 – auf Dielektrika (Isolatoren), 82, 83  
 – auf Metallen, 81, 82  
 Oberflächenspannung, -energie, 26, 118
- OHMSches Gesetz  
 – der Magnetostatik, 100–102  
 – für Gleichstrom, 86, 87  
 – für Wechselstrom, 105–107  
 optische Weglänge, 129  
 osmotischer Druck, 72  
 OTTO-Prozess, 65
- Parallelresonanz, 115  
 Parallelschaltung, 43, 82, 86, 87, 90, 91, 106  
 Parallelschwingkreis, 115  
 Partialdruck, 72  
 PAULI-Prinzip, 139  
 Pendel, s. Schwingung(en)  
 Periode, Periodendauer, 105, 108, 113, 115  
 Periodensystem der Elemente, 139  
 PFEFFERSche Säule, 72  
 Phase (Phasenwinkel), Phasenverschiebung  
 – von Schwingungen, 108, 111–114  
 – von Wechselspannung und -strom, 105–107  
 – von Wellen, 116, 118, 119  
 Phasengeschwindigkeit, 118  
 – allgemein, 116, 118  
 – von Strom- und Spannungswellen, 123  
 – von elektromagnetischen Wellen, 122  
 Phasen(gleichgewicht)  
 – fest/flüssig, 70  
 – flüssig/dampförmig, 69, 70  
 Phasenschieberkondensator, 114  
 Phonon(en), 119  
 Photoeffekt, 135, 137  
 photometrisches Grundgesetz, 134  
 Photon (Energie, Impuls, Masse), 135–137  
 physikalisches Pendel, s. physisches Pendel  
 physisches Pendel, 38, 108  
 piezoelektrischer Effekt, 122  
 Pirouetten-Effekt, 188  
 PLANCKSches Strahlungsgesetz, 132, 133  
 PLANCKSches Wirkungsquantum, 132, 138  
 Planetenbewegung, 29, 169  
 planparallele Schicht, 129, 131  
 Plattenkondensator, 80, 82–85, 90, 92, 115  
 POISSONSche Adiabaten-gleichung, 207, 213  
 POISSONSche Querkontraktionszahl, s. Querkontraktion
- Polarisation  
 – des Lichts, 129, 131  
 – elektrische, 82, 83  
 – magnetische, 99, 101  
 Polarisationsgrad, 129, 131  
 Polstärke, magnetische, 94, 96, 101  
 polytrope Zustandsänderung, 60–62  
 Positroniumatom, 138, 139  
 Potenzial(differenz), 79–81, 84, 85, 102, 104, 105  
 Potenzialtopf, 141  
 – -modell des Atomkerns, 143  
 Potenzialwall, 142

- potenzielle Energie, 110, 138, 139  
 – im elektrischen Feld, 79, 80  
 – im magnetischen Feld, 97  
 – mechanische, 26–28, 37  
 POYNTING-Vektor, 123, 124  
 PRANDTL'sches Staurohr, s. Staurohr  
 Präzession, 42  
 Prinzip des kleinsten Zwangs, s. LE-CHATELIER'sches  
 Prinzip  
 Prisma, 125, 127  
 PRONY'scher Zaun, 41  
 Punktladungssystem, 79, 81  
 Punktmasse, 14, 19, 22, 27, 37, 110  
 Pyknometer, 47, 55
- Quantendot, 138  
 Quantendraht, 136  
 Quantenzahl(en), 139, 305, 307, 313  
 Querkontraktion (elastische), 44
- Radialbeschleunigung, 15, 40  
 radioaktive Strahlung, 144–146  
 radioaktive Zerfallsreihe, 143, 144  
 radioaktives Gleichgewicht, 144  
 Rakete, 11, 13, 32, 33  
 RAOULT'sches Gesetz, 228, 229  
 Raster-Tunnel-Mikroskop, 143  
 RAYLEIGH-JEANS'sche Gleichung, 297  
 RC-Glied, 89, 106  
 Reaktionsenergie, 143–145  
 Reaktionskraft, s. Auflagerkraft  
 reduzierte Masse, 109, 112, 138, 304  
 reduzierte Pendellänge, 108  
 reduzierte Zustandsgleichung, 68  
 Reflexion  
 – am dichteren und dünneren Medium, 116, 117  
