

6.2 Elektrischer Stromkreis

Gleichstromgrössen

55

- a) $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{ne\Delta V}{\Delta t} = \frac{neA\Delta s}{\Delta t} = neAv$
- b) n folgt aus den Daten von Kupfer: Wenn jedes Kupferatom ein Elektron zur Verfügung stellt, dann muss also die Teilchendichte der Kupferatome gefunden werden.

$$n = N_A \frac{\rho_{\text{Cu}}}{M_{\text{Cu}}} ; 8.5 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} \cdot v = \frac{I}{e n A} ; 3.8 \text{ mm/s (Schneckentempo!)*}$$

* Aufgrund einer Änderung im Aufgabentext in der 2. Auflage 2006 hat diese Aufgabe zwei unterschiedliche Lösungen. 3.0 mm/s für die 1. Auflage.

56

	Spannung	Stromstärke	Widerstand	Arbeit	Zeit	Leistung
a)	31.0 V	2.50 A	12.4 Ω	11.6 kJ	2.50 min	77.5 W
b)	150 V	5.75 A	26.1 Ω	71.2 kJ	82.5 s	863 W
c)	230 V	1.10 A	210 Ω	1.07 kWh	4.25 h	252 W
d)	7.50 kV	12.5 A	600 Ω	93.8 kWh	60.0 min	93.8 kW
e)	83.1 V	5.50 A	15.1 Ω	1'000'000 J	36.5 min	457 W
f)	48.0 V	20.0 mA	2.40 k Ω	800 J	13.9 min	960 mW

57

- a) F steht für Flink (es gibt auch Träge T, sehr träge TT, Mittelträge M und sehr Flinke FF Schmelzsicherungen), 0.5 A der höchst zulässige Strom bei einer Spannung von 230 V (die Netzspannung). Dies ergibt eine maximale Leistung von 115 W, z.B. ein Rasierapparat.
- b) Ein Föhn hat eine Leistung von z. B. 1000 W. Die Sicherung ist beim Betätigen des Föhns geschmolzen.
- c) Karl muss eine neue Schmelzsicherung kaufen und ab sofort die untere Steckdose für den Föhn verwenden.

58

- a) $P = UI$; 5 GW b) $t = \frac{P t_{\text{Blitz}}}{E_{\text{Jahr}}}$; 25 Tage

59

- a) $W_1 = P_1 t_1$; 8.2 TWh b) $t_2 = \frac{W_2}{P_2}$; 1 Monat

60

Nutzbarer Energieinhalt der Batterie: $\Delta E = UI\Delta t$; 11.3 kJ;

Preis pro kWh also 790.– Fr.

Vergleich: 1 kWh aus dem Netz kostet ca. 20 Rappen.

61

$$\Delta t = \frac{1 \text{ Fr.} \cdot 3.6 \cdot 10^6 \text{ J/kWh}}{0.14 \text{ Fr./kWh} \cdot 12 \text{ W}} = 2 \cdot 10^6 \text{ s oder 25 Tage}$$

62

a) $t = \frac{\Delta Q}{P} = \frac{cm\Delta\vartheta}{P}$; 3.3 min

b) $R = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{P}$; 59 Ω

c) $P' = \frac{1}{4}P \Rightarrow t' = 4t$; 4-mal länger

63

a) $\vartheta_2 = \vartheta_1 + \frac{IU\Delta t}{mc}$; 56 °C

b) $\eta = \frac{cm\Delta\vartheta}{IU\Delta t}$; 86 %

64

a) $\frac{Q}{m} = L_f + c_{\text{Al}}\Delta\vartheta$; 0.97 MJ/kg bzw. 0.27 kWh/kg

Also 0.97 MJ um ein Kilogramm Aluminium auf Schmelztemperatur zu bringen und dann noch zu schmelzen.

b) Aluminium ist 3fach positiv geladen.

In 110 Öfen wird in der Zeit t folgende Masse abgeschieden:

$$m = 110 n_{\text{Al}} M_{\text{Al}} = 110 \frac{N_{\text{Al}}}{N_A} M_{\text{Al}} = 110 \frac{It}{3eN_A} M_{\text{Al}}$$

In derselben Zeit wird folgende Arbeit aufgewendet:

$$W = Pt = UI t$$

$$\frac{W}{m} = \frac{3UI t e N_A}{110 I t M_{\text{Al}}} = \frac{3UeN_A}{110 M_{\text{Al}}}; \quad 43 \text{ MJ/kg, bzw. 12 kWh/kg}$$

Also 43 MJ um ein kg Aluminium elektrolytisch zu gewinnen.

Es braucht also rund 44-mal mehr Energie, um Aluminium elektrolytisch zu gewinnen, als es wieder einzuschmelzen!

Serien- und Parallelschaltung

65

a) $P = \frac{20 \cdot 4'000 \text{ kWh}}{40 \cdot 8 \text{ h}} = 250 \text{ kW}$ b) $P_L = \frac{P}{n}; \quad 12 \text{ W}$

66

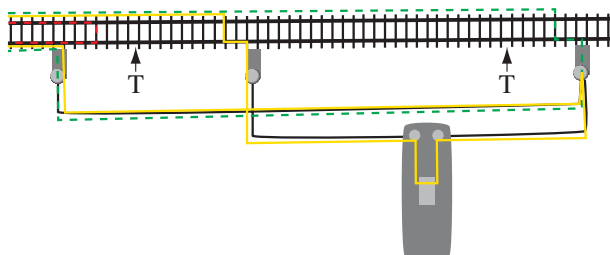
a) N ist die Anzahl Glühbirnen: $N = \frac{R_L}{R_{\text{tot}}} = R_L \frac{I}{U}; \quad 20.9,$
somit dürfen 20 Glühbirnen parallel geschaltet werden.

b) $P = 20 \cdot \frac{U^2}{R_L}; \quad 1.32 \text{ kW (bei 20 Glühbirnen)}$

67

a)

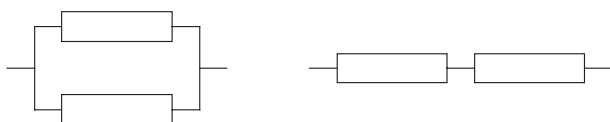
vor dem getrennten Streckenabschnitt: - - - - -
auf dem getrennten Streckenabschnitt: ————
nach dem getrennten Streckenabschnitt: - - - - -



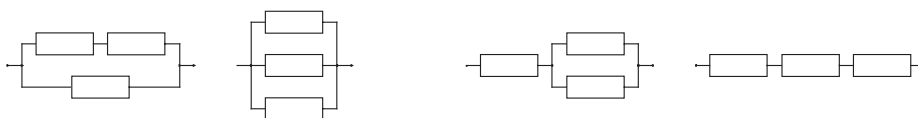
b) $I = \frac{U}{R_M + R_S}; \quad 0.22 \text{ A}$

68

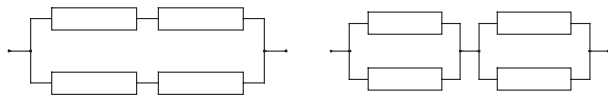
a) Es gibt nur zwei Schaltungen:



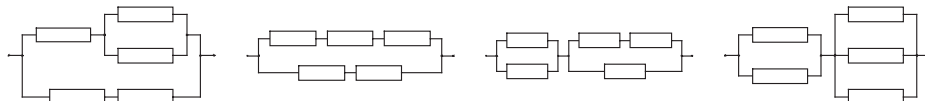
b) Es gibt diese 4 Schaltungen:



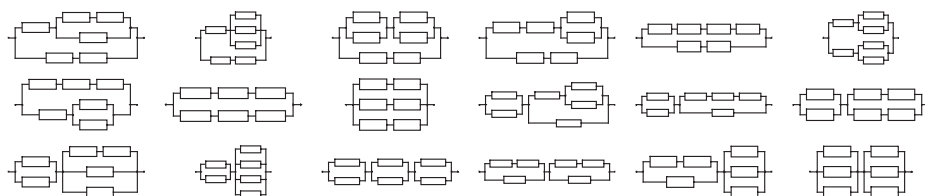
- c) Es gibt die 4 Schaltungen von $N = 3$ mit einem Serie- oder Parallelwiderstand mehr, also 8 Fälle plus die nachfolgenden 2:



- d) Es gibt die 10 Schaltungen von $N = 4$ mit einem Serie- oder Parallelwiderstand mehr, also 20 Fälle plus die nachfolgenden 4:



- e) Es gibt die 24 Schaltungen von $N = 5$ mit einem Serie- oder Parallelwiderstand mehr, also 48 Fälle plus die nachfolgenden 18 Fälle:



Übrigens: (alles mit Computerhilfe gefunden)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
#	1	2	4	10	24	66	180	522	1532	4624	14136	43930	137908	437502

Eine allgemeine Formel ist dem Autor dieser Aufgabe nicht bekannt, fragen Sie mal Ihre Mathematiklehrerin bzw. Ihren Mathematiklehrer.

