

Heribert Stroppe

Physik

Beispiele und Aufgaben

ISBN (Buch): 978-3-446-44979-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-44980-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44979-4>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KINEMATIK</b> . . . . .	9
1–17 Geradlinige Bewegung. Geschwindigkeit und Beschleunigung . . . . .	9
18–26 Fall- und Steigbewegung. Senkrechter Wurf . . . . .	11
27–39 Überlagerung von Bewegungen. Schiefer Wurf . . . . .	12
40–56 Kreisbewegung . . . . .	14
<b>DYNAMIK</b> . . . . .	16
57–74 NEWTONSche Bewegungsgesetze . . . . .	16
75–85 Reibung . . . . .	19
86–97 Trägheitskräfte . . . . .	20
98–113 Inertialsysteme. Relativistische Mechanik . . . . .	22
114–134 Arbeit, Energie, Leistung . . . . .	24
135–147 Gravitationsgesetz. KEPLERSche Gesetze . . . . .	27
148–164 Impuls und Stoß . . . . .	28
<b>STATIK UND DYNAMIK DES STARREN KÖRPERS</b> . . . . .	31
165–176 Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften. Kräftegleichgewicht . . . . .	31
177–189 Drehmoment. Statisches Gleichgewicht . . . . .	33
190–198 Schwerpunkt (Massenmittelpunkt). Gleichgewichtsarten . . . . .	35
199–213 Massenträgheitsmoment. Rotationsbewegung . . . . .	36
214–223 Arbeit, Energie und Leistung bei Rotation . . . . .	38
<b>ELASTIZITÄT FESTER KÖRPER</b> . . . . .	39
224–237 Spannung, Dehnung, Scherung. HOOKESches Gesetz . . . . .	39
238–242 Dehnungsarbeit. Volumenelastizität . . . . .	41
<b>MECHANIK DER FLÜSSIGKEITEN UND GASE</b> . . . . .	42
243–258 Druck in Flüssigkeiten und Gasen . . . . .	42
259–271 Auftrieb . . . . .	44
272–281 Oberflächenspannung, Oberflächenenergie, Kapillarität . . . . .	45
282–296 Strömung idealer Fluide . . . . .	46
297–310 Strömung realer Fluide . . . . .	48
<b>TEMPERATUR UND WÄRME</b> . . . . .	50
311–315 Temperatur, Thermometrie . . . . .	50
316–325 Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper . . . . .	51
326–338 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases . . . . .	52
339–350 Wärme. Spezifische Wärmekapazität. Kalorimetrie . . . . .	54
<b>HAUPTSÄTZE DER THERMODYNAMIK</b> . . . . .	56
351–366 I. Hauptsatz. Zustandsänderungen der Gase . . . . .	56
367–381 Kreisprozesse, Energieumwandlungen . . . . .	59
382–398 II. Hauptsatz. Entropie . . . . .	62
<b>REALE GASE. PHASENUMWANDLUNGEN</b> . . . . .	65
399–409 VAN-DER-WAALSsche Zustandsgleichung . . . . .	65
410–422 Phasenumwandlungen . . . . .	66
423–429 Lösungen . . . . .	68

<b>GASKINETIK. AUSGLEICHSVORGÄNGE</b> . . . . .	69
430–449 Kinetische Gastheorie . . . . .	69
450–462 Wärmeübertragung . . . . .	72
463–470 Diffusion . . . . .	74
<b>ELEKTRISCHES FELD</b> . . . . .	76
471–490 Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Feldstärke, Potenzial, Spannung . . . . .	76
491–497 Elektrischer Fluss, Flussdichte . . . . .	78
498–506 Elektrisches Feld in Stoffen. Feldenergie . . . . .	79
507–525 Kapazität, Kondensatoren . . . . .	80
<b>GLEICHSTROMKREIS</b> . . . . .	83
526–537 Einfacher Stromkreis. OHMsches Gesetz . . . . .	83
538–563 Widerstände und Netzwerke . . . . .	84
564–575 Energie, Wärme und Leistung von Gleichströmen . . . . .	88
576–590 Elektrische Leitungsvorgänge. Elektrolyse . . . . .	89
<b>MAGNETISCHES FELD</b> . . . . .	91
591–607 Magnetfeld von Dipolen und Gleichströmen . . . . .	91
608–625 Kraftwirkungen des Magnetfeldes auf Stromleiter und bewegte Ladungsträger . . . . .	94
626–642 Magnetisches Feld in Stoffen . . . . .	96
<b>ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION. WECHSELSTROMKREIS</b> . . . . .	99
643–664 Induktionsgesetz. Selbstinduktion . . . . .	99
665–679 Wechselstrom . . . . .	102
<b>SCHWINGUNGEN UND WELLEN</b> . . . . .	105
680–724 Mechanische Schwingungen . . . . .	105
725–738 Elektrische Schwingungen . . . . .	111
739–769 Allgemeine Wellenlehre . . . . .	113
770–795 Schallwellen. Akustik . . . . .	117
796–809 Elektromagnetische Wellen . . . . .	119
<b>OPTIK</b> . . . . .	121
810–845 Strahlenoptik (Geometrische Optik) . . . . .	121
846–870 Wellenoptik . . . . .	126
871–880 Temperaturstrahlung . . . . .	129
881–888 Photometrie . . . . .	130
<b>ATOME UND ATOMKERNE</b> . . . . .	132
889–909 Welle-Teilchen-Dualismus . . . . .	132
910–925 Atomhülle . . . . .	135
926–940 Quantenmechanik . . . . .	137
941–960 Atomkern . . . . .	140
<b>Lösungen der Aufgaben</b> . . . . .	144
<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	303

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist ein Arbeits- und Übungsbuch für die physikalische Grundlagenausbildung von Studierenden natur- und ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge an Hoch- und Fachhochschulen. Das bisher in zweibändiger Form erschienene Buch liegt nun zusammengefasst in einem Band vor. 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 der Student (und somit indirekt auch der Dozent) anfänglich zu kämpfen hat, 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.

Der Studierende soll sich aber keinesfalls entmutigen lassen, wenn er eine Aufgabe nicht oder nur unter Zuhilfenahme der kompletten Lösung meistern kann; auch diese muss erst einmal „verarbeitet“ werden, und wenn ihm 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.

Für die Anfertigung der Bilder danken wir Herrn H. GRÄFE sowie Dr. M. SPECHT für die Mithilfe beim Satz.

Dem Fachbuchverlag Leipzig sowie dem Carl Hanser Verlag München danken wir an dieser Stelle für über drei Jahrzehnte gedeihlicher Zusammenarbeit.

Magdeburg, Dezember 2016

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.

# KINEMATIK

## Geradlinige Bewegung. Geschwindigkeit und Beschleunigung

### 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?

### 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?

### 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?

### 4 *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?

### 5 *Beschleunigungsstrecken*

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

### 6 *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?

### 7 *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.

**8** *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?

**9** *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**

**10** 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?

**11** 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!

**12** 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.

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

**14** Ein Personenkraftwagen, der mit  $72 \text{ km/h}$  fährt, bremst vor einer Gefahrenstelle und verringert innerhalb von  $5 \text{ Sekunden}$  seine Geschwindigkeit gleichmäßig auf  $18 \text{ km/h}$ . Man bestimme a) die Verzögerung, b) die Strecke, die das Fahrzeug während der fünften Sekunde zurücklegt!

**15** Bevor es den Erdboden verlässt, legt ein Flugzeug auf der Startbahn nach dem Start in  $12 \text{ s}$  einen Weg von  $720 \text{ m}$  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.

**16** 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?

17 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?

### Fall- und Steigbewegung. Senkrechter Wurf

#### 18 *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?

#### 19 *Freier Fall (2)*

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

#### 20 *Senkrechter Wurf nach oben*

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

#### 21 *Steigbewegung auf der schiefen Ebene*

Ein Skispringer fährt nach dem Aufsetzen mit einer Anfangsgeschwindigkeit von  $72 \text{ km/h}$  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

22 Ein Personenkraftwagen fährt mit  $36 \text{ km/h}$  gegen eine Mauer. Aus welcher Höhe müsste er fallen, damit der Aufprall genauso stark wird?

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

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



25 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?

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

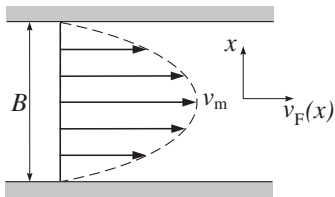
**Überlagerung von Bewegungen. Schiefer Wurf**

27 *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?

28 *Superpositionsprinzip (2)*

(Bild) Man berechne den Abtrieb  $s$  eines Bootes beim senkrechten Überqueren eines Flusses der Breite  $B = 210 \text{ m}$  bei einer Geschwindigkeit des Bootes von  $v_B = 2 \text{ m/s}$ ! Im Unterschied zu Aufgabe 27 ist jetzt die Strömungsgeschwindigkeit nicht über die gesamte Flussbreite konstant, sondern fällt nach



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

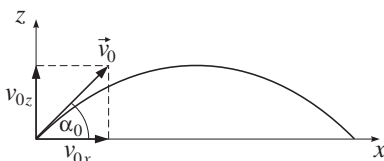
vom Maximalwert  $v_m = 0,6 \text{ m/s}$  in Flussmitte ( $x = 0$ ) auf null am Ufer ( $x = \pm B/2$ ) ab.

29 *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?

30 *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  $v_0$ ,  $v_{0x}$  und  $v_{0z}$ , drücke man durch  $v_0$  und  $\alpha_0$  aus.

**31 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 30 (Lösung).

**32 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 30 (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.

**33 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?

**ZUSATZAUFGABEN**

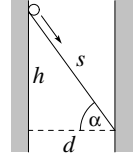
**34** Ein Flugzeug legt eine Entfernung von 300 km in Richtung Osten zurück. Die Windgeschwindigkeit beträgt 20 m/s, die Geschwindigkeit des Flugzeuges relativ zur Luft 600 km/h. Wie lange dauert der Flug, wenn der Wind a) von Osten nach Westen, b) von Süden nach Norden, c) von Westen nach Osten weht?

**35** 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?

**36** 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.

37 Von einem 25 m hohen Turm wird ein Stein mit  $v_0 = 15 \text{ m/s}$  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.

38 (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?



39 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?

### Kreisbewegung

#### 40 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!

#### 41 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  $v$ ?

#### 42 Umlaufzeit

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

#### 43 Drehzahl und Umfangsgeschwindigkeit

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

#### 44 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  $r = 1 \text{ m}$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 1 \text{ rad/s}$ . 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!

# ELEKTRISCHES FELD

## Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Feldstärke, Potenzial, Spannung

### 471 Coulomb-Gesetz (1)

Um eine Vorstellung von der Größe der Ladungseinheit 1 Coulomb (C) zu bekommen, berechne man die Kraft, mit der sich zwei Kugeln mit Ladungen von je 1 C in 100 m Entfernung anziehen bzw. abstoßen!

### 472 Coulomb-Gesetz (2)

Welche gleich große spezifische Ladung  $q/m$  müssten zwei Himmelskörper mit den Massen  $m_1$  und  $m_2$  haben, damit deren Gravitationswirkung durch die elektrostatische Abstoßung gerade kompensiert wird? Welche Ladungen kämen dann der Erde ( $m_E = 5,976 \cdot 10^{24}$  kg) und dem Mond ( $m_M = 7,347 \cdot 10^{22}$  kg) zu?

### 473 Feldstärke und Potenzial des kugelsymmetrischen Feldes (Zentralfeld)

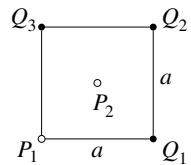
Der Kern des Wasserstoffatoms, das Proton, trägt eine positive Elementarladung. Man bestimme a) die Feldstärke  $E$  und das Potenzial  $\varphi$  auf der kernnächsten Elektronenbahn (Kreisbahn) mit dem sog. BOHRschen Radius  $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$  m (K-Schale). b) Welche Feldstärke- und Potenzialdifferenz besteht zwischen der K- und der darüber liegenden L-Schale mit dem Bahnradius  $r_2 = 2^2 r_1$ ? c) Wie groß ist die potenzielle Energie  $W_p$  eines Elektrons auf den beiden Bahnen? Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

### 474 Resultierende Feldstärke und Feldkraft zweier Ladungen

Zwei positive Punktladungen  $Q_1 = 400$  nC ( $1 \text{ nC} = 10^{-9}$  C) und  $Q_2 = 150$  nC haben voneinander den Abstand 10 cm. a) Wie groß ist die Kraft auf eine genau in der Mitte zwischen den beiden Ladungen befindliche kleine positive Probeladung  $q = 10$  nC? Wie groß ist die elektrische Feldstärke an dieser Stelle? b) Wie groß sind Feldkraft und Feldstärke, wenn  $Q_2$  negativ ist?

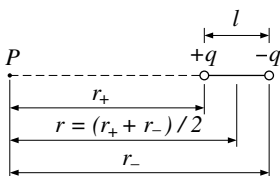
### 475 Potenzial eines Punktladungssystems. Potenzialdifferenz (Spannung)

(Bild) In drei Ecken eines Quadrats mit der Kantenlänge  $a = 4$  cm befinden sich die Punktladungen  $Q_1 = +100$  pC,  $Q_2 = -200$  pC und  $Q_3 = +300$  pC. Man berechne das Potenzial des Ladungssystems in den Punkten  $P_1$  (Eckpunkt) und  $P_2$  (Mittelpunkt) sowie die Spannung  $U$  zwischen den beiden Punkten!



