



# Elektronik 1, Foliensatz 2: Handwerkszeug, Dioden

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU-Clausthal (E1F2.pdf)

28. August 2023



## Handwerkszeug

- 1.1 Widerstandsnetzwerke
- 1.2 Spannungsteiler
- 1.3 Stromteiler
- 1.4 Zerlegung in Überlagerungen
- 1.5 Zweipolvereinfachung
- 1.6 Aufgaben

## Dioden

- 2.1 LED-Anzeige für Logikwerte
- 2.2 Gleichrichter
- 2.3 Diode als Spannungsquelle
- 2.4 Logikfunktionen
- 2.5 Aufgaben

## Inhalt Foliensatz 2



# Handwerkszeug



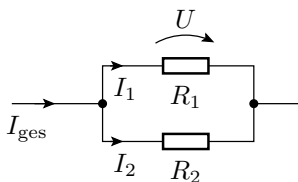
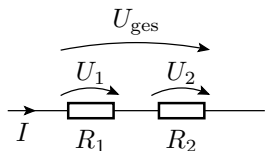
## Werkzeugkasten

- 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.



## Widerstandsnetzwerke

## Grundregeln



Reihenschaltung:

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

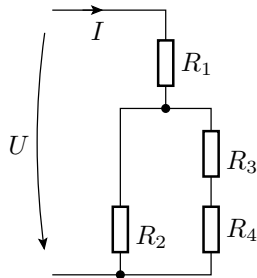
Parallelschaltung

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

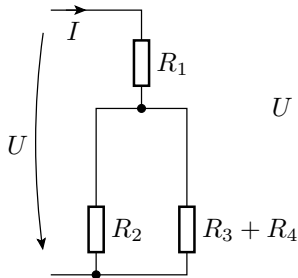
$$R_{\text{ges}} = R_1 \parallel R_2 = \frac{1}{G_{\text{ges}}} = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## Schrittweises Zusammenfassen

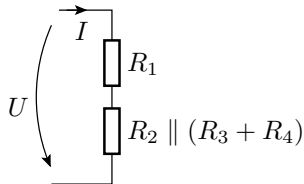
Widerstandsnetzwerk



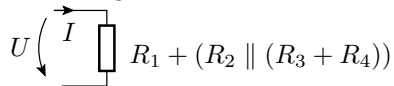
1. Vereinfachung



2. Vereinfachung



3. Vereinfachung

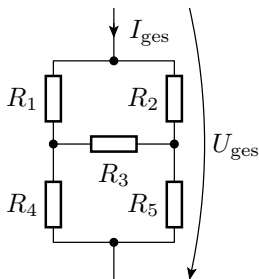


## Das schrittweise Zusammenfassen funktioniert nicht immer

### Brückenschaltung

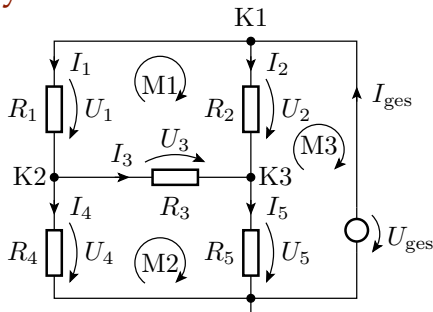
In dieser Schaltung gibt es keine Widerstände, durch die der gleiche Strom fließt oder über denen die gleiche Spannung abfällt.

⇒ Einfache Zusammenfassung nicht möglich!





## Notlösung Gleichungssystem



$$\text{K1 : } -I_1 - I_2 + I_{\text{ges}} = 0$$

$$\text{K2 : } I_1 - I_3 - I_4 = 0$$

$$\text{K3 : } I_2 + I_3 - I_5 = 0$$

$$\text{M1 : } -R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 = 0$$

$$\text{M2 : } -R_4 \cdot I_4 + R_3 \cdot I_3 + R_5 \cdot I_5 = 0$$

$$\text{M3 : } -R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 = -U_{\text{ges}}$$

## Das gesamte Gleichungssystem

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

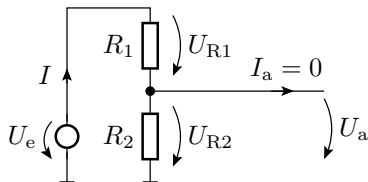
- 6 Gleichungen und 6 Unbekannte
- gesuchter Gesamtwiderstand:

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



## Spannungsteiler

## Spannungsteilerregel



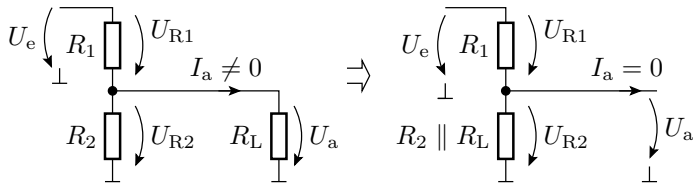
Werden zwei Widerstände vom gleichen Strom durchflossen, verhalten sich die Spannungsabfälle proportional zu den Widerständen:

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

Anwendung auf die Beziehung zwischen  $U_e$  und  $U_a$ :

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

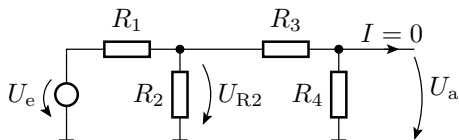
## Belasteter Spannungsteiler



- 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:

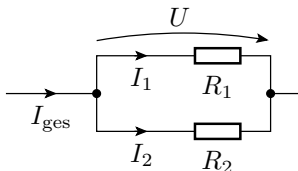
$$U_a = U_e \cdot \frac{R_{234}}{R_1 + R_{234}} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$



## 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.



## 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:

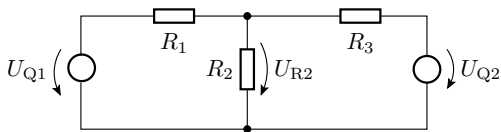
- Aufstellung von  $n$  Ersatzschaltungen mit nur einem Quellenwert<sup>1</sup> ungleich null.
- Berechnung der gesuchten Ströme und Spannungen für jede dieser Ersatzschaltungen und Summation.

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

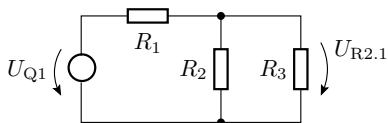
<sup>1</sup>Gilt nicht für gesteuerte Quellen, warum?



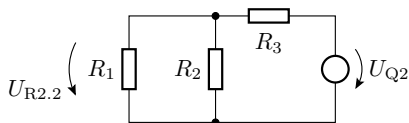
Gesucht:  $U_{R2}$  in Abhängigkeit von  $U_{Q1}$  und  $U_{Q2}$



Ersatzschaltung für  $U_{Q2} = 0$



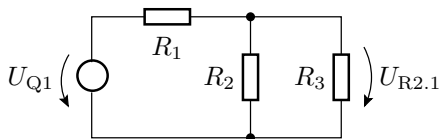
Ersatzschaltung für  $U_{Q1} = 0$



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

## Berechnung von $U_{R_2}$ für die Ersatzschaltung mit der ersten Quelle

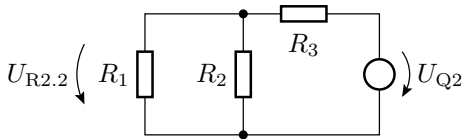
Ersatzschaltung für  $U_{Q_2} = 0$



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

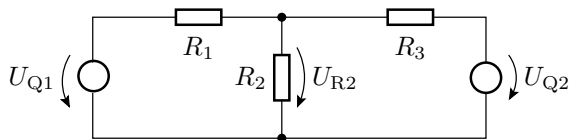
## Berechnung von $U_{R2}$ für die Ersatzschaltung mit der zweiten Quelle

Ersatzschaltung für  $U_{Q1} = 0$



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

## 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.



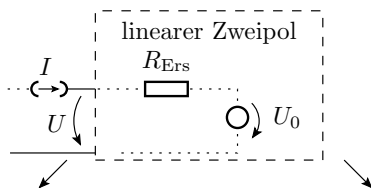


## Zweipolvereinfachung

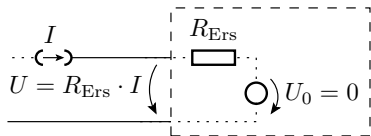
Black-Box-Verhalten linearer Zweipol  $\frac{1}{R_{Ers}} \neq 0$  (bzw.  $R_{Ers} \neq 0$ ):

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

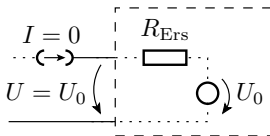
Ein linearer Zweipol aus vielen Bauteilen lässt sich immer durch einen Zweipol aus einem Widerstand und einer Quelle nachbilden.



Schaltung zur Berechnung von  $R_{Ers}$ :  
Weglassen aller internen Quellen.



Berechnung von  $U_0$ :  
Leerlaufspannung der unveränderten Schaltung.

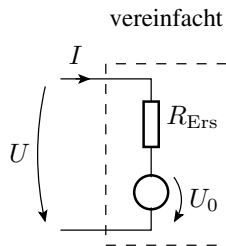
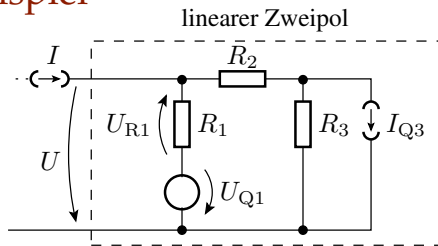




Der Ersatzwiderstand eines Zweipols ist der Ersatzwiderstand des Widerstandsnetzwerks, das übrig bleibt, wenn die Werte aller Quellen auf null gesetzt werden.

