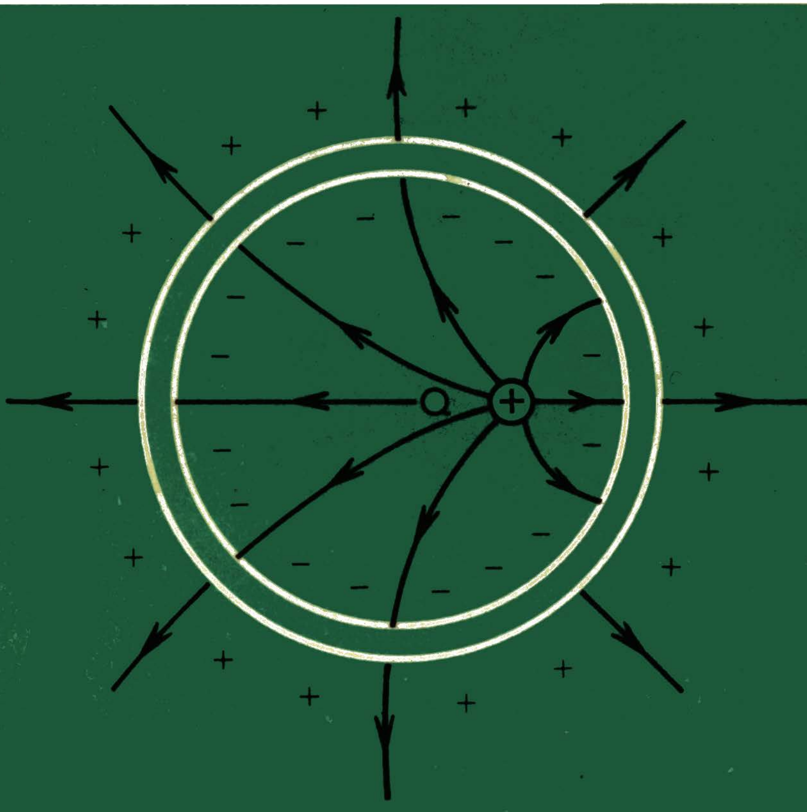
Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek

LEIPZIG



KOGAN

Hundert Aufgaben zur Elektrizität

Hundert Aufgaben zur Elektrizität

B. JU. KOGAN

Mit 57 Abbildungen

LEIPZIG

Verlag MIR, Moskau

BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft

Leipzig 1983

Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek · Band 53

Autor:
Boris Jurjewitsch Kogan

Titel der Originalausgabe:
СТО ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

Verlag NAUKA, Moskau 1976

Deutsche Übersetzung: Dipl.-Phys. H. Börner, Leipzig
Wissenschaftliche Redaktion: Oberlehrer S. Anders, Leipzig

Gemeinschaftsausgabe des Verlages MIR, Moskau, und des
BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig

1. Auflage
VLN 294-375/49/ 83 · LSV 1159
Lektor: Dipl.-Met. Christine Dietrich
Satz und Druck: UdSSR
Bestell-Nr. 666 145 3
DDR 4,30 M

Inhalt

Aufgaben

Elektrostatik

1. Wie groß ist die Ladung aller Elektronen eines Kupferblockes der Masse 1 kg? In welcher Zeit durchfließt diese Ladung das Glühlämpchen einer Taschenlampe? Die Ladung eines Elektrons beträgt $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C und die Stromstärke in der Lampe 0,28 A.

2. Stellen wir uns vor, daß zwei jeweils aus 1 g Elektronen bestehende Ladungen 100 Mill. km voneinander entfernt sind. Mit welcher Kraft wirken sie aufeinander? Die Ladung eines Elektrons beträgt $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C und seine Masse $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg.

3. Wird ein Plast- oder Glasstab elektrisiert, zieht er kleine Papierstückchen an. Befinden sich die Papierstückchen jedoch in der Nähe der Klemmen eines Akkumulators oder einer Taschenlampenbatterie, so ist keinerlei Anziehung zu beobachten. Warum?

4. In ein elektrostatisches Feld wird eine ungeladene Kugel gebracht. Wirkt das Feld mit irgendeiner Kraft auf sie ein?

5. In einem bestimmten Gebiet des Raumes existierte kein elektrisches Feld; als jedoch eine geladene Kugel dorthin gebracht wurde, entstand ein mit einer bestimmten Kraft auf diese Kugel einwirkendes elektrisches Feld. Warum entstand es?

6. Eine positiv geladene Kugel A wird in die Nähe der Metallkugel B gebracht (Abb. 1). Messungen zeigen, daß die elektrische Wechselwirkungskraft zwischen den Kugeln gleich Null ist. Ist die Kugel B geladen?

7. Man beweise: Wenn die Ladung der Kugel B der vorigen Aufgabe positiv und sehr klein ist, stoßen sich die Kugeln A und B nicht ab, sondern ziehen sich an.

8. Eine geladene Kugel A befindet sich im Abstand r von einer ungeladenen Kugel B und zieht diese mit der Kraft F an. Die Durchmesser der Kugeln sind klein im Verhältnis zum Abstand r. Welchen Charakter besitzt die Abhängigkeit F von r? Ändert sich F indirekt proportional zu r^2?

9. Wird der Leiter A aufgeladen, so entstehen auf dem Leiter B induzierte Ladungen; wird jedoch der Leiter B aufgeladen, so entstehen auf dem Leiter A keine induzierten Ladungen. Wann ist ein solches Verhalten zu beobachten?

10. Zwei gleichartigen parallelen Metallplatten wurden negative Ladungen beliebiger Größe zugeführt. Da sich diese Ladungen gegenseitig abstoßen, kann man annehmen, daß sich die Ladungen auf den äußeren Oberflächen der Platten ansammeln. Ist diese Annahme richtig? Der Abstand zwischen den Platten ist klein im Vergleich zu den geometrischen Abmessungen der Platten.

11. Eine unendliche Ebene weist eine Öffnung AB mit dem Durchmesser d auf und ist homogen positiv geladen (Abb. 2). Die Ebene wirkt mit der Kraft $\boldsymbol{F}$ auf eine sich im Abstand l von ihr befindende positive Punktladung Q ein. Wann ist die Kraft größer: bei $l = 5d$ oder bei $l = 10d$?

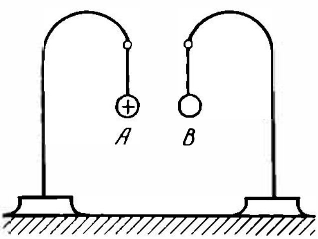


Abb. 1

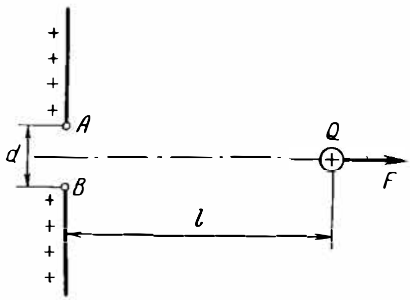


Abb. 2

12. Ein ebener Luftkondensator besitzt die Feldstärke $\boldsymbol{E}$ und die Ladung Q. Welche Kraft wirkt auf jede seiner Platten? Ist diese Kraft gleich $\boldsymbol{E}Q$?

13. Eine geladene Metallplatte befindet sich im elektrostatischen Feld, das in Abb. 3 dargestellt ist. Die Ladung der Platte sei Q, die Feldstärke links der Platte $\boldsymbol{E}_1$, rechts der Platte $\boldsymbol{E}_2$. Welche Kraft wirkt auf die Platte?

14. In Abb. 4 ist das Projekt eines Perpetuum mobile dargestellt. Zwischen den Platten eines geladenen Kondensators befindet sich der Leiter $ABCD$, wie es in der Abbildung gezeigt ist. Da das Kondensatorfeld zwischen seinen Platten konzentriert ist, wirkt im Abschnitt AB eine von A nach B gerichtete elektromotorische Kraft; in allen anderen Abschnitten ist keine elektromotorische Kraft vorhanden. Deshalb wird im Leiter ständig ein Strom aufrechterhalten, dessen Richtung in der Zeichnung angegeben ist. Worin besteht der Fehler der Überlegung?

15. In Abb. 5 ist ein anderes Projekt für ein Perpetuum mobile dargestellt. In einem homogenen elektrostatischen Feld befindet

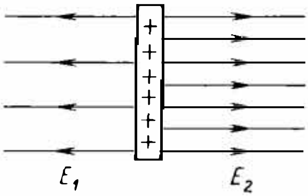


Abb. 3

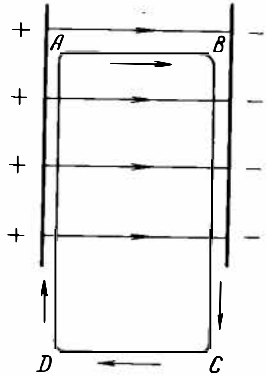


Abb. 4

sich der geschlossene Leiter *ABCDA*. Ein Teil von ihm wird durch den Metallhohlzylinder *KLMN* abgeschirmt. Da im Inneren des Zylinders kein Feld existiert, wirkt im Abschnitt *DC* keine elektromotorische Kraft, wogegen sie im Abschnitt *AB* nach rechts gerichtet ist. Daher wird im Leiter ständig ein Strom in Richtung *ABCDA* aufrechterhalten.
Worin besteht der Fehler dieses Projektes?

16. Eine positive und eine negative Punktladung ziehen sich mit der Kraft F an. Verkleinert sich diese Kraft, wenn man zwischen die Ladungen eine Glaskugel bringt?

17. Die Platten eines Kondensators ziehen sich mit der Kraft F an. Verändert sich diese Kraft, wenn man in den Kondensator eine Platte aus dielektrischem Material einbringt, wie es in Abb. 6 dargestellt ist?

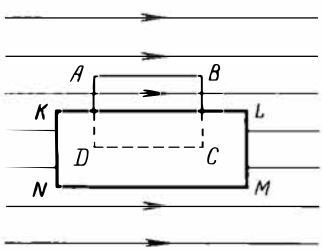


Abb. 5

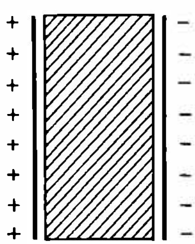


Abb. 6

18. Eine unbeweglich befestigte, positiv geladene Kugel befindet sich über einer negativ geladenen Kugel. Die Ladungen der Kugeln sind gleich groß, ihre Massen betragen jeweils 0,01 g, ihr Radius 1 mm, und der Abstand zwischen ihren Zentren ist 20 mm. Wie groß muß der Potentialunterschied zwischen beiden Kugeln sein, damit die obere Kugel die untere anheben kann?

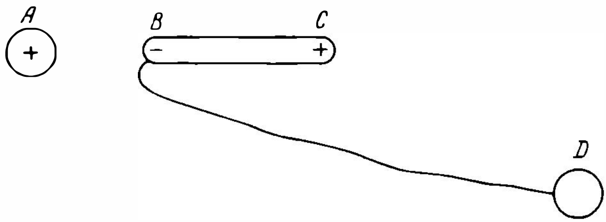


Abb. 7

19. Eine Metallkugel sei geladen, eine andere nicht. Werden beide Kugeln mit einem Draht verbunden, so beginnen Ladungen von der ungeladenen zur geladenen Kugel zu fließen. In welchem Fall ist das möglich?

20. Eine kupferne Hohlkugel mit einem Radius von 10 cm besitzt die Masse 1 kg. Welcher Teil der Elektronen müßte von der Kugel entfernt werden, damit ihr Potential den Wert 10^8 V annimmt? Die Ladung eines Elektrons beträgt $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

21. Wann besitzt ein ungeladener Draht ein positives Potential?

22. Wann besteht zwischen einem positiv geladenen und einem negativ geladenen Leiter keine Potentialdifferenz?

23. Zwei Leiter *A* und *B* werden von anderen Körpern getrennt. Der Leiter *A* ist geladen, der Leiter *B* nicht. Wenn sie jedoch mit einem Draht verbunden werden, findet kein Ladungsfluß von *A* nach *B* statt (ebenso nicht von *B* nach *A*). Nennen Sie Beispiele solcher Leiter!

24. Eine Messinghohlkugel *A* mit einer kleinen Öffnung ist positiv geladen. Bekanntlich sind auf der inneren Oberfläche der Kugel keine Ladungen vorhanden. Lädt sich eine Metallkugel *B* auf, wenn sie leitend mit der inneren Oberfläche der Kugel *A* verbunden wird?

25. Eine positiv geladene Kugel *A* induziert Ladungen auf dem ungeladenen Leiter *BC* (Abb. 7). Danach wird die linke Hälfte des Leiters *BC* mit der ungeladenen Kugel *D* verbunden. Welches Vorzeichen hat die von der Kugel *D* angeeignete Ladung?

26. Zwei Leitern A und B werden positive Ladungen zugeführt, wobei das Potential des ersten Leiters 10 V und das des zweiten Leiters 20 V erreicht. Danach wird die Ladung des Leiters A unbegrenzt vergrößert. Dabei vergrößert sich das Potential des Leiters B ebenfalls, und im Endergebnis bleibt das Potential des Leiters A stets unter dem des Leiters B. Nennen Sie Beispiele solcher Leiter!

27. Zwei konzentrische Hohlkugeln sind geladen: die äußere weist ein Potential von 5 V auf und die innere von 10 V. Vermindert sich das Potential der inneren Hohlkugel und vergrößert sich das der äußeren, wenn man beide mit einem Draht verbindet?

28. Eine Kupferkugel A sei positiv geladen, eine andere Kupferkugel B ungeladen. Die Kugeln haben gleiche Abmessungen und berühren sich fast. Wenn sie durch einen Draht leitend verbunden werden, sinkt die Ladung der Kugel A auf die Hälfte ab. Verringert sich dabei ihr Potential stark?

29. Zwei Leiter werden positiv aufgeladen. Das Potential des ersten beträgt 100 V, das des zweiten 50 V. Wechseln positive Ladungen vom ersten Leiter zum zweiten über, wenn man die Leiter miteinander in Berührung bringt? (Andere Körper befinden sich nicht in der Nähe der Leiter.)

30. Ein Kondensator wird an eine Akkumulatorenbatterie angeschlossen. Er wird geladen und nimmt dabei eine Energie von 1 J auf. Welche Arbeit verrichtet die Batterie?

31. Die Platten eines ebenen Luftkondensators sind an einen Akkumulator angeschlossen. Verringert sich die Feldstärke im Kondensator, wenn man ihn in eine nichtleitende Flüssigkeit mit der Dielektrizitätskonstanten ε taucht?

32. Die Platten eines ebenen Luftkondensators sind an einen Akkumulator angeschlossen. Sie ziehen sich mit der Kraft $\boldsymbol{F}$ an. Wie ändert sich diese Kraft, wenn in den Kondensator eine Platte aus dielektrischem Material eingeführt wird, wie es in Abb. 8 dargestellt ist? Die Dielektrizitätskonstante der Platte beträgt $\varepsilon = 3$.

33. In Abb. 9 ist ein Projekt eines Perpetuum mobile dargestellt. Zwischen den Platten eines ebenen Kondensators befindet sich der Leiter $ABCDA$, dessen unterer Teil in ein Gefäß mit Wasser eintaucht. Der Erfinder nahm folgendes an: Da Wasser ein Dielektrikum ist, wird das Feld im unteren Teil des Kondensators geschwächt; daher ist die elektromotorische Kraft, die auf den Abschnitt AB wirkt, größer als die auf den Abschnitt DC einwirkende elektromotorische Kraft. Als Folge wird im Leiter ständig ein

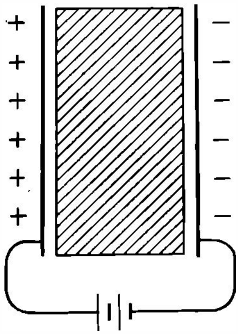


Abb. 8

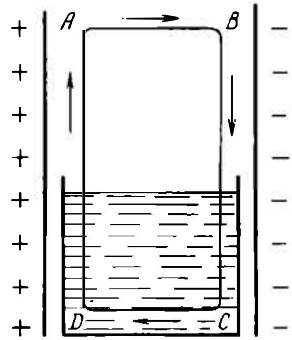


Abb. 9

Strom aufrechterhalten, der so gerichtet ist, wie es Abb. 9 zeigt. Worin besteht der Fehler dieses Projektes?

34. Ein ebener Kondensator, der von den Platten *1* und *2* gebildet wird, wurde bis zu einem Potentialunterschied von 40 V aufgeladen und der aus den Platten *3* und *4* bestehende ebene Kondensator bis zu einem Potentialunterschied von 30 V (Abb. 10). Welche Feldstärke besteht zwischen den Platten *3* und *4*, wenn $d = 2$ cm und $d' = 1$ cm beträgt?
Beim Lösen dieser Aufgabe sagte ein Schüler: „Das betrachtete Feld erhält man aus der Superposition der Felder der Kondensatoren (*1, 2*) und (*3, 4*). Folglich beträgt die gesuchte Feldstärke

$$E = \frac{U_{12}}{d} + \frac{U_{34}}{d'} = \frac{40\ \mathrm{V}}{0{,}02\ \mathrm{m}} + \frac{30\ \mathrm{V}}{0{,}01\ \mathrm{m}} = 5000\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}.\text{“}$$

Ist diese Antwort richtig?

35. Zwei gleichartige Metallkugeln S_1 und S_2 befinden sich in einem großen Abstand voneinander und sind positiv geladen. Eine ungeladene Metallkugel s, die wesentlich kleiner als die Kugeln S_1 und S_2 ist, befindet sich in sehr großer Entfernung von ihnen. In einem Experiment wird die Kugel s durch einen dünnen Draht mit der Kugel S_1 und in einem anderen Experiment mit der Kugel S_2 verbunden. Dabei nimmt sie im ersten Fall die Ladung Q_1 und im zweiten Fall die Ladung Q_2 auf. Welche Ladung nimmt die Kugel s auf, wenn sie gleichzeitig mit den Kugeln S_1 und S_2 leitend verbunden wird?

36. Bekanntlich ist die Kapazität eines ebenen Luftkondensators indirekt proportional dem Abstand zwischen seinen Platten. Ver-

ringert sie sich bis auf Null, wenn man den Abstand zwischen den Platten bis ins Unendliche vergrößert?

37. Zwischen den Punkten A und B einer Kondensatorenkette besteht der Potentialunterschied U. Ein Kondensator der Kapazität C wird an diesen Punkten angeschlossen. Erreicht dann seine Ladung den Wert CU?

38. Vergrößern sich die Ladungen der Kondensatoren C_1 und C_2 der in Abb. 11 gezeigten Kondensatorenkette, wenn ihre Kapazitäten erhöht werden?

39. Der Kondensator in Abb. 12 hat die Kapazität C. Erhält er die Ladung Q_0 und wird der Schalter K geschlossen, so beginnt er sich über den Widerstand R zu entladen. Schätzen Sie seine Entladungszeit ab!