### 476 Elektrischer Dipol

(Bild) Zwei Punktladungen unterschiedlichen Vorzeichens  $q = \pm 20$  nC, die sich in einem festen Abstand  $l = 1$  cm zueinander befinden, bilden einen elektrischen Dipol. a) Wie groß sind Potenzial  $\varphi$  und Feldstärke  $E$  im Punkt  $P$  in der Entfernung  $r = 1,50$  m vom Dipol? Wie groß sind  $\varphi$  und  $E$  im Punkt  $P$ , wenn der Dipol durch eine einzelne Punktladung  $q = 20$  nC ersetzt wird? b) Welches Drehmoment wirkt auf den Dipol, wenn sich in  $P$  eine Ladung  $Q = 100$  nC befindet und die Dipolachse senkrecht zu der im Bild gezeichneten Lage steht?



**477 Arbeit beim elektrischen Aufladen**

Eine elektrisch neutrale Metallkugel vom Radius  $R = 5 \text{ cm}$  soll auf die Ladung  $Q = 10 \mu\text{C}$  aufgeladen werden. a) Welche Arbeit ist dazu erforderlich? b) Welche Spannung liegt dann an der Kugel?

**478 Probeladung im homogenen elektrischen Feld**

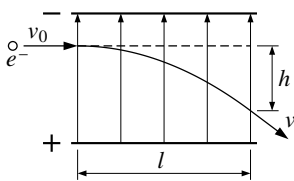
Eine Seifenblase mit dem Durchmesser  $2r = 4 \text{ cm}$  sinkt in Luft mit der Geschwindigkeit  $v = 3 \text{ cm/s}$  zur Erde (dynamische Viskosität von Luft bei  $20^\circ\text{C}$ :  $\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$ ). Wie viele Elementarladungen  $e$  müsste sie tragen, um in einem lotrechten elektrischen Feld der Feldstärke  $E = 130 \text{ V/m}$  gerade in der Schwebelage gehalten zu werden?

**479 Freies Elektron im homogenen elektrischen Feld (1)**

In einer Vakuumröhre befinden sich zwei parallele plattenförmige Elektroden im Abstand  $d = 2 \text{ cm}$ , an denen eine Spannung  $U = 300 \text{ V}$  liegt. Man bestimme a) die elektrische Feldstärke  $E$  im Raum zwischen den Platten, b) die Kraft auf ein Elektron im elektrischen Feld zwischen den Platten, c) die von einem Elektron gewonnene Energie, wenn es sich von der Katode zur Anode bewegt, d) die Geschwindigkeit, mit der es auf die Anode trifft.

**480 Freies Elektron im homogenen elektrischen Feld (2)**

(Bild) Ein Elektron tritt senkrecht zu den elektrischen Feldlinien mit der Geschwindigkeit  $v_0$  in den Vakuumraum eines Plattenkondensators ein und durchläuft ihn auf gekrümmter



Bahn. a) Um welche Art von Bahnkurve handelt es sich? b) Der Kondensator habe einen Plattenabstand von  $d = 4 \text{ cm}$  und eine Plattenlänge von  $l = 10 \text{ cm}$ , die an den Platten anliegende Spannung ist  $U = 300 \text{ V}$ . Mit welcher Geschwindigkeit  $v$  tritt das Elektron aus dem Kondensatorfeld aus, wenn  $v_0 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ ? c) Wie groß ist die Abweichung  $h$  von der ursprünglichen Bewegungsrichtung beim Austritt aus dem

Feld? d) Welche Energieänderung erfährt das Elektron beim Durchqueren des Feldes? Ladung des Elektrons  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , Masse des Elektrons  $m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

**481 Beschleunigungsspannung**

Welche Spannung muss ein Elektron im Vakuum durchlaufen, um auf 95% der Lichtgeschwindigkeit  $c$  beschleunigt zu werden? Man beachte die relativistische Massenzunahme des Elektrons (Ruhmasse  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ )!

**ZUSATZAUFGABEN**

**482** a) Wie viel Elektronen sind in 1 Coulomb (C) enthalten? b) Welche Ladung  $Q$  und Masse  $m$  hat  $n = 1 \text{ mol}$  Elektronen?

**483** Berechnen Sie a) die Feldstärke, welche durch eine kleine, räumlich konzentrierte Gaswolke, bestehend aus 1 kmol einwertiger Ionen, in 100 km Entfernung hervorgerufen wird, und b) die Potenzialänderung, die sich bei Vergrößerung der Entfernung auf 500 km ergibt!

**484** Welche Arbeit wird verrichtet, wenn ein Elektron eine Potenzialdifferenz (Spannung) von 1 V durchläuft?

485 Welche größte Annäherung ist beim zentralen Stoß eines  $\alpha$ -Teilchens ( $\text{He}^{++}$ ) der Energie  $E_\alpha = 2 \text{ MeV}$  mit dem Kern eines Aluminiumatoms (Ordnungszahl 13) möglich (RUTHERFORD-Streuung)? Die kinetische Energie geht bei größter Annäherung vollständig in potenzielle Energie über.

486 In den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks von  $a = 10 \text{ cm}$  Seitenlänge befinden sich die Ladungen  $Q_1 = +1 \mu\text{C}$ ,  $Q_2 = +2 \mu\text{C}$  und  $Q_3 = -3 \mu\text{C}$ . Man berechne den Betrag der resultierenden Kraft, mit der  $Q_1$  und  $Q_2$  auf  $Q_3$  wirken!

487 Eine Ladung von  $8 \mu\text{C}$  befindet sich in  $1 \text{ m}$  Entfernung von einer zweiten Ladung  $50 \mu\text{C}$  und wird a) auf  $50 \text{ cm}$  an diese angenähert, b) auf einer Kreisbahn um diese herumgeführt. Wie groß ist in den beiden Fällen die dazu notwendige Arbeit?

488 Im Abstand von  $1 \text{ m}$  befinden sich zwei Punktladungen  $Q_1 = 5 \text{ nC}$  und  $Q_2 = -3 \text{ nC}$  ( $Q_1$  links von  $Q_2$ ). Auf der Verbindungsgeraden beider Ladungen liegt rechts von  $Q_1$  in der Entfernung  $25 \text{ cm}$  ein Punkt  $A$  und  $25 \text{ cm}$  links von  $Q_2$  ein Punkt  $B$ . a) Welcher Punkt befindet sich auf dem höheren Potenzial? b) Welche Arbeit ist zu verrichten, um eine Probeladung  $q = -50 \mu\text{C}$  von  $A$  nach  $B$  zu verschieben?

489 In Aufgabe 488 ist die Lage desjenigen Punktes zu ermitteln, in dem das resultierende Potenzial null ist.

490 In einem Teilchenbeschleuniger werden Protonen auf eine kinetische Energie von  $10 \text{ GeV}$  gebracht. Wie weit hat sich dadurch die Teilchengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit angenähert? Auf das Wievielfache hat die bewegte Masse  $m$  gegenüber ihrer Ruhmasse  $m_0$  zugenommen? Spezifische Ladung des Protons:  $e/m_0 = 9,579 \cdot 10^7 \text{ C/kg}$ .

### Elektrischer Fluss, Flussdichte

#### 491 Elektrische Durchflutung

a) Man berechne die elektrische Feldstärke  $E$  in der Entfernung  $r = 50 \text{ cm}$  von einer Punktladung  $Q = 2,7 \cdot 10^{-12} \text{ C}$ ! b) Wie groß ist die Flussdichte  $D$  in dieser Entfernung und der elektrische Fluss  $\Psi$  durch eine um die Ladung herumgelegte, beliebige geschlossene Fläche? Elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C/(V m)}$ .

#### 492 Zylindersymmetrisches Feld eines langen Drahtes

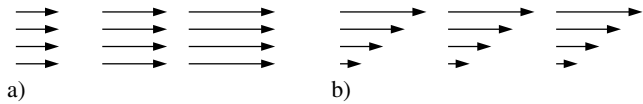
Auf die Oberfläche eines sehr langen, geraden Metalldrahtes von  $2 \text{ mm}$  Durchmesser werden Ladungen mit dem Ladungsbelag  $Q' = Q/l = 90 \text{ nC/m}$  (Ladung je Längeneinheit) gebracht. Welchen Feldstärke- und Potenzialverlauf weist das vom Draht erzeugte Feld in seiner Umgebung (Luft) auf? Wie groß sind Feldstärke und Flächenladungsdichte an der Drahtoberfläche?

#### 493 Atmosphärisches elektrisches Feld

Bei ungestörtem schönen Wetter beträgt das lotrechte elektrische Feld in Bodennähe  $E_1 = 130 \text{ V/m}$  und in  $h = 10 \text{ km}$  Höhe  $E_2 = 4 \text{ V/m}$ . a) Welche Flächenladungsdichte  $\sigma$  der Erdoberfläche und welche (als homogen angenommene) Raumladungsdichte  $\rho$  der Atmosphäre folgt aus diesen Angaben? b) Welche Potenzialdifferenz  $U$  herrscht zwischen Erdoberfläche und  $10 \text{ km}$  Höhe?

494 *Quellen- und Wirbelfeld*

(Bild) Sind die dargestellten Kraftfelder, deren Feldstärke  $E$  a) in Feldlinienrichtung, b) senkrecht zur Feldrichtung linear zunimmt, Quellen- oder Wirbelfelder? – *Anleitung:* Man untersuche den elektrischen Fluss  $\Psi$  durch ein geschlossenes Raumgebiet und prüfe, ob beim Umlauf einer Probeladung auf einem geschlossenen Weg Arbeit verrichtet wird.



ZUSATZAUFGABEN

495 An einem Plattenkondensator (Plattenfläche  $A = 100 \text{ cm}^2$ , Plattenabstand  $d = 2 \text{ cm}$ ) liegt eine Spannung von  $U = 70 \text{ V}$ . Wie groß ist die Ladung auf einer Platte?

496 Ein elektrisches Feld der Feldstärke  $E = 905 \text{ V/m}$  wird durch eine dazu senkrechte Metallschicht abgeschirmt. Wie viel Elementarladungen werden auf der Oberfläche je Flächeneinheit beeinflusst, d. h., wie groß ist ihre Flächenladungsdichte  $\sigma$ ?

497 Eine  $4 \text{ cm}$  von einem langen, elektrisch geladenen Draht entfernte Punktladung  $q = 6,69 \cdot 10^{-10} \text{ C}$  wird auf  $2 \text{ cm}$  Entfernung an den Draht herangeführt. Dazu muss die Arbeit  $W = 5 \cdot 10^{-6} \text{ J}$  verrichtet werden. Welchen Ladungsbelag  $Q/l$  hat der Draht?

Elektrisches Feld in Stoffen. Feldenergie

498 *Geschichtetes Dielektrikum. Effektive Dielektrizitätszahl*

(Bild) Das Innere eines Plattenkondensators ist mit zwei parallel zu den Platten verlaufenden Schichten aus unterschiedlichen Isolierstoffen mit den Dielektrizitätszahlen  $\epsilon_{r1} = 7,5$  (Glas) und  $\epsilon_{r2} = 150$  (Keramik) voll ausgefüllt. Die Schichtdicken sind  $d_1 = 2,5 \text{ mm}$  und  $d_2 = 1 \text{ mm}$ . Am Kondensator liegt die Spannung  $U = 2500 \text{ V}$  an. Wie groß sind a) die Feldstärken  $E_1$  und  $E_2$ , b) die Spannungsabfälle  $U_1$  und  $U_2$  in den beiden Schichten? c) Welche „effektive“ Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  müsste ein Stoff haben, der bei voller Ausfüllung des

Kondensators mit diesem Stoff die gleiche elektrische Polarisation erzeugt wie das geschichtete Dielektrikum?

499 *Energiedichte des elektrischen Feldes*

Ein Plattenkondensator (Plattengröße  $A = 5 \text{ cm}^2$ , Plattenabstand  $d = 1 \text{ mm}$ ) ist mit Glimmer (Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r = 7$ ) ausgefüllt. Er wird auf eine Spannung von  $500 \text{ V}$  aufgeladen. Man berechne a) die Feldstärke  $E$  und b) die Flussdichte  $D$  im Kondensatorraum, c) die Ladung  $Q$  auf einer Kondensatorplatte, d) die Energiedichte  $w_e$  und e) die Energie  $W_e$  des elektrischen Feldes im Kondensator!

500 *Elektrische Polarisation*

Wie groß ist in Aufgabe 499 die Polarisation  $P$  des im Plattenkondensator befindlichen Dielektrikums (Glimmer)? Wie groß sind die infolge Polarisation auf dem Dielektrikum entstandenen freien Oberflächenladungen  $Q_P$ ?

