PHYSIK

Ergänzungen

für Klasse 11

Spezialschulen
mathematisch-
naturwissenschaftlich-
technischer Richtung

P H Y S I K

Ergänzungen für Klasse 11

Spezialschulen mathematisch-naturwissenschaftlich-technischer Richtung

Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1989

Autor:
Dr. Christian Hache

An der Auswahl der Aufgaben, der Ausarbeitung von Lösungen und der Erprobung dieses Materials waren Physiklehrer aller Spezialschulen mathematisch-naturwissenschaftlich-technischer Richtung beteiligt.

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt.

ISBN 3-06-021157-4

1. Auflage

Lizenz-Nr. 203·1000/89 (E 02 11 57-1)
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Polydruck, BT Coswig
Redaktion: Bärbel Grimm
Zeichnungen: Birgit Werwigk
Einband: Manfred Behrendt
Redaktionsschluß: 20. November 1988
LSV 0681
Bestell-Nr. 731 393 6
Schulpreis DDR: 3,20

Inhalt

Inhalt der Ergänzungen für Klassen 9 und 10

4.2. Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Grundlagen

Harmonische Wechselspannung:

$u(t) = \hat{U} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_u)$,

mit $u(t)$: Augenblicksspannung, $\hat{U}$: Amplitude, f : Frequenz, φ_u : Nullphase der Spannung.

Das Produkt $2\pi \cdot f$ heißt Kreisfrequenz ω.
Analoges gilt für die Stromstärke $i(t)$. Die Effektivwerte sind $U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ und $I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$.

Ohmsches Bauelement, Spule und Kondensator im Wechselstromkreis:

Am ohmschen Bauelement sind $u(t)$ und $i(t)$ stets proportional zueinander. Der Quotient der Effektivwerte $\frac{U}{I}$ ist gleich dem ohmschen Widerstand R, wie er sich auch im Gleichstromkreis ergibt. Zwischen Stromstärke und Spannung entsteht keine Phasenverschiebung. Die Differenz $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ der Nullphasen von Spannung und Stromstärke ist Null.

Eine ideale Spule mit der Induktivität L bewirkt beim Anlegen einer harmonischen Wechselspannung ein zeitliches Nacheilen des durch die Spule fließenden Stromes um eine viertel Periode ($\varphi = \frac{\pi}{2}$). Der Quotient $\frac{U}{I}$ wird als induktiver Blindwiderstand X_L bezeichnet. Es gilt:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L.$$

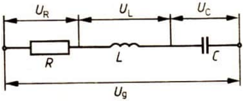
Bei einem verlustfreien Kondensator entsteht ein zeitliches Voraneilen des Stromes um eine viertel Periode ($\varphi = -\frac{\pi}{2}$).
Der kapazitive Blindwiderstand $X_C = \frac{U}{I}$ ergibt sich aus:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

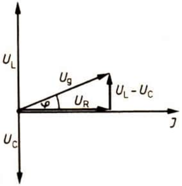
Zeigermethode:

In einem unverzweigten Wechselstromkreis können die Stromstärken und die Spannungen an den einzelnen Bauelementen durch Zeiger repräsentiert werden.
Die Richtung eines Zeigers bezüglich einer vereinbarten Ausgangslage dient der Widerspiegelung der Nullphase und seine Länge repräsentiert die Effektivwerte I bzw. U oder die Amplituden.

Reihenschaltung R - L - C



Spannungszeigerdiagramm
der Reihenschaltung R-L-C



Durch geometrische Addition der Zeiger der Teilspannungen erhält man den Zeiger der Gesamtspannung U_g und die Phasenverschiebung φ zwischen Gesamtspannung und Stromstärke:

$$U_g = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad \text{und} \quad \tan\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} .$$

Streckt man das Spannungszeigerdiagramm der Reihenschaltung in einer Ähnlichkeitstransformation mit dem Streckungsfaktor $\frac{1}{I}$, so entsteht das Widerstandszeigerdiagramm.

Der Gesamtwiderstand heißt Scheinwiderstand $Z = \frac{U_g}{I}$.

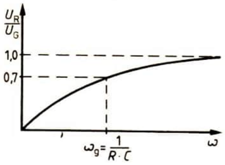
Aus dem <u>Widerstandszeigerdiagramm</u> gewinnt man

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \text{und} \quad \tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

<u>Hochpaß und Tiefpaß:</u>

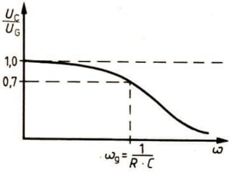
Legt man an eine Reihenschaltung aus ohmschem Bauelement und Kondensator eine harmonische Wechselspannung und greift (belastungsfrei) über dem ohmschen Bauelement die Spannung ab, so erhält man einen frequenzabhängigen Spannungsteiler, einen <u>Hochpaß</u>.

Die Spannungsteilung $\frac{U_R}{U_g}$ erreicht bei $2\pi \cdot f_g = \frac{1}{R \cdot C}$ den Wert $\frac{1}{\sqrt{2}}$ und nähert sich mit wachsender Frequenz dem Wert 1.

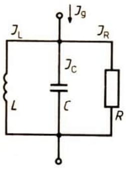


Greift man hingegen über dem Kondensator die Ausgangsspannung ab, so erhält man einen <u>Tiefpaß</u>.

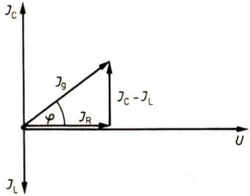
Hier geht $\frac{U_C}{U_g}$ gegen 1 für f gegen Null und $\frac{U_C}{U_g}$ gegen Null für wachsende Werte von f.



<u>Parallelschaltung R-L-C</u>



Stromstärkezeigerdiagramm
der Parallelschaltung R-L-C



Aus diesem Zeigerdiagramm ist ersichtlich, daß gilt:

$$I_g = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}.$$

<u>Leistung im Wechselstromkreis:</u>

Führt man am Spannungszeigerdiagramm der Reihenschaltung die Ähnlichkeitstransformation mit dem Streckungsfaktor I bzw. am Stromzeigerdiagramm der Parallelschaltung mit U durch, so entsteht jeweils das <u>Leistungszeigerdiagramm</u>.

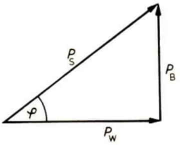
Die Gesamtleistung $P_S = U_g \cdot I_g$ wird als <u>Scheinleistung</u> bezeichnet, die Leistung an R heißt <u>Wirkleistung</u> P_W und die Leistung an L bzw. C <u>Blindleistung</u> P_B. Aus dem Leistungszeigerdiagramm entnimmt man

$$P_S = \sqrt{P_W^2 + P_B^2} \quad ,$$

$$P_W = P_S \cdot \cos\varphi$$

und

$$P_B = P_S \cdot \sin\varphi \ .$$



<u>Elektrischer Schwingkreis:</u>

Ist in einem Wechselstromkreis aus Spule und Kondensator der Sonderfall $X_L = X_C$ realisiert, so ist der durch Spule und Kondensator gebildete Schwingkreis in Resonanz zur Spannungsquelle. Geringe Dämpfung vorausgesetzt, geschieht das sowohl beim Reihen- als auch beim Parallelkreis bei der Frequenz

$f_o = \dfrac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$. Mit dieser Eigenfrequenz f_o schwingt ein verlustfreier Kreis nach einmaliger Energiezufuhr.

Elektromagnetische Wellen:

Breitet sich eine elektromagnetische Schwingung nach Ablösung von einer Antenne (Dipol) im Raum aus, so entsteht eine elektromagnetische Welle. Die elektrische Feldstärke und die magnetische Flußdichte ändern sich dabei zeitlich und räumlich periodisch.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c eines Schwingungszustandes (Phase) ist das Produkt aus Wellenlänge λ (räumlicher Periode) und Frequenz f (Reziprokes der zeitlichen Periode T):

$c = \lambda \cdot f.$

Bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen können Reflexion und Brechung sowie die wellentypischen Erscheinungen Beugung und Interferenz beobachtet werden.
Elektromagnetische Wellen eignen sich zur Informationsübertragung. Auf einen hochfrequenten Träger werden durch Amplituden-, Frequenz- oder Impulsmodulation die Informationen aufgeprägt. Das Signal wird vom Sender über eine Antenne abgestrahlt oder in eine Übertragungsleitung eingespeist. Beim Empfänger muß der gewünschte hochfrequente Träger mit Hilfe der Resonanz an einem Schwingkreis ausgewählt werden. Anschließend ist die Information durch Demodulation vom hochfrequenten Träger zu trennen.

Beispiel

Ein ohmsches Bauelement mit $R = 1{,}0\ k\Omega$ und ein Kondensator mit $C = 1{,}0\ \mu F$ sind in Reihe an den Ausgangsklemmen eines Wechselspannungsgenerators angeschlossen. Der Generator besitzt einen sehr geringen Innenwiderstand und kann bei beliebig einstellbarer Frequenz die konstante Ausgangsspannung mit dem Effektivwert $U_1 = 10$ V abgeben. Die Spannung über dem Kondensator wird mit einem Spannungsmesser mit dem Innenwiderstand von $10\ M\Omega$ gemessen. Ihr Effektivwert sei U_2.

Bei welcher Kreisfrequenz $\omega_G = 2\pi \cdot f_g$ erreicht das Verhältnis $\frac{U_2}{U_1}$ den Wert $\frac{1}{\sqrt{2}}$ und wie groß ist in diesem Falle die Phasenverschiebung zwischen der Gesamtspannung und der Kondensatorspannung?

Lösung:

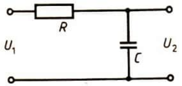
Gegeben: $R = 1{,}0\ \mathrm{k\Omega}$
$C = 1{,}0\ \mu F$
$U_1 = 10\ V$

Gesucht:
$\frac{U_2}{U_1}$ als Funktion von ω,

ω_G mit $\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$,

φ bei ω_G

Die Angaben über Generator und Spannungsmeßgerät berechtigen uns zur Annahme eines unbelasteten Spannungsteilers mit fester Eingangsspannung.



$\frac{U_1}{U_2}$ in Abhängigkeit von ω heißt Frequenzgang. Wir schreiben zur Abkürzung $g(\omega)$.

Mit $g(\omega) = \frac{X_C}{Z}$ und $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

gilt

$$g(\omega) = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} .$$

Kürzen wir durch $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$,

so entsteht schließlich

$$\underline{\underline{g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2 + 1}}}} .$$

Offenbar gibt es ein ω_G mit

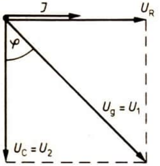
$$g(\omega_G) = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{\omega_G^2 \cdot R^2 \cdot C^2 + 1}}.$$

Diese Gleichung ist erfüllt für

$\omega_G = \frac{1}{R \cdot C}$.

Mit den gegebenen Zahlenwerten erhält man $\omega_G = 10^3 \cdot s^{-1}$, das ist eine Frequenz von etwa 160 Hz.

Über die Phasenbeziehungen gewinnt man mit Hilfe des Spannungszeigerdiagramms einen Überblick.



$$\tan \varphi = \frac{U_R}{U_C} = \frac{R}{X_C}$$

bei ω_G ist $X_C = R$ und

damit $\varphi = \frac{\pi}{4}$.

Ergebnis: Für den Frequenzgang $g(\omega) = \frac{U_2}{U_1}$ gilt an dem gegebenen Tiefpaß

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2 + 1}} .$$

Erhöht man die Kreisfrequenz ω auf $\omega_G = \frac{1}{R \cdot C}$, $\omega_G = 10^3 \cdot s^{-1}$, so ist der Effektivwert der Ausgangsspannung auf das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fache des Effektivwertes der Eingangsspannung abgesunken. Die Ausgangsspannung bleibt gegenüber der Eingangsspannung um $\frac{\pi}{4}$ zurück.

Aufgaben

4.2.1. Ein Kondensator soll bei Netzspannung (220 V, 50 Hz) als Vorwiderstand zu einer Glühlampe mit den Betriebsdaten 6,3 V und 0,1 A verwendet werden.

Welche Kapazität muß dieser Kondensator haben? Welchen Vorteil bietet die Verwendung eines Kondensators gegenüber einem ohmschen Bauelement?

4.2.2. An einer realen Spule, die als Reihenschaltung von ohmschem Bauelement und idealer Spule betrachtet werden kann, mißt man beim Anlegen einer Gleichspannung von 3,0 V eine Stromstärke von 0,25 A. Beim Anlegen einer Wechselspannung von U = 6,3 V und f = 50 Hz wird eine Stromstärke von 0,15 A gemessen.

a) Berechnen Sie den Scheinwiderstand Z, die Induktivität der Spule und die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke im Wechselstromfall!

b) Wie groß sind Wirk-, Blind- und Scheinleistung beim Betrieb mit Wechselstrom?