Betrachten wir diesen Kondensator zu einem beliebigen Zeitpunkt während seines Entladeprozesses. Seine Ladung in diesem Moment sei Q, der Potentialunterschied zwischen seinen Platten U. Der Entladungsstrom ist dann in diesem Moment gleich

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\frac{Q}{C}}{R} = \frac{Q}{CR}.$$

Da $Q \leq Q_0$, ist $I \leq \frac{Q_0}{CR}$. Wenn t die Zeit ist, in der sich der Kondensator vollständig entlädt, dann gilt deshalb

$$t \geq \frac{Q_0}{\frac{Q_0}{CR}},$$

d. h.

$$t \geq CR.$$

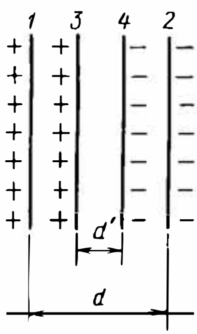


Abb. 10

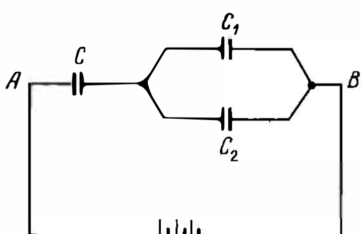


Abb. 11

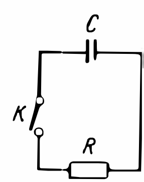


Abb. 12

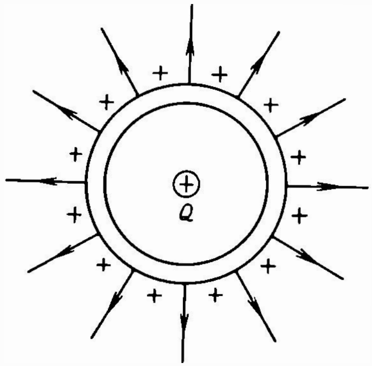


Abb. 13

Wenn z.B. $C = 0{,}001$ F und $R = 10\,000\ \Omega$ ist, so benötigt der Kondensator zur Entladung mehr als 10 s, so gering seine Anfangsladung Q_0 auch sein mag. Wie kann man dieses Resultat verstehen?

40. In den Lehrbüchern wird geschrieben, daß sich die Kraftlinien eines elektrostatischen Feldes nicht schneiden. Ist diese Aussage gänzlich richtig?

41. Bekanntlich befinden sich die Ladungen eines Leiters immer auf dessen Oberfläche. Oft wird das dadurch erklärt, daß gleichartige Ladungen einander abstoßen, daß sie bestrebt sind, sich voneinander so weit wie möglich zu entfernen, und sich dadurch an der Oberfläche ansammeln. Ist diese Erklärung richtig?

42. Befindet sich im Zentrum einer metallischen Hohlkugel die positive Punktladung Q, so ist das Feld außerhalb der Hohlkugel symmetrisch (Abb. 13). Zeigen Sie, daß sich das Feld nicht ändert, wenn sich die Punktladung nicht im Zentrum, sondern in einem beliebigen Punkt im Innern der Hohlkugel befindet!

43. Zwei gleichartige Metallkugeln befinden sich in einem großen Abstand voneinander. Erhalten sie unterschiedliche positive Ladungen Q_1 und Q_2, so ist die potentielle Energie dieses Systems

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r}, \tag{1}$$

wobei r der Abstand zwischen beiden Kugeln ist. Werden die Kugeln für eine kurze Zeit durch einen Draht miteinander verbunden, so wird die Ladung jeder Kugel gleich

$$Q_1' = Q_2' = \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2),$$

und für die potentielle Energie dieses Systems erhalten wir

$$W' = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1' Q_2'}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r} \left[\frac{Q_1 + Q_2}{2}\right]^2$$
$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r} \left(\frac{Q_1^2}{4} + \frac{Q_2^2}{4} + \frac{Q_1 Q_2}{2}\right)$$
$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r} \left[\left(\frac{Q_1 - Q_2}{2}\right)^2 + Q_1 Q_2\right]. \qquad (2)$$

Vergleichen wir die Gleichungen (1) und (2) miteinander, so sehen wir, daß $W' > W$, d.h., die potentielle Energie dieser Ladungen wurde größer. Woher kam dieser Energiezuwachs?

Elektrischer Strom

44. In der Nähe der Erdoberfläche existiert ein elektrostatisches Feld mit einer Feldstärke von ungefähr 130 V/m. Kann man mit diesem Feld einen konstanten elektrischen Strom erhalten?

45. In einem elektrostatischen Feld ist das Potential des Punktes *A* größer als das des Punktes *B*. Wird jedoch der Leiter *AB* in dieses Feld gebracht, fließt in ihm kein Strom. Warum?

46. Bringt man in eine wäßrige Lösung von Schwefelsäure eine Zink- und eine Kupferplatte ein, so entsteht zwischen ihnen ein Potentialunterschied (offenes Voltaelement). Diese Platten und die dazwischen befindliche Säure sind Leiter, und alle Punkte eines Leiters sollten ein gleiches Potential besitzen. Wodurch entsteht aber dieser Potentialunterschied?

47. Der in Abb. 14 gezeigte Abschnitt *AB* ist Bestandteil eines Stromkreises. Zwei Schüler erörtern, wie der durch den Widerstand *R* fließende Strom gerichtet ist. Der eine vertritt folgende Meinung: Da der Strom stets von + nach − fließt und + sich links befindet, fließt der betrachtete Strom in der Richtung *ARB*.

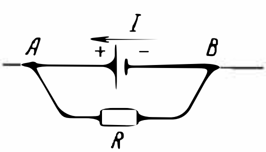


Abb. 14

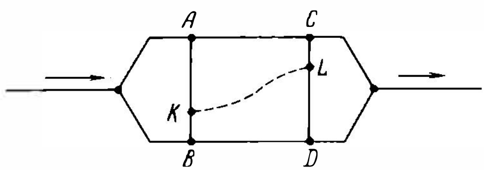


Abb. 15

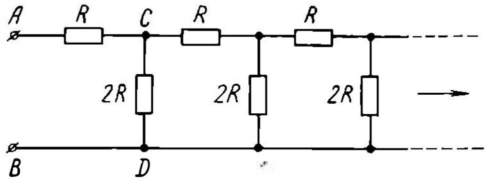


Abb. 16

Der andere aber meint, daß der gesuchte Strom in der Richtung *BRA* fließe, da *B* ein Knotenpunkt sei und der Strom im Abschnitt *AB* von *B* nach *A* fließe. Wer von beiden hat recht?

48. In den in Abb. 15 gezeigten Abschnitten *AKB* und *CLD* fließt kein Strom. Fließt im Abschnitt *KL* ein Strom, wenn die Punkte *K* und *L*, wie durch die gestrichelte Linie dargestellt, miteinander verbunden werden?

49. In Abb. 16 wird ein Stromkreis gezeigt, der sich nach rechts bis ins Unendliche fortsetzt. Wie groß ist sein Widerstand? Die Spannung wird an die Punkte *A* und *B* angelegt.

50. Ein galvanisches Element ist durch zwei parallele Leiter kurzgeschlossen. Verringert sich der Strom in beiden Leitern, wenn deren Widerstand erhöht wird?

51. In dem in Abb. 17 dargestellten Stromkreis sind die Widerstände aller Abschnitte gleich groß. Das Potential des Punktes *B* ist offensichtlich höher als das des Punktes *D* und auch als das des Punktes *F*. Hieraus schlußfolgern wir: Wenn der Punkt *B* mit den Punkten *D* und *F* verbunden wird, fließt der Strom im Abschnitt *BD* von *B* nach *D* und im Abschnitt *BF* von *B* nach *F*. Ist diese Schlußfolgerung richtig?

52. Es steht eine unbegrenzte Anzahl von Taschenlampenbatterien zur Verfügung. Kann man sie auf irgendeine Art miteinander

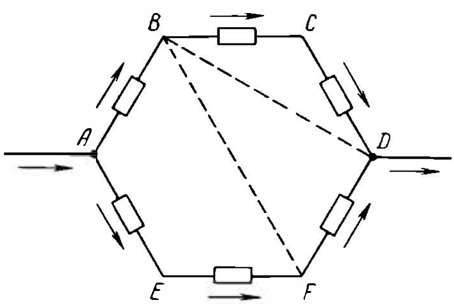


Abb. 17

verbinden, so daß eine für sehr starke Ströme ausgelegte Glühlampe leuchten wird?

53. In Abb. 18 ist ein Stromkreis dargestellt, der aus der Lampe *1* mit einer Leistung von 40 W, dem Schalter *K* und dem Glühlämpchen *2* einer Taschenlampe besteht. Bei geschlossenem Schalter *K* wurde der Stromkreis an die Netzspannung angeschlossen. Danach öffnete man den Schalter. Dabei brannte die Lampe *2* normal. Als der Stromkreis bei geöffnetem Schalter *K* an Netzspannung angeschlossen wurde, brannte das Glühlämpchen der Taschenlampe sofort durch. Warum?

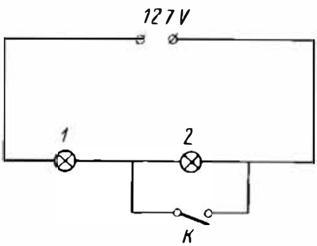


Abb. 18

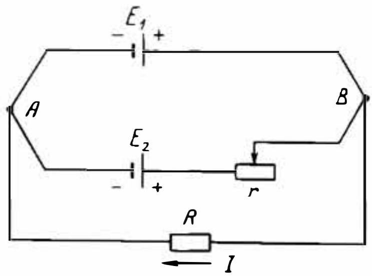


Abb. 19

54. Wir betrachten den aus den Elementen mit den elektromotorischen Kräften E_1 und E_2, dem Widerstand R und dem Rheostaten r bestehenden Stromkreis (Abb. 19). In welchem Fall hängt die Stromstärke I nicht vom Widerstand des Rheostaten r ab?

55. Nach Erhöhung des Widerstandes R_1 des in Abb. 20 dargestellten Stromkreises erhöhte sich die Stromstärke I ebenfalls. Unter welchen Bedingungen wird ein solches Verhalten beobachtet?

56. In dem Stromkreis der Abb. 20 werden alle Widerstände vergrößert. Kann sich dadurch die Stromstärke I erhöhen?

57. In dem in Abb. 20 dargestellten Stromkreis sind die durch die Widerstände R_1 und R_2 fließenden Ströme I_1 und I_2 von links nach rechts gerichtet. Werden sie größer, wenn die elektromotorischen Kräfte E_1 und E_2 erhöht werden, ohne daß dabei die Innenwiderstände dieser Elemente anwachsen?

58. Ein Akkumulator A_1 wird mit den Akkumulatoren A_2 in Reihe geschaltet. Danach wird die so entstandene Batterie an einen äußeren Widerstand angeschlossen. Wann hängt der durch diesen Widerstand fließende Strom nicht von der Anzahl der miteinander verbundenen Akkumulatoren ab?

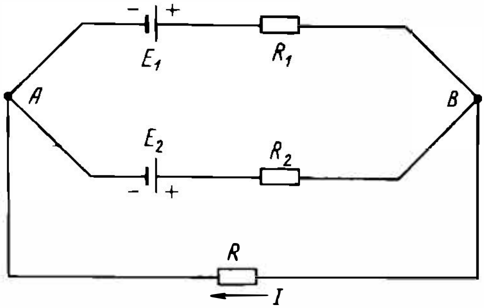


Abb. 20

59. Die Stromstärke im äußeren Stromkreis eines Akkumulators A_1 betrug 1 A. Um sie zu erhöhen, wurden zum Akkumulator A_1 die Akkumulatoren A_2 in Reihe geschaltet, jedoch blieb unabhängig von ihrer Anzahl die Stromstärke von 1 A im äußeren Stromkreis bestehen. Danach schaltete man die Akkumulatoren A_2 parallel zu A_1. Jedoch blieb weiterhin die Stromstärke von 1 A im äußeren Stromkreis unabhängig von der Anzahl der Akkumulatoren A_2 erhalten. Die elektromotorische Kraft des Akkumulators A_1 ist gleich 12 V und die von A_2 8 V. Berechnen Sie die Innenwiderstände der Akkumulatoren und den Widerstand des äußeren Stromkreises!

60. Die Spannung zwischen den Punkten A und B beträgt 100 V (Abb. 21). Brennt das Glühlämpchen einer Taschenlampe durch, wenn man sie an die Punkte A und B anschließt und den Kontakt K schließt?

61. Im Stromkreis der Abb. 22 zeigt jedes Voltmeter 110 V an, und jede der Lampen L_1 und L_2 ist für 110 V ausgelegt; jedoch besitzen die Lampen verschiedene nominale Leistungen. Kann man die Kontakte K_1 und K_2 schließen, ohne die Gefahr einzugehen, daß die Lampen durchbrennen?

62. Wir betrachten den Stromkreis der Abb. 23. Wird nur der Kontakt K_1 geschlossen, fließt durch den Widerstand R der Strom I_1; wird jedoch nur der Kontakt K_2 geschlossen, fließt durch den Widerstand R der Strom I_2. Beträgt, wenn beide Schalter ge-

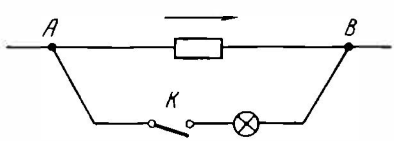


Abb. 21

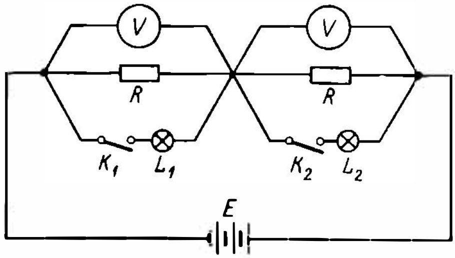


Abb. 22

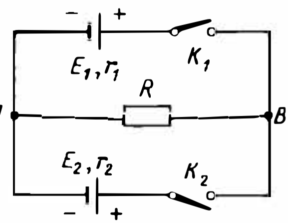


Abb. 23

schlossen sind, der durch diesen Widerstand fließende Strom $I_1 + I_2$?

63. Für den Stromkreis der Abb. 23 soll gelten: $r_1 = r_2 = 0$ und $E_1 \neq E_2$. Wir wollen jetzt die Ströme in diesem Stromkreis nach dem Schließen der Kontakte K_1 und K_2 berechnen. Es sei $\varphi_B - \varphi_A = U$. Dann gilt entsprechend dem Ohmschen Gesetz

$$E_1 - U = I_1 r_1 = 0,$$
$$E_2 - U = I_2 r_2 = 0,$$

woraus

$$E_1 = U,$$
$$E_2 = U$$

folgt, was mit der Voraussetzung $E_1 \neq E_2$ im Widerspruch steht. Lösen Sie diesen Widerspruch!

64. Der Potentialunterschied zwischen den Punkten A und B eines Stromkreises sei U. Wenn diese Punkte mit einem Leiter mit dem Widerstand R verbunden werden, fließt durch ihn der Strom I. Welcher Strom würde durch diesen Widerstand fließen, wenn er nur halb so groß wäre?

65. In der Erdatmosphäre finden durchschnittlich hundert Blitzentladungen je Sekunde statt. Die Dauer eines Blitzes beträgt rund 0,001 s. Für den Potentialunterschied zwischen seinen Enden kann man 10^9 V und für die Stromstärke 20 000 A annehmen. Bestimmen Sie den jährlichen Verbrauch an Elektroenergie in allen Blitzen der Erde und vergleichen Sie ihn mit der jährlich in der Welt erzeugten Elektroenergie (ungefähr $2 \cdot 10^{19}$ J)!

66. Eine für 220 V ausgelegte Lampe wurde an ein Netz mit 127 V angeschlossen. Aus $P = \frac{U^2}{R}$ und $\frac{220^2}{127^2} = 3$ kann man schlie-

ßen, daß ihre Leistung nur ein Drittel ihrer Nennleistung beträgt. Ist das richtig?

67. Wofür wird die von einem Haushaltkühlschrank verbrauchte Elektroenergie benötigt?

68. Ein Waggon ist durch 5 in Reihe geschaltete Glühlampen beleuchtet. Auf jeder Lampe steht: 110 V, 25 W. Man ersetzt eine von ihnen durch eine neue, auf der 110 V, 40 W steht. Leuchtet sie heller als die anderen?

69. In Abb. 24 sind sechs Lämpchen für Taschenlampen dargestellt, die über einen Rheostaten an das 127-V-Netz angeschlossen sind, wobei jede Lampe normal leuchtet. Verringert sich die von ihnen erzeugte Helligkeit, wenn eine von ihnen durchbrennt?

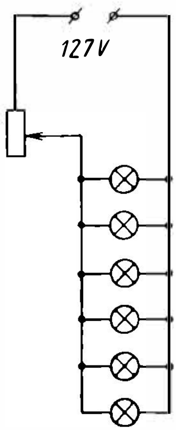


Abb. 24

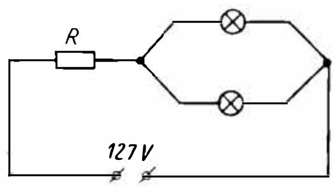


Abb. 25

70. Zwei gleichartige Lampen sind entsprechend Abb. 25 an das 127-V-Netz angeschlossen. Ist ihre Nennleistung groß, so zeigt sich bei entsprechender Auswahl des Widerstandes *R* folgender Effekt: Sind beide Lampen angeschlossen, leuchten sie nicht. Wird eine von ihnen herausgeschraubt, beginnt die zweite zu leuchten, jedoch nicht mit voller Stärke. Erklären Sie diese Erscheinung!

71. Es stehen ein Schalter und zwei Lampen mit einer Leistung von 75 W und 15 W zur Verfügung. Stellen Sie aus ihnen einen Stromkreis zusammen, so daß folgende Bedingung erfüllt ist: Bei geschlossenem Schalter leuchtet nur die 75-W-Lampe und bei geöffnetem Schalter nur die Lampe mit 15 W.

72. Sowohl bei Parallel- als auch bei Reihenschaltung zweier gleichartiger Akkumulatoren wird an einen äußeren Widerstand die Leistung 80 W abgegeben. Welche Leistung wird an diesen Widerstand abgegeben, wenn er nur an einen dieser Akkumulatoren angeschlossen wird?

73. An einen äußeren Widerstand eines Akkumulators wurde eine Wärmeleistung von $P = 10$ W abgegeben. Wenn ein zweiter gleichartiger Akkumulator an diesen Widerstand angeschlossen wird, erhöht sich die Leistung P auf das Zweifache, d.h., sie erreicht 20 W. Wie groß wird sie, wenn noch ein dritter gleichartiger Akkumulator an diesen Widerstand angeschlossen wird?