 – am ebenen und Winkelspiegel, 125, 127  
 – an Hohl- und Wölbspiegel, 126, 127  
 – von Licht, 129, 131  
 Reflexionsgesetz, 124  
 Reflexionsgrad, 129  
 Reibung(skraft), 10, 18, 25–27, 41  
 Reihenresonanz, 114, 115  
 Reihenschaltung, 43, 86, 87, 90, 91, 105, 107, 116  
 Reihenschwingkreis, 114, 115  
 Reißfestigkeit, 21, 43, 44, 54  
 Relativbewegung, 12, 14, 15, 20  
 relative Atommasse, 74  
 Resonanz(frequenz), 106, 111, 113, 116  
 Resonanzbreite (Bandbreite), 115, 116  
 Resonanzkasten, 119  
 Resonanzkatastrophe, 277  
 Resonanzrohr, 119  
 Resonanzschärfe (Güte), 115, 116  
 Resultierende, 22, 33, 79  
 REYNOLDS-Zahl, 52  
 RL-Kombination, 104  
 RLC-Kombination, 106, 107  
 ROCHE-Grenze, 29  
 Rollbedingung, 187–189, 273  
 Rolle, 34, 35  
 Rollen, reines, 187, 188  
 Röntgenstrahlung, 138, 139  
 Rotationsbewegung, 22, 39, 40  
 Rotationsenergie, 41, 42  
 Rotverschiebung von Spektrallinien, 118  
 Rückstoß, 30, 124, 135–138  
 RUTHERFORD-Streuung, 80  
 RYDBERG-Frequenz, 138, 139  
 RYDBERG'sche Serienformel, 305
- Sägezahn-Spannung, 89, 115  
 Saite, 120, 122  
 Sammellinse, s. Abbildung, optische  
 Sättigungsdruck, 71, 228  
 Schalenbau der Atome, 139  
 Schall(wechsel)druck, 120–122  
 Schalldämmung, 121  
 Schallenergie, Schalleistung, 121, 122  
 Schallgeschwindigkeit  
 – in Festkörpern, 120, 121  
 – in Gasen, 120, 121  
 – in Wasser, 120, 121  
 Schallintensität, 120–122  
 Schallpegel (Schallintensitäts- oder Schalldruckpegel,  
 120–122  
 Schallwelle(n), 119–122, 127  
 Scheinleistung, 107  
 Scheinwiderstand, 105, 107  
 Scherung, elastische, 43, 44  
 schiefe Ebene, 11, 12, 14, 17, 21, 22, 26  
 Schmelzdruck(kurve), 70  
 Schmelzen, 58, 66, 69–71  
 Schmelzflusselektrolyse, 93  
 Schmelzwärme, 58  
 SCHRÖDINGER-Gleichung, 140–143  
 Schubmodul, 43–45  
 Schubspannung, 42–44  
 Schwächungskoeffizient, 145, 146  
 schwarzer Körper, 132, 133  
 Schwebung, 111, 113  
 Schweredruck, 46, 47  
 Schwerkraft, 17, 18, 78, 108  
 Schwerpunkt, 14, 30, 32, 34, 36–38, 42, 108, 112  
 Schwerpunktschwerachse, 39, 41, 43, 109  
 Schwingfall, 110  
 Schwingkreis, elektrischer, 114–116  
 Schwingung(en)  
 – Dreh-, 73, 109, 110, 112  
 – Eigen-, 117, 119–122  
 – Energie von, 110, 112, 114, 137  
 – Erreger-, 111, 115, 116  
 – Feder-, 18, 25, 108–110, 112, 113  
 – Flüssigkeits-, 110

- Gitter-, 119, 137
- Molekül-, 109, 112
- Pendel-, 15, 26, 108, 112, 113
- Resonator-, 111, 113
- Saiten-, 120, 122
- Überlagerung von, 111, 113, 114
- Zeigerdarstellung von, 111, 114
- allgemein, 108
- charakteristische Größen, 108, 112
- elektrische, 114
- erzwungene, 111, 113, 114
- gedämpfte, 110, 113, 114
- gegenphasige, 271
- gekoppelte, 109
- gleichphasige, 271
- harmonische, 18, 19, 56, 57, 110
- Schwingungsbauch und -knoten, 117, 281, 284
- Schwinkel, 128, 130
- Seifenblase, 26, 80, 85
- Seilkraft, 19, 21, 22, 39
- Seilreibung, 20
- Selbstinduktion, 104