**102** a) Für die Raumfahrer, die sich gegenüber der Erde mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegen, schrumpft nach dem relativistischen Prinzip der Längenkontraktion (vgl. Aufgabe 100) die Entfernung Erde-Fixstern von  $s = ct = c(4,3 \text{ a})$  auf

$$s' = s\sqrt{1 - (v^2/c^2)} = v\Delta t',$$

wobei  $\Delta t' = 1,25 \text{ a}$  die Flugdauer im Zeitmaß der Raumfahrer ist. Hieraus folgt

$$v = \frac{s}{\sqrt{(s/c)^2 + (\Delta t')^2}} = \frac{4,3c}{\sqrt{4,3^2 + 1,25^2}} = 0,96c.$$

b) Während der Flugdauer der Raumfahrer  $\Delta t'$  verstreicht für die Erdenbewohner die Zeit  $\Delta t = s/v$ , mit dem obigen Ausdruck für  $s'$  bzw.  $s$  also

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \approx 4,5 \text{ a}.$$

Dies ist das Gesetz der relativistischen Zeitdilatation (vgl. Aufgabe 101). Da die Bezugssysteme von Erdenbewohner und Raumfahrer gleichberechtigt sind, dürfen  $\Delta t$  und  $\Delta t'$  vertauscht werden; für jeden von beiden geht die Uhr des anderen nach.

**103** Durch Anwendung der LORENTZ-Transformation (vgl. Lösung zu Aufgabe 99) erhält man

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1 - v(x_2 - x_1)/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}.$$

Die Forderung  $t'_2 - t'_1 < 0$  (Zeitumkehr) führt zu der Ungleichung

$$t_2 - t_1 - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1) < 0, \quad \text{woraus folgt} \quad \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v_S > \frac{c^2}{v} \quad \text{oder} \quad v_S v > c^2.$$

Diese Bedingung ist nicht erfüllbar, da weder die „Signalgeschwindigkeit“  $v_S$  noch die Relativgeschwindigkeit der Bezugssysteme  $v$  die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit  $c$  erreichen kann. Die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen bleibt also in allen Inertialsystemen erhalten. Nur Ereignisse mit  $v_S \leq c$  können als Ursache und Wirkung miteinander verknüpft sein.

**104** Die Geschwindigkeit des Neutrons im Laborsystem  $\Sigma$  ist  $v = 0,9c$ , und die Geschwindigkeit des Elektrons in Bezug auf das Neutron (System  $\Sigma'$ ) ist  $u' = 0,8c$ . Die Geschwindigkeit des Elektrons in Bezug auf das Laborsystem  $\Sigma$  berechnet sich nach dem relativistischen Additionstheorem für Geschwindigkeiten

$$u = \frac{v + u'}{1 + (v/c^2)u'} = \frac{0,9c + 0,8c}{1 + 0,72} = 0,988c.$$

Nach dem klassischen Additionstheorem würde man  $u = v + u' = 1,7c$  erhalten; dies widerspricht jedoch der Relativitätstheorie und der Erfahrung, wonach es Teilchengeschwindigkeiten größer als  $c$  nicht gibt.

**105** Ein Teilchen mit der Ruhmasse  $m_0$ , welches sich mit der Geschwindigkeit  $v$  relativ zum Beobachter bewegt, hat für ihn die Masse

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad (\text{Impulsmasse}).$$

Die relativistische Massenzunahme der Protonen beträgt also hier

$$\frac{m - m_0}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,8^2}} - 1 = 0,67 \quad (67\%).$$

Der relativistische Impuls ist mit  $p_0 = m_0 v$  als nichtrelativistischem Impuls:

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = 1,67 p_0.$$

**106** a) Eine konstante Kraft  $F$  bewirkt bei konstanter Masse  $m_0$  des Teilchens die Beschleunigung  $F/m_0 = a = v/t$ , entsprechend der bekannten Beziehung  $v = at$ . b) Die relativistische Bewegungs-



gleichung lautet mit dem relativistischen Impuls  $p = mv$ :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \right) = F.$$

Mit  $F = m_0 a$  wird

$$\int_0^v d \left( \frac{v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \right) = a \int_0^t dt, \quad \frac{v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = at$$

und hieraus durch Auflösen nach der Geschwindigkeit

$$v = \frac{at}{\sqrt{1 + (at/c)^2}}.$$

Dabei ist  $a$  die Beschleunigung, wie sie von einem Beobachter gesehen wird, der die gleiche Momentangeschwindigkeit wie das Teilchen hat. c) Bei nichtrelativistischer Rechnung würde das Teilchen die Geschwindigkeit  $v_1 = c$  nach der Zeit  $t_1 = c/a$  erreichen. Nach b) wird jedoch die wahre Geschwindigkeit für denselben Zeitpunkt  $t_1$ :  $v_1 = c/\sqrt{2} = 2,12 \cdot 10^8$  m/s.

**107** a) Zwilling A misst die Zeit  $t$ , Zwilling B die Zeit  $t'$ . B erfährt im Zeitintervall  $dt'$  den Geschwindigkeitszuwachs  $dv = a dt'$ , womit sich die geänderte Geschwindigkeit nach dem relativistischen Additionstheorem (vgl. Aufgabe 104) ergibt zu

$$v + dv = \frac{v + a dt'}{1 + \frac{v}{c^2} a dt'} \approx (v + a dt') \left( 1 - \frac{v}{c^2} a dt' \right) = v - \frac{v^2}{c^2} a dt' + a dt' - \frac{v}{c^2} a^2 dt'^2.$$

Das letzte, sehr kleine Glied zweiter Ordnung in  $dt'$  wird vernachlässigt, sodass man mit  $\beta = v/c$  erhält  $dv = c d\beta = a(1 - \beta^2) dt'$  oder nach Trennung der Variablen und Integration

$$\frac{d\beta}{1 - \beta^2} = \frac{a}{c} dt', \quad \int \frac{d\beta}{1 - \beta^2} = \frac{a}{c} \int dt', \quad \operatorname{artanh} \beta = \frac{a}{c} t' + C.$$

$C$  verschwindet, da für  $t' = 0$  die Geschwindigkeit  $v = 0$  sein soll. Damit wird

$$\beta = \frac{v}{c} = \tanh \frac{at'}{c}, \quad v = c \tanh \frac{at'}{c}.$$

Nach  $t' = 3a = 9,467 \cdot 10^7$  s (mit  $1a = 365,2422 \cdot 86\,400$  s =  $3,1557 \cdot 10^7$  s) hat demnach B die Geschwindigkeit  $v = 2,9871 \cdot 10^8$  m/s =  $0,9964c$ . b) Für A ist nach seiner Zeitrechnung (vgl. Aufgabe 106)

$$v = \frac{at}{\sqrt{1 + (a^2 t^2/c^2)}}, \quad \text{woraus folgt} \quad t = \frac{v}{a\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{c}{a} \sinh \frac{at'}{c}. \quad (1a,b)$$

Danach ist für ihn auf der Erde die Zeit  $t = 3,519 \cdot 10^8$  s = 11,15 a vergangen, und nach drei weiteren Perioden (Abbremsen des Raumschiffs auf  $v = 0$ , Umkehr und Rückkehr) insgesamt die Zeit  $4t \approx 44,6$  a, für seinen Bruder B im Raumschiff hingegen nur  $4t' = 12$  a. Der Altersunterschied beträgt also 32,6 Jahre. c) Der zurückgelegte Weg ergibt sich aus (1a) für den Beobachter A zu

$$s(t) = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{at dt}{\sqrt{1 + (a^2 t^2/c^2)}} = \frac{c^2}{a} \left( \sqrt{1 + \frac{a^2 t^2}{c^2}} - 1 \right).$$

Für  $t = 7,038 \cdot 10^8$  s (Umkehrzeitpunkt) wird  $s = 2,02 \cdot 10^{17}$  m  $\approx 21,4$  ly (Lichtjahre). Der nächstgelegene Fixstern, der  $\alpha$  Centauri, ist 4,3 ly von uns entfernt. Selbst wenn man annehmen würde, dass sich Photonenraketen mit  $v \approx c$  realisieren ließen, darf wohl eine Mission dorthin aus energetischen Gründen derzeit als unmöglich angesehen werden.

**108**  $z' = -z_0 \sin(kx' - \varphi)$  mit  $k = \omega/v = \text{const}$ ,  $\varphi = \omega x/v = \text{const}$  (Sinuskurve in der  $x'$ ,  $z'$ -Ebene).

**109** a) 5 m; b) 19,3 ns.

**110**  $0,8c$ .

**111** Mit  $u' = -0,8c$  wird  $u = 0,36c$ .

**112**  $0,946c$ .

**113**  $v/c = \sqrt{1 - (m_0/m)^2}$ ;  $v = 0,995c$ .

**114** a) Die Arbeit ist das skalare Produkt aus Kraft- und Verschiebungsvektor:

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F_x dx + F_y dy + F_z dz.$$

b) Mit den Beträgen beider Vektoren

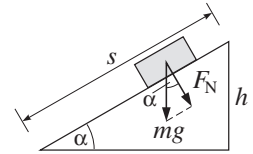
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}, \quad |d\mathbf{r}| = ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}$$

folgt aus der Definition des Skalarprodukts  $dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F ds \cos \alpha$ :

$$\cos \alpha = \frac{dW}{F ds} = \frac{F_x dx + F_y dy + F_z dz}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \cdot \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}}.$$

**115** (Bild) Es wird Hub- und Reibungsarbeit verrichtet. Erstere ist  $mgh$ , letztere  $\mu F_N s$ , wobei  $F_N = mg \cos \alpha$  die Normalkraft und  $s = h / \sin \alpha$  die Länge des Weges auf der schiefen Ebene ist:

$$W = mgh + \mu mgh \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = mgh(1 + \mu \cot \alpha) = mgs(\sin \alpha + \mu \cos \alpha).$$



Mit den Zahlenwerten folgt  $W = 61,85$  kJ. Während die Hubarbeit nur vom Höhenunterschied  $h$ , d. h. von Anfangs- und Endpunkt der Bewegung abhängt, ist die Reibungsarbeit von der tatsächlich zurückgelegten Wegstrecke  $s$  abhängig. Die Schwerkraft ist eine konservative, die Reibungskraft eine nichtkonservative Kraft.

**116** Die Gewichtskraft des bereits auf dem Tisch liegenden Teppichstücks der Länge  $x$  beträgt  $mg(x/l)$ , und die des überhängenden Stücks  $mg[1 - (x/l)]$ . Beim Hochziehen um  $dx$  wird zum einen die Reibungsarbeit  $\mu mg(x/l) dx$  verrichtet, zum anderen die Hubarbeit  $mg[1 - (x/l)] dx$ . Die insgesamt zu verrichtende Arbeit ist also

$$\begin{aligned} W &= \int_x^l \left\{ \frac{\mu mgx}{l} + mg \left(1 - \frac{x}{l}\right) \right\} dx = mg \int_x^l \left(1 - \frac{1-\mu}{l}x\right) dx \\ &= mg \left[ x - \frac{1-\mu}{2l}x^2 \right]_x^l = \frac{mgl}{2} \left\{ (1+\mu) - 2\frac{x}{l} + (1-\mu)\left(\frac{x}{l}\right)^2 \right\}. \end{aligned}$$

Mit den gegebenen Werten für  $W$ ,  $m$ ,  $l$  und  $\mu$  erhält man als Lösung dieser quadratischen Gleichung  $x/l = 0,5$  (die zweite Lösung scheidet aus), d. h., es ist  $x = l/2 = 1$  m.

**117** a) Aus  $V = (4/3)\pi r^3$  als Volumen der (kugelförmigen) Blase in einem Zwischenstadium beim Radius  $r$  folgt für die Volumenzunahme bei Vergrößerung des Blasenradius um  $dr$  (durch Differenziation)  $dV = 4\pi r^2 dr$ . Damit wird

$$dW = p dV = \frac{4\sigma}{r} \cdot 4\pi r^2 dr = 16\pi \sigma r dr.$$

Die Arbeit für die Erzeugung einer Blase mit dem Endvolumen  $V_0 = (4/3)\pi R^3$  ist somit

$$W_0 = \int_0^{V_0} p dV = 16\pi \sigma \int_0^R r dr = 8\pi \sigma R^2.$$

Mit  $R = 0,05$  m und  $\sigma = 0,064$  N/m folgt  $100 W_0 = 0,4$  J. b) Bei einer Seifenblase werden zwei Oberflächen der Größe  $4\pi R^2$  gebildet (innen und außen), insgesamt also die Fläche  $A_0 = 8\pi R^2$ . Es ist also  $W_0 = \sigma A_0$ , d. h., die verrichtete Arbeit ist der gebildeten Oberfläche proportional; sie wird in ihr als *Oberflächenenergie* gespeichert.

**118** a) Die Federkraft  $F$  ist (bei nicht zu großen Dehnungen) der Auslenkung  $x$  der Feder proportional:  $F = kx$  ( $k$  Federkonstante). Für die Dehnungsarbeit erhält man somit

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx = k \int_{x_1}^{x_2} x dx = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2).$$

Es ist  $k = F_1/x_1$  und  $x_2 = x_1 + s$  mit  $s = 10$  cm. Einsetzen in vorstehende Beziehung ergibt die ursprüngliche Auslenkung

$$x_1 = \frac{F_1 s^2}{2(W - F_1 s)} = 1,11 \text{ cm.}$$

b) Mit  $k = F_1/x_1 = 90$  N/m folgt als Endbelastung  $F_2 = F_1 + ks = 10$  N.

**119** Es ist Hub- und Beschleunigungsarbeit zu verrichten. Die Hubarbeit ist  $W_1 = mgh$ , die Beschleunigungsarbeit  $W_2 = mas$  mit  $s = h$  (Trägheitskraft mal Weg). Die Beschleunigung  $a$  folgt aus  $v = \sqrt{2as}$  zu  $a = v^2/(2s)$ , womit sich  $W_2 = mv^2/2$  ergibt. Man erhält also  $W_{\text{ges}} = W_1 + W_2 = 1,08$  MJ.