74. Entsprechend dem 1. Faradayschen Gesetz ist die Masse eines durch Elektrolyse abgeschiedenen Stoffes

$$m = kIt,$$

k ist ein Proportionalitätsfaktor. Dabei wird eine Elektroenergie von

$$W = UIt = \frac{Um}{k}$$

verbraucht, worin U die Spannung ist, bei der die Elektrolyse durchgeführt wird. Dieser Ausdruck zeigt, daß man die Energie, die notwendig ist, um eine bestimmte Stoffmenge abzuscheiden, beliebig gering halten kann, wenn die Elektrolyse bei sehr geringer Spannung durchgeführt wird. Zum Beispiel kann man bei der Elektrolyse von Wasser 1 kg Knallgas mit einem geringfügigen Verbrauch an Elektroenergie erzeugen. Dieses steht jedoch offensichtlich im Widerspruch zum Gesetz der Erhaltung der Energie, da die Wärmemenge, die bei der Explosion von 1 kg Knallgas freigesetzt wird, nicht geringfügig ist.
Lösen Sie diesen Widerspruch!

Elektromagnetismus

75. Eine Kugel aus Weicheisen wurde zuerst in ein schwaches Magnetfeld gebracht und danach in ein starkes, wobei im zweiten Fall eine kleinere Kraft auf die Kugel einwirkte als im ersten. Wann kann ein solches Verhalten beobachtet werden?

76. Eine Kugel aus Weicheisen befindet sich in der Nähe von zwei Magneten (Abb. 26). Wäre der zweite Magnet nicht vorhanden, würde der erste Magnet mit der Kraft F_1 auf die Kugel wirken; wäre dagegen der erste Magnet nicht vorhanden, so würde der

Abb. 26

Abb. 27

zweite Magnet mit der Kraft $\boldsymbol{F}_2$ auf die Kugel wirken. Ist die Kraft $\boldsymbol{F}$, mit der beide Magneten auf die Kugel wirken, gleich der vektoriellen Summe der Kräfte $\boldsymbol{F}_1$ und $\boldsymbol{F}_2$?

77. Die bei der Annäherung zweier sich abstoßender Magneten verrichtete Arbeit wird offensichtlich für die Erhöhung der Energie des magnetischen Feldes benötigt. Wofür wird die Arbeit aufgewendet, die bei der Annäherung zweier sich abstoßender Ströme verrichtet wird, d.h. zweier Leiter, durch die Ströme in entgegengesetzter Richtung fließen?

78. Der Leiter *AB* (Abb. 27) wird so bewegt, daß durch ihn vom Punkt *A* zum Punkt *B* ein Strom fließt. In welchem dieser Punkte ist das größere Potential vorhanden?

79. Eine rotierende Kupferscheibe ist mit dem unbeweglichen Leiter *ABCD* durch die Schleifkontakte *A* und *D* verbunden (Abb. 28). Die Scheibe und der Leiter befinden sich in einem senkrecht zur Zeichenebene liegenden homogenen Magnetfeld. Verändert sich bei Rotation der Scheibe der magnetische Fluß durch die Schleife *ABCDA*? Fließt im Leiter *ABCD* ein Strom?

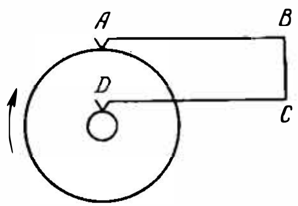


Abb. 28

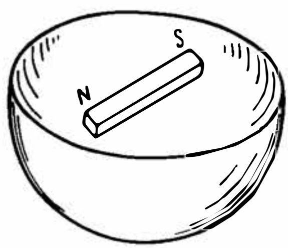


Abb. 29

80. Ein supraleitender Ring befindet sich in der Nähe eines Permanentmagneten und wird von dem magnetischen Fluß Φ durchdrungen. Strom fließt im Ring nicht. Wie groß ist der magnetische Fluß durch den Ring, wenn der Magnet entfernt wird?

81. Folgender effektvoller Versuch ist bekannt: Wenn ein Magnet über eine Schale aus supraleitendem Material gebracht wird, so schwebt er unbeweglich über dieser Schale (Abb. 29). Wie kann dieses Verhalten erklärt werden?

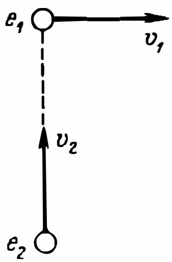


Abb. 30

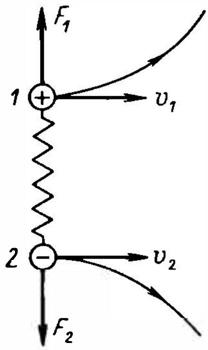


Abb. 31

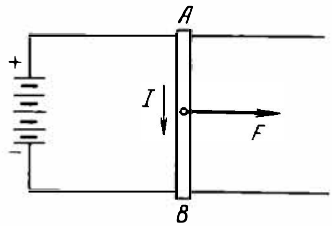


Abb. 32

82. Die Elektronen e_1 und e_2 bewegen sich wie in Abb. 30 dargestellt. $\boldsymbol{F}$ sei die Kraft, mit der das Magnetfeld des ersten Elektrons auf das zweite Elektron wirkt, und $\boldsymbol{F}'$ die Kraft, mit der das Magnetfeld des zweiten Elektrons auf das erste Elektron wirkt. Sind die Kräfte $\boldsymbol{F}'$ und $\boldsymbol{F}$ gleich groß?

83. Die in Abb. 31 gezeigten Kugeln *1* und *2* fliegen in ein senkrecht zur Zeichenebene verlaufendes homogenes Magnetfeld hinein. Die mit einer Feder verbundenen Kugeln bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit, besitzen die gleichen Massen und die gleichen Ladungen, jedoch mit unterschiedlichen Vorzeichen.
Da auf die Kugeln die Lorentzkräfte $\boldsymbol{F}_1$ und $\boldsymbol{F}_2$ senkrecht zu den Geschwindigkeiten $\boldsymbol{v}_1$ und $\boldsymbol{v}_2$ wirken, bewegen sie sich, wie in der Abbildung dargestellt ist. Dabei wird die Feder gespannt und erhält eine bestimmte potentielle Energie. Auf wessen Kosten?

84. Der Metallstab *AB* kann auf zwei sich in der horizontalen Ebene befindlichen Schienen gleiten (Abb. 32). Durch den Stab fließt ein von einem Akkumulator aufrechterhaltener Strom *I*. Dieses System befindet sich in einem vertikal (senkrecht zur Zeichenebene) gerichteten homogenen Magnetfeld.

Da das Magnetfeld mit der Kraft $\boldsymbol{F}$ auf den Stab einwirkt, bewegt er sich, und die Kraft $\boldsymbol{F}$ verrichtet Arbeit. Diese Kraft besteht aus Lorentzkräften, die auf die Elektronen wirken, die sich durch den Leiter AB bewegen. Da aber Lorentzkräfte keine Arbeit verrichten, verrichtet auch die Kraft $\boldsymbol{F}$ keine Arbeit. Lösen Sie diesen Widerspruch!

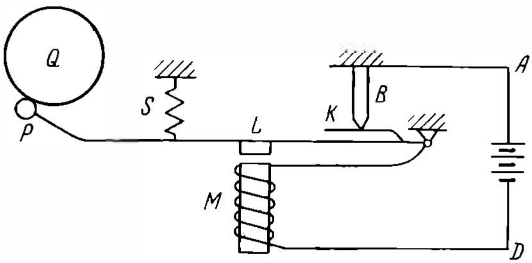


Abb. 33

85. In Abb. 33 ist das Schaltbild einer Gleichstromklingel dargestellt. Wenn durch den Kreis *ABKCMDA* Strom fließt, zieht der Elektromagnet *M* den Anker *L* an. Dabei löst sich das elastische Plättchen *K* von dem Stift *B*, und der Stromkreis wird unterbrochen. Dann zieht die Feder *S* den Anker *L* in seine Ausgangslage zurück, und der Stromkreis wird erneut geschlossen, der Anker vom Magnet angezogen usw. Im Endergebnis vollzieht der Anker periodische Schwingungen, und der Hammer *P* schlägt an die Glocke *Q*.

Betrachten wir die Funktion der Klingel genauer. In Abb. 34 sind drei Stellungen des Ankers gezeigt: In Stellung *1* befindet er sich im oberen Punkt, in Stellung *2* wird der Stromkreis gerade unterbrochen, in Stellung *3* befindet sich der Anker im untersten Punkt. Bei der Bewegung des Ankers aus der Stellung *1* in die Stellung *2* wirkt der Elektromagnet auf ihn ein mit der Kraft $\boldsymbol{F}$, die die positive Arbeit A_{12} verrichtet. Bei der Bewegung des Ankers von Stellung *2* nach *3* und von Stellung *3* nach *2* ist die Kraft $\boldsymbol{F}$ gleich Null, und es wird keine Arbeit verrichtet. Bei der Bewegung des Ankers aus der Stellung *2* in die Stellung *1* wirkt auf ihn erneut die Kraft $\boldsymbol{F}$ ein; da sie nach unten gerichtet ist und sich der Anker nach oben bewegt, ist die durch sie verrichtete Arbeit $\boldsymbol{A}_{21}$ negativ. Die Kraft $\boldsymbol{F}$ besitzt bei der Bewegung von Stellung *2* nach *1* die gleiche Größe wie bei der Bewegung von Stellung *1* nach *2*. Daher ist $\boldsymbol{A}_{21} = -\boldsymbol{A}_{12}$, d.h., die von der Kraft $\boldsymbol{F}$ verrichtete Arbeit pro Zyklus ist gleich Null. Da die Bewegung des Ankers von energetischen Verlusten begleitet ist (z. B. beim Schlag des Hammers an die Glocke), kommen wir zu der Schlußfolgerung, daß die Klingel nicht funktionieren kann. Warum funktioniert sie trotzdem?

86. In einem Gleichstromgenerator für Demonstrationszwecke wird das Magnetfeld von Permanentmagneten erzeugt und der Anker durch ein herabsinkendes Gewicht in Rotation versetzt. (Das Gewicht ist an einem Faden befestigt, der auf der Welle des Generators aufgewickelt ist.) Vergrößert sich der von diesem Generator erzeugte Strom, wenn seine Magneten verstärkt werden?

87. An den in der vorhergehenden Aufgabe beschriebenen Generator ist eine Lampe angeschlossen. Wie verändert sich die Aufheizung dieser Glühlampe, wenn ein geringer Zusatzwiderstand zu ihr in Reihe geschaltet wird?

88. In einem Elektromotor für Demonstrationszwecke wird das Magnetfeld von Permanentmagneten erzeugt. Würde sich der Motor langsamer drehen, wenn seine Magneten etwas schwächer wären? Der Motor arbeitet ohne Belastung.

89. Eine Last wird von einem Hauptschlußelektromotor angehoben (Motor mit Reihenerregung). Wie verändert sich der vom Motor verbrauchte Strom, wenn man die an ihn angelegte Spannung etwas erhöht?

90. Beantworten Sie die Frage der vorhergehenden Aufgabe für den Fall eines Nebenschlußmotors (Motor mit paralleler Erregung)!

91. Auf die Welle eines Nebenschlußmotors ist eine Trosse gewickelt, die eine Last anhebt. Wie verändert sich die Geschwindigkeit der Last, wenn der Radius der Welle etwas vergrößert wird?

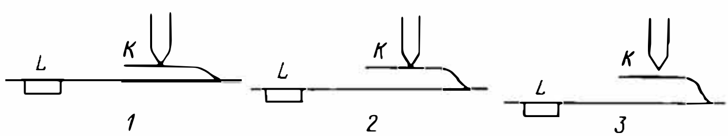


Abb. 34

Ein Schüler meint: „Da $v = \omega \cdot r$ ist, muß eine Vergrößerung des Wellenradius zu einer Erhöhung der Lastgeschwindigkeit führen". Ein anderer Schüler vertritt die Meinung, daß bei Vergrößerung des Wellenradius das Anheben der Last erschwert werde (da dabei ein größeres Drehmoment erforderlich ist) und sich deshalb die Lastgeschwindigkeit verringere. Wer von beiden hat recht?

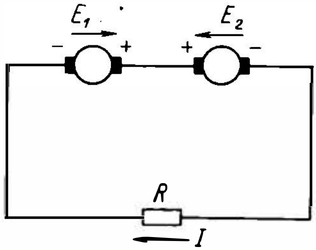


Abb. 35

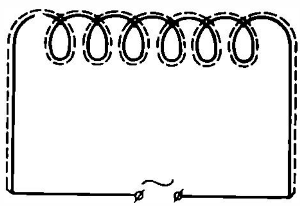


Abb. 36

92. Stellen wir uns vor, daß die Wicklung des Ankers eines Nebenschlußmotors aus supraleitendem Material bestehe. Fließt durch den Motor ein unendlich großer Strom? Hängt die Winkelgeschwindigkeit des Motors vom Belastungsmoment (vom Drehmoment auf die Welle des Motors) ab? Die angelegte Spannung sei gegeben.

93. Die Wicklung des Stators eines Nebenschlußmotors besitzt den Widerstand $R_1 = 120\,\Omega$ und die Wicklung des Rotors den Widerstand $R_2 = 1\,\Omega$. Der durch den Motor fließende Strom beträgt 11 A und die Spannung an seinen Anschlüssen $U = 120$ V. Berechnen Sie die mechanische Leistung des Motors!
(An die Lösung dieser Aufgabe geht ein Schüler wie folgt heran: Die vom Motor aufgenommene Leistung ist gleich

$$P = UI = 120 \cdot 11\,\mathrm{W} = 1320\,\mathrm{W}$$

und die Leistung der Wärmeverluste

$$P' = I^2R,$$

wobei R der Widerstand der Wicklungen des Stators und des Ankers ist. Da diese Wicklungen parallel geschaltet sind, gilt

$$P' = I^2\frac{R_1R_2}{R_1+R_2} = 11^2 \cdot \frac{120 \cdot 1}{120+1}\,\mathrm{W} = 120\,\mathrm{W}.$$

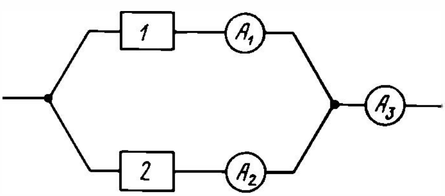


Abb. 37

Dadurch beträgt die gesuchte Leistung

$$N = P - P' = (1320 - 120)\,\mathrm{W} = 1200\,\mathrm{W}.$$

Ist diese Lösung richtig?

94. Zwei Gleichstromgeneratoren sind, wie in Abb. 35 dargestellt ist, zusammengeschaltet. Läßt man ihre Innenwiderstände unberücksichtigt, so gilt

$$P_1 = E_1 I,$$
$$P_r = I^2R = IRI = (E_1 - E_2)I,$$

wobei E_1 und E_2 die elektromotorischen Kräfte dieser Generatoren sind, P_1 ist die vom ersten Generator entwickelte Leistung

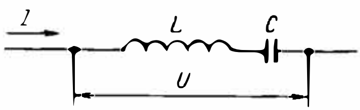


Abb. 38

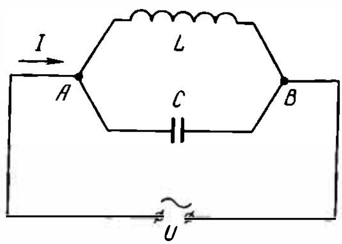


Abb. 39

und P_r die Leistung, die im Widerstand R in Wärme übergeht. Aus diesen Ausdrücken ist ersichtlich, daß $P_1 > P_r$, d.h., ein Teil der vom ersten Generator entwickelten Leistung geht irgendwohin verloren. Wohin?

95. Ein Wechselstromkreis besteht aus drei in Reihe geschalteten Widerständen: einem ohmschen, einem induktiven und einem kapazitiven. Kann eine gleichzeitige Vergrößerung aller dieser Widerstände zu einer Verringerung des Gesamtwiderstandes führen?

96. An das Stadtnetz ist eine Spule mit einer hohen Windungszahl angeschlossen (Abb. 36). Bei der Messung des sie durchfließenden Wechselstromes wurde festgestellt, daß ihr Widerstand 20 Ω beträgt. Danach wurde auf diese Spule eine zweite, genau gleiche Spule gewickelt und parallel zur ersten ans Stadtnetz angeschlossen (die zweite Spule ist punktiert gezeichnet). Beträgt der Gesamtwiderstand der Spulen 10 Ω?

97. Ein geschlossener Leiter befindet sich in einem sinusförmigen Wechselfeld. Schüler diskutierten die Frage, wie der Strom in diesem Leiter sei. Einer von ihnen nahm an, daß entsprechend dem

Ohmschen Gesetz gilt:

$$I = \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R},$$

wobei $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ die Geschwindigkeit der Änderung des Magnetflusses und R der Widerstand des Leiters ist. Ein anderer Schüler war folgender Ansicht: „Da der Widerstand dieses Leiters aus einem ohmschen und einem induktiven Widerstand besteht, gilt

$$I = \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}},$$

wobei ωL der induktive Widerstand des Leiters ist". Welcher von beiden hat recht?

98. Im städtischen Stromnetz befindet sich ein Abschnitt, der aus der „black box" *1* und der „black box" *2* besteht (Abb. 37), wobei das Amperemeter A_1 einen Strom von 0,3 A, das Amperemeter A_2 den Strom 0,4 A und das Amperemeter A_3 den Strom 0,5 A anzeigen. Was könnten die „black boxes" *1* und *2* enthalten?

99. In Abb. 38 ist ein Abschnitt eines Stromkreises mit sinusförmigem Wechselstrom dargestellt. Wann hängt die Spannung U nicht von der Stromstärke I ab?

100. In Abb. 39 ist ein Stromkreis mit sinusförmigem Wechselstrom dargestellt. Unter welchen Bedingungen hängt die Stromstärke I nicht von der Spannung U ab?

Lösungen

Elektrostatik

1. Die Atommasse von Kupfer beträgt 63,54, die Ordnungszahl 29; folglich ist die gesuchte Ladung

$$Q = \frac{6{,}02 \cdot 10^{26}}{63{,}54} \cdot 29 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} = 44 \cdot 10^{6}\,\mathrm{C}.$$

Durch das Glühlämpchen einer Taschenlampe fließt die Ladung in der Zeit

$$t = \frac{44 \cdot 10^{6}}{0{,}28}\,\mathrm{s} = 157 \cdot 10^{6}\,\mathrm{s} \approx 5 \text{ Jahre}.$$

2. Die Ladung eines Gramms Elektronen beträgt

$$Q = \frac{0{,}001}{9{,}11 \cdot 10^{-31}} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 17{,}6 \cdot 10^{7}\,\mathrm{C}.$$

Folglich erhalten wir für die gesuchte Kraft

$$F = \frac{(17{,}6 \cdot 10^{7})^{2}}{4\pi\varepsilon_0 (10^{11})^{2}} = \frac{9 \cdot 10^{9} \cdot (17{,}6 \cdot 10^{7})^{2}}{(10^{11})^{2}}\,\mathrm{N} = 28000\,\mathrm{N}.$$

3. Da das elektrische Feld in der Nähe der Klemmen des Akkumulators zu schwach ist (s. auch Aufg. 18).

4. Ist das Feld homogen, so wirkt keine Kraft. Ist es inhomogen, so wirkt das Feld mit einer Kraft, die in Richtung der größeren Feldstärke gerichtet ist.

5. Die Kugel wurde in die Nähe eines ungeladenen Leiters gebracht. Auf dem Leiter wurden Ladungen induziert, und um ihn herum entstand ein elektrisches Feld.