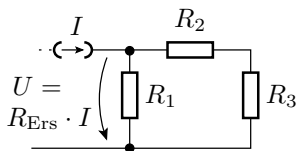
Die Leerlaufspannung eines Zweipols ist die Anschlussspannung, wenn kein Strom eingespeist wird.

## Beispiel

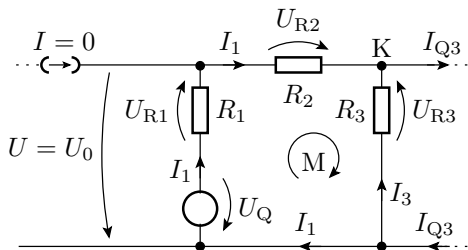


Berechnung von  $R_{Ers}$

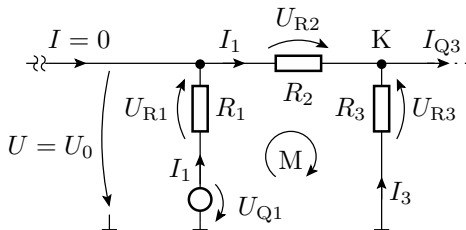
Berechnung von  $U_0$



$$R_{Ers} = R_1 \parallel (R_2 + R_3)$$



## Berechnung von $U_0$ über ein Gleichungssystem



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

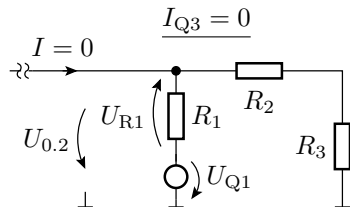
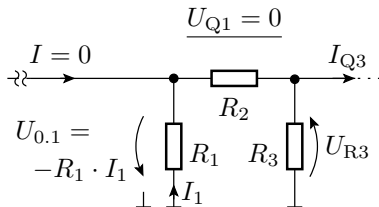
Leerlaufspannung:

$$U_0 = f(I_1) : \quad U_0 = U_{Q1} - R_1 \cdot I_1$$

$$\text{Berechnung } I_1 : \quad (R_1 + R_2) \cdot I_1 - R_3 \cdot \underbrace{(I_1 - I_{Q3})}_{I_3} = U_{Q1}$$

... nach  $I_1$  auflösen und in erste Gl. einsetzen.

## Berechnung von $U_0$ durch Überlagerung



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

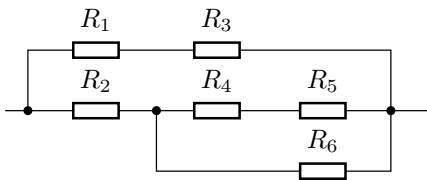
$$U_{0.2} = U_{R23} = \underbrace{\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}}_{\text{Spannungsteiler}} \cdot U_{Q1}$$



# Aufgaben

## Aufgabe 2.1: Widerstandszusammenfassung

Wie groß ist  $R_{\text{ges}}$ ?



$$R_1 = 4 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 8 \text{ k}\Omega$$

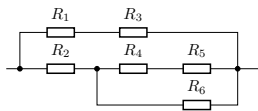
$$R_3 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 = 4 \text{ k}\Omega$$

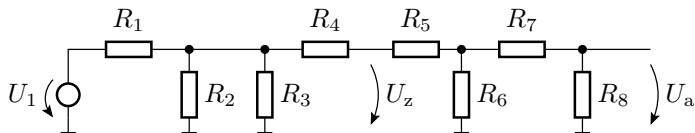




$$\begin{array}{l} R_1 = 4 \text{ k}\Omega \\ R_2 = 8 \text{ k}\Omega \\ R_3 = 6 \text{ k}\Omega \\ R_4 = 1 \text{ k}\Omega \\ R_5 = 3 \text{ k}\Omega \\ R_6 = 4 \text{ k}\Omega \end{array}$$

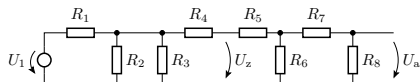
## Aufgabe 2.2: Mehrfacher Spannungsteiler

Wie groß sind  $U_z$  und  $U_a$ ?



$$\begin{aligned}R_1 &= R_4 = R_6 = 2 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= R_3 = 8 \text{ k}\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_5 &= R_7 = R_8 = 1 \text{ k}\Omega \\ U_1 &= 8 \text{ V}\end{aligned}$$

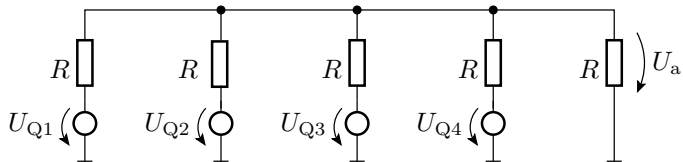


$$\begin{aligned}R_1 &= R_4 = R_6 = 2 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= R_3 = 8 \text{ k}\Omega\end{aligned}$$

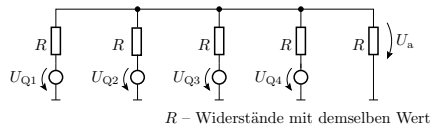
$$\begin{aligned}R_5 &= R_7 = R_8 = 1 \text{ k}\Omega \\ U_1 &= 8 \text{ V}\end{aligned}$$

## Aufgabe 2.3: Überlagerungssatz

Wie groß ist  $U_a$ ?



