

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	$\varepsilon_0$	$= 8,854\,187\,8176 \dots \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1} *$
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	$\gamma$	$= 6,674\,28(67) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c_0$	$= 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1} *$
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0$	$= 12,566\,370\,614 \dots \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1} *$
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	$\sigma$	$= 5,670\,400(40) \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

*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 <sup>1)</sup>	h	$10^2$	Piko	p	$10^{-12}$
Exa	E	$10^{18}$	Deka <sup>1)</sup>	da	10	Femto	f	$10^{-15}$
Peta	P	$10^{15}$	Dezi <sup>1)</sup>	d	$10^{-1}$	Atto	a	$10^{-18}$
Tera	T	$10^{12}$	Zenti <sup>1)</sup>	c	$10^{-2}$	Zepto	z	$10^{-21}$
Giga	G	$10^9$	Milli	m	$10^{-3}$	Yocto	y	$10^{-24}$
Mega	M	$10^6$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$			

<sup>1)</sup> 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	$A$	$\alpha$	Eta	$H$	$\eta$	Ny	$N$	$\nu$	Tau	$T$	$\tau$
Beta	$B$	$\beta$	Theta	$\Theta$	$\vartheta$	Xi	$\Xi$	$\xi$	Ypsilon	$\Upsilon$	$\upsilon$
Gamma	$\Gamma$	$\gamma$	Iota	$I$	$\iota$	Omikron	$O$	$o$	Phi	$\Phi$	$\varphi$
Delta	$\Delta$	$\delta$	Kappa	$K$	$\kappa$	Pi	$\Pi$	$\pi$	Chi	$\chi$	$\chi$
Epsilon	$E$	$\varepsilon$	Lambda	$\Lambda$	$\lambda$	Rho	$P$	$\rho$	Psi	$\Psi$	$\psi$
Zeta	$Z$	$\zeta$	My	$M$	$\mu$	Sigma	$\Sigma$	$\sigma$	Omega	$\Omega$	$\omega$

\*) 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](http://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/cm<sup>3</sup> für die Dichte von Eisen der Wert  $7,8 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, anstelle von  $p_0 = 1,013\,25$  bar für den Normluftdruck  $1,013\,25 \cdot 10^5$  Pa (Pascal) usw. Wird dies alles beachtet, erhält man auch die Ergebnisgröße automatisch in der ihr zukommenden kohärenten SI-Einheit.

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

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

# Inhaltsverzeichnis

Band 2:

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

<b>ELEKTRISCHES FELD</b> . . . . .	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
<b>GLEICHSTROMKREIS</b> . . . . .	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
<b>MAGNETISCHES FELD</b> . . . . .	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
<b>ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION. WECHSELSTROMKREIS</b> . . . . .	32
643–664 Induktionsgesetz. Selbstinduktion . . . . .	32
665–679 Wechselstrom . . . . .	35
<b>SCHWINGUNGEN UND WELLEN</b> . . . . .	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
<b>OPTIK</b> . . . . .	54
810–845 Strahlenoptik (Geometrische Optik) . . . . .	54
846–870 Wellenoptik . . . . .	59
871–880 Temperaturstrahlung . . . . .	62
881–888 Photometrie . . . . .	63

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

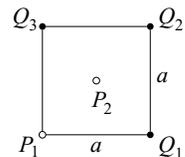
Der Kern des Wasserstoffatoms, das Proton, trägt eine positive Elementarladung. Man bestimme a) die Feldstärke  $E$  und das Potential  $\varphi$  auf der kernnächsten Elektronenbahn (Kreisbahn) mit dem sog. BOHRschen Radius  $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$  m (K-Schale). b) Welche Feldstärke- und Potentialdifferenz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

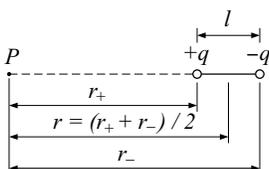
### 475 Potential eines Punktladungssystems. Potentialdifferenz (Spannung)

(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  $\varphi$  und Feldstärke  $E$  im Punkt  $P$  in der Entfernung  $r = 1,50$  m vom Dipol? Wie groß sind  $\varphi$  und  $E$  im Punkt  $P$ , wenn der Dipol durch eine einzelne Punktladung  $q = 20$  nC ersetzt wird? b) Welches Drehmoment wirkt auf den Dipol, wenn sich in  $P$  eine Ladung  $Q = 100$  nC befindet und die Dipolachse senkrecht zu der im Bild gezeichneten Lage steht?

**477 Arbeit beim elektrischen Aufladen**

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

**478 Probeladung im homogenen elektrischen Feld**

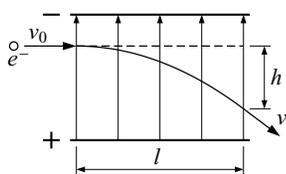
Eine Seifenblase mit dem Durchmesser  $2r = 4 \text{ cm}$  sinkt in Luft mit der Geschwindigkeit  $v = 3 \text{ cm/s}$  zur Erde (dynamische Viskosität von Luft bei  $20^\circ\text{C}$ :  $\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$ ). Wie viele Elementarladungen  $e$  müsste sie tragen, um in einem lotrechten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

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

In einer Vakuumröhre befinden sich zwei parallele plattenförmige Elektroden im Abstand  $d = 2 \text{ cm}$ , an denen eine Spannung  $U = 300 \text{ V}$  liegt. Man bestimme a) die elektrische Feldstärke  $E$  im Raum zwischen den Platten, b) die Kraft auf ein Elektron im Feld zwischen den Platten, c) die von einem Elektron gewonnene Energie, wenn es sich von der Kathode 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  $\alpha$ -Teilchens ( $\text{He}^{++}$ ) der Energie  $E_\alpha = 2 \text{ MeV}$  mit dem Kern eines Aluminiumatoms (Ordnungszahl 13) möglich (RUTHERFORD-Streuung)? Die kinetische Energie geht bei größter Annäherung vollständig in 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  $1 \text{ m}$  Entfernung von einer zweiten Ladung  $50 \mu\text{C}$  und wird a) auf  $50 \text{ cm}$  an diese angenähert, b) auf einer Kreisbahn um diese herumgeführt. Wie groß ist in den beiden Fällen die dazu notwendige Arbeit?

488 Im Abstand von  $1 \text{ m}$  befinden sich zwei Punktladungen  $Q_1 = 5 \text{ nC}$  und  $Q_2 = -3 \text{ nC}$  ( $Q_1$  links von  $Q_2$ ). Auf der Verbindungsgeraden beider Ladungen liegt rechts von  $Q_1$  in der Entfernung  $25 \text{ cm}$  ein Punkt  $A$  und  $25 \text{ cm}$  links von  $Q_2$  ein Punkt  $B$ . a) Welcher Punkt befindet sich auf dem höheren 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  $10 \text{ GeV}$  gebracht. Wie weit hat sich dadurch die Teilchengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit angenähert? Auf das Wievielfache hat die bewegte Masse  $m$  gegenüber ihrer Ruhmasse  $m_0$  zugenommen? Spezifische Ladung des Protons:  $e/m_0 = 9,579 \cdot 10^7 \text{ C/kg}$ .

## Elektrischer Fluss, Flussdichte

### 491 Elektrische Durchflutung

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

### 492 Zylindersymmetrisches Feld eines langen Drahtes

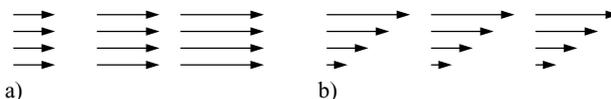
Auf die Oberfläche eines sehr langen, geraden Metalldrahtes von  $2 \text{ mm}$  Durchmesser werden Ladungen mit dem Ladungsbelag  $Q' = Q/l = 90 \text{ nC/m}$  (Ladung je Längeneinheit) gebracht. Welchen Feldstärke- und Potentialverlauf weist das vom Draht erzeugte Feld in seiner Umgebung (Luft) auf?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

494 *Quellen- und Wirbelfeld*

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



ZUSATZAUFGABEN

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

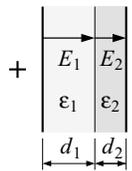
496 Ein elektrisches Feld der Feldstärke  $E = 905 \text{ V/m}$  wird durch eine dazu senkrechte Metallschicht abgeschirmt. Wie viel Elementarladungen werden auf der Oberfläche je Flächeneinheit influenziert, d. h., wie groß ist ihre Flächenladungsdichte  $\sigma$ ?

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

**Elektrisches Feld in Stoffen. Feldenergie**

498 *Geschichtetes Dielektrikum. Effektive Dielektrizitätszahl*

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



499 *Energiedichte des elektrischen Feldes*

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

500 *Elektrische Polarisation*

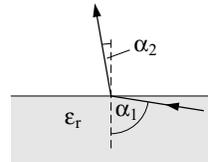
Wie groß ist in Aufgabe 499 die Polarisation  $P$  des im Plattenkondensator befindlichen Dielektrikums (Glimmer)? Wie groß sind die infolge Polarisation auf dem Dielektrikum entstandenen freien Oberflächenladungen  $Q_P$ ?

**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  $\varepsilon_r$  treten elektrische Feldlinien – auch wenn sie streifend die Oberfläche treffen – nahezu senkrecht aus. Man berechne für Nitrobenzol ( $\varepsilon_r = 36$ ) den maximalen Einfallswinkel  $\alpha_1$  gegen die Grenzflächennormale, für den der Brechungswinkel  $\alpha_2$  nicht mehr als  $10^\circ$  von der Grenzflächennormalen abweicht!

**ZUSATZAUFGABEN**

**503** Ein Plattenkondensator ist mit gleich dicken Schichten zweier Isolierstoffe mit den Dielektrizitätskonstanten  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  ausgefüllt. Wie groß ist die mittlere (effektive) Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$ ?

**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  $500 \text{ V}$  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  $5 \text{ mm}$ ) ist mit einem Dielektrikum gefüllt, das eine Suszeptibilität von  $\chi_e = \varepsilon_r - 1 = 1,5$  hat. Am Kondensator liegt eine Spannung von  $4 \text{ kV}$ . Wie groß ist die Flächendichte der Ladung auf den Kondensatorplatten ( $\sigma_K$ ) und auf dem Dielektrikum ( $\sigma_D$ )?

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

Auf die  $1 \text{ cm}$  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?

**508** *Kondensator ohne und mit Dielektrikum*

Ein Luftkondensator der Kapazität  $C_0 = 80 \text{ pF}$  wird auf die Spannung  $U_0 = 220 \text{ V}$  aufgeladen und danach a) von der Spannungsquelle getrennt, b) an der Spannungsquelle belassen. Wie ändern sich im Fall a) und im Fall b) Kapazität, Ladung, Spannung und Energieinhalt des Kondensators, wenn er mit Öl (Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r = 2,75$ ) gefüllt wird?

**509** *Kraft zwischen Kondensatorplatten*

Berechnen Sie die Kraft  $F$ , mit der sich zwei ebene Kondensatorplatten der Fläche  $A = 0,15 \text{ m}^2$  im Abstand  $x = 2 \text{ mm}$  anziehen, wenn zwischen ihnen eine Spannung  $U = 300 \text{ V}$  herrscht! Wie groß muss die Zugspannung  $\sigma$  sein, um die Platten auseinander zu halten?

**510** *Kapazität einer Kugel*

a) Man berechne die Kapazität einer freistehenden Metallkugel vom Durchmesser  $2R = 10 \text{ cm}$ ! b) Welche Flächenladungsdichte ist erforderlich, um sie auf eine Spannung von  $10 \text{ kV}$  aufzuladen?

**511** *Durchschlagsspannung*

Gesucht ist die Spannung  $U$ , auf die eine Metallkugel vom Durchmesser  $2R = 20 \text{ cm}$  in einer Hochspannungsanlage maximal aufgeladen werden kann, wenn die Durchschlags-Feldstärke in Luft  $E_D = 2 \text{ MV/m}$  beträgt. Es wird vorausgesetzt, dass sich die Kugel in hinreichend großem Abstand von leitenden Wänden befindet.

**512** *Koaxialkabel (1)*

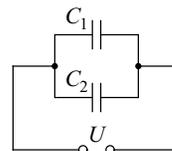
Ein Koaxialkabel besteht aus einer zentralen Ader (Innenleiter vom Radius  $a$ ) und einer sie umgebenden zylindrischen Hülle (Außenleiter mit dem Radius  $b$ ). Dazwischen befindet sich ein Isolator (Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$ ). a) Berechnen Sie allgemein die Kapazität eines solchen Kabels! – *Anleitung*: Man gehe von der Potentialdifferenz zwischen  $r = a$  und  $r = b$  aus (vgl. Aufgabe 492). b) Wie groß ist für ein Koaxialkabel mit  $b/a = 6,667$  und  $\epsilon_r = 2,3$  der Kapazitätsbelag (Kapazität je Längeneinheit)?

**513** *Koaxialkabel (2)*

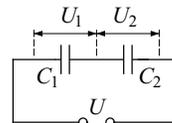
Der Radius der zentralen Ader eines Koaxialkabels beträgt  $a = 1,5 \text{ cm}$ , der Radius der umgebenden zylindrischen Hülle  $b = 3,5 \text{ cm}$ . Zwischen Ader und Hülle besteht ein Potentialunterschied von  $U = 2300 \text{ V}$ . Gesucht ist die elektrische Feldstärke  $E$  in einem Abstand  $r = 2 \text{ cm}$  von der Kabelachse.

**514** *Kondensatorschaltung (1)*

(Bild) Zwei Kondensatoren mit den Kapazitäten  $C_1 = 200 \text{ pF}$  und  $C_2 = 600 \text{ pF}$  werden parallel geschaltet und auf  $120 \text{ V}$  aufgeladen. Man bestimme a) die Ladung auf den Kondensatoren und die Gesamtladung der Schaltung, b) die Gesamtkapazität der Schaltung.

**515** *Kondensatorschaltung (2)*

(Bild) Zwei Kondensatoren ( $C_1 = 1 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 3 \text{ }\mu\text{F}$ ) werden in Reihe geschaltet und dann an  $U = 24 \text{ V}$  Gleichspannung angeschlossen. Man berechne a) die Gesamtkapazität, b) die Gesamtladung und die Einzelladungen auf den Kondensatoren, c) die Spannungen an beiden Kondensatoren, d) die in den Kondensatoren gespeicherte Energie  $W$ . e) Nach dem Laden werden die Kondensatoren von der Spannungsquelle getrennt. Welche Spannung stellt sich ein, wenn sie anschließend mit gleicher/entgegengesetzter Polarität parallel geschaltet werden?



## ZUSATZAUFGABEN

516 Ein  $\gamma$ -Quant erzeugt in einem GEIGER-MÜLLER-Zählrohr eine Ladungslawine von etwa  $10^5$  Elementarladungen. Welche Höhe des Zählrohrimpulses ist bei einer Zählrohrkapazität (einschließlich Schaltkapazität) von 16 pF zu erwarten?

517 Man berechne die Kapazität eines aus einem Metallfolienpaar und einem Papier- oder Kunststofffolienpaar hergestellten platzsparenden Wickelkondensators nach dem Schema des Plattenkondensators und beachte, dass jede Metallfolie beidseitig Ladung trägt! Dicke der Papierfolie  $d_P = 80 \mu\text{m}$ , Dicke der Metallfolie  $d_M = 8 \mu\text{m}$ , Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r = 2,2$ , Volumen des Wickelkondensators  $V = 17 \text{ cm}^3$ .

518 Welche Kapazität hat a) eine aus Stanniolpapier geknetete Kugel von der Größe eines Tischtennisballes ( $R = 1,5 \text{ cm}$ ) und b) die Erdkugel ( $R = 6378 \text{ km}$ )?  $\epsilon_r \approx 1$ .

519 Eine Seifenblase vom Radius  $R_1 = 2 \text{ cm}$  wird auf eine Spannung  $U_1 = 10 \text{ kV}$  aufgeladen. Durch Zerplatzen entstehe ein Tröpfchen vom Radius  $R_2 = 0,5 \text{ mm}$ . Auf welchem Potential  $U_2$  befindet sich das Tröpfchen?

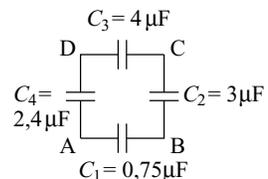
520 Ein Kugelkondensator, wie er z. B. für die Untersuchung photoelektrischer Vorgänge benutzt wird, besteht aus einer inneren Metallkugel (Radius  $R_1 = 0,8 \text{ cm}$ ) als Katode, um die konzentrisch eine innen versilberte Kugelschale (Innenradius  $R_2 = 5 \text{ cm}$ ) als Anode angeordnet ist. Dazwischen herrscht annähernd Vakuum. Man berechne die Kapazität dieses Kondensators! *Anleitung:* Man gehe von der Potentialdifferenz im kugelsymmetrischen Feld (vgl. Aufgabe 473) aus!

521 Zwei Kondensatoren  $C_1 = 1 \mu\text{F}$  und  $C_2 = 4 \mu\text{F}$  werden einzeln auf  $U_0 = 110 \text{ V}$  aufgeladen. Dann werden Sie mit entgegengesetzter Polarität parallel geschaltet. Berechnen Sie die resultierende Ladung und Spannung der Kombination!

522 Drei auf je 500 V aufgeladene 120 pF-Plattenkondensatoren werden in Reihe geschaltet. Gesucht ist a) die Gesamtkapazität der Schaltung, b) die Gesamtspannung zwischen den Endplatten, c) die Ladung auf jedem Kondensator, d) die im System gespeicherte Energie.

523 Ein  $2 \mu\text{F}$ -Kondensator wird auf 50 V aufgeladen. Danach wird er mit einem auf 100 V aufgeladenen  $4 \mu\text{F}$ -Kondensator parallel geschaltet. Wie groß ist a) die Gesamtladung und die Gesamtspannung der Schaltung, b) die Ladung auf jedem der Kondensatoren, c) die in beiden Kondensatoren gespeicherte Gesamtenergie, d) die gespeicherte Gesamtenergie, bevor die Kondensatoren parallel geschaltet wurden?

524 (Bild) Zwischen je zwei Eckpunkten des dargestellten Netzwerkes von Kondensatoren kann man mit einem Messgerät einen Kapazitätswert bestimmen. Welche Gesamtkapazitäten liegen zwischen den Punkten AB, AC, AD, BC, BD und CD?



525 An das Netzwerk von vier Kondensatoren in Aufgabe 524 (Bild) wird zwischen den Punkten A und C eine Spannung von 20 V angelegt. Welche Spannung misst man zwischen den Punkten B und D?