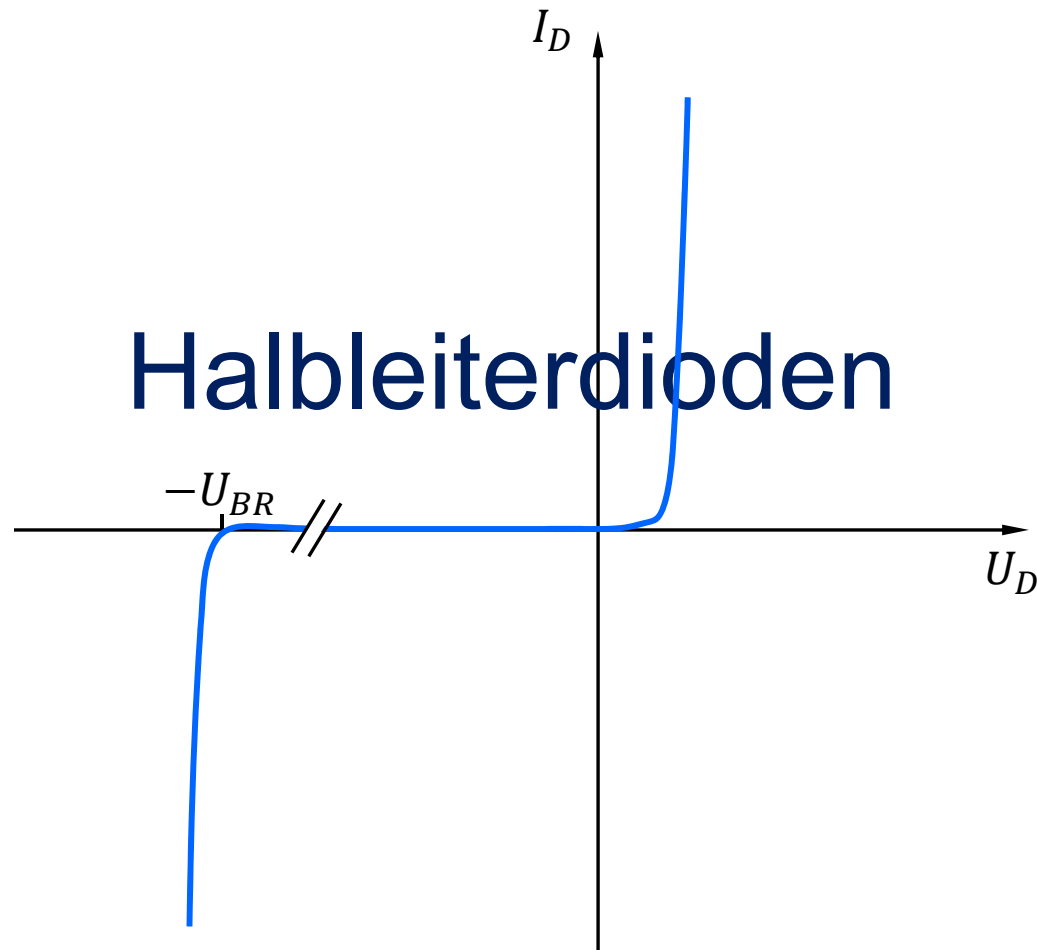
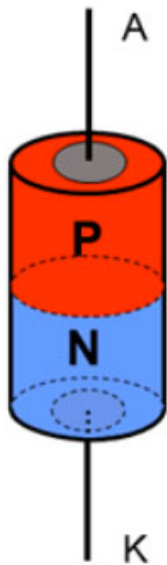


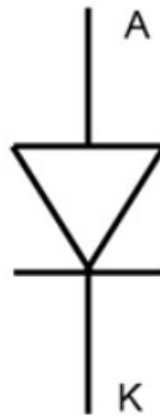
Halbleiterdioden



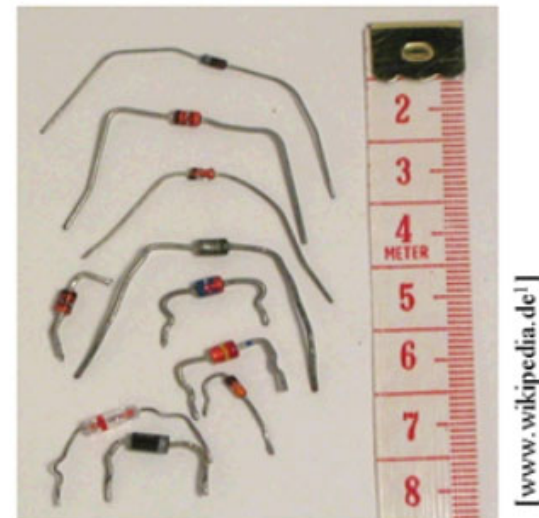
- Grundlagen
 - Was ist eine Diode?
 - Halbleiter
 - Dotierungen
 - Der pn-Übergang
- Anwendung der Diode, Kennlinien
- Shockley-Gleichung, Arbeitspunktberechnung
- Modell der konstanten Durchlassspannung
- Differentieller Widerstand, Kleinsignalmodell der Diode
- Zener-Diode, Grundsaltungen der Diode
- Optische Halbleiterbauelemente



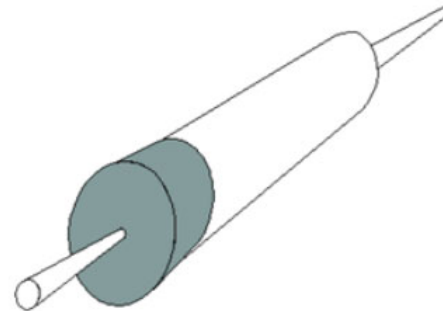
pn-Übergang



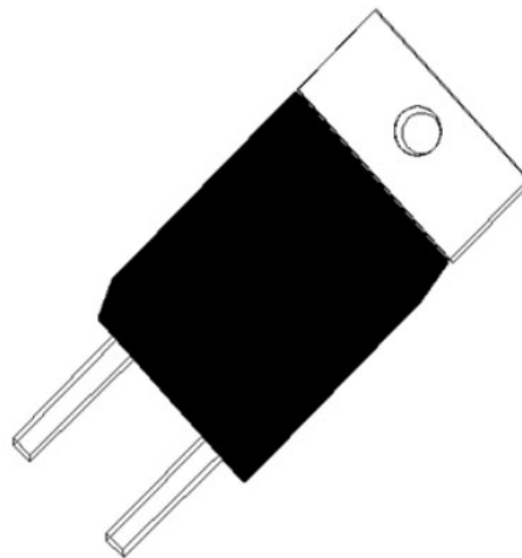
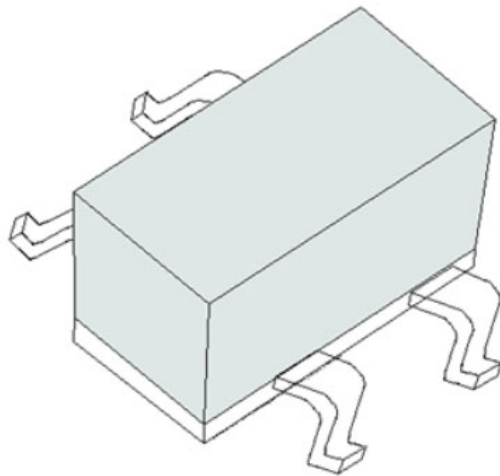
Schaltzeichen



Verschiedene Typen von
Dioden



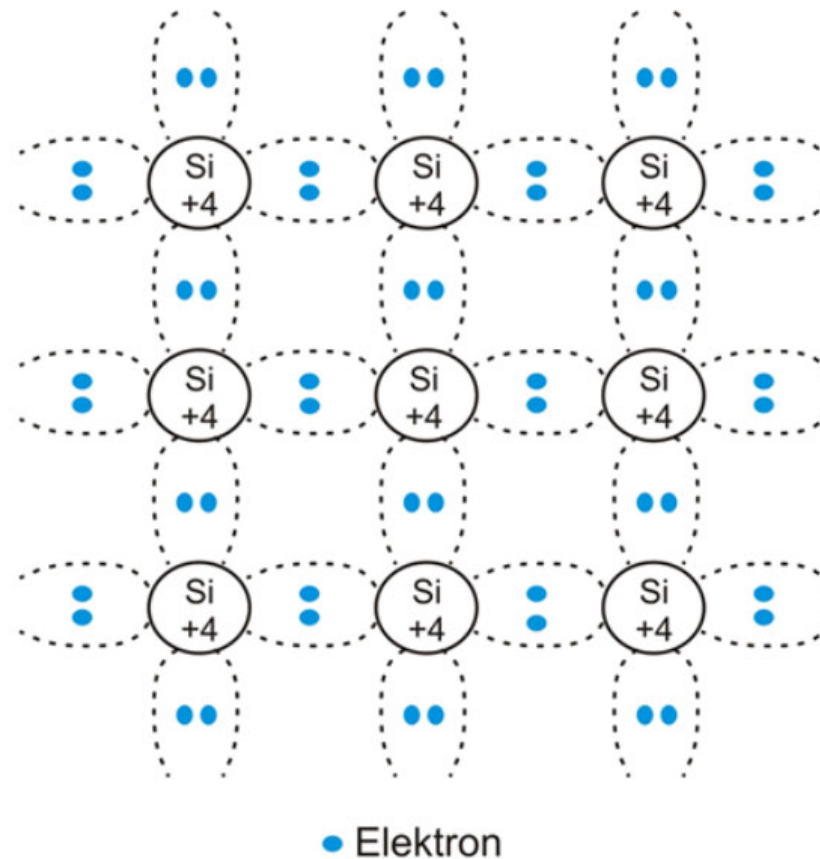
Diode	Durchlassspannung
Si-Diode	0.6-0.7 V
Ge-Diode	0.25-0.3 V
Schottky-Diode	0.15-0.45 V

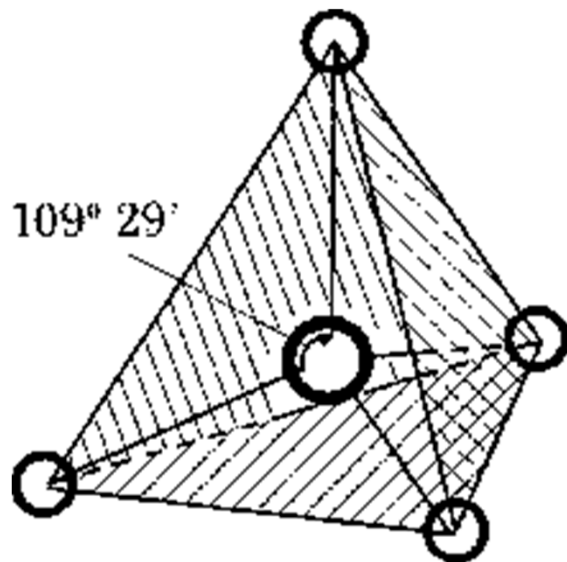


Silizium – Der Stoff aus dem die Halbleiterträume sind

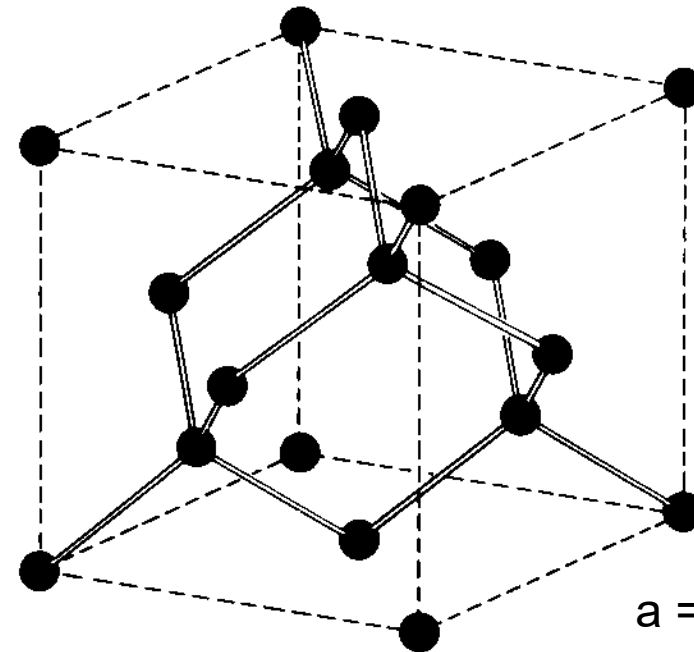
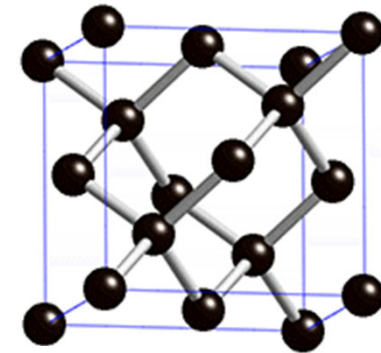


- Silizium ist ein Halbleiter mit 4 Außenelektronen
- Silizium hat das früher verwendete Germanium fast vollständig verdrängt
 - Grund: Es „rostet“ perfekt (SiO_2)!





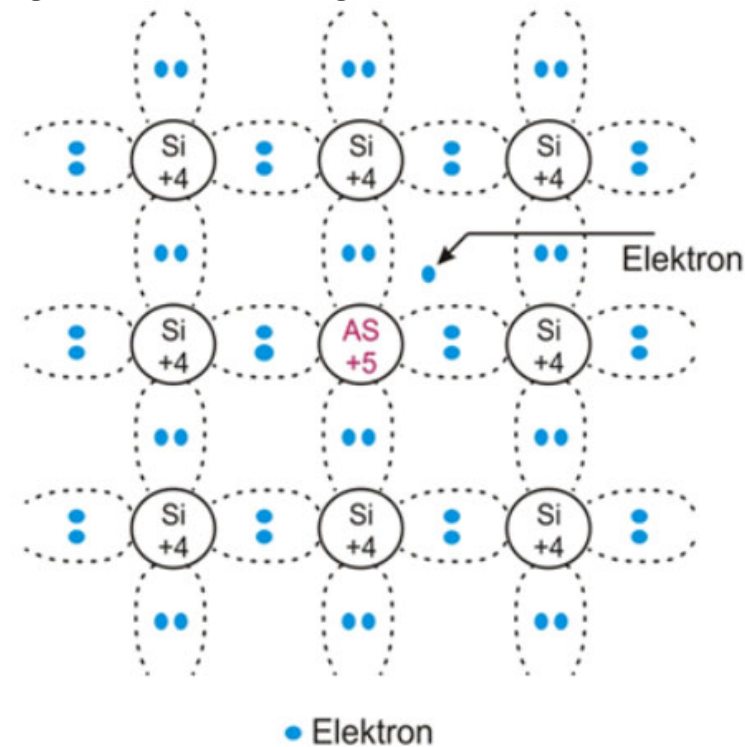
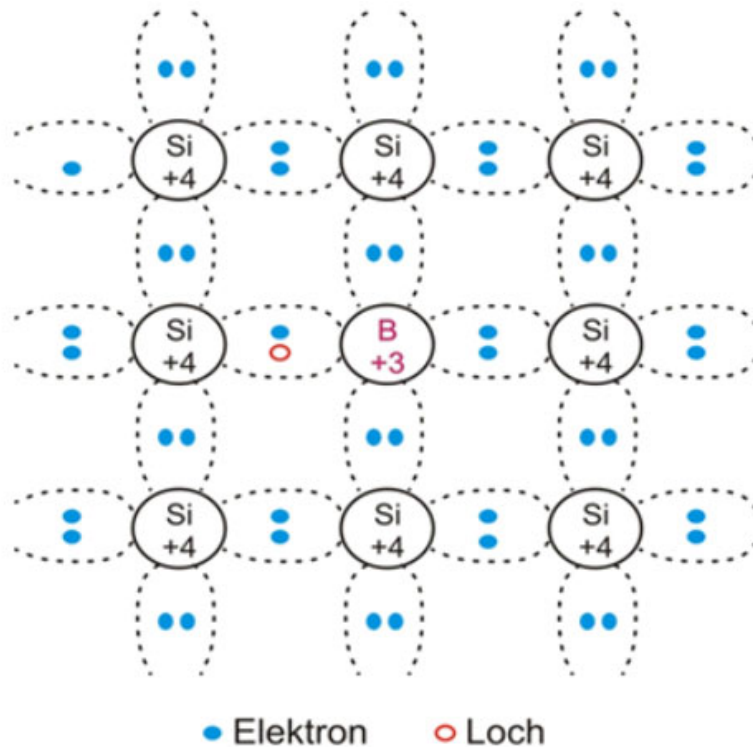
Tetraeder-Bindung



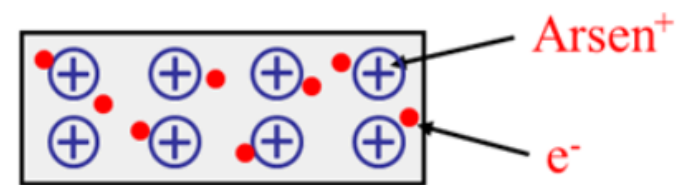
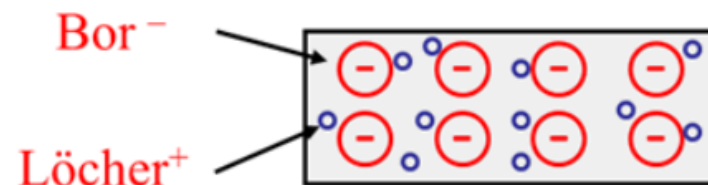
$a = 0,54 \text{ nm}$

Elementarzelle

- Durch Dotierung mit Gruppe 3 (Acceptor) bzw. Gruppe 5 (Donator) Elementen können die elektrischen Eigenschaften gezielt verändert werden