6. Sie ist geladen; denn wenn ihre Ladung gleich Null wäre, würde sie von der Kugel angezogen werden ähnlich wie ungeladene Papierstücke oder Stücke einer ungeladenen Metallfolie von einem aufgeladenen Kamm. Es ist leicht zu erkennen, daß ihre Ladung positiv ist.

7. Es sei die Ladung der Kugel B gleich Null (s. Abb. 1). Dann wird sie von der Kugel A angezogen, d.h., auf sie wirkt eine Kraft $\boldsymbol{F}$, die nach links gerichtet ist. Wir bringen jetzt eine sehr geringe positive Ladung auf die Kugel B. Dann verändert sich die Kraft

geringfügig, ist aber nach wie vor nach links gerichtet. Dabei weist die linke Hälfte der Kugel B eine negative Ladung auf, und die rechte Hälfte eine etwas größere positive Ladung.

8. Besteht die Kugel B aus leitendem Material, so entstehen auf ihr induzierte Ladungen. Ist sie aus einem Dielektrikum, bilden sich auf ihr polarisierte Ladungen. In jedem Fall entsteht auf der einen Seite der Kugel B eine positive Ladung und auf der anderen Seite eine gleich große negative Ladung. Der Absolutwert dieser Ladungen sei q, und der Abstand zwischen ihnen sei l. (Wir betrachten diese Ladungen als Punktladungen.) Wenn die Ladung der Kugel A gleich Q ist, so folgt

$$F = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{\left(r-\frac{1}{2}l\right)^2} - \frac{1}{\left(r+\frac{1}{2}l\right)^2}\right]$$

$$= \frac{Qqrl}{2\pi\varepsilon_0\left(r^2-\frac{1}{4}l^2\right)^2} \approx \frac{Qql}{2\pi\varepsilon_0 r^3},$$

da $\frac{1}{4}l^2$ im Vergleich zu r^2 gering ist.
Daraus ist ersichtlich: Für Ql = const (d.h., die Kugel B ist ein fester Dipol) ist die Kraft F umgekehrt proportional r^3. In Wirklichkeit verringert sich die Kraft F schneller als $1/r^3$, da Q mit wachsendem r abnimmt.

9. Zum Beispiel bei konzentrischen Hohlkugeln.

10. Das gilt nur für gleich große Ladungen der Platten.
Die Ladung der linken Platte sei Q_1 und die der rechten Q_2, wobei $Q_1 \neq Q_2$. Nehmen wir an, die Ladungen Q_1 und Q_2 befänden sich auf den äußeren Oberflächen der Platten. Die Ladung Q_1 würde dann innerhalb der linken Platte ein Feld der Stärke

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} = \frac{Q_1}{2\varepsilon_0 A}$$

und die Ladung Q_2 eines der Stärke

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} = \frac{Q_2}{2\varepsilon_0 A}$$

erzeugen, worin A die Fläche jeder der beiden Platten ist. Da die Felder E_1 und E_2 entgegengesetzt gerichtet sind, entsteht im Innern der linken Platte ein Feld der Stärke

$$E = |E_1 - E_2| = \frac{|Q_1 - Q_2|}{2\varepsilon_0 A} \neq 0.$$

Das ist aber nicht möglich, da die linke Platte aus leitendem Material besteht und im Innern eines Leiters ein elektrisches Feld nicht existiert. Folglich ist die Annahme, die Ladungen Q_1 und Q_2 befänden sich auf den äußeren Oberflächen der Platten, nicht richtig.

11. Bei $l = 10d$.
Die Oberflächenladungsdichte dieser Ebene sei σ. Stellen wir uns vor, die Öffnung wäre nicht vorhanden und im Abschnitt AB sei die Ladungsdichte ebenfalls σ. Dann wirkt auf die Ladung Q die Kraft $\boldsymbol{F} + \boldsymbol{F}'$, wobei $\boldsymbol{F}'$ die Kraft ist, die von seiten des Abschnitts AB auf diese Ladung wirkt. Die Feldstärke, die von der Platte ohne Öffnung erzeugt wird, beträgt $\sigma/2\varepsilon_0$. Demnach gilt

$$\boldsymbol{F} + \boldsymbol{F}' = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} Q$$

und

$$\boldsymbol{F} = \frac{\sigma Q}{2\varepsilon_0} - \boldsymbol{F}'.$$

Wenn wir den Abstand l vergrößern, bleibt das erste Glied der Differenz gleich, und das zweite ändert sich. Für $l = 10d$ ist die Kraft $\boldsymbol{F}'$ natürlich geringer als für $l = 5d$; d.h., für $l = 10d$ ist die Kraft $\boldsymbol{F}$ größer als für $l = 5d$.

12. Ist die Feldstärke des Kondensators gleich $\boldsymbol{E}$, so beträgt die von einer seiner Platten erzeugte Feldstärke $\frac{1}{2}\boldsymbol{E}$; d.h., für die Kraft, die auf die andere Platte wirkt, erhalten wir $\frac{1}{2}Q\boldsymbol{E}$.
In dem Buch von Feynman „Vorlesungen über Physik“ wird eine andere Erklärung des Koeffizienten $\frac{1}{2}$ in dem Ausdruck $\frac{1}{2}Q\boldsymbol{E}$ gegeben. Betrachten wir eine der Kondensatorplatten, z. B. die linke. Ihre Ladung stellen wir uns als eine dünne Schicht auf der inneren Oberfläche vor. Dann befinden sich die auf der rechten Oberfläche dieser Schicht gelegenen Ladungsteile im Feld der Stärke $\boldsymbol{E}$ und die auf der linken Oberfläche gelegenen Ladungsteile in einem Feld der Stärke 0. Folglich ist die mittlere Feldstärke, die auf die betrachtete Ladung wirkt, gleich $\frac{1}{2}\boldsymbol{E}$, und deshalb ist die gesuchte Kraft gleich $\frac{1}{2}Q\boldsymbol{E}$.

13. Das Feld, in dem sich die Platte befindet, ist offensichtlich die Superposition von zwei Feldern: des äußeren Feldes $\boldsymbol{E}$ und des von

der Platte selbst erzeugten Feldes $\boldsymbol{E}'$. Wird die Richtung nach rechts als positiv bezeichnet, erhalten wir

$$\boldsymbol{E} - \boldsymbol{E}' = -\boldsymbol{E}_1, \quad \boldsymbol{E} + \boldsymbol{E}' = \boldsymbol{E}_2,$$

daraus folgt

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{E}_2 - \boldsymbol{E}_1).$$

Da die gesuchte Kraft vom äußeren Feld her auf die Platte wirkt, erhalten wir

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{2}Q(\boldsymbol{E}_2 - \boldsymbol{E}_1).$$

14. Das Feld eines Plattenkondensators sieht ungefähr so aus, wie es in Abb. 40 dargestellt ist, d. h., es existiert auch außerhalb der

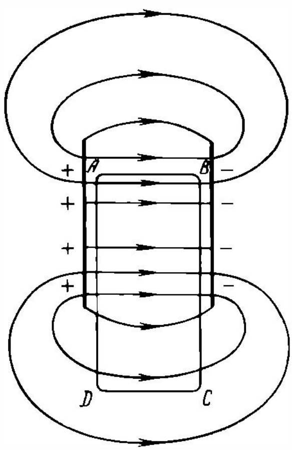


Abb. 40

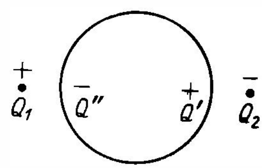


Abb. 41

Kondensatorplatten. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß es im Abschnitt *CD* eine elektromotorische Kraft erzeugt, die zur elektromotorischen Kraft im Abschnitt *AB* entgegengesetzt gerichtet ist.

15. Nachdem der Zylinder *KLMN* in das Feld eingebracht wurde, verliert es seine Homogenität. Auf der rechten Hälfte des Zylinders werden positive Ladungen induziert und auf der linken Hälfte negative Ladungen, und es entsteht ein Feld, das durch diese

Ladungen erzeugt wird. Im Abschnitt AB ist es nach links gerichtet, d. h., es wirkt dem äußeren Feld entgegen.

16. Nein, sie wird größer.
Wir bezeichnen die betrachteten Ladungen mit Q_1 und Q_2 (Abb. 41). Infolge der Polarisation erhält die rechte Hälfte der Kugel die positive Ladung Q' und die linke Hälfte die negative Ladung Q'' der gleichen Größe. Deshalb wirken auf die Ladung Q_2 drei Kräfte: die Kraft $\boldsymbol{F}$ von seiten der Ladung Q_1, die Kraft $\boldsymbol{F}'$ von seiten der Ladung Q' und die Kraft $\boldsymbol{F}''$ von seiten der Ladung Q''. Die Kräfte $\boldsymbol{F}$ und $\boldsymbol{F}'$ sind nach links gerichtet und $\boldsymbol{F}''$ nach rechts. Ihre resultierende Kraft $\boldsymbol{R}$ ist

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F} + \boldsymbol{F}' - \boldsymbol{F}''.$$

Da Q_2 näher zu Q' als zu Q'' liegt, ist $\boldsymbol{F}' > \boldsymbol{F}''$, und deshalb gilt

$$\boldsymbol{R} > \boldsymbol{F}.$$

17. Die Polarisationsladungen, die sich auf der rechten und der linken Seite der Platte gebildet haben, haben die gleiche Größe, aber unterschiedliche Vorzeichen; sie bilden daher kein Feld im Zwischenraum zwischen der Platte und den Platten des Kondensators. Wenn wir eine aus einem Dielektrikum bestehende Platte einführen, so schwächen wir das Feld in dem vom Dielektrikum eingenommenen Raum, verändern dabei aber nicht das Feld in den Spalten zwischen dem Dielektrikum und den Kondensatorplatten. Folglich ändern sich die auf die Kondensatorplatten wirkenden Kräfte nicht.

18. Es gilt die Ungleichung

$$\frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 l^2} > mg, \tag{1}$$

worin Q die Ladung jeder der beiden Kugeln ist, l der Abstand zwischen ihren Zentren und m die Masse der unteren Kugel. Der gesuchte Potentialunterschied beträgt $U = 2\varphi$, d. h.

$$U = 2\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}, \tag{2}$$

wobei R der Radius jeder der beiden Kugeln ist. Aus (1) und (2) erhalten wir

$$U > \frac{l}{R}\sqrt{\frac{mg}{\pi\varepsilon_0}}.$$

Setzen wir für $l = 20$ mm, $R = 1$ mm, $m = 10^{-5}$ kg und für $\pi\varepsilon_0 = 1/(36 \cdot 10^9)$ F/m, erhalten wir $U > 37600$ V.

19. Das ist möglich, wenn sich die Kugeln in einem von anderen Körpern erzeugten elektrostatischen Feld befinden.
Die Kugel A sei negativ geladen, die Kugel B ungeladen, befinde sich aber in der Nähe der negativ geladenen Kugel C (Abb. 42). Ist die Ladung der Kugel A sehr gering, so beginnen, nachdem die Kugeln A und B mit einem Draht verbunden wurden, negative La-

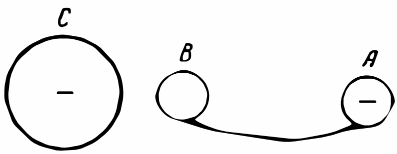


Abb. 42

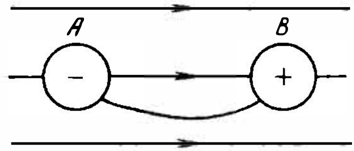


Abb. 43

dungen von der ungeladenen Kugel B auf die geladene Kugel A zu fließen. Dabei vergrößert sich die negative Ladung der Kugel A. Versteht man den Ausdruck „Die Ladungen beginnen zu fließen" wörtlich, kann man eine einfachere Antwort geben. Die Kugel A sei positiv geladen und die Metallkugel B ungeladen. Werden diese Kugeln mit einem Draht verbunden, kann man formal annehmen, daß positive Ladungen von der Kugel A zur Kugel B fließen. In Wirklichkeit verhält es sich anders: Die Elektronen fließen von der ungeladenen Kugel B auf die geladene Kugel A.

20. Die Ladung aller Elektronen dieser Kugel beträgt $Q_0 = 44 \cdot 10^6$ C (s. Lösung der Aufg. 1). Die Ladung der zu entfernenden Elektronen ist

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 R\varphi = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot 0{,}1 \cdot 10^8 \text{ C} = 1{,}11 \cdot 10^{-3} \text{ C}.$$

Da $Q_0/Q \approx 40 \cdot 10^9$ ist, muß von je 40 Milliarden Elektronen eines entfernt werden.

21. Wenn er sich im elektrostatischen Feld anderer Körper befindet.

22. Es besteht kein Potentialunterschied, wenn sich die Leiter in einem von anderen geladenen Körpern erzeugten Feld befinden. Wir verbinden z. B. die ungeladenen Körper A und B mit Draht

und bringen sie in ein homogenes Feld, wie es in Abb. 43 dargestellt ist. Durch Induktion wird die Kugel A negativ und die Kugel B positiv aufgeladen, wobei ihre Potentiale gleich sind. Entfernen wir den Draht, erhalten wir zwei entgegengesetzt geladene Leiter, zwischen denen kein Potentialunterschied besteht.

23. Der Leiter A ist hohl, und der Leiter B befindet sich im Innern des Leiters A.

24. Die Metallkugel lädt sich auf. Wäre die Kugel B nicht mit der inneren, sondern mit der äußeren Oberfläche der Kugel A verbunden, würde sie positiv aufgeladen werden. Die Kugel A ist aber ein Leiter, und das Potential der inneren Oberfläche ist gleich dem der äußeren. Folglich wird die Kugel B auch dann aufgeladen, wenn sie mit der inneren Oberfläche der Kugel A verbunden wird. Der Mechanismus dieses Prozesses ist folgender: Die Elektronen, die sich auf der Kugel B und auf dem die Kugeln verbindenden Leiter befinden, werden von den positiven Ladungen der Kugel A angezogen, gehen zuerst auf deren innere Oberfläche über und danach auch auf die äußere. Die Kugel B erhält schließlich eine positive Ladung.

25. Sie hat ein positives Vorzeichen. Man kann sich vorstellen, der Versuch wäre in einer anderen Reihenfolge durchgeführt worden: Zuerst wird der ungeladene Leiter BC mit der ungeladenen Kugel D verbunden, und danach nähert man die positiv geladene Kugel A an. In diesem Fall wird auf der Kugel D eine positive Ladung induziert, da sie sich in der Ferne befindet, und auf dem Leiter BC eine negative Ladung, da er sich in der Nähe befindet.

26. Der Leiter A ist hohl, und der Leiter B befindet sich im Innern des Leiters A.

27. Das Potential der inneren Kugel wird geringer und das der äußeren Kugel bleibt konstant.
Wir bezeichnen den Radius der inneren Kugel mit R_1 und den der äußeren mit R_2. Vor der Verbindung mit dem Draht sei die Ladung der inneren Kugel Q_1 und die der äußeren Q_2. Dann gilt

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2}, \tag{1}$$

$$\varphi_2 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_2} + \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2}, \tag{2}$$

wobei φ_1 und φ_2 die Potentiale der Kugeln vor der Drahtverbindung sind. Nach der Verbindung mit dem Draht besitzen die Kugeln das Potential

$$\varphi = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2}, \tag{3}$$

da die innere Kugel dann ungeladen sein wird und die Ladung der äußeren Kugel gleich $Q_1 + Q_2$ ist. Vergleicht man (1) und (3) unter Berücksichtigung von $R_1 < R_2$, so sieht man, daß $\varphi < \varphi_1$, d.h., das Potential der inneren Kugel verringert sich. Vergleicht man die Ausdrücke (2) und (3), so sieht man, daß $\varphi = \varphi_2$, d.h., das Potential der äußeren Kugel bleibt konstant.

28. Nach der Verbindung mit dem Draht verringert sich das Potential der Kugel A, und das der Kugel B vergrößert sich. Jedoch waren die Potentiale der Kugeln vor der Verbindung fast gleich, da der Spalt zwischen den Kugeln sehr klein ist. Deshalb wurde das Potential der Kugel A (und auch das der Kugel B) durch das Verbinden der Kugeln mit dem Draht fast nicht verändert.

29. Nicht unbedingt. Das Potential eines Leiters hängt nicht nur von dessen Ladung ab, sondern auch von der Anwesenheit anderer Leiter in seiner Nähe. Werden die Leiter angenähert — wir verändern dabei ihre Potentiale —, kann das Potential des zweiten Leiters größer werden. Zum Beispiel sei der erste Leiter eine Hohlkugel mit einer Öffnung und der zweite eine kleine Kugel, die in das Innere der Hohlkugel gebracht wird und dabei mit der inneren Oberfläche der Hohlkugel in Berührung kommt. Dann gehen positive Ladungen vom zweiten Leiter auf den ersten über.

30. Die Energie eines Kondensators beträgt

$$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}QE,$$

wo Q die Ladung des Kondensators, U die Spannung an seinen Platten und E die elektromotorische Kraft der Batterie ist. Die von der Batterie verrichtete Arbeit ist gleich

$$A = QE.$$

Daraus folgt

$$A = 2W = 2\,\mathrm{J}.$$

Die Arbeit $A - W = 1\,\mathrm{J}$ ging in Joulesche Wärme über. Aus dem Dargelegten ist ersichtlich, daß sie nicht vom Wert des Widerstandes der Verbindungsleitungen abhängt.

31. Da sich der Potentialunterschied zwischen den Platten des Kondensators nicht verändert, verändert sich auch die Feldstärke nicht.

32. Sie wächst auf das Neunfache.
Die Kapazität des Kondensators wächst auf das ε-fache, aber der Potentialunterschied zwischen seinen Platten bleibt konstant, da er der elektromotorischen Kraft des Akkumulators gleich ist. Folglich wächst die Ladung jeder Platte auf das ε-fache, und deshalb wächst das Feld, das jede Platte erzeugt, ebenfalls auf das ε-fache. Die auf jede Platte wirkende Kraft beträgt

$$\boldsymbol{F} = Q\boldsymbol{E},$$

wobei $\boldsymbol{E}$ die Feldstärke ist, die von einer Platte hervorgerufen wird. (Die Polarisationsladungen auf der Platte aus Dielektrikum bilden kein Feld in den Spalten zwischen der Platte und den Platten des Kondensators.) Deshalb vergrößert sich die Kraft $\boldsymbol{F}$ auf das ε^2-fache.

33. Im oberen Teil des Kondensators ist der Potentialunterschied zwischen seinen Platten genau so groß wie im unteren. Da die Breite des Kondensators überall gleich ist, ist sein Feld im Abschnitt DC genau so groß wie im Abschnitt AB. (Hieraus folgt, daß im unteren Abschnitt des Kondensators die Ladungsdichte auf seinen Platten größer ist als im oberen Teil.)