69

$$I_1 = 220 \text{ mA}, I_2 = 220 \text{ mA}, I_3 = I_4 = 73.3 \text{ mA}$$

70

- a) 10Ω
 b) $I_1 = 2.4 \text{ A}, I_2 = 1.4 \text{ A}, I_3 = I_4 = 0.96 \text{ A}, I_5 = 0.58 \text{ A}, I_6 = 0.86 \text{ A}$
 c) 20 V

71

- a) Lösung des Gleichungssystems $P_1 = 300 \text{ W} = \frac{U^2}{R_1 + R_2}$ bzw.

$$P_2 = 1250 \text{ W} = \frac{U^2 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2} \text{ ergibt } R_1 = 71 \Omega \text{ und } R_2 = 106 \Omega.$$

- b) $P = \frac{U^2}{R}; 500 \text{ W bzw. } 750 \text{ W}$

72

a) allgemein: $P = \frac{U^2}{R}$

Stufe 1: $R = 416 \, \Omega$, $P = 130 \, \text{W}$

Stufe 2: $R = 255 \, \Omega$, $P = 210 \, \text{W}$

Stufe 3: $R = 169 \, \Omega$, $P = 310 \, \text{W}$

Stufe 4: $R = 86 \, \Omega$, $P = 620 \, \text{W}$

Stufe 5: $R = 57 \, \Omega$, $P = 930 \, \text{W}$

Stufe 6: $R = 50 \, \Omega$, $P = 1.1 \, \text{kW}$

b)

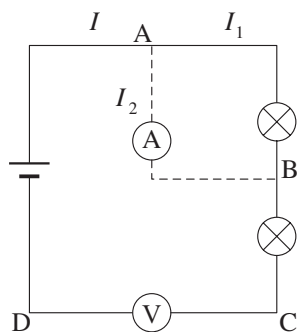
A wird verbunden mit	B wird verbunden mit	R	P
1	4	671 Ω	79 W
2	4 und 5	71 Ω	740 W
4	5	502 Ω	110 W

73

	R_1	P_1	R_2	P_2	R_3	P_3	R_4	P_4	ΔQ_{\max}	ΔQ_{\min}
3-stufig	40 Ω	1.32 kW	80 Ω	0.66 kW	160 Ω	0.33 kW			400 kJ	100 kJ
4-stufig	40 Ω	1.32 kW	80 Ω	0.66 kW	180 Ω	0.29 kW	360 Ω	0.15 kW	400 kJ	44 kJ

Der 4-stufige Haarföhn hat kaum Vorteile, da die neue vierte Stufe nur eine sehr schwache Wärmeleistung hat.

74



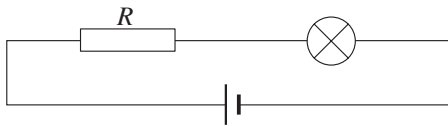
Wenn man Amperemeter und Voltmeter austauscht, bekommt man die oben stehende Schaltung.

Das Amperemeter hat einen sehr kleinen Widerstand, so ist $I_1 \approx 0$. Das Voltmeter hat einen sehr grossen Widerstand, so fliesst praktisch kein Strom zwischen C und D, somit ist auch $I \approx 0$.

Das Amperemeter zeigt praktisch keine Stromstärke, und das Voltmeter zeigt ungefähr die Quellenspannung der Schaltung an: ein bisschen weniger als 230 V.

75

a)



b) $R = \frac{U_0 - U_L}{I}; \quad 2.7 \, \Omega$

c) $\eta = \frac{U_L}{U_0}; \quad 82 \, \%$

76

Der Widerstand R_1 der grossen Glühbirne beträgt nach Herstellerangaben:

$$R_1 = \frac{U^2}{P}; \quad 353 \, \Omega$$

Für die kleine Glühlampe gilt: $R_2 = 6.8 \, \Omega$

Der Gesamtwiderstand der in Reihe geschalteten Lampen ist: $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2$

Folglich fliesst durch beide Lampen eine Stromstärke von: $I = \frac{U}{R_{\text{tot}}}$

Über der grossen Glühbirne liegt eine Spannung von: $U_1 = R_1 I = R_1 \frac{U}{R_{\text{tot}}}$

Die Leistung der grossen Lampe ist demnach: $P_1 = U_1 I = R_1 \frac{U^2}{R_{\text{tot}}^2}; \quad 144 \, \text{W}$

Analog gilt für die kleine Glühbirne: $P_2 = R_2 \frac{U^2}{R_{\text{tot}}^2}; \quad 2.8 \, \text{W}$

77

a) Die Spannung wird 1:1 geteilt, also 6 V.

b) Die Spannung wird 2:1 geteilt, also 8 V.

c) $R = \frac{U^2}{P}; \quad 12 \, \Omega, \quad P_1 = \frac{U_1^2}{R} = 5.3 \, \text{W}$

(dies ist mehr als die erlaubten 3 W, das Lämpchen leuchtet also heller und wird bald durchbrennen),

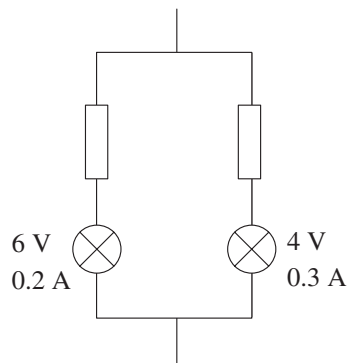
$$P_3 = P_4 = 1.3 \, \text{W}$$

(dies ist weniger als die erlaubten 3 W, diese Lämpchen leuchten einfach weniger hell).

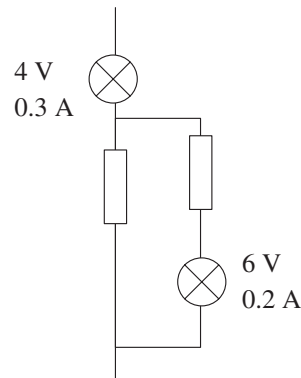
78

a)

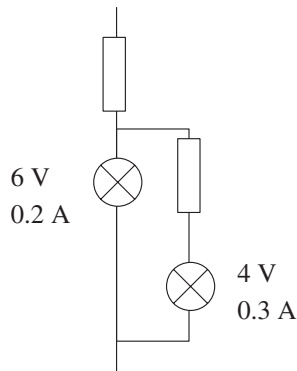
Schaltung 1



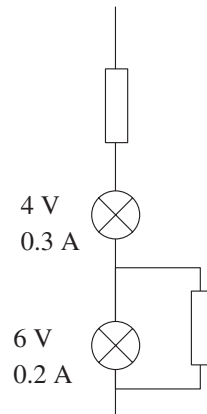
Schaltung 2



Schaltung 3



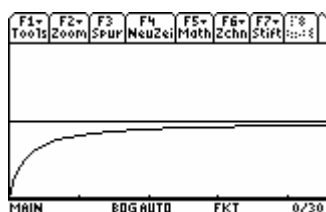
Schaltung 4



- b) Bei den Schaltungen 2 und 4 beträgt die Gesamtstromstärke 0.3 A, bei den anderen Schaltungen 0.5 A. Die Leistung ist also bei 2 und 4 am kleinsten.

79

a)
$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \left(\frac{1}{\frac{1}{x} + 1} \right) \text{ mit } x = \frac{R_2}{R_1}$$



Es wird die Funktion $f(x) = \frac{x}{1+x} = \frac{1}{\frac{1}{x} + 1}$ und $g(x) = 1$ dargestellt.

- b) Ist ein Widerstand der Parallelschaltung null, so ist der Ersatzwiderstand null. Dies entspricht einem Kurzschluss.
Ist ein Widerstand der Parallelschaltung unendlich (entspricht offenem Schalter!), so ist der Ersatzwiderstand gleich dem anderen.

80

a) $R_{1,2} = \frac{1}{2} \left(R_s \pm \sqrt{R_s^2 - 4R_p R_s} \right); \quad R_1 = 94.7 \, \Omega \text{ und } R_2 = 5.28 \, \Omega$

- b) Sei R_p der Parallelwiderstand und R_s der Seriewiderstand, dann folgt aus

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_p}, \text{ dass } R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \text{ d.h. } R_1 + R_2 \text{ muss } R_1 R_2 \text{ teilen.}$$

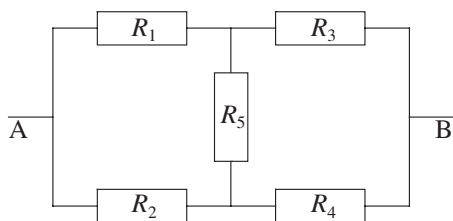
Dazu können Sie ein kleines Programm schreiben, das aus zwei Schleifen besteht. In der äusseren Schleife wird R_1 von 1 bis 150 hochgezählt und in der inneren R_2 von 1 bis 150, wobei jedes Mal die Teilbarkeit geprüft wird. Dann finden Sie unter anderen folgende Lösungen, die aber alle nicht sehr nahe an der Lösung a) sind.

- c)

R_1 in Ω	R_2 in Ω	R_p in Ω	R_s in Ω
72	9	8	81
90	10	9	100
110	11	10	121

81

Diese Schaltung heisst Brückenschaltung. Sie lässt sich mit den Kirchhoff'schen Sätzen vollständig verstehen.