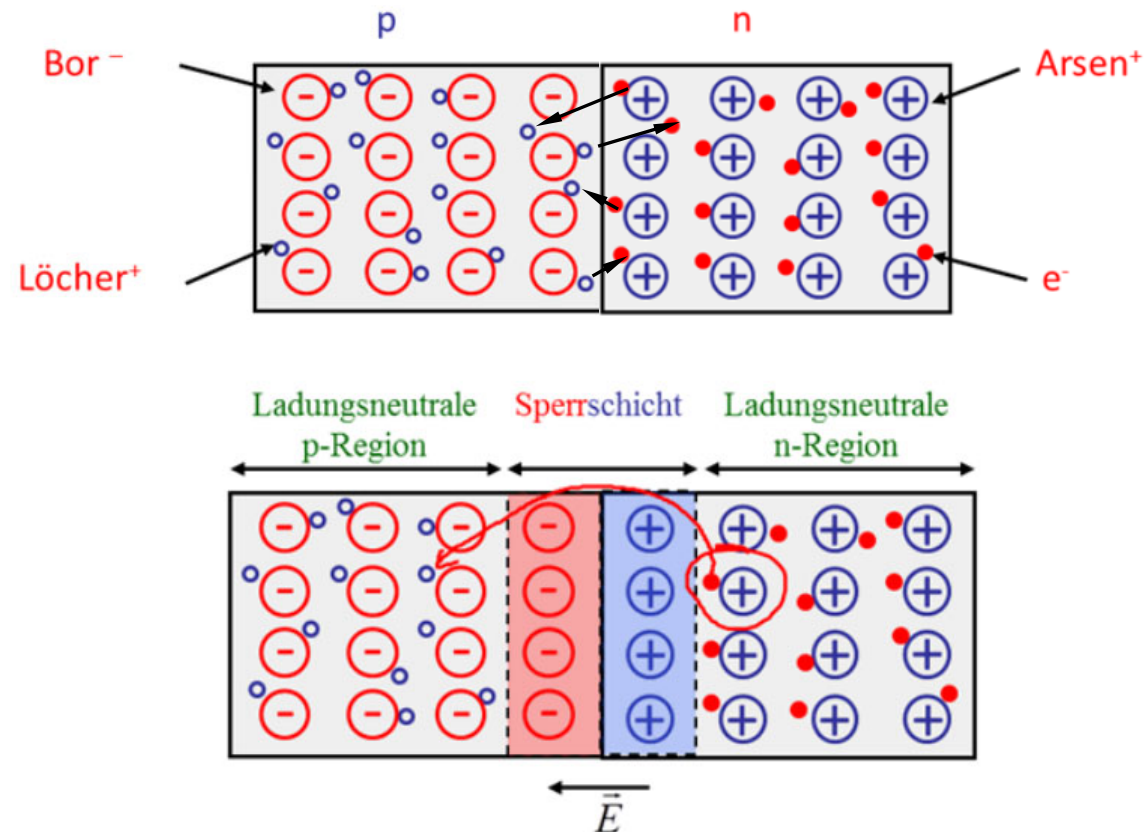
- Vereinfachte Darstellung:



pn-Übergang: Bildung der Raumladungszone

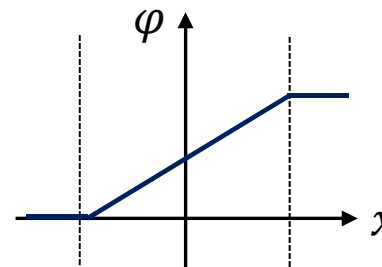


FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

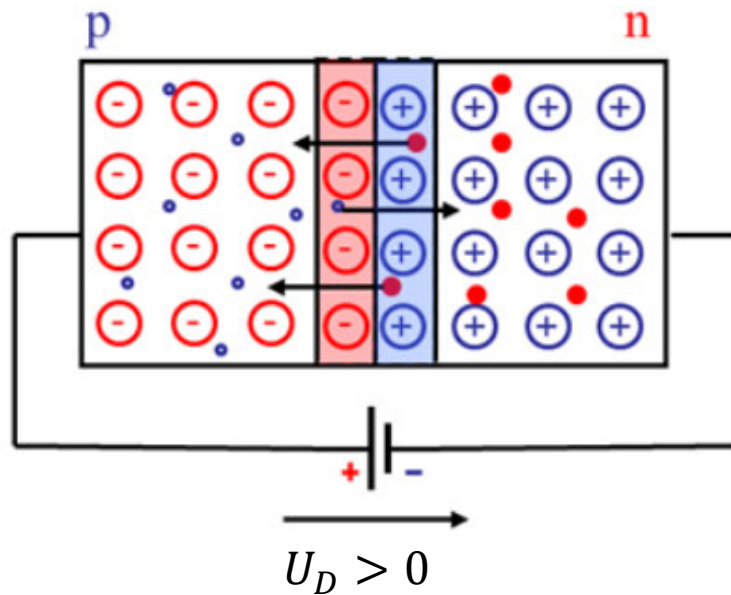


Sperrschicht:

- keine freien, beweglichen Ladungsträger
- Raumladungszone (RLZ)
- engl. depletion region (= Verarmungszone)

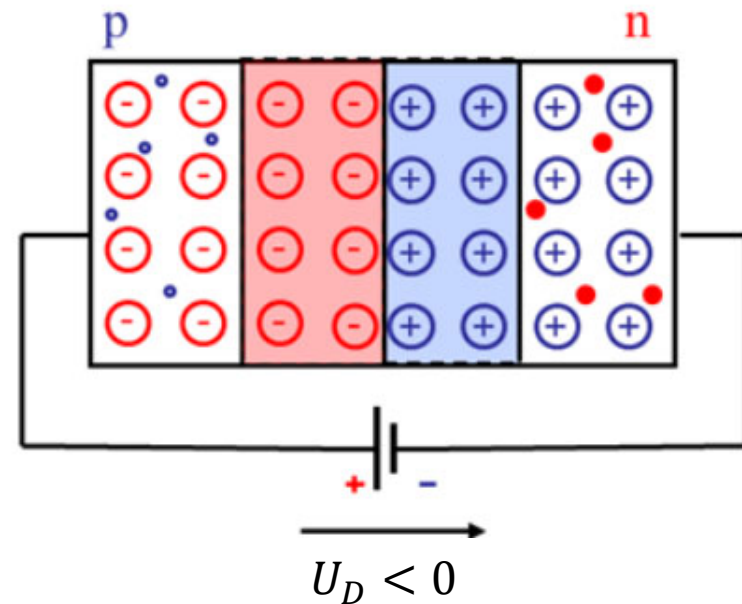


Diode in Flusspolung



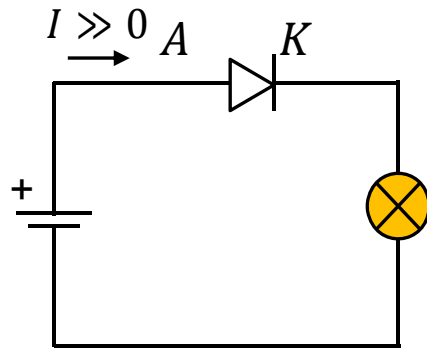
Sperrschicht hat
sich verkleinert

Diode in Sperrpolung

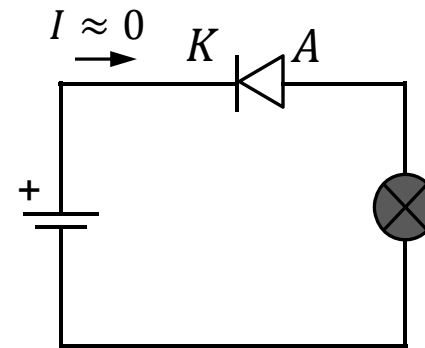


Sperrschicht dehnt
sich aus

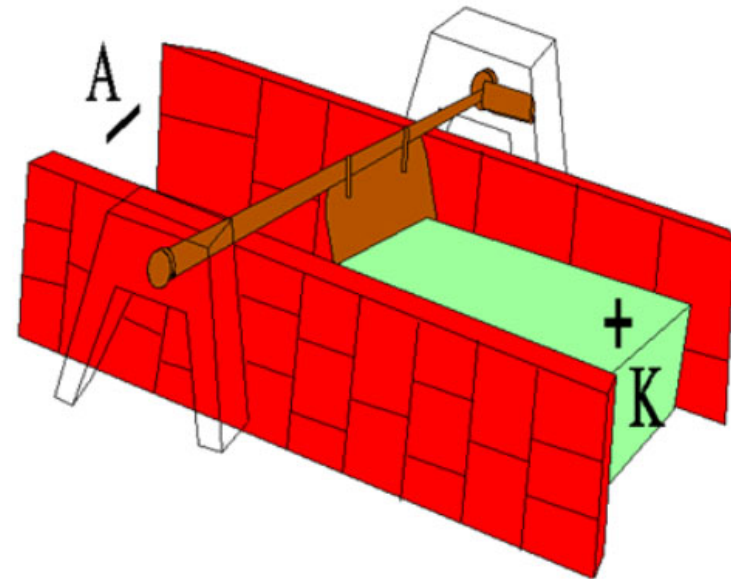
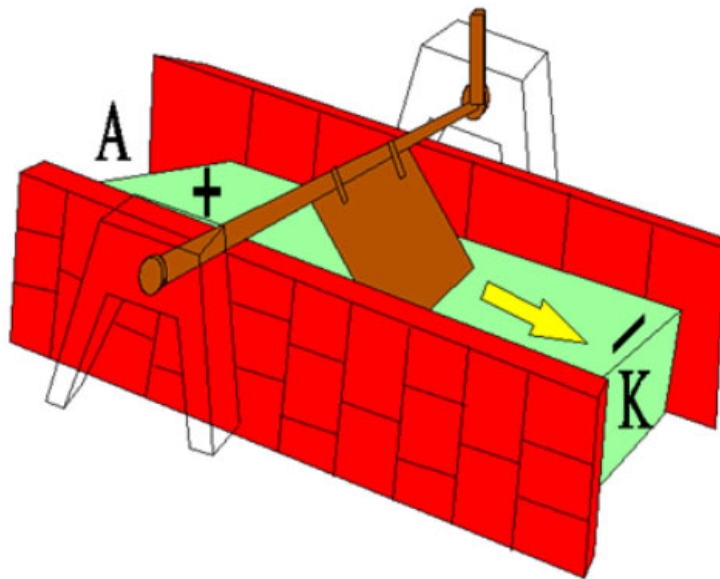
- Grundlagen
- Anwendung der Diode, Kennlinien
 - Die Diode als elektrisches Ventil
 - Eine mögliche Anwendung der Diode: Die Entkopplung von Stromkreisen
 - Welche Arbeitsbereiche gibt es bei der Diode?
- Shockley-Gleichung, Arbeitspunktberechnung
- Modell der konstanten Durchlassspannung
- Differentieller Widerstand, Kleinsignalmodell der Diode
- Zener-Diode, Grundsaltungen der Diode
- Optische Halbleiterbauelemente



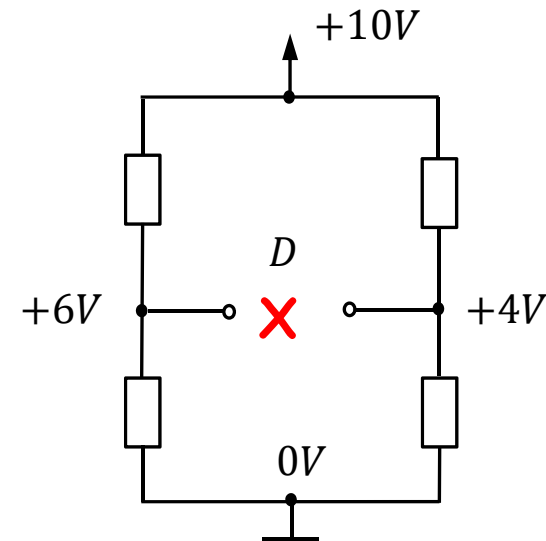
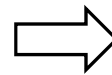
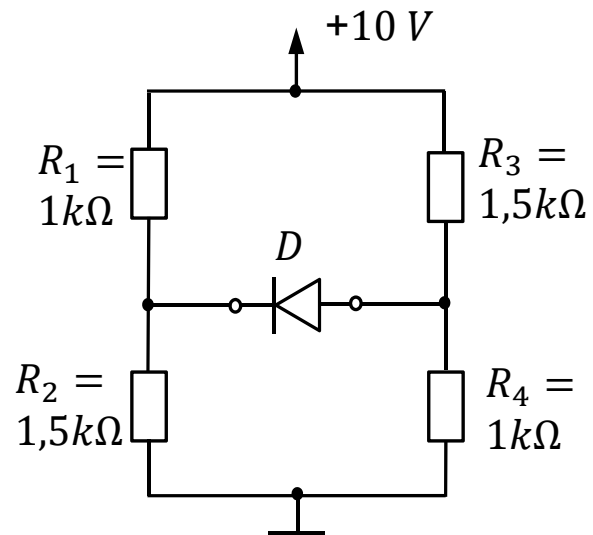
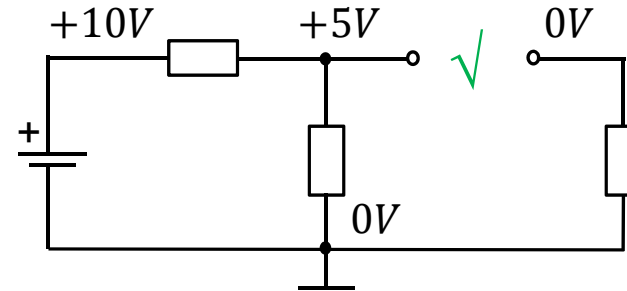
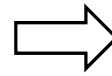
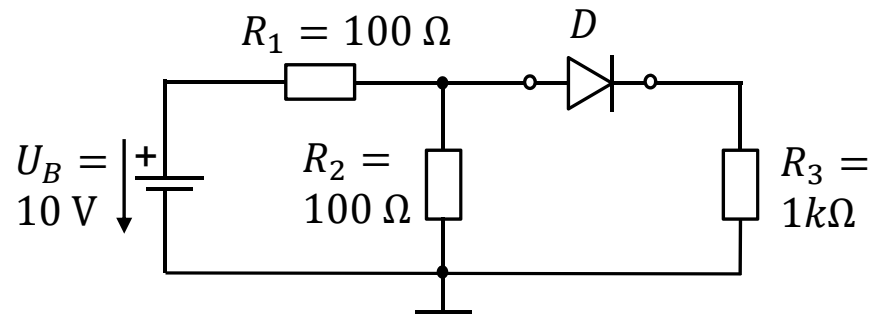
Flusspolung (engl. Forward bias):
Betrieb in Durchlassrichtung
(Diode niederohmig)



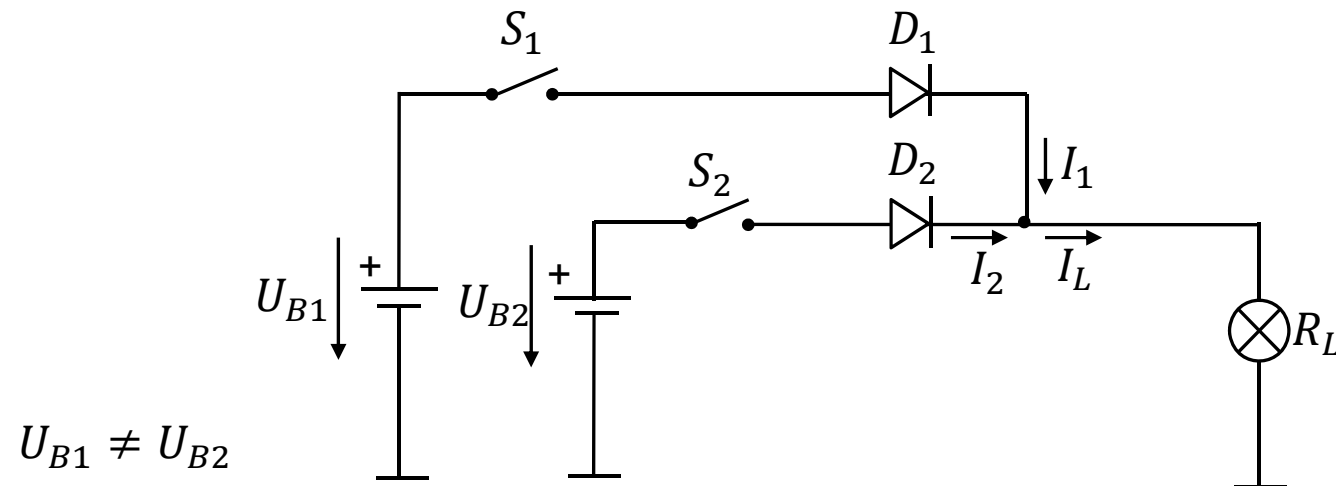
Sperrpolung (engl. reverse bias):
Betrieb in Sperrrichtung
(Diode hochohmig)



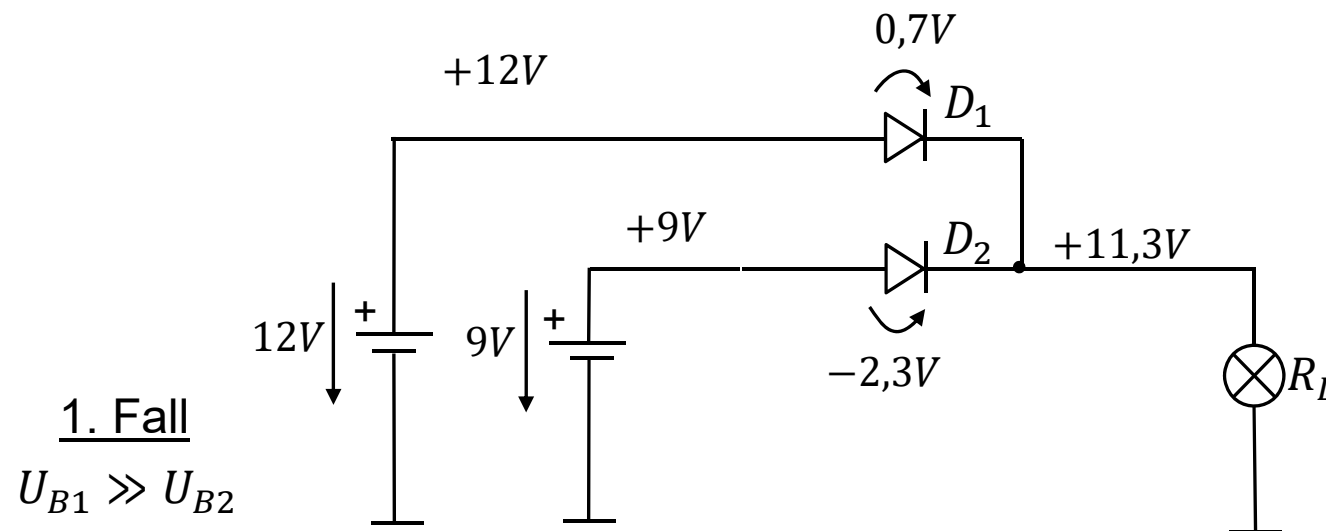
Übung: Diode „on“ oder „off“?



