

Heribert Stroppe u. a.

PHYSIK

Beispiele und Aufgaben 2

Elektrizität und Magnetismus – Schwingungen
und Wellen – Atom- und Kernphysik



3., aktualisierte Auflage



HANSER

Physikalische Konstanten (CODATA 2006)

Atomare Masseneinheit	u	$= 1,660\,538\,782(83) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
AVOGADRO-Konstante	N_A	$= 6,022\,141\,79(30) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Elektrische Elementarladung	e	$= 1,602\,176\,487(40) \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$= 8,854\,187\,8176 \dots \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1} *$
FARADAY-Konstante	F	$= 96\,485,3399(24) \text{ C mol}^{-1}$
Gaskonstante (molare)	R_m	$= 8,314\,472(15) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Gravitationskonstante	γ	$= 6,674\,28(67) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c_0	$= 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1} *$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$= 12,566\,370\,614 \dots \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1} *$
PLANCKSches Wirkungsquantum	h	$= 6,626\,068\,96(33) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Ruhmasse des Elektrons	m_e	$= 9,109\,382\,15(45) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Ruhmasse des Neutrons	m_n	$= 1,674\,927\,211(84) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Ruhmasse des Protons	m_p	$= 1,672\,621\,637(83) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
RYDBERG-Frequenz	R_{HC_0}	$= 3,289\,841\,960\,361(22) \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
Spezifische Ladung des Elektrons	e/m_e	$= -1,758\,820\,150(44) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$
STEFAN-BOLTZMANN-Konstante	σ	$= 5,670\,400(40) \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Hinweis: Die letzten beiden Ziffern in runden Klammern geben jeweils die Standardabweichung der betreffenden Größe an; sie bezieht sich auf die letzten beiden, vor der Klammer stehenden Dezimalen. Z. B. ist die elektrische Elementarladung zu lesen als $e = (1,602\,176\,487 \pm 0,000\,000\,040) \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Vielfache und Teile von SI-Einheiten

Vorsatz	Zeichen	Faktor	Vorsatz	Zeichen	Faktor	Vorsatz	Zeichen	Faktor
Yotta	Y	10^{24}	Kilo	k	10^3	Nano	n	10^{-9}
Zetta	Z	10^{21}	Hekto ¹⁾	h	10^2	Piko	p	10^{-12}
Exa	E	10^{18}	Deka ¹⁾	da	10	Femto	f	10^{-15}
Peta	P	10^{15}	Dezi ¹⁾	d	10^{-1}	Atto	a	10^{-18}
Tera	T	10^{12}	Zenti ¹⁾	c	10^{-2}	Zepto	z	10^{-21}
Giga	G	10^9	Milli	m	10^{-3}	Yocto	y	10^{-24}
Mega	M	10^6	Mikro	μ	10^{-6}			

¹⁾ Diese Vorsätze sollen nur noch bei solchen Einheiten angewendet werden, bei denen sie bisher gebräuchlich waren, z. B. Hektoliter, Hektopascal, Dezitonne, Zentimeter.

Das griechische Alphabet

Alpha	A	α	Eta	H	η	Ny	N	ν	Tau	T	τ
Beta	B	β	Theta	Θ	ϑ	Xi	Ξ	ξ	Ypsilon	Υ	υ
Gamma	Γ	γ	Iota	I	ι	Omikron	O	o	Phi	Φ	φ
Delta	Δ	δ	Kappa	K	κ	Pi	Π	π	Chi	χ	χ
Epsilon	E	ε	Lambda	Λ	λ	Rho	P	ρ	Psi	Ψ	ψ
Zeta	Z	ζ	My	M	μ	Sigma	Σ	σ	Omega	Ω	ω

*) Exakte Konstante.