- Serienformel des Wasserstoffspektrums, 138
- Shunt, 247
- Sieden, 70, 71
- Siedepunktserhöhung, 71
- Sinkgeschwindigkeit, 12, 18, 23, 51–53, 80
- Skinneffekt, 123
- SNELLIUSSches Brechungsgesetz, 124, 136, 289, 293, 295, 300
- Solkonstante, 124, 132
- Sonnensegel, 124
- Sonnenstrahlung, 132, 133
- Spaltprodukte, 143, 145
- Spannung
  - elektrische, 79–85
  - mechanische, 42, 43
- Spannungsabfall, 86, 88, 90
- Spannungskoeffizient, 55
- Spannungsquelle, 86, 87, 89–92
- Spannungsteiler, 88, 90, 107
- Spatprodukt, 256, 263
- Spektrallinien des H-Atoms, 138
- spezifische Ladung, 79, 80
- spezifische Lichtausstrahlung, 134
- Spiegel, s. Abbildung, optische
- Spiegelteleskop, 127
- Spule
  - Anker-, 103
  - Gleichstromwiderstand einer, 86
  - Induktivität einer, 103–105
  - Magnetfeld einer, 97, 99–102
  - Wechselstromwiderstand einer, 107
- Stabmagnet, 94–96, 101
- statischer Druck, s. hydrostatischer Druck
- Staudruck, 50, 51
- Staupunkt, 56
- Staurohr, 50, 51
- STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz, 132, 133
- stehende Welle(n), s. Welle(n)
- STEINERScher Satz, 38, 185, 187–189, 270
- Sternschaltung von Widerständen, 90
- Stimmgabel, 111, 113, 117, 119, 121
- STIRLING-Prozess, 63, 64
- Stoffmengenstrom, 77, 78
- STOKESSches Gesetz, 18, 52, 53, 239
- Stoß
  - elastischer, 30, 31
  - unelastischer, 31–33
- Stoßpendel, 31
- Stoßzahl, 31, 33
- Strahlendichte, spektrale Strahlendichte, 132, 133
- Strahlungsdruck (Lichtdruck), 123, 124, 135
- Strahlungsfluss, Strahlungsleistung, 132, 133, 135
- Strahlungsflussdichte (spezifische Ausstrahlung), 132
- Strahlungsgesetz, 132, 133
- Strahlungsintensität (Energiestromdichte), 123, 124
- Strichgitter, s. Beugung
- Strömung
  - laminare, 52, 53
  - turbulente, 52
- Strömungsgeschwindigkeit, 50, 52, 53
- Strömungswiderstand, 52, 53
- Superpositionsprinzip, 12
- Suszeptibilität, 82, 83, 102
- Tangentenbussole, 96
- Tangentialbeschleunigung, 15, 40
- technische Arbeit, 61
- Teilchenbeschleuniger, 81, 97–99
- Teilchenstrom, 74
- Teleobjektiv, 128
- Temperatenausgleich, 58
  - irreversibler, 66, 67
  - reversibler, 61, 66, 67
- Temperaturkoeffizient (des elektrischen Widerstandes), 87, 90
- Temperaturmessung, 53, 58
- Temperaturskala, 53, 54
- Temperaturstrahlung, 132
- Termschema, 140
- thermische Schwankung, 73
- thermodynamisches Gleichgewicht, 61, 66
- Thermometer, 53, 58
- thermonukleare Reaktion, 144
- Torsionsschwingungen, s. Schwingung(en), Dreh-
- Totalreflexion, 125, 127, 310
- Trägheitsmoment, s. Massenträgheitsmoment
- Trägheitstensor, 42
- Transformator, 104, 105
- Tropfenmodell, 143, 145
- Tunneleffekt, 142, 143



- Überdruck, 56, 57  
 Übergangswiderstand, elektrischer, 86, 88  
 Ultraschall, 120–122  
 Umwandlungsenthalpie, 69  
 Unbestimmtheitsrelation, HEISENBERGSche, 136–138  
 Ursprung, 86, 87, 91, 92, 103  
  
 Vakuum, 47, 61  
 VAN-DER-WAALS-Gas, 68, 69  
 VAN'T HOFFSche Gleichung, 229  
 Verdampfungswärme, 69, 72  