Beispiel: Entkopplung von Stromkreisen (1)

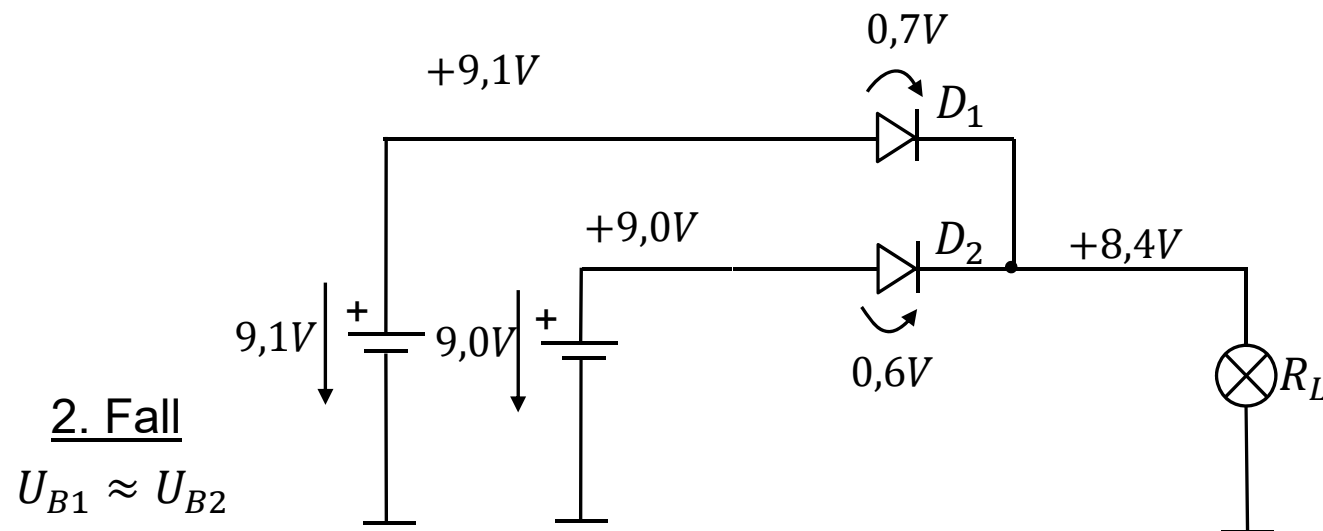


Beispiel: Entkopplung von Stromkreisen (2)



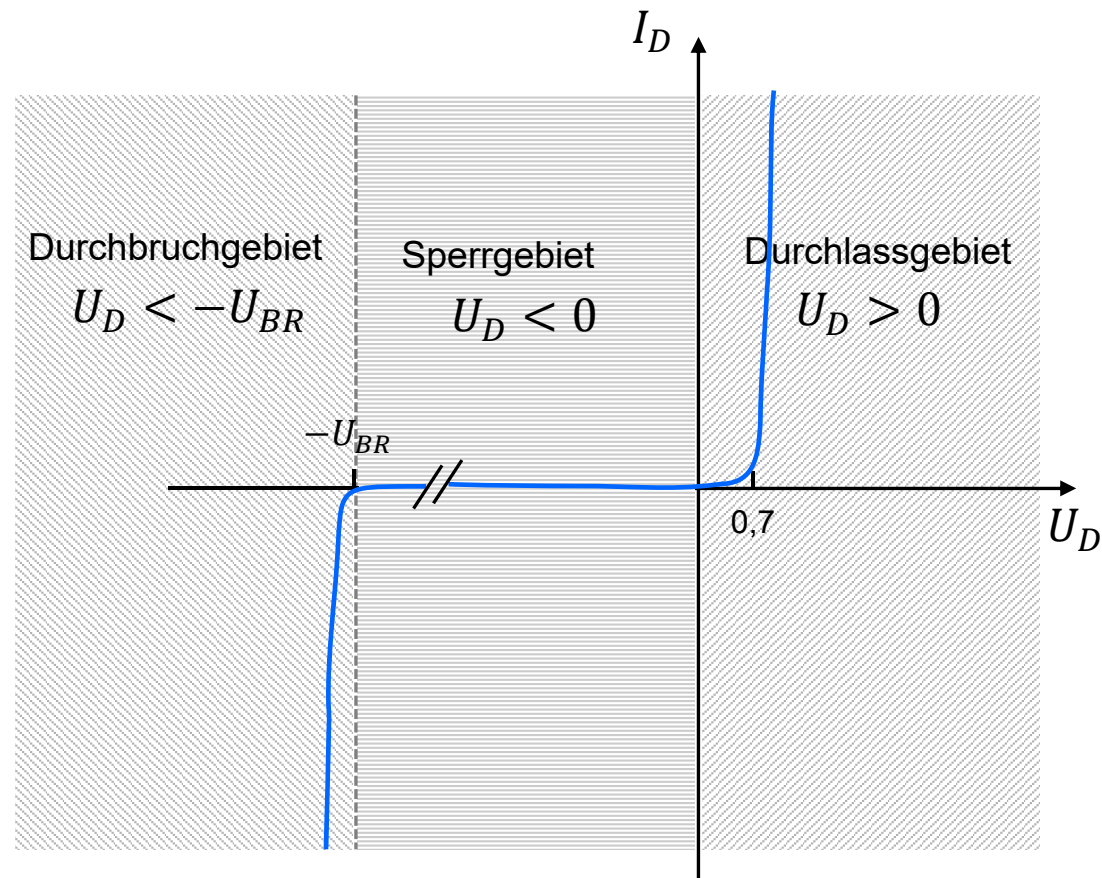
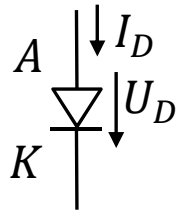
Nur der ersten Batterie wird Energie entnommen.

Beispiel: Entkopplung von Stromkreisen (3)

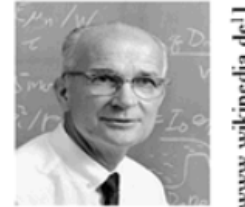
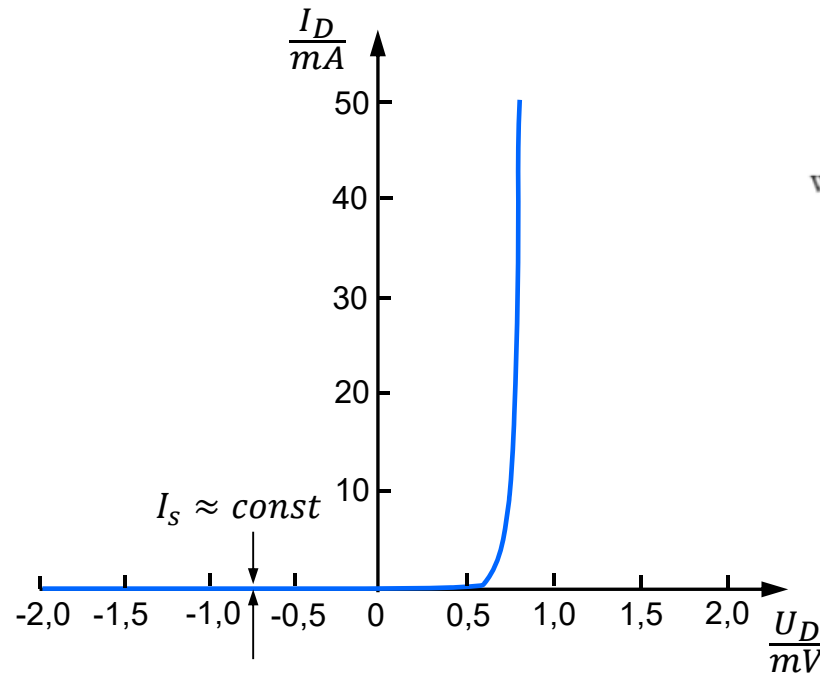


Beide Quellen liefern Energie. D_2 ist hochohmiger $\Rightarrow I_2 \leq I_1$,
d.h. die frischere Batterie wird stärker entladen.

Die 3 Arbeitsbereiche der Diodenkennlinie



Shockley-Gleichung: $I_D = f(U_D)$



W. B. Shockley 1910-1989
[www.wikipedia.de]

$$I_D = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot U_D}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)$$

k Boltzmann-Konstante, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

T absolute Temperatur in Kelvin

q Elementarladung, $q = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

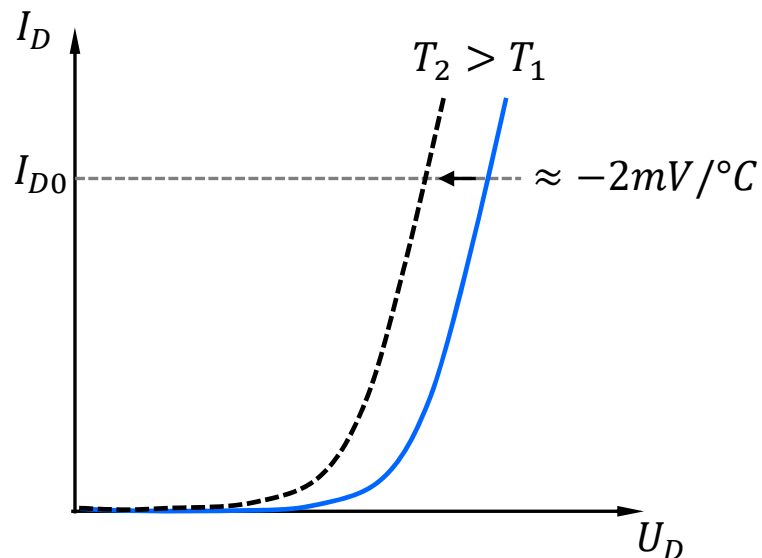
I_S theoretischer Sättigungssperrstrom

n Emissionskoeffizient, $n = 1 \dots 2$

$$U_{Temp} = \frac{k \cdot T}{q} = 25 \text{ mV @ } 293 \text{ K (20 °C)}$$

$$= 26 \text{ mV @ } 300 \text{ K (27 °C)}$$

Bei Raumtemperatur beträgt die Temperaturspannung ca. 25 mV.



$$I_D = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot U_D}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)$$

Halbleiter reagieren auf Erwärmung mit Erhöhung ihrer Leitfähigkeit.

U_{Temp} und I_S sind temperaturabhängig!

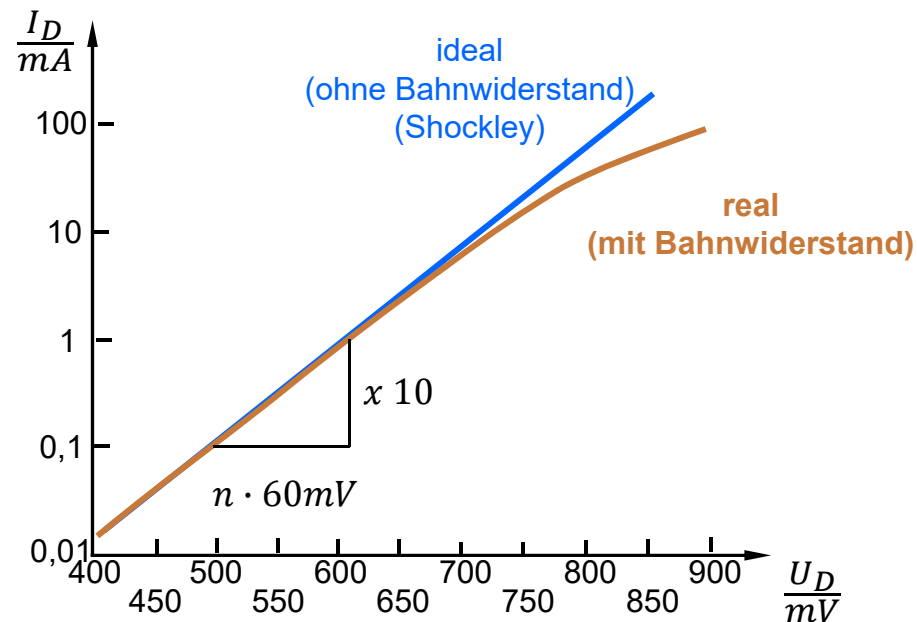
⇒ Kennlinie verschiebt sich nach links (bzw. nach oben)

Für $I_D = const$ gilt: $\frac{dU_D}{dT} = -1 \dots -3 \frac{mV}{K} \approx -2 \frac{mV}{K}$

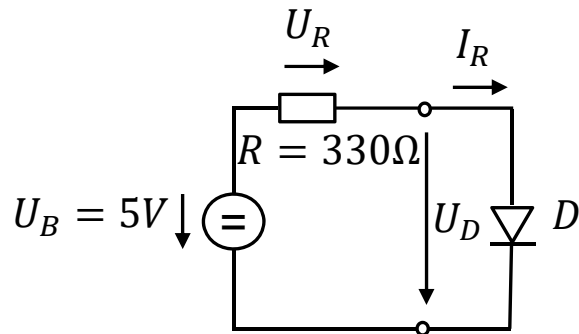
Bei Erwärmung sinkt U_D um ca. 2 mV je Kelvin.

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_D}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad \text{Gute Näherung: } \boxed{I_D = I_S \cdot e^{\frac{U_D}{n \cdot U_{Temp}}} \quad \text{für } U_D \gg n \cdot U_{Temp}}$$

$$\text{Umkehrfunktion: } U_D = n \cdot U_{Temp} \cdot \ln \frac{I_D}{I_S}$$



Beispiel: Wo auf der Diodenkennlinie liegt der Arbeitspunkt?



Konstruktion
(Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom):

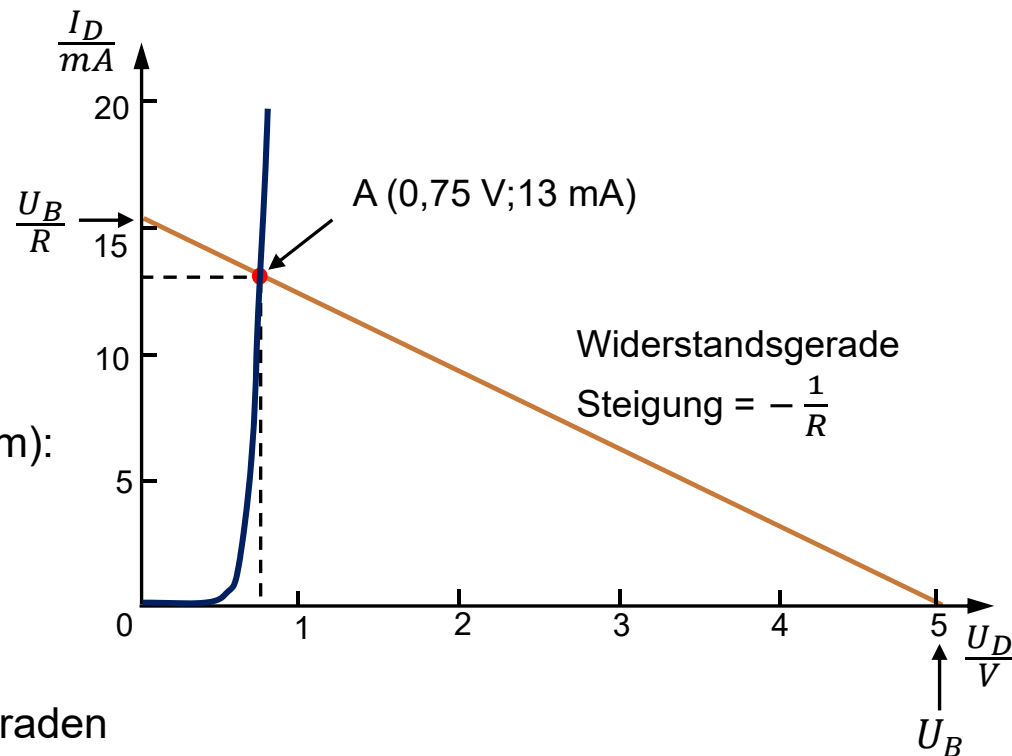
$$U_D\text{-Achsenschnittpunkt} = U_B$$

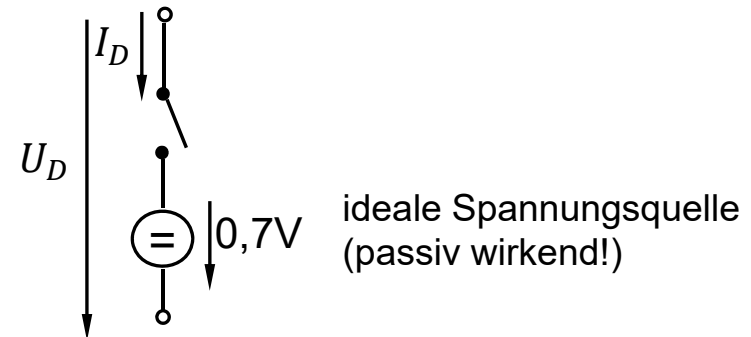
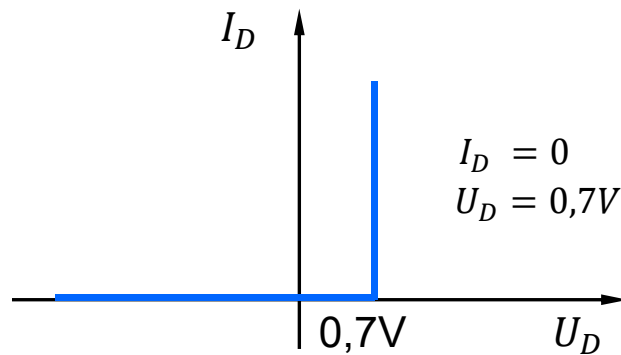
$$I_D\text{-Achsenschnittpunkt} = \frac{U_B}{R}$$

Gleichung der Widerstandsgeraden
im $I_D - U_D$ -Diagramm:

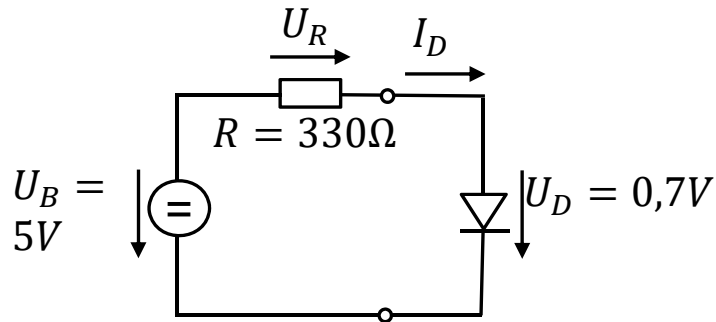
$$U_B = R \cdot I_D + U_D \text{ (Masche)}$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{U_B - U_D}{R} = -\frac{1}{R} \cdot U_D + \frac{U_B}{R} \text{ (vgl. } y = m \cdot x + b \text{)}$$





Beispiel: Bestimme I_D !



$$I_D = \frac{U_B - U_D}{R} = \frac{5V - 0,7V}{330\Omega} = 13,03 \text{ mA}$$

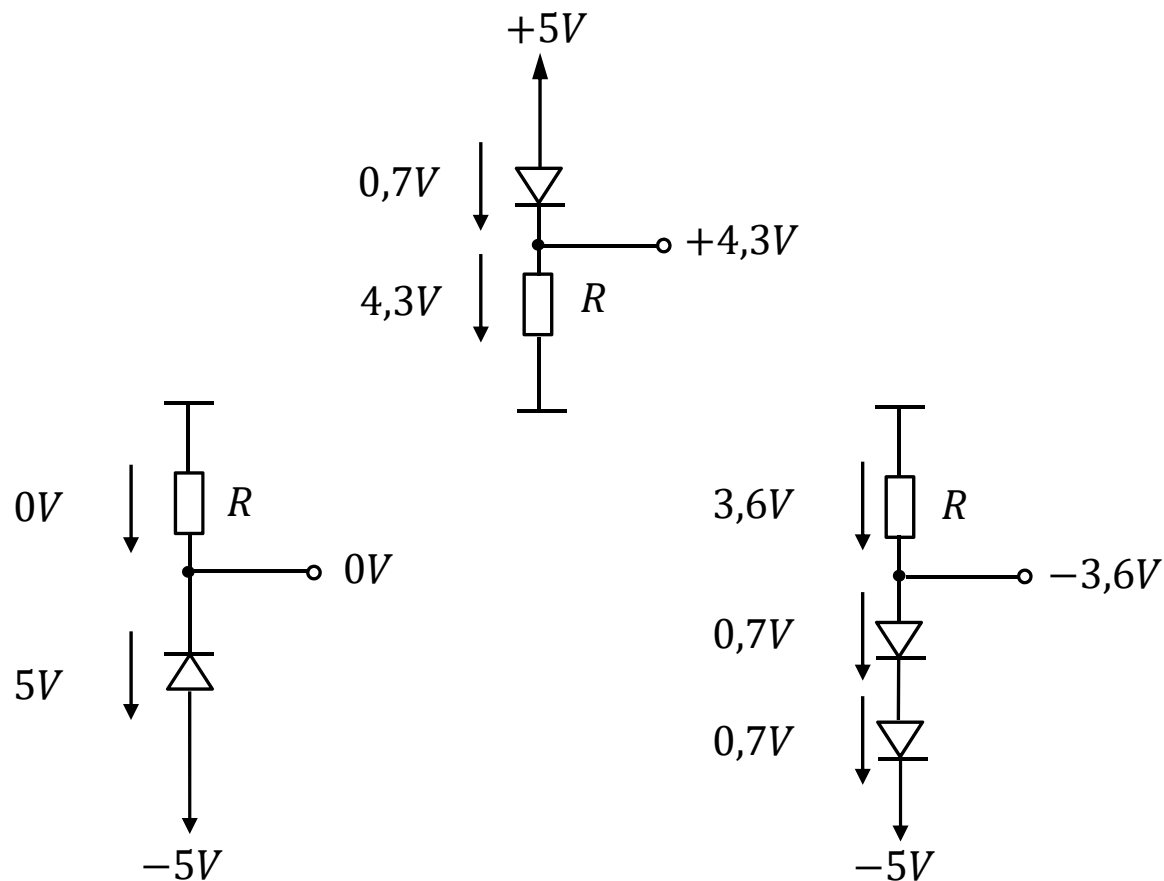
$$\text{neu: } R = 660\Omega \Rightarrow I_D = 6,52 \text{ mA}$$

Die Durchlassspannung einer Diode in Flusspolung kann mit $U_D = 0,7V \approx \text{const.}$ angenommen werden.