STROPPE u. a.
PHYSIK • Beispiele und Aufgaben 2

Prof. Dr. sc. nat. Dr.-Ing. *Heribert Stroppe*

Dr. rer. nat. habil. *Peter Streitenberger*

Dr. rer. nat. *Eckard Specht*

Dr. rer. nat. *Jürgen Zeitler*

Dr. rer. nat. *Heinz Langer*

PHYSIK

Beispiele und Aufgaben

Band 2

*Elektrizität und Magnetismus –
Schwingungen und Wellen –
Atom- und Kernphysik*

3., aktualisierte Auflage

Mit 265 durchgerechneten Beispielen, 225 Zusatzaufgaben
und 153 Bildern



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-41726-7

E-Book-ISBN 978-3-446-43918-4

Umschlagbild: Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln

Bronzerelief am Otto-von-Guericke-Denkmal in Magdeburg (Foto: Jochen Horn, Leipzig)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder von Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

© 2009 Carl Hanser Verlag München

www.hanser.de

Projektleitung: Jochen Horn

Herstellung: Renate Roßbach

Satz: Eckard & Michael Specht, Magdeburg

Grafik: Holger Gräfe, Eckard Specht, Magdeburg

Druck und Bindung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH, Bad Langensalza

Printed in Germany

Vorwort

Der vorliegende Band 2 von „PHYSIK – Beispiele und Aufgaben“ enthält Aufgaben aus den Gebieten Elektrizität und Magnetismus, Schwingungen und Wellen, Optik sowie Atom- und Kernphysik. Das zweibändige Werk wendet sich an alle Studierenden, die eine physikalische Grundlagenausbildung durchlaufen (müssen), vorzugsweise also naturwissenschaftlicher und technischer Studienrichtungen. Hinsichtlich Inhalt, Darstellung und Niveau schließt es an das vom gleichen Verlag herausgegebene, bereits seit 1974 eingeführte Hochschullehrbuch STROPPE „PHYSIK für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften“ an, ist aber unabhängig von diesem und in Verbindung auch mit jedem anderen Physiklehrbuch zu verwenden.

Gegliedert und didaktisch aufbereitet nach Art eines Lehrbuches wird in den beiden Bänden der in einer Physik-Anfängervorlesung üblicherweise behandelte Stoff anhand von gezielt ausgewählten Beispiel- und Zusatzaufgaben wiederholt, gefestigt und vertieft. Für die Beispielaufgaben (mit jeweils eigener Überschrift, die auf das behandelte physikalische Problem hinweist) wird der gesamte Lösungsweg und vollständige Rechengang mit Erläuterung des physikalischen Hintergrundes ausführlich dargestellt, für die Zusatzaufgaben (ohne Überschrift), die der Selbstkontrolle dienen sollen, sind nur die Lösungen und ggf. Zwischenrechnungen angegeben.

Bei der Auswahl der Aufgaben war es in erster Linie unser Bestreben, ein tieferes Verständnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten und ihres theoretischen Gehalts zu erreichen. Das Grundsätzliche soll dabei betont und das formale Denken gefördert werden. Dabei darf jedoch ein anderes wichtiges Anliegen nicht zu kurz kommen: Die Studentin und der Student, welche die Physik als Grundlagenfach betreiben, sollen möglichst frühzeitig deren Bedeutung für die theoretische Grundlegung und Weiterentwicklung anderer Wissenschaftsdisziplinen, vor allem aus dem gesamten Bereich der Technik, erkennen. Aus diesem Grunde wird – wo immer möglich – die praktische Anwendung nicht aus den Augen verloren, und es werden in beiden Bänden Querverbindungen zu anderen Grundlagenfächern, wie z. B. Technische Mechanik, Strömungslehre, Thermodynamik, Elektrotechnik u. a., hergestellt.

Um einen möglichst breiten Benutzerkreis anzusprechen und eingedenk dessen, dass das Verständnis beim Erlernen der Physik erfahrungsgemäß ein allgemeines Problem ist, wurde der Schwierigkeitsgrad der Aufgaben bewusst unterschiedlich gewählt. Die Schwierigkeiten resultieren aber häufig nicht aus der physikalischen Fragestellung, sondern aus dem Anspruch an die für die Lösung des Problems notwendige Mathematik. Leider stehen die erforderlichen mathematischen Grundlagen, bedingt zum einen durch den Studienablauf, zum anderen durch die zuweilen ungenügende Vorarbeit der Schule, nicht immer rechtzeitig und in ausreichendem Maße zur Verfügung. Für den Inhalt dieses Bandes dürfte dies vor allem auf die in der Schwingungs- und Wellenlehre sowie in der Wechselstromlehre und Quantenmechanik vorteilhafte Verwendung von komplexen Zahlen anstelle von trigonometrischen Funktionen, auf das Rechnen mit Vektoren sowie generell auf die Infinitesimalrechnung zutreffen.

Dennoch wurde auf diesbezüglich etwas anspruchsvollere Aufgaben nicht verzichtet; denn stets steht das physikalische Problem im Vordergrund, und dies zu erfassen, ist bei den gegebenen Erläuterungen und Hinweisen, z. B. auf vorausgegangene ähnliche Beispiele, u. E. immer auch dann möglich, wenn der ausführliche Rechengang nicht oder noch nicht durchgängig nachvoll-

zogen werden kann. Man sollte sich deshalb also keinesfalls entmutigen lassen, vielmehr sollten solche Aufgaben für den engagierten Studenten Ansporn zum weiterführenden Lernen sein.

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 M. SPECHT für die Mithilfe beim Satz.

Dem Fachbuchverlag Leipzig sowie dem Carl Hanser Verlag München danken wir an dieser Stelle für über zwei Jahrzehnte gedeihlicher Zusammenarbeit, bei der Herausgabe dieses Buches im Besonderen Herrn Dipl.-Phys. J. HORN, Leipzig.

Magdeburg

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 (in diesem Band) vorkommenden Konstanten nochmals zusammengestellt.

Inhaltsverzeichnis

Band 2:

*Elektrizität und Magnetismus – Schwingungen und Wellen –
Atom- und Kernphysik*

ELEKTRISCHES FELD	9
471–490 Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Feldstärke, Potential, Spannung	9
491–497 Elektrischer Fluss, Flussdichte	11
498–506 Elektrisches Feld in Stoffen. Feldenergie	12
507–525 Kapazität, Kondensatoren	13
GLEICHSTROMKREIS	16
526–537 Einfacher Stromkreis. OHMSches Gesetz	16
538–563 Widerstände und Netzwerke	17
564–575 Energie, Wärme und Leistung von Gleichströmen	21
576–590 Elektrische Leitungsvorgänge. Elektrolyse	22
MAGNETISCHES FELD	24
591–607 Magnetfeld von Dipolen und Gleichströmen	24
608–625 Kraftwirkungen des Magnetfeldes auf Stromleiter und bewegte Ladungsträger	27
626–642 Magnetisches Feld in Stoffen	29
ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION. WECHSELSTROMKREIS	32
643–664 Induktionsgesetz. Selbstinduktion	32
665–679 Wechselstrom	35
SCHWINGUNGEN UND WELLEN	38
680–724 Mechanische Schwingungen	38
725–738 Elektrische Schwingungen	44
739–769 Allgemeine Wellenlehre	46
770–795 Schallwellen. Akustik	50
796–809 Elektromagnetische Wellen	52
OPTIK	54
810–845 Strahlenoptik (Geometrische Optik)	54
846–870 Wellenoptik	59
871–880 Temperaturstrahlung	62
881–888 Photometrie	63

ATOME UND ATOMKERNE	65
889–909 Welle-Teilchen-Dualismus	65
910–925 Atomhülle	68
926–940 Quantenmechanik	70
941–960 Atomkern	73
Lösungen der Aufgaben	77
Sachwortverzeichnis	156