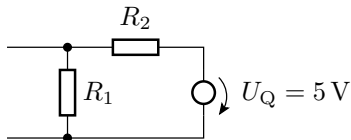
$R$  – Widerstände mit demselben Wert



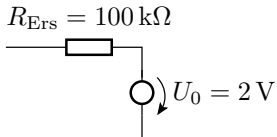
## Aufgabe 2.4: Zweipolumformung

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

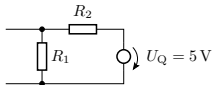
gegebenener Zweipol



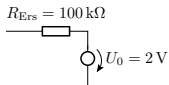
Soll-Verhalten



gegebenener Zweipol



Soll-Verhalten



# Vorlesung 4: Wiederholung & geplante Themen

Schaltungsanalyse: Bestimmung der Ströme und Potentiale.

- Nachbildung der Schaltung durch lineare Zweipolnetzwerke im Arbeitspunkt, bzw. bei uns im Arbeitsbereich. Der Arbeitsbereich eines Ersatzzweipols ist ein linearisierter Teilbereich. Heute stückweise lineare Annäherung einer Diodenkennlinie.
- Aufstellen eines lösbaren linearen Gleichungssystems aus Knoten- und Maschengleichungen. Einprogrammieren und unbekannte Spannungen und Ströme berechnen lassen.
- Falls berechnete UI-Wertepaare für einen der Ersatzzweipole nicht im angenommenen Arbeitsbereich liegen, mit anderer Arbeitsbereichskombination neu versuchen.

Handwerkzeug:

- Zusammenfassen von Widerstandsnetzwerken,
- Strom und Spannungsteiler,
- Zerlegung in Überlagerungen mit nur einer Quelle
- und Zweipolvereinfachungen

Geplante Themen für Vorlesung 4:

- Dioden, Arbeitsbereiche und Ersatzschaltungen
- Beispielanwendungen



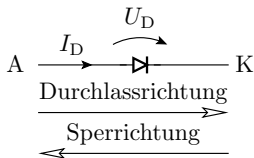
# Dioden





## 2. Dioden

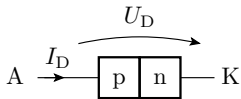
Schaltzeichen und Anschlussbelegung:



$U_D$	Spannungsabfall in Durchlassrichtung
$I_D$	Strom in Durchlassrichtung
A	Anode
K	Kathode

Realisierungen:

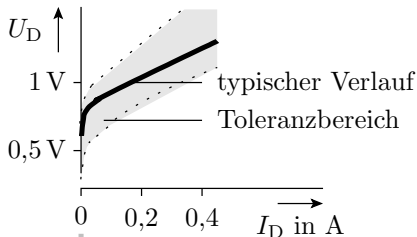
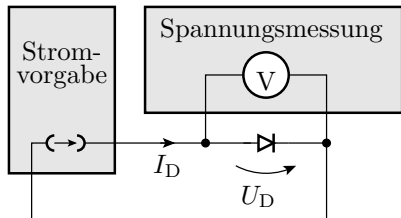
- pn-Übergang: Gleichricht-, Schalt-, Leucht-, Fotodiode, ...



p	Halbleitergebiet mit beweglichen Löchern
n	Halbleitergebiet mit beweglichen Elektronen

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

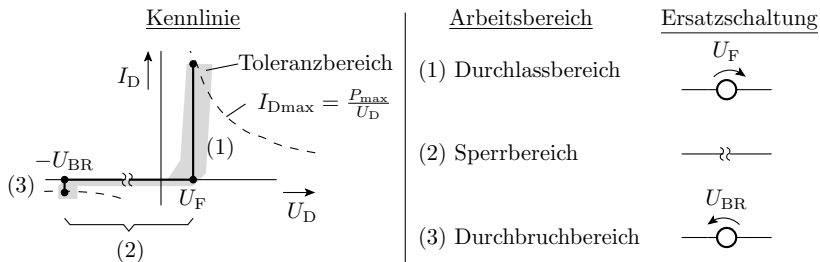
### Messen des Anschlussverhaltens



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

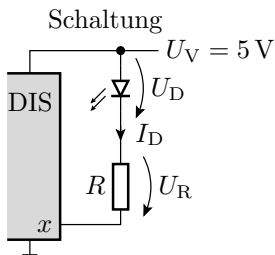
$U_F$  – Flussspannung;  $U_{BR}$  – Durchbruchspannung im Sperrbereich;  
 $P_{\max}$  – maximal zulässige Verlustleistung.