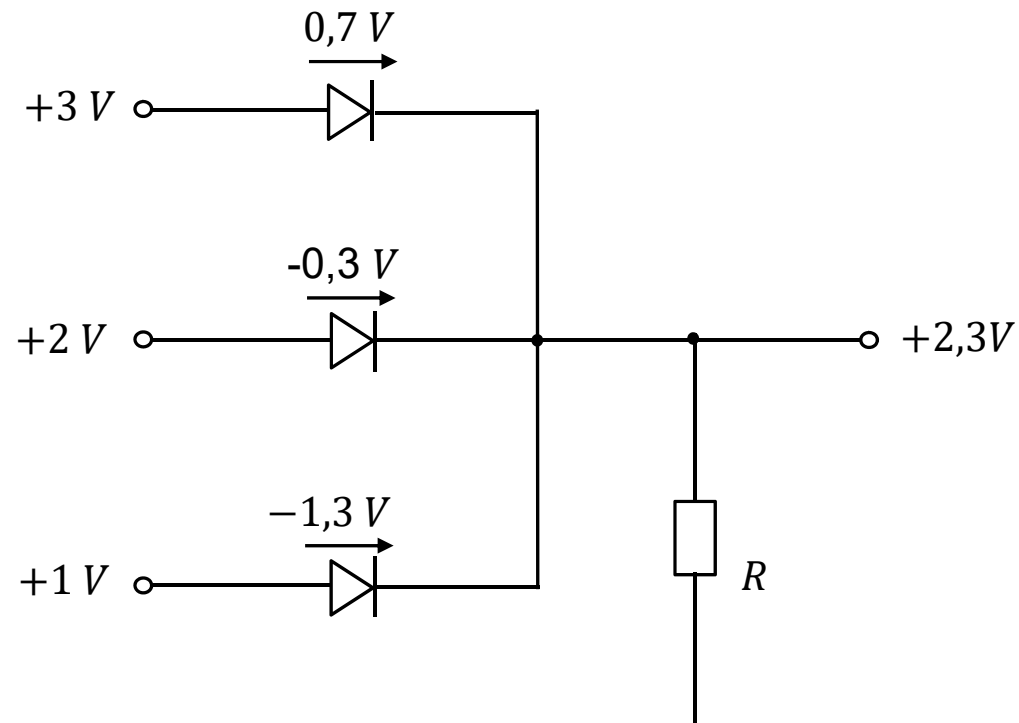
Modell der konstanten Durchlassspannung (2)



Beispiel 2: Man bestimme jeweils den Wert des Potentials an der Ausgangsklemme.



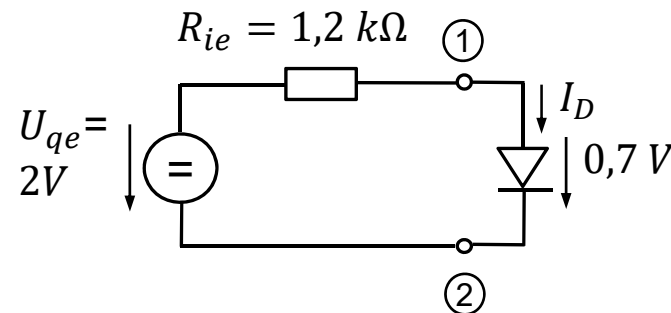
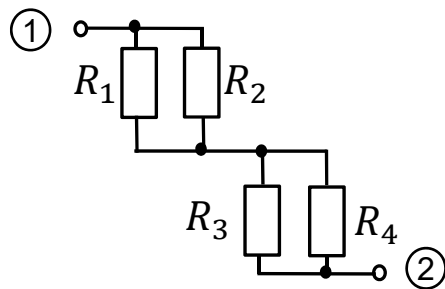
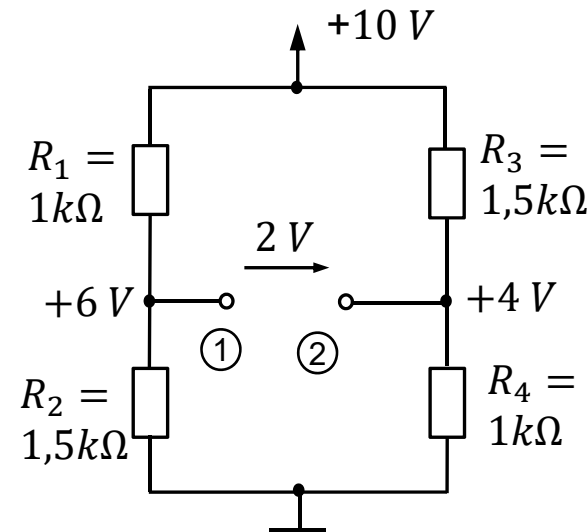
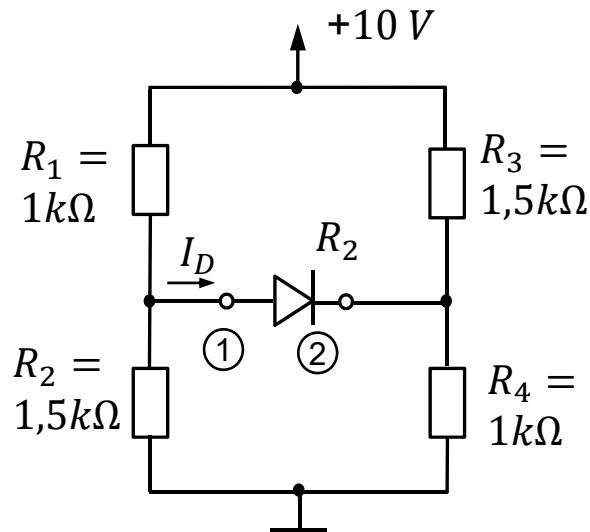
Beispiel 3: Wie groß ist das Potential an der Ausgangsklemme hier?



Modell der konstanten Durchlassspannung (4)



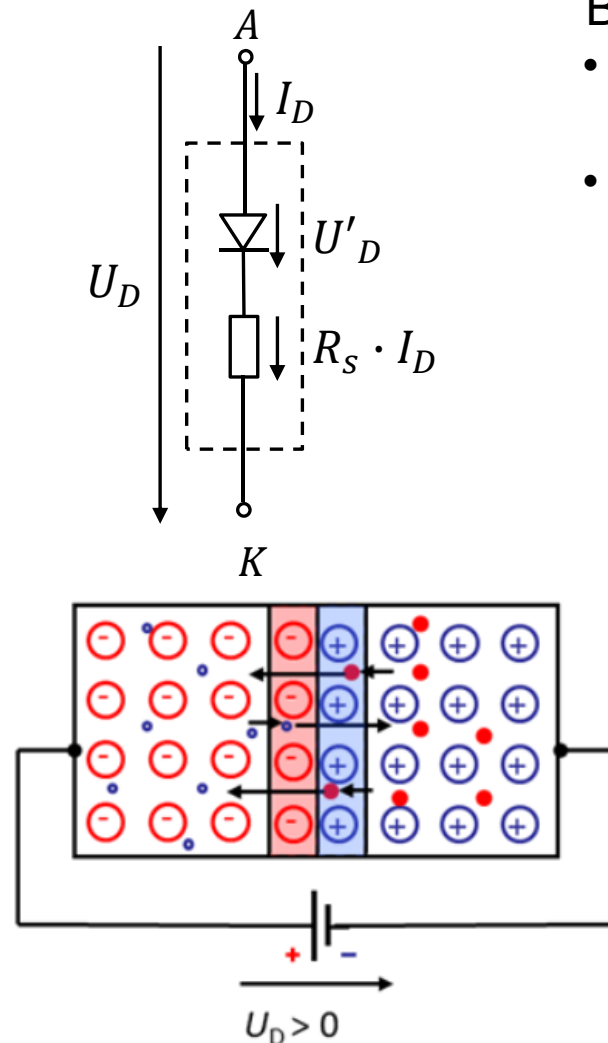
Beispiel 4: Diesmal liegt die Diode in Durchlassrichtung. Wie groß ist I_D ?



$$R_{ie} = (R_1 \parallel R_2) + (R_3 \parallel R_4)$$

$$I_D = \frac{U_{qe} - U_D}{R_{ie}} = \frac{2V - 0,7V}{1,2k\Omega} = 1,08mA$$

- Grundlagen
- Anwendung der Diode, Kennlinien
- Shockley-Gleichung, Arbeitspunktberechnung
- Modell der konstanten Durchlassspannung
- Differentieller Widerstand, Kleinsignalmodell der Diode
 - Was versteht man unter dem Bahnwiderstand einer Diode?
 - Was bedeutete „differentieller Widerstand“?
 - Mischspannung an einer Diode
 - Kleinsignalmodell der Diode
 - Was versteht man unter „nicht linearen Verzerrungen“?
- Zener-Diode, Grundsaltungen der Diode
- Optische Halbleiterbauelemente



Bahnwiderstand (R_S):

- endliche Leitfähigkeit der neutralen Zonen (Halbleitermaterial außerhalb der Sperrschicht)
- Kontaktwiderstände an den Metallisierungen

U_D äußere Diodenspannung

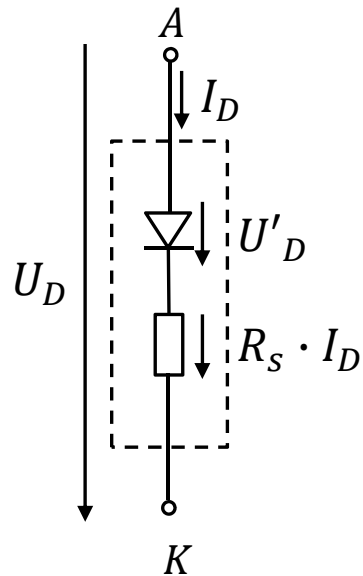
U'_D innere Diodenspannung

Wir versuchen, die resultierende Zweipolgleichung $I_D = f(U_D)$ zu bestimmen:

$$U_D = U'_D + R_S \cdot I_D$$

$$U_D = n \cdot U_{Temp} \cdot \ln \frac{I_D}{I_S} + R_S \cdot I_D \quad \mathbf{I_D = ?}$$

Siehe Arbeitspunktberechnung!



Bahnwiderstand (R_S):

- endliche Leitfähigkeit der neutralen Zonen (Halbleitermaterial außerhalb der Sperrschicht)
- Kontaktwiderstände an den Metallisierungen

U_D äußere Diodenspannung

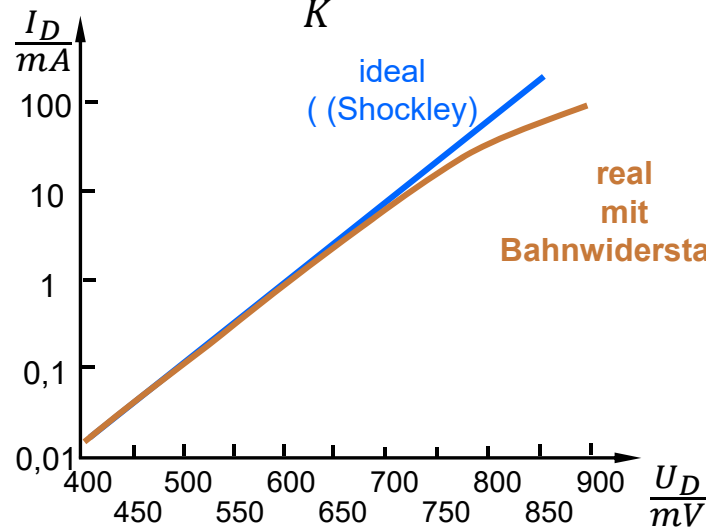
U'_D innere Diodenspannung

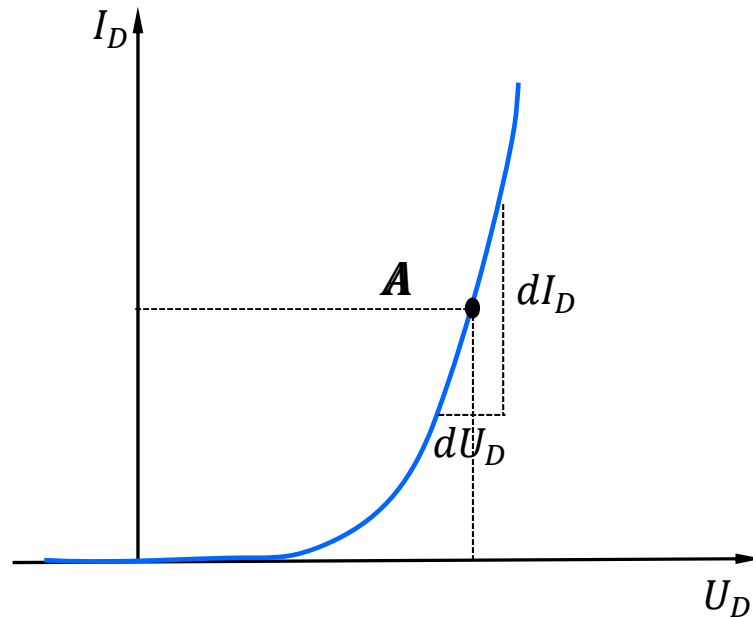
Wir versuchen, die resultierende Zweipolgleichung $I_D = f(U_D)$ zu bestimmen:

$$U_D = U'_D + R_S \cdot I_D$$

$$U_D = n \cdot U_{Temp} \cdot \ln \frac{I_D}{I_S} + R_S \cdot I_D \quad I_D = ?$$

Siehe Arbeitspunktberechnung!





$$\cancel{R_D = \frac{U_D}{I_D} \Big|_A}$$

absoluter
Durchlasswiderstand

$$r_D = \frac{dU_D}{dI_D} \Big|_A$$

differentieller
Durchlasswiderstand

$$g_D = \frac{1}{r_D} = \frac{dI_D}{dU_D} = \frac{d}{dU_D} \left(I_S \cdot e^{\frac{U_D}{n \cdot U_{Temp}}} \right) = \frac{1}{n \cdot U_{Temp}} \cdot \underbrace{I_S \cdot e^{\frac{U_D}{n \cdot U_{Temp}}}}_{= I_D} \quad (1. \text{ Ableitung})$$

$$\boxed{r_D = \frac{n \cdot U_{Temp}}{I_D}} \quad r_D \text{ ist arbeitspunktabhängig}$$

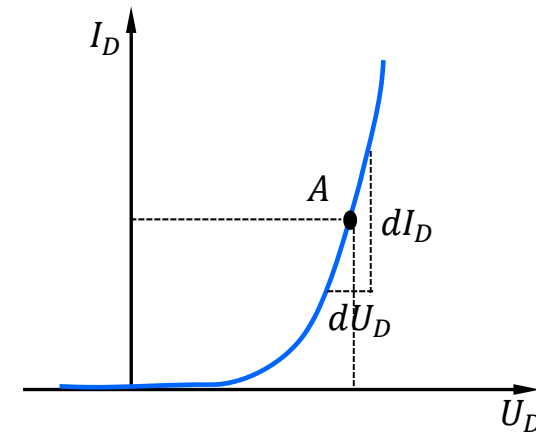
Inverse Proportionalität: $r_D \sim \frac{1}{I_D}$

Beispiel: Bei 20 °C gilt für $n = 1$ (idealer pn-Übergang)

$$r_D = \frac{25 \text{ mV}}{I_D}$$

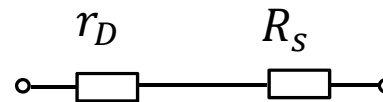
Für $n = 1 \dots 2$ erhält man bei

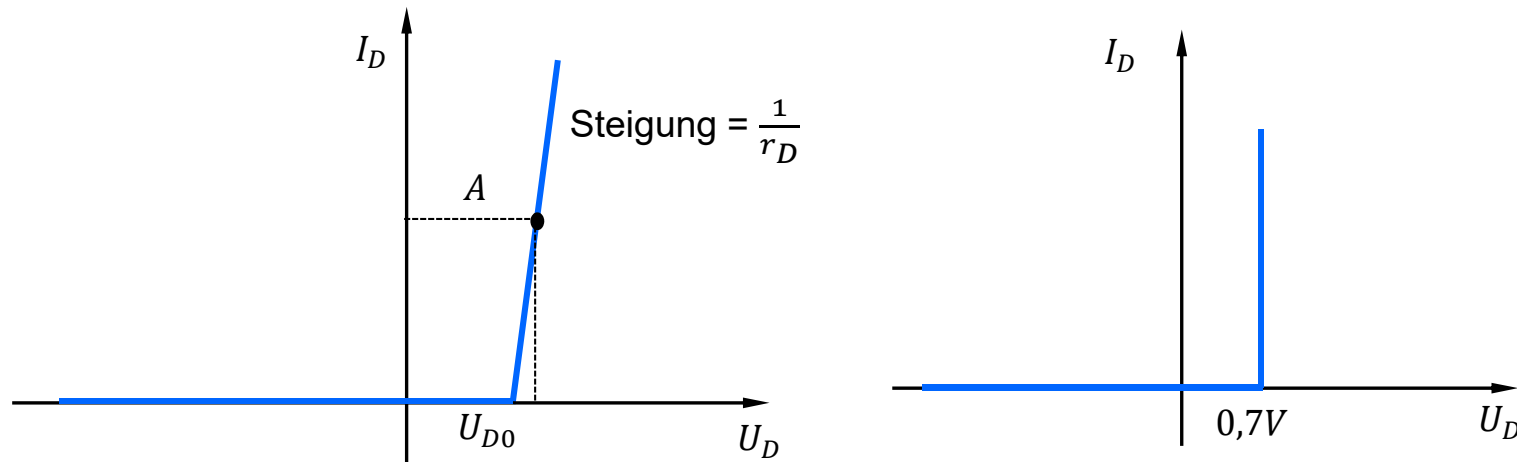
$$I_D = 1 \begin{Bmatrix} \mu\text{A} \\ \text{mA} \\ \text{A} \end{Bmatrix} \Rightarrow r_D = 25 \dots 50 \begin{Bmatrix} \text{k}\Omega \\ \Omega \\ \text{m}\Omega \end{Bmatrix}$$



