

Inhaltsverzeichnis

KINEMATIK	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
DYNAMIK	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
STATIK UND DYNAMIK DES STARREN KÖRPERS	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
ELASTIZITÄT FESTER KÖRPER	39
224–237 Spannung, Dehnung, Scherung. HOOKESches Gesetz	39
238–242 Dehnungsarbeit. Volumenelastizität	41
MECHANIK DER FLÜSSIGKEITEN UND GASE	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
TEMPERATUR UND WÄRME	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
HAUPTSÄTZE DER THERMODYNAMIK	56
351–366 I. Hauptsatz. Zustandsänderungen der Gase	56
367–381 Kreisprozesse, Energieumwandlungen	59
382–398 II. Hauptsatz. Entropie	62
REALE GASE. PHASENUMWANDLUNGEN	65
399–409 VAN-DER-WAALSsche Zustandsgleichung	65
410–422 Phasenumwandlungen	66
423–429 Lösungen	68

GASKINETIK. AUSGLEICHSVORGÄNGE	69
430–449 Kinetische Gastheorie	69
450–462 Wärmeübertragung	72
463–470 Diffusion	74
ELEKTRISCHES FELD	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
GLEICHSTROMKREIS	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
MAGNETISCHES FELD	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
ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION. WECHSELSTROMKREIS	99
643–664 Induktionsgesetz. Selbstinduktion	99
665–679 Wechselstrom	102
SCHWINGUNGEN UND WELLEN	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
OPTIK	121
810–845 Strahlenoptik (Geometrische Optik)	121
846–870 Wellenoptik	126
871–880 Temperaturstrahlung	129
881–888 Photometrie	130
ATOME UND ATOMKERNE	132
889–909 Welle-Teilchen-Dualismus	132
910–925 Atomhülle	135
926–940 Quantenmechanik	137
941–960 Atomkern	140
Lösungen der Aufgaben	144
Sachwortverzeichnis	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 gedehlicher 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/cm³ für die Dichte von Eisen der Wert $7,8 \cdot 10^3$ kg/m³, 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 m/s abgefeuert. Man bestimme die Durchschnittsbeschleunigung im Geschützrohr, wenn dieses eine Länge von 150 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 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 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 km/h fährt, bremst vor einer Gefahrenstelle und verringert innerhalb von 5 Sekunden seine Geschwindigkeit gleichmäßig auf 18 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 s einen Weg von 720 m mit konstanter Beschleunigung zurück. Gesucht sind a) die Beschleunigung, b) die Geschwindigkeit, mit der es den Erdboden verlässt, c) der in der ersten und in der zwölften Sekunde zurückgelegte Weg.

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 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 Δt auf dem Boden auftreffen, nachdem die Schnur losgelassen wurde?

19 *Freier Fall (2)*

Ein frei fallender Körper passiert zwei 10 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 m/s senkrecht nach oben abgefeuert. Man berechne a) die Steigzeit der Rakete bis zur maximal erreichten Höhe, b) die maximale Höhe, c) die Momentangeschwindigkeit nach 40 s und nach 60 s , d) die Zeit, in der die Rakete eine Höhe von 7840 m erreicht! Die Rakete wird von Beginn ihrer Steigbewegung an als Wurfgeschoss betrachtet. Luftwiderstand wird vernachlässigt.

21 *Steigbewegung auf der schiefen Ebene*

Ein Skispringer fährt nach dem Aufsetzen mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 72 km/h einen Hang hinauf, der eine Steigung von 30° 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 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 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 m Höhe befindet, wird Ballast abgeworfen. Nach welcher Zeit erreicht dieser den Erdboden, wenn der Ballon mit der Geschwindigkeit 5 m/s a) sinkt, b) steigt? Luftwiderstand wird vernachlässigt.

25 Ein Schlitten gleitet reibungsfrei einen Hang hinab, der ein Gefälle von 30° 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 .

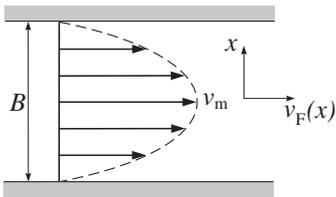
Überlagerung von Bewegungen. Schiefer Wurf

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



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

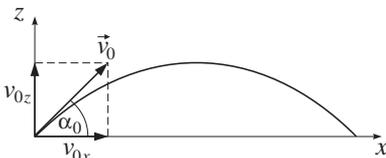
vom Maximalwert $v_m = 0,6 \text{ m/s}$ in Flussmitte ($x = 0$) auf null am Ufer ($x = \pm B/2$) ab.

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 α_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 \vec{v}_0 , v_{0x} und v_{0z} , drücke man durch v_0 und α_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 α_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 α_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

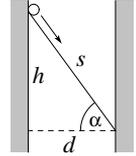
34 Ein Flugzeug legt eine Entfernung von 300 km in Richtung Osten zurück. Die Windgeschwindigkeit beträgt 20 m/s, die Geschwindigkeit des Flugzeuges relativ zur Luft 600 km/h. Wie lange dauert der Flug, wenn der Wind a) von Osten nach Westen, b) von Süden nach Norden, c) von Westen nach Osten weht?

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 α 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 φ 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° 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)

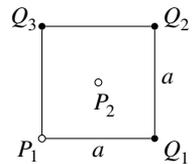
Der Kern des Wasserstoffatoms, das Proton, trägt eine positive Elementarladung. Man bestimme a) die Feldstärke E und das Potenzial φ auf der kernnächsten Elektronenbahn (Kreisbahn) mit dem sog. BOHRschen Radius $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ m (K-Schale). b) Welche Feldstärke- und Potenzialdifferenz besteht 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?