82

- a)

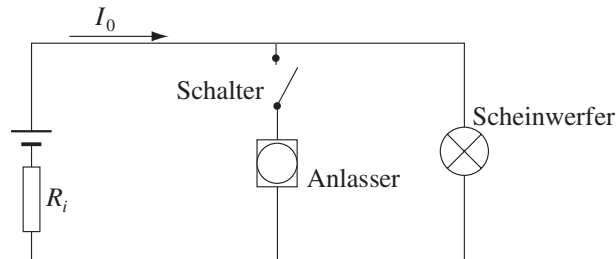
U_1 Batterie 1	U_2 Batterie 2	R_{total} bezüglich wirksamer Batterie	I_1	I_2	I_3
32 V	kurzgeschlossen	64 Ω	500 mA	– 400 mA	100 mA
kurzgeschlossen	30 V	60 Ω	– 375 mA	500 mA	125 mA
32 V	30 V	–	125 mA	100 mA	225 mA

- b) $U_3 = R_3 I_3; \quad 27 \text{ V}$

Innerer Widerstand

83

Beim Drehen des Zündschlüssels (= Schliessen des Schalters) steigt die Stromstärke I_0 stark an. Bedingt durch den Innenwiderstand der Batterie, führt dies zu einer starken Abnahme der Klemmenspannung.



84

$$U_K = U_0 - R_i I; \quad 11.8 \text{ V}, 10.2 \text{ V}$$

85

a) Die Batterie hat einen inneren Widerstand, der in Serie zum Lämpchen geschaltet ist. Wenn ein äusserer Widerstand R_a angeschlossen wird, ist die gemessene Klemmenspannung kleiner als die Quellenspannung U_0 .

b) $R_a = R_l = \frac{U_1}{I_1}; \quad 9.0 \, \Omega$

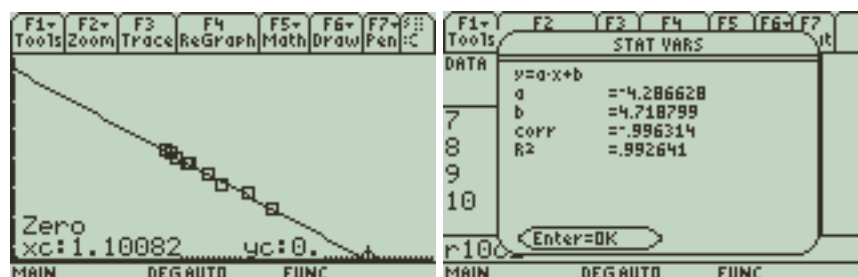
$$P_1 = U_1 I_1; \quad 1.44 \text{ W}$$

c) $R_i = \frac{U_0 - U_1}{I_1}; \quad 3.0 \, \Omega$

d) $I_2 = \frac{1}{2} \frac{U_0}{\left(\frac{1}{2} R_l + R_i\right)}; \quad 0.32 \text{ A};$

$$U_2 = R_l I_2; \quad 2.88 \text{ V}; \quad P_2 = U_2 I_2; \quad 0.92 \text{ W}$$

86

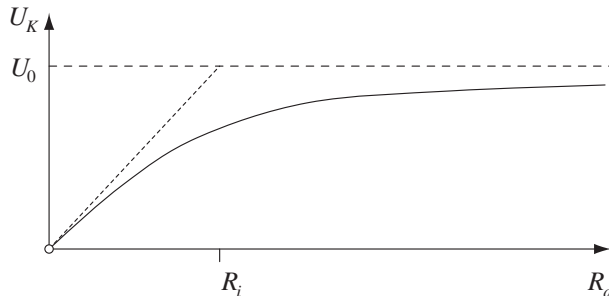


$$U_K = U_0 - R_i I \quad U_0 = 4.7 \text{ V}; \quad I_{\max} = 1.1 \text{ A und } R_i = 4.3 \, \Omega.$$

87

a) $U_K = R_a \cdot \left(\frac{U_0}{R_i + R_a} \right) \approx U_0 \cdot \left(1 - \frac{R_i}{R_a} \right)$, falls $R_a \gg R_i$; $\lim_{R_a \rightarrow \infty} U_K = U_0$.

b)



88

a) $P = UI$; ja

b) $R_i = \frac{U_0 - U_K}{I}$; 200Ω

c) Die Leistung wird maximal für $R = R_i$. Bei einem Verbraucherwiderstand von 200Ω wäre die Stromstärke $I = \frac{U_0}{R + R_i}$, die Leistung also $P = R \cdot \frac{U_0^2}{(R + R_i)^2}$; 0.17 W .

89

a) Vereinfachende Annahme: Der Lampenwiderstand ist unabhängig von der Stromstärke.

$$R_{\text{Birne}} = \frac{6 \text{ V}}{0.5 \text{ A}} = 12 \Omega$$

$$U_K = \frac{R_{\text{Birne}} \cdot 4 \cdot U_0}{R_{\text{Birne}} + 4 \cdot R_i}; \quad 5.1 \text{ V}$$

b) $P = \frac{U_K^2}{R_{\text{Birne}}}$; 2.2 W

90

a) $R = \frac{U_K}{I}$; 7.97Ω ; $R_1 = \frac{U_1 - U'_K}{I'}$; 1.96Ω

b) $I_1 = \frac{U_1 - U_K}{R_1}$; 35.7 mA ; $I_2 = I - I_1$; 146 mA ; $R_2 = \frac{U_2 - U_K}{I_2}$; 0.205Ω

c) Die beiden Batterien werden sehr verschieden belastet.
Zwischen den Batterien fliesst ein Ausgleichsstrom.

91

$$I = \frac{U_0}{R_i + R_a}; \quad 20 \text{ A, } 12 \text{ A und } 5.5 \text{ A}$$

$$U_K = U_0 - R_i I; \quad 40 \text{ V, } 48 \text{ V und } 55 \text{ V}$$

92

a) Die Spannung beträgt: $U = 5000 \cdot U_0 = 750 \text{ V}$

$$R_{\text{Reihe}} = 5000 \cdot R_0 = 1250 \text{ } \Omega$$

Die 140 Reihenwiderstände sind noch parallel geschaltet: $R_{\text{innen}} = \frac{R_{\text{Reihe}}}{140} = 8.9 \text{ } \Omega$

$$\text{Somit ist } I = \frac{U}{(R_{\text{ausser}} + R_{\text{innen}})}; \quad 0.93 \text{ A.}$$

b) Die Stromstärke in den einzelnen Elektrozyten ist 140-mal kleiner als die gesamte Stromstärke:

$$I_{\text{Reihe}} = \frac{I}{140}; \quad 6.6 \text{ mA}$$

Somit wird der Aal von seiner eigenen Stromquelle nicht getötet.

Spezifischer Widerstand

93

$$l = \frac{R \pi r^2}{\rho_{\text{el}}}; \quad 46 \text{ m}$$

94

Weil sein Volumen erhalten bleibt, muss seine Querschnittsfläche A auf ein Drittel zurückgehen. Wegen $R = \rho_{\text{el}} \frac{l}{A}$ verneunfacht sich sein Widerstand auf $18 \text{ } \Omega$.

95

$$\text{a) } U = R_i \frac{3}{4} I_{\text{max}}; \quad 3.8 \text{ V}$$

$$\text{b) } I = \frac{U}{R} = \frac{UA}{\rho_{\text{el}} l}; \quad 6.2 \text{ A}$$

96

$$\text{a) } P = \frac{cm \Delta \vartheta}{\Delta t}; \quad 1.0 \text{ kW}$$

$$\text{b) } I = \frac{P}{U}; \quad 4.4 \text{ A}$$

$$\text{c) } A = \frac{\rho_{\text{el}} l P}{U^2}; \quad 4.3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$$

97

a) $R_{\text{Kabel}} = \rho_{\text{el}} \frac{2l}{A}; \quad 0.68 \, \Omega$

b) $U = U_0 - \frac{R_{\text{Kabel}} U_0}{R_{\text{Kabel}} + R_{\text{Motor}}}, \text{ wobei } R_{\text{Motor}} = \frac{U_0^2}{P_0}; \quad 225 \, \text{V}$

c) $P_1 = \frac{U^2}{R_{\text{Motor}}}; \quad 1.8 \, \text{kW}$

d) $P_{\text{Kabel}} = \frac{(U_0 - U)^2}{R_{\text{Kabel}}}; \quad 44 \, \text{W}$

98

a) $l_{\text{Draht}} = 11.55 \, \text{m}; \quad d = \frac{\rho_{\text{el}} P l_{\text{Draht}}}{b U^2}; \quad 0.22 \, \text{mm}$

b) $R_{\text{Draht}} = \rho_{\text{el}} \frac{l_{\text{Draht}}}{db}; \quad P = \frac{U_0^2 R_{\text{Draht}}}{(R_i + R_{\text{Draht}})^2}; \quad 92 \, \text{W}$

c) $I_{\text{Draht}} R_{\text{Draht}} = U_0 - R_i (I_{\text{Draht}} + I_{\text{Anlasser}}); \quad I_{\text{Draht}} = 4.0 \, \text{A}; \quad P = 23 \, \text{W}$

99

a) $R = \rho_{\text{el,Cu}} \frac{4l}{\pi d_{\text{Cu}}^2}; \quad 3.6 \, \Omega \text{ und } m = \rho_{\text{Cu}} \frac{\pi d_{\text{Cu}}^2}{4} l; \quad 1.5 \, \text{t}$

b) $d_{\text{Al}} = d_{\text{Cu}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{el,Al}}}{\rho_{\text{el,Cu}}}}; \quad 7.5 \, \text{mm}, \quad m = \rho_{\text{Al}} \frac{\pi d_{\text{Al}}^2}{4} l; \quad 0.71 \, \text{t}$

100

a) Widerstand eines Seils zwischen den Kreuzungsmasten: $34 \, \text{m}\Omega$;
 $P_V = I^2 R_{\text{Seil}} \cdot 6; \quad 810 \, \text{kW}$

b) $d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}; \quad 51 \, \text{mm}; \quad \text{effektiv ist der Durchmesser grösser, da } 2027 \, \text{mm}^2 \text{ den reinen Materialquerschnitt angibt.}$

c) $\rho_{\text{el}} = R \frac{A}{l}; \quad 3.6 \cdot 10^{-8} \, \Omega\text{m}$

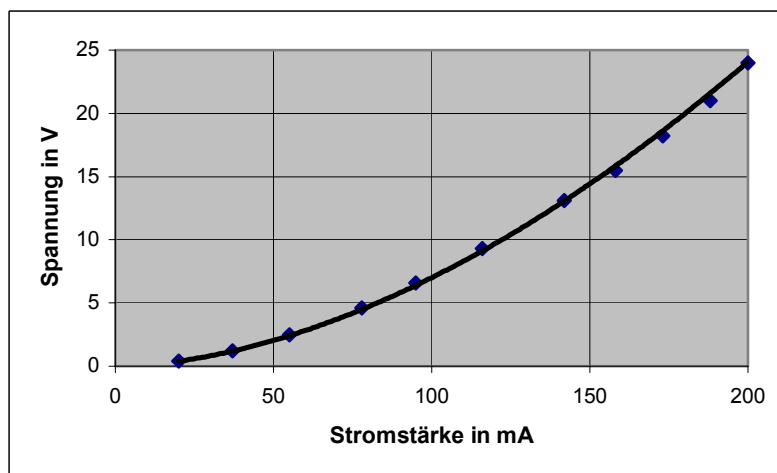
101

- a) Aus $U = RI$ und $R = \rho_{\text{el}} \frac{l}{A}$ und $m = \rho A l$ folgt $l = \sqrt{\frac{mU}{I\rho_{\text{el}}\rho}}$; 1.43 km
- b) $\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right)$; 0.081 = 8.1%, also $l = 1.43 \text{ km} \pm 0.12 \text{ km}$

Temperaturabhängiger Widerstand

102

- a) $R = \frac{U}{I}$; 120 Ω . Der Widerstand von Metallen nimmt mit steigender Temperatur zu. Der Draht der Lampe im Betrieb mit 24 V ist offensichtlich sehr heiss (>2000 $^{\circ}\text{C}$), sonst würde er nicht so hell mit weissem Licht glühen.
- b)

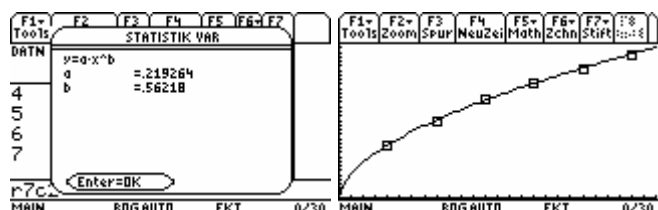


- c) An jeder Lampe liegt eine Spannung von $(230/16) \text{ V} = 14.4 \text{ V}$. Bei dieser Spannung beträgt die Stromstärke gemäss Diagramm 150 mA. Das ist auch die Stromstärke für die Reihenschaltung. Der Gesamtwiderstand beträgt $(230 \text{ V}/0.15 \text{ A}) = 1.53 \text{ k}\Omega$.

103

- a) $6 \text{ V} \cdot 0.6 \text{ A} = 3.6 \text{ W}$
Also «6 V/3.6 W» ist die korrekte Lampeninschrift.

b)



$b = 0.56$

c) Aus $P = UI \propto T^4$ und $R = \frac{U}{I} \propto T$ folgt $I \propto U^{\frac{3}{5}}$

$b = 0.60$

d) $R = \frac{U}{I} \propto \frac{U}{U^{\frac{3}{5}}} = U^{\frac{2}{5}}$

e) Aus d) folgt mit $R \propto T$: $T = T_0 \frac{R}{R_0}$, $T_0 = 353 \text{ K}$, $R_0 = 1.0 \Omega$

U in V	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
I in A	0.22	0.32	0.41	0.48	0.54	0.60
R in Ω	4.5	6.3	7.3	8.3	9.3	10
T in K	$1.6 \cdot 10^3$	$2.2 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^3$	$3.3 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^3$

104

Es handelt sich um Kennlinien bei unterschiedlicher, aber jeweils konstanter Temperatur. Bei 1 ist der Widerstand kleiner und die Temperatur tiefer als bei 2.