4.2.3. Ein ohmsches Bauelement mit R = 200 Ω, ein Kondensator mit C = 4,0 μF und eine Spule mit L = 0,1 H werden in Reihe geschaltet, und es wird eine Gesamtspannung mit dem Effektivwert U_g = 10 V und der Frequenz f = 150 Hz angelegt.

a) Berechnen Sie die drei Teilspannungen U_R, U_C und U_L sowie die Stromstärke I!

b) Zeichnen Sie das Spannungszeigerdiagramm!

c) Berechnen Sie die Phasenverschiebung zwischen der Gesamtspannung und den drei Teilspannungen sowie zwischen Gesamtspannung und Stromstärke!

4.2.4. Eine reale Spule hat einen ohmschen Widerstand von 15 Ω und eine Induktivität von 0,15 H.

a) Wie groß muß die Kapazität eines in Reihe geschalteten Kondensators gewählt werden, damit bei 50 Hz die Phasenverschiebung zwischen Gesamtspannung und Stromstärke $\frac{\pi}{4}$ beträgt? Skizzieren Sie das Widerstandszeigerdiagramm!

b) In welchem Intervall ändert sich die Phasenverschiebung, wenn bei Verwendung des unter a) berechneten Kondensators die Frequenz zwischen 10 Hz und 1,0 kHz geändert wird?

4.2.5. Zu einem ohmschen Bauelement mit dem Widerstand R wird ein Kondensator der Kapazität C in Reihe geschaltet.

a) Welche geometrische Figur entsteht, wenn man im Widerstandszeigerdiagramm die Pfeilspitzen der Zeiger für den jeweiligen Scheinwiderstand verbindet, die sich für $0 \leq f < \infty$ ergeben?

b) Bei welcher Frequenz ist die Phasenverschiebung zwischen Gesamtspannung und Stromstärke $\frac{\pi}{4}$, wenn $R = 5{,}1\ \mathrm{k\Omega}$ und $C = 4{,}0\ \mu F$ gewählt werden?

4.2.6. Für einen R-C-Tiefpaß ist das Verhältnis $g = \frac{U_C}{U_g}$ für verschiedene Paare R, C jeweils in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$ in einem Koordinatensystem darzustellen (Frequenzgang). Die Grenzfrequenz ω_G ist auf der Frequenzachse zu markieren.

a) $R_1 = 0{,}01\ \mathrm{k\Omega}$, $C_1 = 100\ \mu F$

b) $R_2 = 1{,}0\ \mathrm{k\Omega}$, $C_2 = 1{,}0\ \mu F$

c) $R_3 = 100\ \mathrm{k\Omega}$, $C_3 = 0{,}01\ \mu F$

4.2.7. Aus einem ohmschen Bauelement mit $R = 2{,}0\ \mathrm{k\Omega}$ und einem Kondensator mit $C = 0{,}1\ \mu F$ wird ein R-C-Hochpaß aufgebaut. Stellen Sie die Phasenverschiebung zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung als Funktion der Frequenz grafisch dar!

4.2.8. Schalten Sie einen R-C-Hochpaß und einen R-C-Tiefpaß jeweils mit $R = 1{,}0\ \mathrm{k\Omega}$ und $C = 1{,}0\ \mu F$ hintereinander (Wienscher Spannungsteiler)!
Äußern Sie eine Vermutung über den Frequenzgang (Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz) der gesamten Schaltung und berechnen Sie die Frequenz, bei der das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung maximal wird! Nehmen Sie den Frequenzgang experimentell auf! Vergleichen Sie Ihre Vermutung mit dem Ergebnis Ihrer Rechnung! Nutzen Sie nach Möglichkeit für die Rechnung und die grafische Darstellung einen Kleincomputer!

4.2.9. An einem Niederfrequenzgenerator mit der Leerlaufspannung 10 V und dem Innenwiderstand $10\ \Omega$ wird eine Reihenschaltung aus einer realen Spule ($R_L = 10\ \Omega$, $L = 0{,}1\ H$) und einem Kondensator ($C = 4{,}0\ \mu F$) angeschlossen.

a) Bestimmen Sie die Funktionen Z(f) und I(f)!
Zeichnen Sie die Graphen dieser Funktionen!

b) Berechnen Sie die Spannungen über der Spule und dem Kondensator im Falle maximaler Stromstärke!

c) Stellen Sie nach Möglichkeit mit Hilfe eines Kleincomputers den Grapen der Funktion I(f) für verschiedene Werte R, L, C dar! Untersuchen Sie insbesondere den Einfluß von R bei festen Werten für L und C sowie bei festem R und festem Wert des Produktes $L \cdot C$ den Einfluß des Quotienten $\frac{L}{C}$ auf den Verlauf des Graphen der Funktion I(f)!

5. Optik

5.1. Wellenoptik

Grundlagen

Reflexion und Brechung:

Reflexion und Brechung des Lichtes treten an der Grenze optisch verschiedener Medien auf.
Für die Brechung gilt:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \ .$$

(α : Einfallswinkel zwischen Einfallslot und Normale der einfallenden Welle, β : Brechungswinkel zwischen Normale der gebrochenen Welle und Lot, c: Lichtgeschwindigkeit)

Die Brechzahl n eines Stoffes wird im Vergleich mit dem Vakuum festgelegt:

$$n_{Stoff} = \frac{c_{Vakuum}}{c_{Stoff}}$$

Für die Reflexion gilt:

$\alpha = \alpha'$. (α : Einfallswinkel, α' : Reflexionswinkel)

Für die Brechung und Reflexion gilt:
Die Normalen und das Einfallslot liegen jeweils in einer Ebene.

Überschreitet im Falle $c_2 > c_1$ der Einfallswinkel α den Wert α_G (Grenzwinkel der Totalreflexion), so erfolgt an der Grenzschicht totale Reflexion.

Die Brechzahl eines Stoffes ist abhängig von der Wellenlänge des Lichtes.

Interferenz:

Interferenz ist die Überlagerung kohärenter Wellen. Das Interferenzbild an einem Ort ist abhängig vom Gangunterschied Δ, der die Differenz der optischen Weglängen ist. Man unterscheidet zwischen geometrischer Weglänge s und optischer Weglänge s_o. Es gilt $s_o = n \cdot s$ (für n = konst.).

Für Orte maximaler Verstärkung muß gelten

$$\Delta = k \cdot \lambda\ ,$$

für Orte maximaler Abschwächung

$$\Delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ (k ganzzahlig, } \lambda \text{ : Wellenlänge).}$$

Bei Interferenz am Doppelspalt (auch am Gitter) gilt für das k-te Maximum der Verstärkung die Näherung:

$$\frac{k \cdot \lambda}{a} = \frac{s_k}{e} = \sin \alpha_k \approx \tan \alpha_k \quad (\text{für } s_k \ll e).$$

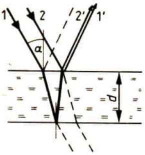
(e: Entfernung Doppelspalt - Maximum auf dem Schirm, s_k: Abstand Maximum - optische Achse, a: Spaltabstand bzw. Gitterkonstante, α_k: Winkel zwischen optischer Achse und Richtung des k-ten Maximums)

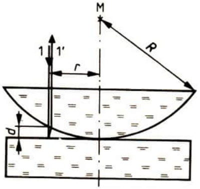
Die Interferenz an dünnen Schichten führt bei

$2d \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ (d: Schichtdicke) zur Verstärkung

und bei $2d \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = k \cdot \lambda$ zur Abschwächung des reflektierten Lichtes. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei Reflexion am optisch dichteren Medium ein Phasensprung von $\frac{\lambda}{2}$ eintritt.

Bei geeigneten Reflexionsbedingungen an den Grenzflächen tritt die Interferenz beim durchgehenden Licht deutlicher auf. Da hierbei der Phasensprung im allgemeinen fehlt bzw. doppelt auftritt, vertauschen die angegebenen Formeln ihre Rolle.





Newtonsche Ringe sind ein System abwechselnd heller und dunkler konzentrischer Kreise. Sie entstehen durch Interferenz von Licht der Wellenlänge λ an der dünnen Schicht, die sich ausbildet, wenn eine sphärische Linse auf einer Glasplatte liegt. Bei Beobachtung des reflektierten Lichtes gilt für die Radien der hellen Ringe (Orte der Verstärkung):

$$r_k^2 = (2k + 1) \cdot \lambda \cdot \frac{R}{2} .$$

Für die Radien der dunklen Ringe (Orte der Abschwächung) gilt:

$$r_k^2 = k \cdot \lambda \cdot R.$$

(k = 0, 1, ..., r: Radius eines hellen bzw. dunklen Ringes,
R: Radius der sphärischen Linse)

Polarisation:

Tritt Licht von einem lichtdurchlässigen Dielektrikum in ein anderes, so ist der reflektierte Anteil genau dann linear polarisiert, wenn die Normalen von reflektiertem und gebrochenem Anteil senkrecht aufeinander stehen. Der entsprechende Einfallswinkel heißt Brewsterscher Winkel oder Polarisationswinkel α_p. Es gilt $\tan \alpha_p = n$.

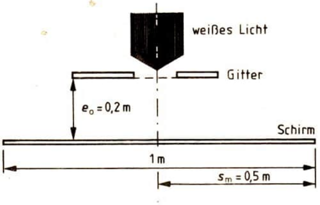
Beim Durchgang durch bestimmte Kristalle (doppelbrechend) kann das Licht in zwei zueinander senkrecht polarisierte Anteile zerlegt werden, für die auch unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten gelten und die zum Teil unterschiedlich stark absorbiert werden.

Einige Stoffe (z. B. Zucker, flüssige Kristalle) vermögen die Polarisationsebene zu drehen. Sie heißen optisch aktiv.

Beispiel

Bei einem Interferenzexperiment fällt weißes Licht einer Wolframlampe durch ein Gitter mit der Gitterkonstante $a = 1{,}2\ \mu m$. Ein 1,0 m breiter Schirm befindet sich senkrecht und symmetrisch zur optischen Achse in einer Entfernung von 0,2 m hinter dem Gitter.

Welche Lichterscheinung sieht ein Beobachter auf dem Schirm?



Lösung:

Gegeben: $a = 1{,}2\ \mu m$
$e_o = 0{,}2\ m$
Schirmbreite $2\ s_m = 1\ m$

Gesucht:
Interferenzbild auf dem Schirm

Zunächst ergibt sich in der Schirmmitte (optische Achse) für alle Lichtanteile, unabhängig von ihrer Wellenlänge, der Gangunterschied Null. Deshalb ist dort ein weißer Lichtstreifen zu beobachten (Maximum nullter Ordnung oder Hauptmaximum). Für Beobachtungsorte, die spiegelsymmetrisch neben der optischen Achse liegen, ergibt sich in Abhängigkeit vom Beobachtungsort und der Wellenlänge des Lichtanteils ein Gangunterschied. Entsprechend der Gleichung

$$\frac{k \cdot \lambda}{a} = \frac{s_k}{e} = \sin \alpha_k \qquad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots)$$

kann ermittelt werden, an welchem Ort für Licht einer bestimmten Wellenlänge die Verstärkungsbedingung erfüllt ist, also Licht der entsprechenden Farbe auftritt.

Wegen der geometrischen Bedingungen kann die Interferenzerscheinung nur bis zu einem maximalen Winkel $\alpha_m = \arctan(\frac{s_m}{e_o})$ beobachtet werden. Mit den gegebenen Werten gilt $\alpha_m = 68{,}2^\circ$.

Sichtbares Licht umfaßt etwa den Wellenlängenbereich von 400 nm (violett) bis 780 nm (dunkelrot).

Mit den Gleichungen

$$\frac{k \cdot \lambda}{a} = \sin \alpha_k \quad \text{und} \quad s_k = e_o \cdot \tan \alpha_k$$

können jeweils die Orte bestimmt werden, an denen violettes und rotes Licht das gesamte Spektrum der Regenbogenfarben begrenzen.

Ergebnis: Für k = 1 erhält man ein erstes Mal die Spektralfarben von

violett bei $\alpha_{1v} = 19{,}47^\circ$, $s_{1v} = 7{,}07$ cm bis

rot bei $\alpha_{1r} = 40{,}5^\circ$, $s_{1r} = 17{,}1$ cm.

Für k = 2 erhält man ein zweites Spektrum:

violett bei $\alpha_{2v} = 41{,}8^\circ$, $s_{2v} = 17{,}9$ cm.

Rot erscheint nicht mehr. Das Spektrum endet am Rande des Schirmes bei Licht der Wellenlänge 557 nm.