 Verflüssigung (der Gase), 68, 69  
 Vergrößerung  
 – einer Lupe, 128  
 – eines Fernrohres, 127, 128, 130  
 – eines Mikroskops, 127, 130  
 Verschiebungsstrom(dichte), 124  
 Viskosität  
 – dynamische, 18, 52, 53, 80, 110  
 – kinematische, 52, 53  
 Volumenstrom(stärke), 50  
  
 Wahrscheinlichkeit (thermodynamische), 74, 75  
 Wahrscheinlichkeit(sdichte) (quantenmechanische), 140–142  
 wahrscheinlichste Geschwindigkeit, 73, 74  
 Wärme, 58, 70, 71, 74  
 Wärmedurchgang, 75, 76  
 Wärmedurchgangskoeffizient, 76  
 Wärmekapazität, 62, 74, 75  
 Wärmekraftmaschine, 62–65  
 Wärmeleitung(sgleichung)  
 – instationäre, 76  
 – stationäre, 75  
 Wärmepumpe, 63–65  
 Wärmestrahlung, s. Temperaturstrahlung  
 Wärmestrom, 63, 64, 75  
 Wärmeübergang, 75  
 Wärmeübergangskoeffizient, 76  
 Wasserstoffatom, 39, 79, 96, 109, 136, 138, 139, 142  
 Wasserstoffspektrum, 138  
 Wasserstrahlpumpe, 51  
 Wasserwelle(n), 117, 118  
 Wechselstrom, 105–107  
 Wechselstromgenerator, 103, 105  
 Wechselstromwiderstand, 105–107, 115  
 Wechselwirkungsenergie, magnetische, 95  
 Welle(n)  
 – Brechung von, 124, 125, 129, 131  
 – Dispersion von, 117, 119  
 – Gruppengeschwindigkeit von, 117–119  
 – Reflexion von, 116, 117, 123, 125, 127, 129, 131  
 – Schwebungs-, 117–119  
 – Überlagerung (Interferenz) von, 116–119, 129, 131  
 – Wasser-, 117, 118  
 – charakteristische Größen, 116  
 – elektromagnetische, 123, 124  
 – gleichphasige, 117  
 – stehende, 117, 119–122  
 Wellen(differenzial)gleichung, 122  
 Wellenfunktion, 116–118, 140  
 Wellenpaket, Wellengruppe, 117–119, 141, 303, 308  
 Wellenwiderstand, 123  
 WHEATSTONE-Brücke, 88, 90  
 Widerstand  
 – Schein- (Admittanz), 106  
 – induktiver und kapazitiver Blind-, 106  
 – Temperaturabhängigkeit, 87, 90  
 – magnetischer, 100, 101  
 – spezifischer, 87, 89, 91  
 Widerstand, elektrischer  
 – Messung, 88–90  
 – Kennlinie, 87  
 – nichtlinearer, 87  
 WIENSche Gleichung, 297  
 WIENSches Geschwindigkeitsfilter, 98, 99  
 WIENSches Verschiebungsgesetz, 133  
 Winkelbeschleunigung, 15, 39, 40  
 Winkelgeschwindigkeit, 15, 16, 29, 73, 105  
 Winkelrichtgröße, 41, 73, 99, 109, 112  
 Winkelspiegel, 125  
 Wirkungsgrad, 60  
 – der CARNOT-Maschine, 62, 63  
 – elektrischer, 59, 104  
 – mechanischer, 27, 60  
 – thermischer, 62–65, 71  
 Widerstand, elektrischer  
 Wobbel-Generator, 116  
 Wurf  
 – horizontaler, 12  
 – schiefer, 12–14  
 – senkrechter, 11, 12, 22, 27  
 Wurfparabel, 12–14  
  
 Zeitdilatation (relativistische), 23–25  
 Zeitkonstante, einer elektrischen Schaltung, 104, 105  
 Zentrifugalkraft, s. Fliehkraft  
 Zentrifuge, 15, 73  
 Zerfallsgesetz, 144, 145  
 Zerfallsreihe, 143, 145  
 Zerstreuungslinse, s. Abbildung, optische  
 Zündspannung, 89  
 Zustandsgleichung des idealen Gases, 72  
 Zustandsgleichung des realen Gases, s. VAN-DER-WAALS-Gas  
 Zweistoffsystem, 70  
 Zwillingparadoxon, 24  
 Zyklotron, 99  
 Zyklotronfrequenz, 257, 258