Band 1:

Mechanik – Wärmelehre

KINEMATIK

DYNAMIK

STATIK UND DYNAMIK DES STARREN KÖRPERS

ELASTIZITÄT FESTER KÖRPER

MECHANIK DER FLÜSSIGKEITEN UND GASE

TEMPERATUR UND WÄRME

HAUPTSÄTZE DER THERMODYNAMIK

REALE GASE. PHASENUMWANDLUNGEN

GASKINETIK. AUSGLEICHSVORGÄNGE

ELEKTRISCHES FELD

Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Feldstärke, Potential, 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 Potential des kugelsymmetrischen Feldes (Zentralfeld)

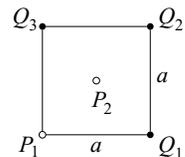
Der Kern des Wasserstoffatoms, das Proton, trägt eine positive Elementarladung. Man bestimme a) die Feldstärke E und das Potential φ auf der kernnächsten Elektronenbahn (Kreisbahn) mit dem sog. BOHRschen Radius $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ m (K-Schale). b) Welche Feldstärke- und Potentialdifferenz besteht zwischen der K- und der darüber liegenden L-Schale mit dem Bahnradius $r_2 = 2^2 r_1$? c) Wie groß ist die potentielle 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?

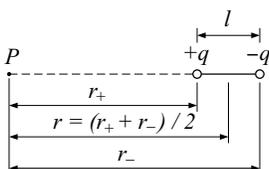
475 Potential eines Punktladungssystems. Potentialdifferenz (Spannung)

(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 Potential 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



Potential 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

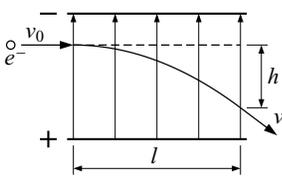
Eine Seifenblase mit dem Durchmesser $2r = 4 \text{ cm}$ sinkt in Luft mit der Geschwindigkeit $v = 3 \text{ cm/s}$ zur Erde (dynamische Viskosität von Luft bei 20°C : $\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$). Wie viele Elementarladungen e müsste sie tragen, um in einem lotrechten elektrischen Feld 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 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. Masse des Elektrons $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

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 Änderung der Gesamtenergie 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 Potentialänderung, die sich bei Vergrößerung der Entfernung auf 500 km ergibt!

484 Welche Arbeit wird verrichtet, wenn ein Elektron eine Potentialdifferenz (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 potentielle 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 Potential? 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 Potential 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 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C/(Vm)}$.

492 Zylindersymmetrisches Feld eines langen Drahtes

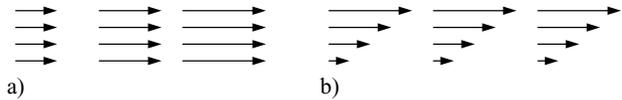
Auf die Oberfläche eines sehr langen, geraden Metalldrahtes von 2 mm Durchmesser werden Ladungen mit dem Ladungsbelag $Q' = Q/l = 90 \text{ nC/m}$ (Ladung je Längeneinheit) gebracht. Welchen Feldstärke- und Potentialverlauf weist das vom Draht erzeugte Feld in seiner Umgebung (Luft) auf? Wie groß sind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

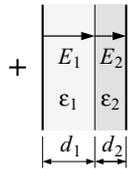
496 Ein elektrisches Feld der Feldstärke $E = 905 \text{ V/m}$ wird durch eine dazu senkrechte Metallschicht abgeschirmt. Wie viel Elementarladungen werden auf der Oberfläche je Flächeneinheit influenziert, d. h., wie groß ist ihre Flächenladungsdichte σ ?

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*

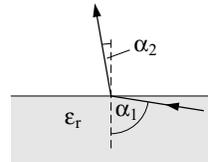
Wie groß ist in Aufgabe 499 die Polarisation P des im Plattenkondensator befindlichen Dielektrikums (Glimmer)? Wie groß sind die infolge Polarisation auf dem Dielektrikum entstandenen freien Oberflächenladungen Q_P ?

501 *Durchgang des E- und D-Feldes durch Grenzflächen*

In einem ausgedehnten Dielektrikum (Sonderkeramik mit $\varepsilon_r = 500$) herrsche ein homogenes elektrisches Feld der Flussdichte $D = 4 \mu\text{C}/\text{m}^2$. Gesucht ist die elektrische Feldstärke E_L in einem darin enthaltenen engen Luftspalt mit $\varepsilon_{rL} = 1$ a) längs zur Feldrichtung, b) quer zur Feldrichtung, c) in einem kleinen kugelförmigen Hohlraum. Feldstärke im Innern einer Kugel, die sich in einem äußeren Feld E_0 befindet: $E_i = 3\varepsilon_a E_0 / (\varepsilon_i + 2\varepsilon_a)$ mit $\varepsilon_i, \varepsilon_a$ Dielektrizitätszahlen im Innen- und Außenraum.

502 *Brechungsgesetz für Feldlinien*

(Bild) Aus einem Dielektrikum mit hoher Dielektrizitätszahl ε_r treten elektrische Feldlinien – auch wenn sie streifend die Oberfläche treffen – nahezu senkrecht aus. Man berechne für Nitrobenzol ($\varepsilon_r = 36$) den maximalen Einfallswinkel α_1 gegen die Grenzflächennormale, für den der Brechungswinkel α_2 nicht mehr als 10° von der Grenzflächennormalen abweicht!

**ZUSATZAUFGABEN**

503 Ein Plattenkondensator ist mit gleich dicken Schichten zweier Isolierstoffe mit den Dielektrizitätskonstanten ε_1 und ε_2 ausgefüllt. Wie groß ist die mittlere (effektive) Dielektrizitätskonstante ε ?

504 Berechnen Sie für den Plattenkondensator in Aufgabe 498 die Anteile der Feldenergie in den beiden mit unterschiedlichen Dielektrika ausgefüllten Kondensatorräumen sowie die Gesamtenergie und die daraus folgende mittlere Energiedichte des Kondensatorfeldes! Plattenfläche $A = 5 \text{ cm}^2$.

505 Im Unterschied zu Aufgabe 499 wird das Dielektrikum (Glimmer, $\varepsilon_r = 7$) erst in den Kondensator eingebracht, wenn dieser bereits an die Spannungsquelle von 500 V angeschlossen ist. Welche Ladung muss von der Spannungsquelle auf den Kondensator nachfließen, wenn sich die Feldstärke im Kondensator nicht ändern soll? Geben Sie die Ladungen Q_0 und Q vor und nach Einbringen des Dielektrikums an!

506 Ein Plattenkondensator (Plattenabstand 5 mm) ist mit einem Dielektrikum gefüllt, das eine Suszeptibilität von $\chi_e = \varepsilon_r - 1 = 1,5$ hat. Am Kondensator liegt eine Spannung von 4 kV . Wie groß ist die Flächendichte der Ladung auf den Kondensatorplatten (σ_K) und auf dem Dielektrikum (σ_D)?

Kapazität, Kondensatoren**507** *Leerer Plattenkondensator*

Auf die 1 cm voneinander entfernten Platten eines luftleeren Kondensators der Kapazität $C_1 = 100 \text{ pF}$ wird aus einer Spannungsquelle die Ladung $Q = 22 \text{ nC}$ aufgebracht. Danach wird der Kondensator wieder von der Spannungsquelle abgeklemmt. a) Welche Spannung U_1 liegt am Kondensator, und wie groß ist die Feldstärke E_1 im Kondensatorraum? b) Welche Werte nehmen Kapazität, Spannung und Feldstärke an, wenn der Plattenabstand auf $d_2 = 2 \text{ cm}$ vergrößert wird?