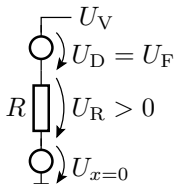
# LED-Anzeige für Logikwerte

## Aufgabe

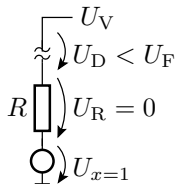
Am Ausgang eines digitalen Schaltkreises, z.B. eines Mikrorechners, ist eine rote Leuchtdiode so anzuschließen, dass sie bei der Ausgabe einer »0« gut sichtbar leuchtet und bei der Ausgabe einer »1« aus ist.



Ersatzschaltung  
»Leuchtdiode ein«



Ersatzschaltung  
»Leuchtdiode aus«



DIS – digitaler integrierter Schaltkreis

## 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  $R$ :

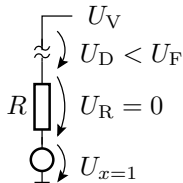
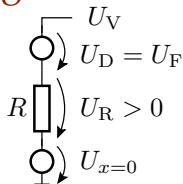
$$R = \frac{U_V - U_F - U_{x=0}}{I_D} \approx \frac{5 \text{ V} - 1,6 \dots 2,1 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 290 \dots 340 \Omega$$

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 ... 340  $\Omega$  aus der E24-Reihe: 300  $\Omega$
- 5% Widerstandstoleranz: 285 ... 315  $\Omega$
- Bereich der Versorgungsspannung:  $U_V = 4,9 \dots 5,1$  V
- minimaler Strom:  $\frac{4,9 \text{ V} - 1,8 \text{ V} - 0,3 \text{ V}}{315 \Omega} \approx 8,95$  mA
- maximaler Strom:  $\frac{5,1 \text{ V} - 1,6 \text{ V} - 0 \text{ V}}{285 \Omega} \approx 12,3$  mA

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





# Gleichrichter

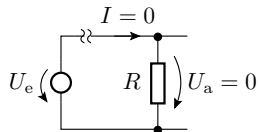
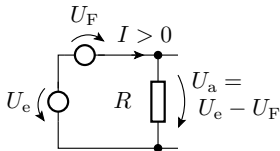
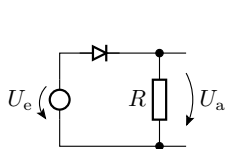
## Einfacher Gleichrichter

- 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:  $U_a = U_e - U_F$ .

Schaltung

Ersatzschaltung  $U_e > U_F$

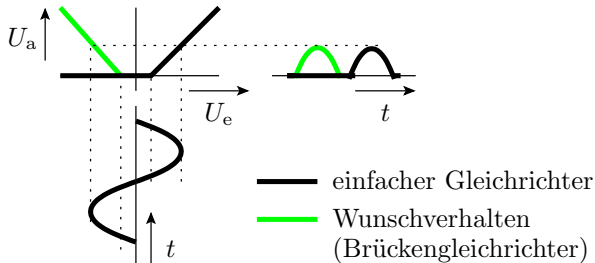
Ersatzschaltung  $U_e \leq U_F$



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

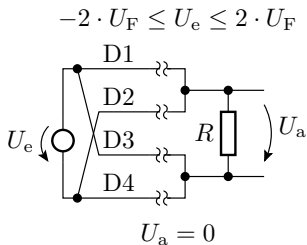
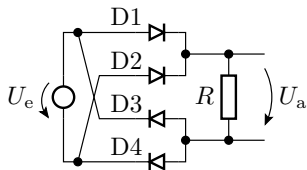


Der einfache Gleichrichter schneidet von einer Wechselspannung die untere Halbwelle ab.

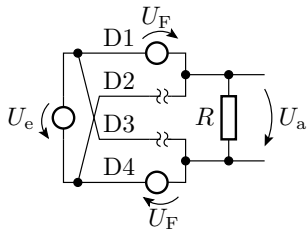
Wünschenswert ist eine Betragsbildung.

## Brückengleichrichter

Schaltung

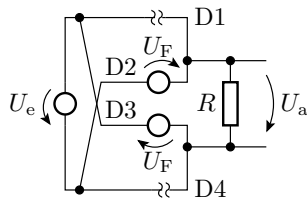


$U_e > 2 \cdot U_F$



$U_a = U_e - 2 \cdot U_F$

$U_e < -2 \cdot U_F$



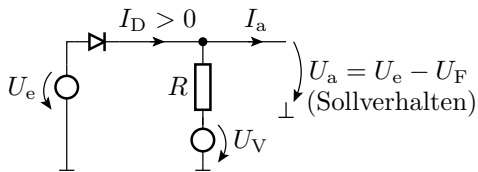
$U_a = -U_e - 2 \cdot U_F$



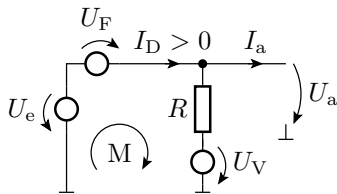
# Diode als Spannungsquelle

## Subtraktion der Flussspannung

Schaltung



Soll-Ersatzschaltung



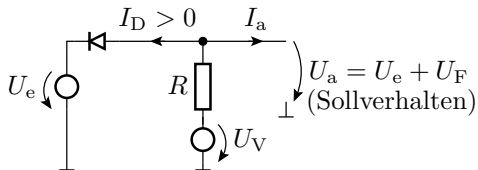
Maximale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