**120** Die gesamte anfänglich vorhandene Energie (potenzielle Energie  $mgh$  mit  $h = s_1 \sin \alpha$  und kinetische Energie  $mv_0^2/2$ ) wird in Reibungsarbeit umgewandelt:

$$mgs_1 \sin \alpha + \frac{mv_0^2}{2} = \mu_F mgs_1 \cos \alpha + \mu_F mgs_2 \quad (\text{Abrollberg und Horizontale}).$$

Daraus folgt  $v_0 = \sqrt{2g[\mu_F(s_1 \cos \alpha + s_2) - s_1 \sin \alpha]} = 3,5$  m/s = 12,6 km/h.

**121** (Bild) Es ist  $h = l(1 - \cos \varphi)$  und somit die potenzielle Energie des Pendelkörpers bei der Auslenkung  $\varphi$

$$E_p(\varphi) = mgh = mgl(1 - \cos \varphi).$$

Die kinetische Energie ist  $E_k(\varphi) = mv^2/2$  mit  $v = v(\varphi)$ . Es gilt der Energieerhaltungssatz

$$E_p(\varphi) + E_k(\varphi) = E_{\text{ges}} = \text{const.}$$

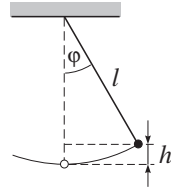
Für  $\varphi = 60^\circ$  (maximale Auslenkung) ist  $v = 0$  und somit  $E_k = 0$ ; es ist dann

$$E_{p,\text{max}} = E_{\text{ges}} = mgl(1 - \cos 60^\circ) = mgl/2 = 0,49 \text{ J.}$$

Für  $\varphi = 0^\circ$  ist  $E_p = 0$  und somit

$$E_{k,\text{max}} = E_{\text{ges}} = mgl/2 = mv_{\text{max}}^2/2; \quad v_{\text{max}} = \sqrt{gl} = 3,13 \text{ m/s.}$$

Für  $\varphi = 30^\circ$  wird  $E_p = 0,13$  J,  $E_k = E_{\text{ges}} - E_p = 0,36$  J und  $v = \sqrt{2E_k/m} = 2,68$  m/s.



**122** a) Ist  $x_m$  die maximale Stauchung der Feder, so ist die vom Körper insgesamt durchfallene Höhe  $h + x_m$  und demzufolge dessen Verlust an potenzieller Energie  $mg(h + x_m)$ . Diese geht im unteren Umkehrpunkt in Form von Spannarbeit  $kx_m^2/2$  vollständig in potenzielle Energie der Feder über:

$$mg(h + x_m) = \frac{kx_m^2}{2}, \quad x_m = \frac{mg}{k} + \sqrt{\left(\frac{mg}{k}\right)^2 + \frac{2mgh}{k}} = 203 \text{ mm.}$$

b) Nimmt man das obere Ende der unbelasteten Feder als Nullpunkt der potenziellen Energie, so teilt sich die Gesamtenergie  $mgh$  bei einer momentanen Stauchung  $x$  der Feder nach unten in die Anteile potenzielle Energie der Lage des Körpers  $-mgx$ , kinetische Energie des Körpers  $mv^2/2$  und potenzielle Energie der Feder  $kx^2/2$  auf:

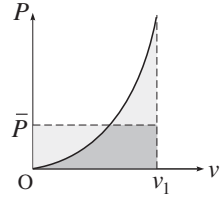
$$mgh = -mgx + \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}, \quad \text{woraus folgt} \quad v = \sqrt{2g(h+x) - (k/m)x^2}.$$

Für  $x_1 = x_m/2 \approx 0,1$  m erhält man  $v_1 = 7,8$  m/s. c) Die maximale Geschwindigkeit erhält man aus der Extremwertbedingung  $dv/dx = 0$ . Aus ihr folgt die zugehörige Stauchung  $x_2 = mg/k = 4,9$  mm und mit der Auftreffgeschwindigkeit  $v_0 = \sqrt{2gh}$  aus b):  $v_m = \sqrt{v_0^2 + mg^2/k} = 8,9$  m/s.  $x_2$  ist gleichzeitig die Stauchung im statischen Gleichgewicht.

**123** a) Bei gleichmäßiger Beschleunigung ist die Antriebskraft konstant, sodass wegen  $P = Fv$  die Momentanleistung  $P$  gleichmäßig mit der Momentangeschwindigkeit  $v$  zunimmt und bei Erreichen der Endgeschwindigkeit am größten ist. Die Durchschnittsleistung  $\bar{P}$  ist bei gleichmäßiger Beschleunigung

wegen  $\bar{v} = v/2$  (mittlere Geschwindigkeit) nur halb so groß wie die maximale Momentanleistung:  $\bar{P} = F\bar{v} = Fv/2$ . b) Bei konstanter Antriebsleistung  $P = Fv = \text{const}$  verhält sich die Antriebskraft reziprok zur Momentangeschwindigkeit. c) Aus  $F = m(dv/dt) = P/v$  folgt nach Integration  $mv^2/2 = Pt$  und daraus  $P = mv^2/(2t) = 66 \text{ kW}$ .

**124** a) Bei konstanter Geschwindigkeit  $v$  und damit konstantem Luftwiderstand  $F = \beta v^2$  ist die Momentanleistung  $P = Fv = \beta v^3$  (Bild). Für  $v_1 = (100/3,6) \text{ m/s}$  wird  $P_1 = \beta v_1^3 = 12,86 \text{ kW}$ . b) Für die durchschnittliche Leistung  $\bar{P}$  gilt



$$\bar{P}v_1 = \int_0^{v_1} P(v) dv \quad (\text{Flächengleichheit}),$$

$$\bar{P} = \frac{1}{v_1} \int_0^{v_1} P(v) dv = \frac{\beta}{v_1} \int_0^{v_1} v^3 dv = \frac{\beta v_1^3}{4} = \frac{P_1}{4} = 3,22 \text{ kW}.$$

**125** a)  $W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} = F_x s_x + F_y s_y + F_z s_z = 19 \text{ J}$ . b)  $F = 3,74 \text{ N}$ ;  $s = 6,16 \text{ m}$ ;  $\alpha = 34,5^\circ$ .

**126** 1,15 MJ. Der Weg spielt keine Rolle.

**127** a) 2,35 MJ; b) 654 W.

**128** 2943 J.

**129** a) 0,515 J; b) 1,5 kg.

**130**  $v = 198 \text{ m/s}$ ,  $v_0 = \sqrt{2}v = 280 \text{ m/s}$ .

**131**  $1,36 \text{ m/s}^2$ .

**132**  $0,46 \text{ m/s}$  (mit  $\eta = 0,36$ ).

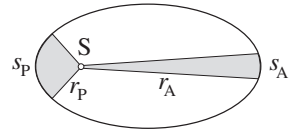
**133** a)  $29,4 \text{ kW}$ ; b)  $39,4 \text{ kW}$ .

**134**  $\Delta E_p = W = \int_0^{x_1} F dx = \beta x_1^3/3$ .

**135** Auf der Erde (Masse  $M_E$ , Radius  $R_E$ , Fallbeschleunigung  $g_E = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) ist die Gewichtskraft eines Körpers der Masse  $m$  gleich der Gravitationskraft:  $mg_E = \gamma m M_E/R_E^2$ , auf dem Mond (Masse  $M_M$ , Radius  $R_M$ , Fallbeschleunigung  $g_M$ ) ist für denselben Körper  $mg_M = \gamma m M_M/R_M^2$ . Es folgt somit

$$\frac{g_M}{g_E} = \frac{M_M}{M_E} \left( \frac{R_E}{R_M} \right)^2; \quad g_M = \frac{M_M}{M_E} \left( \frac{R_E}{R_M} \right)^2 g_E = 1,62 \text{ m/s}^2 \approx \frac{1}{6} g_E.$$

**136** (Bild) Es ist  $a = r_p/(1 - \varepsilon) = 2,686 \cdot 10^{12} \text{ m}$ , womit man  $r_A = 2a - r_p = 5,285 \cdot 10^{12} \text{ m}$  (jenseits der Bahn des Planeten Neptun) und  $b = a\sqrt{1 - \varepsilon^2} = 0,254a = 6,813 \cdot 10^{11} \text{ m}$  erhält. Die Bahn ist also eine sehr langgestreckte Ellipse. Nach dem 2. KEPLERSchen Gesetz überstreicht der Radiusvektor von der Sonne (S) zum Kometen in gleichen Zeiten gleiche Flächen, d. h., es gilt  $\Delta A/\Delta t = \text{const}$ . Bezogen auf einen vollen Umlauf mit  $A = \pi ab$  (Flächeninhalt der Ellipse) ist hier mit  $T \approx 2,4 \cdot 10^9 \text{ s}$  die sog. Flächengeschwindigkeit  $\Delta A/\Delta t = \pi ab/T = 2,396 \cdot 10^{15} \text{ m}^2/\text{s}$ . Werden die Flächen im Perihel und Aphel durch gleichschenkelige Dreiecke angenähert, erhält man mit  $s_p = v_p \Delta t$  und  $s_A = v_A \Delta t$



$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{r_p(v_p \Delta t)}{2 \Delta t} = \frac{r_A(v_A \Delta t)}{2 \Delta t} = \frac{r_p v_p}{2} = \frac{r_A v_A}{2} = 2,396 \cdot 10^{15} \text{ m}^2/\text{s},$$

woraus folgt  $v_p = 54,5 \text{ km/s}$  und  $v_A = 0,9 \text{ km/s}$ .

**137** Die auf einen Trabanten (Masse  $m$ ) wirkenden Kräfte, Gravitationskraft und Fliehkraft, halten sich das Gleichgewicht:  $\gamma m M/r^2 = m\omega^2 r$ . Mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi/T$  folgt das 3. KEPLERSche Gesetz

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{\gamma M} = k_M = 9,19 \cdot 10^{-13} \text{ s}^2/\text{m}^3.$$

$k_M$  ist die Zentralkörperkonstante des Mars. Damit erhält man für den Marsmond Phobos  $T_1 = \sqrt{k_M r_1^3} = 2,75 \cdot 10^4 \text{ s} = 7,6 \text{ h}$  und für Deimos  $T_2 = \sqrt{k_M r_2^3} = 10,9 \cdot 10^4 \text{ s} = 30,3 \text{ h}$ .

**138** a) Die große Bahnhalbachse der Sonde ist  $a_S = (r_P + r_A)/2 = 1,89 \cdot 10^{11}$  m, der Bahnradius der Erde ist  $a_E = r_P = 1,5 \cdot 10^{11}$  m. Mit  $T_S$  und  $T_E$  als Umlaufzeiten von Sonde und Erde um die Sonne folgt nach dem 3. KEPLERschen Gesetz  $(T_S/T_E)^2 = (a_S/a_E)^3$ :

$$T_S = T_E \sqrt{\left(\frac{a_S}{a_E}\right)^3} = (365,24 \text{ d}) \cdot 1,41 \approx 517 \text{ d}.$$

Die Flugdauer ist  $T_S/2 \approx 258$  d. b) Die potenzielle Energie der Sonde in der Entfernung  $r$  von der Sonne berechnet sich aus der Gravitationskraft zwischen Sonne (Masse  $M$ ) und Sonde (Masse  $m$ )  $F = \gamma m M / r^2$  zu

$$E_p = \int_{\infty}^r F \, dr = \gamma m M \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = -\frac{\gamma m M}{r}.$$

Die Gesamtenergie der Sonde als Summe aus kinetischer und potenzieller Energie ist somit

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} - \frac{\gamma m M}{r}.$$

Nach dem Energieerhaltungssatz  $E = \text{const}$  gilt für die Entfernungen  $r_P$  und  $r_A$

$$\frac{m}{2} v_P^2 - \frac{\gamma m M}{r_P} = \frac{m}{2} v_A^2 - \frac{\gamma m M}{r_A}.$$

Außerdem gilt der Drehimpulserhaltungssatz (zum Bahndrehimpuls s. Aufgabe 205)

$$m v_P r_P = m v_A r_A.$$

Mit  $v_A = v_P (r_P / r_A)$  und  $r_A = 2a_S - r_P = 2,28 \cdot 10^{11}$  m folgt aus dem Energiesatz

$$v_P^2 \left(1 - \frac{r_P^2}{r_A^2}\right) = \frac{v_P^2}{r_A^2} (r_A^2 - r_P^2) = \frac{v_P^2}{r_A^2} (r_A + r_P)(r_A - r_P) = \frac{2a_S v_P^2}{r_A^2} (r_A - r_P) = 2\gamma M \frac{r_A - r_P}{r_A r_P},$$

womit man als Einschussgeschwindigkeit  $v_P = \sqrt{\gamma M r_A / (a_S r_P)} = 32,7$  km/s (also nur  $\Delta v = 2,8$  km/s mehr als die Bahngeschwindigkeit der Erde, vgl. Aufgabe 140) und als Ankunfts geschwindigkeit  $v_A = v_P r_P / r_A = 21,5$  km/s erhält.