Aufgaben

5.1.1. Wie groß ist der Brechungswinkel beim Übergang von Luft in Ethanal, wenn reflektiertes und gebrochenes Licht einen Winkel von 120° einschließen? (n = 1,36)

5.1.2. Wie groß ist der Einfallswinkel von Licht, das aus Luft in Wasser übergeht, wenn der Winkel zwischen den Normalen der reflektierten und der gebrochenen Lichtwelle 90° beträgt?

5.1.3. Bei einem Interferenzexperiment mit einem Gitter wurde auf dem Schirm für Licht der Wellenlänge λ_1 = 700 nm das erste Maximum in 5 mm Entfernung vom Hauptmaximum gemessen.
Wie groß ist die Wellenlänge eines anderen Lichtanteils, dessen drittes Maximum 13 mm vom Hauptmaximum entfernt ist?

5.1.4. Monochromatisches Licht der Frequenz $5{,}0 \cdot 10^{14}$ Hz fällt durch ein Gitter mit der Gitterkonstante 50 μm. Auf einem Schirm, der sich in 500 cm Entfernung vom Gitter befindet, soll das Interferenzbild aufgefangen werden.
Ermitteln Sie den geometrischen und den optischen Gangunterschied für einen Punkt, der 30 mm vom Maximum nullter Ordnung entfernt ist, wenn die Experimentieranordnung

a) in Luft und
b) in Wasser angeordnet wird!
c) Wie ändert sich der Abstand zwischen den Maxima erster und zweiter Ordnung beim Eintauchen in Wasser?

5.1.5. Welche kleinste Dicke muß ein Plättchen (n = 1,54) haben, damit es bei senkrechter Beleuchtung mit Licht der Wellenlänge 750 nm im reflektierten Licht a) hell, b) schwarz erscheint?
Welche Dicke müßte es jeweils besitzen, wenn das Licht unter einem Winkel von 30° einfällt?

5.1.6. Ein Glaskeil besitzt einen Keilwinkel von 1°. Er wird mit Licht der Wellenlänge 600 nm unter einem Winkel von 45° beleuchtet.
In welchem Abstand voneinander befinden sich benachbarte helle Streifen im reflektierten Licht?
Nutzen Sie mögliche Näherungen wegen der Kleinheit des Keilwinkels!

5.1.7. Bei der Beobachtung von Newtonschen Ringen im reflektierten Licht betrug der Durchmesser des vierten dunklen Ringes 14,4 mm.
Bestimmen Sie die Wellenlänge des verwendeten Lichtes, wenn das Licht senkrecht auftrifft und die Linse einen Krümmungsradius von 22 m hat!

5.1.8. Wie groß ist der Durchmesser des zweiten hellen Interferenzmaximums, wenn die Beobachtung Newtonscher Ringe mit Licht der Wellenlänge 700 nm (senkrecht) erfolgt und die Linse einen Krümmungsradius von 6,4 m besitzt?
Wie würde sich der Durchmesser des Ringes ändern, wenn die Anordnung in Wasser getaucht wäre? (Die Beobachtung erfolgt jeweils im reflektierten Licht!)

5.1.9. Wie groß ist der Polarisationswinkel für den Übergang des Lichtes von Wasser in Glas, und wie groß ist er für den Übergang von Glas in Diamant?

5.1.10. Welche Flüssigkeit hat einen Polarisationswinkel von $53{,}67^{\circ}$ gegenüber Luft?

5.2. Strahlenoptik

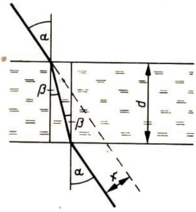
Grundlagen

Fermatsches Prinzip:

Gegenüber benachbarten Wegen zwischen den Punkten A und B ist für den tatsächlichen Lichtweg die Laufzeit extremal, in der Mehrzahl der Anwendungen ist er minimal.

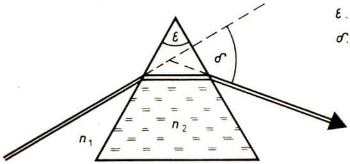
Planparallele Platte:

Beim Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte erfolgt in Abhängigkeit von Brechzahl, Plattendicke und Einfallswinkel eine Parallelverschiebung des Lichtstrahls.



Prisma:

Beim Lichtdurchgang durch ein Prisma erfolgt an beiden Grenzflächen Brechung, unter bestimmten Bedingungen auch Totalreflexion. Der ursprüngliche Lichtstrahl erfährt eine Gesamtablenkung, die von den Brechzahlunterschieden, dem Einfallswinkel und dem Winkel, den die brechenden Seitenflächen des Prismas einschließen, abhängt. Der Winkel der Gesamtablenkung wird bei symmetrischem Durchgang des Lichtstrahls minimal.



ε ... brechender Winkel

δ ... Gesamtablenkung

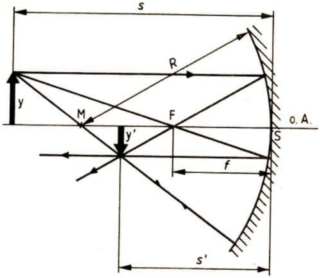
Hohl- und Wölbspiegel (sphärisch):

Für achsnahe Strahlen gilt die

Abbildungsgleichung: $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$, und der

Abbildungsmaßstab: $-(y' : y) = (s' : s)$.

(f: Brennweite, s: Gegenstandsweite, s': Bildweite, y: Gegenstandshöhe, y': Bildhöhe)
Vorzeichenregelung: Wölbspiegel negative Brennweite, virtuelle Bilder haben negative Bildweiten.



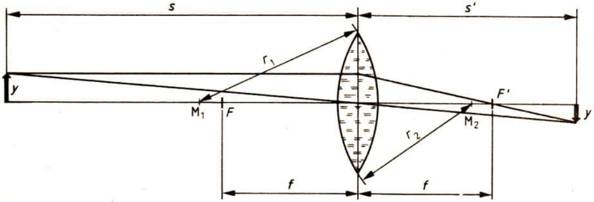
Dünne Linsen:

Betrachtet man an dünnen sphärischen Linsen nur achsnahe Strahlen und ist im Gegenstands- und Bildraum $n_G = n_B = 1$, so gilt die Abbildungsgleichung: $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n - 1) \cdot (\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})$.

(n: Brechzahl, r_1, r_2: Krümmungsradien (bei konkaven Flächen negatives Vorzeichen, konvex und konkav gilt bezüglich der Lichtrichtung), f: Brennweite (bei Zerstreuunglinsen negatives Vorzeichen), s: Gegenstandsweite, s': Bildweite (bei virtuellen Bildern negatives Vorzeichen))

Die Größe $D = \frac{1}{f}$ heißt Brechkraft, ihre Einheit Dioptrien ($1\ \text{dpt} = 1\ \text{m}^{-1}$). Der Abbildungsmaßstab (laterale Vergrößerung) ergibt sich zu:

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}.$$



System aus dünnen Linsen:

Die resultierende Brennweite f eines Systems aus zwei dünnen Linsen der Brennweiten f_1 bzw. f_2 ergibt sich für achsnahe Strahlen zu:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 \cdot f_2}.$$

(e: Abstand der Mittelebenen der beiden Linsen)

Beispiel

Das Normalobjektiv einer Kleinbildkamera hat eine Brennweite von 50 mm.

a) Ein Gegenstand befindet sich zunächst in der Entfernung von 25 cm und wird in immer größere Entfernungen gerückt. Wie verändert sich die Bildweite?

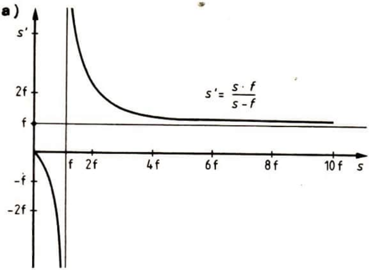
b) Die Kamera wird nun auf eine Gegenstandsweite von 5,0 m eingestellt. Aus welchem Entfernungsbereich erzeugen Gegenstände auf dem Film scharfe Abbildungen, wenn man annehmen darf, daß bei einer bestimmten Blendeneinstellung ihre Bilder in der Filmebene im Intervall $\Delta s' = \pm 0{,}25$ mm als scharf zu beurteilen sind?

Lösung:

Gegeben: $f = 50$ mm
a) 25 cm $\leq s < \infty$
b) $s = 5{,}0$ m und für $\Delta s' = \pm 0{,}25$ mm scharfe Bilder

Gesucht:
a) s'
b) Entfernungsbereich für scharfe Bilder

a)



Wir benutzen die Abbildungsgleichung für dünne Linsen und lösen sie nach s' auf:

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f}.$$

Für s = 25 cm ergibt sich s' = 6,25 cm und für $s \longrightarrow \infty$ hat s'(s) den Grenzwert f.

Die Filmebene braucht also nur um 1,25 cm nachgestellt zu werden.

b) Wir berechnen nach obiger Gleichung zunächst die zu s = 5,0 m gehörende exakte Bildweite s'. Man erhält 50,505 mm. Das Intervall der zu betrachtenden Bildweiten ist damit 50,255 mm < s' < 50,755 mm. Von diesen Bildweiten ausgehend, berechnen wir nun die zugehörigen Gegenstandsweiten mit Hilfe der Gleichung:

$$s = \frac{s' \cdot f}{s' - f}.$$

Ergebnis: Das Intervall der Gegenstandsweiten (Schärfentiefebereich), für die sich scharfe Bilder ergeben, ist damit:
3,36 m bis 9,85 m.

Aufgaben

5.2.1. Weisen Sie mit Hilfe des Fermatschen Prinzips nach, daß sich Licht in einem homogenen Medium geradlinig ausbreitet!

5.2.2. In ein Wasserbecken von 2 m Tiefe wird ein Pfahl gerammt, welcher 50 cm aus dem Wasser herausragt.
Wie lang ist der Schatten des Pfahles auf dem Grund des Wasserbeckens, wenn die Sonnenstrahlen unter einem Winkel von 60° zur Wasseroberfläche einfallen?

5.2.3. Auf einem Blatt sind zwei Geraden in einem Abstand von 2,1 cm voneinander gezeichnet. Diese werden mit einer planparallelen Glasplatte der Dicke 4,5 cm bedeckt. Blickt man von oben durch die Platte rechtwinklig zu den Geraden auf eine von beiden, so daß die Blickrichtung mit der Glasplatte einen Winkel von 45° einschließt, erscheint es, als ob die Verlängerung der einen Geraden hinter der Platte die andere Gerade sei.
Wie groß ist die Brechzahl des Glases?

5.2.4. Um welche Strecke wird ein Lichtstrahl parallel verschoben, wenn er an einer Glasplatte der Dicke 1,5 cm und der Brechzahl 1,55 beim Austritt einen Winkel von 60° mit der Glasplatte bildet?

5.2.5. Auf ein Glasprisma mit einem brechenden Winkel von 30° fällt Licht unter einem Einfallswinkel von 45°.

a) Wie groß ist der Winkel der Gesamtablenkung, wenn die Brechzahl 1,55 beträgt? Lösen Sie die Aufgabe rechnerisch oder zeichnerisch!
b) Erarbeiten Sie sich nach Möglichkeit ein Programm zur Berechnung der Gesamtablenkung (für den Kleincomputer) und berechnen Sie, für welchen Einfallswinkel die Gesamtablenkung minimal wird.

5.2.6. Auf ein Prisma aus Kronglas trifft weißes Licht unter einem Winkel von 45°. In welchem Abstand voneinander befinden sich rotes (n_r = 1,505) und violettes (n_v = 1,525) Licht auf der Austrittsseite des Prismas, wenn der brechende Winkel des Prismas 30° beträgt und das Licht in der Mitte der 6,0 cm breiten Seitenfläche auftrifft?

5.2.7. Welche Brechkraft hat eine dünne bikonvexe Linse der Brechzahl 1,5, wenn ihre Krümmungsradien 12 cm und 18 cm betragen?

5.2.8. Ein Linsensystem aus zwei Konvexlinsen (f_1 = 100 mm, f_2 = 50 mm) erzeugt von einem Gegenstand ein Bild. Die Gegenstandsweite beträgt 120 mm und das Bild ist doppelt so groß wie der Gegenstand.
Welchen Abstand haben die Linsen voneinander?

5.2.9. Ein Kleinbildprojektor erzeugt von einem 36 mm breiten Dia ein 80 cm breites Bild auf dem Schirm. Entfernt man den Projektor um 2 m weiter vom Schirm, wird das Bild um 1,2 m breiter.
Wie groß sind die Objektivbrennweite und die ursprüngliche Brennweite?

5.2.10. Zwei Linsen können eine "Gummilinse" bilden, indem man den Abstand zwischen beiden in bestimmten Bereichen variiert.