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

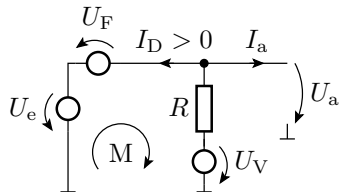
$$U_V < U_e - U_F + R \cdot I_a$$

## Addition der Flussspannung

Schaltung



Soll-Ersatzschaltung

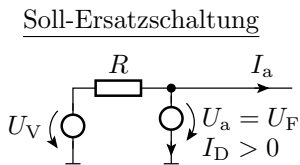
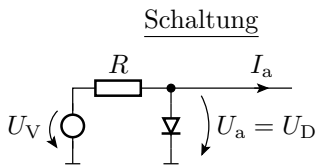


Minimale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

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

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

# Konstantes Potential gleich der Flussspannung



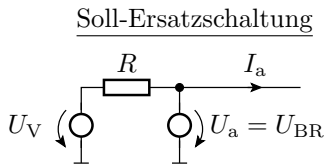
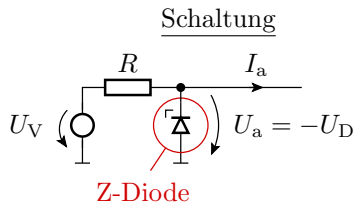
Minimale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

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

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



# Konstantes Potential gleich der Durchbruchspannung



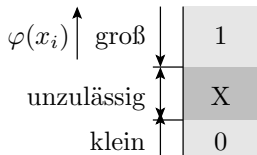
Minimale Versorgungsspannung, bis zu der das Modell gilt:

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



# Logikfunktionen

## Zuordnung zwischen Logik- und Signalwerten

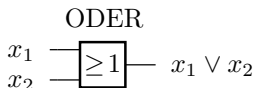
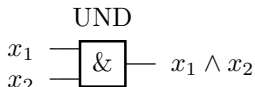


- In der Regel und auch in dieser Vorlesung ist die Zuordnung:  $1 \Rightarrow$  groß und  $0 \Rightarrow$  klein. Umgekehrte Zuordnung auch zulässig.
- Signalwerte zwischen 0 und 1 sind unzulässig / unbestimmt (X).

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



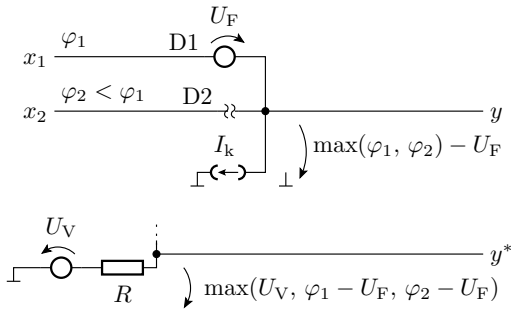
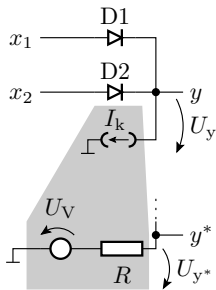
$x_2$	$x_1$	$x_1 \vee x_2$	$x_1 \wedge x_2$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1

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:

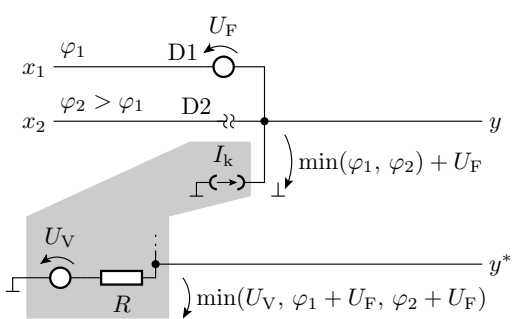
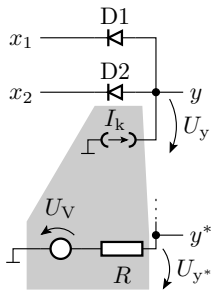
$$\varphi_y = \max_{i=1}^{N_e} (\varphi_i) - U_F$$