**139** a) Für den Satelliten (Masse  $m$ ) in der Höhe  $h$  über der Oberfläche der Erde (Masse  $M$ ) herrscht Kräftegleichgewicht zwischen Gravitationskraft und Fliehkraft:

$$\frac{\gamma m M}{(R+h)^2} = m \omega^2 (R+h) = m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 (R+h).$$

Hieraus folgt mit  $\gamma m M / R^2 = mg$ ,  $g = \gamma M / R^2$ :

$$\frac{gR^2}{(R+h)^2} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 (R+h); \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g} \left(1 + \frac{h}{R}\right)^3}.$$

Die Umlaufdauer nimmt also mit der Höhe zu. b) Es ist

$$v = \frac{2\pi(R+h)}{T} = \frac{2\pi R}{T} \left(1 + \frac{h}{R}\right) = \sqrt{\frac{gR}{1 + (h/R)}}.$$

Die Bahngeschwindigkeit nimmt dagegen mit der Höhe ab. c) Für  $h = 0$  wird  $v_1 = \sqrt{gR} = 7,91$  km/s und  $T_1 = 5066$  s = 1 h 24,4 min. d)  $T_M = 2,37 \cdot 10^6$  s  $\approx 27,4$  d und  $v_M = 1,02$  km/s. e) Ja; es gilt mit den obigen Gleichungen und  $M = \rho V = 4\pi \rho R^3 / 3$ ;  $\rho = 3\pi / (\gamma T_1^2) = 5500$  kg/m<sup>3</sup>.

**140** a) Die zum Verlassen des Schwerfeldes der Erde (bei Verbleib auf der Erdumlaufbahn um die Sonne) erforderliche kinetische Energie des Raumflugkörpers ist gleich der Arbeit gegen die Schwerkraft der Erde  $F_E = \gamma m M_E / r^2$  bei Wegbewegung des Flugkörpers von der Erdoberfläche ( $r = R_E$ ) bis in eine Entfernung  $s \gg R_E$  (auf der Erdbahn), in der  $F_E$  verschwindet:

$$\frac{m}{2} v_2^2 = \int_{R_E}^s F_E \, dr = \gamma m M_E \int_{R_E}^s \frac{dr}{r^2} = \gamma m M_E \left[-\frac{1}{r}\right]_{R_E}^s = \gamma m M_E \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{s}\right) \approx \frac{\gamma m M_E}{R_E}.$$

Wegen  $\gamma m M_E / R_E^2 = mg$  folgt hieraus  $v_2 = \sqrt{2gR_E} = \sqrt{2}v_1 = 11,2 \text{ km/s}$ . Der Flugkörper bewegt sich dann wie die Erde, jedoch in großem Abstand  $s$  von ihr, auf gleicher Umlaufbahn um die Sonne mit der mittleren Geschwindigkeit  $v_E = 2\pi r_E / T_E = 29,9 \text{ km/s}$ . Die Gravitationswirkung der Sonne braucht nicht berücksichtigt zu werden, da sie sich auf der Erdbahn nicht ändert.

b) Die Geschwindigkeit, die der im Abstand  $r_E$  von der Sonne befindliche Flugkörper haben muss, um die Gravitationskraft der Sonne  $F_S = \gamma m M_S / r^2$  überwinden zu können, die sog. Fluchtgeschwindigkeit  $v_F$ , berechnet sich analog zu  $v_2$ :

$$\frac{m}{2} v_F^2 = \int_{r_E}^{\infty} F_S \, dr = \frac{\gamma m M_S}{r_E}; \quad v_F = \sqrt{\frac{2\gamma M_S}{r_E}} = 42,1 \text{ km/s}.$$

Dies ist die Fluchtgeschwindigkeit im Bezugssystem der Sonne. In Bezug auf die Erde, die im Sonnensystem selbst bereits die Geschwindigkeit  $v_E$  hat, ist die Fluchtgeschwindigkeit  $v'_F = v_F - v_E = 12,2 \text{ km/s}$ . Um von der Erde aus das Sonnensystem verlassen zu können, muss das Gravitationsfeld der Erde und das der Sonne überwunden werden. Dazu benötigt der Flugkörper die kinetische Energie

$$\frac{m}{2} v_3^2 = \frac{m}{2} v_2^2 + \frac{m}{2} v_F^2, \quad \text{woraus folgt} \quad v_3 = \sqrt{v_2^2 + v_F^2} = 16,6 \text{ km/s}.$$

**141**  $T = \sqrt{3\pi/(\gamma\rho)} = 5066 \text{ s} \approx 1,4 \text{ h}.$

**142**  $M_S = 4\pi^2 r^3 / (\gamma T^2) = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}.$

**143** a)  $x = r \frac{\mu - \sqrt{\mu}}{\mu - 1} = 346\,024 \text{ km};$  b)  $v/v_2 = \sqrt{1 - R/x} = 0,9907 \approx 99\%.$

**144** a)  $T = 2\pi \sqrt{(R_M + h)^3 / (\gamma M_M)} = 6613 \text{ s} \approx 110 \text{ min};$  b)  $v = 1,67 \text{ km/s}.$

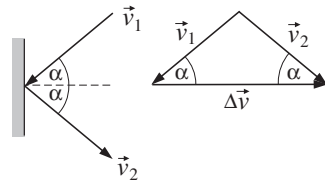
**145** Mit  $T_E = 365,24 \text{ d}$  als Umlaufdauer der Erde um die Sonne und  $a_M = (r_P + r_A)/2 = 57,9 \cdot 10^9 \text{ m}$  als große Halbachse der Merkurbahn wird  $T_M = T_E \sqrt{(a_M/a_E)^3} = 0,24 T_E \approx 88 \text{ d}.$

**146**  $h_S = \sqrt[3]{\frac{gR^2 T_0^2}{4\pi^2}} - R = 35\,880 \text{ km};$   $v_S = \sqrt{\frac{gR}{1 + (h_S/R)}} = 3,07 \text{ km/s}.$

**147** a)  $1,55 \cdot 10^{-4} \text{ m/s};$  b) Mit  $r_0 = 0,5 \text{ m}, R = 0,05 \text{ m}$  und  $z = \sqrt{R/(r_0 - R)} = 1/3$  gilt  $t = \sqrt{r_0^3 / (2\gamma m)} [\pi/2 + z/(z^2 + 1) - \arctan z] = 14991 \text{ s} \approx 4 \text{ h } 10 \text{ min}.$

**148** (Bild) Vor dem Stoß auf die Wand ist der Impuls des Moleküls gleich dem Vektor  $m\mathbf{v}_1$ , nach dem Stoß  $m\mathbf{v}_2$ . Die durch den Stoß bewirkte Impulsänderung ist gleich dem senkrecht zur Gefäßwand orientierten Vektor  $m(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) = m\Delta\mathbf{v}$ . Nach dem Rückstoßprinzip ist der auf die Wand übertragene Impuls  $-m\Delta\mathbf{v}$ . Für dessen Betrag folgt wegen  $|\mathbf{v}_1| = |\mathbf{v}_2| = v$ :

$$m\Delta v = 2mv \cos \alpha = 2,8 \cdot 10^{-23} \text{ N s}.$$



**149** Als Bezugssystem für alle Geschwindigkeiten wählen wir die Erde. a) Vor dem Schuss ist der Gesamtimpuls des Systems, bestehend aus Geschütz und Geschoss, gleich null, da deren Impulse für sich null sind. Da von außen keine Kräfte auf das System einwirken, gilt dies auch für den Gesamtimpuls nach dem Schuss (Impulserhaltungssatz):

$$m_1 v'_1 + m_2 v_0 = 0; \quad v'_1 = -\frac{m_2}{m_1} v_0 = -4,5 \text{ km/h}.$$

Das negative Vorzeichen besagt, dass sich das Geschütz nach dem Schuss in die der Schussrichtung ( $v_0$ ) entgegengesetzte Richtung bewegt.

b) Mit  $(m_1 + m_2)v_1$  als Gesamtimpuls des Systems vor dem Schuss gilt jetzt mit  $v_1 = 14,5 \text{ km/h}$ :

$$(m_1 + m_2)v_1 = m_1 v'_1 + m_2(v_0 + v_1), \quad \text{woraus folgt} \quad v'_1 = v_1 - \frac{m_2}{m_1} v_0 = 10 \text{ km/h}.$$

Wählt man anstelle der Erde das Geschütz (vor dem Schuss) als Bezugssystem, so sind alle Geschwindigkeiten gegenüber denen bezüglich der Erde um  $v_1$  kleiner, d. h., das Geschütz ist anfänglich in Ruhe, und

# Sachwortverzeichnis

Die in Klammern stehenden Zahlen sind **Aufgaben-Nummern**, die Zahlen dahinter **Seiten-Nummern**.

- $\alpha$ -Umwandlung (941, 952) 140, 142  
Abbildung, optische  
— durch Linsen (821–828, 835–845) 123–125  
— durch Spiegel (812, 813, 819, 820, 830, 831, 834) 122–124  
Abklingkonstante (696–699, 716–718, 720, 726–728) 107, 110, 111  
Abkühlungskurve (410) 66  
Ablenkung von Ladungsträgern (480, 614–617, 624, 625) 77, 95, 96  
absolute Temperatur (311, 315) 50, 51  
Absorptionsgrad (872, 902) 129, 134  
Additionstheorem der Geschwindigkeiten (relativistisches) (104, 107, 111, 112) 23, 24  
Adiabatexponent (366, 447) 59, 72  
Ähnlichkeit, hydrodynamische (300, 306) 49, 50  
Aktivität, spezifische Aktivität (947, 950, 956–960) 141–143  
Altersbestimmung (radioaktive) (950) 142  
aperiodischer Grenzfall (699) 107  
Äquivalenzdosis(leistung) (951, 960) 142, 143  
Arbeit  
— im elektrischen Feld (477, 484, 487, 488, 494, 497, 509) 77–79, 81  
— im magnetischen Feld (595, 607, 610, 613) 92, 94  
—, mechanische (114 ff., 140, 216, 219, 238, 241, 263, 302, 351 ff., 367 ff.) 25, 26, 28, 38, 39, 41, 42, 44, 49, 57–61  
ARCHIMEDisches Prinzip, s. Auftrieb  
ARRHENIUS-Beziehung (465) 74  
Atmosphärendruck, s. Luftdruck  
Atomhülle (910 ff.) 135, 136  
Atomkern (940 ff.) 140–143  
Atommodell (205, 605, 910) 37, 93, 135  
Aufenthaltswahrscheinlichkeit, s. Wahrscheinlichkeit(sdichte)  
Auflagerkraft (168, 181, 183–185, 196, 237) 32, 34, 36, 41  
Auflösungsvermögen (857–859, 870, 896) 127–129, 133  
Auftrieb(skraft) (259 ff., 320) 44, 45, 52  
Auge (837, 838, 858, 859) 125, 127, 128  
Ausdehnungsarbeit (360) 58  
Ausdehnungskoeffizient (321, 325, 326) 52  
—, scheinbarer (319) 51  
Ausfluss(ström)geschwindigkeit (288, 293, 329) 47, 48, 53  
Austrittsarbeit (891, 940) 132, 140  
Austrittsrate (eines Gases) (437) 70  
AVOGADRO-Konstante (431) 69  
 $\beta$ -Umwandlung (941, 945, 952) 140–142  
Balkenbiegung (229, 230, 236, 237) 40, 41  
ballistisches Pendel (154) 29  
Ballon(aufstieg) (264, 265, 328) 45, 53  
BALMER-Serie (900) 134  
barometrische Höhenformel (250, 251, 421, 467) 43, 68, 75  
Beleuchtungsstärke (882–886) 131  
Benetzung (272, 274, 277, 280) 45, 46  
BERNOULLische Gleichung (286 ff., 331) 47, 48, 53  
Beschleunigung  
—, bei der Kreisbewegung (44 ff.) 14–16  
—, bei geradliniger Bewegung (3 ff., 11 ff.) 9, 10  
Bestrahlungsstärke (871) 129  
BETHE-WEIZSÄCKER-Formel (943, 953) 140, 142  
Beugung  
— am Spalt (853) 127  
— am Strichgitter (854, 855, 866–868) 127–129  
— an einer kreisförmigen Öffnung (856, 869) 127, 129  
— von Elektronen am Doppelspalt (928) 137  
Beweglichkeit von Ladungsträgern (577–579, 590) 89–91  
Bewegungsgleichung (59, 64–66) 16–18  
—, relativistische (106) 24  
Bezugssystem (98 ff.) 22–24  
Biegung (elastische), s. Balkenbiegung  
Bimetallstreifen (317) 51  
Bindungsenergie (942, 953) 140, 142  
BIOT-SAVARTSches Gesetz (598–600) 92  
Blindleistung (672) 104  
Blindleistungskompensation (673, 729) 104, 111  
Blindwiderstand, s. Widerstand, elektrischer  
BOHRsches Atommodell (605, 910–912, 915, 918, 919, 921) 93, 135, 136  
BOLTZMANN-Konstante (431) 69  
BOLTZMANN-Statistik (901) 134  
BOLTZMANN-Verteilung (438) 71  
BOYLE-MARIOTTESches Gesetz (248, 249, 251, 265, 326, 330) 43, 45, 52, 53  
BRAGGsche Reflexion (898, 905) 133, 134  
Brechung  
—, elektronenoptische (897) 133  
— von elektrischen Feldlinien (502) 80  
— von Licht (811, 814, 846, 847) 121, 122, 126  
— von Materiewellen (897) 133  
Bremsstrahlung (914) 135  
BREWSTERScher Winkel (847, 848) 126

- Brille (826, 838) 124, 125  
 BROWNSche Molekularbewegung (434) 70  
 Brückenabgleich (545, 671) 85, 104  
 Brutreaktion (946) 141  
 BUNSENSches Ausströmungsgesetz (293, 329) 190, 195  
 CARNOT-Prozess (367, 368, 372, 376, 383, 390, 420) 59–62, 210, 216  
 CELSIUS-Temperatur (311–314) 50, 51  
 CLAUDIUS-CLAPEYRONsche Gleichung (411, 415, 421) 66, 68, 215  
 CLEMÉNT-DESORMES-Methode (366) 59  
 COMPTON-Effekt (893, 894, 904, 906) 132, 134  
 CORIOLIS-Kraft (90–92, 97) 21, 22  
 COULOMB-Gesetz (471, 472, 486) 76, 78  
 CURZON-AHLBORNScher Wirkungsgrad (367) 59  
 cw-Wert, s. Strömungswiderstand  
 Dampfdruck(kurve) (401, 408, 411, 412, 424) 65, 66, 68  
 Dampfdruck (312) 50  
 Dampftabelle (411) 67  
 Dämpfungskonstante (696) 107  
 DE-BROGLIE-Wellen, s. Materiewellen  
 Dehnung (elastische) (225–227, 231, 233, 234, 238, 241, 316) 40–42, 51  
 —, zulässige (228, 234) 40, 41  
 deutliche Sehweite (826, 828, 836, 837) 124, 125  
 Dichte (74, 246, 247, 251, 259, 260, 264, 320, 331, 400, 438) 19, 42–45, 52, 53, 65, 71  
 Dielektrikum im elektrischen Feld (498 ff., 508, 512, 517, 733) 79–82, 112  
 DIESEL-Prozess (374) 61  
 Diffusion(sgleichung) (465, 468) 75  
 —, instationäre (465, 466) 74, 75  
 —, stationäre (463, 464) 74  
 Dipolmoment (476, 591–594, 601–603, 605, 606) 91–93  
 Dispersion (749, 768, 769, 907) 114, 116, 135  
 Doppelleitung  
 —, LECHER-Leitung (797) 120  
 —, parallele (618, 660) 95, 102  
 DOPPLER-Effekt (751, 752, 766, 767) 114–116  
 Dosis (Äquivalentdosis) (951, 960) 142, 143  
 Drehimpuls(erhaltung) (138, 205, 206, 213, 216) 27, 37, 38  
 Drehmoment  
 — eines elektrischen Dipols (476) 76  
 — eines magnetischen Dipols (591, 602, 606) 91, 93  
 — eines Stromleiters im Magnetfeld (612, 621, 622) 94, 96  
 —, mechanisches (177 ff., 339) 33–35, 55  
 Drehschwingung, s. Schwingung(en)  
 Drehspulgalvanometer (621) 96  
 Drehwinkel-Zeit-Gesetz (48, 49) 15  
 Drehzahl (41, 46, 54, 203, 218, 223) 14–16, 37, 39  
 Driftdiffusion (467) 75  
 Driftgeschwindigkeit (467, 469, 576, 577) 75, 89  
 Druck (243, 245, 247 ff.) 42–44  
 —, dynamischer, s. Staudruck  
 —, in Gasen (327 ff.) 53, 54  
 Durchflutungsgesetz (596, 597, 604) 92, 93  
 Durchlassgrad (848, 902) 126, 134  
 Durchschlagspannung (511) 81  
 Effektivwert  
 — der elektrischen und magnetischen Feldstärke (802, 803, 807) 120, 121  
 — von Wechselspannungen und -strömen (665, 666, 674, 675) 102, 104  
 Eigenfunktion(en) (926, 931, 932, 939) 137–139  
 Eigenzeit (101, 109) 22, 24  
 EINSTEINSche Gleichung (891) 132  
 Eisenkern (magnetischer) (629–634, 637–642, 648, 650) 97–101  
 Eispunkt (312) 50  
 Elastizitätsmodul (225 ff., 233, 234, 242) 40–42  
 elektrischer Fluss (491 ff.) 78, 79  
 elektrisches Feld  
 —, atmosphärisches (493) 78  
 — einer Punktladung (473, 483, 485) 76–78  
 — eines geladenen Drahtes (492, 497) 78, 79  
 — in Stoffen (Dielektrika) (498–506) 79, 80  
 — zwischen zwei Punktladungen (488, 489) 78  
 elektrochemisches Äquivalent (580, 581, 586) 90  
 Elektrolyse (580–583, 585–590) 90, 91  
 Elektromagnet (632, 640) 97, 99  
 Elektromotor (575) 89  
 Elektronenbeugung (898, 905) 133, 134  
 Elektronendichte (576, 577, 584) 89, 90  
 Elektronenleitung (576, 577, 584) 89, 90  
 Elektronenmikroskop (896) 133  
 Elementarladung (473, 478–482, 484) 76, 77  
 Emissionsgrad (871, 872, 876, 878) 129, 130  
 Energie(erhaltung) (120 ff., 130, 138, 140, 151 ff., 160, 162, 214, 217, 222, 285) (Strömung) 25–31, 38, 39, 47, (345) (Wärme) 55  
 —, kinetische, s. kinetische –  
 —, potenzielle, s. potenzielle –  
 Energiedichte  
 — des elektrischen Feldes (499, 504, 508) 79–81  
 — des magnetischen Feldes (595, 649) 92, 100  
 — elektromagnetischer Wellen, s. Strahlungsdruck (Lichtdruck)  
 — von Schallwellen (794) 119  
 Energiestromdichte, s. Strahlungsintensität  
 Entmagnetisierungsfaktor (641) 99  
 Entmischung (386, 449) 63, 72  
 Entropie(änderung) (382 ff., 390, 402, 440) 62–65, 71  
 Entropiezunahme (384, 385, 397, 398) 63–65  
 Erdmagnetfeld (593, 656) 91, 101  
 Erregerschwingung, s. Schwingung(en)  
 Erwartungswert (929, 935, 937, 939) 137, 139



- erzwungene Schwingung, s. Schwingung(en)  
 Exergie (369, 390, 382, 386) 60, 64, 208, 209  
 Expansionsarbeit (352, 365) 57, 59
- Fallbeschleunigung (18 ff., 135) 11, 27  
 FARADAYSche Gesetze (580–582) 90  
 Federkonstante (63, 74, 118, 122, 129, 152, 233, 685, 689) 17, 18, 25, 26, 29, 41, 105, 106  
 Federkraft (63, 118, 129) 17, 25, 26  
 Feldenergie  
 —, elektrische (479, 480, 484, 485, 499, 504, 508, 522, 523, 564) 77–82, 88  
 —, magnetische (595, 607, 632, 638, 648) 92, 94, 97, 99, 100  
 Feldkraft  
 —, elektrische (471, 474, 478–480, 486) 76–78  
 —, magnetische (592, 594) auf Stromleiter:  
 (608–613, 618–620) auf Ladungsträger:  
 (614–617, 624, 625) 91, 92, 94–96  
 Feldstärke  
 — des elektrischen Feldes (473, 474, 476, 483, 491–494, 501, 507) 76–80  
 — des magnetischen Feldes (591–593, 600, 603–606, 627, 629–631) 91–93, 96, 97  
 FERMATSches Prinzip (810, 811) 121  
 FERMI-Energie (944) 140  
 Fettfleckphotometer (884) 131  
 Flächenladungsdichte (492, 493, 496) 78, 79  
 Flächenträgheitsmoment (229, 230, 236) 40, 41  
 Fliehkraft (88, 89, 96, 216) 21, 22, 38  
 Flussdichte  
 —, elektrische (491 ff., 499) 78, 79  
 —, magnetische (595, 600, 606, 614–616, 620–624, 626–633, 636, 637, 640, 641, 643, 644, 646) 92, 94–100  
 FOURIER-Analyse (732, 738) 112, 113  
 freier Fall (18, 19, 22–24, 26) 11, 12  
 Freiheitsgrad (416, 433, 447) 67, 70, 72  
 FRESNELSche Formeln (848, 861) 126, 128
- GALILEI-Transformation (98, 108) 23, 24  
 Gangunterschied (849) 126  
 Gasmisch (443, 448) 70, 72  
 Gaskonstante (431, 442, 448) 69, 71, 72  
 Gasthermometer (313) 51  
 GAY-LUSSACSches Gesetz (326) 52  
 Gefrierpunktniedrigung (425, 427) 69  
 Gegeninduktion, -induktivität (652) 101  
 GEIGER-MÜLLER-Zählrohr (516, 956) 82, 142  
 geometrische Optik, s. Strahlenoptik  
 Geschwindigkeit,  
 —, bei geradliniger Bewegung (1 ff., 10 ff.) 9, 10  
 —, bei der Kreisbewegung (41, 43 ff.) 14–16  
 Gewicht(skraft) (60, 70, 71, 86–88, 135) 17, 18, 20, 21, 27  
 GIBBSsche Phasenregel (416) 68  
 Gitterschwingungen (769, 901) 116, 134  
 Gleichgewichtsarten (194, 198) 36  
 Gleichgewicht(sbedingungen) (167, 168, 170, 174, 180–182, 185, 187, 188) 32–35  
 Gleichstromkreis (526 ff.) 83–91  
 Gleichverteilungssatz (433, 434, 446, 901) 70, 71, 134  
 Gravitation(sgesetz) (135 ff.) 27, 28  
 Gravitationswirkung (147, 472, 925) 28, 76, 136  
 Grenzwellenlänge  
 — beim Photoeffekt (891) 132  
 — des Röntgenspektrums (914) 135  
 Grundgesetz der Dynamik (58, 59) 16  
 Grundzustand (910, 911, 915, 917–919, 926, 935, 938) 135–137, 139  
 Gruppengeschwindigkeit (748, 749, 758, 768, 769, 907) 114–116, 135
- Haftspannung, Haftkraft (272, 277) 45, 46  
 HAGEN-POISEUILLESches Gesetz (297, 303) 49  
 Halbwertszeit (947–950, 955, 957) 142, 143  
 HALL-Effekt (576) 89  
 harmonischer Oszillator (681, 682, 901) 105, 134  
 I. Hauptsatz (351 ff.) 57 ff.  
 II. Hauptsatz (382 ff.) 62 ff.  
 Hebel (182, 188) 35  
 Hohlspiegel, s. Abbildung, optische  
 HOOKEsches Gesetz (225–227, 233–235, 316) 40, 41, 51  
 Hörbereich (770) 117  
 Hubarbeit (352) 57  
 Hydraulik (244) 42  
 Hysteresisschleife (628) 97
- Impedanz, s. Wechselstromwiderstand  
 Impuls(erhaltung) (148 ff., 159, 160) 29–31  
 —, (Strömung) (289) , 47  
 —, relativistischer (105, 106) 23, 24  
 Impulsmasse (105, 106, 113) 23, 24  
 Induktion  
 —, elektromagnetische (643–647, 654–657, 659–664) 99–102  
 —, magnetische (Feldgröße) s. Flussdichte  
 Induktivität  
 — einer Doppelleitung (660) 102  
 — einer Ringspule (Toroid) (648, 650) 100, 101  
 — einer Zylinderspule (652, 658) 101, 102  
 Inertialsystem (98 ff.) 22, 23  
 Innenwiderstand (526 ff., 536, 555) 83, 84, 86  
 innere Energie (351, 357, 360, 364, 402, 406, 413) 57–59, 65–67  
 Intensität  
 — elektromagnetischer Wellen (802–804, 807–809) 120, 121  
 — von Schallwellen (778–782, 790–795) 117–119  
 Interferenz  
 — von Licht (850–852, 862–865) 126–128  
 — von Wellen allgemein (745–748, 758–760) 114–116  
 — von Elektronen(wellen) (898, 905) 133, 134