34. Die Antwort ist nicht richtig. Da das Feld zwischen den Platten des inneren Kondensators homogen ist, beträgt die gesuchte Feldstärke

$$E = \frac{U_{34}}{d'} = \frac{30}{0{,}01}\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} = 3000\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}\,.$$

Der Fehler des Schülers besteht in folgendem: Entsprechend dem Superpositionsprinzip gilt

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_{12} + \boldsymbol{E}_{34},$$

wobei $\boldsymbol{E}_{12}$ die Feldstärke ist, die nur vom Kondensator (*1*, *2*) erzeugt wird, und $\boldsymbol{E}_{34}$ die Feldstärke, die nur vom Kondensator (*3*, *4*) erzeugt wird. Daraus folgt

$$E_{12} = \frac{U_{12}}{d}\,,$$

wobei U_{12} nicht der wirkliche Potentialunterschied zwischen den Platten *1* und *2*, der 40 V beträgt, ist, sondern der Potentialunterschied, der dann bestehen würde, wenn der Kondensator (*3*, *4*) nicht vorhanden wäre. Analog gilt

$$E_{34} = \frac{U_{34}}{d'},$$

wobei U_{34} nicht der wirkliche Potentialunterschied zwischen den Platten *3* und *4*, der 30 V beträgt, ist, sondern der Potentialunterschied, der bei Fehlen des Kondensators (*1*, *2*) zwischen ihnen bestehen würde.

35. Das Potential der Kugel S_1 sei φ_1, und das Potential der Kugel S_2 sei φ_2. Da die Kugel s bedeutend kleiner als die Kugeln S_1 und S_2 ist, verändern wir ihr Potential durch das Verbinden mit einer der Kugeln S_1 oder S_2 praktisch nicht. Daher gilt

$$Q_1 = C\varphi_1, \qquad Q_2 = C\varphi_2,$$

wobei C die Kapazität der Kugel s ist. Bei gleichzeitigem Verbinden der Kugel s mit den Kugeln S_1 und S_2 wird das Potential dieser Kugel gleich

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2),$$

da die Kugeln S_1 und S_2 gleichartig sind und die Kugel s sehr klein ist. Folglich ist die von der Kugel s aufgenommene Ladung gleich

$$Q = C\varphi = \frac{1}{2}C(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{1}{2}(C\varphi_1 + C\varphi_2).$$

Berücksichtigen wir die vorhergehenden Gleichungen, erhalten wir

$$Q = \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2).$$

36. Die Gleichung $C = \varepsilon_0 S/d$ gilt nur für kleine d, und daher kann man sie nicht für den Fall $d \to \infty$ anwenden.
Die Platten eines ebenen Kondensators seien unendlich weit voneinander entfernt. Erhalten sie die Ladungen $+Q$ und $-Q$, nehmen sie die Potentiale

$$\varphi_1 = \frac{Q}{C}, \qquad \varphi_2 = -\frac{Q}{C}$$

an, wobei C die Kapazität einer der Platten ist, die als isolierter Leiter aufgefaßt werden kann. Die Kapazität des aus diesen Platten bestehenden Kondensators ist

$$C' = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{\frac{Q}{C} - \left(-\frac{Q}{C}\right)} = \frac{1}{2}\,C.$$

Da $C \neq 0$, ist auch $\frac{1}{2}\,C \neq 0$.

37. Nicht unbedingt, da der Anschluß des Kondensators den Potentialunterschied zwischen den Punkten A und B verändern kann. Betrachten wir z. B. den in Abb. 44 dargestellten Strom-

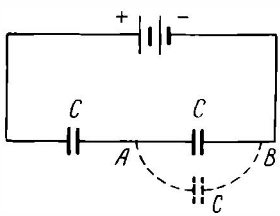


Abb. 44

kreis. Die elektromotorische Kraft des Akkumulators sei $2\,U$. Dann ist $\varphi_A - \varphi_B = U$. Wird jetzt an die Punkte A und B der durch die gestrichelte Linie angedeutete Kondensator angeschlossen, so ist leicht zu errechnen, daß der Potentialunterschied gleich $\frac{2}{3}\,U$ und die Ladung des angeschlossenen Kondensators gleich $\frac{2}{3}\,CU$ sein wird.

Führen Sie die Rechnung durch!

Die Kapazität des an die Punkte A und B angeschlossenen Kondensators ist gleich $2C$, und die Kapazität aller drei Kondensatoren beträgt

$$C' = \frac{C \cdot 2C}{C + 2C} = \frac{2}{3}\,C.$$

Folglich ist die Ladung dieser Batterie

$$Q = C' \cdot 2U = \frac{4}{3}\,CU,$$

und für den Potentialunterschied $\varphi_A - \varphi_B$ erhalten wir

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{Q}{2C} = \frac{\frac{4}{3}\,CU}{2C} = \frac{2}{3}\,U.$$

Daher ist die Ladung des angeschlossenen Kondensators

$$C \cdot \frac{2}{3} U = \frac{2}{3} UC.$$

38. Nicht unbedingt.
Den Potentialunterschied zwischen den Punkten A und B (er ist gleich der elektromotorischen Kraft des Akkumulators) bezeichnen wir mit U. Die Kapazität der Anordnung ist

$$\frac{C(C_1 + C_2)}{C + C_1 + C_2},$$

folglich erhalten wir für die Gesamtladung der Kondensatoren C_1 und C_2

$$Q = \frac{C(C_1 + C_2)}{C + C_1 + C_2} U.$$

Da die Ladungen der Kondensatoren proportional ihren Kapazitäten sind, gilt

$$Q_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} Q, \qquad Q_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} Q,$$

was unter Berücksichtigung der vorigen Gleichungen

$$Q_1 = \frac{C_1}{C + C_1 + C_2} CU, \qquad Q_2 = \frac{C_2}{C + C_1 + C_2} CU$$

ergibt. Aus diesen Ausdrücken ist ersichtlich, daß bei Erhöhung der Kapazitäten C_1 und C_2 die Ladungen Q_1 und Q_2 entweder größer werden oder eine von ihnen größer wird und die andere kleiner. Wird z. B. die Kapazität C_1 stark vergrößert und die Kapazität C_2 sehr geringfügig, so erhöht sich Q_1, und Q_2 wird kleiner.

39. Aus dem erhaltenen Resultat folgt, daß sich der Kondensator unendlich lange bei beliebigem Q_0 entlädt.
Da von einem beliebigen Moment, der der vollständigen Entladung des Kondensators vorausgeht, nicht weniger als 10 s (bei ausgewählten Werten C und R) bis zur vollständigen Entladung vergehen dürfen, muß die Entladung selbst unendlich lange dauern. (Siehe Anhang 1 auf Seite 68.)

40. Die Kraftlinien eines elektrostatischen Feldes schneiden sich nicht in Punkten, in denen die Feldstärke verschieden von Null ist, können sich aber in Punkten mit der Feldstärke Null kreuzen. In Abb. 45 ist z. B. ein von zwei gleichen positiven Ladungen erzeugtes Feld gezeigt. Hier schneiden sich die Kraftlinien im Punkt 0, in dem die Feldstärke gleich Null ist.

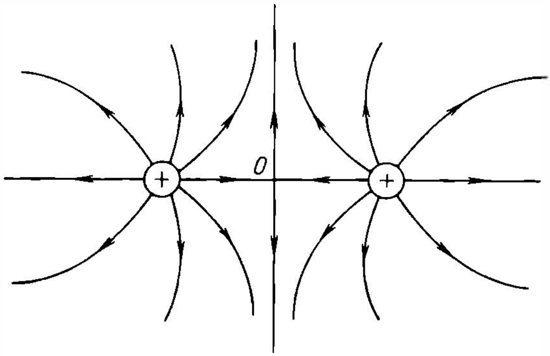


Abb. 45

41. Sie ist nicht richtig, da man mit der gleichen Berechtigung behaupten kann, daß sich die auf der Oberfläche befindenden Ladungen einander abstoßen und daß daher ein Teil von ihnen in das Innere des Leiters gedrückt wird. (Die Ladungen, die zuerst auf die Oberfläche kommen, stoßen die später zur Oberfläche kommenden Ladungen ab.)

Daß sich die Ladungen eines Leiters nur an dessen Oberfläche befinden, kann man wie folgt beweisen. Nehmen wir an, daß in einem beliebigen Punkt innerhalb des Leiters die Volumenladungsdichte ρ verschieden von Null ist. Dann ist sie auch in einer gewissen Umgebung dieses Punktes verschieden von Null. Beschreiben wir um diesen Punkt eine Sphäre — ein kugelförmiges Gebiet — mit beliebig kleinem Radius und betrachten wir die auf ihr befindlichen Ladungen. Da sich jede von ihnen im Gleichgewicht befindet, ist die auf sie einwirkende elektrostatische Kraft gleich Null. Folglich ist die Stärke des elektrostatischen Feldes in jedem Punkt der Sphäre gleich Null, und deshalb ist auch der Fluß des Feldstärkevektors durch die betrachtete Sphäre gleich Null. Aufgrund des Gaußschen Satzes ist dieser genannte Fluß gleich

$$\frac{1}{\varepsilon_0} \sum Q,$$

wobei $\sum Q$ die Summe der Ladungen ist, die sich innerhalb dieser Sphäre befinden, d. h., $\sum Q = 0$, und da $\sum Q = \rho V$, wobei V das von der Sphäre begrenzte Volumen und ρ die Volumenladungs-

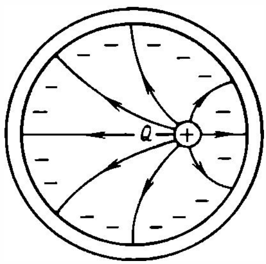


Abb. 46

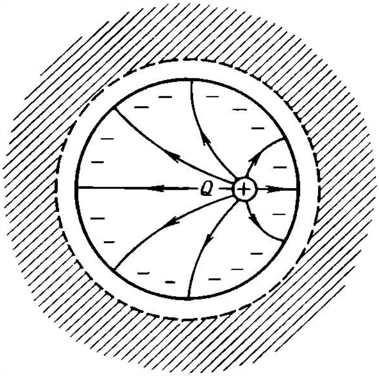


Abb. 47

dichte innerhalb der Sphäre ist, kommen wir zu der Schlußfolgerung, daß $\rho = 0$.
Daher führt die Annahme, daß im gegebenen Punkt $\rho \neq 0$ ist, zu einem Widerspruch.
Der angeführte Beweis basiert auf dem Gaußschen Theorem, und das Gaußsche Theorem wird aus dem Coulombschen Gesetz abgeleitet. Daß sich die Ladungen eines Leiters auf dessen Oberfläche befinden, ist folglich eine mathematische Schlußfolgerung aus dem Coulombschen Gesetz. Man kann auch eine bessere Behauptung anführen: Wenn die Wechselwirkungskräfte zwischen den Ladungen nicht dem Coulombschen Gesetz unterliegen würden, d. h., sie würden nicht vom Kehrwert des Quadrates des Abstandes abhängen, sondern sie wären nach irgendeinem anderen Gesetz voneinander abhängig, so würden sich die Ladungen nicht nur an der Oberfläche eines Leiters befinden, sondern auch in dessen Inneren.

42. Betrachten wir zunächst einen anderen Fall. Eine Punktladung $+Q$ wurde auf eine leitende Sphäre gebracht, die die negative Ladung $-Q$ trägt (Abb. 46). Beweisen Sie, daß in jedem Fall das Feld nur innerhalb der Sphäre existiert!
Betrachten wir ein homogenes leitendes Medium, das den ganzen Raum ausfüllt. Wir schneiden nun aus ihm eine sphärische Höhle

heraus, in die wir eine Punktladung $+Q$ bringen (Abb. 47). Auf der Oberfläche des Hohlraumes erscheint dann die induzierte negative Ladung $-Q$ und in unendlich entfernten Punkten des Mediums die induzierte positive Ladung $+Q$. Dabei existiert in allen Punkten dieses Hohlraumes weder ein elektrisches Feld noch Ladungen (da das Medium ein Leiter ist). Beseitigen wir nun den Teil des betrachteten Mediums, der sich außerhalb der punktierten Sphäre befindet (s. Abb. 47), so erscheint die Punktladung $+Q$ innerhalb einer die Ladung $-Q$ tragenden leitenden Sphäre. Da der zu entfernende Teil des Mediums keine Ladungen besitzt (die im Unendlichen befindlichen Ladungen sind unwesentlich), verändern wir bei der Entfernung dieses Teils das elektrische Feld nicht. Folglich existiert es nach wie vor nur innerhalb des gegebenen Hohlraumes.

Wenn sich innerhalb einer die Ladung $-Q$ tragenden Hohlsphäre eine Punktladung $+Q$ befindet, so existiert nur innerhalb dieser Sphäre ein Feld (s. Abb. 46).

Wir geben der in Abb. 46 dargestellten Sphäre die zusätzliche Ladung $+Q$. Somit wird die Gesamtladung gleich Null, d. h., wir er-

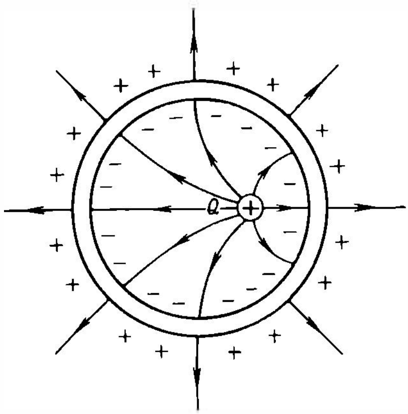


Abb. 48

halten den uns interessierenden Fall (eine Punktladung $+Q$ innerhalb einer ungeladenen Sphäre). Da auf der äußeren Oberfläche der Sphäre kein Feld existiert, verteilt sich die zusätzliche Ladung $+Q$ gleichmäßig auf ihr. Dadurch erhalten wir das in Abb. 48 dargestellte Bild: Innerhalb der ungeladenen Sphäre befindet sich die Punktladung $+Q$, auf ihrer inneren Oberfläche die Ladung

$-Q$ und auf der äußeren Oberfläche die Ladung $+Q$, die auf dieser Oberfläche gleichmäßig verteilt ist.
Jetzt wird ersichtlich, welches Feld außerhalb der Sphäre entsteht (s. Abb. 48). Man kann es als Resultat der Superposition von zwei Feldern annehmen: dem durch die Ladung $+Q$ auf der äußeren Oberfläche erzeugten Feld und dem von der Punktladung $+Q$ und der Ladung $-Q$ auf der inneren Oberfläche erzeugten Feld. Wir sahen jedoch, daß das zweite Feld nur innerhalb der Sphäre existiert (s. Abb. 46). Folglich wird das Feld außerhalb der Sphäre nur von der Ladung $+Q$ erzeugt, die sich auf der äußeren Oberfläche befindet. Da diese Ladung gleichmäßig verteilt ist, ist das erzeugte Feld symmetrisch.
In den angeführten Betrachtungen gingen wir von einer in der Vorstellung künstlich erzeugten Situation aus: Anstelle die Ladung $+Q$ in das Innere einer ungeladenen Sphäre zu bringen, brachten wir sie in eine die Ladung $-Q$ tragende Sphäre und führten dieser dann die zusätzliche Ladung $+Q$ zu. Aber es ist klar, daß ein elektrostatisches Feld nicht von der Art und Weise des Ladens oder Entladens des das Feld hervorrufenden Körpers abhängt. Deshalb entsteht das in Abb. 48 dargestellte Feld auch beim Einbringen der Punktladung $+Q$ in eine ungeladene Sphäre. Die positive Ladung auf der äußeren Oberfläche der Sphäre und die negative Ladung auf der inneren Oberfläche entstehen in diesem Fall infolge der elektrostatischen Induktion.

43.
$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_1Q_2}{r}$$

ist die Wechselwirkungsenergie der betrachteten Kugeln. Außerdem besitzen sie eine Eigenenergie von

$$\frac{Q_1^2}{2C} + \frac{Q_2^2}{2C},$$

wobei C die Kapazität jeder der beiden Kugeln ist. Werden die Kugeln mit einem Draht verbunden, verändern wir damit ihre Ladungen und verringern dabei ihre Eigenenergie. (Siehe Anhang 2 auf Seite 68.)

Elektrischer Strom

44. Nein, da man zur Erzeugung eines Gleichstroms in einem geschlossenen Stromkreis Kräfte nichtelektrostatischer Natur benötigt (äußere Kräfte).

45. Das Potential des Punktes A ist nur so lange größer als das des Punktes B, wie der Leiter AB nicht in das Feld gebracht wird. Nach Einbringen dieses Leiters beginnt ein Ladungstransport in ihm, in dessen Folge sich das Ende B positiv und das Ende A negativ aufladen. Im Leiter bildet sich daher ein dem ursprünglichen Feld entgegengesetztes Feld. Beide Felder heben sich gegenseitig auf.

46. An der Grenze zwischen Elektroden und Säure wirken Kräfte nichtelektrostatischer Natur (äußere Kräfte). Bei Wirkung solcher Kräfte können verschiedene Punkte eines Leiters unterschiedliche Potentiale besitzen.

47. Das hängt von den anderen Gliedern des Stromkreises ab. Zum Beispiel fließt im in Abb. 49 gezeigten Stromkreis der Strom in Richtung ARB. Betrachten wir dagegen den Stromkreis in Abb. 50. Dort fließt der Strom bei geringer elektromotorischer Kraft E_1 in Richtung BRA.

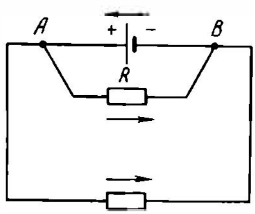


Abb. 49

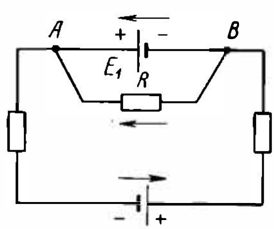


Abb. 50

48. In den Abschnitten AK und CL fließt kein Strom, und im Abschnitt AC fließt er von links nach rechts. Deshalb gilt

$$\varphi_A = \varphi_K, \quad \varphi_C = \varphi_L, \quad \varphi_A > \varphi_C.$$

Aus diesen Verhältnissen folgt $\varphi_K > \varphi_L$, d. h.: Werden die Punkte K und L mit einem Leiter miteinander verbunden, so fließt in ihm ein Strom.

49. Intuitiv ist ersichtlich, daß der Stromkreis einen endlichen Widerstand besitzt. Er sei gleich r. Dann ist der Widerstand des unendlichen Stromkreises rechts von den Punkten C und D ebenfalls gleich r. Folglich ist der Ausgangsstromkreis dem in Abb. 51 dar-

gestellten äquivalent, und für dessen Widerstand erhalten wir

$$R + \frac{2Rr}{2R + r}.$$

Da er aber auch gleich r ist, gilt

$$R + \frac{2Rr}{2R + r} = r.$$

Lösen wir diese Gleichung, erhalten wir $r = 2R$.
Die Endlichkeit des Widerstandes des unendlichen Stromkreises kann man wie folgt beweisen:
Betrachten wir einen der Abb. 16 ähnlichen Stromkreis, der nicht aus einer unendlichen Zahl von Gliedern besteht, sondern aus ei-

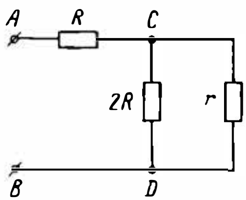


Abb. 51

ner endlichen Anzahl. Die Anzahl der Glieder sei n und der Widerstand des Stromkreises r_n. Fügen wir dem äußeren rechten Glied ein weiteres hinzu, erhalten wir einen aus $n + 1$ Gliedern bestehenden Stromkreis, dessen Widerstand gleich r_{n+1} ist. Da der neue Stromkreis durch Hinzufügen eines Leiters aus dem alten entsteht, verringert sich der Widerstand (da die Ladungen eine größere Bewegungsfreiheit erhalten). Somit ist $r_{n+1} < r_n$, d.h., die Größen $r_1, r_2, r_3, \ldots, r_n, \ldots$ bilden eine monoton abnehmende Reihe. Da alle ihre Glieder positiv sind, besitzt sie einen bestimmten nichtnegativen Grenzwert r.