Man beachte: Für große Diodenströme muss der in Serie liegende Bahnwiderstand mitberücksichtigt werden.

$$\frac{dU_D}{dI_D} = r_D + R_S$$



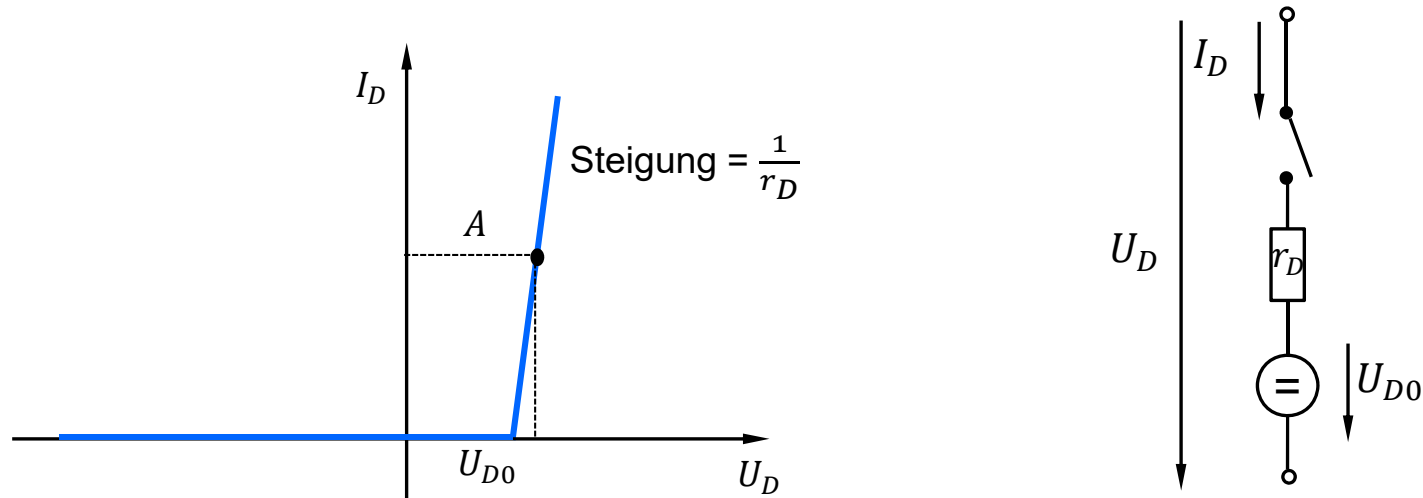


Idee: Die reale Kennlinie wird durch ihre Tangente im Arbeitspunkt A ersetzt.

Einsatz der
Tangentengleichung
im Arbeitspunkt A:

$$U_D = U_{D0} + r_D \cdot I_D$$
$$\Rightarrow I_D = \frac{U_D - U_{D0}}{r_D} = \frac{1}{r_D} \cdot U_D - \frac{U_{D0}}{r_D}$$

Achtung: Die Gleichung gilt nur für die berechneten Werte im Arbeitspunkt !!!



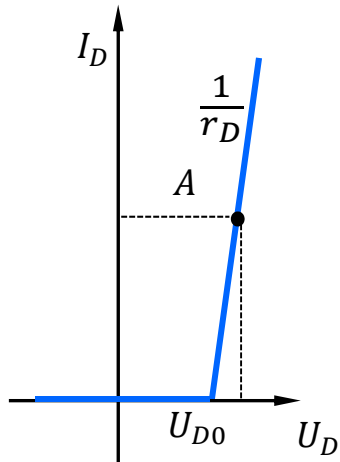
Idee: Die reale Kennlinie wird durch ihre Tangente im Arbeitspunkt A ersetzt.

Einsatz der
Tangentengleichung
im Arbeitspunkt A:

$$U_D = U_{D0} + r_D \cdot I_D$$
$$\Rightarrow I_D = \frac{U_D - U_{D0}}{r_D} = \frac{1}{r_D} \cdot U_D - \frac{U_{D0}}{r_D}$$

Achtung: Die Gleichung gilt nur für die berechneten Werte im Arbeitspunkt !!!

Beispiel: Eine Diode ($I_S = 10^{-11} \text{ A}$, $n = 1,6$) soll in der Umgebung des Arbeitspunkts $I_D = 1 \text{ mA}$ durch das obige Modell approximiert werden.



Die zu $I_D = 1 \text{ mA}$ gehörende Arbeitspunktspannung U_D der realen Kennlinie ist:

$$U_D = n \cdot U_{Temp} \cdot \ln \frac{I_D}{I_S} = 1,6 \cdot 25 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{-3} \text{ A}}{10^{-11} \text{ A}} = 737 \text{ mV}$$

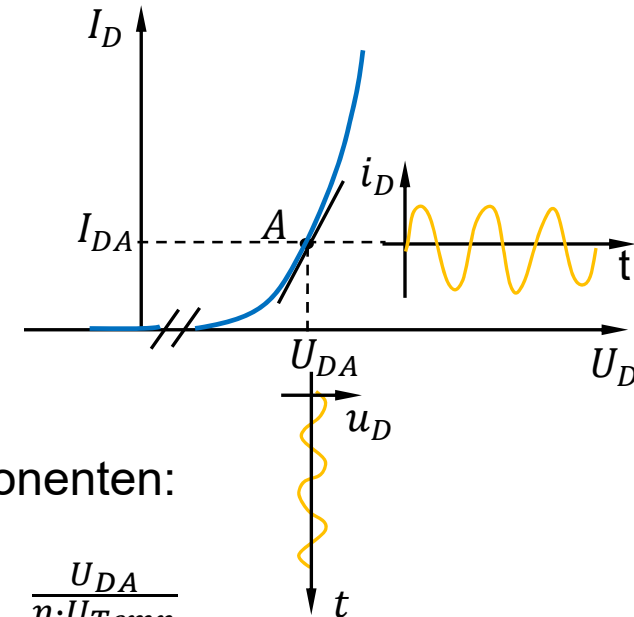
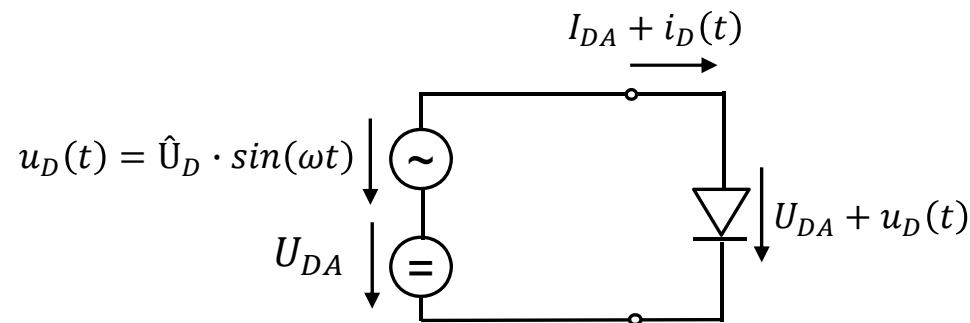
Man bestimme noch r_D und U_{D0} .

$$r_D = \frac{n \cdot U_{Temp}}{I_D} = \frac{1,6 \cdot 25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 40 \Omega$$

Aus der Tangentengleichung $I_D = (U_D - U_{D0}) / r_D$ erhält man für U_{D0} (Ersatzquellenspannung):

$$U_{D0} = U_D - r_D \cdot I_D$$

$$\Rightarrow U_{D0} = 737 \text{ mV} - 40 \Omega \cdot 1 \text{ mA} = 697 \text{ mV} \approx 0,7 \text{ V}$$



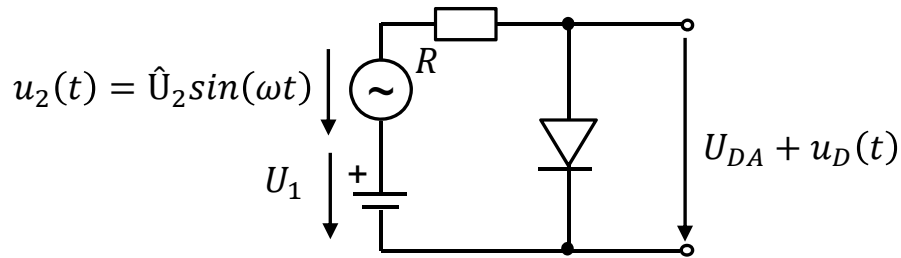
Zerlegung des Mischstroms in zwei Komponenten:

1. Gleichstrom im Arbeitspunkt:

$$I_{DA} = I_S \cdot e^{\frac{U_{DA}}{n \cdot U_{Temp}}}$$

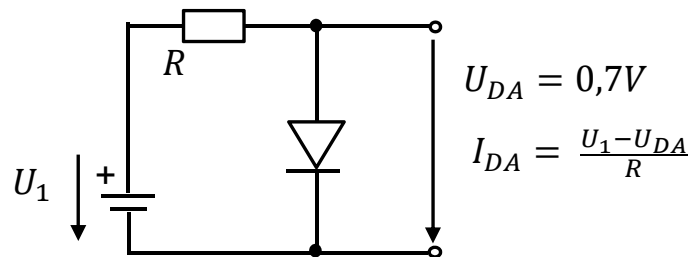
2. Überlagerter Wechselstrom: Ersetzt man im Arbeitspunkt die $I - U$ -Kennlinie durch ihre Tangente (= Linearisierung), dann gilt für kleine Spannungsänderungen ($\hat{U}_D \ll U_{DA}$) näherungsweise:

$$r_D = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_A \approx \frac{u_D}{i_D} \quad \Rightarrow \quad i_D \approx \frac{u_D}{r_D} \quad \text{bzw.} \quad \hat{I}_D \approx \frac{\hat{U}_D}{r_D}$$

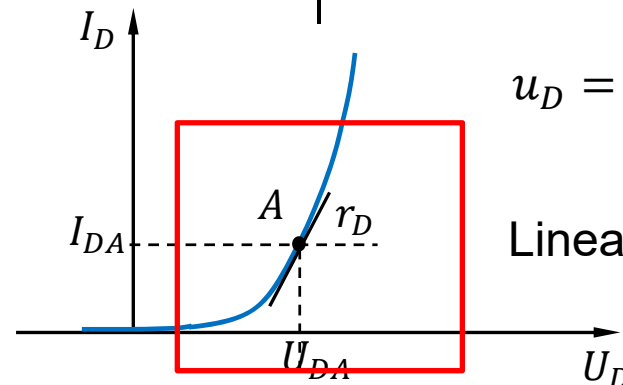
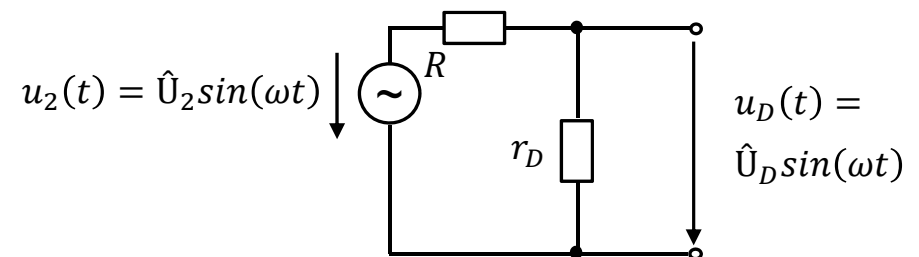


Beispiel: Man bestimme die Komponenten der Mischspannung am Ausgang.
Es gelte

1. DC-Anteil: Deaktiviere gedanklich alle Wechselquellen. I_{DA} , U_{DA} berechnen, z. B. mit dem Modell der konstanten U_D .



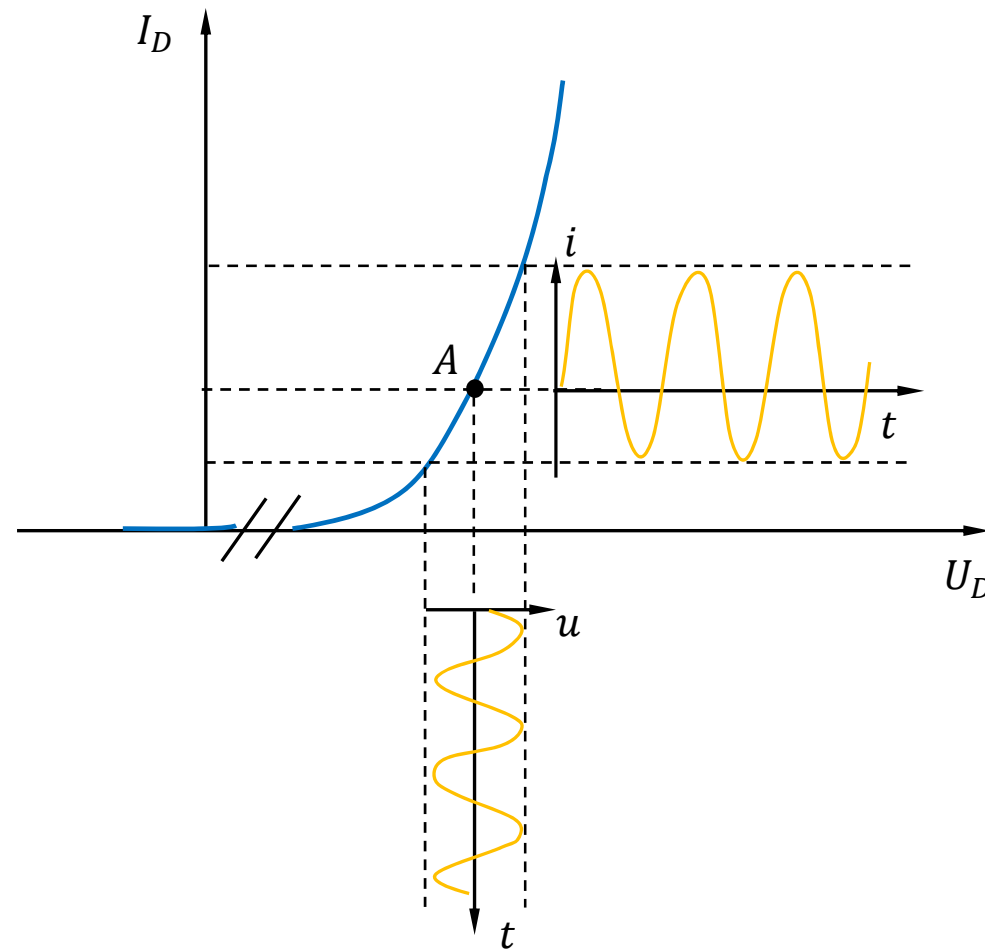
2. AC-Anteil: Deaktiviere gedanklich alle Gleichquellen. Ersetze die Diode durch r_D . u_D , i_D berechnen.



$$u_D = u_2 \cdot \frac{r_D}{r_D + R} \text{ bzw. } \hat{U}_D = \hat{U}_2 \cdot \frac{r_D}{r_D + R}$$

$$i_D = \frac{u_D}{r_D + R}$$

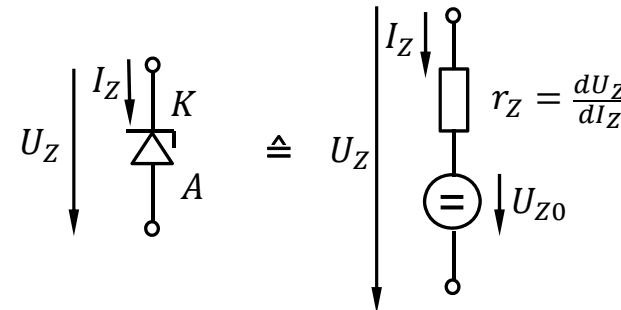
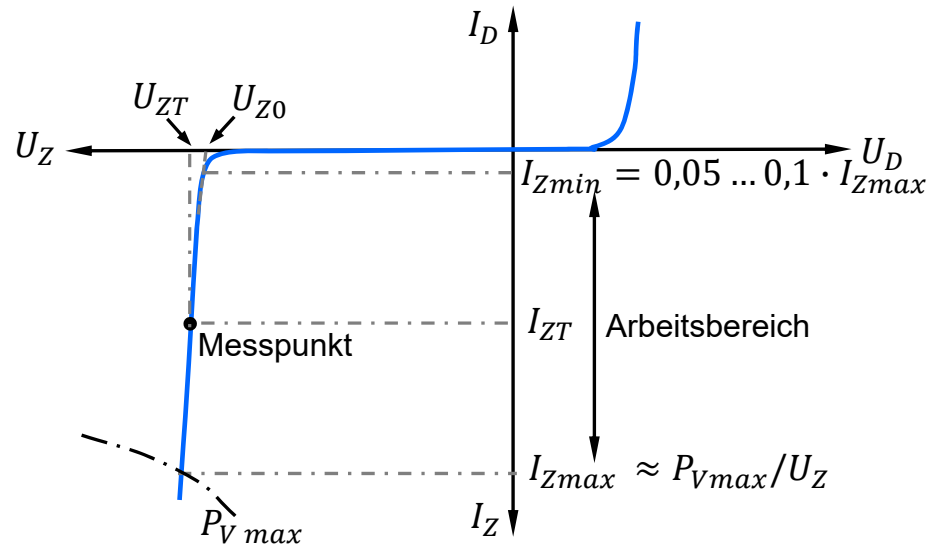
Linearisierung!



Die Linearisierung der Kennlinie im Arbeitspunkt gilt näherungsweise nur für Kleinsignale.