- Ionenleitung (578–583, 586–590) 89–91  
Ionisierungsenergie (911) 135  
irreversibler Prozess (382, 384, 385, 387, 388, 396) 62–64  
isentrope Zustandsänderung (403) 65  
Isotop (941 ff.) 140–142
- JOULE-THOMSON-Prozess (404, 409) 65, 66
- Kalorimetrie (343–345, 347–350) 55, 56  
Kältemaschine (370, 372, 380) 60, 62  
Kapazität (507 ff.) 80–82  
Kapillarität (274, 280) 46  
Kastenpotenzial (926 ff.) 137–139  
KELVIN-Temperatur (315) 51  
KEPLERSche Gesetze (136 ff., 142 ff.) 27, 28  
Kernenergie (945, 946) 141  
Kernfusion (946) 141  
Kernreaktion (941, 945, 946, 952–954) 140–142  
Kernspaltung (945, 954) 141, 142  
Kernstabilität (942, 943, 953) 140, 142  
kinetische Energie (120–122, 130, 138, 140, 153–155, 214, 216, 217, 220, 221, 436) 25–30, 38, 39, 70  
Kippschwingung (-spannung) (552, 732) 86, 112  
KIRCHHOFFSche Gesetze (544, 545, 561) 85, 87  
Klemmenspannung (526 ff., 567, 569, 647) 83, 84, 88, 100  
Koaxialkabel (512, 513, 597, 649, 800, 801) 81, 92, 100, 120  
Kompassnadel (593, 594, 603) 91–93  
Kompressibilität (240, 246, 407) 41, 42, 66  
Kompressionsmodul, s. Kompressibilität  
Kompressor (359, 362) 58, 59  
Kondensatoren (507 ff.) 80–82  
Kondensatorentladung (551, 552) 86  
Kondensatorschaltungen (514, 515, 521–525) 81, 82  
Kontinuitätsgleichung (284, 286, 288, 294, 295) 47, 48  
Konzentration(sverteilung) (429, 465–467) 69, 75  
Kopfwelle (750) 114  
kosmische Geschwindigkeit (139, 140, 146) 28  
Kraft (57 ff., 125, 165 ff., 243) 16–18, 26, 31, 42  
Krafteck (167, 168) 32  
Kreisbewegung (40 ff.) 14–16  
Kreisprozess (367 ff., 379, 380, 383 f.) 59, 61–63  
Kreisstrom (600, 601, 605) 92, 93  
Kriechfall (699) 117  
kritische Größen (399, 400, 405) 65, 66  
KUNDTsche Röhre (775, 787) 117, 118  
Kurzschluss(strom) (527, 532, 537) 83, 84
- Längenkontraktion (relativistische) (100–102, 109, 110) 23, 24  
Laserlicht (809, 853, 890, 903) 121, 127, 132, 134  
Lautstärke(pegel) (779) 118  
Lebensdauer, mittlere (900, 909) 134, 135  
LE-CHATELIERSches Prinzip (423) 68  
LECHER-Leitung (797) 120  
Leerlauf(spannung) (527, 537) 83, 84  
Leitfähigkeit, elektrische (539, 540, 555, 577–579, 584, 590) 84, 86, 89–91  
Leitungselektronen (576, 577, 584) 89, 90  
Leitwert (539) 84  
—, induktiver und kapazitiver Blind- (668) 103  
—, Schein- (Admittanz) (668) 103  
Leistung  
— im Gleichstromkreis (564 ff.) 88, 89  
— im Wechselstromkreis (672, 673, 675) 104  
—, mechanische (123, 124, 132, 133, 218, 223, 291) 26, 27, 39, 48  
LENZsche Regel (644, 646) 99, 100  
Leuchtdichte (883, 887) 131  
Lichtausbeute (882) 131  
Lichtausstrahlung, spezifische (883, 887) 131  
Lichtbogen (542) 85  
Lichtdruck, s. Strahlungsdruck  
Lichtleistung (889) 132  
Lichtstärke (881–883, 886, 887) 130, 132  
Lichtstrom (881, 883, 887) 130, 131  
Linienbreite, natürliche (900, 909) 134, 135  
Linse, s. Abbildung, optische  
—, magnetische (615) 95  
LISSAJOUS-Figur (703, 722, 723) 108, 110  
logarithmisches Dekrement (697, 698, 717, 718, 735) 107, 110, 112  
Looping (88) 20  
LORENTZ-Kraft (614–617, 624, 625) 95, 96  
LORENTZ-Transformation (99) 22  
LOSCHMIDT-Konstante (431) 69  
Lösungen (424, 427, 429) 68, 69  
Luftdruck (atmosphärischer) (250, 251, 254 ff., 352 ff.) 43, 44, 57, 58  
Lupe (828, 836, 837) 124, 125
- MACHscher Kegel, MACH-Zahl, s. Kopfwelle  
Magdeburger Halbkugeln (73, 354) 18, 57  
magnetische Durchflutung (596, 597, 604) 92, 93  
magnetische Polarisierung, s. Polarisierung  
magnetischer Fluss (592, 602, 635, 636, 638, 643 ff.) 91, 93, 98 ff.  
magnetischer Kreis (630–634, 639, 640) 97–99  
magnetischer Widerstand (633, 634) 98  
magnetisches Feld  
— der Erde (593, 603) 91, 93  
— in Stoffen (626 ff.) 96–99  
— von Dipolen (591–595, 602, 603) 91–93  
— von Gleichströmen (596–601, 605–607) 92–94  
Magnetisierung (626, 627, 631) 96, 97  
Magnetron (617) 95  
Masse (86, 87) 20  
—, relativistische, s. Impulsenergie  
Massendefekt (942, 945, 946) 140, 141  
Massenmittelpunkt, s. Schwerpunkt  
Massenspektrometer (624) 96

- Massenträgheitsmoment (199–202, 208–210) 36–38  
 Materiewellen (895–898, 905–907) 133–135  
 maximale Arbeit (369, 389) 60, 63  
 MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilung (434, 435) 70  
 MAXWELL-Kriterium (401) 65  
 Meniskus (273, 274) 45, 46  
 Messbereichserweiterung (548, 549) 86  
 Mikroskop (815, 828, 859, 870) 122, 124, 128, 129  
 Mischgas (385, 398) 63, 65  
 Mischungsentropie (385) 63  
 Mischungstemperatur (343–345, 349) 55, 56  
 mittlere freie Weglänge (439) 71  
 mittlere quadratische Geschwindigkeit (432, 433, 446) 70, 71  
 molares Volumen (431) 69  
 Molmasse (427) 69  
 Molwärme (433) 70  
  
 NEWTONSche Axiome (57–59) 16  
 NEWTONSche Ringe (852, 864) 126, 128  
 Normalspannung (224, 225) 39, 40  
 Normzustand (333) 54  
 Nullpunktsenergie (899, 901, 908) 133–135  
 Nutzarbeit (352, 355, 358) 57, 58  
  
 Oberflächenladungen (492, 495–497, 500, 506) 78–80  
 — auf Dielektrika (Isolatoren) (500, 506) 79, 80  
 — auf Metallen (492, 495–497) 78, 79  
 Oberflächenspannung, -energie (272 ff.) 45, 46  
 OHMScher Widerstand, s. Widerstand  
 OHMSches Gesetz  
 — der Magnetostatik (633, 634, 639) 98, 99  
 — für Gleichstrom (526–537, 540) 83, 84  
 — für Wechselstrom (667, 668, 676) 103, 104  
 optische Weglänge (850) 126  
 osmotischer Druck (426, 429) 69  
 OTTO-Prozess (381) 62  
  
 Parallelresonanz (729, 731) 111, 112  
 Partialdruck (430, 432) 69, 70  
 PAULI-Prinzip (916) 136  
 Pendel, s. Schwingung(en)  
 Periode, Periodendauer (665, 666, 681, 685, 721, 732) 102, 105, 110, 112  
 Periodensystem der Elemente (922, 923) 136  
 Permeabilitätszahl (626 ff.) 96–99  
 Phase (Phasenwinkel), Phasenverschiebung  
 — von Schwingungen (682, 700, 701, 703, 704, 707, 722, 724, 729) 105, 108–111  
 — von Wechselspannung und -strom (667, 668, 670, 672, 673) 103, 104  
 — von Wellen (742–745, 753, 755, 757–759) 113–115  
 Phasengeschwindigkeit  
 —, allgemein (739, 742, 757) 113, 115  
 — von elektromagnetischen Wellen (796) 119  
 — von Schallwellen, s. Schallgeschwindigkeit  
 — von Strom- und Spannungswellen (801) 120  
 Phasen(gleichgewicht)  
 —, flüssig/dampförmig (412, 413) 67  
 —, fest/flüssig (415) 67  
 Phononen (769) 116  
 Photoeffekt (891, 892) 132  
 Photometrie (881 ff.) 130, 131  
 photometrisches Grundgesetz (884) 131  
 Photon (Energie, Impuls, Masse) (889–894, 900, 902, 903) 132, 134  
 physisches Pendel (202, 684) 37, 105  
 PLANCKSches Strahlungsgesetz (873, 874, 880) 129, 130  
 PLANCKSches Wirkungsquantum (873, 914) 129, 135  
 Plattenkondensator (480, 495, 498–500, 503–507, 509, 522) 77, 79–82  
 POISSONSche Querkontraktionszahl, s. Querkontraktion  
 Polarisation  
 — des Lichts (847, 848, 861) 126, 128  
 —, elektrische (500, 506) 79, 80  
 —, magnetische (626–628, 635–637) 96–98  
 Polarisationsgrad (848, 861) 126, 128  
 Polstärke, magnetische (592, 602, 635, 636, 638) 91, 93, 98, 99  
 polytrope Zustandsänderung (351, 359, 365) 56, 58, 59  
 Potenzial(differenz) (473, 475–477, 484, 488, 489, 492, 493, 512, 513, 519, 643, 656, 659) 76–78, 81, 82, 99, 101, 102  
 Potenzialtopf (933) 138  
 — -modell des Atomkerns (944) 140  
 potenzielle Energie  
 — im elektrischen Feld (473, 480, 485) 76–78  
 — im magnetischen Feld (614) 95  
 —, mechanische (120–122, 130, 134, 138, 140, 194) 25–28, 36  
 POYNTING-Vektor (802, 807) 120, 121, s. auch Strahlungsintensität (Energiestromdichte)  
 PRANDTL'Sches Staurohr, s. Staurohr  
 Prinzip des kleinsten Zwangs, s. LE-CHATELIERSches Prinzip  
 Prisma (816, 832) 122, 124  
 PRONYscher Zaun (218) 39  
 Punktladungssystem (475, 486, 488, 489) 76, 78  
 Pyknometer (261, 325) 44, 52  
  
 Quantenmechanik (926 ff.) 137 ff.  
 Querkontraktion (elastische) (239, 240) 42  
  
 Radialbeschleunigung (45, 47) 15  
 radioaktives Gleichgewicht (949) 141  
 radioaktive Strahlung (947, 950, 956, 959, 960) 141–143  
 radioaktive Zerfallsreihe (941, 948) 140, 141  
 Rakete (157, 158, 164) 30, 31

- RC-Glied (551, 552, 669) 86, 103  
 Reaktionsenergie (945, 946, 954) 141, 142  
 reduzierte Masse (688, 710, 915) 106, 109, 135  
 reduzierte Pendellänge, s. Schwingung(en)  
 reduzierte Zustandsgleichung (400) 65  
 Reflexion  
 — am dichteren und dünneren Medium (743, 747) 113  
 — am ebenen und Winkelspiegel (812, 813, 830) 112, 114  
 — an Hohl- und Wölbspiegel (819, 820, 830, 831, 834) 113, 114  
 —, Total- (817, 818, 832, 833) 112, 114  
 — von Licht (847, 848, 851, 852, 860–865) 116, 118  
 Reflexionsgesetz (810) 121  
 Reflexionsgrad (848, 902) 116, 134  
 Reibung(kraft) (9, 65, 75 ff., 115, 116, 120, 218) 10, 17, 19, 20, 25, 39  
 —, in Strömungen (297, 299, 302, 305, 307, 309) 49, 50  
 Reihenresonanz (728, 730, 731) 111, 112  
 Reißfestigkeit (86, 228, 234, 238, 316) 20, 40, 41, 51  
 Relativbewegung (27, 98 ff.) 12, 22–24  
 relative Atommasse (441) 71  
 Relativitätstheorie (99 ff.) 22, 23, 24  
 Resonanzbreite (Bandbreite) (730, 737) 112, 113  
 Resonanz(frequenz) (700, 719, 720, 737) 108, 110, 113  
 Resonanzrohr (764) 116  
 Resonanzschärfe (Güte) (731, 737) 112, 113  
 Resonatorschwingung, s. Schwingung(en)  
 Resultierende (166, 171 ff.) 32, 33  
 REYNOLDS-Zahl (298–300, 303) 49  
 Richtgröße, s. Federkonstante  
 RLC-Kombination (670, 679) 103, 104  
 Rolle (169, 170, 176) 32, 33  
 Röntgenstrahlung (913, 914, 920) 135, 135  
 Rotationsbewegung (203, 204, 211–213) 37, 38  
 Rotationsenergie (214, 216, 217, 221, 222) 38, 39  
 Rückstoß (149) 29  
 RUTHERFORD-Streuung (485) 78  
 RYDBERG-Frequenz (912, 913, 917, 920) 135, 136  
  