50. Der durch beide Widerstände fließende Strom wird geringer. Was die Ströme, die durch jeden einzelnen der beiden Widerstände fließen, anbetrifft, so verringert sich einer von ihnen, und der andere kann sowohl kleiner als auch größer werden. Wird z.B. R_1 stark vergrößert und R_2 nur geringfügig, so wird der Strom durch R_2 größer.
Lösen wir die Aufgabe quantitativ. Da

$$I = \frac{E}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + r}$$

gilt, wobei E die elektromotorische Kraft und r der Innenwiderstand der Stromquelle ist, sind die Ströme im ersten und im zweiten Leiter entsprechend gleich

$$I_1 = I\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{ER_2}{R_2(R_1 + r) + R_1 r},$$

$$I_2 = I\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{ER_1}{R_1(R_2 + r) + R_2 r},$$

was man auch in der Form

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r + \dfrac{R_1 r}{R_2}},$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + r + \dfrac{R_2 r}{R_1}}$$

schreiben kann. Aus den erhaltenen Ausdrücken wird folgendes ersichtlich: Wenn R_1 stark vergrößert wird und R_2 nur sehr geringfügig, wird I_2 größer.

Das erhaltene Resultat ist nur für den Fall $r \neq 0$ gültig. Für $r = 0$ ist $I_1 = E/R_1$, $I_2 = E/R_2$, und jede beliebige Vergrößerung von R_1 und R_2 führt zu einer Verringerung der Ströme I_1 und I_2.

51. Sie ist nicht richtig. Im Leiter *BD* fließt der Strom von *B* nach *D*, und im Leiter *BF* hängt die Stromrichtung vom Widerstand des Leiters *BD* ab. Das wird aus folgender Überlegung ersichtlich: Der Punkt *B* sei zunächst nicht mit den Punkten *D* und *F* verbunden. Dann ist das Potential des Punktes *B* größer als das des Punktes *F*. Verbinden wir nun die Punkte *B* und *D* durch einen Leiter mit einem sehr großen Widerstand miteinander. Der durch ihn fließende Strom ist sehr gering, und die Potentiale aller Punkte des Stromkreises bleiben praktisch die gleichen wie vor dieser Verbindung. Das Potential des Punktes *B* bleibt weiterhin größer als das Potential des Punktes *F*, und werden sie miteinander verbunden, so fließt der Strom von *B* nach *F*.

Betrachten wir nun den anderen Grenzfall, wenn der Widerstand des Leiters *BD* sehr gering ist. In diesem Fall ist der Widerstand des ganzen Abschnitts zwischen den Punkten *B* und *D* ebenfalls sehr gering, und deshalb ist das Potential des Punktes *B* nahe dem Potential des Punktes *D*. Da der Punkt *D* ein geringeres Potential als der Punkt F besitzt, ist das Potential des Punktes B geringer als das des Punktes F. Folglich wird der Strom bei Verbindung der Punkte B und F von F nach B fließen. Somit hängt die Stromrichtung im Leiter BF vom Widerstand des Leiters BD ab.

52. Man kann, jedoch weder mit reiner Parallelschaltung noch mit reiner Reihenschaltung der Batterien. Bei Parallelschaltung gilt

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}},$$

und bei Reihenschaltung gilt

$$I = \frac{nE}{R + nr},$$

wobei I der durch die Lampe fließende Strom, R ihr Widerstand, E die elektromotorische Kraft einer Batterie, r ihr Innenwiderstand und n die Anzahl der Batterien ist. Aus diesen Ausdrücken wird ersichtlich, daß bei Parallelschaltung $I < E/R$ und bei Reihenschaltung $I < E/r$ ist, d.h., durch eine der beiden Schaltungen allein kann der Strom nicht beliebig hoch werden.
Um einen beliebig hohen Strom zu erreichen, müssen die Batterien gemischt verbunden werden, z.B. folgendermaßen: Werden m Batterien in Reihe geschaltet, erhält man eine Quelle mit der elektromotorischen Kraft mE und dem Innenwiderstand mr. Werden danach n dieser Quellen parallel geschaltet und an die Lampe angeschlossen, erhält man den Strom

$$I = \frac{mE}{R + \frac{mr}{n}}.$$

m sei sehr groß und m/n sehr gering (d.h., n sei vielfach größer als m). Dann gilt $I \approx mE/R$, und da m sehr groß ist, ist I ebenfalls sehr groß.

53. Im ersten Fall beginnt der Strom durch die Lampe *2* erst zu fließen, nachdem der Glühfaden der Lampe *1* bereits aufgeheizt ist, wodurch sein Widerstand erheblich wurde. Im zweiten Fall fließt der Strom sofort nach dem Anschalten ans Netz durch die Lampe *2*, d.h., wenn der Glühfaden der Lampe *1* noch nicht aufgeheizt und sein Widerstand gering ist. Deshalb brennt die Lampe *2* durch.

54. Dies gilt für

$$E_2 = \varphi_B - \varphi_A,$$

wobei φ_A und φ_B die Potentiale der Punkte A und B vor dem Anschließen des Elementes E_2 sind.
In diesem Fall gleicht die elektromotorische Kraft E_2 den Potentialunterschied $\varphi_B - \varphi_A$ aus, und es fließt kein Strom im Stromkreis des Elementes E_2. Deshalb hängt der Strom nicht vom Widerstand des Rheostaten ab und ist gleich

$$I = \frac{E_1}{R + r_1},$$

worin r_1 der Innenwiderstand des Elementes E_1 ist. Da dabei

$$\varphi_B - \varphi_A = IR = \frac{E_1 R}{R + r_1}$$

gilt, muß die elektromotorische Kraft E_2 ebenfalls diesen Wert haben. Folglich wird der betrachtete Effekt bei

$$E_2 = E_1 \frac{R}{R + r_1}$$

beobachtet. (Siehe Anhang 3 auf Seite 69.)

55. Wenn die elektromotorische Kraft E_1 erheblich geringer als die elektromotorische Kraft E_2 ist. In diesem Fall ist der durch das Element E_1 fließende Strom nicht von A nach B, sondern von B nach A gerichtet, d.h., der vom Element E_2 generierte Strom fließt teils durch den Widerstand R und teils durch den Widerstand R_1. Bei Vergrößerung von R_1 wird der Strom im Abschnitt BR_1A verringert, was zu einer Erhöhung des Stromes im Abschnitt BRA führt.

56. Ja. In der Lösung der vorhergehenden Aufgabe wurde gezeigt, daß bei der Vergrößerung des Widerstandes R_1 der Strom I erhöht wird, wenn die elektromotorische Kraft E_1 im Vergleich zur elektromotorischen Kraft E_2 gering ist. Die elektromotorische Kraft E_1 sei erheblich größer als E_2. Wir vergrößern R_1 merklich und R_2 und R nur geringfügig. Das Resultat ist dann fast das gleiche wie bei alleiniger Erhöhung des Widerstandes R_1. Folglich erhöht sich dabei der Strom I.
Wir lösen die Aufgabe quantitativ. Zur Vereinfachung der Darlegungen fügen wir die Innenwiderstände der Quellen zu den Widerständen des Abschnittes AB hinzu, d.h., wir nehmen an, daß R_1

und R_2 die vollen Widerstände des oberen und des unteren Zweiges dieses Abschnitts sind. Das Potential des Punktes A sei Null, und das des Punktes B bezeichnen wir mit φ. Dann gilt entsprechend dem Ohmschen Gesetz

$$E_1 - \varphi = I_1R_1,$$
$$E_2 - \varphi = I_2R_2,$$
$$\varphi = IR,$$
$$I = I_1 + I_2.$$

Wir erhalten ein System von 4 Gleichungen mit den 4 Unbekannten φ, I_1, I_2, I. Bei der Lösung dieses Systems finden wir

$$I = \frac{E_1R_2 + E_2R_1}{R_1R_2 + R(R_1 + R_2)},$$

was man auch in der Form

$$I = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_2}}$$

schreiben kann. Da E_1 erheblich geringer als E_2 ist, kann der erste Summand des Zählers des angeführten Quotienten vernachlässigt werden. Erhöhen wir weiterhin R_1 stark und R_2 und R nur geringfügig, bleibt der Zähler des Quotienten (bei vernachlässigtem erstem Summanden) fast unverändert, aber der Nenner wird dabei kleiner. Folglich erhöht sich der Strom I. (Siehe Anhang 4 auf Seite 70.)

57. Entweder werden sie größer, oder einer wird größer und der andere kleiner. Die erste Möglichkeit ist offensichtlich. Die zweite wird aus folgender Überlegung ersichtlich: Wir vergrößern zunächst nur die elektromotorische Kraft E_1. Dann erhöht sich der Strom I; da $\varphi_B - \varphi_A = IR$, wächst der Potentialunterschied $\varphi_B - \varphi_A$. Da jedoch

$$E_2 - (\varphi_B - \varphi_A) = I_2R_2$$

gilt, verringert sich die Stromstärke I_2. Jetzt erhöhen wir die elektromotorische Kraft E_2 geringfügig. Dabei verändert sich die

Stromstärke I_2 fast nicht, ist also kleiner als der Strom, der vor der Erhöhung von E_1 und E_2 durch den Widerstand R_2 floß.

58. Der betrachtete Strom ist gleich

$$I = \frac{E_1 + nE_2}{r_1 + nr_2 + R},$$

wobei E_1 und E_2 die elektromotorischen Kräfte der Akkumulatoren A_1 und A_2, r_1 und r_2 ihre Innenwiderstände, R der äußere Widerstand und n die Anzahl der miteinander verbundenen Akkumulatoren sind. Der angeführte Quotient hängt nur in einem Fall nicht von n ab, und zwar bei

$$\frac{E_1}{r_1 + R} = \frac{E_2}{r_2}.$$

Dabei gilt $I = E_2/r_2$.

59. Da bei Reihenschaltung der Akkumulatoren A_2 der Strom des äußeren Kreises nicht verändert wird, gilt

$$\frac{E_1}{r_1 + R} = \frac{E_2}{r_2}, \tag{1}$$

wobei E_1 und E_2 die elektromotorischen Kräfte der Akkumulatoren A_1 und A_2, r_1 und r_2 ihre Innenwiderstände und R der äußere Widerstand sind (s. Lösung der vorangehenden Aufgabe). Die Stromstärke des äußeren Kreises beträgt

$$I = \frac{E_2}{r_2}. \tag{2}$$

Da bei Parallelschaltung der Akkumulatoren A_2 der Strom im äußeren Kreis unverändert bleibt, ist die elektromotorische Kraft E_2 gleich der Spannung am äußeren Kreis vor dem Anschließen dieser Akkumulatoren (s. Lösung der Aufg. 54). Folglich gilt

$$E_2 = IR. \tag{3}$$

Setzt man in die Gleichungen (1), (2) und (3) $E_1 = 12$ V, $E_2 = 8$ V und $I = 1$ A ein, erhält man ein System von drei Gleichungen mit drei Unbekannten:

$$\frac{12}{r_1 + R} = \frac{8}{r_2},$$

$$1 = 8/r_2,$$
$$8 = 1 \cdot R.$$

Wenn wir es lösen, erhalten wir

$$r_1 = 4\,\Omega,$$
$$r_2 = 8\,\Omega,$$
$$R = 8\,\Omega.$$

60. Das hängt von den restlichen Abschnitten des Stromkreises ab. Betrachten wir z.B. den in Abb. 52 dargestellten Stromkreis. Es sei $R_1 = R_2 = 10000\Omega$, $E = 200$ V, und der Innenwiderstand der Quelle der elektromorischen Kraft sei vernachlässigbar gering. Dann beträgt bis zum Schließen des Kontaktes $U_{AB} = 100$ V. Wird der Kontakt geschlossen, so ist der durch R_2 fließende Strom geringer als E/R_2, und folglich ist der durch die Lampe fließende Strom kleiner als E/R_2. Bei $E = 200$ V und $R_2 = 10000\Omega$ ist dieser Strom geringer als 0,02 A. Folglich brennt die Lampe nicht nur

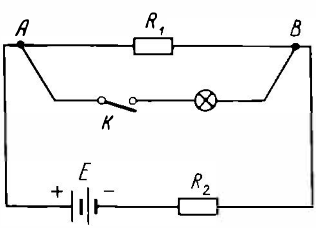


Abb. 52

nicht durch, sondern sie leuchtet nicht einmal. (Beim Schließen des Kontaktes *K* fällt die Spannung im Abschnitt *AB* und beträgt nur noch einige Bruchteile von 1 V.)

61. Eine der Lampen kann durchbrennen. *E* sei 220 V, und der Innenwiderstand der Quelle der elektromotorischen Kraft sei vernachlässigbar gering. Dann zeigt jedes Voltmeter 110 V an. Weiterhin sei *R* sehr groß. Beim Schließen der Kontakte K_1 und K_2 ste-

hen die Lampen unter den Spannungen

$$U_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$U_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

wobei R_1 und R_2 die Widerstände der Lampen sind. Schließlich sei die Nennleistung der ersten Lampe gering (z.B. 15 W) und die der zweiten groß (z.B. 150 W). Dann ist $R_1 \gg R_2$, und folglich gilt

$$U_1 \approx E = 220 \text{ V}.$$

Deshalb brennt die erste Lampe durch.

62. Nein. Dies ist zumindest aus folgendem einfachen Beispiel ersichtlich. Es sei $E_1 = E_2 = E$ und $r_1 = r_2 = r$. Dann gilt

$$I_1 = \frac{E}{R + r},$$

$$I_2 = \frac{E}{R + r},$$

$$I = \frac{E}{R + \frac{1}{2} r} = \frac{2E}{2R + r},$$

d.h. $I \neq I_1 + I_2$. (Siehe Anhang 5 auf Seite 71.)

63. Für $E_1 \neq E_2$ und $r_1 = r_2 = 0$ fließt durch die Quellen ein unendlich hoher Strom. Folglich gilt in diesem Fall $I_1 = I_2 = \infty$, und die Produkte $I_1 r_1$ und $I_2 r_2$ können nicht als gleich Null angenommen werden. (Mit anderen Worten: Sind die Innenwiderstände der Quellen sehr klein, kann man sie beim Berechnen des betrachteten Stromkreises nicht annähernd gleich Null setzen.)

64. Welche Form der Stromkreis auch annehmen würde, man kann ihn als Generator mit einer bestimmten elektromotorischen Kraft E und einem bestimmten Innenwiderstand r betrachten, der an die Punkte A und B angeschlossen ist. (Diese Feststellung ist intuitiv ersichtlich. In der Elektrotechnik wird sie streng bewiesen und als Satz des äquivalenten Generators — Zweipoltheorie —

bezeichnet.) Folglich kann man annehmen, daß der Widerstand R, wie in Abb. 53 gezeigt, geschaltet ist.
In der Aufgabenstellung wird gesagt, daß beim Fehlen des Leiters, der die Punke A und B verbindet, zwischen ihnen der Potentialunterschied U besteht. Folglich ist die elektromotorische Kraft E

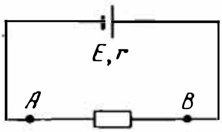


Abb. 53

gleich U. Weiterhin fließt durch den Widerstand R des Abschnitts AB der Strom I. Folglich gilt

$$\frac{E}{R + r} = I,$$

und da $E = U$ ist, gilt

$$\frac{U}{R + r} = I,$$

woraus

$$r = \frac{U - IR}{I}$$

folgt; d.h., wenn der Abschnitt AB den Widerstand $\frac{1}{2}R$ aufweist, fließt in ihm der Strom

$$I' = \frac{E}{\frac{1}{2}R + r} = \frac{U}{\frac{1}{2}R + \frac{(U - IR)}{I}} = 2I \frac{U}{2U - IR}.$$

65. Die bei einem Blitz freiwerdende Energie beträgt

$$UIt = 10^9 \cdot 20000 \cdot 0{,}001 \text{ J} = 2 \cdot 10^{10} \text{ J}.$$

Die bei allen Blitzen eines Jahres freiwerdende Energie ist

$$W = 2 \cdot 10^{10} \cdot 100 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 \text{ J} = 6{,}3 \cdot 10^{19} \text{ J}.$$

Das ist mehr als das Dreifache der jährlichen Weltproduktion an Elektroenergie.

66. Nein. Da der Glühfaden bei einer Spannung von 127 V eine geringere Temperatur und folglich einen geringeren Widerstand besitzt, nimmt die Leistung der Lampe um weniger als das Dreifache ab.

67. Für die „Erwärmung" des Zimmers. Betrachten wir einen eingeschalteten Kühlschrank zum Zeitpunkt t und einige Stunden danach. Offensichtlich verändert sich sein Zustand in dieser Zeit nicht (konkret auch seine Innentemperatur nicht). Folglich ändert sich seine innere Energie ebenfalls nicht. Da der Kühlschrank nur mit dem Zimmer, in dem er aufgestellt ist, in Wechselwirkung steht, kommen wir zu der Schlußfolgerung, daß die von ihm benötigte Elektroenergie für die Erwärmung dieses Zimmers verbraucht wird.

68. Nein. Von den fünf Lampen ist nur eine ausgewechselt worden, und der durch diese Lampen fließende Strom ändert sich dadurch nur geringfügig. Aber da der Widerstand der neuen Lampe erheblich geringer ist als der der alten (sie besitzt eine merklich höhere Nennleistung), wird sie weniger hell leuchten.

69. Die Helligkeit wird größer. Das Lämpchen einer Taschenlampe ist für eine Spannung von 3,5 V ausgelegt. Da diese Spannung erheblich geringer ist als die Netzspannung, ist der Widerstand des Rheostaten erheblich größer als der Widerstand der sechs parallel geschalteten Lampen. Deshalb ändert sich der Gesamtwiderstand des Stromkreises fast nicht, wenn eine von ihnen durchbrennt; folglich ändert sich die Stromstärke fast nicht. Aber da sich der Widerstand der Lampen dabei vergrößert, vergrößert sich ihre Leistung.

70. Wenn beide Lampen eingeschaltet sind, fließt durch jede von ihnen der Strom

$$I = \frac{1}{2} \frac{U}{R + \frac{1}{2} r} = \frac{U}{2R + r},$$

wobei U die Netzspannung und r der Widerstand einer Lampe ist. Ist nur eine Lampe eingeschaltet, so ist der sie durchfließende Strom gleich

$$I' = \frac{U}{R + r}.$$

Da $I < I'$, kann die Stromstärke I für die Heizung der Lampe zu gering, jedoch I' dafür ausreichend sein.