Welche Brennweiten haben die Einzellinsen, wenn durch Veränderung des Abstands zwischen 2 und 8 cm die Brennweite zwischen 5 cm und 8 cm verändert werden kann?

5.2.11. Eine Linse der Brennweite 100 mm erzeugt ein Bild eines Gegenstandes, das 20 cm weiter von der Linsenebene entfernt ist als der Gegenstand.
Wie groß sind Bild- und Gegenstandsweite?

5.2.12. Im Krümmungsmittelpunkt eines Hohlspiegels (f = 50 cm) steht eine Sammellinse gleicher Brennweite. 25 cm vor der Linse (zwischen Linse und Hohlspiegel) steht ein leuchtender Gegenstand.
Wo entsteht das durch Hohlspiegel und Linse erzeugte reelle Bild? (Lösung zeichnerisch)

5.2.13. Skizzieren Sie den Strahlengang in optischen Teleskopen (Refraktor und Spiegelteleskop nach Newton und Cassegrain)! Erläutern Sie anhand der Skizzen Aufbau und Funktion der Geräte!

6. Thermodynamik

6.1. Zustandsgleichung des idealen Gases

Grundlagen

Der Zustand eines thermodynamischen Systems kann durch die Zustandsgrößen Druck p, Volumen V, Temperatur T und thermische Energie E_{th} (allgemeiner die innere Energie U) beschrieben werden. Befinden sich zwei Systeme in thermischem Kontakt, so nehmen sie nach hinreichend langer Zeit eine einheitliche Temperatur an.

Für viele reale Gase läßt sich bei nicht zu hohen Drücken und nicht zu tiefen Temperaturen das Modell <u>ideales Gas</u> anwenden. Sie erfüllen in guter Näherung die allgemeine <u>Zustandsgleichung</u> des idealen Gases

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T = n \cdot R_o \cdot T.$$

(m: Masse des Systems, R: spezielle Gaskonstante, $[R] = J\ (kg \cdot K)^{-1}$, n: Anzahl der Mole, R_o: universelle oder molare Gaskonstante)

Der Normzustand von Gasen wird durch die Werte $T_o = 273{,}15$ K und $p_o = 101{,}325$ kPa definiert.
Neben einer phänomenologischen ist oft eine kinetisch-statistische Betrachtungsweise günstig. Statt des Kontinuums verwendet man dann das Teilchenbild.

Die <u>thermische Energie</u> des idealen Gases stellt sich in kinetisch-statistischer Betrachtungsweise als das N-fache des Mittelwertes der kinetischen Energie $\overline{E_k}$ eines Teilchens dar:

$$E_{th} = N \cdot \overline{E_k}.$$

Es gilt:

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{E_k}$$ (auch bei einatomigen realen Gasen).

Durch Vergleich der Ergebnisse phänomenologischer und kinetisch statistischer Betrachtungen gewinnt man:
Die Temperatur ist proportional zur mittleren kinetischen Energie $\overline{E_k}$ der Teilchen:

$$T \sim \overline{E_k}.$$

Die mittlere quadratische Geschwindigkeit ist:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{3 \cdot R \cdot T} = \sqrt{\frac{3 \cdot p}{\varrho}}.$$

Die thermische Energie ergibt sich zu:

$$E_{th} = \frac{3}{2} \cdot m \cdot R \cdot T$$ (bei einatomigen Gasen).

Der Quotient aus molarer Gaskonstante R_o und Avogadrokonstante N_A stimmt mit der Boltzmannkonstante k überein.
Damit gilt auch $k = \frac{R \cdot m}{N}$ und für die mittlere kinetische Energie der Teilchen kann

$\overline{E_k} = \frac{3}{2} k \cdot T$ beim idealen und bei atomaren Gasen sowie

$\overline{E_k} = \frac{5}{2} k \cdot T$ bei zweiatomigen Molekülgasen geschrieben werden.

Beispiel

In einem Glockengasbehälter befinden sich $8{,}0 \cdot 10^3$ m^3 Gas bei 15 °C und 98,1 kPa. Durch Sonneneinstrahlung steigen die Temperatur auf 25 °C und der Druck auf 100 kPa.
Welches Volumen beansprucht das Gas dann?

Lösung:

Gegeben:	Zustand 1	Zustand 2	Gesucht: V_2
	$p_1 = 98{,}1$ kPa	$p_2 = 100$ kPa	
	$T_1 = 288$ K	$T_2 = 298$ K	
	$V_1 = 8{,}0 \cdot 10^3$ m^3		

Mit Hilfe der Zustandsgleichung des idealen Gases $\frac{p \cdot V}{T}$ konst. gewinnt man:

$$V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2}$$

$$V_2 = \frac{98{,}1\ \text{kPa} \cdot 8{,}0 \cdot 10^3\ \text{m}^3 \cdot 298\ \text{K}}{288\ \text{K} \cdot 100\ \text{kPa}}$$

$$\underline{\underline{V_2 = 8{,}12 \cdot 10^3\ \text{m}^3}}$$

Ergebnis: Nach der Erwärmung durch Sonneneinstrahlung enthält der Behälter $8{,}12 \cdot 10^3$ m^3 Gas bei 25 °C und 100 kPa.

Aufgaben

6.1.1. Die Volumenänderung eines Gases erfolgt isotherm von 2,0 m^3 auf 12,0 m^3. Der Anfangsdruck beträgt 1,5 MPa. Zeichnen Sie das p-V-Diagramm des Prozesses! (Berechnen Sie dazu mindestens 6 Wertpaare)

6.1.2. In einem durch einen Kolben verschlossenen Zylinder befindet sich ein Gas im Anfangszustand (196 kPa; 3,6 dm^3; 25 °C). Das Gas wird nacheinander folgenden Zustandsänderungen unterworfen:

(1) isotherme Kompression auf doppelten Druck,
(2) isochore Temperaturerhöhung um 160 K,
(3) isotherme Expansion auf den Anfangsdruck.

a) Berechnen Sie p, V und T nach jeder Zustandsänderung!
b) Zeichnen Sie das p-V-Diagramm!
c) Welche Zustandsänderung führt zum Anfangszustand?

6.1.3. Glühlampen werden bei der Herstellung bei 15 °C mit Stickstoff, der unter einem Druck von 50,7 kPa steht, gefüllt. Eine Messung im Betriebszustand zeigt, daß der Druck auf 0,11 MPa gestiegen ist.
Welche Temperatur hat das Gas im Betriebszustand?

6.1.4. Wie ändern sich Druck und Temperatur des idealen Gases, wenn die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Gasmoleküle bei konstantem Volumen verdoppelt wird?

6.1.5. Gegeben sind zwei volumengleiche abgeschlossene Gasmengen, die aus gleichartigen Molekülen bestehen. Die eine Gasmenge enthält N Moleküle, die zweite 2 N Moleküle. Die thermische Energie beider Gasmengen ist gleich.
In welchem Verhältnis stehen Druck und Temperatur in beiden Gasmengen?

6.1.6. Die Dichte eines einatomigen Gases, das unter einem Druck von 0,35 MPa steht, beträgt 0,56 $kg \cdot m^{-3}$.
a) Berechnen Sie die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Gasteilchen!
b) Welche thermische Energie besitzen 2,3 kg des Gases?

6.1.7. Helium wird vom Anfangszustand (0,7 MPa; 70 m^3; 330 K) isochor in den Endzustand (0,3 MPa) überführt.
Berechnen Sie die Masse und die Temperatur im Endzustand!

6.1.8. In einem Raum von 30 m^3 befindet sich Luft bei 20 °C unter einem Druck von 100 kPa.
Berechnen Sie die Masse der Luft!

6.1.9. Die Dichte von Stadtgas beträgt im Normzustand
$\varrho_0 = 0{,}61\ kg \cdot m^{-3}$.
Berechnen Sie die Gaskonstante!

6.1.10. Welche Temperatur haben 2.0 g Stickstoff, die bei $2{,}026 \cdot 10^5$ Pa ein Volumen von 820 cm^3 einnehmen?

6.1.11. Ein Behälter (Volumen $1{,}2 \cdot 10^{-2}\ m^3$) ist mit Stickstoff unter einem Druck von 8,1 MPa bei 17 °C gefüllt.
Welche Stickstoffmenge befindet sich im Behälter?

6.1.12. In einem Behälter (Volumen 4,8 m^3) befinden sich 6 kg Wasserstoff bei 18 °C.
a) Berechnen Sie den Druck!

b) Das Gas erfährt eine isobare Zustandsänderung, bei der sich das Volumen um 1,3 m^3 vergrößert. Berechnen Sie die sich ändernden Zustandsgrößen!

c) Stellen Sie den Vorgang im p-V-Diagramm dar!

6.1.13. Die Dichte von Chlorgas beträgt im Normzustand 3,22 $kg \cdot m^{-3}$.
Berechnen Sie die Dichte bei -20 °C, wenn der Druck konstant bleibt!

6.1.14. Wieviel Moleküle sind in 1 g Wasserstoff enthalten?

6.1.15. In einem Labor wurde Hochvakuum bei 20 °C erzeugt, das einen Druck von 1,3 nPa hatte.
Wieviele Moleküle verblieben in 1 m^3 des Vakuumraumes?

6.1.16. Bei einer Kernreaktion entsteht eine Temperatur von 10^7 K. Es wird angenommen, daß dabei alle Moleküle zu Atomen dissoziieren und alle Atome ionisieren.
Welche mittlere quadratische Geschwindigkeit haben die Wasserstoffionen?

6.1.17. Die thermische Energie von 3 kg eines einatomigen Gases beträgt $3{,}04 \cdot 10^5$ J.
Welche Dichte hat das Gas bei $5 \cdot 10^4$ Pa?

6.2. Erster Hauptsatz

Grundlagen

Wärme als Prozeßgröße:

Wird thermische Energie von einem thermodynamischen System auf ein anderes übertragen, so wird die transportierte Energie durch die Prozeßgröße Wärme Q erfaßt. Die von einem System aufgenommene oder abgegebene Wärme beträgt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T.$$

(c: spezifische Wärmekapazität, m: Masse, Δ T: Temperaturänderung)

Einheit der spezifischen Wärmekapazität: $[c] = J\ (kg \cdot K)^{-1}$.

Bei Brennstoffen bezeichnet man die auf die Masse m bezogene Wärme Q, die bei vollständiger Verbrennung der betreffenden Menge frei wird, als Heizwert:

$$H = \frac{Q}{m}.$$

Grenzen zwei thermodynamische Systeme unterschiedlicher Temperatur aneinander, so erfolgt der Transport thermischer Energie vom System mit höherer Temperatur zum System mit geringerer Temperatur so lange, bis sich eine einheitliche Mischungstemperatur T_m eingestellt hat. Dabei gilt die Wärmebilanz:

$$Q_{ab} = - Q_{auf}.$$

Die vom Kalorimeter aufgenommene oder abgegebene Wärme wird mit Hilfe seiner Wärmekapazität $C = \frac{Q}{\Delta T}$ erfaßt.

Einheit der Wärmekapazität: $[C] = J \cdot K^{-1}$.

Volumenarbeit beim idealen Gas:

Für die reversible Volumenarbeit bei Kompression oder Expansion des idealen Gases gilt:

$$W_m = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV.$$

Für isobare Prozesse ergibt sich daraus

$$W_m = - p \cdot (V_2 - V_1)$$

und für isotherme Prozesse

$$W_m = m \cdot R \cdot T \cdot \ln (V_1/V_2).$$

Erster Hauptsatz:

Der erste Hauptsatz gibt die Erfahrung wieder, daß die Änderung der thermischen Energie eines thermodynamischen Systems durch Wärme oder mechanische Arbeit erfolgen kann:

$$\Delta E_{th} = Q + W_m.$$

Für das ideale Gas tritt bei isobaren Zustandsänderungen die Wärme $Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$ auf, hingegen bei isochoren Prozessen $Q = c_v \cdot m \cdot \Delta T$. Mit Hilfe des ersten Hauptsatzes findet man

$\Delta E_{th} = c_v \cdot m \cdot \Delta T$ und $c_p - c_v = R$.

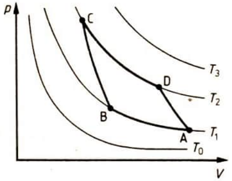
Als <u>adiabatisch</u> bezeichnet man Zustandsänderungen mit $Q = 0$. Aus dem ersten Hauptsatz und der allgemeinen Zustandsgleichung des idealen Gases folgt für solche Zustandsänderungen:

$\Delta E_{th} = W_m$, $T \cdot V^{\varkappa - 1} = \text{konst.}$, $p \cdot V^{\varkappa} = \text{konst.}$ und

$$W_m = \frac{m \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{(\varkappa - 1)} \qquad \left(\varkappa = \frac{c_p}{c_v}\ ;\ \varkappa\text{: Adiabatenexponent}\right)$$

<u>Carnotscher Kreisprozeß und thermischer Wirkungsgrad</u>:

Bei einem Carnotschen Kreisprozeß durchläuft das ideale Gas nacheinander abwechselnd isotherme und adiabatische Zustandsänderungen und kehrt schließlich in den Ausgangszustand zurück.



Als thermischen Wirkungsgrad η bezeichnet man bei "rechtsläufigem" Prozeß das Verhältnis von gewonnener mechanischer Arbeit $- W_m$ zu aufgenommener Wärme Q:

$$\eta = -\frac{W_m}{Q}.$$

Man findet, daß dieser Wirkungsgrad gleich dem Verhältnis $(T_1 - T_2) : T_1$ ist, wobei T_1 die Temperatur des Systems ist, aus dem Wärme aufgenommen wird, während T_2 die Temperatur des Systems ist, an das Wärme abgeführt wird (niedrigere Temperatur). Beim "linksläufigen" Kreisprozeß (Wärmepumpe, Kältemaschine) definiert man eine Leistungszahl ε. Es gilt beispielsweise für die Wärmepumpe $\varepsilon = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$.

(Allgemein gilt: η bzw. $\varepsilon = \frac{\text{gewünschte, abgegebene Energie}}{\text{zuzuführende Energie}}$.)

Beispiel

Ein Gefäß mit der Wärmekapazität 200 $J \cdot K^{-1}$ ist mit 2,0 kg Wasser der Temperatur 20 °C gefüllt.
Kann dieses Wasser zum Sieden gebracht werden, wenn unter dem wassergefüllten Gefäß in einem Kocher 50 g Benzin vollständig verbrannt werden und wenn man annimmt, daß die Hälfte der bei der Verbrennung auftretenden Wärme dazu genutzt werden kann?
Der Heizwert des Benzins ist $4{,}4 \cdot 10^4$ $kJ \cdot kg^{-1}$.

Lösung:

Gegeben:

$$
\begin{aligned}
K &= 200\ J \cdot K^{-1} \\
m_w &= 2{,}0\ kg \\
\vartheta_o &= 20\ ^\circ C \\
m_B &= 5{,}0 \cdot 10^{2}\ kg \\
H_B &= 4{,}4 \cdot 10^4\ kJ \cdot kg^{-1} \\
\eta &= 0{,}5 \\
c_w &= 4{,}2\ kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}
\end{aligned}
$$

Gesucht: Entscheidung, ob Sieden eintritt

Damit das Wasser zum Sieden, d. h. bei normalem Luftdruck auf 100 °C gebracht werden kann, muß der Betrag der von der Verbrennung des Benzins herrührenden Wärme Q_B mindestens gleich dem Betrag der Wärme Q_w sein, die notwendig ist, um Wasser und Gefäß von 20 °C auf 100 °C zu erwärmen.

$$
\begin{aligned}
|Q_B| &= H_B \cdot m_B \cdot \eta \\
&= 4.4 \cdot 10^4\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}\ kg \cdot 0{,}5 \\
&= \underline{\underline{1{,}1\ MJ}}
\end{aligned}
$$

$$|Q_w| = (c_w \cdot m_w + K) \cdot (\vartheta_s - \vartheta_o)$$
$$= (4{,}2\ kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1} \cdot 2{,}0\ kg + 0{,}2\ kJ \cdot K^{-1}) \cdot (100\ ^oC - 20\ ^oC)$$
$$= 0{,}69\ MJ,$$

also $|Q_B| > |Q_w|$

Ergebnis: Werden 50 g Benzin verbrannt, so kann mit der dabei auftretenden Wärme bei einem Wirkungsgrad von 0,5 das Wasser im Gefäß zum Sieden gebracht werden. Die überschüssige Wärme führt zum teilweisen Verdampfen des Wassers.

Aufgaben

6.2.1. In einen Behälter mit 80 l Wasser der Temperatur 25 °C soll so viel heißes Wasser der Temperatur 100 °C gegossen werden, daß eine Mischungstemperatur von 36 °C entsteht.
Welche Menge des heißen Wassers ist nötig, wenn das Gefäß eine Wärmekapazität von $6{,}5\ kJ \cdot K^{-1}$ hat?

6.2.2. Eine auf 850 K erwärmte Schraubenfeder aus Stahl mit der Masse 0,5 kg wird in ein Ölbad von 2,5 kg mit der Temperatur 20 °C getaucht.
Welche Mischungstemperatur stellt sich ein?
($c_{Öl} = 2{,}1\ kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$)

6.2.3. Mit Hilfe eines Hammers der Masse 250 g wird ein Nagel der Masse 5,0 g in einen Holzbalken geschlagen. Im Moment des Auftreffens hat der Hammer eine Geschwindigkeit von $7{,}0\ m \cdot s^{-1}$ erreicht.
Um wieviel Kelvin erwärmt sich der Stahlnagel, wenn mit dem Hammer 10mal zugeschlagen wird und man annimmt, daß die sich entwickelnde Wärme zur Hälfte beim Nagel auftritt?

6.2.4. Der Kolben einer Luftpumpe mit der Querschnittsfläche 10 cm² wird sehr rasch um 35 cm in den Zylinder mit dem Anfangs-

volumen V_a = 0,40 l gedrückt. Das Ventil am Auslaß ist dabei geschlossen.
Welche Werte nehmen Druck und Temperatur der komprimierten Luft an, wenn anfangs T_a = 293 K und p_a = 0,10 MPa herrschten?
Nach einiger Zeit wird in dieser Stellung das Ventil bei fixiertem Kolben geöffnet.
Wieviel Luft strömt nun aus, wenn man annimmt, daß außen der Druck p_a herrscht und die Luft im Inneren, die ausströmende und die Außenluft die einheitliche Temperatur T_a annehmen?
Anschließend wird der Kolben freigegeben, das Ventil geschlossen und die eingeschlossene Restluft auf 100 °C erwärmt.
Welches Volumen begrenzt der Kolben nun?

6.2.5. Ein 4-Takt-Otto-Motor hat einen Hubraum von 250 cm^3 und ein Verdichtungsverhältnis von 8 : 1.
Berechnen Sie die Temperatur des verdichteten Kraftstoff-Luft-Gemisches am Ende des Kompressionshubes, wenn man annimmt, daß der Vorgang adiabatisch mit dem Adiabatenexponenten $\varkappa$ = 1,4 abläuft, die Anfangstemperatur zu Beginn der Kompression 350 K und der Anfangsdruck 0,1 MPa betragen!
Wie groß ist die zur Kompression notwendige Arbeit?
Das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird als ideales Gas betrachtet.
Stellen Sie den gesamten idealisierten Kreisprozeß des Otto-Motors in einem p-V-Diagramm dar!

6.2.6. Ein Pkw verbraucht bei einer Autobahnfahrt in einer Stunde 8,5 l Vergaserkraftstoff. Der Motor entwickelt dabei eine Leistung von 18 kW.
Berechnen Sie den Wirkungsgrad!

6.2.7. Eine "Carnotmaschine" arbeitet in einem rechtsläufigen Kreisprozeß zwischen zwei Wärmebehältern, die sich auf den Temperaturen des gefrierenden bzw. des siedenden Wassers befinden.
Wie groß wäre der thermische Wirkungsgrad der Maschine?

6.2.8. Eine Wärmepumpe nimmt die elektrische Leistung von 1,0 kW für ihre Pumpen auf. Sie soll thermische Energie von einem Gewässer der Temperatur 15 °C zum Wärmebehälter einer Heizanlage der Temperatur 80 °C pumpen.
Welche Wärme kann in einer Stunde maximal von der Heizanlage abgegeben werden?

6.3. Zweiter Hauptsatz

Grundlagen

Während reibungsfreie mechanische Prozesse vollständig umkehrbar, d. h. reversibel sind, bewirkt Reibung eine nicht rückgängig zu machende Umwandlung mechanischer Energie in thermische. Der Prozeß verläuft irreversibel. Zwar kann mechanische Energie vollständig in thermische verwandelt werden, jedoch nicht umgekehrt.

"Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts weiter leistet, als einem Wärmespeicher Wärme zu entziehen und diese in mechanische Arbeit umzuwandeln." Diese von M. Planck stammende Formulierung des zweiten Hauptsatzes nennt man auch Satz von der Unmöglichkeit des perpetuum mobile II. Art.
Körper unterschiedlicher Temperatur streben bei thermischem Kontakt einem Gleichgewichtszustand einheitlicher Temperatur zu. Dieser irreversible Prozeß läuft ohne äußere Einwirkung niemals in umgekehrter Richtung. Auf Kosten der thermischen Energie von Körpern, die untereinander im thermodynamischen Gleichgewicht stehen, kann keine Arbeit verrichtet werden.
Jeder reale Kreisprozeß in einer Wärmekraftmaschine hat wegen der irreversiblen Anteile einen Wirkungsgrad, der kleiner als der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses ist.
Den Quotienten $\frac{Q}{T}$ aus der Wärme Q, die bei einer bestimmten Temperatur T aufgenommen ($Q > 0$) oder abgegeben ($Q < 0$) wird, nennt man reduzierte Wärme. Addiert man beim Carnot-Prozeß jeweils die reduzierten Wärmen für die vier Zustandsänderungen, so erhält man Null.

Entropie:

Durchläuft ein thermodynamisches System eine Zustandsänderung vom Zustand (1) zum Zustand (2) und werden die differentiell kleinen (reversiblen) Anteile an ausgetauschter Wärme dQ, bezogen auf die jeweils herrschende Temperatur T, aufsummiert, so entsteht das bestimmte

Integral $\int_{(1)}^{(2)} \frac{dQ}{T}$. Dieses Integral ist gleich der Differenz der

Werte einer Stammfunktion: $S_2 - S_1 = \Delta S$. Eine solche Stammfunktion heißt Entropie. Die Einheit der Entropie ist $J \cdot K^{-1}$.
Im allgemeinen kann man nur Aussagen über Entropieänderungen ΔS machen. Dabei ist ΔS ein Maß für die Irreversibilität eines Prozesses.
Von selbst ablaufende Prozesse in einem abgeschlossenen System sind immer mit Entropiezunahme verbunden.
Während beim Carnot-Prozeß für den gesamten Kreisprozeß die Entropieänderung Null ist, nimmt bei allen realen Prozessen mit irreversiblen Anteilen die Entropie zu.
Stellt man für den Carnot-Prozeß den Zusammenhang zwischen T und S in einem T-S-Diagramm dar, so entsteht ein Rechteck, dessen Flächeninhalt Maß für die gewonnene mechanische Arbeit ist.

Für das ideale Gas erhält man

bei isothermen Zustandsänderungen: $\Delta S = m \cdot R \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1}\right)$,

bei isochoren Zustandsänderungen: $\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$,

bei isobaren Zustandsänderungen: $\Delta S = m \cdot c_p \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

und bei adiabatischen Vorgängen wegen $dQ = 0$: $\Delta S = 0$.

Beispiel:

Eine Wassermasse von 20 kg der Temperatur 100 °C wird mit 15 kg Wasser der Temperatur 10 °C gemischt. Der Einfluß des Gefäßes werde vernachlässigt.
Wie groß ist die gesamte Entropieänderung des Vorgangs?

Lösung:

Gegegeben: $T_1 = 373\ K$ — Gesucht: ΔS_{ges}

$m_1 = 20\ kg$

$T_2 = 283\ K$

$m_2 = 15\ kg$

$c = 4,2\ kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$

Das Gesamtsystem wird dem Gleichgewicht mit der Mischungstemperatur T_m zustreben. Der jeweilige Prozeß wird in differentiell kleine reversible Schritte $dQ = c \cdot m \cdot dT$ zerlegt. Damit können die Entropieänderungen des heißen Wassers mit

$\Delta S_1 = c \cdot m_1 \cdot \int_{T_1}^{T_m} \frac{dT}{T}$ und des kalten Wassers mit

$\Delta S_2 = c \cdot m_2 \int_{T_2}^{T_m} \frac{dT}{T}$ beschrieben werden. Weiter gilt:

$\Delta S_{ges} = \Delta S_1 + \Delta S_2$.

Die Mischungstemperatur T_m ergibt sich aus der Wärmebilanz

$c \cdot m_1 \cdot (T_1 - T_m) = c \cdot m_2 \cdot (T_m - T_2)$ zu

$$T_m = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2}{m_1 + m_2}$$

$$T_m = \frac{20\ kg \cdot 373\ K + 15\ kg \cdot 283\ K}{35\ kg} = \underline{334\ K}$$

Damit ergibt sich

$$\Delta S_{ges} = c \cdot m_1 \cdot \ln \left(\frac{Tm}{T_1}\right) + c \cdot m_2 \cdot \ln \left(\frac{Tm}{T_2}\right)$$

$$\Delta S_{ges} = 4,2\ kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1} \cdot 20\ kg \cdot \ln (0,895) + 4,2\ kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1} \cdot 15\ kg \cdot \ln (1,18)$$

$$\Delta S_{ges} = -9,3\ kJ\ K^{-1} + 10,4\ kJ \cdot K^{-1}$$

$$\underline{\underline{\Delta S_{ges} = 1,1\ kJ\ K^{-1}}}$$

Ergebnis: Das Mischen der beiden Wassermassen führt insgesamt zu einer Entropiezunahme von 1,2 $kJ \cdot K^{-1}$. Der Vorgang ist irreversibel.

6.4. Thermodynamisches Verhalten der Stoffe

Grundlagen

Lineare und kubische Ausdehnung:

Bei einer Temperaturänderung um ΔT ändert sich die Anfangslänge l der betrachteten Abmessung (Kantenlänge, Durchmesser) eines festen Körpers:

$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$ (α: linearer Ausdehnungskoeffizient)

Einheit des linearen Ausdehnungskoeffizienten: $[\alpha] = K^{-1}$.

Für die Volumenänderung eines Körpers gilt:

$\Delta V = \gamma \cdot V \cdot T$ (γ: kubischer Ausdehnungskoeffizient)

Einheit des kubischen Ausdehnungskoeffizienten: $[\gamma] = K^{-1}$.

Die stoffspezifischen Größen α und γ sind immer nur in gewissen Temperaturbereichen konstant, und es gilt näherungsweise für feste Körper: $\gamma = 3\alpha$.

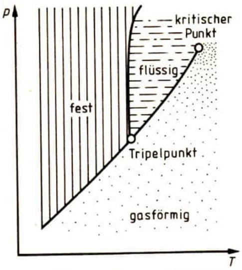
Daltonsches Gesetz:

Setzt sich ein gasförmiger Körper aus mehreren Komponenten zusammen, so ergibt sich der Gesamtdruck als Summe der Partialdrücke der einzelnen Komponenten.

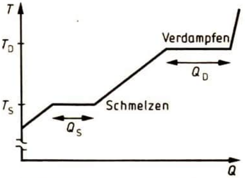
Phasenumwandlungen:

Verändert man Druck und/oder Temperatur eines Körpers, so kann es zu Phasenumwandlungen kommen. Bezieht man die zur vollständigen Phasenumwandlung des Körpers der Masse m notwendige Wärme Q_u auf die Masse, so erhält man die spezifische Umwandlungswärme

$q = \frac{Q_u}{m}$.



p-T-Diagramm (Phasendiagramm)



Temperatur eines Körpers in Abhängigkeit von der zugeführten Wärme

Wärmeleitung und -übergang:

Wird durch einen Körper des Querschnittes A und der Länge l in der Zeit t thermische Energie transportiert, so gilt
$Q = \lambda \cdot (T_1 - T_2) \cdot A \cdot \frac{t}{l}$, wenn an den Enden die Temperaturen T_1 bzw. T_2 herrschen. (λ : spezifisches Wärmeleitvermögen)
Einheit des spezifischen Wärmeleitvermögens: $[\lambda] = J\cdot(K\cdot m\cdot s)^{-1} = W\cdot(K\cdot m)^{-1}$.

Für den Wärmestrom Φ_W gilt: $\Phi_W = \frac{dQ}{dt}$.
Das Verhätlnis $(T_1-T_2) : \Phi_W = R_W$ ist als Wärmewiderstand definiert.
Erfolgt während der Zeit t ein gleichmäßiger Transport thermischer Energie von einem System der Temperatur T_1 durch die Systemgrenze der Fläche A hindurch zum System der Temperatur T_2, so spricht man vom Wärmeübergang:
$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \cdot t$ (α : Wärmeübergangskoeffizient)
Einheit des Wärmeübergangskoeffizienten: $[\alpha] = W\cdot(K \cdot m^2)^{-1}$

Beispiel

Für einen Silizium-Transistor vom Typ SC 206 mit Plastgehäuse ist eine maximale Verlustleistung von 200 mW zulässig. Die Sperrschichttemperatur darf 125 °C nicht übersteigen.

Bis zu welcher maximalen Umgebungstemperatur könnte der Transistor mit maximaler Verlustleistung (ohne zusätzliche Kühlung) betrieben werden, wenn der Gesamtwärmewiderstand $0{,}5\ K \cdot mW^{-1}$ beträgt?

Lösung:

Gegeben: $P_V = 200\ mW$ Gesucht:

$\vartheta_i = 125\ °C$ ϑ_u

$R_W = 0{,}5\ K\ mW^{-1}$

Die maximale Verlustleistung P_V ist gleich dem abzuführenden Wärmestrom Φ_W. Aus der Definitionsgleichung für den Wärmewiderstand $R_W = \frac{T_2 - T_1}{\Phi_W}$ entsteht deshalb:

$T_2 - T_1 = R_W \cdot P_V$. Statt der Differenz der absoluten Temperaturen kann zur Differenz der "Celsiustemperaturen" übergegangen werden.

$$\vartheta_u = \vartheta_i - R_W \cdot P_V$$

$$\vartheta_u = 125\ °C - 0{,}5\ K \cdot mW^{-1} \cdot 200\ mW$$

$$\vartheta_u = 25\ °C$$

Ergebnis: Nur bis zu einer Umgebungstemperatur von 25 °C darf der Transistor SC 206 mit maximaler Verlustleistung betrieben werden.

Aufgaben

6.4.1. Ein Konstantandraht hat bei 20 °C eine Anfangslänge von 500 mm und einen Widerstand von 0,15 Ω.
Wie groß ist die Längenzunahme des Drahtes in 5 Minuten, wenn ein konstanter Strom von 2,0 A durch den Draht fließt und die Wärmeabgabe vom Draht an die Umgebung vernachlässigt wird?

6.4.2. Ein Pyknometer (Gasflasche mit eingeschliffenem Stopfen) hat bei 20 °C ein Fassungsvermögen von 100,00 cm^3 und ist mit Wasser gefüllt.
Welche Flüssigkeitsmenge tritt durch die Bohrung im Stopfen aus, wenn die Temperatur auf 30 °C steigt?

6.4.3. Eine Eismasse m_E der Temperatur T_E wird mit einer Wassermasse m_W der Temperatur T_W in einem idealen Kalorimeter vermischt.

a) Welche Fälle sind für das sich nach gewisser Zeit einstellende thermische Gleichgewicht möglich?

b) Wie kann man aus den Anfangsdaten ablesen, welcher Fall eintreten wird? Fertigen Sie sich nach Möglichkeit dazu ein Programm für einen Kleincomputer an.

c) Ein Eisblock mit der Masse 0,5 kg und der Temperatur - 10 °C soll zur Hälfte geschmolzen werden.
Wie groß ist die dazu notwendige Wassermenge, wenn das Wasser eine Temperatur von 20 °C hat?

6.4.4. Welche Heizleistung ist erforderlich, um in einem Gewächshaus mit einer Glasfläche von 200 m^2 eine Temperatur von 20 °C aufrecht zu erhalten, wenn die Außentemperatur auf - 20 °C abgesunken ist?
Die Glasscheiben sind 1,5 mm dick und für Glas gilt:

spezifisches Wärmeleitvermögen: $\lambda = 1{,}0\ W \cdot (m \cdot K)^{-1}$,

Wärmeübergangskoeffizient Luft/Glas: $\alpha = 15\ W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$.

Hinweis: Die Wärmewiderstände der drei Teilprozesse addieren sich zum gesamten Wärmewiderstand.

6.4.5. Wärmeleitung und elektrische Leitung in einem metallischen Leiter lassen sich durch strukturgleiche Gesetze beschreiben. Stellen Sie in einer Tabelle analoge Größen des Transports thermischer Energie und des Transports elektrischer Ladungen gegenüber!

7. Spezielle Relativitätstheorie

Grundlagen

Durch Albert Einstein wurde das klassische Relativitätsprinzip der Mechanik verallgemeinert:
In Inertialsystemen gelten alle Naturgesetze in gleicher Form. Inertialsysteme sind deshalb prinzipiell gleichwertig. Insbesondere ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum in allen Inertialsystemen gleich.
Wie das Michelson-Experiment zeigte, benötigt Licht zu seiner Ausbreitung keinerlei stoffliche Materie.
Transformiert man die in einem Inertialsystem Σ festgestellten Orts- und Zeitkoordinaten eines Ereignisses in die eines anderen Inertialsystems Σ', so muß für sehr große Relativgeschwindigkeiten u (die mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum vergleichbar werden) die Lorentz-Transformation benutzt werden. Die klassische Galilei-Transformation ergibt sich als Sonderfall für $u \ll c$ aus der Lorentz-Transformation.

Lorentz-Transformation:

Bewegt sich Σ' bezüglich Σ mit der konstanten Geschwindigkeit u längs der übereinstimmenden x'-x-Achsen und fallen für $t = t' = 0$ die Ursprungspunkte O und O' zusammen, so gelten die Transformationsbeziehungen:

$$x' = \frac{x - u \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \qquad \text{und} \qquad t' = \frac{t - u \cdot \frac{x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} .$$

(c: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum)

Zeitdilatation und Längenkontraktion:

Bewegt sich eine in Σ' ruhende Uhr nacheinander an zwei in Σ installierten Uhren vorbei, so wird ein in Σ' festgestelltes Zeitintervall $\Delta t'$ in Σ um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ gedehnt gemessen:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} .$$

Bewegt sich ein in Σ' ruhender Maßstab der Länge $\Delta l'$ an zwei Beobachtungspunkten in Σ vorbei und mißt man dort gleichzeitig Anfangs- und Endpunkt des Maßstabes, so erscheint Δl gegenüber $\Delta l'$ verkürzt:

$$\Delta l = \Delta l' \cdot \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} .$$

Additionstheorem der Geschwindigkeiten:

Durch Differentiation erhält man aus den Gleichungen der Lorentz-Transformation für den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit v' eines Objektes in Σ' und der Geschwindigkeit v, die dem selben Objekt in Σ zukommt:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{u \cdot v'}{c^2}} \qquad \text{für } \vec{v},\ \vec{v}',\ \vec{u} \text{ parallel zur x-Achse.}$$

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist die maximale Geschwindigkeit, mit der sich Signale und stoffliche Materie bewegen können.

Relativistische Massenzunahme:

Bewegt sich ein in Σ' ruhender Körper, dessen Ruhemasse dort m_o beträgt, mit der Geschwindigkeit u bezüglich Σ, so hat er in Σ die Masse (Impulsmasse):

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} .$$

Masse - Energie - Äquivalenz:

Statt durch seine Impulsmasse m kann der Zustand eines physikalischen Systems äquivalent durch seine Energie beschrieben werden. Dabei gilt nach A. Einstein die Äquivalenz:

$$E = m \cdot c^2.$$

Mit der Aufteilung in einen Ruheanteil m_o bzw. E_o und einen Zusatzanteil Δm bzw. ΔE kann

$$m = m_o + \Delta m \quad \text{und} \quad m \cdot c^2 = m_o \cdot c^2 + \Delta m \cdot c^2 \quad \text{also}$$

$$E = E_o + \Delta E$$ geschrieben werden.

Statt durch seine Ruhemasse kann ein physikalisches System durch seine Ruheenergie charakterisiert werden, und eine Energieänderung kann durch eine Masseänderung (der Impulsmasse) ausgedrückt werden, je nachdem, welche der beiden Größen für die Beschreibung bequemer ist oder sich leichter messen läßt.

Beispiel 1

Wird zur Zeit $t_o = t'_o = 0$ bei $x_o = x'_o = 0$ in Σ' ein Lichtblitz ausgelöst, so breitet sich in Σ' eine Kugelwelle aus, deren vordere Wellenfront nach einer Zeit t' eine Kugelfläche mit der Gleichung

(1) $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 \cdot t'^2$ darstellt.

Auch ein Beobachter in einem anderen Inertialsystem, bezüglich dessen sich Σ' mit u bewegt, beobachtet die Lichtausbreitung in

Form von Kugelwellen um den Entstehungsort O = O'. Für ihn ist die Gleichung der vorderen Wellenfront nach Ablauf der Zeit t:

(2) $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 \cdot t^2$.

Es ist zu zeigen, daß die Lorentz-Transformation in der Lage ist, diesen Sachverhalt richtig widerzuspiegeln.

Lösung:

Wir zeigen, daß Gleichung (1) bei Verwendung der Lorentz-Transformation

$$x' = \frac{x - u \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad y = y', \ z = z' \quad \text{und} \quad t' = \frac{t - u \cdot \frac{x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

in Gleichung (2) übergeht.

$$\frac{x^2 - 2u \cdot t \cdot x + u^2 \cdot t^2}{1 - \frac{u^2}{c^2}} + y^2 + z^2 = c^2 \cdot \frac{t^2 - 2t \cdot u \cdot \frac{x}{c^2} + u^2 \cdot \frac{x^2}{c^4}}{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

$$\frac{c^2 \cdot x^2 + c^2 \cdot u^2 \cdot t^2 - c^4 . t^2 - u^2 . x^2}{c^2 - u^2} + y^2 + z^2 = 0$$

$$\frac{c^2(x^2 - c^2 \cdot t^2) - u^2(x^2 - c^2 . t^2)}{c^2 - u^2} + y^2 + z^2 = 0$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 . t^2$$

====================

Beispiel 2

Myonen sind instabile elementare Teilchen mit einer Ruhemasse von etwa 200 Elektronenmassen. Sie haben die Eigenschaft, daß nach jeweils $t_h = 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Menge an Teilchen zerfallen ist. Diese sogenannte Halbwertzeit t_h wird gemessen, wenn sich die Myonen relativ zum Beobachter in Ruhe befinden.

Myonen entstehen ständig in Höhen von 10 km bis 50 km (Stratosphäre) durch Wechselwirkung von Höhenstrahlung mit Luftmolekülen.

Nach solchen Reaktionen bewegen sich die Myonen fast mit Lichtgeschwindigkeit ($u \approx 0{,}9996\ c$). Auf diese Geschwindigkeit kann man beispielsweise aus der Tatsache schließen, daß sie im Mittel mit einer Energie von 5 GeV auf der Erde auftreffen

(aus $E = m \cdot c^2$ und $m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$).

Legt man die Halbwertszeit von $t_h = 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s zugrunde, so müßten nach $c \cdot t_h \approx 600$ m jeweils die Hälfte zerfallen sein, und daher dürften Myonen an der Erdoberfläche nicht mehr angetroffen werden. Wie ist der Widerspruch zu erklären?

Lösung:

Der scheinbare Widerspruch klärt sich auf, wenn man die Zeitdilatation berücksichtigt.

Die Eigenzeit $\Delta t' = 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s in dem sich mit $u = 0{,}9996\ c$ bewegenden Bezugssystem muß in das Zeitintervall Δt zwischen Entstehung und Auftreffen auf der Erde umgerechnet werden. Mit

$$t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$ erhält man $t = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ s. Legt man

diese Zeit in einem mit der Erde verbundenen Bezugssystem zugrunde, so wird der Flugweg $\Delta t \cdot u = 30$ km (in Übereinstimmung mit experimentellen Befunden).

8. Praktikum

8.1. Einführung

Zusätzlich zu den im Praktikum (3.) der Klasse 10 bereits gegebenen Hinweisen zur Durchführung des Praktikums und zur Fehlerfortpflanzung sollen im Praktikum der Klassen 11 und 12 zur Auswertung von Meßreihen Methoden der Statistik Anwendung finden.
Wenn der Wert einer physikalischen Größe durch mehrfache Messung unter gleichen Bedingungen festgestellt wird, so verwenden wir im allgemeinen statt des wahren Wertes der Meßgröße das aus den Meßwerten x_i gebildete arithmethische Mittel:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i .$$

Als Maß für die Streuung der mit zufälligen Fehlern behafteten Meßwerte benutzen wir die empirische Standardabweichung des Mittelwertes:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2} .$$

Das Resultat einer derartigen Messung geben wir in der Form $\overline{x} \pm s$ an. Mit statistischer Sicherheit von 68 % ist dann der wahre Wert der Meßgröße im Intervall $(\overline{x} - s\ ;\ x + s)$ zu finden.

8.2. Praktikumsexperimente Klasse 11

1. Bestimmen des Haft- und Gleitreibungskoeffizienten durch Winkelmessung an der geneigten Ebene

Aufgaben

1. Ermitteln Sie den Haftreibungskoeffizienten zwischen Holz und und Holz sowie zwischen Holz und Metall mittels einer geneigten Ebene!
2. Bestimmen Sie jeweils die Gleitreibungskoeffizienten für die gleichen Anordnungen!
3. Untersuchen Sie, ob die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten von der Größe der Reibungsfläche abhängen!

Geräte und Hilfsmittel

1 geneigte Ebene	1 Holzkörper	1 Winkelmesser
(aus Holz)	1 Metallkörper	Stativmaterial

2. Bestimmen der Fallbeschleunigung mittels Fadenpendel

Aufgaben

1. Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Pendellänge!
2. Untersuchen Sie, ob die Schwingungsdauer vom Auslenkwinkel und von der Masse des Pendelkörpers abhängt!
3. Bestimmen Sie mit Hilfe eines Fadenpendels die Fallbeschleunigung!
   Führen Sie zur Zeitmessung eine ausführliche Fehlerrechnung durch!
   Untersuchen Sie die Fehlerfortpflanzung der Fehler der Zeit- und Längenmessung!

Hinweise zur Durchführung

1. Wählen Sie für die Untersuchungen zu den Aufgaben 1 und 2 jeweils 5 verschiedene Werte!

2. Führen Sie zur Erfüllung der Aufgabe 3 mindestens 10 Zeitmessungen aus! Stellen Sie die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte grafisch dar, bilden Sie Mittelwert und Standardabweichung!
3. Leiten Sie aus den Untersuchungen zur Fehlerfortpflanzung Anforderungen an die Meßmittel und ihre Genauigkeit ab!

Geräte und Hilfsmittel

Stativmaterial	Pendelkörper verschiedener Masse	1 Stoppuhr
1 Meßstab	Faden	1 Winkelmesser

Literatur

Ilberg, Physikalisches Praktikum für Anfänger.
BSB G. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1985

3. Bestimmen von Stoßkraft und Stoßdauer beim elastischen Stoß einer Kugel

Aufgaben

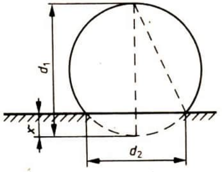
1. Bestimmen Sie die mittlere Stoßkraft $\overline{F}_S$, wenn eine Kugel aus einer bestimmten Höhe elastisch auf eine Stahlplatte aufschlägt!
2. Ermitteln Sie die Stoßdauer t_S aus dem Kraftstoß, den die Kugel ausübt!

Hinweise zur Durchführung

Zur Bestimmung der Stoßkraft wird die Abplattung x der Kugel beim Aufprall benutzt, die man durch Ausmessen des Abdrucks (Durchmesser d_2) auf der berußten Stahlplatte erhält.

Geräte und Hilfsmittel

1 Kugel	1 Waage mit Wägesatz
1 Stahlplatte	1 Stativmaterial
1 Meßstab	1 Kugelrinne
1 Meßschieber	1 Kerze



Literatur

Physik Schülerexperimente Kl. 11 und 12, S. 18.
Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1981.

4. Bestimmen der Geschwindigkeit eines Körpers mit Hilfe des Stoßpendels

Aufgabe

Bestimmen Sie die Geschwindigkeit eines Metallkörpers, der auf ein bifilar aufgehängtes Sandpendel trifft!

Hinweise zur Durchführung

Metallkörper und Sandpendel sollen nach dem unelastischen Stoß eine gemeinsame Bewegung vollführen, die bei genügend langem Pendel während des Abbremsens als horizontale Bewegung betrachtet werden kann.

Geräte und Hilfsmittel

1 Metallkörper	Bindfäden	1 Waage mit Wägesatz
1 Sandpendel	Stativmaterial	1 Stoppuhr
		1 Meßstab mit Halterung

Literatur

Physik Schülerexperimente Kl. 11 und 12, S. 16.
Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1981.

5. Bestimmen der Strömungsgeschwindigkeit der Luft mit der Venturidüse

Aufgaben

1. Erarbeiten Sie sich theoretische Grundlagen über Methoden zur Geschwindigkeitsmessung in strömenden Medien!
2. Messen Sie die Strömungsgeschwindigkeit bei 5 verschiedenen Geschwindigkeitsstufen des Luftstromerzeugers!

Geräte und Hilfsmittel

Luftstromerzeuger (regelbar)	Venturidüse	Schlauchverbindungen
	Mikromanometer	Stativmaterial

Hinweis

Die Querschnittsfläche des Luftstroms muß gleich oder größer sein als die der Venturidüse.

Literatur

1. Sprockhoff: Physikalische Schulversuche 3/4/5.
   Volk und Wissen, Volkseigener Verlag, Berlin 1981, S. 112 f.
2. Körner, u. a.: Physik - Fundament der Technik, 8. Auflage.
   VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1984, S. 163 f.

6. Bestimmen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Luft

Aufgaben

1. Bestimmen Sie in einem Resonanzrohr mit Hilfe stehender Wellen, die Sie mit einer Stimmgabel bzw. einem Tonfrequenzgenerator bekannter Frequenz erzeugen, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft!
2. Ermitteln Sie mit der erhaltenen Schallgeschwindigkeit die unbekannte Frequenz einer Stimmgabel!

Geräte und Hilfsmittel

Stativmaterial
1 Glasrohr (etwa 750 mm lang, Durchmesser 20 mm bis 30 mm)
1 Stimmgabel bzw. Tongenerator bekannter Frequenz, Lautsprecher
1 Stimmgabel unbekannter Frequenz
1 Anschlaghammer
1 Rohrverschluß (Stab mit Stopfen oder Ausgleichsgefäß mit Wasser)
1 Meßstab
1 Thermometer

Literatur

1. Körner u. a.: Physik - Fundament der Technik.
   VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1984.
2. Kretschmar u. a.: Physikalisches Praktikum.
   VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1984.

7. Aufbauen und Erproben von Schaltungen zum Meißner- und Wiengenerator

Aufgaben

1. Bauen Sie einen Meißner- und einen Wiengenerator mit Operationsverstärkern auf, und überprüfen Sie die Funktion mit einem Oszillographen!
2. Überprüfen Sie die Phasenverschiebungen an verschiedenen Stellen der Schaltung!

   (Wie wird $\varphi_{u1} - \varphi_{u2} = 0$ jeweils erreicht?)
3. Variieren Sie jeweils die Frequenz in beiden Generatoren, und untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen den Kenndaten der frequenzbestimmenden Bauelemente und der Generatorfrequenz!

Geräte und Hilfsmittel

Stabilisiertes Stromversorgungsgerät
Zweistrahloszillograph
Spulen, Widerstände, Kondensatoren, OPV
Verbindungsleiter

Literatur

1. Burmeister, R.: Elektronik (PfL).
   Studienbücherei, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1979.
2. Pfeifer: Elektronikpraktikum.
   BSB, G. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1986.

8. Aufnehmen der Resonanzkurve von Schwingkreisen

Aufgaben

1. Koppeln Sie verschiedene (mindestens zwei) Reihenschwingkreise induktiv an einen durchstimmbaren Generator!
2. Messen Sie die Stromstärke in Abhängigkeit von der Frequenz! Zeichnen Sie den Graphen der Funktion $I(f)$!
3. Ermitteln Sie jeweils die Bandbreite!

Geräte und Hilfsmittel

Spulen	Strommesser	Generator GF 21 RC
Kondensatoren	Verbindungsleiter	oder UVG 2

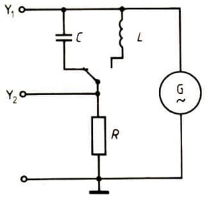
Literatur

Lindner u. a.: Elektrotechnik - Elektronik. 2. Auflage.
VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1983.

9. Bestimmen der Phasenverschiebung eines RC- bzw. RL-Gliedes in einem Wechselstromkreis

Aufgaben

1. Schalten Sie die Bauelemente nach folgendem Schema!



2. Messen Sie bei verschiedenen Widerständen in der RC- und RL-Reihenschaltung die jeweilige Phasenverschiebung zwischen der Gesamtspannung und der Stromstärke!
3. Messen Sie jeweils bei konstantem Widerstand in der RL- und RC-Kombination die Phasenverschiebung zwischen der Gesamtspannung und der Stromstärke bei verschiedenen Frequenzen!
4. Stellen Sie die Meßwerte grafisch dar, und deuten Sie Ihre Ergebnisse!

Geräte und Hilfsmittel

1 Generator UVG 2 oder GF 22	Widerstände, Kondensatoren,
1 Zweistrahloszillograph	Spulen
(notfalls elektronischer	Verbindungsleiter
Umschalter und ED 2)	

10. Untersuchen des Übertragungsverhaltens eines RC-Hochpasses und eines RC-Tiefpasses

Aufgaben

1. Ermitteln Sie experimentell die Übertragungsfunktion

   $g(\omega) = \frac{U_2}{U_1}$ eines RC-Tiefpasses und eines RC-Hochpasses!

2. Tragen Sie in einem Diagramm jeweils $g(\omega)$ über ω auf, ermitteln Sie (grafisch) die untere bzw. obere Grenzfrequenz!
3. Vergleichen Sie die experimentell gefundenen Werte mit den aus den Bauelemente-Kenndaten berechneten Werten!

Geräte und Hilfsmittel

1 RC-Generator GF 22 oder UVG 2

1 Röhrenvoltmeter oder Oszillograph

Widerstände $1\ \mathrm{k}\Omega \leqq R$, $R \leqq 10\ \mathrm{k}\Omega$

Kondensator $C = 1\ \mu F$

Literatur

Lindner u. a.: Elektrotechnik - Elektronik. 2. Auflage. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1983.

11. Bestimmen der Brechzahl von Glas aus der Parallelverschiebung des Lichtes an einer planparallelen Platte

Aufgaben

1. Bestimmen Sie experimentell die Brechzahl von Glas bzw. von Wasser aus der Parallelverschiebung eines Lichtstrahls an einer planparallelen Glasplatte bzw. an einer mit Wasser gefüllten Küvette bei unterschiedlichen Winkeln!
2. Ermitteln Sie jeweils die Brechzahl n aus den $\sin\alpha$ - $\sin\beta$ - Diagrammen!

Geräte und Hilfsmittel

1 Heftleuchte mit Einspaltblende
1 Flachglaskörper (planparallel)
1 Küvette
1 Winkelmesser

4 Stecknadeln
1 Stück Pappe
1 Lineal

12. Bestimmen der Brennweite einer dünnen Zerstreuungslinse

Aufgaben

1. Erarbeiten Sie sich theoretische Grundlagen über verschiedene Methoden zur Bestimmung der Brennweiten dünner Linsen!
2. Bestimmen Sie experimentell die Brennweite einer dünnen Zerstreuungslinse nach mindestens zwei unterschiedlichen Verfahren!

Geräte und Hilfsmittel

4 T-Füße

1 Blendrahmen mit Zerstreuungslinse unbekannter Brennweite

1 Blendrahmen mit Sammellinse bekannter Brennweite

1 Experimentierleuchte

1 Blendrahmen mit Schiebeschacht

1 Schirm

1 Transparentobjekt "L" mit Diarahmen

1 Spiegel (50 mm x 50 mm)

1 Meßstab (1 m)

2 Stativstäbe SEG Mechanik

Literatur

1. Sprockhoff: Physikalische Schulexperimente Strahlenoptik. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1988, S. 122 ff.
2. Autorenkollektiv: Versuche mit dem SEG Optik. VEB Polytechnik, Karl-Marx-Stadt, o. J.

13. Bestimmen der Wellenlänge von monochromatischem Licht mit Hilfe des Doppelkeilspalts und Ermitteln der Gitterkonstanten

Aufgaben

1. Ermitteln Sie experimentell die (mittlere) Wellenlänge des Lichtes der vorgegebenen Filter!
2. Bestimmen Sie mit den erhaltenen Werten die Gitterkonstante eines unbekannten Gitters!

Geräte und Hilfsmittel

1 Experimentierleuchte

1 Handapparat

3 Farbfilter

1 Doppelkeilspalt

3 T-Füße

1 Gitter, k = 0,05 mm

1 Meßstab

1 Blendrahmen mit Schiebeschacht

1 Gitter unbekannter Gitterkonstante

Literatur

Sprockhoff: Physikalische Schulexperimente Wellenlehre, Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1986, S. 118 ff.

14. Bestimmen der Wellenlänge monochromatischen Lichtes mit Hilfe der Newtonschen Ringe

Aufgaben

1. Erarbeiten Sie sich die theoretischen Grundlagen über das Zustandekommen von Newtonschen Ringen zwischen Planglasplatten und schwach gewölbten Linsen!
2. Bestimmen Sie den Krümmungsradius der vorgegebenen Linse mit Hilfe der Newtonschen Ringe unter Verwendung von monochromatischem Licht bekannter Wellenlänge!
3. Ermitteln Sie mit diesem Radius die unbekannte Wellenlänge monochromatischen Lichtes!

Geräte und Hilfsmittel

1 Meßmikroskop
1 Vorrichtung zum Einspiegeln des monochromatischen Lichtes
1 Kondensator
1 Natriumdampflampe
1 Quecksilberdampflampe
2 Monochromatfilter
1 Filterhalter
1 planparallele Glasplatte (geschwärzt)
1 optische Bank
1 schwach gewölbte Linse

Literatur

1. Ilberg u. a.: Physikalisches Praktikum für Anfänger. BSB, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1985, S. 222 ff.
2. Kretschmar u. a.: Physikalisches Praktikum. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1963, S. 185 ff.

Ausgewählte Lösungen

4.2.1. $C = 1{,}45\ \mu F$

4.2.2. a) $L = 128\ mH$

b) $P_S = 0{,}945\ V \cdot A$, $P_W = 0{,}26\ W$, $P_B = 0{,}91\ W$

4.2.3. a) $I = 38\ mA$, $U_R = 7{,}6\ V$, $U_L = 3{,}6\ V$, $U_C = 10\ V$

c) $\varphi = 40^o$

4.2.4. a) $C = 100\ \mu F$

b) $- 87{,}3^o \ldots 88{,}2^o$

4.2.5. b) $f = 7{,}8\ Hz$

4.2.7. $f_g = 796\ Hz$

4.2.8. U_2/U_1 bei 159 Hz maximal, gleich 1/3

4.2.9. a) bei 252 Hz Z minimal, gleich $10\ \Omega$ und I maximal, gleich 0,5 A

b) $U_L = 79{,}2\ V$, $U_C = 79{,}1\ V$

5.1.1. $\beta = 25^o$

5.1.2. $\alpha = 53{,}1^o$

5.1.3. Wellenlänge 606 nm

5.1.4. a) $\Delta\ s_o = 3{,}0\ \mu m$

b) $\Delta\ s_o = 3{,}9\ \mu m$

c) Abstand in Luft 60 mm, in Wasser 46 mm

5.1.5. a) $d_V = 122\ nm$, $d_A = 244\ nm$

b) $d_V = 129\ nm$, $d_A = 257\ nm$

5.1.6. $x_2 - x_1 = 13\ \mu m$

5.1.7. Wellenlänge 785 nm

5.1.8. Durchmesser in Luft 5,18 mm und in Wasser 4,49 mm

5.1.9. Winkel $48{,}4^o$ bzw. $58{,}2^o$

5.1.10. $n = 1{,}36$ (Ethanol)

5.2. $s = 1{,}12$ m

5.2.3. $n = 1{,}5$

5.2.4. $x = 3{,}07$ mm

5.2.5. Winkel der Gesamtablenkung $19{,}43^{\circ}$

5.2.6. $\Delta x = 0{,}1$ mm

5.2.7. 6,9 Dioptrien

5.2.8. $e = 87{,}5$ mm

5.2.9. $f = 6{,}0$ cm, $s_1' = 1{,}4$ m, $s_2' = 3{,}4$ m

5.2.10. $f_1 = 10$ cm, $f_2 = 8$ cm

5.2.11. $s_1 = 14{,}1$ cm, $s_1' = 34{,}1$ cm

6.1.3. $T_e = 625$ K

6.1.4. Beide Größen werden vervierfacht.

6.1.5. $p_1/p_2 = 1$ $T_1/T_2 = 2$

6.1.6. a) $\sqrt{\overline{v^2}} = 1{,}37$ km·s^{-1}

b) $E_{th} = 2{,}16$ MJ

6.1.7. $m = 71$ kg, $T_e = 141$ K

6.1.8. $m = 35{,}7$ kg

6.1.9. $R = 608$ J(kg · K)$^{-1}$

6.1.10. $T = 280$ K

6.1.11. $m = 1{,}13$ kg

6.1.12. a) $p = 1{,}6$ MPa

b) $V_e = 6{,}1$ m^3, $T_e = 370$ K

6.1.13. $\varrho_e = 3{,}47$ kg · m^{-3}

6.1.14. $N = 3 \cdot 10^{23}$

6.1.15. $N = 3{,}2 \cdot 10^{11}$

6.1.16. $\sqrt{\overline{v^2}} = 5 \cdot 10^5$ m · s^{-1}

6.1.17 $\varrho = 0{,}74$ kg · m^{-3}

6.2.1. $m_1 = 14$ kg

6.2.2. $\vartheta_m = 44\ ^oC$

6.2.3. $\Delta T = 13$ K

6.2.4. $T_1 = 673$ K, $p_1 = 1{,}8$ MPa, 0,35 l strömen aus,
$V_e = 64\ cm^3$

6.2.5. $W_m = 92$ J, $T_2 = 804$ K

6.2.6. $\eta = 23$ %

6.2.7. $\eta = 27$ %

6.2.8. Q = 5,43 kWh

6.4.1. $\Delta l = 0{,}45$ mm (ohne Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes)

6.4.2. $V' = 0{,}17\ cm^3$

6.4.3. c) $m_w = 1{,}12$ kg

6.4.4. P = 60 kW

Tabellen

Naturkonstanten (die in diesem Material benötigt werden)

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c_o = 2{,}99792458 \cdot 10^8 \ m \cdot s^{-1}$
Universelle (molare) Gaskonstante	$R_o = 8{,}31441 \ J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
Molares Volumen des idealen Gases bei Normbedingungen	$V_m = 2{,}24138 \cdot 10^{-2} m^3 \cdot mol^{-1}$
Avogadro-Konstante	$N_A = 6{,}02205 \cdot 10^{23} \ mol^{-1}$
Boltzmann-Konstante	$k = 1{,}38066 \cdot 10^{-23} \ J \cdot K^{-1}$

Brechzahlen (bei Wellenlänge 589,2 nm)

Ethylalkohol	1,362	Kronglas FK 3	1,464
Benzol	1,501	BK 1	1,510
Diamant	2,417	SK 1	1,610
Flintglas F3	1,613	Plexiglas	1,491
SF 4	1,755	Polystyrol	1,588
Glyzerin	1,469	Quarzglas	1,458
Kalkspat (o)	1,658	Steinsalz	1,544
(ao)	1,486	Wasser	1,333

Gaskonstanten (spezielle, in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

Argon	208	Luft	287
Butan	143	Neon	412
Helium	2078	Sauerstoff	260
Kohlendioxid	189	Stickstoff	297
Kohlenmonoxid	297	Wasserdampf	461
		Wasserstoff	4125

Spezifische Wärmekapazitäten (bei 20 °C, in $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

feste Stoffe:		flüssige Stoffe:	
Aluminium	0,896	Ethylalkohol	2,39
Beton	0,92	Leichtbenzin	2,09
Blei	0,13	Motorenöl	1,7
Eis (0 °C)	2,09	Quecksilber	0,138
Eisen	0,465	Wasser	4,18
Glas	0,78		
Holz	1,4 ... 1,7		
Kupfer	0,385		
Porzellan	0,80		
Schamotte	0,84		

gasförmige Stoffe:	c_p	c_V
Helium	5,238	3,161
Kohlendioxid	0,846	0,653
Kohlenmonoxid	1,047	0,754
Luft	1,009	0,720
Sauerstoff	0,917	0,653
Stickstoff	1,038	0,745
Wasserstoff	14,27	10,13

Heizwerte in $MJ \cdot kg^{-1}$

Steinkohle	30	Ethylalkohol	27
Rohbraunkohle	ca. 10	Benzin	42 ... 44
Koks	29	Dieselöl	43
Holzkohle	30	Rohöl	ca. 41

Lineare und kubische Ausdehnungskoeffizienten (bei 20 °C)

	in $10^{-6} \cdot K^{-1}$	in $10^{-3} \cdot K^{-1}$
Aluminium	23,8	
Konstantan	15,2	
Kupfer	16,5	
Glas	8,1	
Ethylalkohol		1,10
Benzin		1,00
Quecksilber		0,18
Wasser		0,18

Spezifisches Wärmeleitvermögen bei 20 ° in $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$

Silber	307	Glas	0,7 ... 1,0
Kupfer	384	Wasser	0,58
Stahl	47	PVC	0,17
Quecksilber	8,2	Holz	0,1 ... 0,2
Eis (0 °C)	2,2	Luft	0,034

Wärmeübergangskoeffizienten in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Ruhendes Wasser an Metallwand	350 ... 580
Luft an glatter Fläche	5 ... 25

(Strömungsgeschwindigkeit $0\ m \cdot s^{-1}$ ... $5\ m \cdot s^{-1}$)

Kurzwort: 021157 Phys.Kl11 Erg.SPS
Schulpreis DDR: 3,20
ISBN 3-06-021157-4