 Saite (777, 789) 117, 119  
 Sammellinse, s. Abbildung, optische  
 Sättigungsdruck (420) 68  
 Schalenbau der Atome (916, 922, 923) 136  
 Schalldämmung (780, 781) 118  
 Schall(wechsel)druck (778, 782, 794, 795) 117–119  
 Schallenergie, Schallleistung (782, 795) 118, 119  
 Schallgeschwindigkeit  
 — in Festkörpern (775, 776, 786) 117, 118  
 — in Gasen (772, 773, 784, 787) 117, 118  
 — in Wasser (774) 117  
 Schallintensität (778–782, 790–795) 117–119  
 Schallpegel (Schallintensitäts- oder Schalldruckpegel (778–782, 790–794) 117–119  
 Schallwellen (770–795) 117–119  
 Scheinleistung (672) 104  
 Scheinwiderstand, s. Wechselstromwiderstand  
 Scherung (elastische) (226, 235) 40, 41  
 Schmelzdruck(kurve) (415) 67  
 Schmelzen (388, 415, 422) 63, 67, 68  
 Schmelzwärme (340, 344) 55, 56  
 SCHRÖDINGER-Gleichung (926 ff., 932, 938, 939) 137–139  
 Schubmodul (225, 235, 239, 242) 40–42  
 Schubspannung (224, 225, 235) 39–41  
 Schwächungskoeffizient (951, 960) 142, 143  
 schwarzer Körper (871–875, 877–880) 129, 130  
 Schwebung (702, 721) 108, 110  
 Schwebungswelle, s. Welle(n)  
 Schweredruck (247, 253, 254, 256) 43, 44  
 Schwerkraft (60, 65, 467) 17, 75  
 Schwerpunkt (190 ff.) 35, 36  
 Schwingfall (699) 107  
 Schwingkreis, elektrischer (725–731, 733–737) 111–113  
 Schwingung(en)  
 —, charakteristische Größen (681, 682, 707) 105, 109  
 —, Dreh- (690–693, 711–713) 116, 117, 119  
 —, Eigen- (747, 761, 762, 764, 777, 787–789) 114, 116, 117–119  
 —, elektrische (725 ff.) 111–113  
 —, Energie von (694, 695, 709, 727, 901) 107, 109, 111, 134  
 —, Erreger- (700) 108  
 —, erzwungene (700, 719, 720, 728, 729) 108, 110, 111  
 —, Feder- (66, 685–690, 692, 694–696, 698, 708, 709, 714, 715, 718) 17, 105–107, 109, 110  
 —, Flüssigkeits- (699) 107  
 —, gedämpfte (696–699, 716–718, 726–728) 107, 110, 111  
 —, gekoppelte (689) 106  
 —, Gitter- (769, 901) 116, 134  
 —, harmonische (66, 74, 328, 330, 337, 338) 18, 19, 53, 54  
 —, mechanische (680 ff., 705 ff.) 105–110  
 —, Molekül- (689, 710) 106, 109  
 —, Pendel- (683, 684, 711, 717) 105, 109, 110  
 —, Resonator- (700, 720) 108, 110  
 —, Saiten- (777, 789) 117, 119  
 —, Überlagerung von (701–703, 721–724) 108, 110, 111  
 —, Zeigerdarstellung von (704, 724, 726–728) 108, 111  
 Schwingungsbäuche und -knoten (747) 114  
 Seifenblase (117, 276, 478, 519) 25, 46, 77, 82  
 Seilkraft (70, 87, 93, 94, 204) 18, 20, 21, 37

- Selbstinduktion (650, 651) 101  
 Serienformel des Wasserstoffspektrums (912) 135  
 Sieden (414, 421) 67, 68  
 Siedepunkterhöhung (424) 68  
 Sinkgeschwindigkeit (65, 299, 305, 310) 17, 49, 50  
 Skineffekt (798, 800) 120  
 Solarkonstante (808, 871) 121, 129  
 Sonnenstrahlung (871, 874, 875, 879) 129, 130  
 Spaltprodukte (945, 953, 954) 141, 142  
 Spannung, elektrische (475, 477, 481, 483, 484, 493, 498, 507, 508, 510, 511, 515, 525, 526 ff.) (Urspannung) 76–82, 16 ff.  
 Spannung, mechanische (224, 225, 231 ff.) 40, 41  
 —, zulässige (228, 232, 234, 238) 40, 41  
 Spannungsabfall (526, 534, 543, 560) 83, 85, 87  
 Spannungskoeffizient (326) 52  
 Spannungsquelle (526–530, 532, 533, 535–537, 555, 571) 83, 84, 86, 89  
 Spannungsteiler (546, 547, 561, 562, 672) 85, 87, 104  
 Spektrallinien des H-Atoms (912) 135  
 spezifische Ausstrahlung, s. Strahlungsflussdichte  
 spezifische Ladung (472, 480) 76, 77  
 spezifische Lichtausstrahlung (883, 887) 131  
 Spiegel, s. Abbildung, optische  
 Spiegelteleskop (829) 124  
 Spule  
 —, Anker- (647) 100  
 —, Gleichstromwiderstand einer (533) 86  
 —, Induktions-, Induktivität einer (648, 650–653, 657, 658, 663, 664) 100–102  
 —, Magnetfeld einer (607, 626, 629–634, 637–642) 96–99  
 —, Wechselstromwiderstand einer (676, 677) 104  
 Stabmagnet (592, 593, 595, 602, 635) 91–93  
 Statik (165 ff.) 31  
 statischer Druck, s. BERNOULLI'sche Gleichung  
 Staudruck (286, 287, 296) 47, 48  
 Staupunkt (331) 53  
 Staurohr (287, 296) 47, 48  
 STEFAN-BOLTZMANN'Sches Gesetz (871, 872, 876–878) 129, 130  
 stehende Wellen, s. Welle(n)  
 Stimmgabel (721, 748, 763, 764) 110, 114, 116  
 STIRLING-Prozess (373, 378) 60, 61  
 Stoffmengenstrom (463, 464, 470) 74, 75  
 STOKES'sches Gesetz (65, 299, 304, 310) 17, 49, 50  
 Stoß(gesetz) (150 ff., 162 ff.) 29, 30, 31  
 Stoßzahl (155, 163) 30, 31  
 Strahldichte, spektrale Strahldichte (873, 874, 875) 129, 130  
 Strahlenoptik (810 ff.) 121 ff.  
 Strahlungsdruck (Lichtdruck) (804, 808, 809, 890) 120, 121, 132  
 Strahlungsfluss, Strahlungsleistung (871, 872, 874, 876–879, 890, 891, 902) 128–129, 132, 134  
 Strahlungsflussdichte (spezifische Ausstrahlung) (871, 873) 129  
 Strahlungsgesetze (871–880) 129, 130  
 Strahlungsintensität (Energiestromdichte) (802–804, 807–809) 120, 121  
 Strichgitter, s. Beugung  
 Strömung  
 —, ideale (282 ff.) 47, 48  
 —, laminare (297–299, 303, 304, 310) 49, 50  
 —, reale (297 ff.) 49, 50  
 —, turbulente (298, 299) 49  
 Strömungsgeschwindigkeit (282, 284 ff., 290 ff., 297, 303, 306) 47–50  
 Strömungswiderstand (301, 302, 305–309) 49, 50  
 Superpositionsprinzip (27, 28) 12  
 Suszeptibilität (500, 506, 641) 79, 80, 82  
 Tangentialbeschleunigung (45, 47) 15  
 technische Arbeit (359) 58  
 Teilchenbeschleuniger (490, 614, 616, 617, 623–625) 78, 95, 96  
 Teilchenstrom (445) 71  
 Teleobjektiv (845) 125  
 Temperaturausgleich (341, 342) 55  
 —, irreversibler (388–390, 397) 63, 64  
 —, reversibler (358, 389, 397) 58, 63, 64  
 Temperaturkoeffizient (des elektrischen Widerstandes) (541, 557) 84, 87  
 Temperaturmessung (311, 313, 341) 50, 51, 55  
 Temperaturskala (311–315) 50, 51  
 Temperaturstrahlung (871 ff.) 129, 130  
 Termschema (926) 137  
 thermische Ausdehnung (316 ff.) 51, 52  
 thermodynamisches Gleichgewicht (358, 387) 58, 63  
 Thermometer (311, 313, 341) 50, 51, 55  
 thermonukleare Reaktion (946) 141  
 Torsionsschwingung(en), s. Schwingung(en)  
 Totalreflexion (817, 818, 832, 833) 122, 124  
 Trägheit(skraft) (86 ff.) 20, 21, 22  
 Trägheitsmoment, s. Massenträgheitsmoment, s. Flächenträgheitsmoment  
 Transformator (653, 664) 101, 102  
 Trennung der Veränderlichen (8, 9, 65, 107, 651) 145, 152, 160, 252  
 Tröpfchenmodell (943, 953) 140, 142  
 T, S-Diagramm (383) 62  
 Tunneleffekt (934, 940) 139, 140  
 Überdruck (329, 334, 335) 53, 54  
 Überlagerung von Bewegungen (27 ff.) 12–14  
 Umwandlungsenthalpie (410) 66  
 Unbestimmtheitsrelation, HEISENBERG'sche (899–901, 908) 133–135  
 Urspannung (526 ff., 569) 83, 84, 88  
 Vakuum (262, 356) 44, 57  
 VAN-DER-WAALS-Gas (403, 406) 65, 66  
 VAN-DER-WAALS-Gleichung (399 ff.) 65

- VAN-DER-WAALS-Konstanten (402, 405) 65, 66  
Verdampfungswärme (411, 428) 66, 69  
Verflüssigung (der Gase) (401, 404, 408, 409) 65, 66  
Vergrößerung  
— einer Lupe (836, 837) 115  
— eines Fernrohres (829, 842–845, 858) 124, 125, 127  
— eines Mikroskops (828, 859) 124, 128  
Verschiebungsstrom(dichte) (806) 121  
Viskosität,  
—, dynamische (297–299, 303, 304, 310) 49, 50  
—, kinematische (304, 306) 49, 50  
Volumenstrom(stärke) (282, 283, 286, 288, 290 ff.) 47, 48  
Wahrscheinlichkeit (thermodynamische) (440, 449) 71, 72  
Wahrscheinlichkeit(sdichte) (927–929, 931, 932, 936, 938) 137–139  
wahrscheinlichste Geschwindigkeit (435, 443) 70, 71  
Wärme (339, 351 ff., 413, 419, 440) 55, 57, 67, 68, 71  
Wärmedurchgang (454, 455) 73  
Wärmekapazität (339 ff., 363, 446, 448) 55, 56, 59, 72  
Wärmekraftmaschine (367, 368, 372, 375, 380) 59–62  
Wärmeleitung(sgleichung)  
—, stationäre (450–452) 72  
—, instationäre (457, 458, 461) 73, 74  
Wärmepumpe (371, 376, 377, 380) 60–62  
Wärmestrahlung, s. Temperaturstrahlung  
Wärmestrom (371, 376, 450) 60, 61, 72, 73  
Wärmeübergang (453) 72  
Wasserstoffatom (473, 605, 900, 918, 919) 76, 93, 134, 136  
Wasserstoffspektrum (912) 135  
Wasserstrahlpumpe (295) 48  
Wasserwellen (749, 756) 114, 115  
Wechselstrom (665–679) 102–104  
Wechselstromgenerator (647, 666) 100, 102  
Wechselstromwiderstand (667–671, 678, 679, 730) 103, 104, 112  
Wechselwirkungsenergie, magnetische (594) 92  
Welle(n)  
—, Brechung von (811, 814–816, 818, 846, 847, 861) 121–123, 126, 128  
—, charakteristische Größen (739, 740, 742) 113  
—, Dispersion von (749, 768, 769) 114, 116  
—, elektromagnetische (796 ff.) 119–121  
—, -funktion (740, 741, 743, 744, 747, 748, 755, 926 ff.) 113–115, 137 ff.  
—, Gruppengeschwindigkeit von (748, 749, 758, 768, 769) 114–116  
—, Reflexion von (743, 744, 747, 800, 812, 813, 817, 830, 832, 833, 847, 848, 860–862) 113, 114, 121–124, 126, 128  
—, Schall- (770 ff.) 117–119  
—, Schwebungs- (748, 758, 765) 114–116  
—, stehende (747, 761–764, 769, 777, 787–789) 114, 116  
—, Überlagerung (Interferenz) von (745–748, 758–760, 850–852, 862–865) 114–116, 126–128  
Wellen(differenzial)gleichung (796) 119  
Wellenoptik (846 ff.) 126–128  
Wellenpaket, Wellengruppe (748, 758, 768, 932) 114–116, 138  
Wellenwiderstand (799, 800) 120  
Welle-Teilchen-Dualismus (889 ff.) 132–135  
WHEATSTONE-Brücke (545) 85  
Widerstand, elektrischer  
—, Gleichstrom- (526 ff.) 83–87  
—, Kennlinie (542) 85  
—, magnetischer (633, 634) 98  
—, Messung (543–549, 562) 85, 87  
—, Netzwerke (538 ff.) 84–88  
—, nichtlinearer (542) 85  
—, OHmscher (526 ff., 667 ff.) 84–87, 103, 104  
—, Schein-, s. Wechselstromwiderstand  
—, spezifischer (538, 539, 553, 554, 568) 84, 86, 88  
—, Temperaturabhängigkeit (541, 557) 84, 87  
WIENSches Verschiebungsgesetz (875) 130  
Winkelbeschleunigung (46 ff.) 15, 16  
Winkelgeschwindigkeit (41 ff.) 14–16  
Winkelrichtgröße (219, 434, 690, 712) 39, 70, 106, 109  
Wirkungsgrad (352) 57  
—, der CARNOT-Maschine (367, 373) 59, 61  
—, thermischer (367, 373, 374, 378–381, 420) 59, 61, 62, 68  
Wirkwiderstand, s. Widerstand, elektrischer  
Wurf  
—, senkrechter (20, 23, 24, 26, 92, 130) 11, 12, 21, 26  
—, schiefer (29 ff.) 12–14  
Zeitdilatation (relativistische) (101, 102, 107, 109) 23, 24  
Zeitkonstante (651, 661) 101, 102  
Zentrifugalkraft, s. Fliehkraft  
Zerfallsgesetz (947, 950, 955) 141, 142  
Zerfallsreihe (941, 945) 140, 141  
Zustandsänderungen der Gase (326 ff.) 52–54  
Zustandsgleichung des idealen Gases (326 ff., 430) 52–54, 69  
—, des realen Gases, s. VAN-DER-WAALS-Gleichung  
Zweistoffsystem (416) 68  
Zwillingsparadoxon (107) 23  
Zyklotron (623) 96