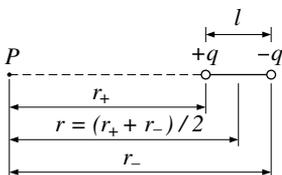
475 Potenzial eines Punktladungssystems. Potenzialdifferenz (Spannung)

(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 φ und Feldstärke E im Punkt P in der Entfernung $r = 1,50$ m vom Dipol? Wie groß sind φ 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

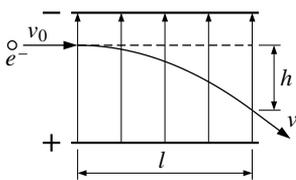
Eine Seifenblase mit dem Durchmesser $2r = 4 \text{ cm}$ sinkt in Luft mit der Geschwindigkeit $v = 3 \text{ cm/s}$ zur Erde (dynamische Viskosität von Luft bei 20°C : $\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$). Wie viele Elementarladungen e müsste sie tragen, um in einem lotrechten elektrischen Feld 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 α -Teilchens (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 m Entfernung von einer zweiten Ladung $50 \mu\text{C}$ und wird a) auf 50 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 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 cm ein Punkt A und 25 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 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 Ψ 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

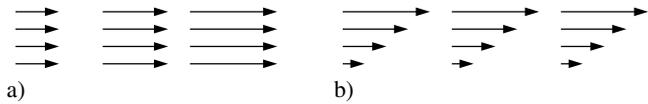
Auf die Oberfläche eines sehr langen, geraden Metalldrahtes von 2 mm Durchmesser werden Ladungen mit dem Ladungsbelag $Q' = Q/l = 90 \text{ nC/m}$ (Ladung je Längeneinheit) gebracht. Welchen Feldstärke- und Potenzialverlauf weist das vom Draht erzeugte Feld in seiner Umgebung (Luft) auf? Wie groß sind 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 σ der Erdoberfläche und welche (als homogen angenommene) Raumladungsdichte ρ der Atmosphäre folgt aus diesen Angaben? b) Welche Potenzialdifferenz U herrscht zwischen Erdoberfläche und 10 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 Ψ 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 σ ?

497 Eine 4 cm von einem langen, elektrisch geladenen Draht entfernte Punktladung $q = 6,69 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ wird auf 2 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 ϵ_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 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 Δt 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 Σ ist $v = 0,9c$, und die Geschwindigkeit des Elektrons in Bezug auf das Neutron (System Σ') ist $u' = 0,8c$. Die Geschwindigkeit des Elektrons in Bezug auf das Laborsystem Σ 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 $1a = 365,2422 \cdot 86400$ 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 α 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:

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

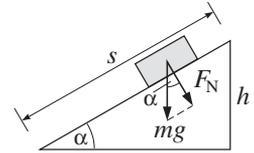
b) Mit den Beträgen beider Vektoren

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

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 μ 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 φ

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

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

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

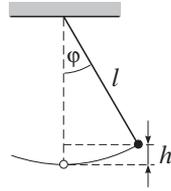
Für $\varphi = 60^\circ$ (maximale Auslenkung) ist $v = 0$ und somit $E_k = 0$; es ist dann

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

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.

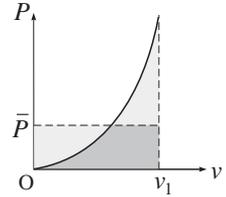
123 a) Bei gleichmäßiger Beschleunigung ist die Antriebskraft konstant, sodass wegen $P = Fv$ die Momentanleistung P gleichmäßig mit der Momentangeschwindigkeit v zunimmt und bei Erreichen der Endgeschwindigkeit am größten ist. Die Durchschnittsleistung \bar{P} ist bei gleichmäßiger Beschleunigung

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 $\eta = 0,36$).

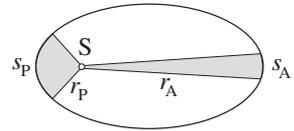
133 a) $29,4 \text{ kW}$; b) $39,4 \text{ kW}$.

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/m³.

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) $v = 1,67 \text{ km/s}.$

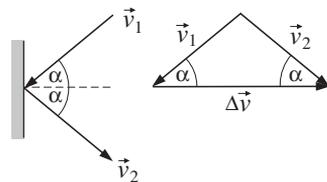
145 Mit $T_E = 365,24 \text{ d}$ als Umlaufdauer der Erde um die Sonne und $a_M = (r_P + r_A)/2 = 57,9 \cdot 10^9 \text{ m}$ als große Halbachse der Merkurbahn wird $T_M = T_E \sqrt{(a_M/a_E)^3} = 0,24 T_E \approx 88 \text{ d}.$

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**.

- α -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
 β -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
BERNOULLI'sche 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-SAVART'sches Gesetz (598–600) 92
Blindleistung (672) 104
Blindleistungskompensation (673, 729) 104, 111
Blindwiderstand, s. Widerstand, elektrischer
BOHR'sches Atommodell (605, 910–912, 915, 918, 919, 921) 93, 135, 136
BOLTZMANN-Konstante (431) 69
BOLTZMANN-Statistik (901) 134
BOLTZMANN-Verteilung (438) 71
BOYLE-MARIOTTE'sches Gesetz (248, 249, 251, 265, 326, 330) 43, 45, 52, 53
BRAGG'sche 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
BREWSTER'scher 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
CLAUSIUS-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
Dampfpunkt (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 Polarisaton, s. Polarisaton
 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. Impulsmasse
 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
 Nullpunktenergie (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(skraft) (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, Schalleistung (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