71. Siehe Abb. 54.

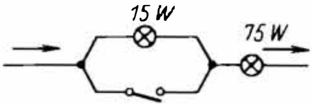


Abb. 54

72. Entsprechend der Voraussetzung gilt

$$\left(\frac{E}{R + \frac{1}{2}r}\right)^2 R = 80,$$

$$\left(\frac{2E}{R + 2r}\right)^2 R = 80,$$

wobei E die elektromotorische Kraft des Akkumulators, r sein Innenwiderstand und R der Außenwiderstand ist. Aus diesen Gleichungen folgt

$$r = R, \quad \frac{E^2}{R} = 180.$$

Daher beträgt die gesuchte Leistung

$$P = \left(\frac{E}{R + r}\right)^2 R = \left(\frac{E}{R + R}\right)^2 R$$

$$= \frac{E^2}{4R} = \frac{180}{4} \text{ W} = 45 \text{ W}.$$

73. Entsprechend der Voraussetzung gilt

$$\left(\frac{E}{R + r}\right)^2 R = 10,$$

$$\left(\frac{E}{R + \frac{1}{2} r}\right)^2 R = 20.$$

Aus diesen Gleichungen folgt

$$r = R\sqrt{2} = 1{,}41\ R,$$
$$E^2/R = 10\,(\sqrt{2} + 1)^2 = 58{,}1.$$

Die gesuchte Leistung beträgt

$$P = \left(\frac{E}{R + \frac{1}{3} r}\right)^2 R$$

$$= \frac{E^2}{R}\left(\frac{3R}{3R + r}\right)^2.$$

Setzen wir für $E^2/R = 58{,}1$ und $r = 1{,}41R$ ein, erhalten wir $P \approx 27$ W.

74. Bei der Elektrolyse entsteht eine durch Polarisation bedingte elektromotorische Kraft E_P, die entgegengesetzt zu U gerichtet ist. Deshalb ist die Elektrolyse nicht bei beliebiger Spannung möglich, sondern nur bei $U > E_P$ (für Wasser beträgt $E_P = 1{,}5$ V).

Elektromagnetismus

75. Wenn das zweite Feld nicht so stark inhomogen wie das erste ist. Wenn es vollständig homogen wäre, so wäre die Kraft, mit der es auf die Kugel einwirkt, gleich Null.

76. Nein, da der zweite Magnet die auf die Kugel von seiten des ersten Magneten wirkende Kraft vergrößert (und umgekehrt). Das kann man dadurch erklären, daß die in Abb. 26 dargestellten Magneten die Kugel stärker magnetisieren als jeder einzelne von ihnen. Im Endergebnis ist die Kraft $\boldsymbol{F}$ größer als die geometrische Summe der Kräfte $\boldsymbol{F}_1$ und $\boldsymbol{F}_2$.

77. Bei Annäherung der Leiter AB und CD (Abb. 55) wird das von ihnen erzeugte Magnetfeld geschwächt, da die sie durchfließenden Ströme entgegengesetzt gerichtet sind. Folglich geht die bei Annäherung dieser Leiter verrichtete Arbeit in Wärme über.
Der Mechanismus dieser Erscheinung ist folgender: Bei Annähe-

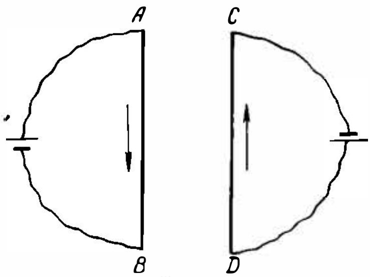


Abb. 55

rung der Leiter durchschneidet jeder von ihnen die Kraftlinien des Magnetfeldes des anderen Leiters. Als Folge wird in jedem Leiter eine durch elektromagnetische Induktion bedingte elektromotorische Kraft erzeugt, die einen zusätzlichen Strom und eine zusätzliche Erwärmung des Leiters hervorruft.

78. Im Punkt B, da im Abschnitt BCA, in dem Quellen elektromotorischer Kräfte fehlen, der Strom von V nach A fließt.

79. Der magnetische Fluß bleibt konstant, jedoch fließt durch den Leiter $ABCD$ ein Induktionsstrom. Betrachten wir den Abschnitt der Scheibe zwischen den Punkten D und A. Da sich dieser Abschnitt im Magnetfeld bewegt und dessen Feldlinien durchschneidet, wird in ihm eine elektromotorische Kraft induziert, und im Stromkreis $ABCDA$ fließt ein Strom. Der formale Widerspruch zum Induktionsgesetz entsteht hier dadurch, daß der Radius DA ständig durch „einen neuen ersetzt wird".

80. Die durch Induktion hervorgerufene elektromotorische Kraft ist gleich $\Delta\Phi/\Delta t$, folglich gilt

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = IR,$$

wobei im vorliegenden Fall $R = 0$ ist. Deshalb ist $\Delta\Phi/\Delta t$ stets Null unabhängig von der Bewegung des Magneten, d.h., Φ bleibt konstant. Wird der Magnet entfernt, bleibt der magnetische Fluß gleich Φ. (Beim Entfernen des Magneten entsteht im Ring ein Induktionsstrom. Das Magnetfeld dieses Stromes erzeugt den Fluß Φ, der zuvor vom Feld des Permanentmagneten erzeugt wurde.)

81. Beginnt der Magnet zu fallen, entsteht in der Schale ein Induktionsstrom, dessen Magnetfeld auf den Magneten mit einer nach oben gerichteten Kraft wirkt (entsprechend der Lenzschen Regel). Diese Kraft wächst schnell und hält den Magneten an. Da die Schale aus supraleitendem Material besteht, verringert sich der Strom nicht, und der Magnet verbleibt in der Schwebelage.

82. Nein.
In den Punkten der Geraden, auf der der Vektor $\boldsymbol{v}_2$ liegt, ist das Magnetfeld des Elektrons e_2 gleich Null. Folglich ist die Kraft $\boldsymbol{F}'$ gleich Null. In dem Punkt, in dem sich das Elektron e_2 selbst befindet, ist das Magnetfeld des Elektrons e_1 verschieden von Null. Sind die Vektoren $\boldsymbol{v}_1$ und $\boldsymbol{v}_2$ nicht, wie in Abb. 30 gezeigt, gerichtet, sondern beliebig, so sind die Kräfte $\boldsymbol{F}$ und $\boldsymbol{F}'$ i. allg. ebenfalls einander nicht gleich.

83. Auf Kosten der kinetischen Energie der Kugeln. Aus Abb. 31 ist ersichtlich, daß bei Bewegung der Kugeln nach rechts bzw. links die Feder auf sie mit Kräften einwirkt, die die Geschwindigkeit der Kugeln vermindern.

84. Die auf den Stab von seiten des Magnetfeldes wirkende Kraft ist anders gerichtet, als es in Abb. 32 dargestellt ist. Wäre der Lei-

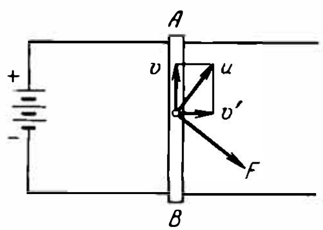


Abb. 56

ter AB unbeweglich, würden die Elektronen von B nach A fließen und die Kraft $\boldsymbol{F}$ wäre so gerichtet, wie es in der Abbildung gezeigt wird. Der Leiter AB bewegt sich jedoch nach rechts. Die Elektronen nehmen folglich an zwei Bewegungen teil: entlang des Leiters mit der Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ und gemeinsam mit dem Leiter mit der Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}'$ (Abb. 56). Die resultierende Geschwindigkeit der Elektronen wird durch den Vektor $\boldsymbol{u}$ dargestellt. Da die Kraft $\boldsymbol{F}$ eine Lorentzkraft ist, ist sie entsprechend Abb. 56 gerichtet. Da

diese Kraft senkrecht auf der Geschwindigkeit $\boldsymbol{u}$ steht, ist die von ihr verrichtete Arbeit gleich Null.
Jedoch kann der Stab bei der Bewegung nach rechts eine Arbeit verrichten (z.B. die Überwindung der Reibung auf den Schienen, auf denen er sich bewegt). In Verbindung damit kann die Frage aufgeworfen werden, auf wessen Kosten sie verrichtet wird. Es ist leicht zu sehen, daß diese Arbeit auf Kosten der Energie des Akkumulators verrichtet wird.

85. Der Elektromagnet besitzt eine Induktivität, und deshalb stellt sich der Strom nicht sofort ein. Wenn durch die Bewegung des Ankers nach oben der Kontakt K geschlossen wird, beginnt durch die Wicklung des Elektromagneten ein Strom zu fließen, der sich innerhalb einer bestimmten Zeit vergrößert. Deshalb ist der Strom in ihm bei der Bewegung des Ankers aus der Lage *1* in die Lage *2* (s. Abb. 34) etwas größer als in der darauffolgenden Bewegung aus Lage *2* in Lage *1*. Folglich ist auf dem Weg *1 – 2* die Kraft $\boldsymbol{F}$ etwas größer als auf dem Weg *2 – 1*, d.h., die Arbeit A_{12} ist größer als die Arbeit A_{21} (die Absolutwerte). Deshalb ist die von der Kraft $\boldsymbol{F}$ in einem Zyklus verrichtete Arbeit positiv.
Somit ist die Funktion der Klingel nur durch die Trägheit des Elektromagneten möglich. Würde der Elektromagnet gleichzeitig ein- und ausgeschaltet werden, würde die Klingel nicht funktionieren. (Siehe Anhang 6 auf Seite 71.)

86. Der Strom wird geringer.
Das Magnetfeld des Generators wirkt auf den Anker mit dem der Rotation entgegenwirkenden Moment M. Da dieses Moment durch Amperesche Kräfte hervorgerufen wird, ist es der Stromstärke und der Induktion des Magnetfeldes, in dem der Anker rotiert, proportional. Es gilt

$$M = kBI,$$

wobei k ein konstanter Koeffizient ist (für einen gegebenen Generator). Da der Anker gleichmäßig rotiert, gilt auf der anderen Seite

$$M = Gr,$$

wobei G das Gewicht der herabsinkenden Last und r der Radius der Welle ist. Daraus folgt

$$kBI = Gr$$

und

$$I = \frac{Gr}{kB}.$$

Werden die Magneten verstärkt, wird B größer, und G, r und k verändern sich nicht. Der Strom wird folglich geringer. (Daher verringert sich offensichtlich auch die Winkelgeschwindigkeit des Ankers.)

87. Aus der bei der Lösung der vorhergehenden Aufgabe erhaltenen Gleichung

$$I = \frac{Gr}{kB}$$

ist ersichtlich, daß der Strom I nicht vom Widerstand des äußeren Stromkreises abhängt, d.h., die Heizung der Lampe verändert sich nicht.
Das kann etwas eigenartig erscheinen, da die Heizung der Lampe bei einem sehr großen zusätzlichen Widerstand sehr klein werden müßte. Aber je größer der Widerstand des äußeren Stromkreises ist, desto größer ist die Rotationsgeschwindigkeit des Ankers, desto länger benötigt der Anker, um sie zu erreichen. Ist der Widerstand sehr groß, erhält der Anker eine sehr hohe Geschwindigkeit, und die durch Induktion bedingte elektromotorische Kraft wird so groß, daß der Strom I ungeachtet des sehr großen Widerstandes im äußeren Stromkreis einen endlichen Wert annimmt. Das ist aber nur im Idealfall richtig, wenn keine Reibung und kein Luftwiderstand vorhanden sind, die der Ankerrotation und dem Herabsinken der Last entgegenwirken. Im Realfall wird die Ankergeschwindigkeit durch die Reibung und den Luftwiderstand begrenzt (und auch dadurch, daß die Last den Boden eher erreicht als der Anker eine sehr hohe Geschwindigkeit). Unter diesen Bedingungen bleibt der Strom nur so lange konstant, wie der äußere Widerstand nur schwach vergrößert wird.

88. Der Motor dreht sich schneller.
Der Motor arbeitet ohne Belastung, und folglich ist das den Anker in Rotation versetzende Moment gleich Null (der Anker dreht sich aufgrund der Trägheit). Da dieses Moment durch Amperesche Kräfte erzeugt wird und es dem im Anker fließenden Strom proportional ist, ist der Strom im Anker ebenfalls gleich Null. Dieser

Strom wird aber durch die Gleichung

$$U - E_i = IR$$

bestimmt, worin U die an den Motor angelegte Spannung, E_i die durch Induktion bedingte elektromotorische Kraft und R der Ankerwiderstand ist. Folglich gilt

$$U - E_i = 0.$$

Weiterhin ist die elektromotorische Kraft E_i proportional der Ankergeschwindigkeit ω und der Induktion des vom Permanentmagneten erzeugten Feldes. Das bedeutet: Es gilt

$$E_i = kB\omega;$$

die vorhergehende Gleichung nimmt dann die Form

$$U - kB\omega = 0$$

an, woraus folgt

$$\omega = \frac{U}{kB}.$$

Aus dieser Beziehung ist ersichtlich, daß eine Verringerung von $\boldsymbol{B}$ eine Erhöhung von ω nach sich zieht.
Ist $\boldsymbol{B}$ sehr gering, so ist entsprechend der letzten Gleichung ω sehr groß. Daher führt diese Gleichung zu der der Wirklichkeit nicht entsprechenden Schlußfolgerung, daß sich bei sehr schwachen Magneten der Anker mit einer sehr hohen Geschwindigkeit dreht. Entsprechend der Voraussetzung arbeitet der Motor ohne Belastung, also wirken auf den Motor weder Reibungskräfte noch der Luftwiderstand ein. In diesem angenommenen Fall gilt die Gleichung

$$\omega = \frac{U}{kB}$$

für beliebige Induktionswerte; für sehr geringe $\boldsymbol{B}$ erreicht der Anker sehr hohe Geschwindigkeiten, obwohl er nur sehr langsam anläuft. Unter realen Bedingungen gilt die Gleichung

$$\omega = \frac{U}{k\boldsymbol{B}}$$

jedoch nur bei nicht zu kleinen Induktionswerten; bei sehr geringem $\boldsymbol{B}$ kann das Drehmoment nicht die Reibungskräfte überwinden, und der Anker verbleibt in Ruhestellung.

89. Das Gewicht der Last bleibt unverändert; deshalb verändert sich das Drehmoment des Motors nicht. Folglich bleibt der Strom konstant. Würde der durch den Motor fließende Strom größer werden, würde neben der Vergrößerung des Stromes im Anker auch das Magnetfeld des Stators größer. Jeder dieser Gründe würde zu einer Vergrößerung des Drehmomentes führen.

90. Der Strom wird geringer.
Da die Spannung anwächst, wird der Strom im Statorkreis größer, und das Magnetfeld des Stators wird stärker. Das Drehmoment des Motors ist proportional zur Induktion dieses Feldes und zum Strom im Anker:

$$M = k\boldsymbol{B}I.$$

Deshalb führt eine Erhöhung von $\boldsymbol{B}$ zu einer Verringerung von I, da das Drehmoment konstant bleiben muß.
Deshalb wird der Strom im Statorstromkreis größer und im Ankerstromkreis geringer. Da der Statorstrom sehr gering ist (einige Prozent des Ankerstromes), verringert sich der vom Motor benötigte Strom.

91. Berechnen wir zunächst die Abhängigkeit des Drehmomentes des Motors von seiner Winkelgeschwindigkeit. Dieses Moment ist dem Ankerstrom und der Magnetfeldstärke des Stators proportional, wobei letztere nicht von der Winkelgeschwindigkeit abhängt; folglich gilt

$$M = kI,$$

wobei I der Strom im Anker und k ein für den gegebenen Motor und bei gegebener Spannung konstanter Koeffizient ist. Nun gilt

$$I = \frac{U - E_i}{R},$$

worin R der Ankerwiderstand und E_i die durch Induktion bedingte elektromotorische Kraft ist; es gilt

$$E_i = k'\omega;$$

hier ist k' ein konstanter Koeffizient für den gegebenen Motor bei gegebener Spannung. Folglich ist

$$M = k\frac{U - k'\omega}{R} = \frac{kU}{R} - \frac{kk'}{R}\omega,$$

d.h.

$$M = A - B\omega, \qquad (1)$$

worin A und B Konstanten sind, die von den Parametern des Motors und von der angelegten Spannung bestimmt werden. Gleichung (1) zeigt, daß das Drehmoment eines Nebenschlußmotors

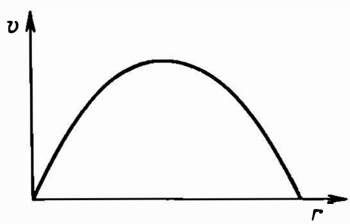


Abb. 57

linear von der Winkelgeschwindigkeit des Motors abhängt.
Wir berechnen jetzt die Abhängigkeit der Lastgeschwindigkeit vom Radius der Welle. Das Gewicht der Last sei G und der Radius der Welle r. Das Drehmoment des Motors ist dann gleich Gr, und da $\omega = v/r$, nimmt die Beziehung (1) die Form

$$Gr = A - B\frac{v}{r}$$

an, woraus

$$v = \frac{A}{B} r - \frac{G}{B} r^2$$

folgt. Eine solche Form besitzt die Abhängigkeit v von r. Diese Abhängigkeit ist in Abb. 57 grafisch dargestellt. Aus ihr ist ersichtlich, daß mit wachsendem Radius v zunächst größer und danach geringer wird, d.h.: Ist der Radius der Welle klein, so ist der erste Schüler im Recht, ist der Radius jedoch groß, ist der zweite Schüler im Recht.

92. Der Anker eines Nebenschlußmotors hat den Widerstand R. Nehmen wir die Spannung und das Belastungsmoment als bekannt an und berechnen wir die Winkelgeschwindigkeit des Ankers und den Strom im Anker.
Das Arbeitsregime des Nebenschlußmotors wird durch folgende Gleichungen beschrieben:

$$U - E_i = IR,$$
$$E_i = k_1\omega,$$
$$M = k_2 I,$$

worin k_1 und k_2 Koeffizienten sind, die von der Magnetfeldstärke des Stators abhängen, jedoch nicht von ω, I und R. In diesem Gleichungssystem sind drei Unbekannte enthalten: I, E_i, ω. Lösen wir es, erhalten wir für I und ω folgende Werte:

$$I = \frac{M}{k_2},$$

$$\omega = \frac{U}{k_1} - \frac{M}{k_1 k_2} R.$$

R sei jetzt gleich Null. Daraus folgt

$$I = \frac{M}{k_2},$$

$$\omega = \frac{U}{k_1}.$$

Daher besitzt der Strom im Anker einen endlichen Wert, und die Rotationsgeschwindigkeit des Ankers hängt nicht vom Belastungsmoment ab.

