

Elektronik 1, Foliensatz 2: Handwerkszeug, Dioden

G. Kemnitz

22. April 2021

Contents

1	Handwerkszeug	1
1.1	Widerstandsnetzwerke	2
1.2	Spannungsteiler	3
1.3	Stromteiler	4
1.4	Zerlegung in Überlagerungen	5
1.5	Zweipolvereinfachung	7
1.6	Aufgaben	8
2	Dioden	9
2.1	LED-Anzeige für Logikwerte	11
2.2	Gleichrichter	12
2.3	Diode als Spannungsquelle	13
2.4	Logikfunktionen	14
2.5	Aufgaben	17

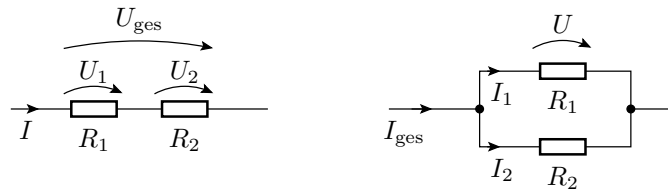
1 Handwerkszeug

Werkzeugkasten

- Die Abschätzung der Spannungen und Ströme in einer Schaltung erfolgt in der Praxis überwiegend durch mehrfache Anwendung einfacher Analyseschritte:
 - Schrittweise Nachbildung durch immer weiter vereinfachte Ersatzschaltungen, die sich im betrachteten Arbeitsbereich (nahezu) gleich verhalten.
 - Zusammenfassen von Widerständen.
 - Zurückführen auf Strom- und Spannungsteiler.
 - Zerlegen in Überlagerungen.
- Die Analyse über Knoten- und Maschengleichungen ist in diesem Werkzeugkasten die Notlösung, wenn die einfacheren Lösungswege versagen.

1.1 Widerstandsnetzwerke

Grundregeln



Reihenschaltung:

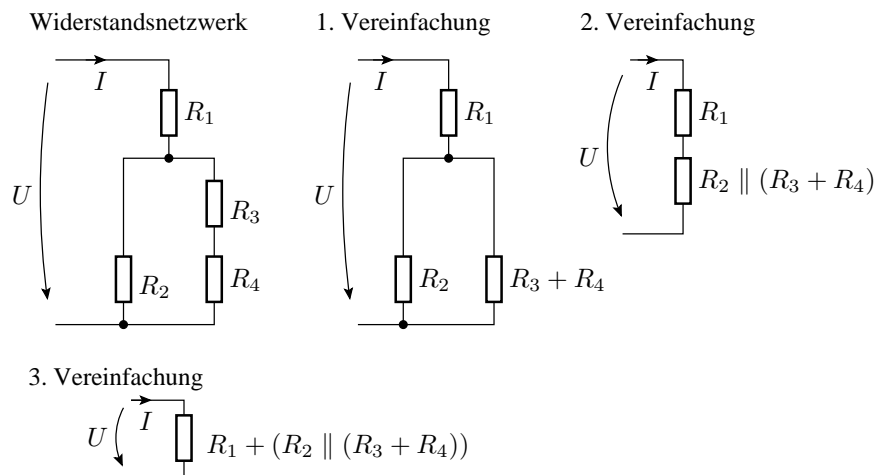
$$\frac{U_{\text{ges}}}{I} = R_{\text{ges}} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2$$

Parallelschaltung:

$$\frac{I_{\text{ges}}}{U} = G_{\text{ges}} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = G_1 + G_2$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 \parallel R_2 = \frac{1}{G_{\text{ges}}} = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Schrittweises Zusammenfassen

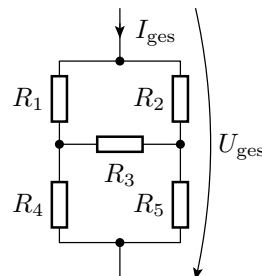


Das schrittweise Zusammenfassen funktioniert nicht immer

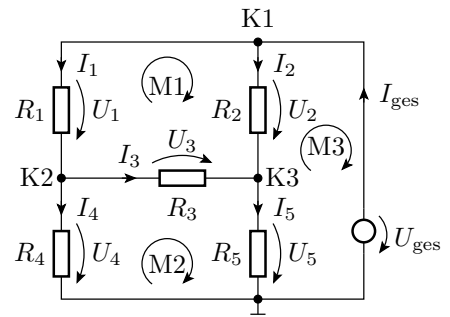
Brückenschaltung

In dieser Schaltung gibt es keine Widerstände, durch die der gleiche Strom fließt oder über denen die gleiche Spannung abfällt.

⇒ Einfache Zusammenfassung nicht möglich!



Notlösung Gleichungssystem



$$\begin{aligned}
 \text{K1: } & -I_1 - I_2 + I_{\text{ges}} = 0 \\
 \text{K2: } & I_1 - I_3 - I_4 = 0 \\
 \text{K3: } & I_2 + I_3 - I_5 = 0 \\
 \text{M1: } & -R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 = 0 \\
 \text{M2: } & -R_4 \cdot I_4 + R_3 \cdot I_3 + R_5 \cdot I_5 = 0 \\
 \text{M3: } & -R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 = -U_{\text{ges}}
 \end{aligned}$$

Das gesamte Gleichungssystem

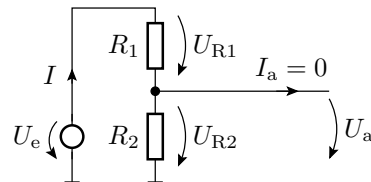
$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ -R_1 & R_2 & -R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 & R_5 & 0 \\ 0 & -R_2 & 0 & 0 & -R_5 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_{\text{ges}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -U_{\text{ges}} \end{pmatrix}$$

- 6 Gleichungen und 6 Unbekannte
- gesuchter Gesamtwiderstand:

$$R_{\text{ges}} = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}}$$

1.2 Spannungsteiler

Spannungsteilerregel



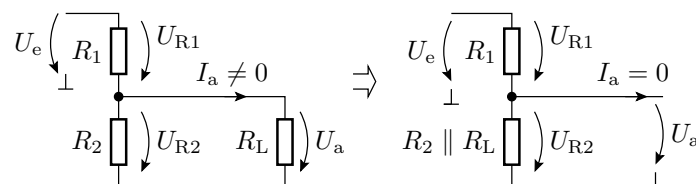
Werden zwei Widerstände vom gleichen Strom durchflossen, verhalten sich die Spannungsabfälle proportional zu den Widerständen:

$$\frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U_e}{R_1 + R_2} = \frac{U_a}{R_2} = I$$

Anwendung auf die Beziehung zwischen U_e und U_a :

$$U_a = U_e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

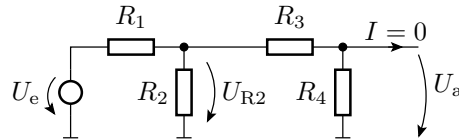
Belasteter Spannungsteiler



- Transformation in einen unbelasteten Spannungsteiler.
- Anwendung der Spannungsteilerregel:

$$U_a = U_e \cdot \frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + (R_2 \parallel R_L)}$$

Mehrfachanwendung



Zusammenfassen von R_2 bis R_4 zu einem Ersatzwiderstand:

$$R_{234} = R_2 \parallel (R_3 + R_4) = \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4}$$

Berechnung von U_{R2} über die Spannungsteilerregel:

$$U_{R2} = U_e \cdot \frac{R_{234}}{R_1 + R_{234}}$$

Berechnung von U_a aus U_{R2} über die Spannungsteilerregel:

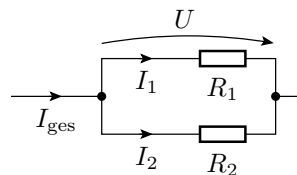
$$U_a = U_{R2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Gesamtergebnis:

$$U_a = U_e \cdot \frac{R_{234}}{R_1 + R_{234}} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

1.3 Stromteiler

Stromteilerregel



Ströme durch Widerstände, über denen dieselbe Spannung abfällt, verhalten sich umgekehrt proportional zu den Widerstandswerten:

$$R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2 = (R_1 \parallel R_2) \cdot I_{\text{ges}} = U$$

Stromteilverhältnis für I_1 :

$$\frac{I_1}{I_{\text{ges}}} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1} = \frac{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Wie Spannungsteiler nur nicht durchflossener Widerstand im Zähler.

1.4 Zerlegung in Überlagerungen

Überlagerungssatz

In linearen Systemen ist die Ausgabe einer Linearkombination von Eingaben gleich der Linearkombination der Ausgaben der einzelnen Eingaben:

$$f(k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_2) = k_1 \cdot f(x_1) + k_2 \cdot f(x_2)$$

Angewendet auf ein System

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{Q}$$

bei dem die Eingabe \mathbf{Q} ein Vektor von Quellenwerten und das Ergebnis \mathbf{X} ein Vektor der gesuchten Ströme/Spannungen ist:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{M}^{-1} \cdot (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2) \\ &= \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{Q}_1 + \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{Q}_2 \end{aligned}$$

Man kann den Quellenvektor in Summanden zerlegen, die gesuchten Ströme und Spannungen für jeden Summanden einzeln berechnen und addieren.

Helmholtzsches Überlagerungsprinzip

Bei einem linearen System mit n Quellen ist folgendes möglich:

- Aufteilung des Vektors der Quellenwerte in eine Summe von n Vektoren mit nur einer Quelle, z.B.:

$$\begin{pmatrix} I_{Q1} \\ U_{Q2} \\ U_{Q1} + U_{Q2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{Q1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U_{Q1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ U_{Q2} \\ U_{Q2} \end{pmatrix}$$

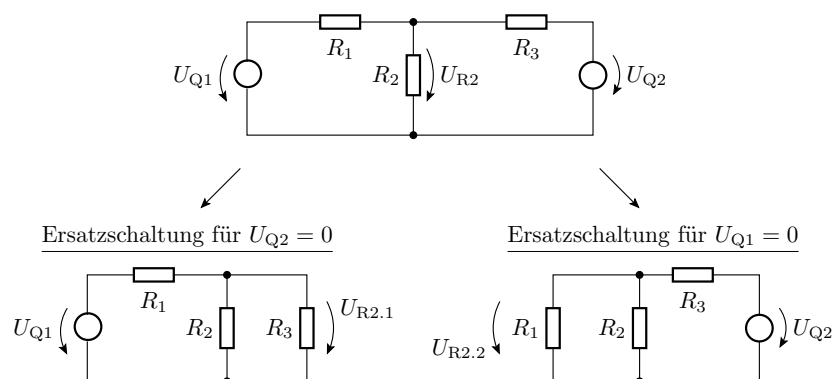
- Berechnung aller $\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{Q}_i$ und Summation.

Zu diesem Rechenweg ist identisch:

- Aufstellung von n Ersatzschaltungen mit nur einem Quellenwert¹ ungleich null.
- Berechnung der gesuchten Ströme und Spannungen für jede dieser Ersatzschaltungen und Summation.

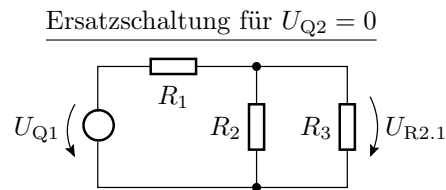
Die Analyse *mehrerer* Ersatzschaltungen mit *einer* Quelle ist oft einfacher als die *einer* Ersatzschaltung mit *mehreren* Quellen.

Gesucht: U_{R2} in Abhängigkeit von U_{Q1} und U_{Q2}

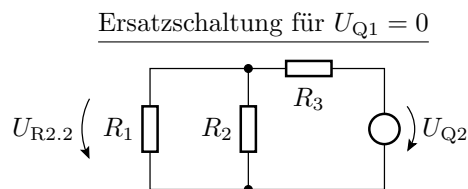


$$U_{R2} = U_{R2.1} + U_{R2.2}$$

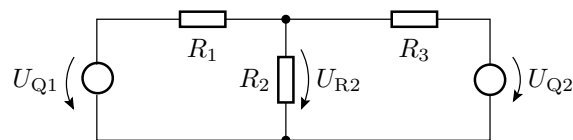
¹Gilt nicht für gesteuerte Quellen, warum?

Berechnung von U_{R2} für die Ersatzschaltung mit der ersten Quelle

$$U_{R2.1} = \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \cdot U_{Q1}$$

Berechnung von U_{R2} für die Ersatzschaltung mit der zweiten Quelle

$$U_{R2.2} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + (R_1 \parallel R_2)} \cdot U_{Q2}$$

Die Summe der beiden Teilergebnisse

$$U_{R2} = \underbrace{\frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \cdot U_{Q1}}_{U_{R2.1}} + \underbrace{\frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + (R_1 \parallel R_2)} \cdot U_{Q2}}_{U_{R2.2}}$$

Vorteile des Helmholtzschen Überlagerungsprinzips:

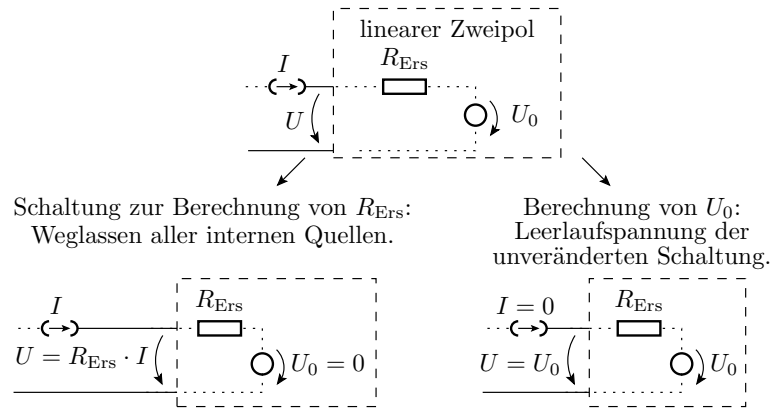
- Oft auf mehrfache Anwendung der Spannungs- oder Stromteilerregel rückführbar.
- Aus dem Ergebnis ist der Einfluss der einzelnen Quellen auf die untersuchten Ströme/Spannungen direkt ablesbar.

1.5 Zweipolvereinfachung

Black-Box-Verhalten linearer Zweipol $\frac{1}{R_{Ers}} \neq 0$ (bzw. $R_{Ers} \neq 0$):

$$U = U_0 + R_{Ers} \cdot I \quad \left(\text{oder } I = I_0 + \frac{U}{R_{Ers}} \right)$$

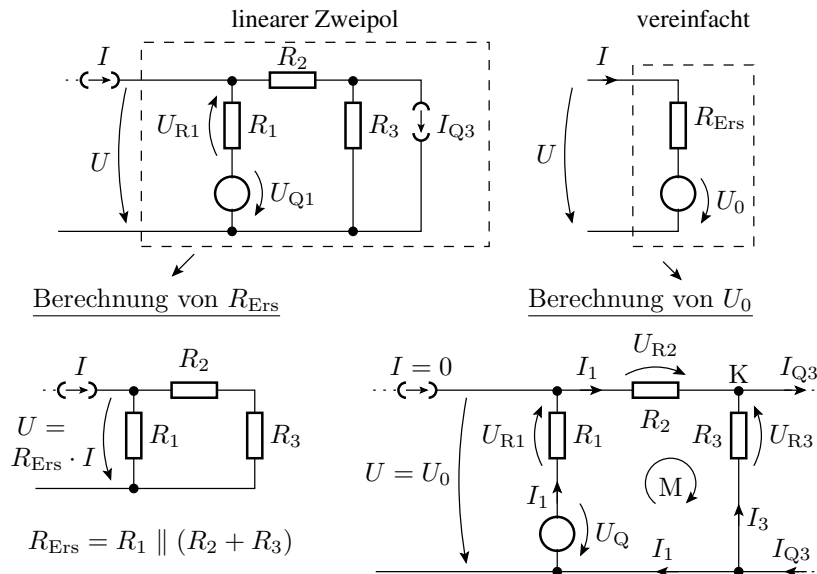
Ein linearer Zweipol aus vielen Bauteilen lässt sich immer durch einen Zweipol aus einem Widerstand und einer Quelle nachbilden.



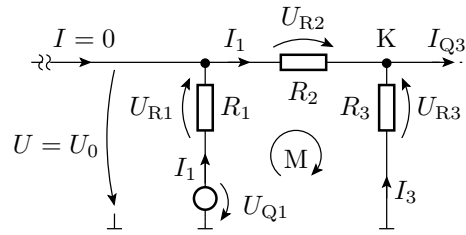
Der Ersatzwiderstand eines Zweipols ist der Ersatzwiderstand des Widerstandsnetzwerks, das übrig bleibt, wenn die Werte aller Quellen auf null gesetzt werden.

Die Leerlaufspannung eines Zweipols ist die Anschlussspannung, wenn kein Strom eingespeist wird.

Beispiel



Berechnung von U_0 über ein Gleichungssystem

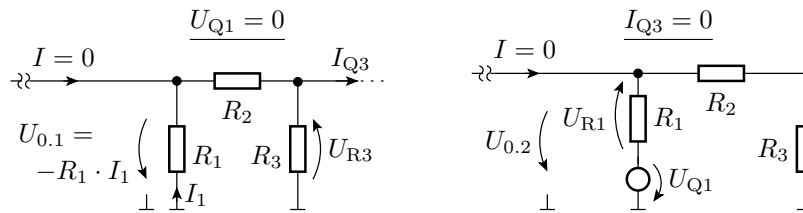


$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ (R_1 + R_2) & -R_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{Q3} \\ U_{Q1} \end{pmatrix}$$

Leerlaufspannung:

$$U_0 = U_{Q1} - R_1 \cdot I_1 = I_1 \cdot R_1 - I_3 \cdot R_3$$

Berechnung von U_0 durch Überlagerung



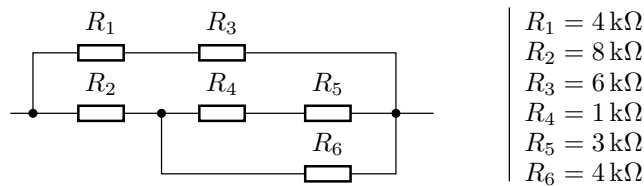
$$U_{0.1} = -R_1 \cdot I_1 = -R_1 \cdot \underbrace{\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot I_{Q3}}_{I_1 \text{ nach Stromteiler}}$$

$$U_{0.2} = U_{R23} = \underbrace{\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_{Q1}}_{\text{Spannungsteiler}}$$

1.6 Aufgaben

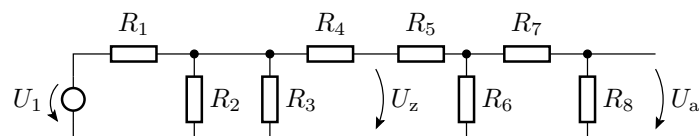
Aufgabe 2.1: Widerstandszusammenfassung

Wie groß ist R_{ges} ?



Aufgabe 2.2: Mehrfacher Spannungsteiler

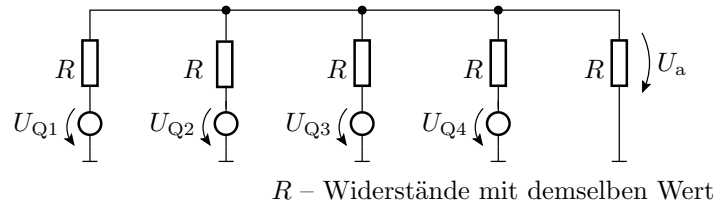
Wie groß sind U_z und U_a ?



$$\begin{array}{ll} R_1 = R_4 = R_6 = 2 \text{ k}\Omega & R_5 = R_7 = R_8 = 1 \text{ k}\Omega \\ R_2 = R_3 = 8 \text{ k}\Omega & U_1 = 8 \text{ V} \end{array}$$

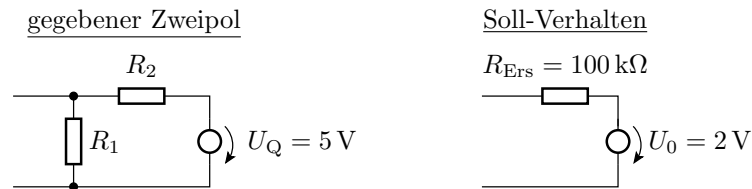
Aufgabe 2.3: Überlagerungssatz

Wie groß ist U_a ?



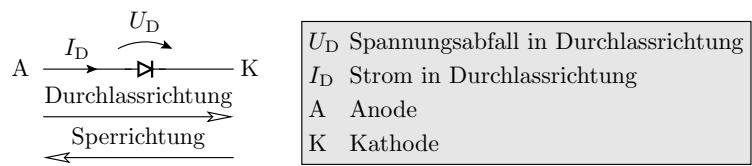
Aufgabe 2.4: Zweipolumformung

Wie groß müssen R_1 und R_2 sein, damit sich die Schaltungen links und rechts nach außen hin gleich verhalten?



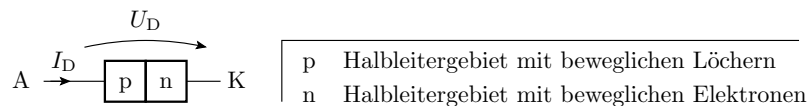
2 Dioden

Schaltzeichen und Anschlussbelegung:



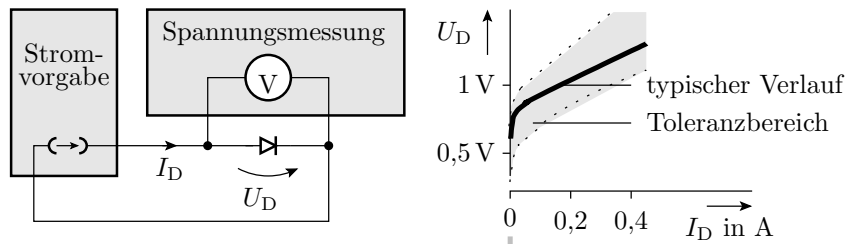
Realisierungen:

- pn-Übergang: Gleichricht-, Schalt-, Leucht-, Fotodiode, ...



- Metall-Halbleiter-Übergang (Schottky-Dioden): schnelle Gleichricht- und Schaltdioden.
- Bestimmte Typen von Röhren (veraltete Technik).

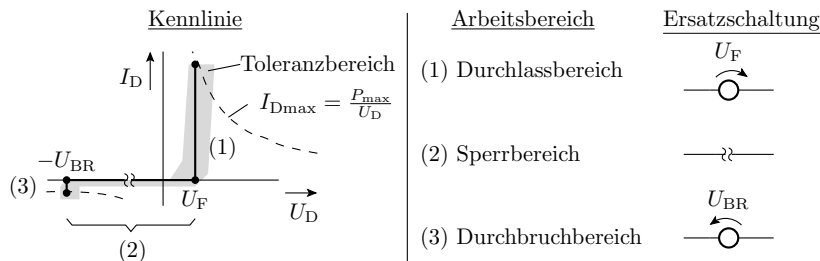
Messen des Anschlussverhaltens



Über einer Diode fällt

- bei einem nennenswerten Strom in Durchlassrichtung eine geringe in grober Näherung konstante Spannung U_F und.
- bei einem nennenswerten negativen Strom in umgekehrter Richtung eine viel größere in grober Näherung konstante Spannung U_{BR} ab.

Modellierung durch 3 lineare Kennlinienäste



Kennlinienast	Bereich	UI-Beziehung
Durchlassbereich	$0 < I_D \leq \frac{P_{max}}{U_F}$	$U_D = U_F$
Durchbruchbereich	$-\frac{P_{max}}{U_{BR}} < I_D < 0$	$U_D = -U_{BR}$
Sperrbereich	$-U_{BR} < U_D < U_F$	$I_D = 0$

Die Parameter einiger Dioden

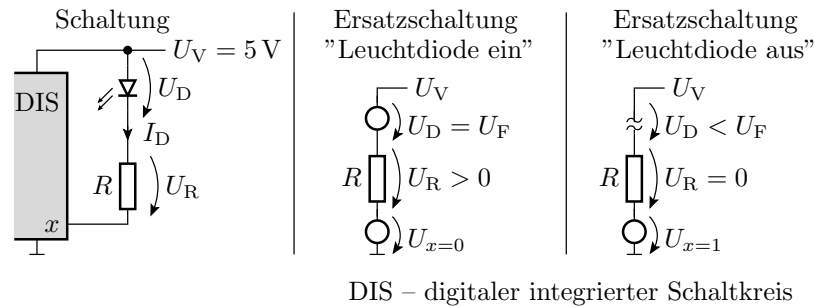
	P_{max}	U_F	U_{BR}
1N4148 (Standarddiode)	500 mW	$\approx 0,7\text{ V}$	$> 100\text{ V}$
BAT46 (Schottky-Diode)	150 mW	$\approx 0,45\text{ V}$	$> 100\text{ V}$
TLHR44... (Leuchtdiode rot)	100 mW	$\approx 1,6\text{ V}$	$> 6\text{ V}$
TLHG44... (Leuchtdiode grün)	100 mW	$\approx 2,4\text{ V}$	$> 6\text{ V}$
BZX83 C4V5 (Z-Diode)	500 mW		4,4 bis 5,0 V

U_F – Flussspannung; U_{BR} – Durchbruchspannung im Sperrbereich; P_{max} – maximal zulässige Verlustleistung.

2.1 LED-Anzeige für Logikwerte

Aufgabe

Am Ausgang eines digitalen Schaltkreises, z.B. eines Mikrorechners, ist eine rote Leuchtdiode so anzuschließen, dass sie bei der Ausgabe einer »0« gut sichtbar leuchtet und bei der Ausgabe einer »1« aus ist.



Ersatzschaltungen und Modelrechnungen

Arbeitsbereich »Leuchtdiode ein«

- LED-Modell: Konstantspannungsquelle

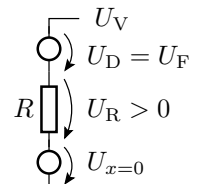
$$U_F \approx 1,6 \dots 1,8 \text{ V}$$

- Modell DIS-Ausgang: Spannungsquelle

$$U_{x=0} \approx 0 \dots 0,3 \text{ V}$$

- Abschätzung von R :

$$R = \frac{U_V - U_F - U_{x=0}}{I_D} \approx \frac{5 \text{ V} - 1,6 \dots 2,1 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 290 \dots 340 \Omega$$

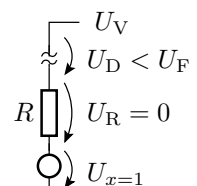


Arbeitsbereich »Leuchtdiode aus«

- Voraussetzung:

$$U_{x=1} > U_V - U_F = 5 \text{ V} - 1,6 \dots 1,8 \text{ V}$$

$$U_{x=1} > 3,4 \text{ V}$$



Toleranzbereich des LED-Stroms

$$\frac{U_{V\min} - U_{F\max} - U_{x0\max}}{R_{\max}} < I_D < \frac{U_{V\max} - U_{F\min} - U_{x0\min}}{R_{\min}}$$

- Nächster Widerstandswert zu $290 \dots 340 \Omega$ aus der E24-Reihe: 300Ω
- 5% Widerstandstoleranz: $285 \dots 315 \Omega$
- Bereich der Versorgungsspannung: $U_V = 4,9 \dots 5,1 \text{ V}$
- minimaler Strom: $\frac{4,9 \text{ V} - 1,8 \text{ V} - 0,3 \text{ V}}{315 \Omega} \approx 8,95 \text{ mA}$

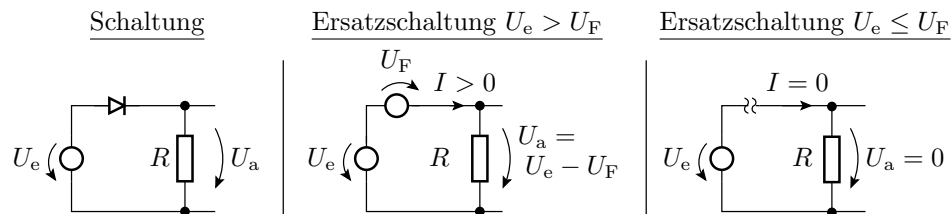
- maximaler Strom: $\frac{5,1\text{V}-1,6\text{V}-0\text{V}}{285\ \Omega} \approx 12,3\text{ mA}$

- 20% Abweichung der Helligkeit der LED akzeptabel?
- Ist $U_{x=1}$ des DIS ausreichend groß?
- Alle Ströme, Spannungen und Verlustleistungen zulässig?
 \Rightarrow Professioneller Schaltungsentwurf ist aufwändig.

2.2 Gleichrichter

Einfacher Gleichrichter

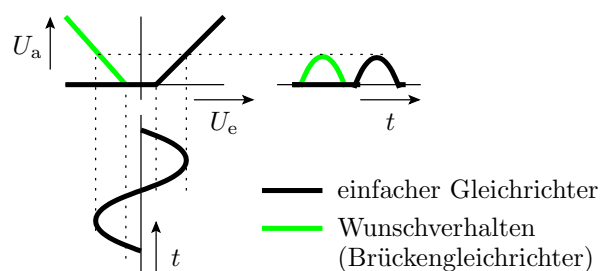
- Eingangsspannung U_e kann positiv oder negativ sein.
- Für kleine und negative U_e sperrt die Diode: $U_a = 0$.
- Für $U_e > U_F$ fällt über der Diode U_F ab: $U_a = U_e - U_F$.



Übertragungsfunktion:

$$U_a = \begin{cases} U_e - U_F & \text{für } U_e \geq U_F \\ 0 & \text{für } U_F > U_e > -U_{BR} \end{cases}$$

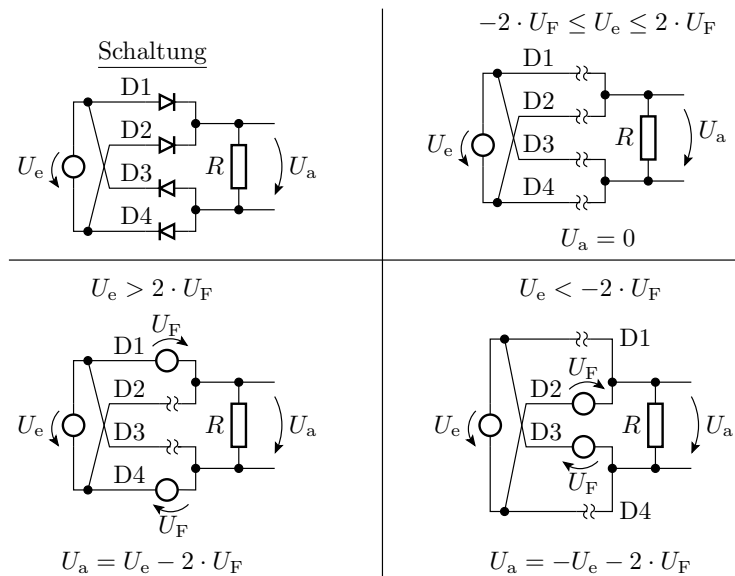
Ist- und Wunschverhalten



Der einfache Gleichrichter schneidet von einer Wechselspannung die untere Halbwellen ab.

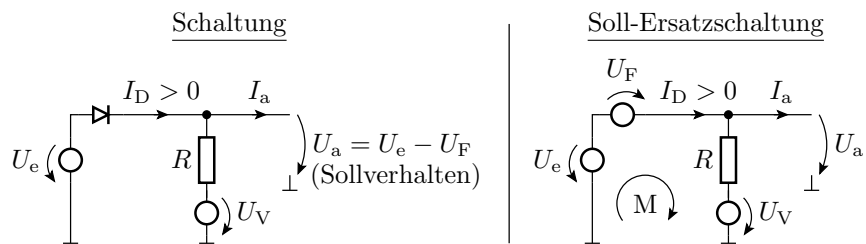
Wünschenswert ist eine Betragsbildung.

Brückengleichrichter



2.3 Diode als Spannungsquelle

Subtraktion der Flussspannung

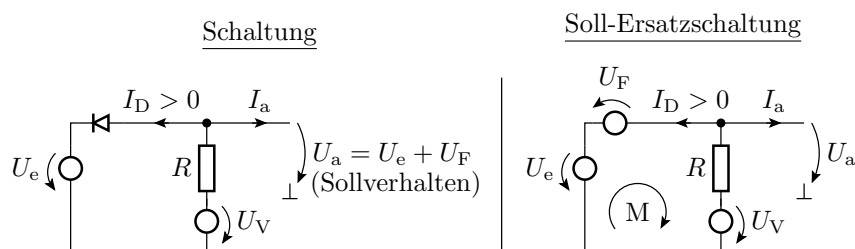


Maximale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

$$I_D = \frac{U_e - U_F - U_V}{R} + I_a > 0$$

$$U_V < U_e - U_F + R \cdot I_a$$

Addition der Flussspannung

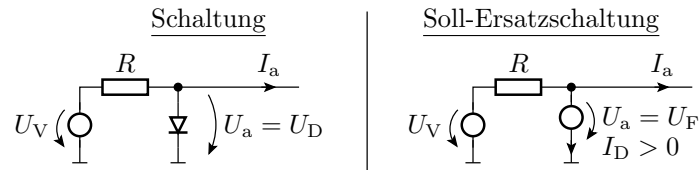


Minimale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

$$I_D = \frac{U_V - U_e - U_F}{R} - I_a > 0$$

$$U_V > U_e + U_F + R \cdot I_a$$

Konstantes Potential gleich der Flussspannung

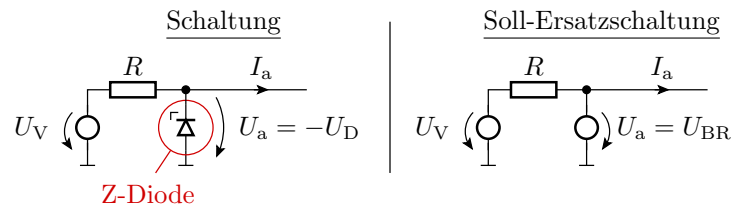


Minimale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

$$I_D = \frac{U_V - U_a}{R} - I_a > 0$$

$$U_V > U_a + R \cdot I_a$$

Konstantes Potential gleich der Durchbruchspannung



Minimale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

$$U_V > U_a + R \cdot I_a$$

2.4 Logikfunktionen

Zuordnung zwischen Logik- und Signalwerten

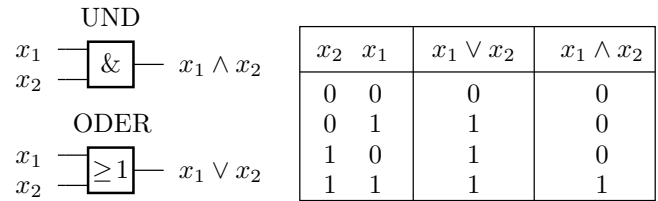
$\varphi(x_i)$ groß	1
unzulässig	X
klein	0

- In der Regel und auch in dieser Vorlesung ist die Zuordnung: 1⇒groß und 0⇒klein. Umgekehrte Zuordnung auch zulässig.
- Signalwerte zwischen 0 und 1 sind unzulässig / unbestimmt (X).

Bezeichnungen für Spannungspegel:

- U_{IL} Eingangs- (Input-) Spannung für Logikwert 0 (Low)
- U_{IH} Eingangs- (Input-) Spannung für Logikwert 1 (High)
- U_{OL} Ausgangs- (Output-) Spannung für Logikwert 0 (Low)
- U_{OH} Ausgangs- (Output-) Spannung für Logikwert 1 (High)

UND und ODER

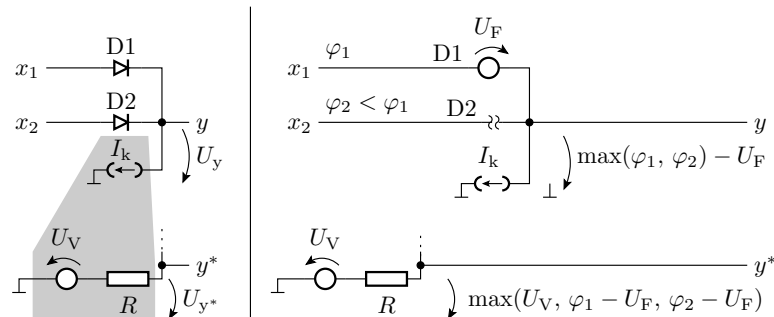


Wenn große Spannung (großer Strom) als »1« definiert ist:

- UND (\wedge): Der kleinere Eingabewert setzt sich durch.
- ODER (\vee): Der größere Eingabewert setzt sich durch.

Dafür gibt es Schaltungen mit Dioden.

Dioden-ODER



Für die Verallgemeinerung auf $N_e \geq 2$ Eingänge gilt:

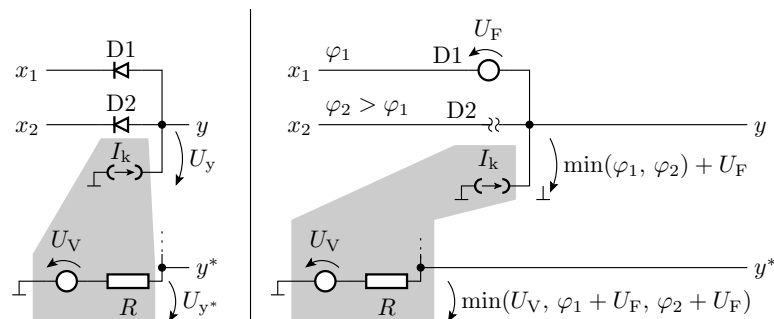
$$\varphi_y = \max_{i=1}^{N_e} (\varphi_i) - U_F$$

Bei Ersatz der Stromquelle durch einen Zweipol aus R und U_V

$$\varphi_{y^*} = \max(\varphi_y, U_V)$$

muss gelten $U_V \leq U_{IL}$ (U_{IL} – kleiner Eingabewert, Input Low).

Dioden-UND

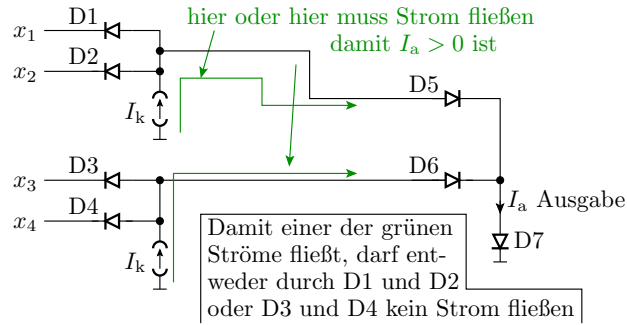


$$\varphi_y = \min_{i=1}^{N_e} (\varphi(x_i) + U_F)$$

N_e – Anzahl der Eingänge. Bei Ersatz der Stromquelle durch einen Zweipol aus R und $U_V \geq U_{IH}$ gilt zusätzlich:

$$\varphi_{y^*} = \min(\varphi_y, U_V)$$

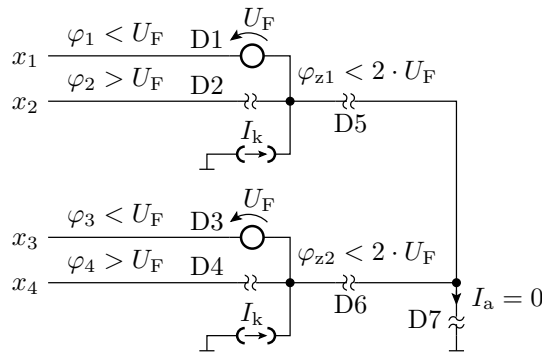
Verkettung von UND- und ODER



I_a ist nur groß, wenn entweder die Potentiale von x_1 und x_2 größer als U_F sind oder wenn die Potentiale von x_3 und x_4 größer als U_F sind. Sonst ist $I_a = 0$. Logische Funktion:

$$y = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)$$

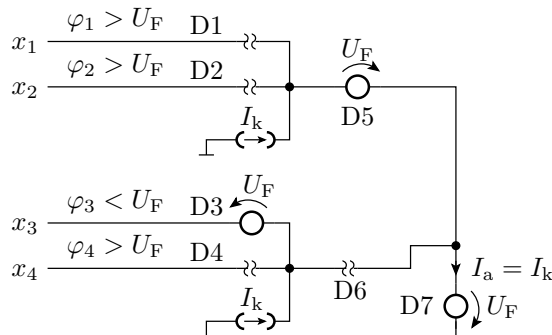
Kontrolle für $x_4x_3x_2x_1 = 1010$



$$\begin{aligned} \varphi_{z1} &= \varphi_1 + U_F < 2 \cdot U_F \Rightarrow \text{D5 sperrt} \\ \varphi_{z2} &= \varphi_3 + U_F < 2 \cdot U_F \Rightarrow \text{D6 sperrt} \end{aligned}$$

Damit bekommt auch D7 keinen Strom: $I_a = 0$

Kontrolle für $x_4x_3x_2x_1 = 1011$

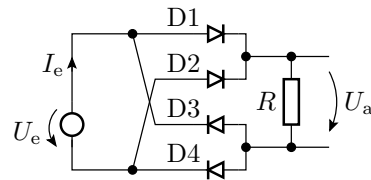


Die Dioden D1 und D2 sperren, so dass der obere Quellenstrom I_k als I_a durch D7 fließt.

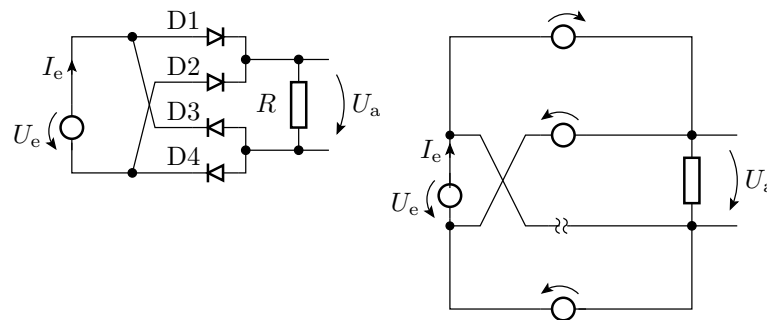
2.5 Aufgaben

Aufgabe 2.5: Brückengleichrichter mit einer Diode im Durchbruchbereich

Was passiert mit dem nachfolgenden Brückengleichrichter, wenn die Eingangsspannung so groß ist, dass D2 in den Durchbruchbereich übergeht?

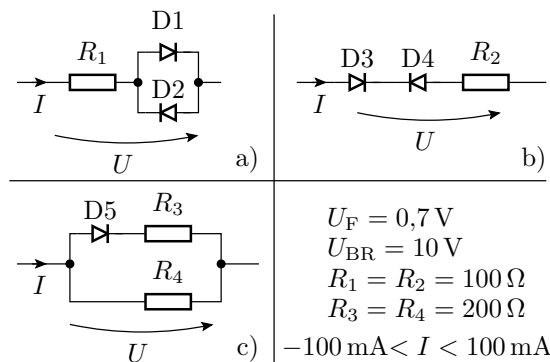


1. Zeichnen Sie die Ersatzschaltung?
2. Schätzen Sie für diesen Betriebsfall den Strom I_e und die Verlustleistung $P_V = I_e \cdot U_e$ ab?

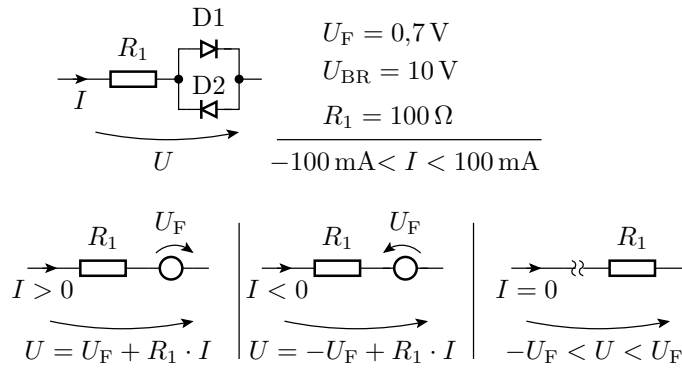


Aufgabe 2.6: Bestimmung von Zweipolkennlinien

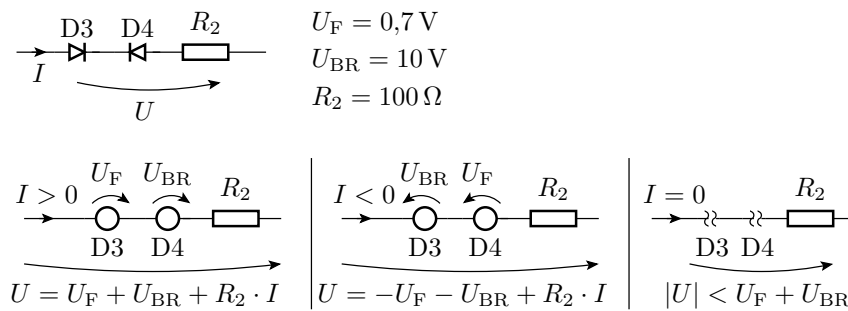
Welche Strom-Spannungs-Beziehungen haben die drei Zweipole?



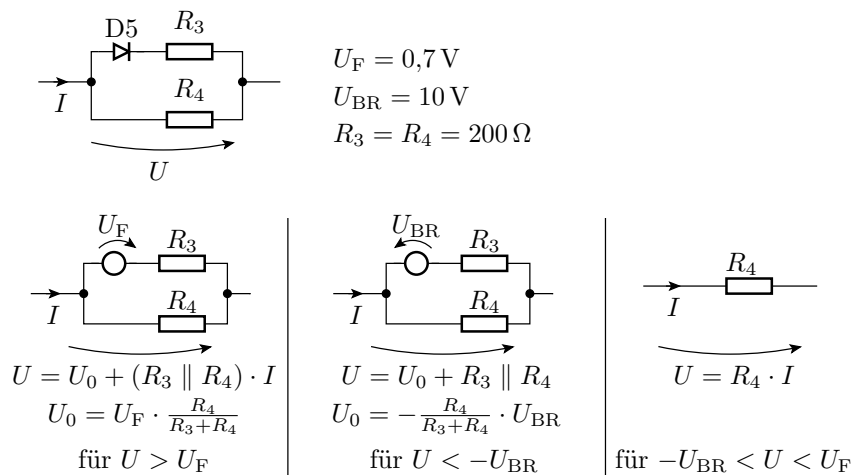
Lösung zu Aufgabe 2.6 a



Lösung zu Aufgabe 2.6 b

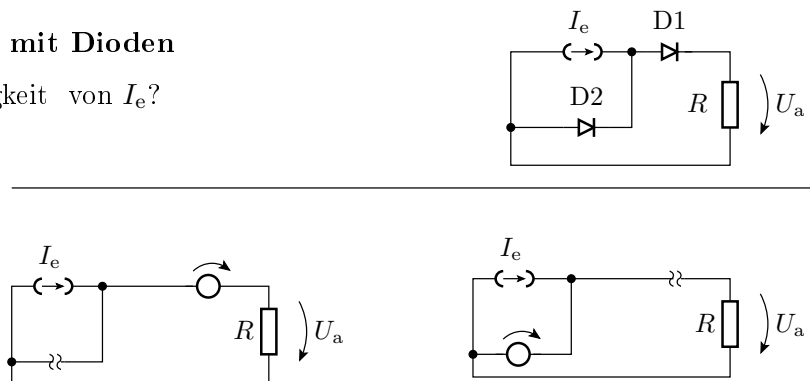


Lösung zu Aufgabe 2.6 c

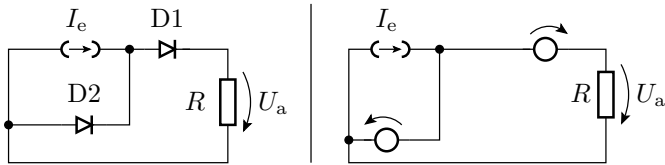


Aufgabe 2.7: Stromteiler mit Dioden

Wie groß ist U_a in Abhängigkeit von I_e ?

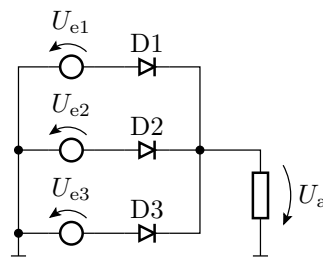


Gibt es weitere Arbeitsbereiche?



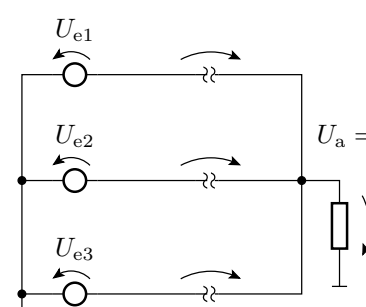
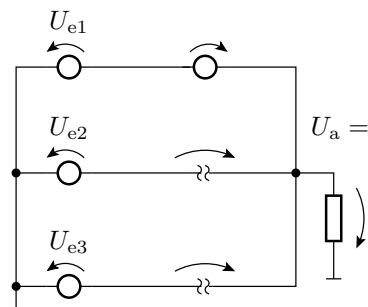
Aufgabe 2.8: Logikschaltung

1. Wie groß ist U_a in Abhängigkeit von den drei Eingangsspannungen?
2. Welche logische Funktion lässt sich mit dieser Schaltung nachbilden?



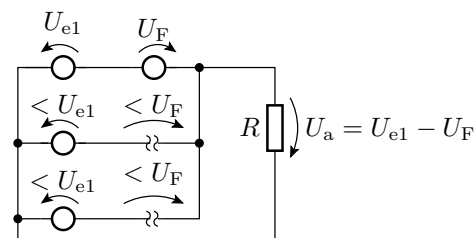
1x Durchlassbereich, 2x gesperrt

3x gesperrt



Lösung zu Aufgabe 2.8

Die Diode am Eingang mit der höchsten Spannung arbeitet im Durchlassbereich, die anderen sperren. Für $U_{e1} > U_{e2}$ und $U_{e1} > U_{e3}$:



$$U_a = \max(U_{e1}, U_{e2}, U_{e3}) - U_F$$

Logische Funktion für »groß«=1 und »klein«=0:

$$a = e_1 \vee e_2 \vee e_3$$