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

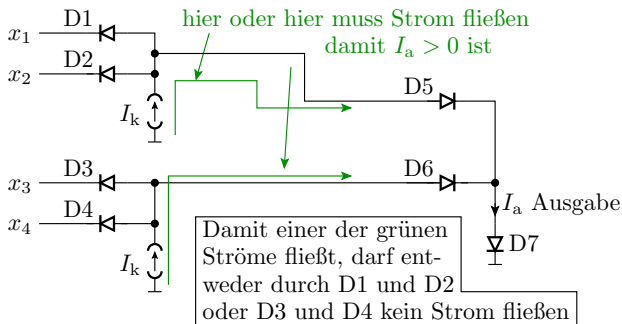


$$\varphi_y = \min_{i=1}^{N_e} (\varphi(x_i) + U_F)$$

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

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

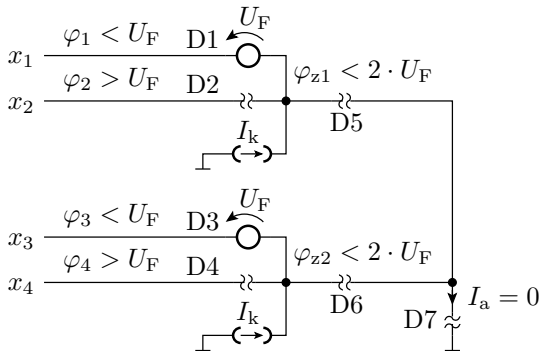
## Verkettung von UND- und ODER



$I_a$  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 $x_4x_3x_2x_1 = 1010$



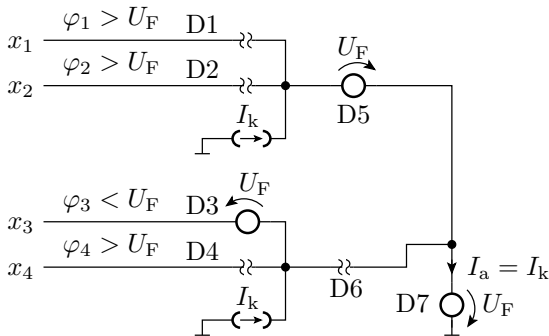
$$\varphi_{z1} = \varphi_1 + U_F < 2 \cdot U_F \Rightarrow D5 \text{ sperrt}$$

$$\varphi_{z2} = \varphi_3 + U_F < 2 \cdot U_F \Rightarrow D6 \text{ sperrt}$$

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



## Kontrolle für $x_4x_3x_2x_1 = 1011$



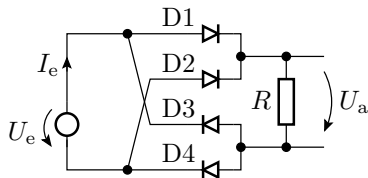
Die Dioden  $D1$  und  $D2$  sperren, so dass der obere Quellenstrom  $I_k$  als  $I_a$  durch  $D7$  fließt.



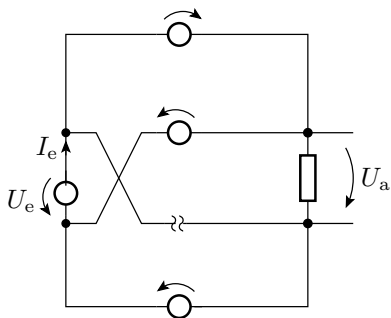
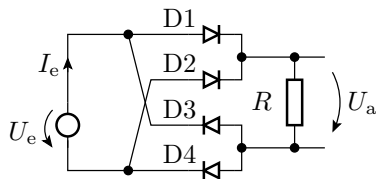
# Aufgaben

## 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?

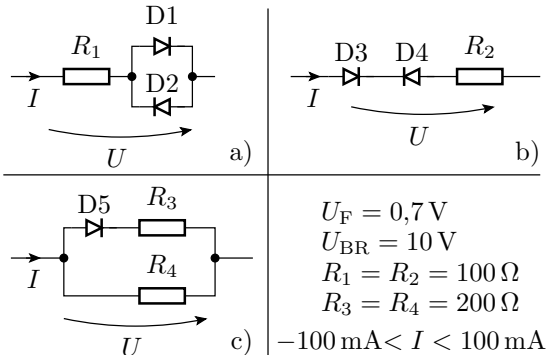


- 1 Zeichnen Sie die Ersatzschaltung?
- 2 Schätzen Sie für diesen Betriebsfall den Strom  $I_e$  und die Verlustleistung  $P_V = I_e \cdot U_e$  ab?



## Aufgabe 2.6: Bestimmung von Zweipolkennlinien

Welche Strom-Spannungs-Beziehungen haben die drei Zweipole?



$$U_F = 0,7 \text{ V}$$

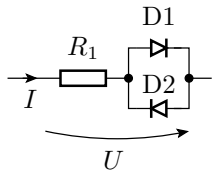
$$U_{BR} = 10 \text{ V}$$

$$R_1 = R_2 = 100 \, \Omega$$

$$R_3 = R_4 = 200 \, \Omega$$

$$-100 \text{ mA} < I < 100 \text{ mA}$$

## Lösung zu Aufgabe 2.6 a



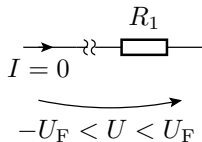
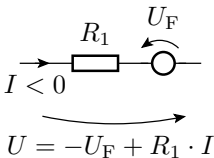
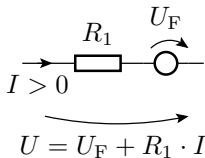
$$U_F = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{BR} = 10 \text{ V}$$