93. Nein, da man die Gleichung $P' = I^2R$ nicht für einen verzweigten Stromkreis, in dessen Abschnitten elektromotorische Kräfte wirken, anwenden kann (im vorliegenden Fall: die durch Induktion bedingte elektromotorische Kraft im Anker).
Führen wir die richtige Berechnung der gesuchten Leistung aus. Die vom Motor aufgenommene Leistung beträgt

$$P = UI = 120 \cdot 11 \text{ W} = 1320 \text{ W}.$$

Die Leistung der Wärmeverluste im Statorstromkreis ist gleich

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1} = \frac{120^2}{120} \text{ W} = 120 \text{ W}.$$

Die Stromstärke im Statorstromkreis beträgt

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{120}{120} \text{ A} = 1 \text{ A}.$$

Der Strom im Ankerstromkreis beträgt

$$I_2 = I - I_1 = (11 - 1) \text{ A} = 10 \text{ A}.$$

Die Leistung der Wärmeverluste im Ankerstromkreis ist gleich

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 10^2 \cdot 1 \text{ W} = 100 \text{ W}.$$

Die mechanische Leistung des Motors ist dann gleich

$$N = P - P_1 - P_2 = 1320 \text{ W} - 120 \text{ W} - 100 \text{ W} = 1100 \text{ W}.$$

94. Sie wird an den zweiten Generator abgegeben, der als Elektromotor arbeitet und daher eine Arbeit verrichtet. (Siehe Anhang 7 auf Seite 72.)

95. Ja, da sich der Gesamtwiderstand

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

dabei verringern kann (R ohmscher, X_L induktiver, X_C kapazitiver Widerstand).

96. Der Widerstand der Spulen ist größer als 10 Ω.
Im Stadtnetz fließt Wechselstrom, und der Widerstand der Spulen ist gleich

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

worin R ihr ohmscher und X_L ihr induktiver Widerstand ist. Nachdem die zweite Spule auf die erste Spule gewickelt worden ist, wurde R um die Hälfte verringert, und X_L blieb konstant (die zweite Spule führt zu einer Vergrößerung des Querschnitts der ersten). Folglich verringert sich der Widerstand Z nicht um die Hälfte, d.h., er ist größer als 10 Ω.

97. Das hängt davon ab, wie man das Symbol Φ auffaßt. Außer dem äußeren Magnetfeld, in dem sich der Leiter befindet, existiert noch das Magnetfeld, das von dem durch den Leiter fließenden Strom erzeugt wird. Werden diese beiden Felder addiert, erhalten wir ein resultierendes Feld. Wird unter Φ der magnetische Fluß des resultierenden Feldes verstanden, hat der erste Schüler recht, wird unter Φ jedoch nur der magnetische Fluß des äußeren Feldes verstanden, hat der zweite Schüler recht.

98. Da $0{,}3 + 0{,}4 \neq 0{,}5$ ist, sind die Ströme I_1 und I_2 phasenverschoben. Da $(0{,}3)^2 + (0{,}4)^2 = (0{,}5)^2$ ist, beträgt die Phasenverschiebung 90°, d.h., in den „Kästen" befinden sich irgendwelche Blind- und Wirkwiderstände, die diese Phasenverschiebung bewirken. Die einfachste Antwortvariante lautet: In einem der „Kästen" befindet sich nur ein ohmscher Widerstand und im anderen nur ein induktiver oder kapazitiver. Diese Variante kann jedoch nur annähernd verwirklicht werden, da jede Drossel und jeder Kondensator einen — wenn auch sehr geringen — Wirkwiderstand besitzt.

99. Der Widerstand des betrachteten Abschnittes beträgt

$$Z = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

woraus folgt:

$$U = I\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Hieraus wird ersichtlich, daß U nur dann nicht von I abhängig ist, wenn

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

In diesem Fall ist $U = 0$ für beliebige I. Das gilt nur in dem idealen Fall, wenn im betrachteten Abschnitt kein ohmscher Widerstand vorhanden ist. Praktisch besitzen aber Spulen und Kondensatoren einen bestimmten ohmschen Widerstand. Wenn er sehr gering ist, ist die Spannung annähernd gleich Null.

100. Durch die Spule fließt der Strom

$$I_L = \frac{U}{\omega L},$$

und der durch den Kondensator fließende Strom ist gleich

$$I_C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U\omega C.$$

Der erste von ihnen läuft der Spannung U um 90° hinterher, und der zweite eilt U um 90° voraus, d.h., die Phasen dieser Ströme sind entgegengesetzt, und folglich gilt

$$I = I_L - I_C = U\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right).$$

Aus dem erhaltenen Ausdruck ist ersichtlich, daß I nur dann nicht von U abhängt, wenn

$$\frac{1}{\omega L} = \omega C.$$

In diesem Fall gilt $I = 0$ bei beliebiger Spannung U. Folglich fließt der Strom nur im Teilkreis $ALBCA$. Das ist damit zu erklären, daß in einem solchen idealisierten Stromkreis der ohmsche Widerstand der Abschnitte ALB und ACB gleich Null ist. Praktisch sind diese Widerstände jedoch stets von Null verschieden. Wenn sie aber sehr klein sind, ist der Strom I gering gegenüber dem Strom I_L und dem Strom I_C.

1. Zur Lösung der Aufgabe 39. Der während der Entladezeit fließende Strom ist gleich

$$I = -\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}.$$

Daher kann die Gleichung

$$I = \frac{Q}{CR}$$

(S. 11) in folgender Form geschrieben werden:

$$-\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \frac{Q}{CR}$$

oder

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} + \frac{Q}{CR} = 0.$$

Die erhaltene Differentialgleichung bestimmt die zeitliche Änderung der Ladung Q. Löst man die Gleichung unter Berücksichtigung der Anfangsbedingung $Q(0) = Q_0$, erhält man folgende Abhängigkeit Q von t:

$$Q = Q_0 \mathrm{e}^{\frac{-t}{CR}}.$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß Q monoton abnimmt und nur bei $t \to \infty$ Null wird.

2. Zur Lösung der Aufgabe 43. Wir zeigen, daß die Gesamtenergie dieses Systems abnimmt (die Feldenergie der zwei Kugeln).
Aus den Gleichungen (1) und (2) auf S. 12 und S. 13 sieht man, daß die Vergrößerung der potentiellen Energie der Kugeln

$$\Delta W = \frac{(Q_1 - Q_2)^2}{16\pi\varepsilon_0 r}$$

ist. Gleichzeitig ist die Verringerung der Eigenenergie der Kugeln gleich

$$\Delta U = \frac{1}{2C}\left[Q_1^2 + Q_2^2 - 2\left(\frac{Q_1 + Q_2}{2}\right)^2\right],$$

was man in der Form

$$\Delta U = \frac{(Q_1 - Q_2)^2}{4C}$$

schreiben kann. Da $C = +4\pi\varepsilon_0 R$, wobei R der Radius einer Kugel ist, gilt

$$\Delta U = \frac{(Q_1 - Q_2)^2}{16\pi\varepsilon_0 R}.$$

Vergleicht man ΔU mit ΔW, sieht man: Da $r > R$, ist $\Delta W < \Delta U$. Dadurch verringert sich die Gesamtenergie dieses Systems. (Sie geht teilweise in Joulesche Wärme über.)

3. Zur Lösung der Aufgabe 54. Wir berechnen den Strom für den allgemeinen Fall, d.h. bei beliebigen $\boldsymbol{E}_1$ und $\boldsymbol{E}_2$.
Das Potential des Punktes A sei Null und das des Punktes B φ (s. Abb. 19). Dann gilt entsprechend dem Ohmschen Gesetz

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{E}_1 - \varphi &= I_1 r_1, \\
\boldsymbol{E}_2 - \varphi &= I_2(r_2 + r), \\
\varphi &= IR, \\
I_1 + I_2 &= I.
\end{aligned}$$

Wir erhalten ein System von vier Gleichungen mit vier Unbekannten φ, I, I_1, I_2. Durch Lösen dieses Systems erhalten wir

$$I = \frac{\boldsymbol{E}_1(r_2 + r) + \boldsymbol{E}_2 r_1}{(r_1 + R)(r_2 + r) + Rr_1}.$$

Wir sehen, daß der Strom I im allgemeinen Fall vom Widerstand $r_2 + r$ des unteren Zweiges des Abschnittes AB abhängt (und dadurch auch von r). Aber da sowohl der Zähler als auch der Nenner des erhaltenen Quotienten lineare Funktionen von $r_2 + r$ sind, hängt I nicht von dieser Summe ab, wenn die Koeffizienten dieser Funktionen proportional sind. Daher wird der in der Aufgabe betrachtete Effekt dann beobachtet, wenn

$$\frac{\boldsymbol{E}_1}{\boldsymbol{E}_2 r_1} = \frac{r_1 + R}{Rr_1},$$

d.h. bei

$$E_2 = \frac{R}{R + r_1} E_1.$$

4. Zur Lösung der Aufgabe 56. Den Strom I kann man finden, ohne das System der vier Gleichungen mit den vier Unbekannten zu lösen. Dafür genügt es, folgende Formeln zu benutzen:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}, \tag{1}$$

$$\frac{E}{r} = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \ldots + \frac{E_n}{r_n}, \tag{2}$$

wobei r der Innenwiderstand und E die elektromotorische Kraft einer Batterie ist, die durch Parallelschaltung einiger Stromquellen entsteht. Mit Formel (1) kann man den Innenwiderstand der in Abb. 20 gezeigten Batterie berechnen und mit Formel (2) die elektromotorische Kraft dieser Batterie. Danach kann bei bekanntem äußerem Widerstand R der Strom I mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes berechnet werden.

Beweisen wir die Gleichungen (1) und (2). Einige Stromquellen seien parallelgeschaltet und über irgendeinen äußeren Widerstand kurzgeschlossen. Dem Ohmschen Gesetz entsprechend gilt

$$\begin{aligned} E_1 - U &= I_1 r_1, \\ E_2 - U &= I_2 r_2, \\ &\ldots\ldots\ldots \\ E_n - U &= I_n r_n, \end{aligned}$$

worin U die Spannung im Außenkreis der Batterie ist. Der Strom im äußeren Kreis ist gleich

$$I = \sum I_i = \sum \frac{E_i - U}{r_i},$$

d.h.

$$I = \sum \frac{E_i}{r_i} - U \sum \frac{1}{r_i}. \tag{3}$$

E sei jetzt die elektromotorische Kraft und r der Innenwiderstand einer der Batterie äquivalenten Quelle. Dann ist der Strom gleich

$$I = \frac{E - U}{r} = \frac{E}{r} - U\frac{1}{r}. \qquad (4)$$

Durch Vergleich der Formeln (3) und (4) sehen wir, daß

$$\frac{E}{r} = \sum \frac{E_i}{r_i},$$

$$\frac{1}{r} = \sum \frac{1}{r_i},$$

d.h., wir erhalten die Beziehungen (1) und (2).

Die Formeln (1) und (2) sind für die Lösung vieler Aufgaben günstig, in denen parallel verbundene Stromquellen vorkommen.

Anmerkung. Die durch Formel (2) bestimmte elektromotorische Kraft E ist nicht gleich P/I, wobei P die Gesamtleistung der Batterie und I der sie durchfließende Strom ist. Folglich ist diese elektromotorische Kraft nicht die elektromotorische Kraft der Batterie im wörtlichen Sinne. Wird jedoch diese Batterie durch eine Quelle ersetzt, deren elektromotorische Kraft durch Formel (2) und deren Innenwiderstand durch Formel (1) bestimmt werden, so bleiben die durch den äußeren Kreis der Batterie fließenden Ströme gleich, unabhängig vom Aufbau dieses Kreises. Dadurch bestimmen die Formeln (1) und (2) den Innenwiderstand und die elektromotorische Kraft einer Quelle, die der gegebenen Batterie äquivalent ist. Dieser Umstand erlaubt es, E als die elektromotorische Kraft der gegebenen Batterie und r als ihren Innenwiderstand zu betrachten.

5. Zur Lösung der Aufgabe 62. Es kann scheinen, daß die erhaltene Antwort dem Superpositionsprinzip widerspricht, da beim Schließen der Kontakte K_1 und K_2 der Strom gleichzeitig von zwei Quellen generiert wird. Beim Schließen des Kontaktes K_1 oder K_2 schalten wir jedoch nicht nur die elektromotorische Kraft E_1 oder E_2 ein, sondern führen auch den Widerstand r_1 oder r_2 in den betrachteten Stromkreis ein. Folglich fließen die Ströme I_1 und I_2 in verschiedenen Stromkreisen (obwohl diese Ströme durch ein und denselben Abschnitt fließen). Deshalb ist $I \neq I_1 + I_2$. Die Anwendung des Superpositionsprinzips auf diesen Stromkreis besteht in folgendem: Wir stellen uns vor, die Kontakte K_1 und K_2 seien geschlossen, der Stromkreis enthielte die Widerstände r_1 und r_2 und der Strom werde nur durch die elektromotorische Kraft E_1 generiert (d.h. $E_2 = 0$). Der Strom, der in diesem Fall durch den Widerstand R fließt, ist gleich I'. Wir stellen uns jetzt vor, daß der Strom nur von der elektromotorischen Kraft E_2 generiert wird (d.h. $E_1 = 0$). Der Strom, der dabei durch den Widerstand R fließt, ist gleich I''. Dann gilt entsprechend dem Superpositionsprinzip $I = I' + I''$.

6. Zur Lösung der Aufgabe 85. Es kann die Frage entstehen: Was wäre, wenn der Elektromagnet gleichzeitig ein- und ausgeschaltet würde? (Wir stellen uns vor, daß ein solcher Magnet möglich wäre.) Es ist klar, daß in diesem Fall die Klingel nicht funktioniert. In welcher Lage befindet sich jedoch dabei der Anker? Offensichtlich kann er nicht geschlossen sein, da in diesem Fall durch den Elektromagneten M Strom fließt und der Anker L, der vom Elektromagneten angezogen wird, den Stromkreis öffnet. Der Kontakt K kann aber auch nicht geöffnet sein, da dann der Elektromagnet den Anker nicht anzieht und die Feder S den Kontakt schließt. Wie wird nun die Stellung des Kontaktes K sein? Es ist unschwer zu erkennen, daß der

Kontakt geschlossen sein wird, aber nur „sehr" gering"; d.h., er wird nur sehr schwach an den Stift B gedrückt. Infolgedessen entsteht im Berührungspunkt des Plättchens K mit dem Stift B ein erheblicher Widerstand, und der Strom im Ankerstromkreis ist sehr gering. Deshalb ist die den Anker zum Elektromagneten ziehende Kraft ebenfalls sehr gering, und der Anker kann den bestehenden schwachen Kontakt nicht öffnen.

7. Zur Lösung der Aufgabe 94. Da der Strom I entgegengesetzt zur elektromotorischen Kraft E_2 gerichtet ist, ist die vom zweiten Generator entwickelte Leistung negativ. Als Folge entwickelt er keine Elektroenergie, sondern verbraucht welche, d.h., er arbeitet als Elektromotor. Dabei ist die elektromotorische Kraft E_2 die durch Induktion bedingte elektromotorische Kraft, die in jedem Gleichstromelektromotor entsteht. Sie ist dem durch den Motor fließenden Strom entgegengesetzt gerichtet und hat die Tendenz, diesen Strom zu verringern.

Band, Autor und Titel		Preis	Best.-Nr.
1	Landau/Rumer, Was ist die Relativitätstheorie?	3,60	666 043 4
2	Makejewa/Zedrik, Verwunderliches aus der Physik	4,15	665 527 2
3	Naundorf, Abbildungstreue	3,20	665 221 5
6	Tschudnowski, Was ist Agrophysik?	3,50	665 003 3
7	Artamonow, Optische Täuschungen	7,50	665 156 2
8	Schustorowitsch, Neues aus der Theorie der chemischen Bindung	3,60	665 520 5
12	Makowezki, Schau den Dingen auf den Grund!	8,50	665 587 0
13	Gläser, Was ist Radiographie?	6,80	665 589 7
17	Kompanejez, Statistische Gesetze in der Physik	7,80	665 626 7
18	Müller, Grundzüge der Astronomie	8,90	665 669 7
21	Milantjew/Temko, Plasmaphysik	7,90	665 703 2
23	Butkewitsch/Selikson, Ewige Kalender	5,90	6656961
24	Dautcourt, Was sind Pulsare?	4,90	665 706 7
25	Kulikow/Sidorenkow, Planet Erde	7,50	665 704 0
26	Lange, Physikalische Paradoxa und interessante Aufgaben	8,–	665 701 6
27	Bogdanow, Laser lenken Flugkörper	4,30	665 745 4
28	Bogdanow, Vom Molekül zum Kristall	7,40	665 748 9
29	Dautcourt, Was sind Quasare?	4,90	665 753 4
30	Kusnezow, Kernenergie – Schatzkammer des 21. Jahrhunderts	3,90	665 749 7
31	Rawitsch, Die Rätsel Gondwanas	4,80	665 752 6
33	Gubarew, Kosmische Trilogie	12,–	665 768 1
35	Sharkow, Der innere Aufbau von Erde, Mond und Planeten	7,–	665 771 0
36	Holzmüller, Unsere Umwelt – ihre Entwicklung und Erhaltung	6,–	665 765 7
37	Komarow, Neue unterhaltsame Astronomie	16,50	665 839 3
38	Lange, Physikalische Knobeleien	5,60	665 835 0
40	Hupfer, Die Ostsee – kleines Meer mit großen Problemen	7,90	665 878 0
41	Meinhold/Pätz, Erdöl und Erdgas – vom Plankton bis zur Pipeline	9,20	665 884 4
42	Biehl/Zier, Röntgenstrahlen – ihre Anwendung in Medizin und Technik	8,90	665 989 8
43	Pskowski, Novae und Supernovae	12,50	665 889 5
44	Ljubimow/Nowikow, Einfache elektrische Stromkreise – keine Angst vor Schaltalgebra	3,90	665 987 1
45	Kaplan, Physik der Sterne	13,–	665 994 3
46	Galkin/Schwarew, Reise zum Mittelpunkt des Mondes	4,50	665 993 5
47	Nowikow, Schwarze Löcher im All	5,50	666 035 4
48	Pogosjan, Umweltfaktor Atmosphäre	9,90	666 034 6
49	Röseberg, Philosopie und Physik	8,50	666 084 8
50	Meinhold, Energie aus der Tiefe der Erde	6,50	666 031 1
51	Jefremow, In die Tiefen des Weltalls	11,50	666 087 2
52	Nowikow, Evolution des Universums	11,50	666 088 0

Der Autor legt klar und eindeutig formulierte Denksportaufgaben aus drei Teilgebieten der Elektrizitätslehre vor: Elektrostatik, elektrischer Strom, Elektromagnetismus. Der Leser wird angeregt, sich eingehender mit der berührten Thematik zu beschäftigen.
Die Lösungen dieser interessanten Fragestellungen sind sehr ausführlich; sie beziehen auch das Umfeld der Problemstellung mit ein und erleichtern dadurch das Erkennen der physikalischen Zusammenhänge und das Analysieren der angegebenen Lösung.
Der geübte Leser wird angeregt, schwierigere mathematische und physikalische Erörterungen in einem Anhang weiter zu verfolgen.

BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft