4.8.2 Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung **Bild 1** liegt an allen Widerständen dieselbe Spannung. Der Ersatzleitwert ist gleich der Summe der Teilleitwerte. Weil R der Ersatzwiderstand für die Parallelschaltung von R_1, R_2 und R_3 ist, schreibt man auch $R = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$.

Beispiel 1: Gesamtwiderstand berechnen

Die Widerstände $R_1 = 2{,}5\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 4\ \text{k}\Omega$ und $R_3 = 5\ \text{k}\Omega$ sind parallel geschaltet. Berechnen Sie den Ersatzwiderstand der Schaltung.

Lösung:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2{,}5\ \text{k}\Omega} = 0{,}4\ \text{mS}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4\ \text{k}\Omega} = 0{,}25\ \text{mS}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{5\ \text{k}\Omega} = 0{,}2\ \text{mS}$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$
$$= 0{,}4\ \text{mS} + 0{,}25\ \text{mS} + 0{,}2\ \text{mS} = 0{,}85\ \text{mS}$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{0{,}85\ \text{mS}} = \mathbf{1{,}18\ k\Omega}$$

Beispiel 2: Teilwiderstand berechnen

Einem Widerstand $R_1 = 100\ \Omega$ soll ein Widerstand R_2 so parallel geschaltet werden, dass sich ein Ersatzwiderstand $R = 80\ \Omega$ ergibt.

Lösung:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{100\ \Omega} = 10\ \text{mS}$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{80\ \Omega} = 12{,}5\ \text{mS}$$

$$G = G_1 + G_2$$

$$\Rightarrow G_2 = G - G_1 = 12{,}5\ \text{mS} - 10\ \text{mS} = 2{,}5\ \text{mS}$$

$$R_2 = \frac{1}{G_2} = \frac{1}{2{,}5\ \text{mS}} = \mathbf{400\ \Omega}$$

Aufgaben zu 4.8.2

1. Eine Parallelschaltung enthält die Leitwerte mit $G_1 = 2$ S, $G_2 = 5$ S und $G_3 = 8$ S. Berechnen Sie den Widerstand R der Schaltung.
2. Sechs gleiche Widerstände mit je 30 Ω sind parallel geschaltet. Berechnen Sie a) Ersatzwiderstand, b) Ersatzleitwert.

$$I = I_1 + I_2 + \ldots \qquad G = G_1 + G_2 + \ldots$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Bei 2 Widerständen:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Bei n gleichen Widerständen:

$$R = \frac{R_1}{n}$$

I	Gesamtstromstärke	$\parallel$	Zeichen für parallel
G	Ersatzleitwert	$I_1, I_2, \ldots$	Teilstromstärken
R	Ersatzwiderstand	$G_1, G_2, \ldots$	Teilleitwerte
U	Spannung	$R_1, R_2, \ldots$	Teilwiderstände
n	Anzahl der gleichen Widerstände		

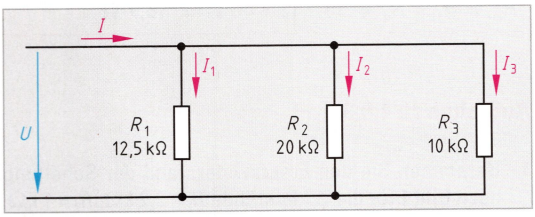

Bild 1: Parallelschaltung

3. Der Leitwert einer Schaltung soll von 20 S auf 25 S erhöht werden. Welcher Widerstand R_2 muss parallel geschaltet werden?
4. Vier gleiche Widerstände R_1 sind parallel an die Spannung $U = 25$ V angeschlossen. Das Abtrennen eines Widerstandes verringert den Gesamtstrom um 40 mA. Berechnen Sie a) Leitwert G_1 eines Einzelwiderstandes, b) Ersatzwiderstand R der ursprünglichen Schaltung.
5. Berechnen Sie in Schaltung **Bild 1** für $U = 50$ V a) kleinsten Teilstrom, b) Ersatzwiderstand der Schaltung.
6. Die Widerstände $R_1 = 800\ \Omega$, $R_2 = 1\ \text{k}\Omega$ und $R_3 = 250\ \Omega$ sind parallel geschaltet und führen einen Gesamtstrom von 13,5 mA. An welcher Spannung liegt die Schaltung?
7. Die Widerstände $R_1 = 16\ \Omega$ und $R_2 = 60\ \Omega$ sind parallel geschaltet und haben je 1 W Bemessungsleistung. Zu berechnen sind a) Widerstand der Parallelschaltung, b) höchstzulässige Spannung U.
8. Die Parallelschaltung $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 16\ \text{k}\Omega$, $R_3 = 25\ \text{k}\Omega$ und $R_4 = 40\ \text{k}\Omega$ besteht aus Widerständen von 0,25 W Bemessungsleistung. Welche Spannung darf höchstens angelegt werden?

vel.plus/ MELGS17

4.8.3 Gemischte Schaltungen

vel.plus/ MELGS18

Gemischte Schaltungen setzen sich aus Reihenschaltungen und Parallelschaltungen zusammen. Zur Berechnung des Ersatzwiderstandes der Schaltung werden schrittweise Ersatzwiderstände gesetzt anstelle von Schaltungsteilen, die zwei Anschlüsse haben **(Bild 1)**.

Beispiel 1: Ersatzwiderstand berechnen

Berechnen Sie den Ersatzwiderstand der Schaltung nach **Bild 1** für die Widerstände

$R_1 = 15\,\Omega$, $R_2 = 10\,\Omega$, $R_3 = 50\,\Omega$ und $R_4 = 40\,\Omega$

Lösung:

$$R_{\mathrm{I}} = R_1 + R_2 = 15\,\Omega + 10\,\Omega = 25\,\Omega$$

$$R_{\mathrm{II}} = \frac{R_{\mathrm{I}} \cdot R_3}{R_{\mathrm{I}} + R_3} = \frac{25\,\Omega \cdot 50\,\Omega}{25\,\Omega + 50\,\Omega} = 16{,}7\,\Omega$$

$$R_{\mathrm{E}} = R_{\mathrm{II}} + R_4 = 16{,}7\,\Omega + 40\,\Omega = \mathbf{56{,}7\,\Omega}$$

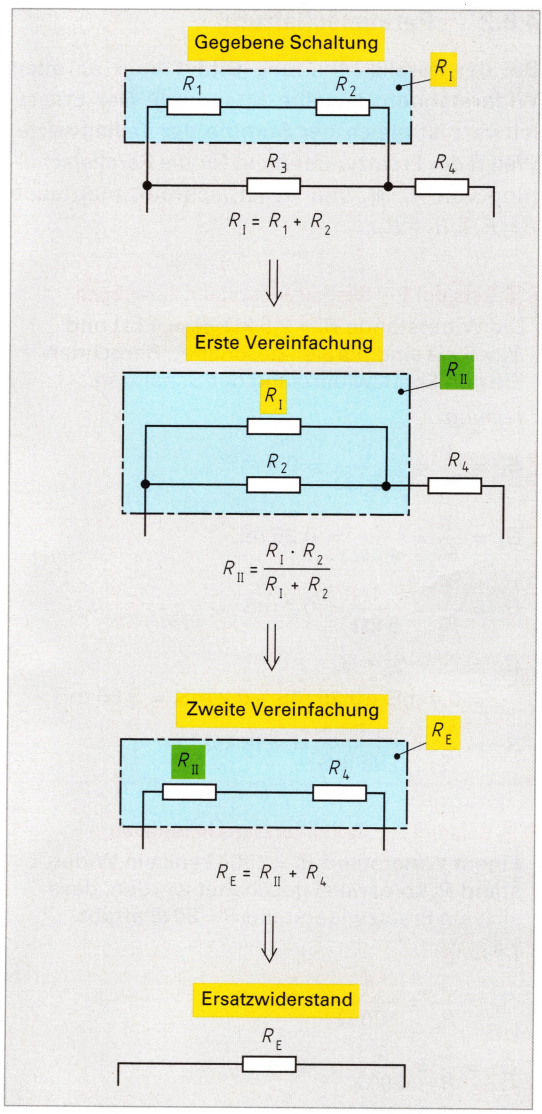

Bild 1: Auflösung einer gemischten Schaltung

Aufgaben zu 4.8.3

1. Berechnen Sie den Ersatzwiderstand der Schaltung nach **Bild 1** für die Widerstände $R_1 = 2{,}2\,\mathrm{k\Omega}$, $R_2 = 1\,\mathrm{k\Omega}$, $R_3 = 4{,}7\,\mathrm{k\Omega}$ und $R_4 = 2{,}7\,\mathrm{k\Omega}$.

2. Zur Parallelschaltung der Widerstände $R_1 = 125\,\mathrm{k\Omega}$ und $R_2 = 500\,\mathrm{k\Omega}$ ist ein Widerstand $R_3 = 1{,}25\,\mathrm{M\Omega}$ in Reihe geschaltet. Berechnen Sie den Ersatzwiderstand R der Schaltung.

3. Der Reihenschaltung der Widerstände $R_1 = 680\,\Omega$ und $R_2 = 470\,\Omega$ liegt ein Widerstand $R_3 = 150\,\Omega$ parallel. Berechnen Sie den Ersatzwiderstand R der Schaltung.

4. Mit der Messschaltung **Bild 2** wird der Widerstand R_x bestimmt. Man misst $U = 1{,}2\,\mathrm{V}$ und $I = 0{,}065\,\mathrm{mA}$. Der Widerstand R_V des Spannungsmessers beträgt $250\,\mathrm{k\Omega}$. Berechnen Sie den Widerstand R_x.

Die Stromfehlerschaltung verwendet man zur Bestimmung kleiner Widerstände.

5. Mit der Messschaltung **Bild 3** wird der Widerstand R_y bestimmt. Man misst $I = 0{,}40\,\mathrm{mA}$ und $U = 2{,}44\,\mathrm{V}$. Der Widerstand R_A des Strommessers beträgt $100\,\Omega$. Berechnen Sie den Widerstand R_y.

Die Spannungsfehlerschaltung verwendet man zur Bestimmung großer Widerstände.

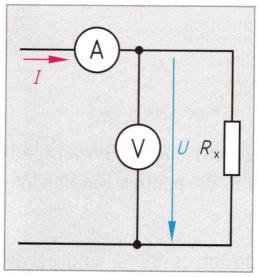

Bild 2: Stromfehlerschaltung

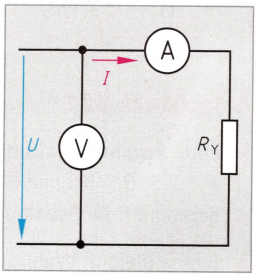

Bild 3: Spannungsfehlerschaltung

6. In Schaltung **Bild 1** erhält der Widerstand R_1 eine Leistung von 2,4 W. Berechnen Sie alle unbekannten Spannungen, alle Ströme und den Widerstand R_3 der Schaltung.

7. In Schaltung **Bild 2** erhält der Widerstand R_4 eine Leistung von 1,6 W. Berechnen Sie alle unbekannten Ströme, alle Spannungen sowie die Widerstände R_1 und R_2 der Schaltung.

8. Parallel zur Reihenschaltung der Widerstände $R_1 = 100\ \Omega$ und $R_2 = 250\ \Omega$ liegt eine zweite Reihenschaltung mit den Widerständen $R_3 = 300\ \Omega$ und $R_4 = 400\ \Omega$. Die Schaltung liegt an der Spannung $U = 280$ V. Berechnen Sie die Leistung jedes Einzelwiderstandes.

9. In Reihe zur Parallelschaltung der Widerstände $R_1 = 200\ \Omega$ und $R_2 = 400\ \Omega$ liegt eine zweite Parallelschaltung mit den Widerständen $R_3 = 500\ \Omega$ und $R_4 = 250\ \Omega$. Die ganze Schaltung liegt an der Spannung $U = 90$ V. Berechnen Sie die Totalleistung (Gesamtleistung).

10. Falls in der Schaltung **Bild 3** der Schalter S1 geschlossen und der Schalter S2 geöffnet ist, erhält der Widerstand R_1 seine Bemessungsleistung, wenn an der Schaltung die Spannung $U_{b1} = 100$ V liegt. Welche Spannung U_{b2} muss an der Schaltung liegen, damit der Widerstand R_1 seine Bemessungsleistung erhält, wenn beide Schalter geschlossen sind?

11. Falls in der Schaltung **Bild 4** der Schalter in Stellung 1 steht, erhält der Widerstand R_1 seine Bemessungsleistung, wenn in die Schaltung der Strom $I_{b1} = 1{,}2$ A fließt. Welcher Strom I_{b2} muss in die Schaltung fließen, damit der Widerstand R_1 seine Nennleistung erhält, wenn der Schalter nach Stellung 2 gelegt ist?

12. Die Schaltung **Bild 5** enthält die Widerstände $R_1 = 1$ kΩ, $R_2 = 10$ kΩ, $R_3 = 1{,}5$ kΩ, $R_4 = 100\ \Omega$, $R_5 = 220\ \Omega$ und $R_6 = 1$ kΩ. Zu berechnen ist die Spannung U_x.

13. Die Schaltung **Bild 5** enthält die Widerstände $R_1 = 15$ kΩ, $R_2 = 10$ kΩ, $R_3 = 10$ kΩ, $R_4 = 1$ kΩ, $R_5 = 1{,}5$ kΩ und $R_6 = 680\ \Omega$. Zu berechnen ist das Verhältnis U_1/U_4.

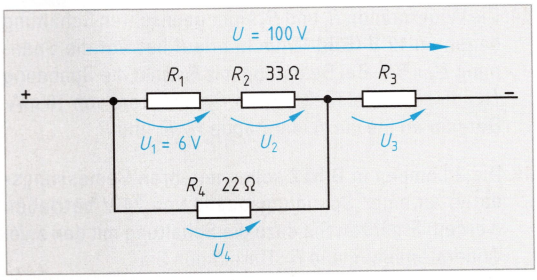

Bild 1: Gemischte Schaltung

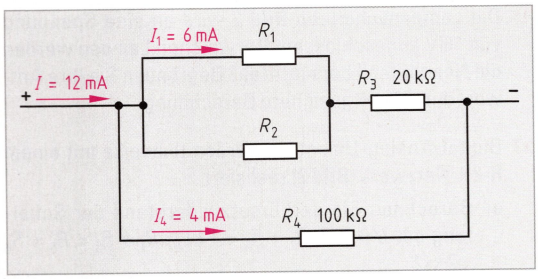

Bild 2: Gemischte Schaltung

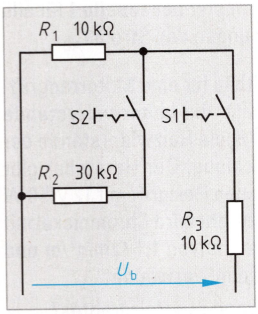

Bild 3: Gemischte Schaltung mit zwei Schließern

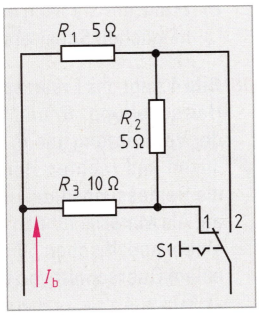

Bild 4: Schaltung für unterschiedliche Belastung

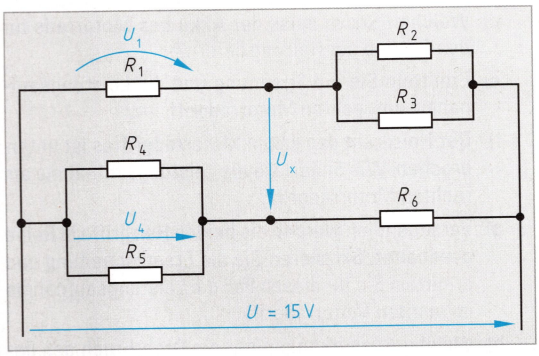

Bild 5: Gemischte Schaltung

14. Die Widerstände R_1 und R_2 einer gemischten Schaltung liegen an 12 V **(Bild 1)**. Im Leerlauf beträgt die Spannung $U_2 = 5$ V. Bei Belastung mit R_L sinkt die Spannung U_2 auf 3 V, dabei fließt durch R_2 ein Strom von 10 mA. Berechnen Sie die Widerstände R_1, R_2 und R_L.

15. Die 3 Lampen in **Bild 2** sollen mit ihren Bemessungsdaten an einer Spannungsquelle von 24 V betrieben werden. Ergänzen Sie dazu die Schaltung mit den zwei Widerständen R_1 und R_2. Berechnen Sie

a) die Widerstandswerte und

b) die Leistungen der einzubauenden Widerstände.

16. Die Lampenschaltung **Bild 2** wird an eine Spannung von 18 V angeschlossen. Bei welchen Lampen werden die Nenndaten überschritten? Begründen Sie Ihre Antwort durch eine geeignete Berechnung.

17. Digital-Analog-Umsetzer werden teilweise mit einem R-2R-Netzwerk **(Bild 3)** realisiert.

a) Berechnen Sie den Ersatzwiderstand der Schaltung mit $U = 5$ V, $R_2 = R_4 = 1$ kΩ, $R_1 = R_3 = R_5 = R_6 = 2$ kΩ.

b) Berechnen Sie den Gesamtstrom I_{AB} der Schaltung.

c) Berechnen Sie alle Teilströme der Schaltung.

d) Ermitteln Sie nach dem Muster der **Tabelle 1** für alle möglichen Schalterstellungen den Strom I_{AB}.

18. **Bild 4** zeigt das Ersatzschaltbild für eine Motorradgriff-Heizschaltung. R_1 und R_2 sind die Leiterwiderstände der Verdrahtung und R_r und R_l die Heizwiderstände der linken und rechten Heizwicklung. Der Hersteller gibt die Bemessungsdaten für einen Heizgriff mit 12 V/50 W an. Als Material für den Heizdraht wird Chromnickel mit einem spezifischen Widerstand von 1,1 $\Omega mm^2/m$ und einem Querschnitt von 0,45 mm^2 verwendet.

a) Wie groß ist der Widerstand des Heizdrahtes?

b) Berechnen Sie die Länge des Heizgriffdrahtes.

c) Ermitteln Sie den Ersatzwiderstand der Motorradgriff-Heizschaltung. Für die Leiterwiderstände sind $R = 0{,}12\ \Omega$ und $R_2 = 0{,}08\ \Omega$ anzunehmen.

d) Welchen Strom muss der Akku des Motorrads für den Betrieb der Heizung liefern?

e) Ermitteln Sie die Spannung und die Leistungsaufnahme am rechten Motorradgriff.

f) Der Heizdraht des linken Motorradgriffes ist unterbrochen. Wie ändert sie die Leistungsaufnahme am rechten Motorradgriff?

g) Versehentlich wurden die beiden Heizgriffe in Reihe geschaltet. Skizzieren Sie die Ersatzschaltung und ermitteln Sie für diesen Fall die Leistungsaufnahme im rechten Motorradgriff.

h) Welche Auswirkungen hat ein Drahtbruch des linken Heizdrahtes im Falle der Reihenschaltung?

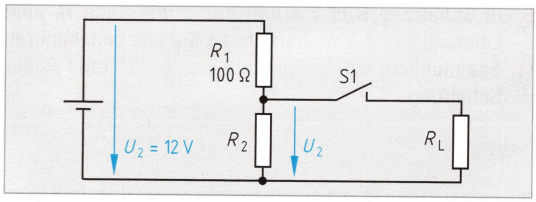

Bild 1: Gemischte Schaltung

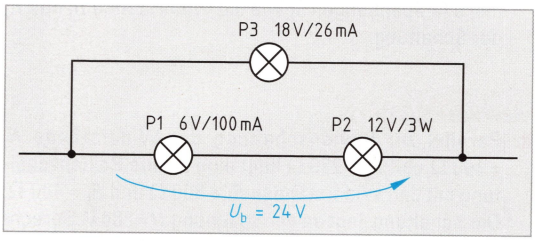

Bild 2: Lampenschaltung

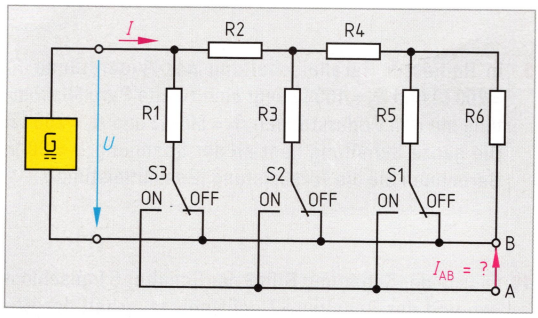

Bild 3: R-2R-Netzwerk

Tabelle 1: Strom I_{AB} OFF: S = 0; ON: S = 1

S1	S2	S3	I_{AB}

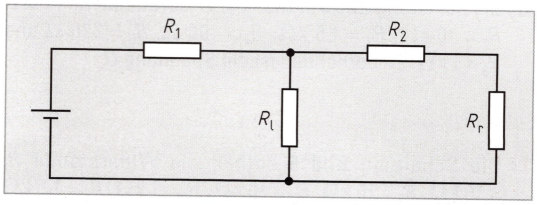

Bild 4: Ersatzschaltung Motorradgriff-Heizschaltung

4.8.4 Spannungsteiler

Unbelasteter Spannungsteiler

Der unbelastete Spannungsteiler ist eine Reihenschaltung von zwei Widerständen **(Bild 1)**. Über die Widerstandsverhältnisse lassen sich die Spannungen berechnen.

Belasteter Spannungsteiler

Der belastete Spannungsteiler ist eine gemischte Schaltung von drei Widerständen **(Bild 2)**.

Die Lastspannung U_L ist umso stabiler, je größer der Querstrom I_q gegenüber dem Laststrom I_L ist. In der Praxis spricht man ab $\boldsymbol{q > 5}$ von einer stabilen Lastspannung.

$$\frac{U_{20}}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad \frac{R_1}{R_2} = \frac{U}{U_{20}} - 1$$

U_{20} Teilspannung unbelastet (sprich U-zwei-null)
U Gesamtspannung
R_1, R_2 Teilwiderstände

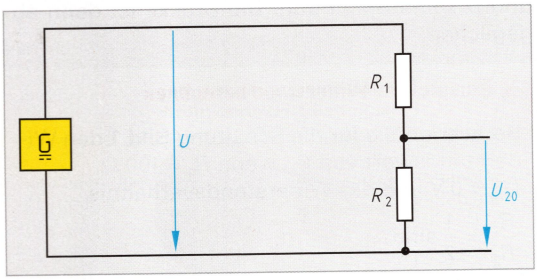

Bild 1: Unbelasteter Spannungsteiler

$$q = \frac{I_q}{I_L} \qquad q > 5$$

$$\frac{U_L}{U} = \frac{R_{2L}}{R_1 + R_{2L}} \qquad R_{2L} = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

U_L Lastspannung
U Gesamtspannung
R_1, R_2 Teilwiderstände
R_L Lastwiderstand
R_{2L} Ersatzwiderstand aus R_2 und R_L
I_L Laststrom
I_q Querstrom
q Querstromverhältnis

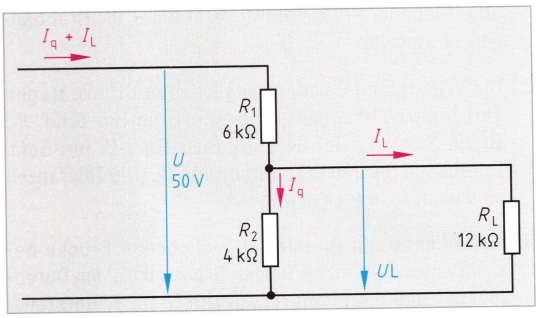

Bild 2: Belasteter Spannungsteiler

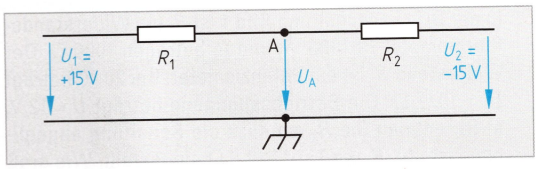

Bild 3: Bipolarer unbelasteter Spannungsteiler

Aufgaben zu 4.8.4

1. Ein unbelasteter Spannungsteiler liegt an 100 V. Sein Widerstand R_2 hat 100 Ω, und sein Widerstand R_1 ist veränderbar. Berechnen Sie die Spannung an R_2 für a) $R_1 = 0\,\Omega$, b) $R_1 = 50\,\Omega$, c) $R_1 = 100\,\Omega$, d) $R_1 = 200\,\Omega$.

2. Ein Widerstand ist an 24 V angeschlossen. Sein verstellbarer Abgriff teilt den Gesamtwiderstand von 10 kΩ in die Teilwiderstände R_1 und R_2. a) Berechnen Sie die Ausgangsspannungen U_{21} bis U_{25} für die Abgriffstellungen $R_{21} = 0\,\Omega$, $R_{22} = 2{,}5\,\text{k}\Omega$, $R_{23} = 5\,\text{k}\Omega$, $R_{24} = 7{,}5\,\text{k}\Omega$, $R_{25} = 10\,\text{k}\Omega$. b) Zeichnen Sie mit den Ergebnissen von a) ein Schaubild, das zeigt, wie die Ausgangsspannung von der Abgriffstellung abhängt.

3. Ein 16-kΩ-Widerstand mit verstellbarem Abgriff ist an 56 V angeschlossen und mit 4 kΩ belastet. a) Berechnen Sie die Ausgangsspannung für die Abgriffstellungen $R_{21} = 0\,\Omega$, $R_{22} = 4\,\text{k}\Omega$, $R_{23} = 8\,\text{k}\Omega$, $R_{24} = 12\,\text{k}\Omega$, $R_{25} = 16\,\text{k}\Omega$. b) Tragen Sie die Ergebnisse von a) in einem Schaubild ein, das die Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Abgriffstellung zeigt. c) Ergänzen Sie das Schaubild durch die Kennlinie für unbelasteten Ausgang. d) Wo ist die Ausgangsspannung am meisten absolut und relativ lastabhängig?

4. Berechnen Sie vom Spannungsteiler **Bild 2** die Lastspannung und den Laststrom für a) Leerlauf, b) Nennlast mit R_L, c) Kurzschluss. d) Tragen Sie die Ergebnisse von a), b) und c) in einem Schaubild ein, das die Abhängigkeit der Lastspannung von der Höhe des Laststromes zeigt.

5. Zwischen den Spannungen für $U_1 = +15$ V und $U_2 = -15$ V bilden zwei Widerstände einen bipolaren Spannungsteiler **(Bild 3)**. Berechnen Sie die Spannung U_A, wenn a) $R_1 = 10\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\,\text{k}\Omega$, b) $R_1 = 33\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 47\,\text{k}\Omega$, c) $R_1 = 820\,\Omega$, $R_2 = 180\,\Omega$.

vel.plus/ MELGS 19

4.9 Brückenschaltungen

Eine Brückenschaltung **(Bild 1)** besteht aus der Parallelschaltung zweier Spannungsteiler. Teilt der Spannungsteiler aus R_1 und R_2 die zwischen den Punkten A und B angelegte Spannung im gleichen Verhältnis wie der Spannungsteiler aus R_3 und R_4, so besteht zwischen den Punkten C und D keine Spannung. Die Brücke ist dann abgeglichen.

Beispiel 1: Widerstand berechnen

Berechnen Sie für die Schaltung **Bild 1** den Widerstandswert von R_3, wenn $R_4 = 100\ \Omega$, $U_{Br} = 0$ V und das Widerstandsverhältnis $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2}$ sind.

Lösung:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \Rightarrow R_3 = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 = \frac{1}{2} \cdot 100\ \Omega = \mathbf{50\ \Omega}$$

Allgemein:

$$U_{Br} = U_2 - U_4$$

Bei abgeglichener Brücke:

$$U_{Br} = 0\,\text{V} \qquad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Bei nicht abgeglichener Brücke:

$$U_{Br} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

U_{Br} Brückenspannung
U_2, U_4 Teilspannungen
R_1, R_2, R_3, R_4 Brückenwiderstände

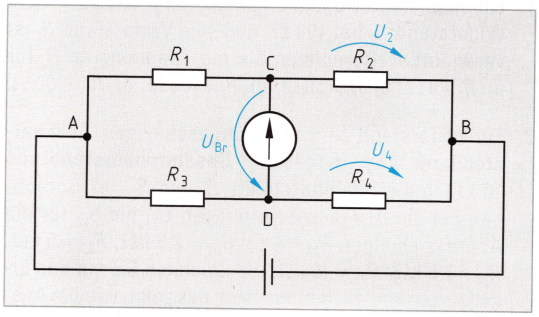

Bild 1: Brückenschaltung

Aufgaben zu 4.9

1. Der Spannungsteiler R_1 und R_2 besteht aus einem 10-kΩ-Widerstand mit verschiebbarem Abgriff. Dieser ist bei Abgleich auf $R_1 = 3$ kΩ eingestellt. R_4 beträgt 680 Ω. Wie groß ist R_3?

2. Der Spannungsteiler R_1 und R_2 besteht aus einem 1000 mm langen Widerstandsdraht von 0,275 mm Durchmesser. Der andere Spannungsteiler besteht aus dem Präzisionswiderstand $R_3 = 100{,}0\ \Omega$ und dem zu bestimmenden Widerstand R_4. Wie groß ist R_4, wenn bei abgeglichener Brücke der Widerstand R_1 die Drahtlänge 221,5 mm hat?

3. Die Widerstände einer abgeglichenen Brücke tragen Farbkennzeichnungen: R_1: Braun-Grün-Rot-Gold; R_3: Braun-Schwarz-Rot-Gold; R_4: Blau-Grau-Braun-Gold. Berechnen Sie den Widerstand von R_2. (Die Toleranzen sind nicht zu berücksichtigen.)

4. Der Widerstand R_2 einer abgeglichenen Brücke besteht aus einem 7,85 m langen Draht mit 0,1 mm Durchmesser und 0,4 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ spezifischem Widerstand. Das Verhältnis $R_3 : R_4$ ist 0,45. Wie groß ist R_1?

5. In der Brückenschaltung **Bild 1** ist R_2 ein Widerstandsthermometer Pt 1000. R_1 und R_4 betragen 1000 Ω. Der Widerstand R_3 ist ein Potenziometer. Bei 20 °C beträgt $R_2 = 1077\ \Omega$. Die Betriebsspannung beträgt $U = 12$ V. a) Berechnen Sie R_3, so dass die Schaltung abgeglichen ist. b) R_3 wird auf 928,5 Ω eingestellt. Wie groß ist die Brückenspannung bei 40 °C ($R_2 = 1154\ \Omega$)?

6. In einer Brückenschaltung **(Bild 1)** ist R_1 ein Dehnungsmessstreifen DMS mit Bemessungswiderstand 350 Ω. Der Widerstand eines DMS wird durch Dehnung erhöht, durch Stauchung vermindert. Die anderen Widerstände haben den festen Wert 350 Ω. Die Betriebsspannung beträgt $U = 5$ V. Berechnen Sie die Brückenspannung, wenn a) der DMS gedehnt wird, R_1 ändert sich um 1 Ω, b) der DMS gestaucht wird, R_1 ändert sich um 0,5 Ω, c) zusätzlich auch R_4 als DMS gewählt wird, dabei erhöhen sich R_1 und R_4 um je 0,5%.

7. Die Widerstände mit $R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 50\ \Omega$, $R_3 = 100\ \Omega$ und $R_4 = 1$ kΩ bilden eine Brückenschaltung **(Bild 1)**. Welcher Widerstand R_x muss zu jedem der Widerstände R_3 und R_4 in Reihe geschaltet werden, damit die Brücke abgeglichen ist?

8. Die Brückenschaltung von **Bild 1** mit $R_1 = 400\ \Omega$ und $R_2 = 600\ \Omega$ ist abgeglichen. Wie groß sind R_3 und R_4, wenn beide parallel geschaltet 10 kΩ ergeben?

4.10 Erzeuger-Ersatzschaltungen

Eine Schaltung darf durch eine Ersatzschaltung ersetzt werden, wenn beide Schaltungen gleiche elektrische Eigenschaften besitzen.

4.10.1 Spannungserzeuger

Die Ersatzschaltung eines Spannungserzeugers besteht aus der Reihenschaltung des Urspannungserzeugers und des Innenwiderstandes **(Bild 1)**. Bei Kurzschluss liegt die Leerlaufspannung am Innenwiderstand, d.h. $U_0 = I_k \cdot R_i$. Bei Leerlauf ist $I = 0$ A und die Spannung an den Klemmen gleich der Urspannung (Quellenspannung).

Beispiel 1: Kennwerte berechnen

Eine Batterie für 9 V hat bei Leerlauf eine Spannung von 9,14 V. Bei Belastung mit $I_2 = 20$ mA ist die Spannung an den Klemmen 8,96 V. Berechnen Sie a) Innenwiderstand, b) Kurzschlussstrom.

Lösung:

a) $R_i = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = \frac{9{,}14\,\text{V} - 8{,}96\,\text{V}}{20\,\text{mA} - 0\,\text{mA}} = \frac{0{,}18\,\text{V}}{20\,\text{mA}} = \mathbf{9{,}0\,\Omega}$

b) $I_k = \frac{U_0}{R_i} = \frac{9{,}14\,\text{V}}{9{,}0\,\Omega} = \mathbf{1{,}016\,A}$

$U_0 = U + I \cdot R_i$ | $U_0 = I_K \cdot R_i$ | $R_i = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}$

U_0	Leerlaufspannung, Urspannung, Quellenspannung
I_K	Kurzschlussstrom
R_i	Innenwiderstand
U_1, U_2	Spannungen an den Klemmen
I_1, I_2	Stromstärken
1, 2	Indizes für zwei verschiedene Belastungen

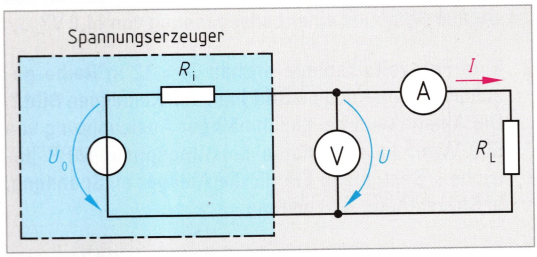

Bild 1: Erzeuger-Ersatzschaltung

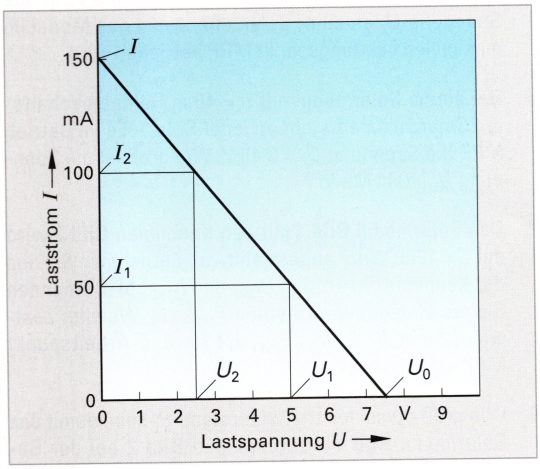

Bild 2: Belastungskennlinie

Aufgaben zu 4.10.1

1. Eine Flachbatterie hat die Urspannung 4,5 V. Bei Kurzschluss fließen 3,6 A. Welche Spannung stellt sich bei einem Laststrom von 0,6 A an den Klemmen ein?

2. Eine Kfz-Batterie hat die Kenngrößen $U_0 = 12{,}8$ V und $R_i = 50\,\text{m}\Omega$. Welche Spannung stellt sich an den Klemmen ein, während der Anlassermotor den Strom $I = 70$ A entnimmt?

3. Ein Netzgerät liefert im Leerlauf die Spannung 6,9 V. Bei Belastung mit 6 A sinkt die Spannung an den Klemmen auf $U_1 = 6{,}3$ V ab. Welche Spannung U_2 erhält man bei einem Laststrom von $I_2 = 9$ A?

4. An einer Steckdose wurde die Spannung von $U_0 = 235$ V gemessen. Bei Belastung mit 10 A beträgt die Spannung 230 V. Wie groß ist der Innenwiderstand R_i des Netzes?

5. Die Belastungskennlinie eines Funktionsgenerators ist in **Bild 2** dargestellt. a) Bestimmen Sie den Innenwiderstand R_i des Generators aus Quellenspannung und Kurzschlussstrom. b) Welche Leistung P_{ab1} wird im ersten Belastungsfall an den Lastwiderstand abgegeben und welche Leistung P_{i1} entsteht im Innenwiderstand?

6. Ein Spannungserzeuger hat die Belastungskennlinie **Bild 2.** a) Berechnen Sie den Innenwiderstand R_i für die Klemmenspannungen U_1 und U_2. b) Wie groß sind für den zweiten Belastungsfall die Leistung P_{ab2}, die an den Lastwiderstand abgegeben wird, und die Leistung P_{i2}, die im Innenwiderstand entsteht?

7. Ein Tauchspulmikrofon wurde mit $I_1 = 10\,\mu$A belastet; dabei stellte sich $U_1 = 4$ mV ein. Bei Belastung mit $I_2 = 20\,\mu$A ist $U_2 = 2$ mV. Wie groß sind R_i und U_0?

4.10.2 Spannungserzeugung mit Fotovoltaik

Solarmodule werden wie Spannungsquellen mit Innenwiderstand behandelt.

Aufgaben zu 4.10.2

1. Eine Fotovoltaikanlage mit $m = 6$ parallel geschalteten Solarmodulen **Bild 1** mit den Kennlinien **Bild 2** dient zum Laden eines 12-V-Akkumulators. Wie groß ist der Ladestrom bei einer Bestrahlungsstärke von $S = 800\ \mathrm{W/m^2}$ und einer Ladespannung von 14,0 V?

2. Eine Fotovoltaikanlage enthält $m = 12$ in Reihe geschaltete Solarmodule **Bild 1** mit den Kennlinien **Bild 2.** Die Anlage wird bei gleichmäßiger Ausleuchtung von $600\ \mathrm{W/m^2}$ im maximalen Leistungspunkt MPP betrieben. Bestimmen Sie für die Anlage a) Spannung, b) Stromstärke, c) Leistung.

3. Ein Solarmodul **Bild 1** mit den Kennlinien **Bild 2** besteht aus $n = 36$ in Reihe geschalteten Solarzellen. Wie groß ist bei der Bestrahlungsstärke von $S = 1000\ \mathrm{W/m^2}$ die Spannung U_Z an einer Solarzelle, wenn das Modul im maximalen Leistungspunkt MPP betrieben wird?

4. Bei einem Solarmodul mit $n = 40$ in Reihe geschalteten Solarzellen entsteht an jeder Solarzelle im Betrieb MPP die Spannung $U_Z = 0{,}48$ V. Wie groß ist die Spannung U_{MPP} am Modul?

5. Das Solarmodul **Bild 1** mit den Kennlinien **Bild 2** wird mit $S = 1000\ \mathrm{W/m^2}$ angestrahlt. a) Entnehmen Sie aus der Kennlinie die Größen U_{MPP} und I_{MPP}. b) Berechnen Sie die abgegebene Leistung P_{MPP}. c) Welcher Lastwiderstand $R_L = U_{MPP}/I_{MPP}$ ist für den Arbeitspunkt MPP erforderlich?

6. Wie groß muss der Lastwiderstand R_L sein, damit das Solarmodul **Bild 1** mit Kennlinien **Bild 2** bei der Bestrahlungsstärke $S = 400\mathrm{W/m^2}$ im Leistungspunkt MPP betrieben wird?

7. Das Solarmodul **Bild 1** mit den Kennlinien **Bild 2** hat die wirksame Solarfläche von $A = 0{,}545\ \mathrm{m^2}$. Die Bestrahlungsstärke beträgt $S = 1000\ \mathrm{W/m^2}$. a) Berechnen Sie die Bestrahlungsleistung P_{st}. b) Wie groß ist die abgegebene Leistung P_{MPP}? c) Wie viel Prozent beträgt der Wirkungsgrad η_{MPP}?

8. Eine Solaranlage mit der wirksamen Solarfläche von $A = 39{,}2\ \mathrm{m^2}$ wird mit $S = 800\ \mathrm{W/m^2}$ angestrahlt. Dabei gibt die Anlage die elektrische Leistung $P_{MPP} = 4{,}64$ kW ab. a) Wie groß ist die Bestrahlungsleistung P_{st}? b) Berechnen Sie den Wirkungsgrad η_{MPP} in Prozent für den Betrieb im Leistungspunkt MPP.

$$P_{st} = S \cdot A \qquad P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \qquad \eta_{MPP} = \frac{P_{MPP}}{P_{st}}$$

P_{MPP}	größte abgebbare Leistung im Leistungspunkt
I_{MPP}	Strom im Leistungspunkt
U_{MPP}	Spannung im Leistungspunkt
P_{st}	Bestrahlungsleistung
S	Bestrahlungsstärke ($[S] = \mathrm{W/m^2}$)
A	wirksame Solarfläche
η_{MPP}	Wirkungsgrad im Leistungspunkt
MPP	maximaler Leistungspunkt (von Maximal Power Point)

Beispiel 1: Leistungsabgabe bestimmen

Ein Solarmodul **Bild 1** hat bei der Modultemperatur $\vartheta = 25$ °C die Belastungskennlinien von **Bild 2.** Die Bestrahlungsstärke beträgt $S = 600\ \mathrm{W/m^2}$. Bestimmen Sie für den Punkt MPP (Maximal Power Point) die größte abgegebene Leistung P_{MPP}.

Lösung:

Aus Bild 2 abgelesen: $U_{MPP} = 17{,}6$ V; $I_{MPP} = 2{,}8$ A

$\Rightarrow P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 17{,}6\ \mathrm{V} \cdot 2{,}8\ \mathrm{A} = \mathbf{49{,}3\ W}$

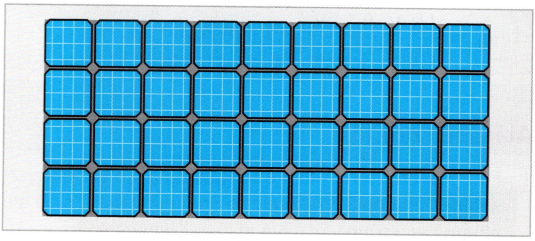

Bild 1: Solarmodul

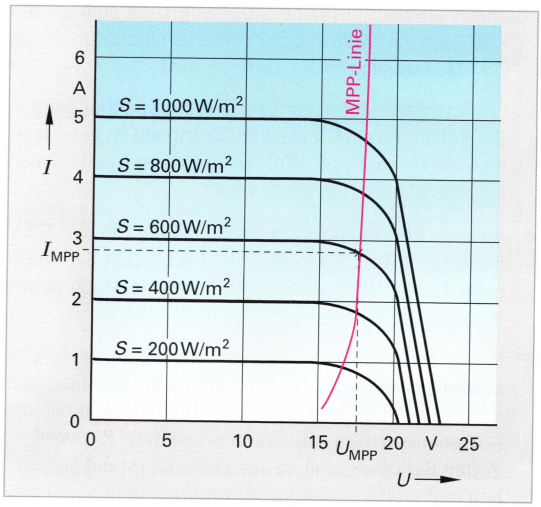

Bild 2: Belastungskennlinien des Solarmoduls

4.10.3 Sekundärelemente (der Energieelektronik) aufladen

Die elektrische Ladung Q ist das Produkt aus Stromstärke I und der Zeit t. Ihre Einheit ist die Amperesekunde bzw. im besonderen Coulomb[1] (C). Umgangssprachlich wird sie oft als Ladekapazität bezeichnet.

Beispiel 1: Ladestrom und Ladezeit berechnen

Ein Saugroboter hat eine durchschnittliche Leistung von 30 W bei $U = 14{,}4$ V. Die Ladekapazität beträgt 2700 mAh. Berechnen Sie a) den Ladestrom I, wenn der Saugroboter in 3 h vollständig geladen wird, b) die Zeit t bis zur Rückkehr zur Ladestation.

Lösung:

a) $I = \frac{Q}{t} = \frac{2700\ \text{mAh}}{3\ \text{h}} = \mathbf{900\ mA}$

b) $t = \frac{U \cdot Q}{P} = \frac{14{,}4\ \text{V} \cdot 2700\ \text{mAh}}{30\ \text{W}} = \mathbf{1{,}3\ h}$

$Q = I \cdot t$ | $W = P \cdot t$ | $W = U \cdot Q$

Q	Ladung	W	Elektrische Energie
I	Stromstärke	U	Spannung
t	Zeit	P	Leistung

Die Fläche unter der Ladekurve entspricht der Ladung.

Tabelle 1: Akku-Werkzeuge

Bezeichnung	Akkuspannung	Ladekapzität
Stichsäge	18,0 V	4000 mAh
Schrauber	7,2 V	1300 mAh
Multischleifer	10,8 V	1500 mAh
Bohrhammer	14,4 V	3000 mAh

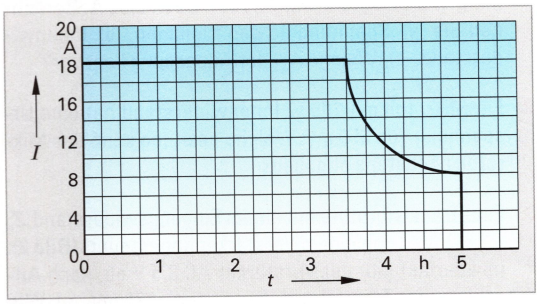

Bild 1: Ladekurve eines Elektrofahrzeugs

Tabelle 2: Kenndaten Powerpacks

Art	U_{Akku}	Lade-kapazität	Aus-gang 1	Aus-gang 2
P1 – 2600	3,3 V	2600 mAh	5 V/1 A	–
P2 – 5200	3,3 V	5200 mAh	5 V/1 A	5 V/2,1 A
P3 – 7800	3,3 V	7800 mAh	5 V/1 A	5 V/2,1 A

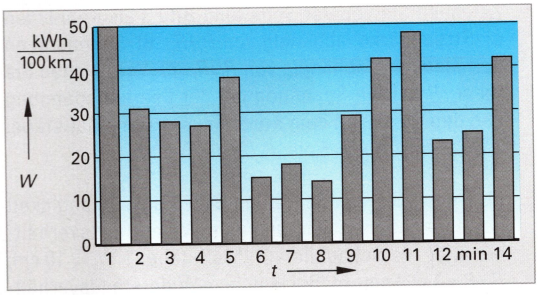

Bild 2: Energiebedarf in Segmenten

Aufgaben zu 4.10.3

1. Berechnen Sie nach **Tabelle 1** a) die elektrische Energie, b) die Ladedauer t bei einem mittleren Ladestrom von 400 mA bzw. 1,5 A.
2. Die Batterie eines Elektrofahrzeugs wird an einer Stromtankstelle geladen **(Bild 1)**. Berechnen Sie die Ladung Q.
3. Drei Powerpacks besitzen Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit Kenndaten nach **Tabelle 2**. Berechnen Sie a) die gespeicherte Energie je Powerpack, b) die maximale Leistung am jeweiligen Ausgang, c) die Entladedauer in h, wenn die komplette Energie am Ausgang 2 eines Powerpacks P3 entnommen wird, d) den Ladestrom, wenn bei einem Powerpack P2 nach 468 min die Ladeanzeige 75 % anzeigen soll.
4. 1 kWh aus erneuerbaren Energien kostet ca. 0,35 €. Berechnen Sie die Kosten für 1 kWh, wenn Sie Zellen von Typ AA (Mignon) verwenden. (8 × 1,5 V/2,8 Ah für 1,69 €)
5. Ein Elektrofahrrad besitzt einen tragbaren Lithium-Ionen-Akkumulator mit 423 Wh. a) Wie groß ist die Ladung, wenn es sich um eine 48-V-Batterie handelt? b) Welche Stromstärke ist notwendig, wenn die Batterie in 3 h bei einer Restladung von 20 % auf 80 % geladen werden soll?
6. Bestimmen Sie den durchschnittlichen Energiebedarf im Intervall von 0 bis 14 min **(Bild 2)**.

[1] Charles Augustin de Coulomb, franz. Physiker, 1736 bis 1806

4.10.4 Anpassungsarten

vel.plus/ MELGS20

Der Lastwiderstand R_L ist bei Stromanpassung sehr viel kleiner, bei Spannungsanpassung sehr viel größer als der Innenwiderstand R_i.

Beispiel 1: Leistungsmaximum berechnen

Der Generator von **Bild 1** hat eine Urspannung von 12 V und einen Innenwiderstand von **60 Ω**. Berechnen Sie a) R_L für Leistungsanpassung, b) größte Leistungsabgabe.

Lösung:

a) $R_L = R_i = \mathbf{60\ \Omega}$

b) $P_{max} = \frac{U_0^2}{4 \cdot R_i} = \frac{(12\ \text{V})^2}{4 \cdot 60\ \Omega} = \mathbf{0{,}6\ W}$

Spannungsanpassung ergibt eine möglichst hohe Spannung ($R_i \ll R_L$).

Stromanpassung ergibt eine möglichst große Stromstärke ($R_i \gg R_L$).

Leistungsanpassung ermöglicht eine größtmögliche Leistungsentnahme ($R_i = R_L$).

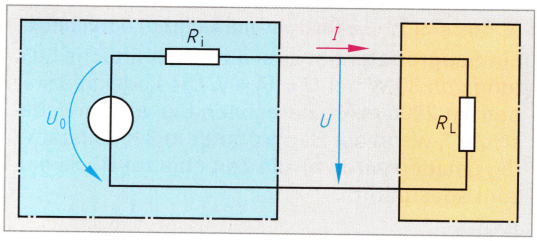

Bild 1: Generator und Lastwiderstand

Bei Leistungsanpassung:

$R_L = R_i$	$U = \frac{U_0}{2}$
$P_{max} = \frac{U_0^2}{4 \cdot R_i}$	$I = \frac{I_k}{2}$

I	Stromstärke	U_0	Urspannung
I_k	Kurzschlussstrom	R_L	Lastwiderstand
P_{max}	größte Leistungsabgabe	R_i	Innenwiderstand
U	Spannung an den Klemmen		

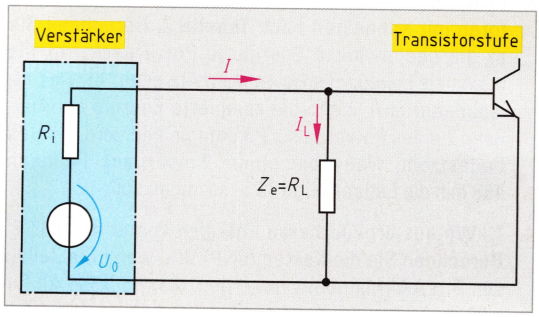

Bild 2: Belasteter Spannungserzeuger

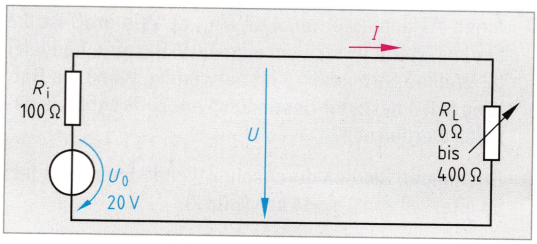

Bild 3: Veränderliche Belastung

Aufgaben zu 4.10.4

1. Ein Stromversorgungsgerät hat 30 V Leerlaufspannung. Bei Belastung mit 12,5 Ω fließen 2,36 A. Berechnen Sie a) Spannung an den Klemmen, b) Innenwiderstand. c) Welche Art der Anpassung liegt vor?

2. Ein Mikrofon mit 200 Ω Innenwiderstand hat eine Urspannung von 350 mV. Welche Leistung kann das Mikrofon höchstens abgeben?

3. Eine Transistorstufe mit einem Eingangswiderstand Z_e = 1 kΩ wird von einem Verstärker angesteuert **(Bild 2)**. Im Leerlauf gibt der Verstärker AC 3,5 V ab, nach Anschluss der Transistorstufe nur noch 235 mV. a) Wie groß ist der Laststrom I_L? b) Berechnen Sie den Innenwiderstand R_i. c) Welche Anpassung liegt vor?

4. Eine Transistorstufe hat einen Eingangswiderstand von Z_e = 70 Ω und wird von einem Verstärker mit 5 mA angesteuert **(Bild 2)**. Im Leerlauf liegen am Ausgang des Verstärkers AC 390 mV. Berechnen Sie a) Widerstand $R = R_i + R_L$, b) Innenwiderstand R_i. c) Welche Art der Anpassung besteht zwischen Transistorstufe und Verstärker?

5. Zeichnen Sie von der Schaltung **Bild 3** als Kennlinien a) Stromstärke, abhängig von R_L/R_i, b) Spannung an den Klemmen, abhängig von R_L/R_i. c) Vergleichen Sie für $R_L/R_i = 1$ die Spannung mit der Leerlaufspannung und den Strom mit dem Kurzschlussstrom. Maßstäbe: 2 V ≙ 1 cm; 0,1 A ≙ 5 cm; $R_L/R_i = 1$ ≙ 4 cm.

6. a) Tragen Sie von Schaltung **Bild 3** die Abhängigkeit der abgegebenen Leistung vom Widerstandsverhältnis R_L/R_i als Schaubild auf. Maßstäbe: 1 W ≙ 10 cm; $R_L/R_i = 1$ ≙ 4 cm. b) Bei welchem Widerstandsverhältnis R_L/R_i ist die Leistungsabgabe am größten?

7. Ein Spannungserzeuger mit Innenwiderstand R_i und Leerlaufspannung U_0 wird bei Stromanpassung betrieben. Dabei entsteht am Innenwiderstand die Leistung P_{ik}, welche den Spannungserzeuger erwärmt. Berechnen Sie das Verhältnis P_{ik}/P_{max} von innerer Leistung P_{ik} bei Kurzschluss zur abgegebenen Leistung P_{max} bei Leistungsanpassung.

8. Ein Spannungserzeuger mit der Urspannung U_0 und dem großen Innenwiderstand R_i wird in Kurzschluss betrieben. a) Welche Anpassungsart liegt vor? b) Wie groß ist die abgegebene Leistung P? c) Wie groß ist das Verhältnis von Kurzschlussstrom I_k zum Strom, der bei Leistungsanpassung fließt?

9. Ein Transistor, den man sich als veränderbaren Widerstand R_{CE} vorstellen darf, liegt über dem Kollektorwiderstand $R_C = 270\,\Omega$ an der Betriebsspannung $U_b = 12\,V$ nach **Bild 1.** a) Bei welchem Wert von R_{CE} entsteht im Transistor die größte Verlustleistung? b) Wie groß ist diese Leistung P_{max}?

10. Ein Transistor (vorstellbar als veränderbaren Widerstand R_{CE}) liegt nach **Bild 1** über dem Kollektorwiderstand R_C an der Spannung $U_b = 15\,V$. a) Berechnen Sie den Widerstand R_C so, dass im Transistor höchstens 700 mW Verlustleistung auftreten können. b) Wählen Sie für R_C den Wert aus der Reihe E12, der gerade über dem berechneten Wert liegt.

11. Bei einem belasteten Spannungserzeuger ist das Verhältnis der abgegebenen Leistung P zur größten Leistung P_{max}:

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{4}{\frac{R_L}{R_i} \cdot \left(1 + \frac{R_i}{R_L}\right)^2}$$

a) Weisen Sie nach, dass bei Leistungsanpassung $P = P_{max}$ ist.

b) Wie groß ist das Verhältnis P/P_{max}, wenn bei einer Fehlanpassung $R_L = 3 \cdot R_i$ ist?

c) Berechnen Sie P/P_{max} für $R_L = R_i/3$.

12. Bei einem Generator mit Lastwiderstand (**Bild 1,** vorhergehende Seite) wird das Verhältnis der an R_L abgegebenen Leistung P zur Gesamtleistung P_{ges} des Generators als Leistungswirkungsgrad η bezeichnet. Dabei ist:

$$\eta = \frac{P}{P_{ges}} = \frac{I_2 \cdot R_L}{I_2 \cdot (R_i + R_L)} = \frac{R_L}{R_i + R_L} = \frac{1}{1 + R_i/R_L}$$

Berechnen Sie den Wirkungsgrad η in Prozent für

a) $R_i/R_L = 0{,}01$ (Spannungsanpassung),

b) $R_i/R_L = 1$ (Leistungsanpassung),

c) $R_i/R_L = 100$ (Stromanpassung).

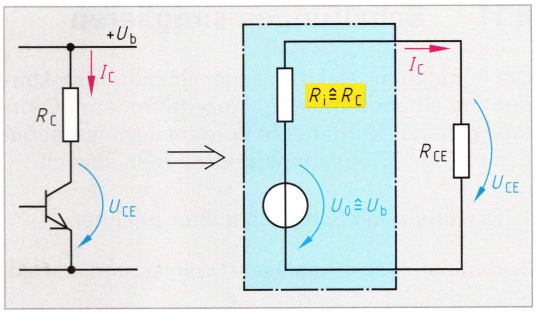

Bild 1: Ersatzschaltung

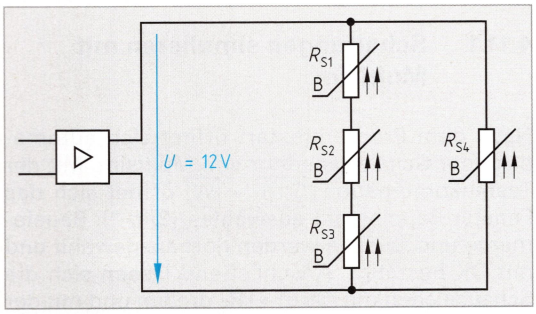

Bild 2: Sensorengruppe

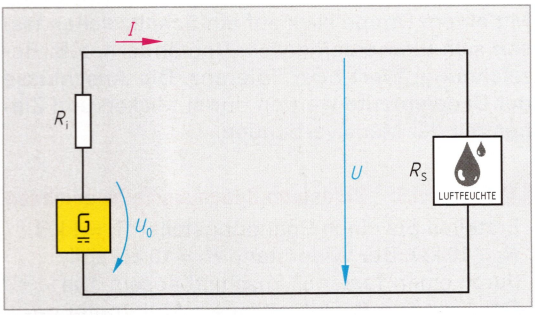

Bild 3: Leistungsanpassung

13. Vier Sensoren sind nach **Bild 2** geschaltet und an einen Verstärker leistungsangepasst angeschlossen. $R_{S1} = R_{S2} = 40\,\Omega$, $R_{S3} = 80\,\Omega$, $R_{S4} = 160\,\Omega$. Berechnen Sie

a) den Gesamtstrom,

b) die Leistungsabgabe des Verstärkers und die Leistungen der einzelnen Sensoren.

14. Ein Feuchtesensor mit dem Innenwiderstand $300\,\Omega$ ist an einen Verstärker mit dem Innenwiderstand $910\,\Omega$ angeschlossen (**Bild 3**). Wie groß sind bei einer Leerlaufspannung von 210 mV des Sensors a) die Eingangsspannung des Verstärkers, b) die maximale Verlustleistung des Sensors, c) die wirkliche Verlustleistung des Sensors.

vel.plus/ MELGS21

4.11 Schaltungen simulieren

Die Funktionen elektronischer Schaltungen können mit einem Simulationsprogramm am PC virtuell getestet werden. Die Vorgehensweise ist bei den meisten Simulationsprogrammen ähnlich.

1. Schaltung mit Schaltplaneditor zeichnen
2. Simulationsart/Analyseart wählen und starten
3. Sumulationsergebnisse darstellen, bearbeiten und auswerten

4.11.1 Schaltungen simulieren mit Multisim

Nach dem Programmstart öffnet sich automatisch der Schaltplaneditor von Multisim. Mit der Tastenkombination Strg + W öffnet sich das Fenster Bauelement auswählen **(Bild 1)**. Bauelemente und Quellen werden dort ausgewählt und mit OK bestätigt. Anschließend lassen sich die Schaltzeichen mit Strg + R drehen und mit der Maus auf der Arbeitsfläche positionieren.

Mit einem Doppelklick auf ein Schaltzeichen lassen sich Elementeigenschaften ändern, z. B. Bezeichnung, Wert oder Toleranz. Die Anschlüsse der Bauelemente werden durch Klicken und Ziehen mit der Maus verbunden.

Beispiel 1: Belasteter Spannungsteiler zeichnen

Erstellen Sie einen Spannungsteiler $R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 10\ k\Omega$. Der Widerstand $R_3 = 10\ k\Omega$ soll durch einen Taster S1 zuschaltbar sein. Die Spannung an R_2 soll mit einem Multimeter gemessen werden.

Lösung:

Mit Strg + W Bauelemente auswählen und positionieren. Doppelklick auf Bauelemente, Bezeichnungen und Werte ändern. Anschlüsse verbinden **(Bild 2)**.

Simulation mit virtuellen Messgeräten

Die Auswahl von Geräten erfolgt über Schaltflächen, die sich am Rand des Programmfensters befinden. Die Geräte werden im Schaltplan positioniert und mit der Schaltung verbunden. Mit der Schaltfläche ▷ wird die Simulation gestartet. Durch einen Doppelklick auf ein Gerätesymbol im Schaltplan öffnet sich die Frontplatte.

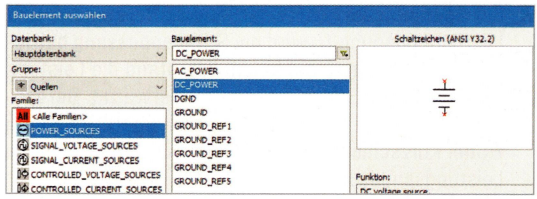

Bild 1: Bauelemente auswählen

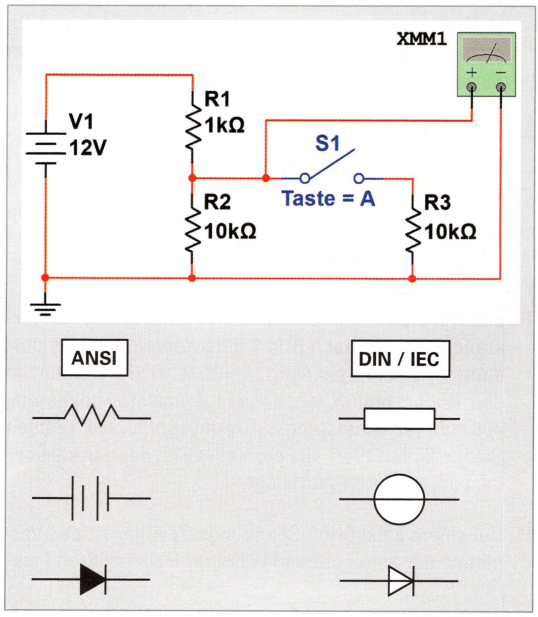

Bild 2: Belasteter Spannungsteiler

Bezugsquelle für Multisim: www.ni.com

Aufgaben zu 4.11.1

1. Zeichnen Sie einen belasteten Spannungsteiler, $R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 2{,}2\ k\Omega$, $R_L = 10\ k\Omega$. Simulieren Sie mit einem virtuellen Multimeter a) U_2, b) U_1, c) I, d) I_2.
2. Zeichnen Sie eine Brückenschaltung, Brückenzweig 1: $R_1 = 4{,}7\ k\Omega$, $R_2 = 10\ k\Omega$ und Brückenzweig 2: $R_3 = 6{,}8\ k\Omega$, $R_4 = 20\ k\Omega$. Simulieren Sie mit einem Multimeter die Brückenspannung.
3. Simulieren Sie mit virtuellem Funktionsgenerator und Oszilloskop a) Sinusspannung, $\hat{u} = 5\ V$, $f = 3\ kHz$, b) Rechteckspannung $\hat{u} = 2{,}5\ V$, $f = 10\ MHz$, Tastgrad 30 %, Offset-Spannung 2,5 V.

Zeitverhalten simulieren

Mit der Analysefunktion Zeitverhalten lassen sich die Variablen einer Schaltung über einen bestimmten Zeitbereich genauer betrachten. Im Menü *Simulieren ⇒ Analysen und Simulation* und der Auswahl Zeitverhalten **(Bild 1)** werden Analyseparameter, Ausgabevariablen und Analyseoptionen eingestellt.

Nach Simulationsstart über die Schaltfläche ▷ werden die Simulationsergebnisse im Fenster Graphanzeige ausgegeben und weiterverarbeitet.

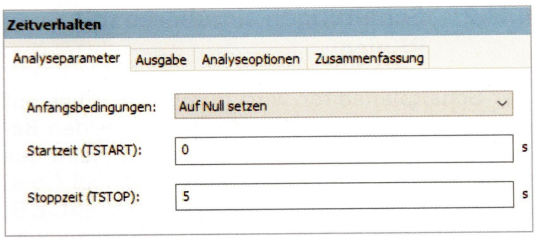

Bild 1: Analyseparameter Auswahl Zeitverhalten

Beispiel 1: Zeitverhalten einer RC-Schaltung simulieren

Zeichnen Sie eine RC-Schaltung an einer Gleichspannungsquelle, $R = 1\ \text{k}\Omega$, $C = 470\ \mu\text{F}$, $U = 10$ V. Simulieren Sie die Spannungen $u_R(t)$ und $u_C(t)$ im Zeitbereich 0 bis 5 s.

Lösung:

1. Mit STRG + W *R*, *C* und Spannungsquelle DC_Power auswählen und positionieren.
2. Anschlüsse mit Maus verbinden **(Bild 2)**.
3. Doppelklick auf Bauelemente und Eigenschaften ändern, z. B. DC_Power Beschriftung G1, Wert $U = 10$ V.
4. Doppelklick auf Verbindungslinien und Netznamen anzeigen einschalten.
5. Im Menü *Simulieren ⇒ Analysen und Simulation ⇒* Zeitverhalten auswählen.
6. Analyseparameter: Anfangsbedingungen auf Null setzen, Startzeit (TSTART) = 0 s, Stoppzeit (TSTOP) = 5 s (Bild 1).
   Ausgabe: *Ausdruck hinzufügen...* V(1) – V(3) und V(3) hinzufügen.
7. Simulation starten mit der Schaltfläche ▷.
8. Simulationsergebnis **Bild 3**.

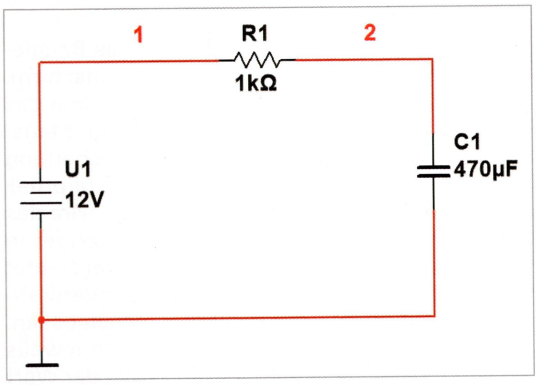

Bild 2: RC-Schaltung

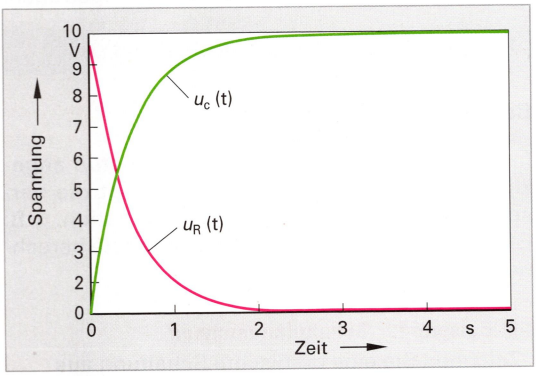

Bild 3: Simulationsergebnis Zeitverhalten

Aufgaben zu 4.11.1

1. Eine RL-Schaltung $R = 470\ \Omega$, $L = 100$ mH, wird an einer Gleichspannungsquelle $U = 20$ V betrieben. a) Zeichnen Sie die Schaltung. b) Simulieren Sie $u_R(t)$ und $u_L(t)$ im Zeitbereich 0 bis 1,5 ms. c) Ermitteln Sie die Augenblickswerte der Spannungen nach 212,8 µs.
2. Eine RLC-Schaltung $R = 1\ \text{k}\Omega$, $L = 200$ mH, $C = 470$ nF, wird an einer AC-Quelle $f = 1$ kHz, $\hat{u} = 24$ V betrieben. Zeichnen Sie die Schaltung und simulieren Sie $u_R(t)$, $u_L(t)$, $U_C(t)$ im Zeitbereich 0 bis 2 ms.
3. Ein Brückengleichrichter wird mit Glättungskondensator betrieben **(Bild 4)**. a) Zeichnen Sie die Schaltung, b) simulieren Sie $u_{RL}(t)$ und $u_{R1}(t)$ im Zeitbereich 0 bis 60 ms.

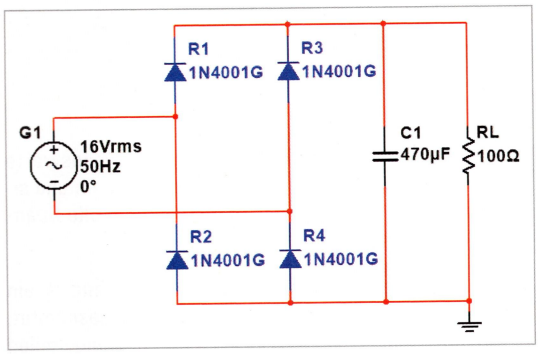

Bild 4: Brückengleichrichter mit Glättung

4.11.2 Schaltungen simulieren mit PSpice

Der Schaltplaneditor wird durch Mausklick auf das Symbol *Schematics* geöffnet. Über den Befehl *Get New Part* im Menü *Draw* erscheint das Eingabefenster *Add Part*. Unter dem Menü *Library* sind Bauelementebibliotheken abgelegt, z. B. analog.slb. Durch Anklicken eines Bauelementes, z. B. R (für Resistor), wird dieses im Menü *Part Browser* angezeigt **(Bild 1)**.

Wird mit *OK* bestätigt, so erscheint das Bauelement anstelle des Mauszeigers am Bildschirm. Mit der Tastenkombination [Strg] + [R] kann das Bauelement gedreht werden. Die rechte Maustaste schließt die Eingabe ab. Jede Schaltung muss mit Massepotenzial aus der Bibliothek *Port* versehen werden. Mit dem Befehl *Wire* des Menüs *Draw* verwandelt sich der Mauszeiger in einen Bleistift, mit dem die Schaltung verdrahtet wird. Mit der linken Maustaste wird die Verdrahtung begonnen, mit der rechten abgeschlossen. Zum Eintrag der Bauelementwerte wird jeweils die voreingestellte Nummerierung bzw. der Wert doppelt angeklickt. In dem erscheinenden Menü werden die jeweils benötigten Werte eingetragen.

Bezugsquelle für *PSPICE*: www.orcad.com

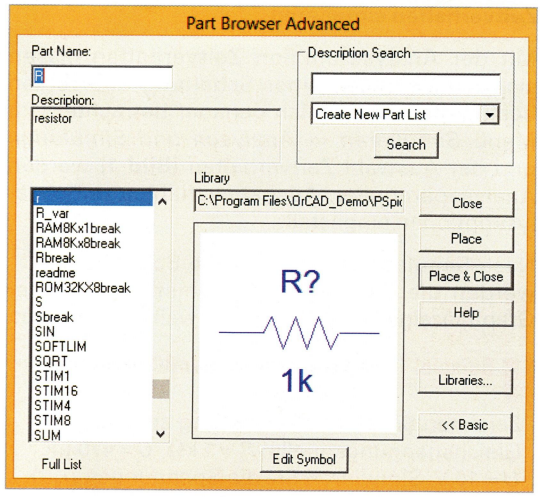

Bild 1: Bauelementeauswahl

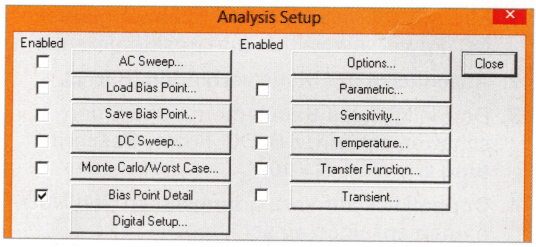

Bild 2: Simulations- und Berechnungsauswahl

Berechnung und Simulation

Im Menü *Analysis* wird der Befehl *Setup* angeklickt. Das erscheinende Fenster zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Simulation, z. B. Gleichspannungs- und Gleichstromwerte berechnen **(Bild 2)**.

Beispiel 1: Schaltplan zeichnen

Zeichnen Sie eine gemischte Schaltung aus $R_1 = 500\ \Omega$ in Reihe mit einer Parallelschaltung von $R_2 = 1\ \text{k}\Omega$ und $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$.

Lösung: **Bild 3**

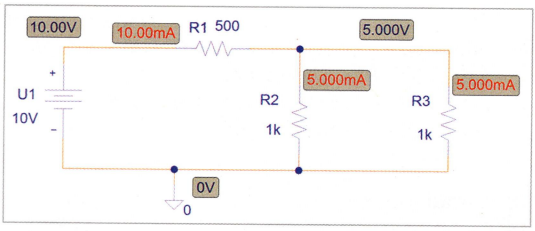

Bild 3: Schaltung mit berechneten Werten

Beispiel 2: Gleichspannungsgrößen simulieren

Simulieren Sie die Schaltung aus **Bild 3** und stellen Sie die Spannungs- und Stromwerte dar.

Lösung:

1. Simulationsart einstellen: *Bias Point Details* aktivieren.
2. Simulation der Schaltung starten: Menü *Analysis* und Menüpunkt *Simulate*. Die Darstellung der Ergebnisse wird anschließend mit den Buttons [V] und [I] aktiviert. Die angezeigten Spannungswerte sind auf Masse bezogen **(Bild 3)**.

Aufgaben zu 4.11.2

1. Eine Schaltung nach **Bild 3** hat die Widerstandswerte $R_1 = 1\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 5\ \text{k}\Omega$ und $R_3 = 10\ \text{k}\Omega$. Zeichnen und simulieren Sie die Schaltung und stellen Sie alle Spannungs- und Stromwerte dar.
2. Zur Schaltung in **Bild 3** wird zum Widerstand R_3 ein weiterer Widerstand R_4 mit $1\ \text{k}\Omega$ in Reihe geschaltet. Zeichnen und simulieren Sie die Schaltung und stellen Sie alle Spannungs- und Stromwerte dar.

Darstellung von Simulationsergebnissen

Neben der Gleichspannungs- und Gleichstromberechnung können weitere Analysemöglichkeiten unter dem Menüpunkt *Analysis Setup* eingestellt werden **(Bild 1)**. In Diagrammen können verschiedene Werte auf der x- oder y-Achse dargestellt und zusätzliche Größen berechnet werden.

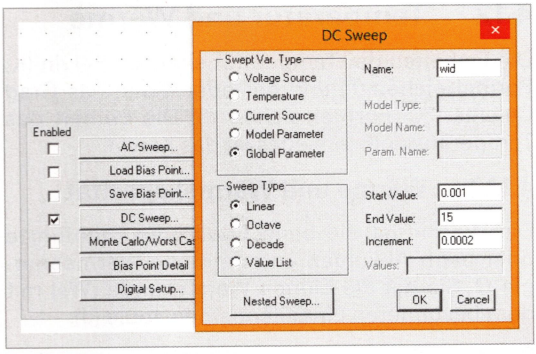

Bild 1: Simulations- und Berechnungsauswahl

Beispiel 1: Schaltung mit Parameter simulieren

Eine Spannungsquelle hat die Werte $U_0 = 10$ V und $R_i = 5\ \Omega$ und wird mit einem variablen Lastwiderstand $R_L = 0\ \Omega$ bis $15\ \Omega$ belastet. Zeichnen Sie die Schaltung und simulieren Sie die Lastspannung U_L und den Laststrom I_L in Abhängigkeit des Lastwiderstandes.

Lösung:

Die Schaltung wird, wie auf der vorhergehenden Seite beschrieben, gezeichnet und beschriftet, dem Lastwiderstand R_L wird als Wert der Parameter {*wid*} zugeordnet. Im Menü *Part Browser* wird *Param* aufgerufen und der Name *wid* sowie ein beliebiger Widerstandswert eingetragen **(Bild 2)**.

Unter *Analysis Setup* wird *DC Sweep* aktiviert. Dort wird unter *Var.Type* der *Global Parameter* und unter *Sweep Type* linear eingestellt. Dann wird der Name *wid* sowie die Werte für *Start Value, End Value* und *Increment* eingegeben **(Bild 1)**.

Nach Starten mit *Simulate* berechnet PSpice die Größen U_0, U_L und I_L. Diese werden über den Menüpunkt *Trace, Add Trace* durch Anklicken aktiviert und dargestellt **(Bild 3)**.

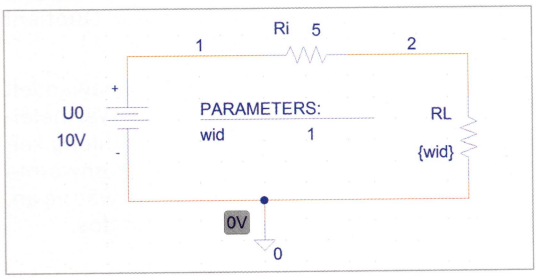

Bild 2: Belastete Spannungsquelle

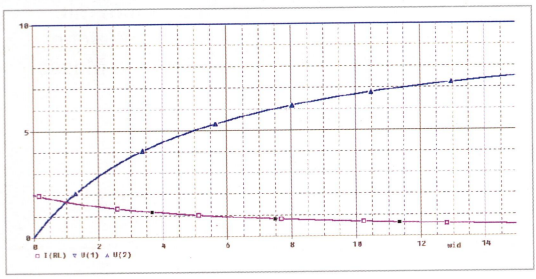

Bild 3: Belastete Spannungsquelle mit U_0, U_L und I_L

Beispiel 2: Simulationsergebnis ergänzen

Ergänzen Sie das Simulationsergebnis aus Beispiel 1 um die Leistung $P_L = U_L \cdot I_L$ am Lastwiderstand.

Lösung:

Menüpunkt *Trace, Add Trace* aktivieren und in der Zeile *Trace Expression* die Berechnungsformel U(2) · I(2) eintragen. Nach Bestätigung mit „OK" erscheint zusätzlich die Kurve für die Leistung am Lastwiderstand **(Bild 4)**.

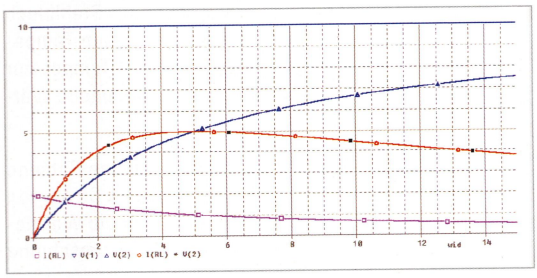

Bild 4: Ergänzte Leistungskurve P_L einer mit $U_L \cdot I_L$ belasteten Spannungsquelle

3. Eine Spannungsquelle hat einen Innenwiderstand von 2,5 Ω und bei Leerlauf eine Spannung von 12 V. Simulieren Sie den Verlauf von U_L, I_L und P am Lastwiderstand, wenn dieser von 0 Ω bis 10 Ω verändert wird.

4. Ein Spannungserzeuger hat eine Leerlaufspannung von 35,2 V. Der Innenwiderstand ist mit 6,29 Ω angegeben. Simulieren Sie den Verlauf von U_L, I_L und P am Lastwiderstand R_L, wenn dieser von 0 Ω bis 50 Ω verändert wird.

4.12 Temperatur und Wärme

vel.plus/ MELGS22

Die Einheiten der Temperatur sind das Kelvin (K, Formelzeichen T) und der oder meist das Grad Celsius (°C, Formelzeichen ϑ). Die Einheit des Temperaturunterschiedes ist das Kelvin.

4.12.1 Wärme und Wärmekapazität

Die Wärme ist die beim Erwärmen zugeführte oder beim Abkühlen entnommene Wärmeenergie Q. Sie hat die Einheit Wattsekunde (Ws) mit dem besonderen Einheitennamen Joule (J).

Der Quotient Wärme durch Temperaturunterschied heißt Wärmekapazität C. Die spezifische Wärmekapazität c **(Tabelle 1)** ist der Quotient Wärmekapazität durch Masse.

Elektrische Energie kann in Wärme umgewandelt werden (Stromwärme). Geht durch Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung keine Wärme verloren, so kommt die Stromwärme an der erwünschten Stelle voll als Nutzwärme an. Die Wärmeübertragung ist dann verlustlos.

Beispiel 1: Wärme berechnen

Ein Thyristor erwärmt durch kurzzeitigen Betrieb seinen Kühlkörper aus Aluminium mit $c = 0{,}92$ J/(gK) von 20 °C auf 26,3 °C. Welche Wärme wird dem Kühlkörper, der eine Masse von 380 g aufweist, zugeführt?

Lösung:

$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 26{,}3\ °C - 20\ °C = 6{,}3\ K$

$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 380\ g \cdot 0{,}92\ J/(g \cdot K) \cdot 6{,}3\ K$
$= \mathbf{2202\ J}$

$[T] = K$

$[\Delta\vartheta] = K$

$T = \vartheta + 273{,}15\ K$

$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$

$[C] = \frac{J}{K}$

$C = \frac{Q}{\Delta\vartheta}$

$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\vartheta}$

$C = m \cdot c$

$[c] = J/(g \cdot K)$

$[Q] = g \cdot J/(g \cdot K) \cdot K = J$

$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$

$[Q] = W \cdot s = Ws$

$Q = P \cdot t$

C Wärmekapazität
c spezifische Wärmekapazität
m Masse
P Leistung
Q Wärme
T Temperatur in Kelvin
t Zeit
ϑ Temperatur in °C
ϑ_1 Anfangstemperatur
ϑ_2 Endtemperatur
$\Delta\vartheta$ Temperaturunterschied

Tabelle 1: Spezifische Wärmekapazitäten

Aluminium	0,92 kJ/(kg · K)
Kupfer	0,39 kJ/(kg · K)
Eisen, Stahl	0,46 kJ/(kg · K)
Polyvinylchlorid	0,88 kJ/(kg · K)
Wasser	4,19 kJ/(kg · K)

Aufgaben zu 4.12.1

1. Ein Transformator hat einen M-74-Kern aus Stahlblech mit $m = 880$ g. Vor Inbetriebnahme ist dessen Temperatur 18 °C. Im Betrieb weist der Kern eine Temperatur von 95 °C auf. Berechnen Sie die aufgenommene Wärme.

2. In einer elektrischen Schaltanlage wird eine Schiene aus Aluminium mit 4,8 kg Masse durch den Strom von 20 °C auf 55 °C erwärmt. a) Wie groß ist die Wärmekapazität? b) Welche Wärme hat die Stromschiene aufgenommen?

3. Ein Transistor hat ein Gehäuse mit 16,5 g und $c = 0{,}39$ J/(g · K). Kurzzeitig wird dem Transistor eine Wärme von 45 J zugeführt. Um wie viel K nimmt die Temperatur des Transistors zu?

4. Ein Ölhärtebad mit 80 l Öl soll von 18 °C auf 55 °C erwärmt werden. Das Öl hat eine spezifische Wärmekapazität von 1,88 kJ/(kg · K) und eine Dichte von 0,90 kg/dm³. a) Wie groß ist die Wärmekapazität des Ölbades? b) Welche Wärme muss zugeführt werden?

5. Über eine mangelhafte Kontaktstelle mit einem Übergangswiderstand von 30 mΩ fließt ein Strom von 10 A. Welche Wärme wird je Stunde erzeugt?

6. Ein Relais mit einer Wicklung aus 0,1 mm dickem Kupferdraht hat einen Widerstand von 860 Ω und eine Anschlussspannung von 24 V. Berechnen Sie die stündlich erzeugte Wärme.

7. Durch einen Drahtwiderstand aus 0,8 mm dickem Chromnickeldraht mit 150 Ω fließen 2,5 Stunden lang 200 mA. Wie groß ist die entwickelte Wärme?

8. Bei verlustloser Umwandlung soll in 3,5 Stunden eine Wärme von 37800 kJ erzeugt werden. Welche elektrische Leistung ist dazu erforderlich?

4.12.2 Wärmewiderstand

Wärme wird über Wärmewiderstände weitergeleitet. Der gesamte Wärmewiderstand setzt sich aus dem inneren Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuseboden und dem äußeren Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und umgebendem Kühlmittel, z. B. Luft, zusammen **(Bild 1)**. Er wird in K/W angegeben.

Beispiel 1: Verlustleistung und Z-Strom berechnen

Eine Z-Diode mit $U_Z = 8{,}2$ V hat eine höchstzulässige Sperrschichttemperatur von 150 °C. Die Verlustleistung darf bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C höchstens 250 mW betragen. Wie groß dürfen Verlustleistung und Z-Strom bei einer Umgebungstemperatur von 45 °C sein?

Lösung:

$$P_{tot} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_U}{R_{th}}$$

$$\Rightarrow R_{th} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_U}{P_{tot25}} = \frac{(150 - 25)\ \text{K}}{250\ \text{mW}} = \mathbf{500\ K/W}$$

$$P_{tot45} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_U}{R_{th}} = \frac{(150 - 45)\ \text{K}}{500\ \text{K/W}} = 0{,}21\ \text{W} = \mathbf{210\ mW}$$

$$I_{Zmax} = \frac{P_{tot45}}{U_Z} = \frac{210\ \text{mW}}{8{,}2\ \text{V}} = \mathbf{25{,}6\ mA}$$

Beispiel 2: Wärmewiderstand berechnen

Ein Transistor soll mit einer Verlustleistung von 28 W betrieben werden. Die Sperrschichttemperatur soll 190 °C bei einer Umgebungstemperatur von 50 °C nicht überschreiten. Der innere Wärmewiderstand R_{thG} ist ≤ 1,5 K/W. $R_{thÜ}$ kann vernachlässigt werden. Welchen Wärmewiderstand muss der Kühlkörper haben?

Lösung:

$$R_{th} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_U}{P_v} = \frac{(190 - 50)\ \text{K}}{28\ \text{W}} = \mathbf{5\ K/W}$$

$$R_{th} = R_{thG} + R_{thÜ} + R_{thK}$$

$$\Rightarrow R_{thK} = R_{th} - R_{thG} - R_{thÜ}$$

$$= 5\ \text{K/W} - 1{,}5\ \text{K/W} - 0\ \text{K/W} = \mathbf{3{,}5\ K/W}$$

$$R_{thG} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{P_v}$$

$$R_{th} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_U}{P_v}$$

$$[R_{th}] = \text{K/W}$$

$$R_{th} = R_{thG} + R_{thÜ} + R_{thK}$$

$$g = \frac{t_i}{T}$$

ϑ_j, ϑ_U	Sperrschichttemperatur, Umgebungstemperatur		
ϑ_G, ϑ_K	Gehäusetemperatur, Kühlkörpertemperatur		
P_{tot}	höchstzulässige Verlustleistung		
P_v	Verlustleistung		
R_{th}	Ersatzwärmewiderstand		
R_{thG}	innerer Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse		
$R_{thÜ}$	Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper		
R_{thK}	Wärmewiderstand zwischen Kühlkörper und Kühlmittel		
g	Tastgrad		
t_i	Impulsdauer	T	Periodendauer

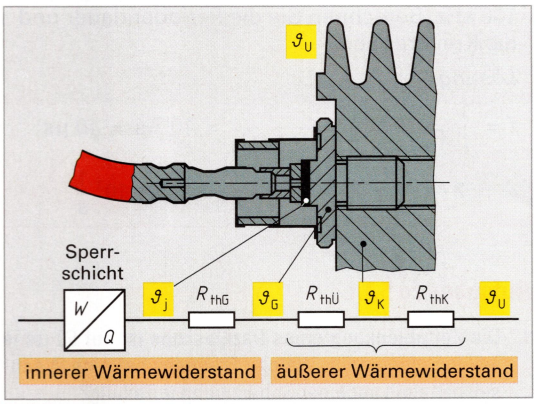

Bild 1: Ersatzwärmewiderstand

Aufgaben zu 4.12.2

1. Beim Transistor BD 130 sind die höchste zulässige Sperrschichttemperatur 200 °C und der Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Transistorgehäuse 1,5 K/W. Wie groß darf die Temperatur am Gehäuseboden bei einer Verlustleistung von 75 W höchstens sein?
2. Eine Diode 1N 4385 hat 80 K/W Wärmewiderstand und bei 30 °C Umgebungstemperatur eine Verlustleistung von 0,6 W. Wie groß ist die Sperrschichttemperatur?
3. Im Datenblatt für die Leistungs-Z-Diode ZY 91 (U_Z = 9,1 V) sind angegeben ϑ_{jmax} = 150 °C und P_{tot} = 1,32 W bei ϑ_U = 25 °C. Berechnen Sie den Wärmewiderstand und den höchstzulässigen Z-Strom für 45 °C Umgebungstemperatur und 130 °C Sperrschichttemperatur.
4. Ein Transistor mit R_{thG} = 200 K/W und ϑ_{jmax} = 175 °C wird bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C betrieben. Es werden gemessen: U_{CE} = –20 V und I_C = –10 mA. Der äußere Wärmewiderstand beträgt 300 K/W. Begründen Sie, ob der Transistor überlastet wird.

vel.plus/
MELGS23

5 Wechselstromtechnik

5.1 Wechselgrößen

5.1.1 Periode, Frequenz, Kreisfrequenz, Wellenlänge

Die Frequenz gibt die Anzahl der Perioden je Sekunde an. Die Zeitdauer einer vollständigen Schwingung ist die Periodendauer **(Bild 1)**.

Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei Stellen gleichen Schwingungszustandes, z. B. zweier Verdichtungsstellen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen in Luft und im Vakuum ist etwa 300 000 km/s (Lichtgeschwindigkeit), in Metallen oder Glas ist sie etwa 240 000 km/s.

Die Frequenz der Wechselspannung eines Maschinengenerators hängt von der Polpaarzahl und der Drehzahl ab.

Beispiel 1: Wechselgrößen berechnen

Ein Generator erzeugt Wechselspannung mit 100 kHz. Berechnen Sie die Periodendauer und die Kreisfrequenz.

Lösung:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100\ \text{kHz}} = 10^{-5}\ \text{s} = \mathbf{10\ \mu s}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 100\ \text{kHz} = \mathbf{628 \cdot 10^3\ \frac{1}{s}}$$

Aufgaben zu 5.1.1

1. Die Zeitablenkung eines Oszilloskops ist auf 50 µs je Teilung eingestellt. Welche Frequenz hat eine Wechselspannung mit einer Schwingung je Teilung?
2. Eine Periode nimmt auf dem Oszilloskopschirm 6,2 Teilungen ein. Die Zeitablenkung ist 20 µs je Teilung. Wie groß ist die Frequenz?
3. Die Monitorfrequenz eines PC-Monitors beträgt 75 Hz. Welche Zeit vergeht zwischen zwei Bildern?
4. Eine Warnleuchte blinkt 84-mal je Minute. Die Pausendauer ist 3-mal so lange wie die Leuchtdauer. Wie lange leuchtet die Lampe jeweils auf?
5. Rotes Licht hat eine Wellenlänge von 710 nm. Welche Frequenz hat diese Strahlung?
6. Eine Richtantenne besteht aus einem 0,75 m langen Dipol. Auf welche Frequenz ist die Antenne abgestimmt, wenn die Dipollänge $\lambda/2$ beträgt (c = 240 000 km/s)?

$$f = \frac{1}{T} \qquad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad f = p \cdot n$$

$$[f] = 1/\text{s} = \text{Hz}; \quad [\omega] = 1/\text{s}; \quad [\lambda] = \frac{\text{m/s}}{1/\text{s}} = \text{m}$$

f	Frequenz	T	Periodendauer
ω	Kreisfrequenz (ω griech. Kleinbuchstabe Omega)		
λ	Wellenlänge (λ griech. Kleinbuchstabe Lambda)		
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit		
p	Polpaarzahl		
n	Drehzahl, Umdrehungsfrequenz		

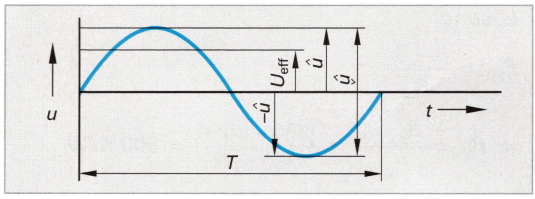

Bild 1: Wechselgrößen

5.1.2 Maximalwert, Spitze-Tal-Wert, Effektivwert

Bei Wechselgrößen unterscheidet man Augenblickswert, Maximalwert, Spitze-Tal-Wert (Schwingungsbreite, Hub) und Effektivwert. Bei Sinusschwingungen wird der Maximalwert Amplitude genannt.

Bei symmetrischen Schwingungsformen:

$$\hat{\underset{\smile}{u}} = 2 \cdot \hat{u} \qquad \hat{\underset{\smile}{i}} = 2 \cdot \hat{i}$$

$$\hat{u} = F_c \cdot U \qquad \hat{i} = F_c \cdot I$$

Bei Sinusform:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U \qquad \hat{i} = \sqrt{2} \cdot I$$

$\hat{\underset{\smile}{u}}, \hat{\underset{\smile}{i}}$	Spitze-Tal-Werte (u_{pp}, i_{pp})		
$\hat{u}, \hat{i}$	Maximalwerte	$\check{u}, \check{i}$	Minimalwerte
U, I	Effektivwerte (U_{eff}, I_{eff})		
F_c	Scheitelfaktor, Crestfaktor (crest = Gipfel)		

Der Effektivwert ist vom Maximalwert und vom Scheitelfaktor **(Tabelle 1)** abhängig. Mit dem Oszilloskop lassen sich die Ablenkungen in Teilungen ablesen und mit den eingestellten Ablenkkoeffizienten (V/Teilung bzw. s/Teilung) Spannungen und Zeiten berechnen.

Der Augenblickswert einer Wechselgröße kann mit der Sinusfunktion berechnet werden (Aufgaben zur Berechnung des Augenblickswertes siehe Seite Graphen der Sinusfunktion und der Kosinusfunktion im Kapitel »Ergänzendes Fachwissen Mathematik«).

Beispiel 1: Augenblickswert berechnen

Ein sinusförmiger Strom mit 400 Hz hat eine Amplitude von 4 mA. Wie groß ist sein Augenblickswert 350 µs nach ansteigendem Nulldurchgang?

Lösung:

Taschenrechner auf RAD einstellen.

$i = \hat{\imath} \cdot \sin \omega t = 4\,\text{mA} \cdot \sin(2\pi \cdot 400\,\text{Hz} \cdot 0{,}000\,35\,\text{s})$

$= 4\,\text{mA} \cdot \sin 0{,}88 = 4\,\text{mA} \cdot 0{,}771 = \mathbf{3{,}08\,mA}$

Tabelle 1: Scheitelfaktoren (Crestfaktoren)

Schwingungsform	Scheitelfaktor F_c
Sinus	$\sqrt{2} \approx 1{,}414$
Dreieck, Sägezahn	$\sqrt{3} \approx 1{,}732$
Rechteck, symmetrisch	1,00

$u = y \cdot A_y$ | $t = x \cdot A_x$

$u = \hat{u} \cdot \sin \omega t$ | $i = \hat{\imath} \cdot \sin \omega t$

i, u	Augenblickswerte
t	Zeit
A_x, A_y	Ablenkkoeffizienten
x, y	Ablenkung in x-Richtung bzw. y-Richtung
$\hat{u}, \hat{\imath}$	Maximalwerte, Amplituden
ω	Kreisfrequenz
ωt	Winkel in der Einheit rad ($2\pi \triangleq 360°$)

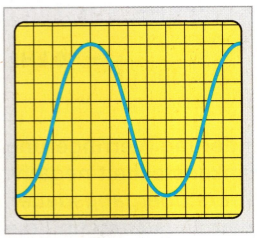

Bild 1: Schirmbild 1 eines Oszilloskops

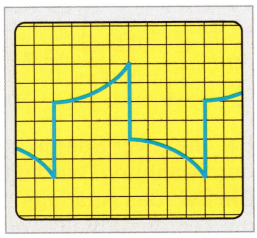

Bild 2: Schirmbild 2 eines Oszilloskops

Bei Berechnung von sin ωt mit dem Taschenrechner gilt:

$\omega = 2\pi f \Rightarrow$ Einstellung RAD

$\omega = 360° \cdot f \Rightarrow$ Einstellung DEG

Umschalten mit Taste DRG oder im SETUP.

Aufgaben zu 5.1.2

1. Eine Diode wird bei einer Sinusspannung von $U = 6{,}36$ V mit dem Spitze-Tal-Wert belastet. Berechnen Sie die Spitze-Tal-Spannung.

2. Die Isolation einer Leitung hält höchstens 1000 V Gleichspannung aus. Prüfen Sie nach, ob 700 V Sinusspannung eine höhere Amplitude hat.

3. Berechnen Sie Amplitude und Spitze-Tal-Wert der Netzspannung von 230 V.

4. Berechnen Sie Amplitude und Spitze-Tal-Wert der Sinusgrößen a) $I = 365$ mA, b) $U = 6$ V, c) $I = 2{,}4$ A, d) $I_{eff} = 2{,}4$ A, e) $U = 42$ V, f) $U = 740$ V.

5. Mit einem Oszilloskop wird eine Spannung dargestellt **(Bild 1)**. Eingestellt sind für die x-Achse 20 µs je Teilung und für die y-Achse 50 mV je Teilung. Berechnen Sie $\hat{u}$, $\hat{\underline{u}}$, U, T und f.

6. An einem 2,2-kΩ-Widerstand mit 0,25 W Bemessungsleistung wird die Wechselspannung oszilloskopiert **(Bild 2)**. Ihr Scheitelfaktor beträgt 2,1. Der eingestellte Zeitmaßstab ist 1 µs je Teilung, der Spannungsmaßstab 5 mV je Teilung. Wie groß sind a) Maximalwert des Wechselstromes im Widerstand, b) Zeitdauer einer Halbperiode, c) Frequenz?

7. Eine Gleichspannung mit überlagerter Sägezahn-Wechselspannung wird mit einem Oszilloskop (DC) gemessen. Das Gerät zeigt 7,8 V Maximalwert an. Der Gleichspannungsanteil beträgt 5 V. Wie groß ist die überlagerte Wechselspannung U?

8. Eine Relais-Widerstandswicklung mit 70 Ω wird an eine Wechselspannung gelegt mit a) 8,8 V Maximalwert und Sägezahnform, b) 5,8 V Effektivwert und Sinusform. Wie groß ist jeweils der Effektivwert des Stromes?

5.1.3 Impulse

vel.plus/ MELGS24

Impulse (von lat. impulsus = Stoß) sind Ströme oder Spannungen, welche nur kurze Zeit vorhanden sind (**Bild 1** und **Bild 1,** folgende Seite).

Folgen gleiche Impulse durch Pausen unterbrochen einander periodisch, so besteht ein Pulsvorgang (Puls, **Bild 2,** folgende Seite).

Impulse sind einzelne Stromstöße oder Spannungsstöße. Periodisch folgende Impulse sind ein Puls.

Der Tastgrad eines Pulses gibt das Verhältnis der Impulsdauer zur Pulsperiodendauer an. Der Tastgrad wird auch als Duty Cycle bezeichnet.

Beispiel 1: Puls berechnen

Eine bistabile Kippschaltung wird von Rechteckimpulsen mit 20 µs Impulsdauer und 80 µs Pausendauer angesteuert. Wie groß sind Periodendauer, Tastgrad und Pulsfrequenz?

Lösung:

$T = t_i + t_p = 20\ \mu s + 80\ \mu s = \mathbf{100\ \mu s}$

$g = \frac{t_i}{T} = \frac{20\ \mu s}{100\ \mu s} = \mathbf{0{,}2};\ f = \frac{1}{T} = \frac{1}{100\ \mu s} = \mathbf{10\ kHz}$

Bei negativer Spannungsänderung (Verringerung der Spannung) wird die Flankensteilheit negativ. Die Zeit des Anstiegs heißt *Erstübergangsdauer,* die Zeit des Abfalls *Letztübergangsdauer* und die Pausendauer *Impulsabstand.*

Die Erstübergangsdauer und die Letztübergangsdauer werden zwischen 10 % und 90 % des Maximalwertes des Impulses abgelesen.

Beispiel 2: Impuls berechnen

Bestimmen Sie von dem nach **Bild 2** oszilloskopierten Impuls die Erstübergangsdauer t_r (r von to rise = ansteigen), die Letztübergangsdauer t_f (f von to fall = fallen, abfallen), die Impulsdauer t_i und die Flankensteilheiten S_r für die Vorderflanke und S_f für die Rückflanke.

Lösung: Aus Bild 2 abgelesen:

$t_r = 6{,}4 \cdot 2\ \mu s = \mathbf{12{,}8\ \mu s};\ t_f = 0{,}88 \cdot 2\ \mu s = \mathbf{1{,}76\ \mu s}$

$t_i = 4{,}5 \cdot 2\ \mu s = \mathbf{9\ \mu s};\quad \Delta u = 5 \cdot 5\ mV = 25\ mV$

$S_r = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{25\ mV}{8 \cdot 2\ \mu s} = \mathbf{1{,}56\ \frac{V}{ms}}$

$S_f = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{-25\ mV}{1{,}1 \cdot 2\ \mu s} = \mathbf{-11{,}36\ \frac{V}{ms}}$

$v = \frac{T}{t_i}$ $\quad g = \frac{t_i}{T}$

$T = t_i + t_p$ $\quad f = \frac{1}{T}$

v Tastverhältnis (kein Normbegriff)
T Pulsperiodendauer
t_i Impulsdauer
g Tastgrad
f Pulsfrequenz
t_p Pausendauer (Impulsabstand)

$[S] = \frac{V}{s}$ $\quad S_\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta t}$

S_Δ Flankensteilheit
Δu Spannungsdifferenz
Δt Zeitdifferenz

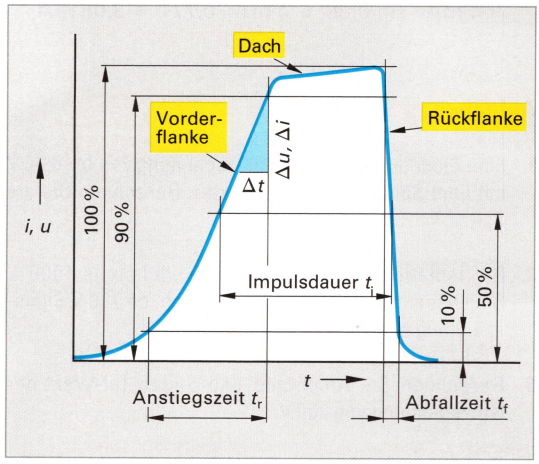

Bild 1: Impulsgrößen

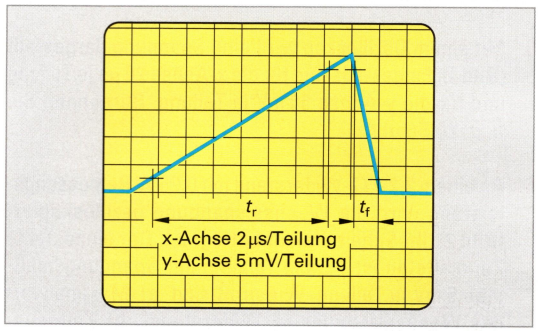

Bild 2: Dreieckimpuls

Aufgaben zu 5.1.3

1. Ein trapezförmiger Impuls mit 4,8 V Amplitude hat 3,2 µs Erstübergangsdauer und 7,3 µs Letztübergangsdauer. Wie groß sind a) Steilheit der Vorderflanke, b) Steilheit der Rückflanke?

2. Ein sägezahnförmiger Impuls hat bei 0,264 µs Erstübergangsdauer eine Flankensteilheit von 5,3 V/µs. Die Letztübergangsdauer beträgt 34 ns. Wie groß sind a) Amplitude der Impulsspannung, b) Steilheit der Rückflanke?

3. Der Impuls von **Bild 3** soll bei gleicher Amplitude zeitlich gedehnt werden, sodass die Steilheit der Vorderflanke 12 V/ms beträgt. Berechnen Sie die Erstübergangsdauer.

4. Die Amplitude des Impulses von **Bild 2,** vorhergehende Seite soll bei gleich bleibenden Übergangsdauern so verändert werden, dass die Steilheit der Rückflanke –18 V/ms erreicht. Berechnen Sie a) Amplitude, b) Steilheit der Vorderflanke.

5. Der Trapezimpuls in **Bild 4** wird mit dem Oszilloskop gemessen (A_x = 50 µs/Teilung; A_y = 10 mV/Teilung). Bestimmen Sie a) Erstübergangsdauer, b) Letztübergangsdauer, c) Steilheit der Rückflanke, d) Impulsdauer.

6. In **Bild 4** hat die Vorderflanke des trapezförmigen Impulses 75 V/ms Steilheit. Die Amplitude beträgt 1,5 V. Berechnen Sie a) Ablenkkoeffizienten der y-Achse, b) Erstübergangsdauer, c) Letztübergangsdauer, d) Steilheit der Rückflanke, e) Impulsdauer.

7. Ein Impulsgenerator gibt Impulse mit 1 MHz und 320 ns Impulsdauer ab. Wie groß sind Impulsabstand und Tastgrad?

8. Ein Rechteck-Pulsvorgang mit 2 kHz weist 400 µs Impulsabstand auf. Berechnen Sie Impulsdauer, Tastverhältnis und Tastgrad.

9. Berechnen Sie vom Rechteckimpuls in **Bild 4** a) Impulsdauer, b) Impulsabstand, c) Periodendauer, d) Pulsfrequenz, e) Tastgrad (A_x = 0,2 ms/Teilung; A_y = 0,5 V/Teilung).

10. Bestimmen Sie vom Trapezimpuls in **Bild 4** a) Impulsdauer, b) Periodendauer, c) Impulsabstand, d) Pulsfrequenz, e) Tastgrad (A_x = 0,2 ms/Teilung; A_y = 0,5 V/Teilung).

11. Die Ansteuerimpulse eines Zählers werden nacheinander mit verschiedenen Ablenkkoeffizienten oszilloskopiert **(Bild 3).** Bestimmen Sie a) Erstübergangsdauer, Letztübergangsdauer, Impulsdauer und Steilheit der Vorderflanke eines Impulses, b) Periodendauer, Tastgrad, Tastverhältnis und Pulsfrequenz.

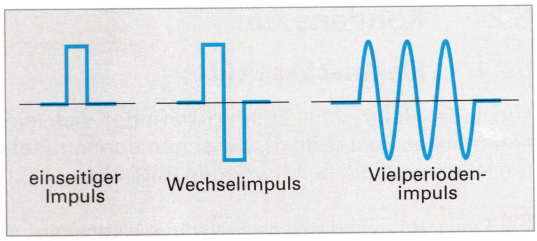

Bild 1: Impulsarten

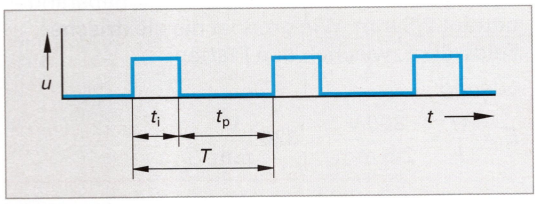

Bild 2: Spannungspuls

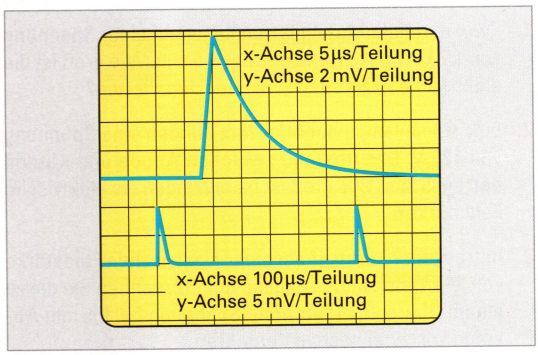

Bild 3: Nadelimpulse

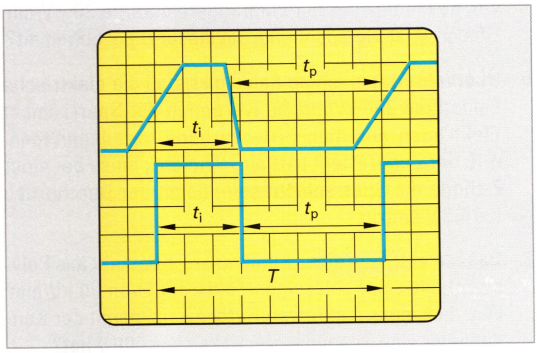

Bild 4: Trapezimpuls und Rechteckimpuls

12. Eine Steuerschaltung spricht nur auf Impulse mit mindestens 70 V/ms Flankensteilheit bei einem Tastverhältnis von mindestens 6 an. a) Welche Erstübergangsdauer darf ein Rechteckimpuls mit 3,8 V Maximalwert höchstens haben? b) Welche Pulsfrequenz darf bei 150 µs Impulsdauer nicht unterschritten werden?

vel.plus/ MELGS25

5.2 Kondensator

5.2.1 Elektrisches Feld

Um jede elektrische Ladung befindet sich ein elektrisches Feld **(Bild 1)**. Zwischen ebenen Platten ist dieses Feld fast homogen **(Bild 2)**.

Beispiel 1: Elektrische Feldstärke berechnen

Zwischen zwei parallelen Metallplatten liegt eine Spannung von 800 V. Der Plattenabstand beträgt 2,5 mm. Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten?

Lösung:

$$E = \frac{U}{l} = \frac{800\ \text{V}}{2{,}5\ \text{mm}} = \mathbf{320\ \frac{V}{mm}}$$

Aufgaben zu 5.2.1

1. Zwei parallele Metallplatten liegen an einer Spannung von 1,2 kV. Ihr Abstand beträgt 3,5 mm. Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten?
2. Eine Glimmlampe benötigt zum Zünden eine Spannung von 125 V. Der Abstand zwischen Anode und Katode beträgt 5 mm. Wie groß ist beim Zünden die elektrische Feldstärke?
3. In trockener Luft tritt bei einer elektrischen Feldstärke von 30 kV/cm ein Überschlag auf. Berechnen Sie die zu einem Überschlag führende Spannung bei 0,5 mm Abstand von zwei flachen Kontakten.
4. An einem Dipol mit einer elektrisch wirksamen Länge von 80 cm beträgt die Empfangsfeldstärke 30 µV/cm. Wie groß ist die Spannung, die dieser Dipol aufnimmt?
5. Überschreitet in einem Siliciumkristall die elektrische Feldstärke 200 kV/cm, so werden in der Sperrschicht Elektronen aus dem Gitterverband herausgerissen, d.h. der Zenereffekt tritt auf. Wie dick muss bei einer Z-Diode die Sperrschicht sein, damit der Durchbruch bei 4,3 V eintritt?
6. Das Dielektrikum eines Kondensators besteht aus Polystyrol mit einer zulässigen Feldstärke von 30 kV/mm. Wie dick muss die Polystyrolfolie sein, damit der Kondensator eine Spannungsfestigkeit von 500 V hat?
7. Ein Entstörkondensator wird aus 2,5 µm dicken metallisierten Polypropylenfolien mit der Durchschlagfestigkeit von 650 kV/mm gewickelt. Welche Bemessungsspannung hat der Kondensator, wenn diese 20 % geringer als die Durchschlagspannung ist?

Bei homogenem Feld:

$$[E] = \frac{\text{V}}{\text{m}} \qquad E = \frac{U}{l}$$

E elektrische Feldstärke
U Spannung zwischen den geladenen Körpern
l Abstand der geladenen Körper voneinander

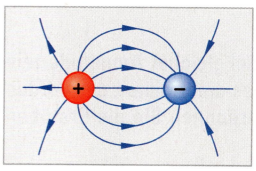

Bild 1: Elektrisches Feld zwischen Punktladungen

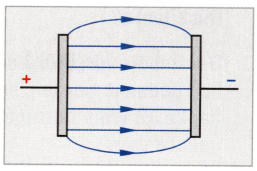

Bild 2: Homogenes elektrisches Feld zwischen den Platten

5.2.2 Ladung und Kapazität

Im Kondensator können elektrische Ladungen gespeichert werden. Die Spannung ist verhältnisgleich zur Ladung. Die Einheit der Ladung ist die Amperesekunde mit dem besonderen Einheitennamen Coulomb[1] (C). Die Einheit der Kapazität ist die Amperesekunde je Volt mit dem besonderen Einheitennamen Farad[2] (F).

$$[Q] = \text{As} = \text{C} \qquad Q = I \cdot t$$

$$[C] = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F} \qquad Q = C \cdot U$$

$$[\Delta U] = \frac{\text{As}}{\text{F}} = \text{V} \qquad \Delta U = \frac{I \cdot \Delta t}{C}$$

Q elektrische Ladung
I konstante Stromstärke
t Zeit
C Kapazität
U Spannung
ΔU Spannungsänderung
Δt Zeit, in der die Spannungsänderung erfolgt

Beispiel 2: Ladestromstärke berechnen

An einem Kondensator mit 47 nF steigt die Spannung innerhalb von 18 ms gleichmäßig um 34 V. Wie groß ist die Ladestromstärke?

Lösung:

$$\Delta U = \frac{I \cdot \Delta t}{C} \Rightarrow I = \frac{C \cdot \Delta U}{\Delta t} = \frac{47\ \text{nF} \cdot 34\ \text{V}}{18\ \text{ms}} = \mathbf{88{,}78\ \mu A}$$

[1] Charles Augustin De Coulomb, franz. Physiker, 1736 bis 1806
[2] Michael Faraday, engl. Physiker, 1791 bis 1867

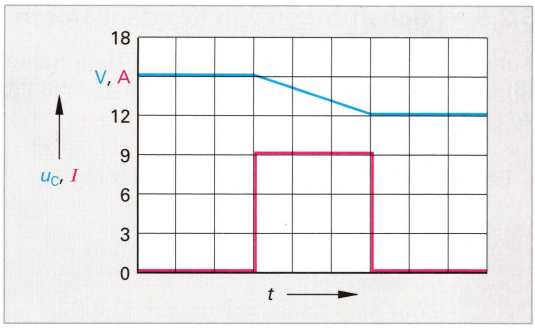

Bild 1: Kondensatorentladung

Aufgaben zu 5.2.2

1. Ein Kondensator mit 27 pF liegt an 70 V. Berechnen Sie die Ladung des Kondensators.

2. Berechnen Sie die maximal speicherbare elektrische Ladung in einem
   a) Lithium-Ionen-Kondensator mit 2200 F an 3,8 V,
   b) Kondensator-Hochvolt-Modul mit 62 F für 125 V.

3. Ein Kondensator nimmt an 15 V Gleichspannung eine Ladung von 4,05 nC auf. Wie groß ist die Kapazität?

4. Wenn man einen Kondensator an eine Spannung von 24 mV legt, so fließen 43,2 pAs in den Kondensator. Wie groß ist die Kapazität?

5. Ein Kondensator mit 10 nF wird über einen Transistor geladen. Es fließt 2 ms lang ein Ladestrom von 4 mA. Auf welche Spannung wird der Kondensator geladen?

6. Aus einem Kondensator mit 5 µF fließt 3,2 ms lang ein konstanter Endladestrom von 1,6 mA. Die Kondensatorspannung ist danach 0 V. Auf welche Spannung war der Kondensator geladen?

7. Wie groß ist die Spannungsabnahme an einem Kondensator mit 100 µF, wenn die Entladestromstärke während 3 s gleichmäßig 20 mA beträgt?

8. Wie groß muss an einem Kondensator mit 12 nF die Ladestromstärke sein, damit die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit 5 V/µs beträgt?

9. Einem Kondensatormodul mit 16 F wird elektrische Energie entnommen **(Bild 1)**. Berechnen Sie
   a) die Dauer der Entladung,
   b) die entnommene Ladungsmenge.

5.2.3 Kraftwirkung und Energie des elektrischen Feldes

Auf einen elektrisch geladenen Körper wird im elektrischen Feld eine Kraft ausgeübt.

$$[F] = \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot \text{C} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}} = \text{N} \qquad F = E \cdot Q$$

$$[W] = \text{F} \cdot \text{V}^2 = \text{Ws} = \text{J} \qquad W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

F Kraft auf einen geladenen Körper
E elektrische Feldstärke
Q elektrische Ladung des Körpers
W elektrische Energie
C Kapazität
U Spannung

Beispiel 1: Elektrische Feldstärke berechnen

In einem elektrischen Feld wirkt auf einen Körper mit der Ladung $Q = 10$ mC eine Kraft von 2,6 N. Wie groß ist die elektrische Feldstärke?

Lösung:

$$F = E \cdot Q \Rightarrow E = \frac{F}{Q} = \frac{2{,}6\ \text{N}}{10\ \text{mC}} = \mathbf{260\ \frac{V}{m}}$$

Aufgaben zu 5.2.3

1. In einem analogen Oszilloskop liegt an den Ablenkplatten eine Spannung $U = 3{,}6$ kV. Der Plattenabstand beträgt 8 mm. Mit welcher Kraft wird ein Elektron mit der Elementarladung $Q = 0{,}1602$ aC abgelenkt?

2. Beim elektrostatischen Lackieren mit einer Spannung von 70 kV legen die zerstäubten Farbpartikel Entfernungen zwischen 20 cm und 30 cm zurück. Berechnen Sie die maximale Kraft F_{max}, die auf einen auf 6 mAs aufgeladenen Farbpartikel wirkt.

3. Zum Aufbau des elektrischen Feldes an einem Kondensator wird eine Ladung von 0,75 C zugeführt. Die Spannung am Kondensator beträgt nach dem Ladevorgang 370 V.
   a) Welche elektrische Energie ist im elektrischen Feld gespeichert?
   b) Welche Kapazität besitzt der Kondensator?

4. Berechnen Sie die speicherbare Energie eines Kondensator-Hochvoltmoduls mit 62 F und 125 V und vergleichen Sie diese mit der eines Rasenmäherakkus mit 36 V und 4 Ah.

vel.plus/ MELGS26

5.2.4 Kapazität

Die Kapazität eines Kondensators hängt von seinem Aufbau ab.

$$\varepsilon_0 = 8{,}85\ \text{pC/(Vm)} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{l}$$

C Kapazität
ε_0 elektrische Feldkonstante
ε_r Permittivitätszahl
A gleichartig geladene Plattenoberfläche, wirksame Folienoberfläche
l Abstand der Leiterflächen, Plattenabstand

Aufgaben zu 5.2.4

1. Ein Keramikkondensator ($\varepsilon_r = 45$) hat eine wirksame Plattenoberfläche von 2,21 cm². Die Keramikschicht ist 0,4 mm dick. Wie groß ist die Kapazität?

2. Ein Kunststofffolien-Kondensator mit 150 nF hat eine wirksame Oberfläche von 3000 cm². Zwischen den Metallfolien befindet sich eine Kunststofffolie ($\varepsilon_r = 4$). Wie dick ist diese Kunststofffolie?

3. Ein Tantalkondensator ($\varepsilon_r = 26$) mit 6,8 µF hat eine wirksame Oberfläche von 800 mm × 25 mm. Wie dick ist die Tantalpentoxidschicht, die als Dielektrikum wirkt?

4. Es soll ein Glimmerkondensator ($\varepsilon_r = 8$) für eine Betriebsspannung von 2 kV mit vierfacher Sicherheit gebaut werden. Die Durchschlagsfestigkeit (Durchschlagsfeldstärke) von Glimmer beträgt 25 kV/mm. Ermitteln Sie für einen Kondensator mit 820 pF
   a) Dicke der Glimmerschicht,
   b) wirksame Oberfläche einer Platte.

5. Ein Scheibchenkondensator mit 47 pF hat als Dielektrikum Keramik ($\varepsilon_r = 80$). Das Keramikscheibchen ist 2 mm dick. Wie groß ist der Durchmesser der kreisförmigen Metallbeläge?

6. Ein Aluminium-Elektrolytkondensator ($\varepsilon_r = 9$) liegt an 6,3 Volt und weist eine Feldstärke von 715,9 V/µm auf. Seine Kapazität beträgt 10000 µF. Berechnen Sie
   a) den Abstand der aufgerauten Aluminiumfolien,
   b) deren wirksame Folienoberfläche und
   c) den Faktor, um welchen sich die wirksame Folienoberfläche durch das Aufrauen erhöht hat, wenn die wirksame Folienoberfläche im glatten Zustand 100 cm² betragen würde.

5.2.5 Schaltungen von Kondensatoren

Kondensatoren können parallel **(Bild 1)**, in Reihe **(Bild 2)**, oder als gemischte Schaltung geschaltet werden.

Bei Parallelschaltung:

$$C = C_1 + C_2 + \ldots$$

Bei Reihenschaltung:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots$$

Bei nur zwei Kondensatoren in Reihe:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \qquad \frac{C_1}{C_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

C Ersatzkapazität
C_1, C_2 Einzelkapazitäten
U_1, U_2 Teilspannungen

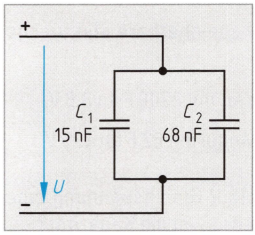

Bild 1: Parallelschaltung von Kondensatoren

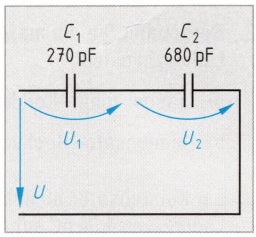

Bild 2: Reihenschaltung von Kondensatoren

Aufgaben zu 5.2.5

1. Zwei Kondensatoren sind nach **Bild 1** geschaltet. Wie groß ist die Ersatzkapazität?

2. Ein Kondensator von 470 pF soll mit einem zweiten parallel geschaltet werden, sodass die Ersatzkapazität 1,15 nF beträgt. Wie groß muss die zweite Kapazität sein?

3. Wie groß ist die Ersatzkapazität, wenn zwei Kondensatoren nach **Bild 2** geschaltet sind?

4. Drei Kondensatoren mit 150 pF, 820 pF und 1,2 nF sind in Reihe geschaltet. Wie groß ist die Ersatzkapazität?

5. Welche Kapazität muss einem Kondensator von 560 pF vorgeschaltet werden, damit die Ersatzkapazität 208 pF beträgt?

6. Ein auf 2 V geladener Gold-Kondensator mit einer Kapazität von 0,4 F und ein ungeladener Kondensator gleicher Kapazität werden über einen Schalter parallel verbunden. Berechnen Sie die gespeicherte elektrische Energie beider Kondensatoren vor und nach dem Schaltvorgang.

5.2.6 RC-Schaltung an Gleichspannung und Rechteckspannung

Das Produkt Widerstand mal Kapazität nennt man Zeitkonstante τ.

Beim Laden und Entladen eines Kondensators an Gleichspannung verlaufen Strom und Spannung nach Exponentialfunktionen **(Bild 1)**. Die Spannung ist nach 1τ beim Laden auf 63 % der Endspannung gestiegen, beim Entladen auf 37 % der Anfangsspannung gesunken. Der Strom sinkt beim Laden oder beim Entladen nach 1τ auf 37 % seines Anfangswertes. Jeweils nach 5τ ist die Ladung oder die Entladung fast beendet.

Beispiel 1: Kapazität berechnen

Die Zeitkonstante eines RC-Gliedes beträgt 0,2 µs. Wie groß ist die Kapazität, wenn der Widerstand 2,2 kΩ hat?

Lösung:

$$\tau = R \cdot C \Rightarrow C = \frac{\tau}{R} = \frac{0{,}2\ \mu s}{2{,}2\ k\Omega} = \mathbf{90{,}91\ pF}$$

$$[\tau] = \Omega \cdot F = \frac{V}{A} \cdot \frac{As}{V} = s \qquad \tau = R \cdot C$$

Beim Laden:

$$u_C = U_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \qquad i_C = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-t/\tau}$$

Beim Entladen:

$$u_C = U_0 \cdot e^{-t/\tau} \qquad i_C = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-t/\tau}$$

τ Zeitkonstante (τ griech. Kleinbuchstabe „Tau")
R Widerstand
C Kapazität
u_C Spannung am Kondensator
U_0 Spannung des Spannungserzeugers, Spannung des geladenen Kondensators
t Zeit
i_C Ladestromstärke, Entladestromstärke

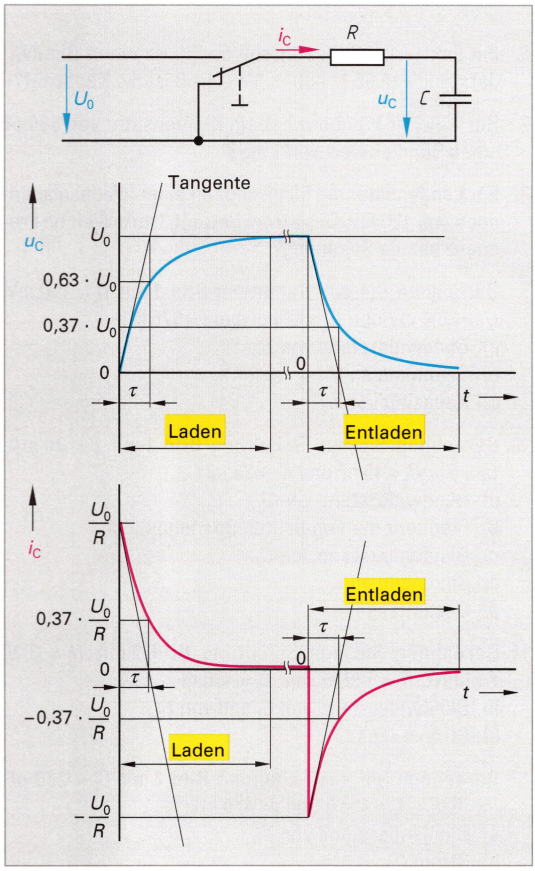

Bild 1: Laden und Entladen eines Kondensators an Gleichspannung über einen Widerstand

Aufgaben zu 5.2.6

1. Berechnen Sie die Zeitkonstante eines RC-Gliedes mit $R = 560\ k\Omega$ und $C = 0{,}1\ \mu F$.
2. Wie groß ist die Zeitkonstante bei $R = 18\ k\Omega$ und $C = 15\ nF$.
3. Die Zeitkonstante des RC-Gliedes beträgt 360 ms. Wie groß ist der Widerstand, wenn die Kapazität 200 µF ist?
4. Die Zeitkonstante des RC-Gliedes beträgt 28 ms. Berechnen Sie den Kondensator, wenn der Widerstand 5,6 kΩ ist.
5. Ein auf 20 V geladener Kondensator wird über einen Spannungsmesser mit $R_i = 50\ k\Omega$ entladen. Nach 2,5 s beträgt die Kondensatorspannung noch 7,4 V. Wie groß ist die Kapazität?
6. Ein Kondensator mit 50 µF wird über einen Widerstand an eine Gleichspannung von 50 V gelegt. Nach 9 s ist der Kondensator auf 31,5 V geladen. Wie groß ist der Widerstand?
7. Ein Kondensator von 15 nF wird über einen Widerstand von 680 kΩ an 120 V Gleichspannung gelegt. a) Berechnen Sie die Kondensatorspannung nach einer Ladezeit von 60 ms. b) Wie groß ist dann der Ladestrom?
8. Ein Timer-IC hat eine Schaltschwelle u_C bei zwei Drittel der Spannung U_0. a) Stellen Sie die Formel für u_C für den Ladevorgang nach der Zeit t um. b) Ermitteln Sie die Schaltzeit des Timer-ICs in Abhängigkeit von τ.

5.2.7 Kapazitiver Blindwiderstand

Der Kondensator wirkt im Wechselstromkreis als Blindwiderstand X_C. Den Kehrwert des kapazitiven Blindwiderstandes nennt man kapazitiven Blindleitwert B_C.

$$[X_C] = \frac{s}{F} = \frac{s \cdot V}{As} = \Omega \qquad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} \qquad X_C = \frac{U_{bC}}{I}$$

X_C	kapazitiver Blindwiderstand
ω	Kreisfrequenz
C	Kapazität
U_{bC}	kapazitive Blindspannung
I	Stromstärke
B_C	kapazitiver Blindleitwert

Aufgaben zu 5.2.7

1. Wie groß ist bei 50 Hz der kapazitive Blindwiderstand eines Kondensators mit 1 µF?
2. Berechnen Sie für $f = 800$ kHz und $C = 18$ nF
   a) Blindwiderstand,
   b) Blindleitwert.
3. Ein Kondensator mit 680 pF liegt an 1,6 MHz 12 V. Wie groß ist der Strom?
4. Wie groß ist der Spannungsfall, wenn in einen Kondensator von 47 nF ein Strom von 460 kHz 5 mA fließt?
5. In einen Kondensator, der an einer Wechselspannung von 6 V 120 kHz liegt, fließt ein Strom von 1,22 mA. Wie groß ist die Kapazität?
6. Ein Emitterkondensator soll bei 30 Hz einen Blindwiderstand von 56 Ω haben. Wie groß ist die Kapazität?
7. Bei welcher Frequenz hat ein Kondensator von 680 pF einen Blindleitwert von 1 mS?
8. Ein Kondensator mit 50 nF liegt an einer Wechselspannung von 120 mV. Der Strom beträgt 3 mA. Welche Frequenz hat die Spannung?
9. Berechnen Sie aus Schaltung **Bild 1** mit $U = 150$ mV, $U_1 = 36{,}4$ mV und $C_1 = 470$ pF bei $f = 575$ kHz
   a) Blindwiderstand von C_1,
   b) Spannung an C_2,
   c) Kapazität von C_2.
10. Berechnen Sie aus Schaltung **Bild 1** mit $I = 20$ mA, $U_1 = 5$ V, $C_1 = 15$ nF und $C_2 = 33$ nF
    a) Blindwiderstand von C_1,
    b) Frequenz der angelegten Spannung,
    c) Blindwiderstand von C_2,
    d) Spannung an C_2,
    e) Gesamtspannung.
11. Berechnen Sie aus Schaltung **Bild 2** mit $U = 3$ V, $f = 1$ kHz, $C_1 = 120$ nF und $C_2 = 470$ nF
    a) Blindwiderstand von C_1 und von C_2,
    b) Ströme I_1 und I_2.
12. Berechnen Sie aus Schaltung **Bild 2** mit $C_1 = 220$ pF, $I = 10$ mA, $I_2 = 4$ mA und $f = 470$ kHz
    a) Blindwiderstand von C_1,
    b) Strom I_1,
    c) Spannung U,
    d) Kapazität von C_2.

Beispiel 1: Kapazitiven Blindwiderstand berechnen

Bei welcher Frequenz hat ein Kondensator mit $C = 2{,}2$ nF den kapazitiven Blindwiderstand von 3,62 kΩ?

Lösung:

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

$$\Rightarrow f = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 2{,}2\ \text{nF} \cdot 3{,}62\ \text{k}\Omega} = \mathbf{20\ kHz}$$

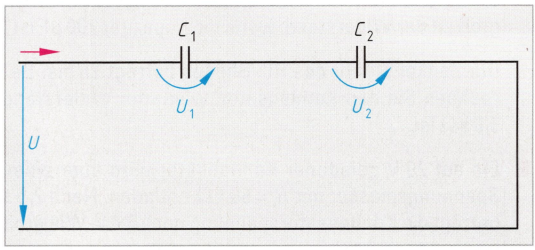

Bild 1: Reihenschaltung

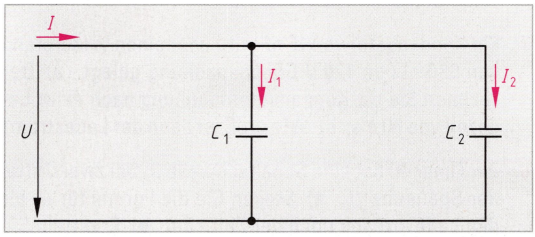

Bild 2: Parallelschaltung

5.3 Spule

5.3.1 Elektromagnetismus

5.3.1.1 Magnetische Grundgrößen

Die *Durchflutung* Θ ist das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl **(Bild 1)**. Die Durchflutung bewirkt im Innern der Spule die *magnetische Feldstärke H* und den *magnetischen Fluss* Φ.

Die Einheit des magnetischen Flusses ist Voltsekunde (Vs) mit dem Einheitennamen Weber[1] (Wb).

Die *magnetische Flussdichte B* (magnetische Induktion) gibt den magnetischen Fluss einer Spule an, der eine Flächeneinheit durchstößt. Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist Voltsekunde je Meterquadrat (Vs/m²) mit dem Einheitennamen Tesla[2] (T).

Beispiel 1: Magnetische Größen berechnen

Eine Spule mit 9 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von 12 cm wird von 2,5 A durchflossen. Berechnen Sie a) Durchflutung, b) magnetische Feldstärke.

Lösung:

a) $\Theta = I \cdot N = 2{,}5\ \text{A} \cdot 9 = 22{,}5\ \text{A}$

b) $H = \frac{\Theta}{l} = \frac{22{,}5\ \text{A}}{12\ \text{cm}} = \mathbf{1{,}875\ \frac{A}{cm}}$

$[\Theta] = \text{A}$	$\Theta = I \cdot N$
$[H] = \frac{\text{A}}{\text{m}}$	$H = \frac{\Theta}{l}$
$[\Phi] = \text{Vs} = \text{Wb}$	$B = \frac{\Phi}{A}$
$[B] = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \text{T}$	$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

Θ Durchflutung (Θ griech. Großbuchstabe Theta)
I Stromstärke
N Windungszahl
H magnetische Feldstärke
l mittlere Feldlinienlänge
B magnetische Flussdichte
Φ magnetischer Fluss (Φ griech. Großbuchstabe Phi)
A Fläche
μ_0 magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 1{,}257\ \mu\text{Vs/(Am)}$ (μ griech. Kleinbuchstabe Mü)
μ_r Permeabilitätszahl (für Luft, Vakuum ist $\mu_r = 1$)

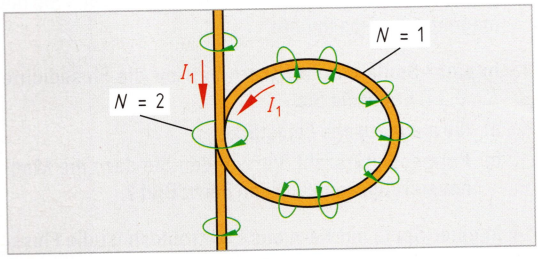

Bild 1: Windungsdurchflutung

Aufgaben zu 5.3.1.1

1. Welche Durchflutung hat eine Drosselspule mit 200 Windungen, die von 0,8 A durchflossen wird?
2. Wie viele Windungen benötigt eine Spule, wenn sie bei einem Strom von 5 A die Durchflutung $\Theta = 250$ A besitzen soll?
3. Ein Elektromagnet mit 80 Windungen arbeitet mit der Durchflutung $\Theta = 150$ A. Welcher Magnetisierungsstrom ist erforderlich?
4. Ein Elektromagnet mit $N_1 = 120$ Windungen wird vom Strom $I_1 = 1{,}5$ A durchflossen. Welche Stromstärke I_2 benötigt ein Magnet mit $N_2 = 2000$ Windungen für die gleiche Durchflutung?
5. Welche magnetische Feldstärke hat eine Ringspule **(Bild 1,** folgende Seite) mit 300 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von 0,15 m, die von 0,2 A durchflossen wird?
6. Welche Stromstärke erzeugt eine Feldstärke 7 A/cm in einer Ringspule **(Bild 1**, Seite 74) mit 75 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von 0,18 m?
7. In einer Spule mit einem Kernquerschnitt von $A = 12\ \text{cm}^2$ besteht der Fluss $\Phi = 1{,}44$ mWb. Berechnen Sie die Flussdichte B.
8. In einer Spule mit einem Kernquerschnitt von $A = 16\ \text{cm}^2$ besteht die Flussdichte $B = 1{,}1$ T. Berechnen Sie den magnetischen Fluss Φ.
9. Welche Flussdichte stellt sich bei einer Spule ohne Kern ein, deren magnetische Feldstärke $H = 25$ A/cm beträgt?

[1] Wilhelm Eduard Weber, deutscher Physiker, 1804 bis 1891
[2] Nikola Tesla, kroatischer Physiker, 1856 bis 1943

Beispiel 1: Magnetische Größen berechnen

Eine Spule mit dem Kernquerschnitt $A = 6{,}8\ \text{cm}^2$ hat die Feldstärke $H = 2$ A/cm. Die Permeabilitätszahl des Kernes ist dabei $\mu_r = 4000$. Berechnen Sie a) magnetische Flussdichte, b) magnetischen Fluss.

Lösung:

a) $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = 1{,}257 \frac{\mu\text{Vs}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot 4000 \cdot \frac{2\ \text{A}}{\text{cm}}$

$= \frac{1\ \text{Vs}}{\text{m}^2} = 1\ \text{T}$

b) $B = \frac{\Phi}{A} \Rightarrow \Phi = B \cdot A = 1\ \text{T} \cdot 6{,}8\ \text{cm}^2$

$= 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$

$= 0{,}68 \cdot 10^{-3}\ \text{Vs} = \mathbf{0{,}68\ mWb}$

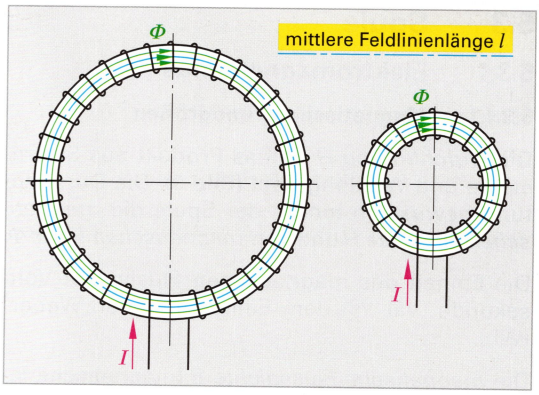

Bild 1: Ringspulen

10. Welche Feldstärke erzeugt in einer Spule ohne Kern die Flussdichte 5 mT?

11. In einer Spule bewirkt die Feldstärke 2 A/cm die Flussdichte 0,38 T. Berechnen Sie die Permeabilitätszahl μ_r des Kernes.

12. In einer Spule besteht die Feldstärke 80 A/m. Die Permeabilitätszahl des Kernes ist 7000. Berechnen Sie die magnetische Flussdichte.

13. In einer Spule mit Ferritkern beträgt die Flussdichte $B = 0{,}3$ T. Ermitteln Sie
a) die magnetische Feldstärke,
b) Permeabilitätszahl. Verwenden Sie dazu die Magnetisierungskennlinie von Ferrit **Bild 2.**

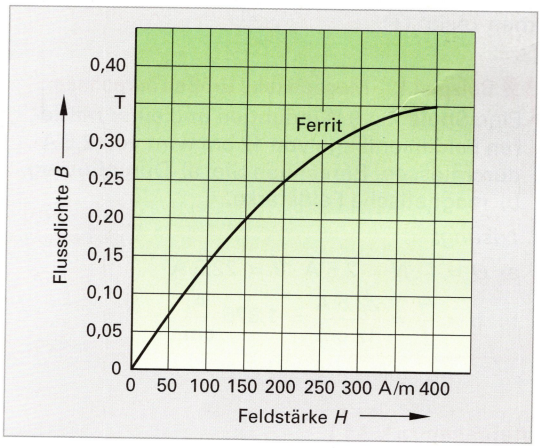

Bild 2: Magnetisierungskennlinie für Ferrit

14. In einer Spule mit Kern aus Elektroblech ist die Flussdichte $B = 1{,}1$ T. Ermitteln Sie
a) die magnetische Feldstärke H,
b) die Permeabilitätszahl μ_r. Benützen Sie dafür die Magnetisierungskennlinie von Elektroblech **Bild 3.**

15. In einer Drosselspule mit Ferritkern soll der Gleichstrom $I = 2{,}8$ A die Flussdichte $B = 0{,}25$ T bewirken. Die mittlere Feldlinienlänge ist $l = 21$ cm. Bestimmen Sie
a) Windungszahl,
b) Permeabilitätszahl. Verwenden Sie dazu die Magnetisierungskennlinie von Ferrit **Bild 2.**

16. Durch eine Drosselspule mit 56 Windungen und einem Kern aus Elektroblech fließt der Gleichstrom $I = 2{,}5$ A. Die mittlere Feldlinienlänge ist $l = 0{,}5$ m. Ermitteln Sie
a) Flussdichte,
b) Permeabilitätszahl. Benützen Sie dafür die Magnetisierungskennlinie von Elektroblech **Bild 3.**

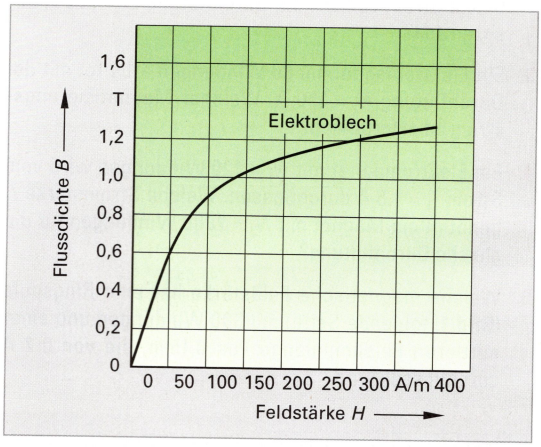

Bild 3: Magnetisierungskennlinie für Elektroblech