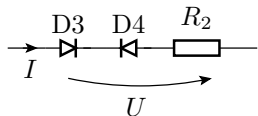
$$R_1 = 100 \Omega$$

---


$$-100 \text{ mA} < I < 100 \text{ mA}$$



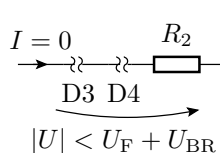
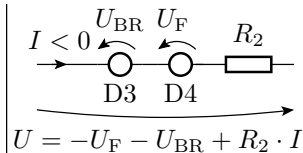
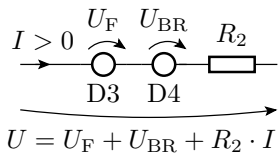
## Lösung zu Aufgabe 2.6 b



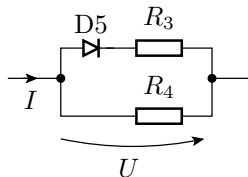
$$U_F = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{BR} = 10 \text{ V}$$

$$R_2 = 100 \Omega$$



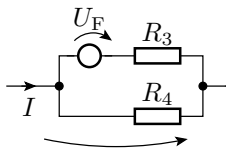
## Lösung zu Aufgabe 2.6 c



$$U_F = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{BR} = 10 \text{ V}$$

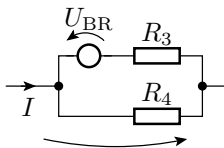
$$R_3 = R_4 = 200 \Omega$$



$$U = U_0 + (R_3 \parallel R_4) \cdot I$$

$$U_0 = U_F \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

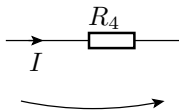
$$\text{für } U > U_F$$



$$U = U_0 + R_3 \parallel R_4 \cdot I$$

$$U_0 = -\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_{BR}$$

$$\text{für } U < -U_{BR}$$



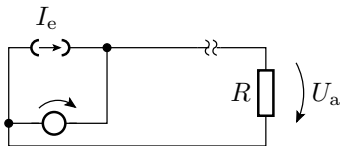
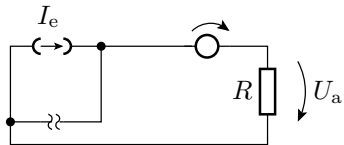
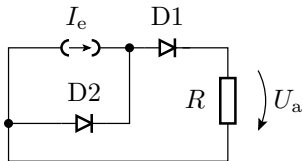
$$U = R_4 \cdot I$$

$$\text{für } -U_{BR} < U < U_F$$

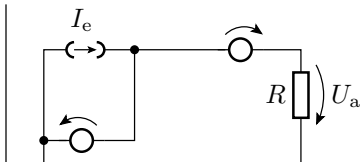
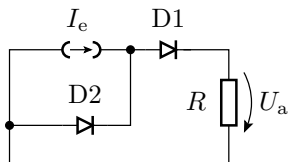


## Aufgabe 2.7: Stromteiler mit Dioden

Wie groß ist  $U_a$  in Abhängigkeit von  $I_e$ ?

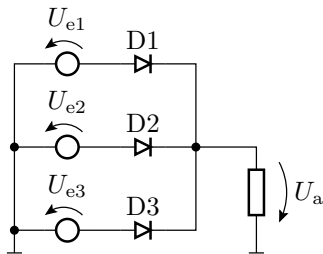


## Gibt es weitere Arbeitsbereiche?

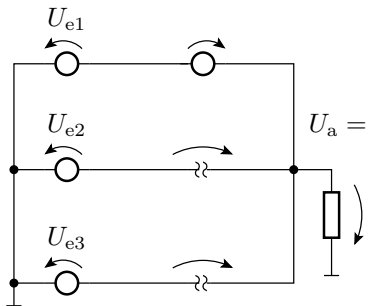


## Aufgabe 2.8: Logikschaltung

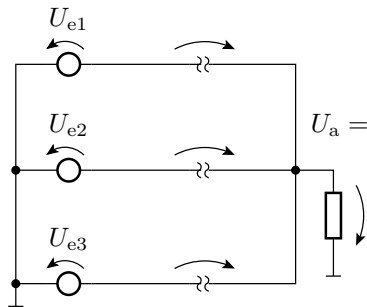
- 1 Wie groß ist  $U_a$  in Abhängigkeit von den drei Eingangsspannungen?
- 2 Welche logische Funktion lässt sich mit dieser Schaltung nachbilden?



1x Durchlassbereich, 2x gesperrt

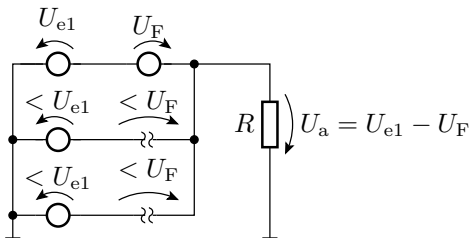


3x gesperrt



## 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:

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