- Grundlagen
- Anwendung der Diode, Kennlinien
- Shockley-Gleichung, Arbeitspunktberechnung
- Modell der konstanten Durchlassspannung
- Differentieller Widerstand, Kleinsignalmodell der Diode
- Zener-Diode, Grundsaltungen der Diode
 - Die Zener-Diode (Z-Diode) und Ihre Anwendung
 - Begrenzerschaltungen
 - Einweg-Gleichrichter
 - Brückengleichrichter
- Optische Halbleiterbauelemente

Z-Dioden (Zener-Dioden)



U_{ZT} : Z-Spannung (laut Datenblatt) bei definiertem Teststrom I_{ZT}
(z.B. IN764A mit $U_{ZT} = 3.3V @ I_{ZT} = 20mA$)

U_{Z0} : Z-Spannung, extrapoliert für $I_Z = 0$

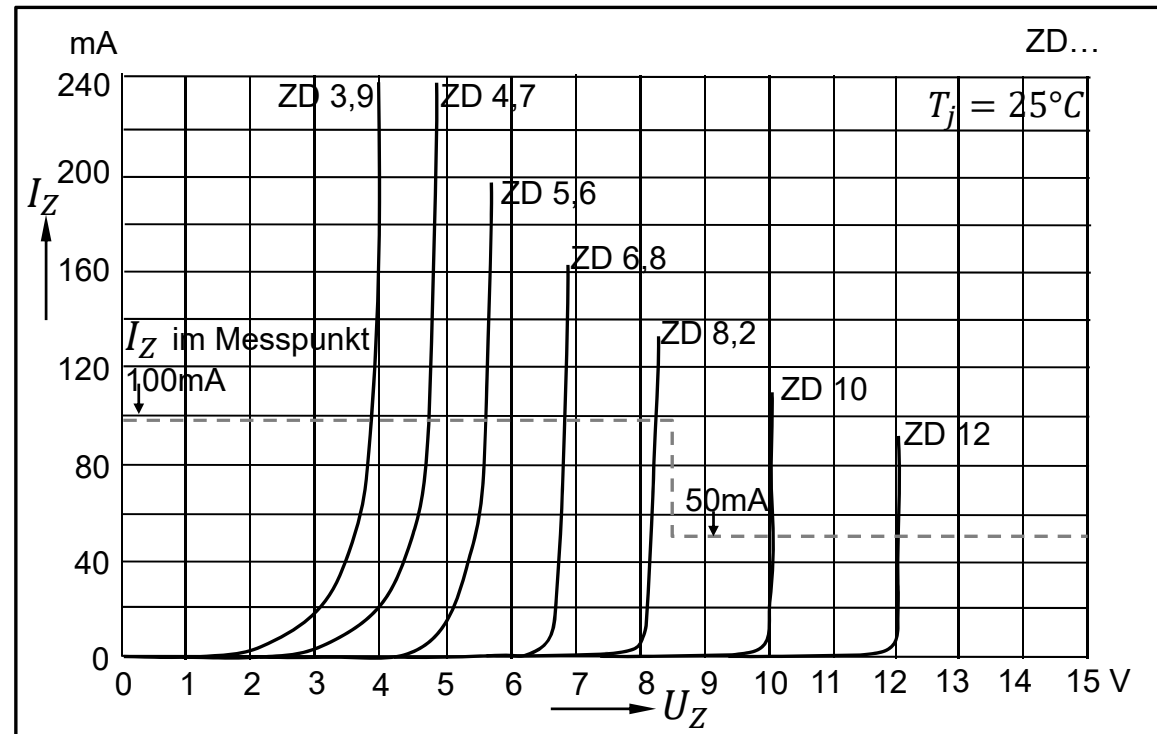
r_Z : differentieller Widerstand bei I_{ZT} (siehe Datenblatt)

I_{Zmax} : max. zulässiger Dauerstrom

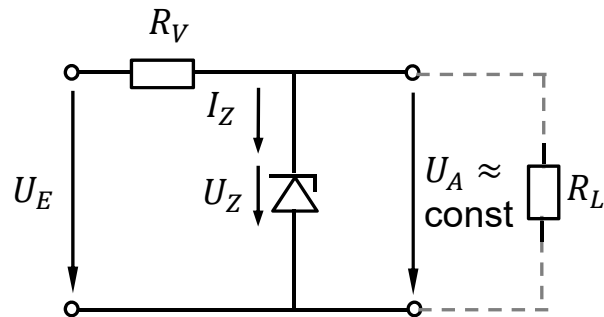
I_{Zmin} : min. Arbeitsstrom (Grenze zum Knickbereich)

Z-Dioden sind in Sperrrichtung betriebene Si-Dioden mit definierter Durchbruchspannung.

Da diese die übliche Betriebsart ist, wird die Durchbruchspannung positive angegeben.



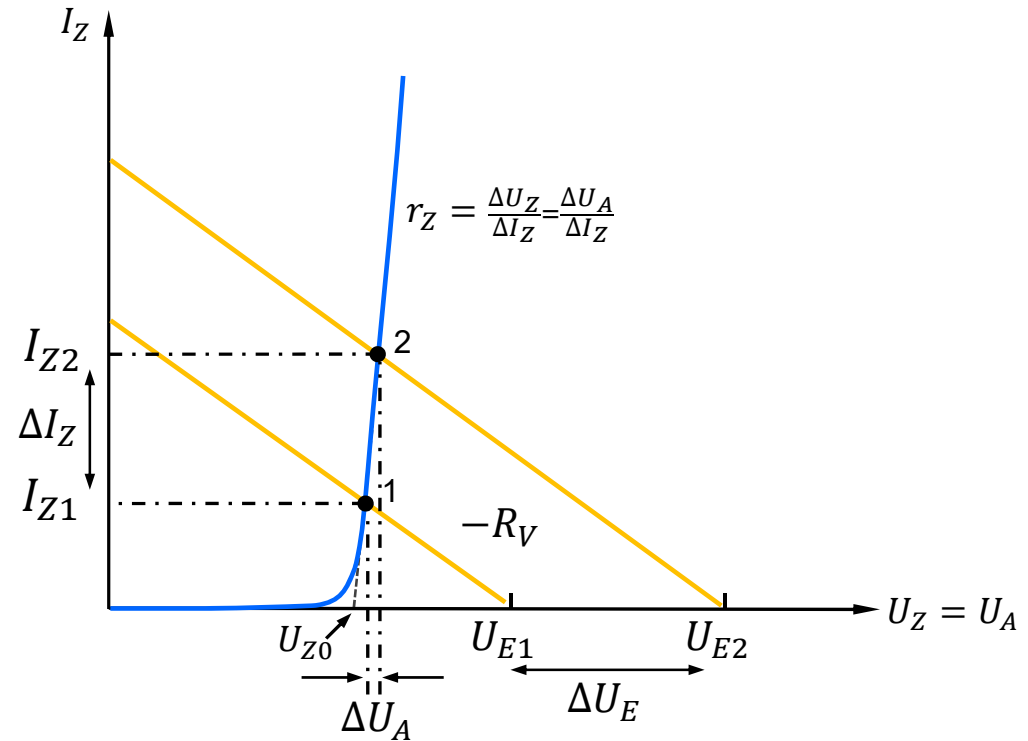
- Durchbruchursache: 1. Zener- oder Tunneleffekt ($U_Z < 5,6\text{V}, TK -$)
2. Lawineneffekt ($U_Z > 5,6\text{V}, TK +$)
- „Gezüchteter“ Durchbruch durch speziellen Dotierungsverlauf
- handelsübliche Ausführungen von ca. 3...300 V (in E24-Abstufung)
- sehr steile Durchbruchkennlinie, typische Werte für $r_Z = 2 \dots 20\Omega$
- auch Durchbruchkennlinien haben einen Temperaturgang (leider!)



R_L : Lastelement
(zu betreibende Schaltung)

Funktionsvoraussetzungen:

1. $U_E > U_{Z0}$
2. $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$



Beispiel: Für eine Z-Diode macht der Hersteller folgende Angaben:

$U_Z = 6,8V$, $r_Z = 5\ \Omega$ (jeweils bei einem Messstrom $I_{ZT} = 20\ mA$).

Die Z-Diode wird über einem Vorwiderstand $R_V = 220\ \Omega$ an einer nicht konstanten Eingangsspannung $U_E = (12V \pm 4V)$ betrieben

a) Bestimme die Ausgangsspannung U_A bei $U_E = 12\ V$ mit Hilfe der Z-Dioden-Ersatzschaltung.

extrapolierte Z-Spannung aus den Angaben:

$$U_Z = U_{Z0} + r_Z \cdot I_Z$$

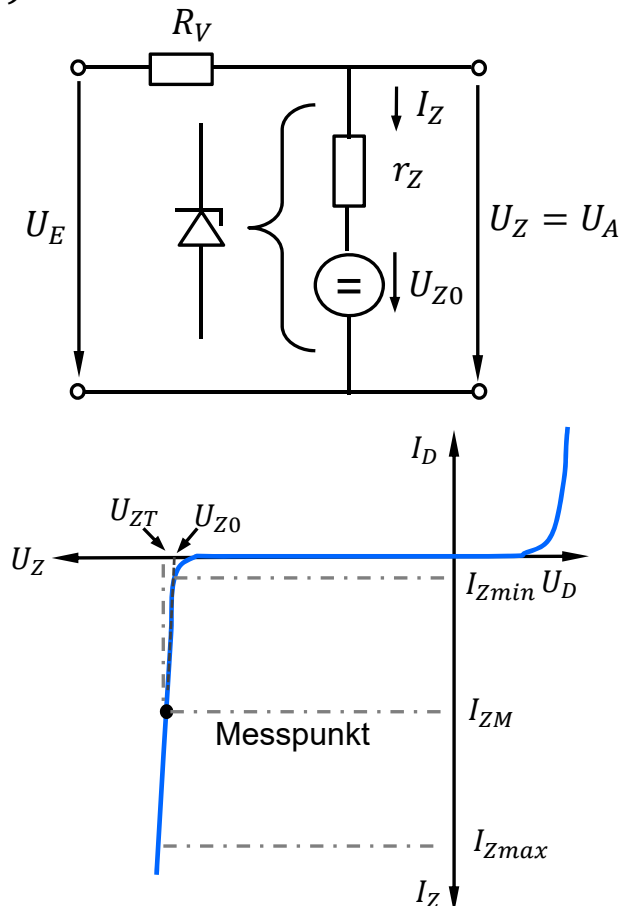
$$\Rightarrow U_{Z0} = U_Z - r_Z \cdot I_Z$$

$$= 6,8\ V - 5\ \Omega \cdot 20\ mA = 6,7\ V$$

Berechne die Z-Spannung für den Arbeitspunkt:

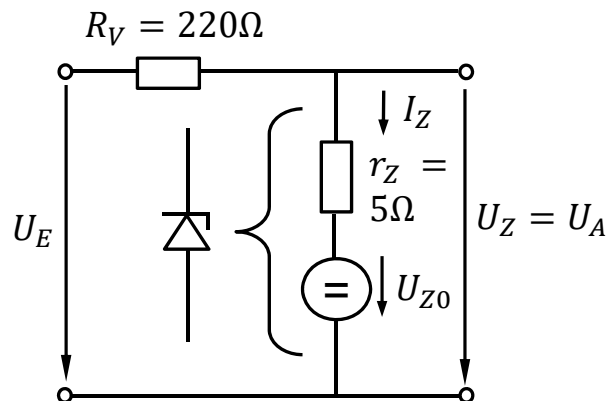
$$U_A = U_{Z0} + (U_E - U_{Z0}) \cdot \frac{r_Z}{r_Z + R_V}$$

$$= 6,7\ V + (12\ V - 6,7\ V) \cdot \frac{5\ \Omega}{5\ \Omega + 220\ \Omega} = 6,82\ V$$



b) Wie groß ist die Änderung der Ausgangsspannung ΔU_A , wenn sich die Eingangsspannung U_E ($12V \pm 4V$) um $\Delta U_E = 8V$ ändert?

Differentiation von: $U_A = U_{Z0} + (U_E - U_{Z0}) \cdot \frac{r_Z}{r_Z + R_V}$



$$\frac{dU_A}{dU_E} = \frac{r_Z}{r_Z + R_V}$$

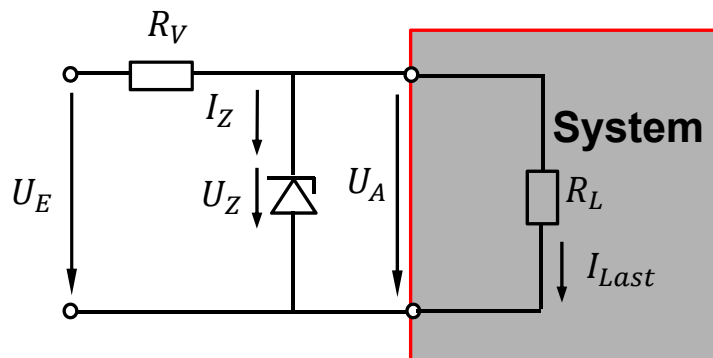
$$\Rightarrow \Delta U_A = \Delta U_E \cdot \frac{r_Z}{r_Z + R_V}$$

$$= 8V \cdot \frac{5\Omega}{5\Omega + 220\Omega} = 178\text{ mV} (\hat{=} 2,2\%)$$

Die Spannungsstabilisierung ist umso besser, je kleiner r_Z gegenüber R_V ist.

Gegeben: $U_E = 12V$ $R_V = 220\Omega$
 $U_Z = 6,8V$ $U_{Amin} = 5V$

Frage: Ab welchem Laststrom (Stromaufnahme des Systems dargestellt als Widerstand R_L) wird U_A kleiner 5V?

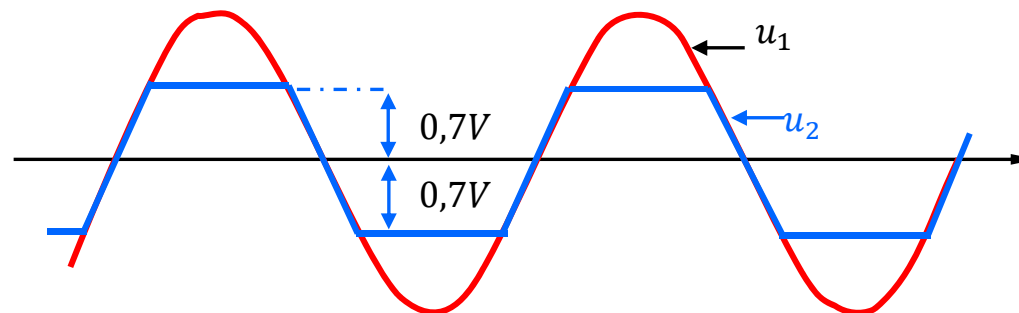
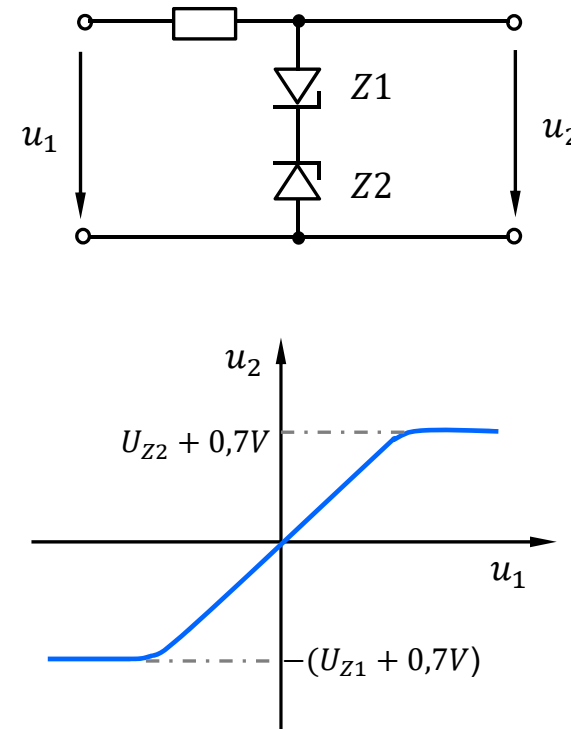
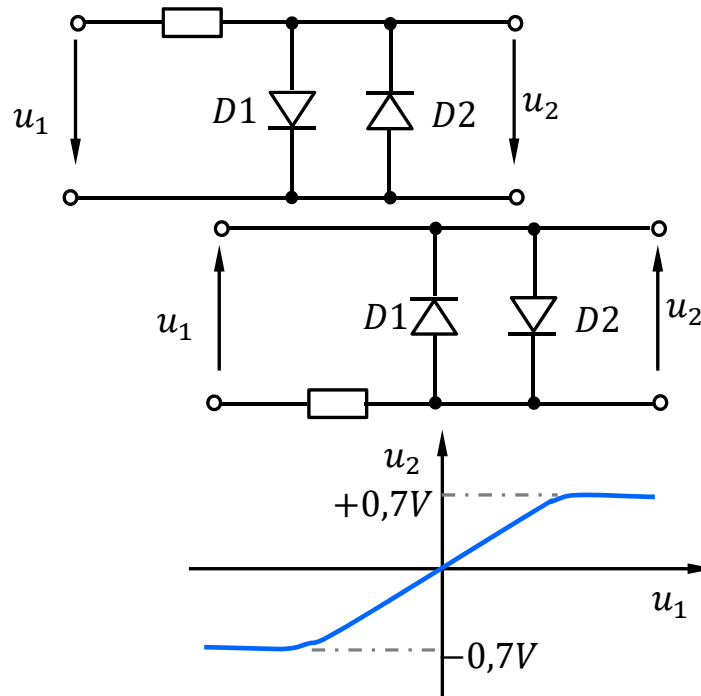


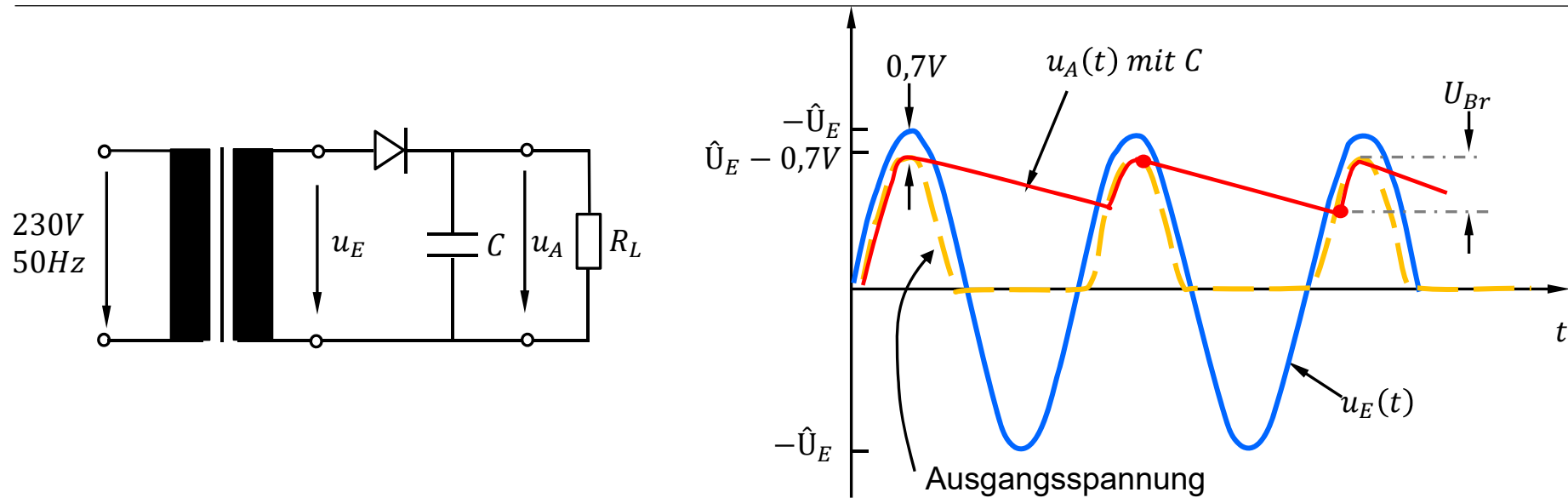
$$I_Z = 0 \Rightarrow I_{Last} = \frac{U_{RL}}{R_{Lmin}} = \frac{U_{RV}}{R_V}$$

$$I_{Last} = \frac{U_{RV}}{R_V} = \frac{7V}{220\Omega} = 32 \text{ mA}$$

$$(R_{Lmin} = \frac{5V}{32mA} = 157\Omega)$$

- Wenn $U_A < U_Z$ ($U_{Amin} < U_Z$) Z-Diode sperrt \rightarrow Spannungsteiler (Spannung nicht stabilisiert!)
- Sonst wird U_A von der Zenerspannung bestimmt

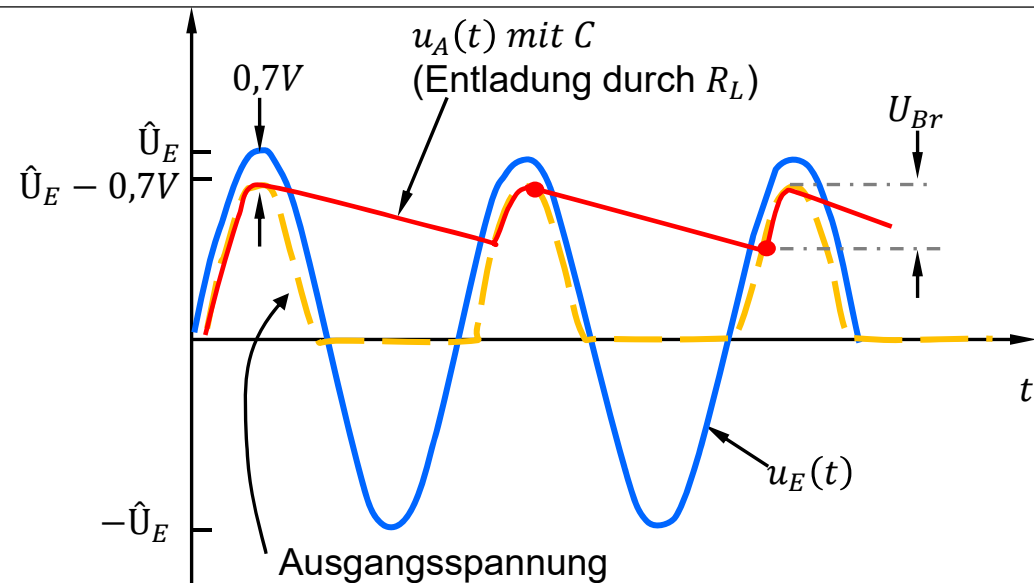
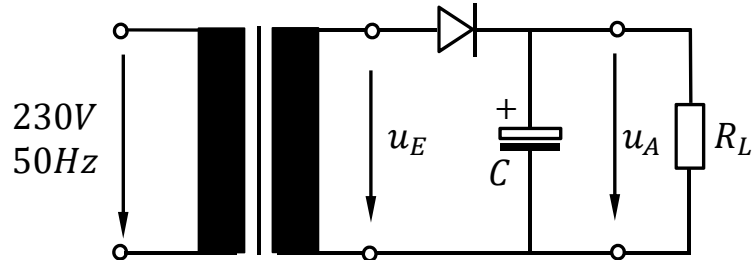




$u_E > u_A + 0,7V$: Diode „on“ \Rightarrow C wird von $(u_E - 0,7V)$ geladen.

$u_E < u_A + 0,7V$: Diode „off“ \Rightarrow C entlädt sich über R_L .

Einweg-Gleichrichter mit Glättungskapazität



Die Dauer der Entladung beträgt nahezu T . Somit gilt für die von C abfließende Ladung näherungsweise:

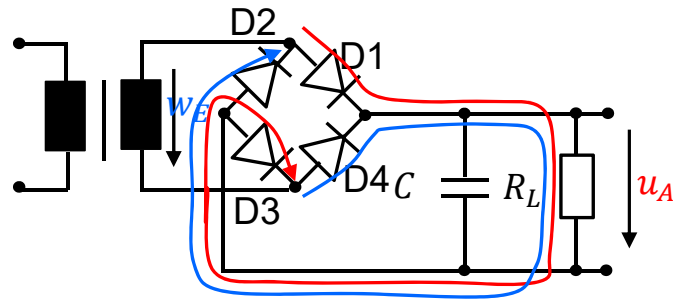
$$Q \approx I_L \cdot T \approx \frac{\hat{U}_E - 0,7V}{R_L} \cdot T = \frac{\hat{U}_E - 0,7V}{f \cdot R_L}$$

Die Spannungsänderung am Kondensator ist mit der abfließenden Ladung wie folgt verknüpft:

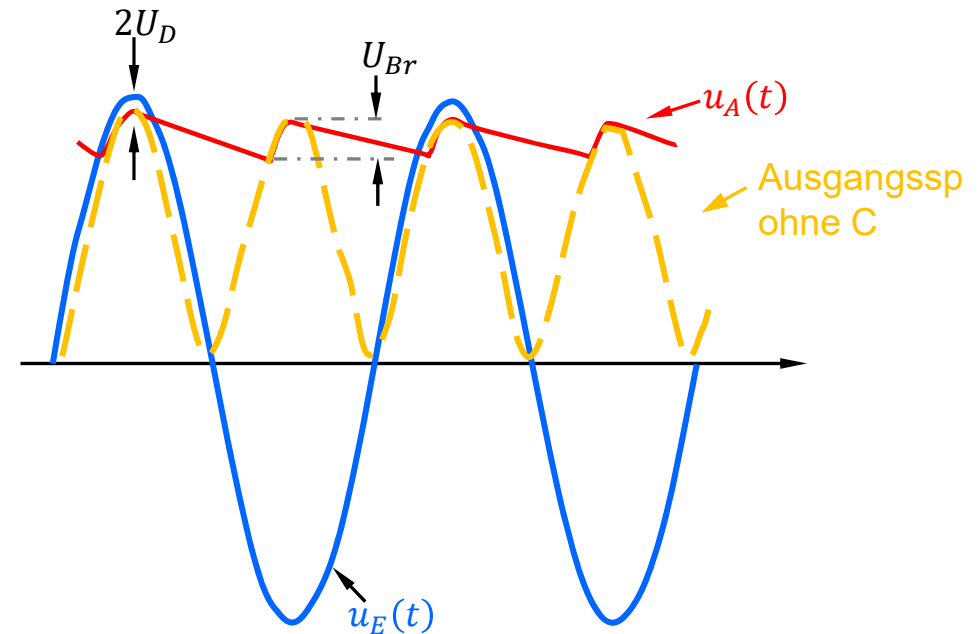
$$Q = U_{Br} \cdot C \quad (U_{Br}: \text{Brummspannung})$$

Durch Gleichsetzen erhält man als Dimensionierungsformel für den Ladekondensator:

$$U_{Br} \cdot C = \frac{\hat{U}_E - 0,7V}{f \cdot R_L} \Rightarrow C = \frac{\hat{U}_E - 0,7V}{f \cdot R_L \cdot U_{Br}}$$



- Beide Halbwellen werden ausgenutzt (Vorteil).
- In der **pos. Halbwelle** leiten **D1 und D3**, in der **negativen Halbwelle** **D2 und D4**.
- Wegen halber Entladungsdauer braucht C nur halb so groß zu sein.
- Brummfrequenz ist doppelt so groß („100-Hz-Brumm“).



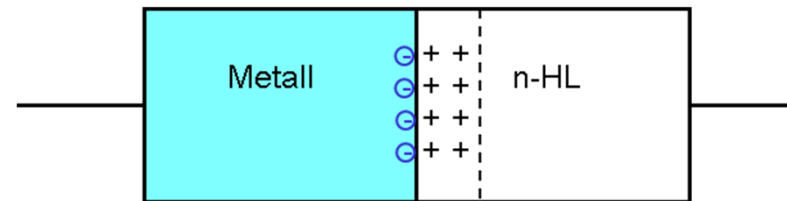
$$U_{Br} = \frac{\hat{U}_E - 1,4V}{2f \cdot R_L \cdot C} \Rightarrow C = \frac{\hat{U}_E - 1,4V}{2f \cdot R_L \cdot U_{Br}}$$

Schaltsymbol



Funktionsweise:

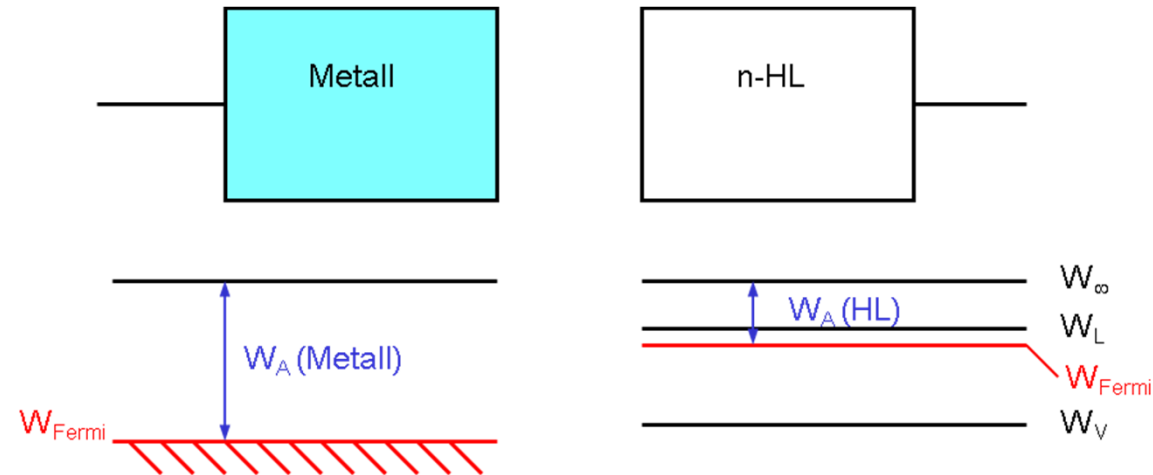
Eine Schottky-Diode (auch Hot-Carrier-Diode) besteht aus einem Metall-HL-Übergang:



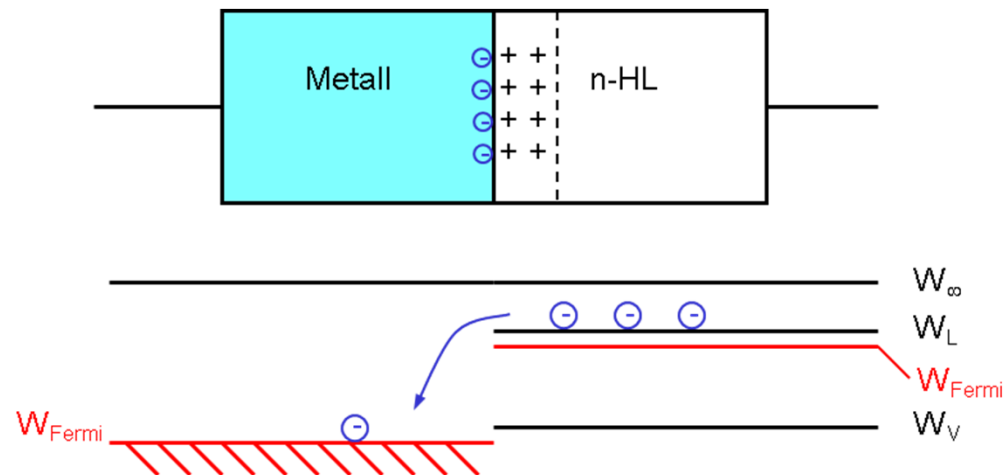
Damit sich eine Sperrschicht ausbilden kann, müssen die Austrittsenergien W_A von HL und Metall unterschiedlich sein.

W_A : Energie, die notwendig ist, um ein Elektron aus dem Kristall ins Unendliche zu bringen (nach W_∞). Ist $W_A(HL) < W_A(Metall)$, so entsteht im Energiediagramm eine Stufe.

(getrennte Kristalle)



(verbundene Kristalle)



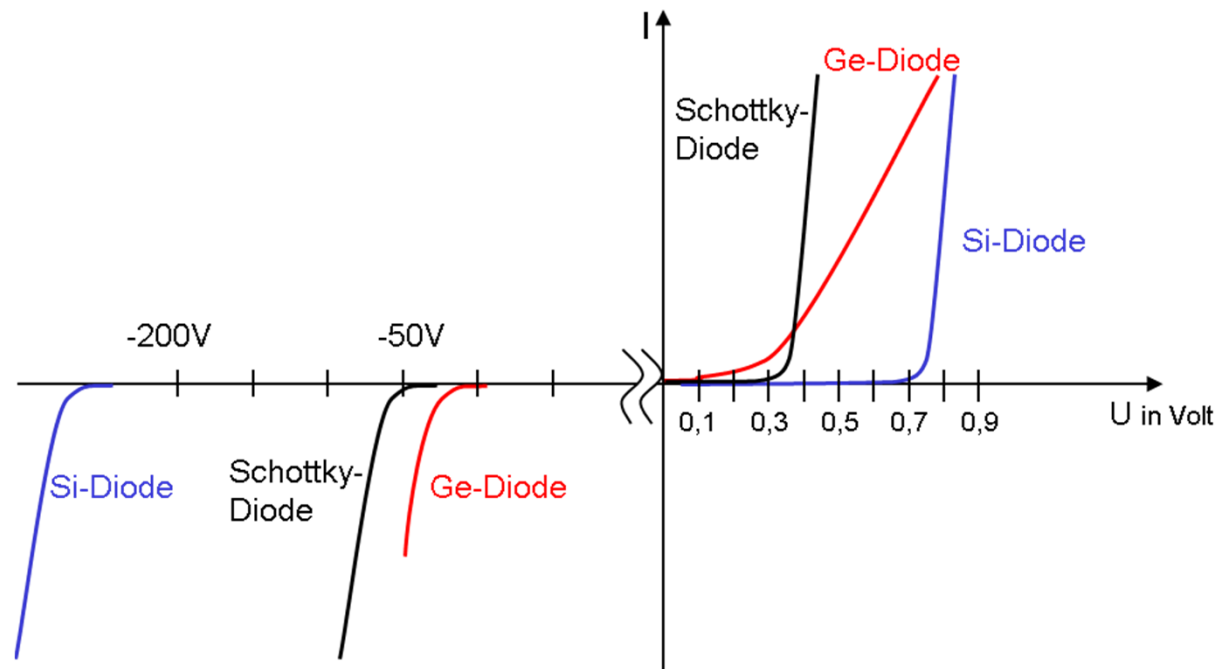
W_{Fermi} : Die Energie, die die Elektronen „im Mittel“ haben

- Elektronen strömen von der HL-Seite zum Metall, um einen niedrigeren Energiezustand zu erhalten. Zurück bleiben ionisierte Donatoratome. Auf der Metallseite bildet sich eine negative Oberflächenladung.

[Elektronenaffinität z.B. Al 4,1eV, n-Si 4,05eV]

1. Fall: $U > 0$ (Minus an n-Seite)
Elektronen strömen „von rechts“ zum Übergang und bauen die RLZ ab. \rightarrow Strom fließt, $U_S \approx 0,3V$
2. Fall $U < 0$: Die „Stufe“ kann nicht überwunden werden. \rightarrow Diode sperrt.

Vergleich der Diodenkennlinien und -werte



Parameter	Si-Diode	Ge-Diode	Schottky-Diode
Schleusenspannung U_S	0,7 – 0,8 V	0,3 – 0,4 V	0,3 – 0,4 V
Sperrstrom I_R	nA-Bereich	μ A-Bereich	μ A-Bereich
Durchbruchspannung U_{Rmax}	100 – 1500 V	50 – 100 V	50 – 100 V
Rückwärtserholzeit t_{rr}	100 ns	10 ns	0,1 ns

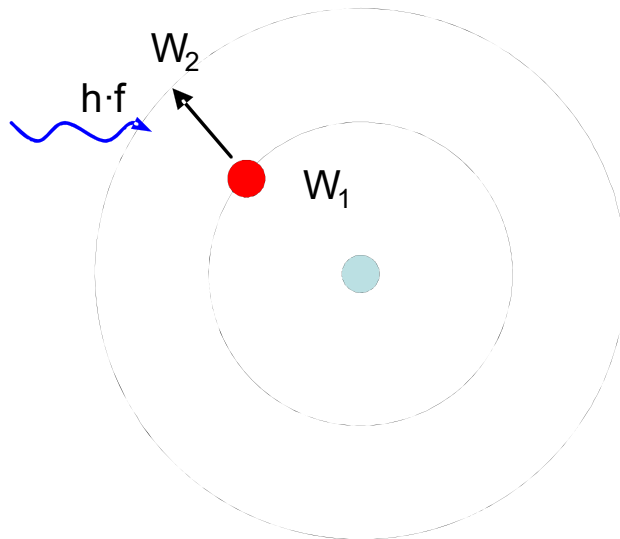
- Grundlagen
- Anwendung der Diode, Kennlinien
- Shockley-Gleichung, Arbeitspunktberechnung
- Modell der konstanten Durchlassspannung
- Differentieller Widerstand, Kleinsignalmodell der Diode
- Zener-Diode, Grundsaltungen der Diode
- Optische Halbleiterbauelemente
 - Absorption, Emission
 - LED
 - LDR
 - Fotodiode
 - Solarzelle

Absorption und Emission

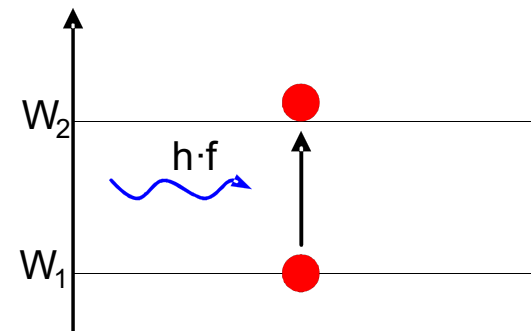
a) Absorption

Fällt Licht auf einen Halbleiter, wird es absorbiert, falls für die Energie der einzelnen Photonen $W_{Ph} = h \cdot f$ gilt:

$$W_{Ph} = h \cdot f \geq \Delta W_g$$



Energiediagramm:



→ Ein ELP entsteht!