105

Bei 1 nimmt der Quotient U/I mit zunehmender Spannung ab. Das bedeutet, dass der Ohm'sche Widerstand mit zunehmender Temperatur abnimmt. 1 ist also die Kennlinie des NTC-Widerstandes, 2 die des PTC-Widerstandes.

106

Nach Einstellung einer Spannung nimmt die Stromstärke zu, weil sich der Widerstand aufheizt und daher besser leitet. Bei den ersten Messungen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der elektrischen Leistung $P_{\text{zu}} = UI$ und der durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung abgegebenen Leistung $P_{\text{ab}} = Q/t$ ein. Dadurch wird auch die Temperatur stabil und die Stromstärke steigt nicht weiter. Bei der letzten Messung nimmt über längere Zeit die Stromstärke und damit die elektrische Leistung schneller zu als die abgegebene Wärmeleistung. Bevor sich ein neues Gleichgewicht einstellen kann, ist eine Temperatur erreicht, bei der der Widerstand schmilzt.

107

Die Spannung U_0 der Spannungsquelle wird in der Serienschaltung aufgeteilt:

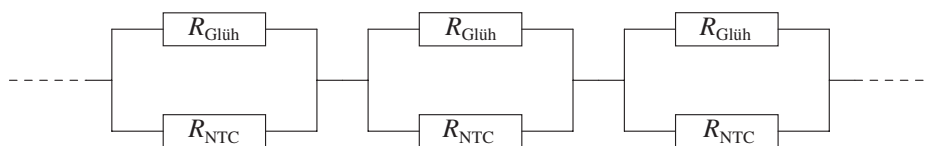
$$U_0 = U_{\text{NTC}} + U_{\text{Lampe}}$$

Die Teilspannungen sind proportional zu den Widerständen: $\frac{U_{\text{NTC}}}{R_{\text{NTC}}} = \frac{U_{\text{Lampe}}}{R_{\text{Lampe}}}$

Wenn nach dem Einschalten die Temperatur der beiden Widerstände durch die elektrische Energiezufuhr steigt, nimmt R_{NTC} ab und R_{Lampe} zu. Somit nimmt auch U_{NTC} ab und U_{Lampe} zu. Die Stromstärke in der Reihenschaltung kann sich auch verändern. Aber offensichtlich nimmt sie kaum ab, sondern eher zu, so dass die Leistung der Lampe $P = U_{\text{Lampe}} I$ mit steigender Temperatur zunimmt.

108

a)



- b) Der NTC-Widerstand darf sich nicht stark aufheizen und der Strom, der durch ihn fliesst, trägt nicht zur gewünschten Lichtproduktion bei. Im kalten Zustand hat der Glühdraht einen viel kleineren Widerstand als der NTC-Widerstand. Dadurch fliesst bei gleicher Spannung mehr Strom durch den Glühdraht. Die Leistung ist für den Glühdraht höher, und er wird so heiss, dass er glüht. Aber auch dann ist sein Widerstand immer noch deutlich kleiner als der des NTC-Widerstandes.
- c) Wenn ein Glühdraht durchbrennt, hat der verbleibende, kalte NTC-Widerstand einen viel grösseren Widerstandswert als die übrigen, intakten Lampen. In der Reihenschaltung entfällt also auf ihn ein grosser Teil der Netzspannung. Dadurch heizt er sich auf, und sein Widerstandswert geht zurück. Parallel dazu geht auch die Teilspannung, die auf ihn entfällt, zurück. Im Vergleich zu a) ist die Teilspannung an der (defekten) Lampe und die Stromstärke wieder etwa gleich gross. Der NTC-Widerstand ist heisser, aber nicht so heiss, dass er glüht.
- d) Offensichtlich kann es vorkommen, dass die in c) beschriebenen Vorgänge zu einer grösseren Stromstärke in der Serienschaltung führen. Das geschieht, wenn der Widerstand des heissen NTC-Widerstandes in einer defekten Lampe kleiner als der Gesamtwiderstand einer intakten Lampe ist. Bei mehreren durchgebrannten Lampen kann es so zu einer Überhitzung der übrigen Lampen kommen, die dann auch durchbrennen. Schliesslich kann es zu einer Überhitzung der Zuleitungen und Verbindungsdrähte mit Brandgefahr kommen.