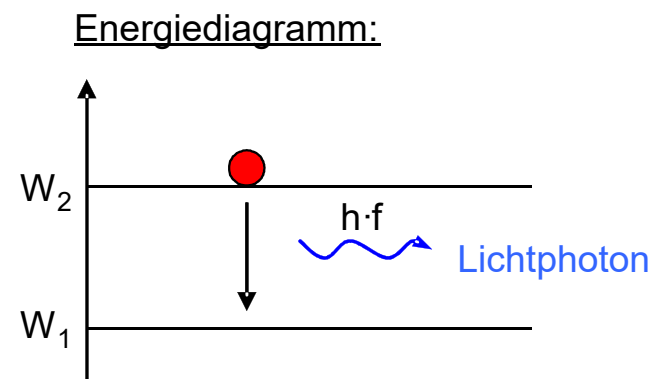
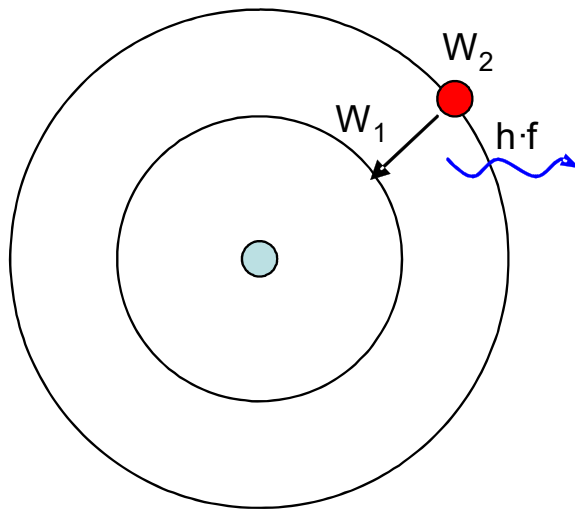
→ innerer Photoeffekt

Die Wellenlänge bei der gerade noch Absorption auftritt, nennt man Grenzwellenlänge λ_g :

$$\lambda_g = \frac{c}{f_g} = \frac{h \cdot c}{\Delta W_g} \text{ mit } f_g = \frac{\Delta W_g}{h}$$

b) Emission

Bei Rekombination eines ELP kann die freiwerdende Energie ΔW_g in Lichtenergie umgewandelt werden.



$$W_{ph} = h \cdot f \leq \Delta W_g$$

Die Leuchtdiode, LED: Light Emitting Diode



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Licht

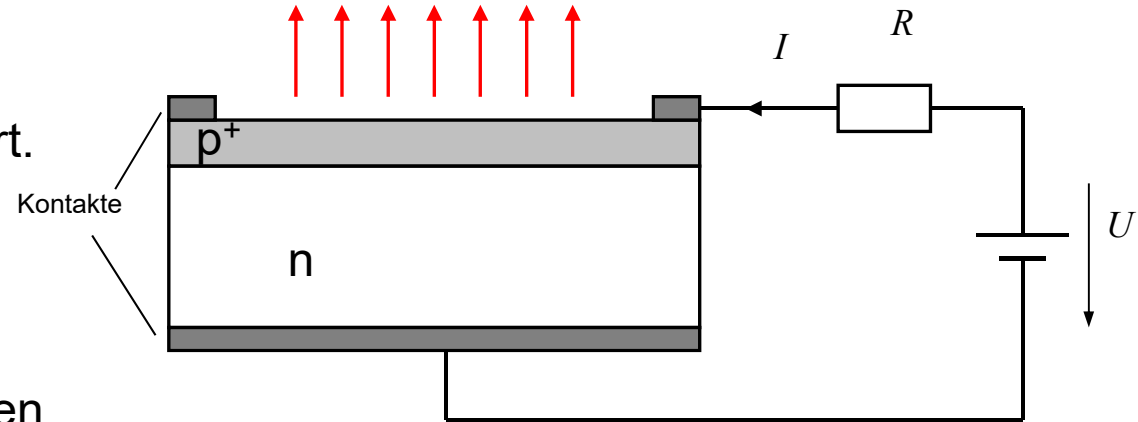
Prinzip:

Elektronen wandern zur p^+ -Seite und rekombinieren dort.

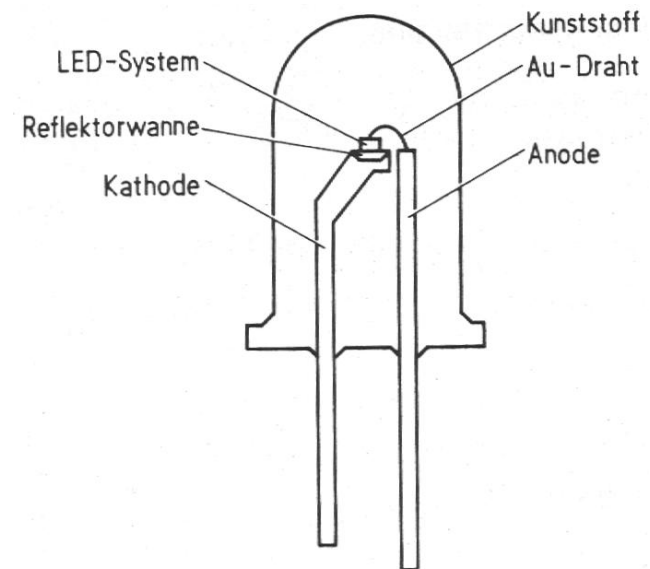
Emissions-Wellenlänge:

$$\lambda_g = \frac{h \cdot c}{\Delta W_g}$$

Um LEDs mit bestimmten Farben (WL) herzustellen verwendet man Mischkristalle (Legierungshalbleiter).



Typischer Gehäuseaufbau



Beispiel:

$GaAs$:

$$\Delta W_g = 1,43eV \rightarrow \lambda_g = 870nm$$

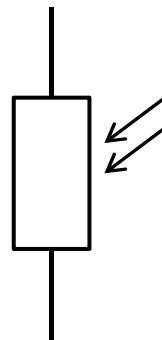
$GaAs_{0,35}P_{0,65}$:

$$\Delta W_g = 1,97eV \rightarrow \lambda_g = 630nm$$

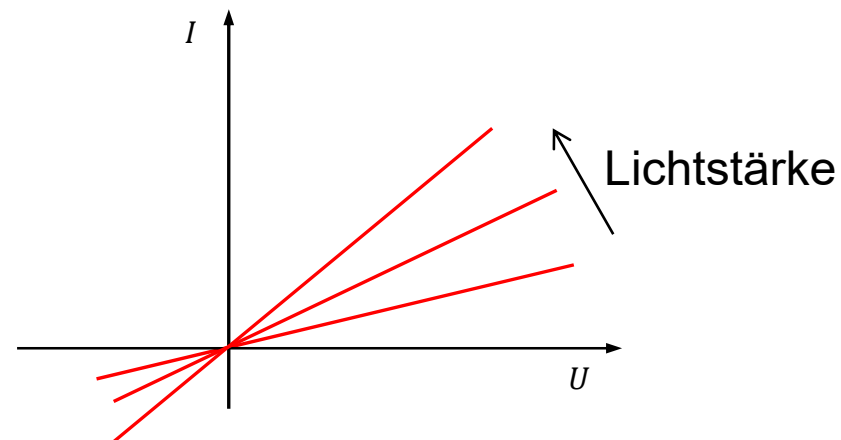
Ein LDR ist ein HL-Kristall, dessen Eigenleitungsichte (und damit Leifähigkeit) durch Lichteinstrahlung variiert wird.

Ursache: innerer Fotoeffekt.

Symbol:



Kennlinie:



Nachteil:

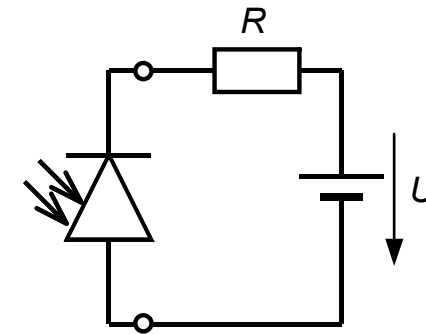
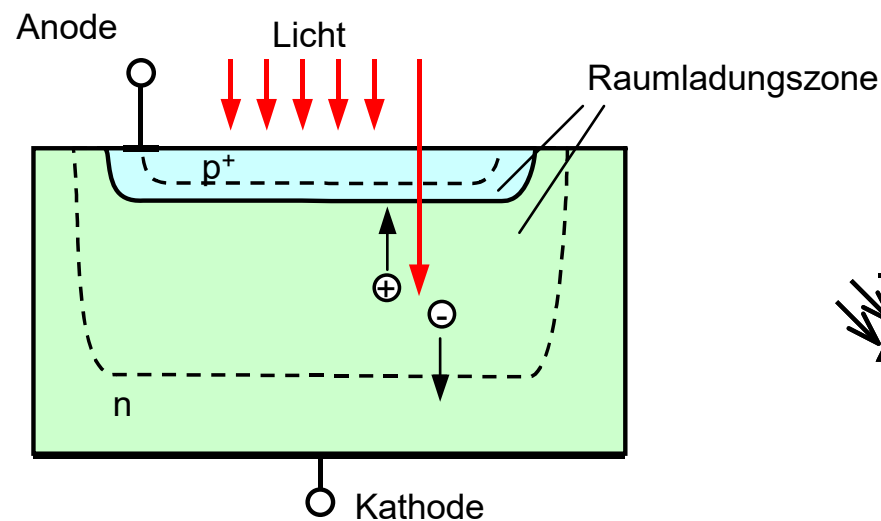
- LDR ist träge
- unempfindlich

Vorteil:

- günstig
- robust

Einsatz:

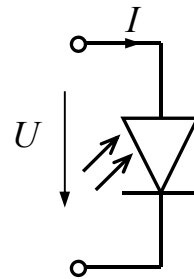
- Fotokamera
- Dämmerungsschalter
- Bewegungsmelder



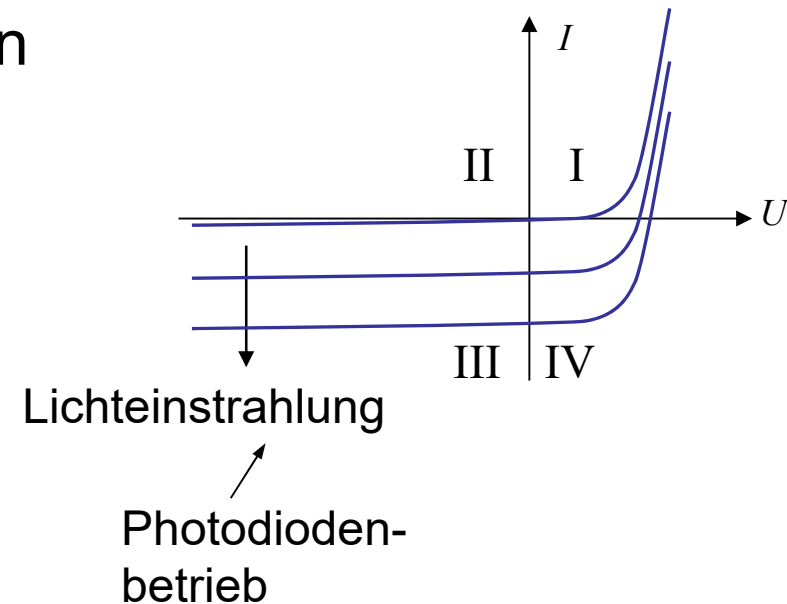
Falls die Absorption außerhalb der RLZ stattfindet, rekombinieren die erzeugten ELP wieder und liefern kein Beitrag zum Fotostrom

Solarzellen sind Fotodioden, die darauf optimiert sind, aus Sonnenlicht Strom zu erzeugen.

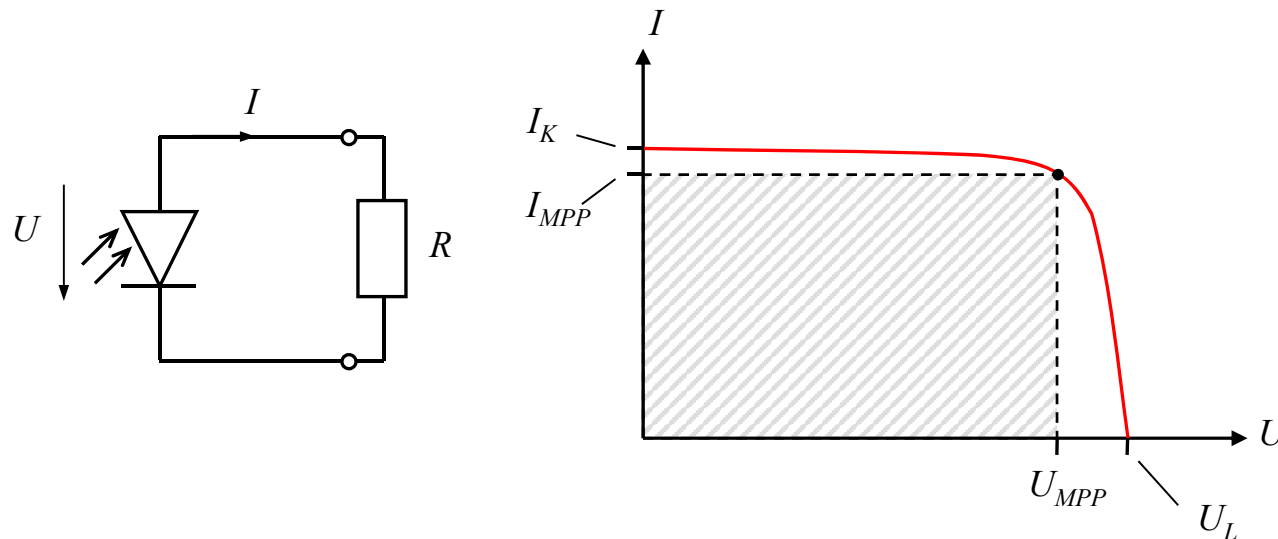
Der Betrieb erfolgt im 4. Quadranten



$$I = I_S \left(e^{U/U_T} - 1 \right) - I_{ph}$$



Da die Solarzelle eine Spannungs- bzw. Stromquelle darstellt, wird oft das Erzeugerzählpfeilsystem verwendet und nur der relevante Kennlinien-Ausschnitt dargestellt:



MPP: Maximum Power Point:
Kennlinienpunkt mit maximaler Leistungsabgabe

$I = -I_S - I_{Ph} \approx -I_{Ph}$ dabei ist $I_{Ph} \sim$ Bestrahlungsstärke

→ Fotodiode wirkt hier als lichtgesteuerte Stromquelle

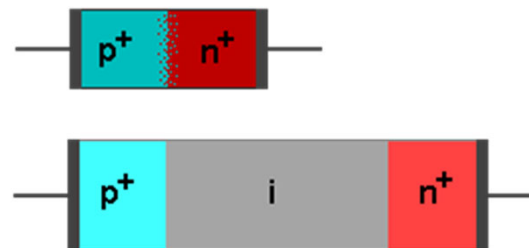
U>0: Solarzellenbetrieb

In diesem Fall ist $P < 0$ und das Bauteil gibt Energie ab.

PIN-Diode

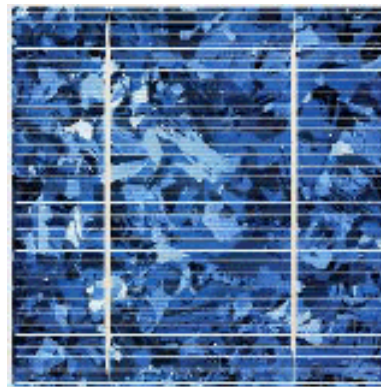
Vorteil:

- große RLZ
- → Cs klein
- → schnell

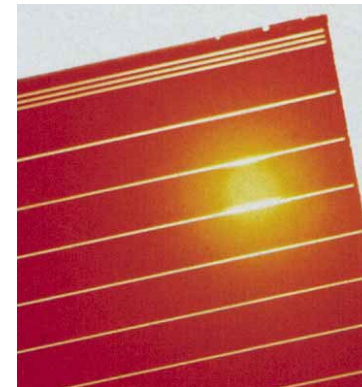




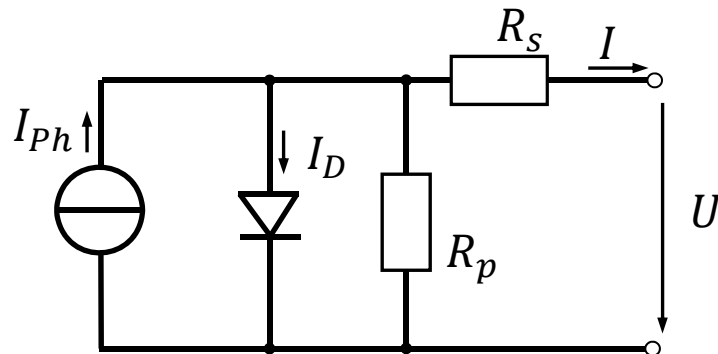
Monokristallin



Multikristallin



Dünnschichtzelle
(z.B. amorphes Si)



Kennliniengleichung:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$
$$I = I_{Ph} + I_S \left(1 - e^{\frac{U}{U_T}} \right)$$

Zusätzliche Verluste:

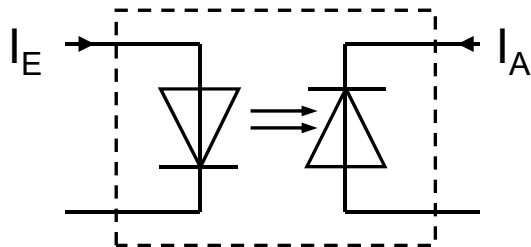
- Zuleitungswiderstände: R_s
- Verluste im Halbleiter: R_p

Leerlaufspannung:

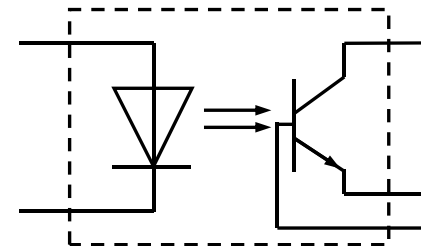
$$U_L = U(I = 0) = U_T \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{Ph}}{I_S} \right)$$

Ziel: Galvanische Trennung zweier Stromkreise

a) mit Fotodiode

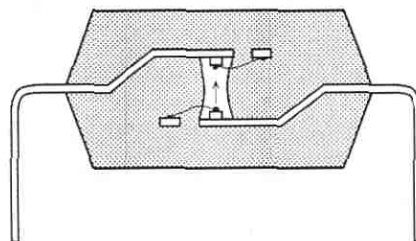


b) mit Fototransistor



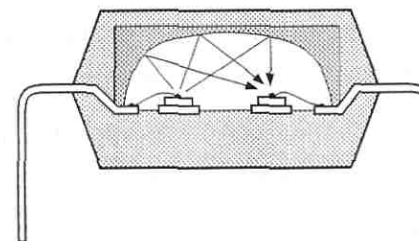
$$\text{CTR} = \text{Current Transfer Ratio} = \frac{I_A}{I_E}$$

Konkreter Aufbau von Optokopplern



Direkter Strahlengang

hohes CTR

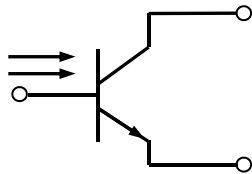


Reflexionskoppler

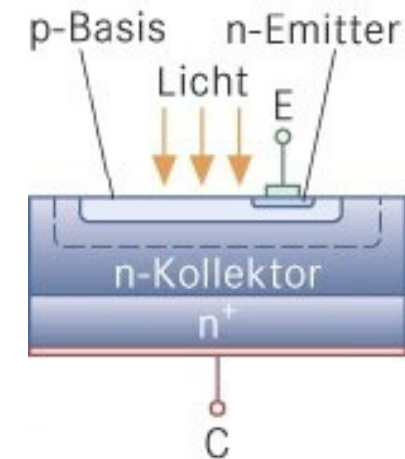
hohe Isolationsspannung (z.B. 2KV)

Der Fototransistor wird eingesetzt, um den schwachen Fotostrom „gleich an der Quelle“ zu verstärken.

Symbol:

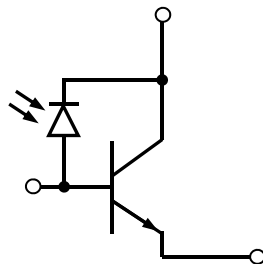


Aufbau:



Die Absorption erfolgt in der RLZ des BC-Übergangs.

ESB:



Kennlinie:

