

Elektronik 1

Prof. Dr. Michael Arzberger

Skriptgrundlage: Prof. Dr. Michael Ullmann

Übersicht – Inhalte

Halbleiterphysik

- Einordnung
- Aufbau von Leitern und Halbleitern
- Halbleitereigenschaften
- Herstellung
- Leitungsmechanismen in Halbleitern

pn-Übergang

- pn-Übergang mit /ohne äußere Spannung
- Diffusionsspannung
- Sperrsichtweite / Sperrsichtkapazität
- Durchbruch im pn-Übergang
- Gesamtkennlinie des pn-Übergangs
- Schaltverhalten des pn-Übergangs

Metall-Halbleiter-Übergänge

- Schottky-Kontakt (Sperrsicht-Kontakt)
- Ohmscher-Kontakt

Literatur

Reisch, M. Elektronische Bauelemente, Springer 2007

Atomphysik

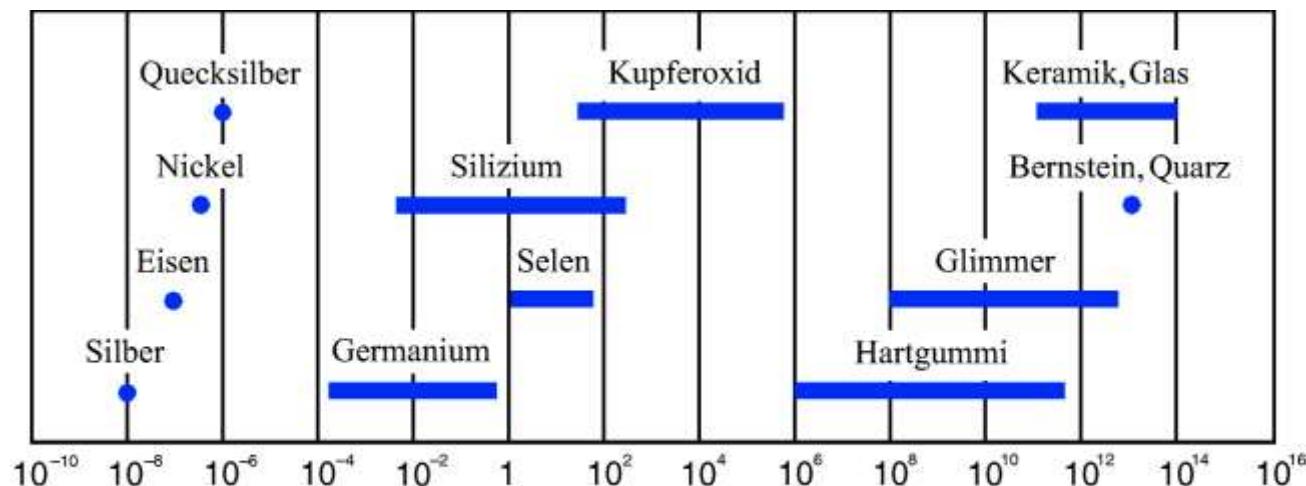
Wir müssen grob verstehen
warum Halbleiter bestimmte
elektrische und mechanische
Eigenschaften haben...



Halbleiter

Halbleiter

- Elektrischer Strom / spezifischer Widerstand
- Einordnung der Halbleiter zwischen Leitern und Isolatoren
- Arten von beweglichen Ladungsträgern
- Aufbau der Atome



ρ_R / Ωm
ELC1.526 Rev13 Seite 6

Atommodelle

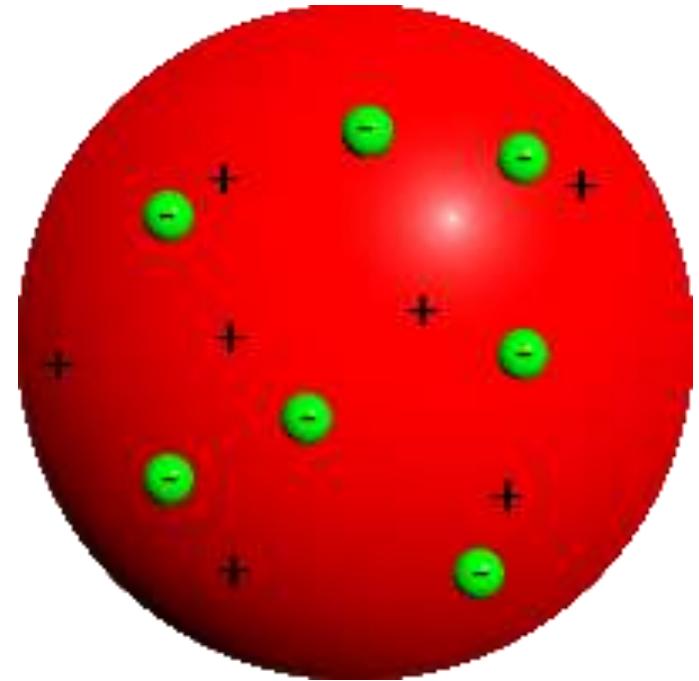


Thomsonsches Atommodell

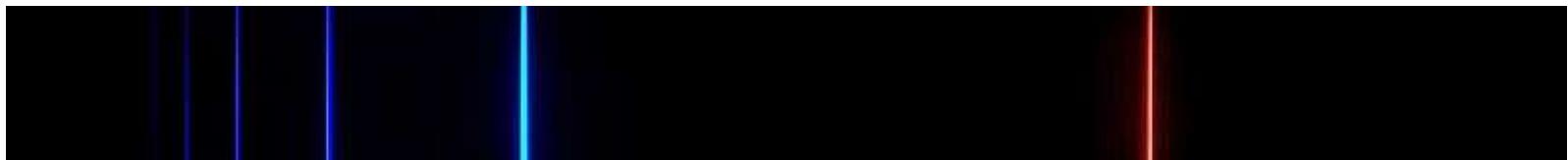
Positiv geladene Masse = Teig

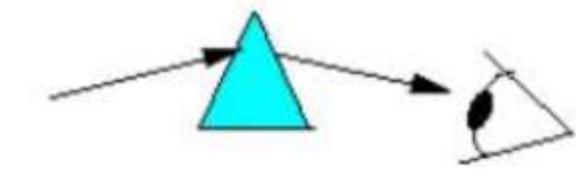
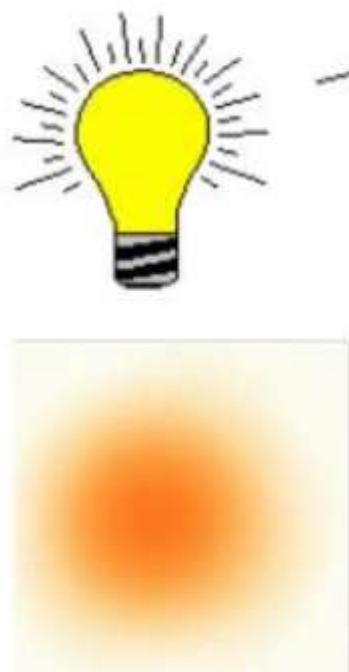
Elektronen darin gleichmäßig verteilt = Rosinen

Elektronen fangen bei Anregung (z.B. durch Wärme) an zu schwingen

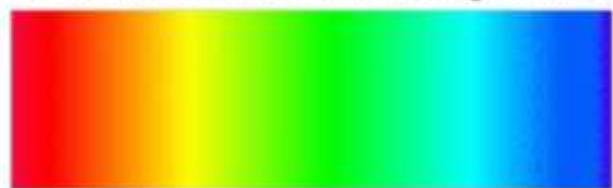


Problem: warum gibt es Linienspektrum, wenn man einen Festkörper stark erhitzt

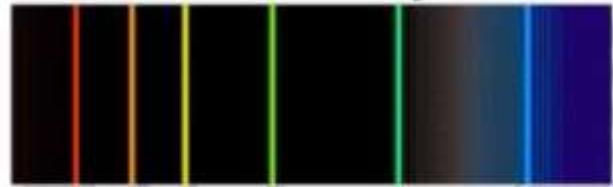




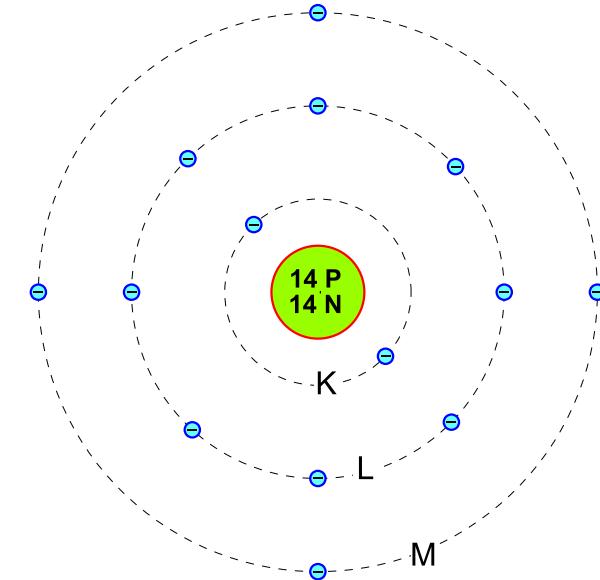
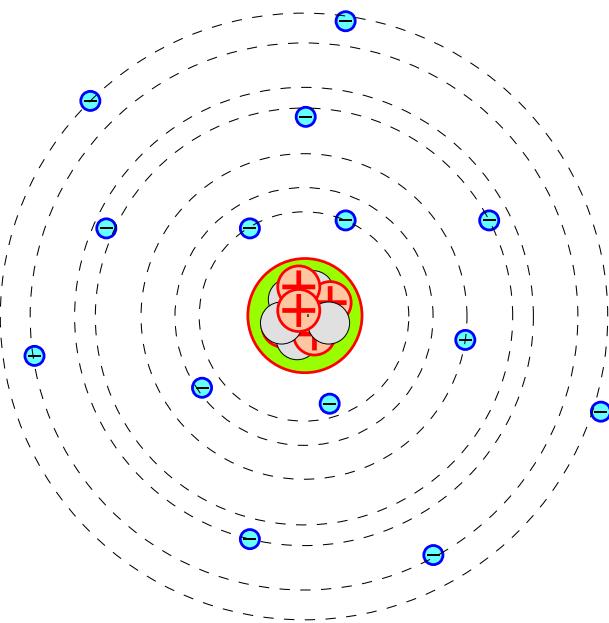
kontinuierliches Emissionsspektrum



diskretes Emissionsspektrum



Bohrsches Atommodell



**Elektronen nur in bestimmten Bahnen (Schalen)
Energie eines Elektrons nimmt mit Bahnradius zu**



Bohrsches Atommodell

Kräftegleichgewicht

Fliehkraft (Zentrifugalkraft)

Elektrische Anziehung (Coulomb-Kraft)

Energie

Bewegungsenergie (kinetische Energie)

Lageenergie (potentielle Energie)

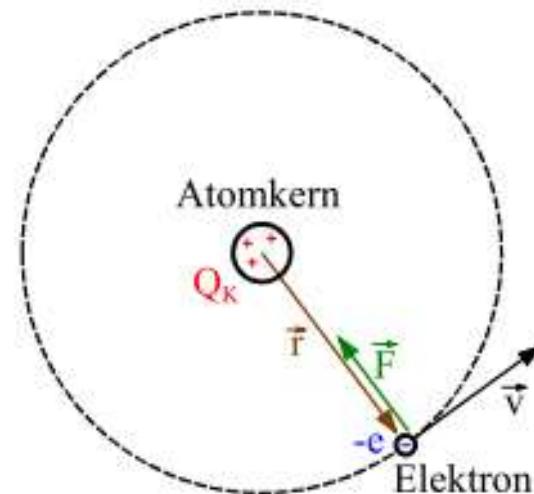
- durch Integration über Coulombkraft

$$W = W_{kin} + W_{pot} = -\frac{Q_k \cdot e}{8 \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{1}{r}$$

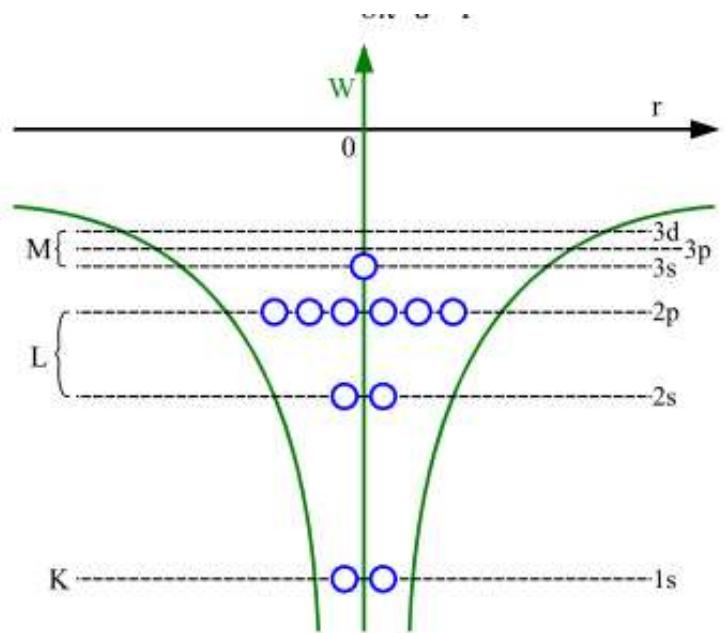
nur bestimmte $r \rightarrow W$ „gequantelt“

Definieren Schalen (Radien) K,L,M

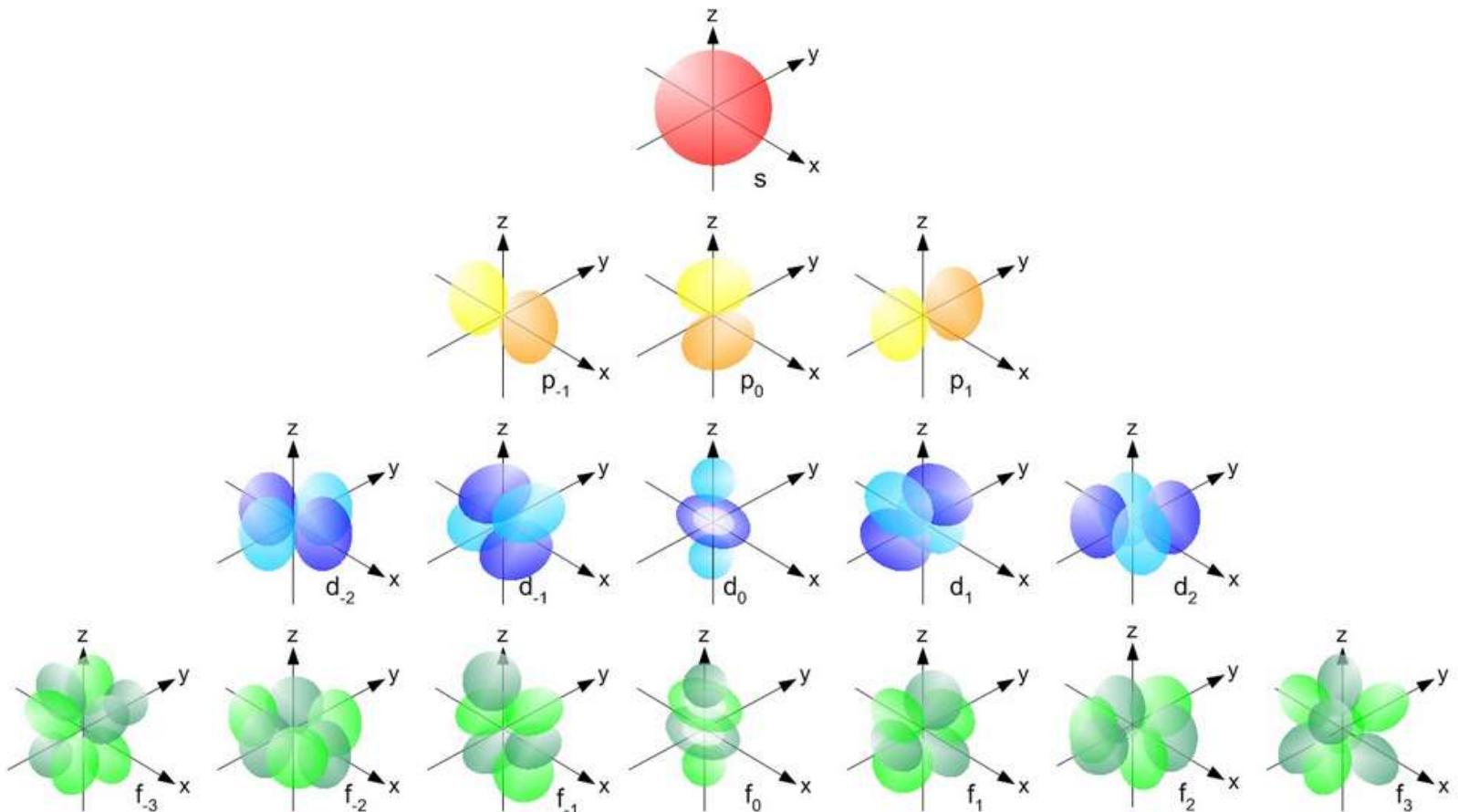
...es gibt Unterschalen



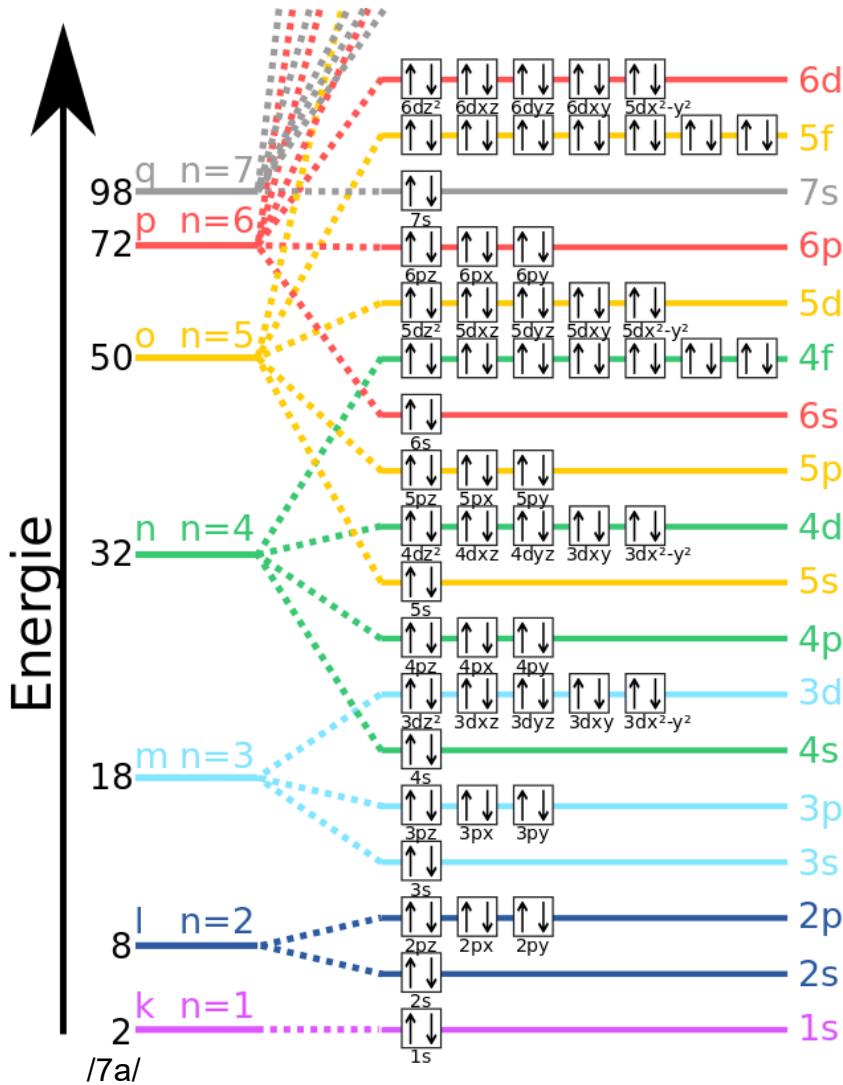
Quelle: /Schei



Orbitale

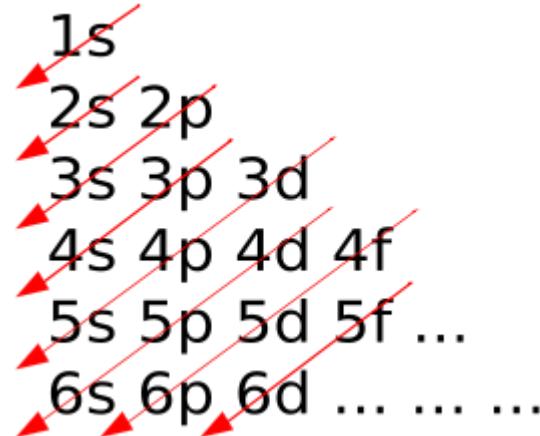


Schalen und Orbitale



Besetzung
mit steigender Energie
Zustände einer Energie erst einfach, dann doppelt

Schema



//10a//

Demo

Viele Atome

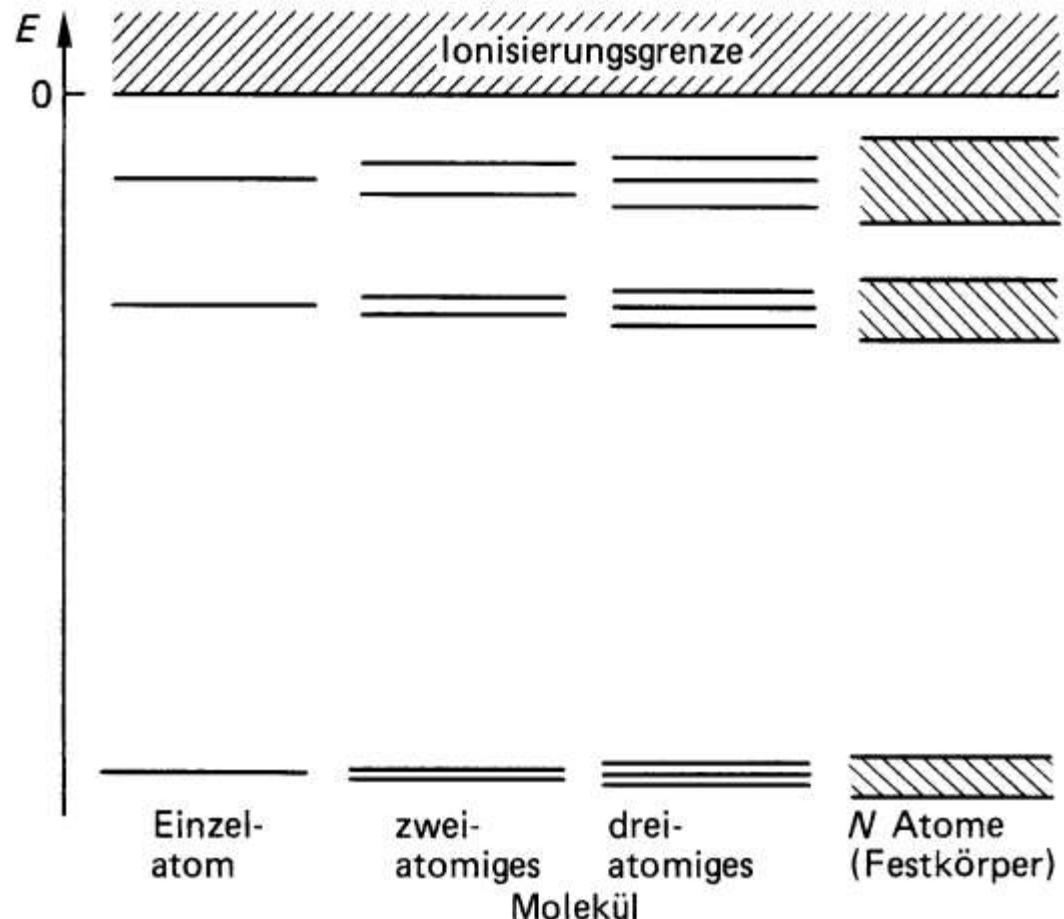
Festkörper

Viele Atome

Wechselwirkungen zw. Atomen

Energieniveaus verschmieren zu
Bändern

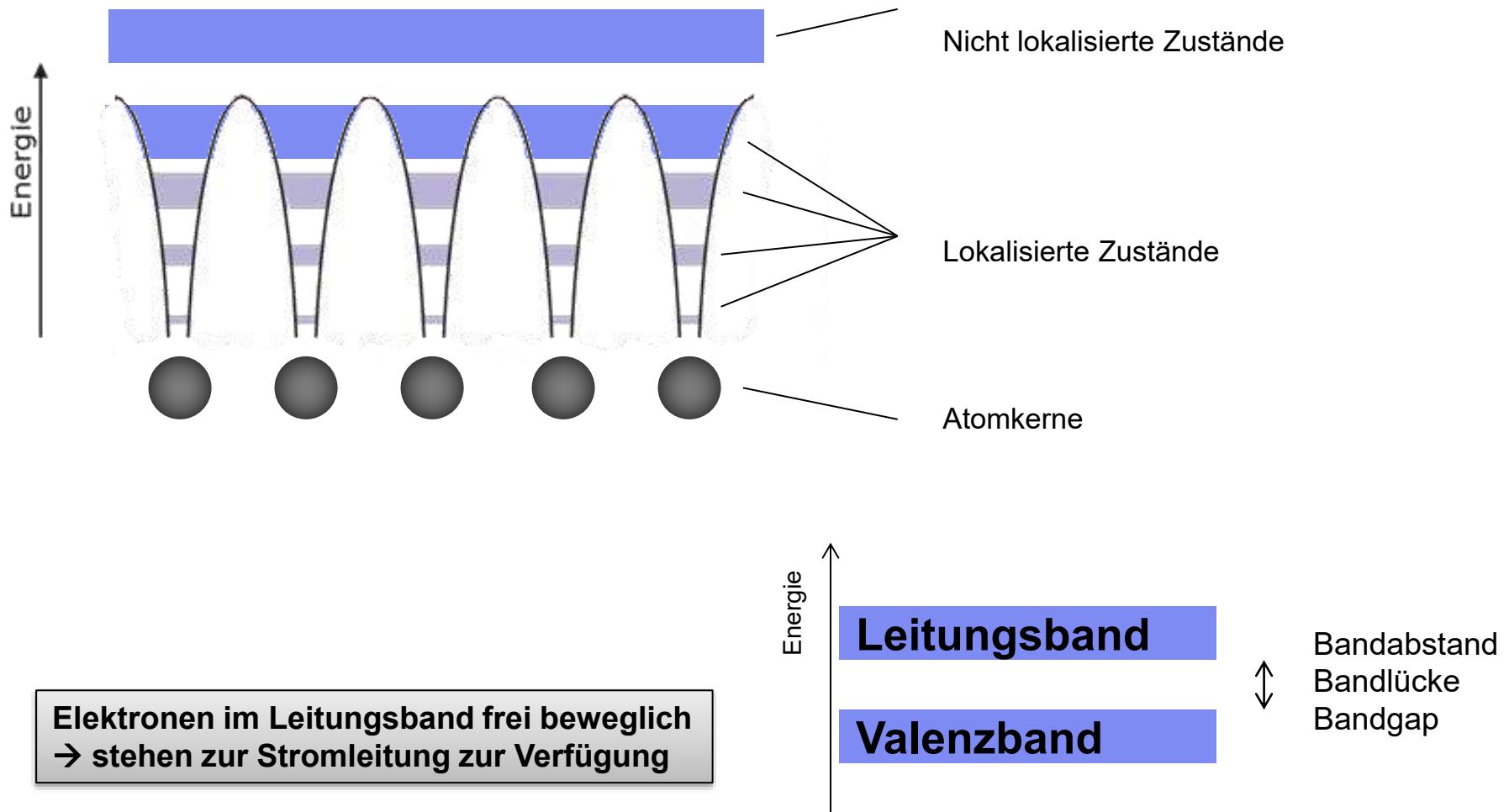
Zwischen den Bändern:
verbotene Zonen



Im Festkörper verbreitern sich die atomaren Energieniveaus zu Bändern

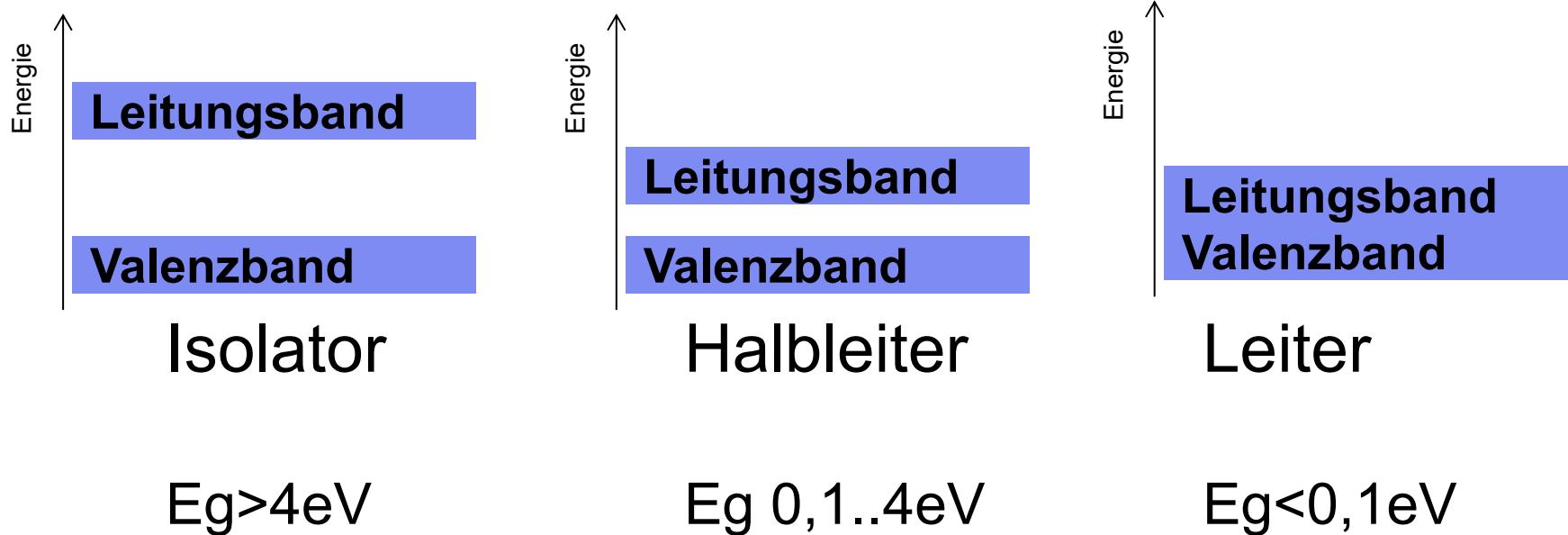
Schematische Darstellung der Energieniveaus /Her/

Bändermodell



Elektronen im Leitungsband frei beweglich
→ stehen zur Stromleitung zur Verfügung

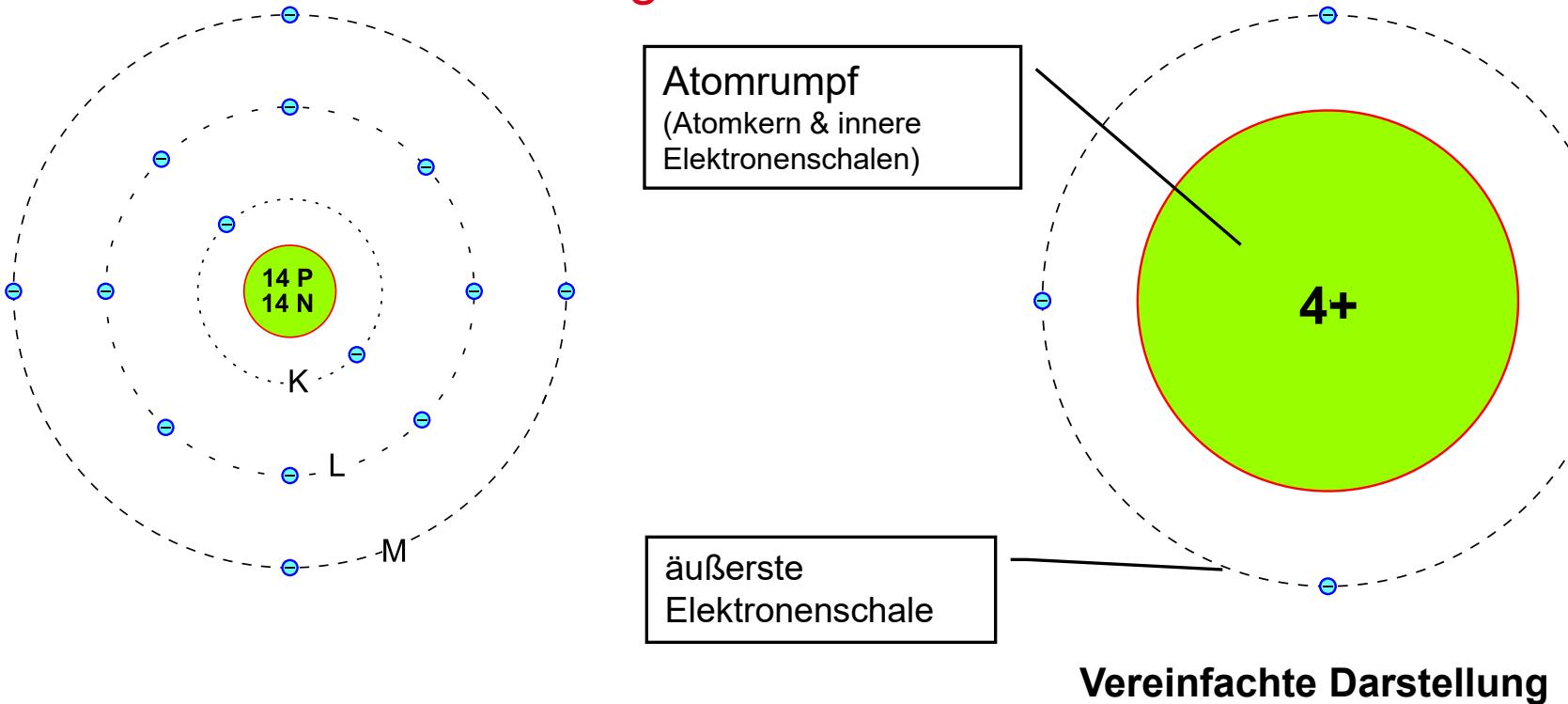
Isolator – Halbleiter - Leiter



Material	Bandlücke
C	5,5 eV
Si	1,12 eV
Ge	0,67 eV
SiC	3,28 eV

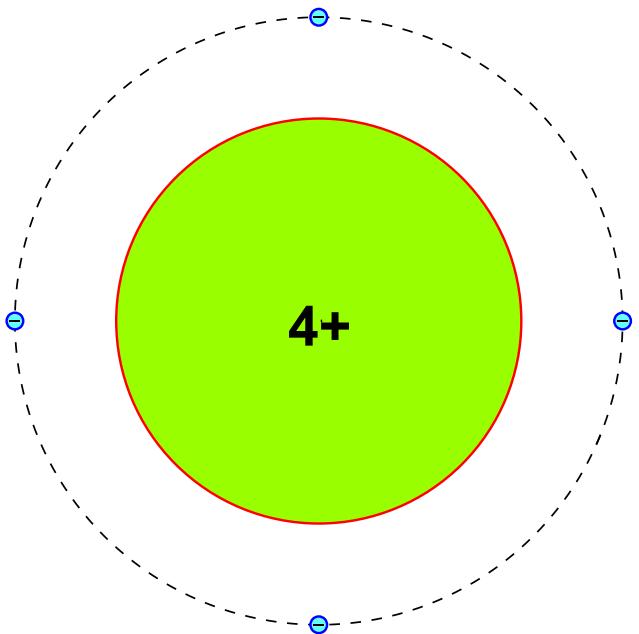
Aufbau von Leitern und Halbleitern

Vereinfachte Darstellung eines Atoms



Elektrotechnik (und Chemie) packen Atomkern und innere Schalen zusammen und betrachten nur äußerste Schale mit Valenzelektronen

Valenzelektronen

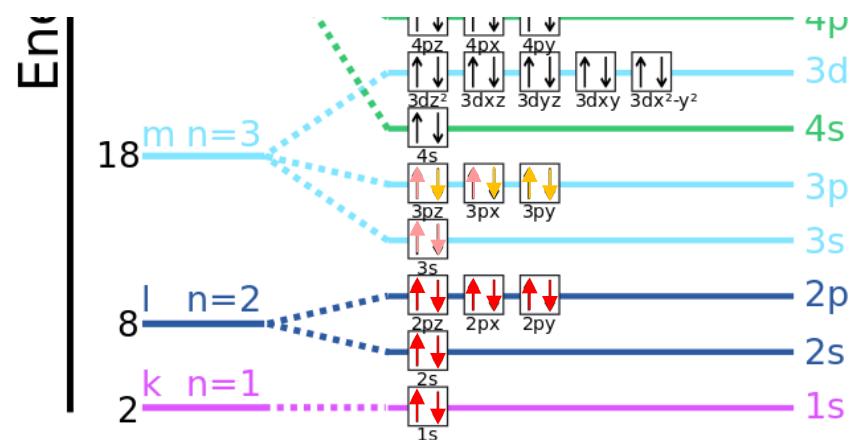


Si fehlen 4 Valenzelektronen
zur Edelgaskonfiguration

Valenzelektronen
4 Stück
2 im 3s (voll), 2 im 3p Orbital

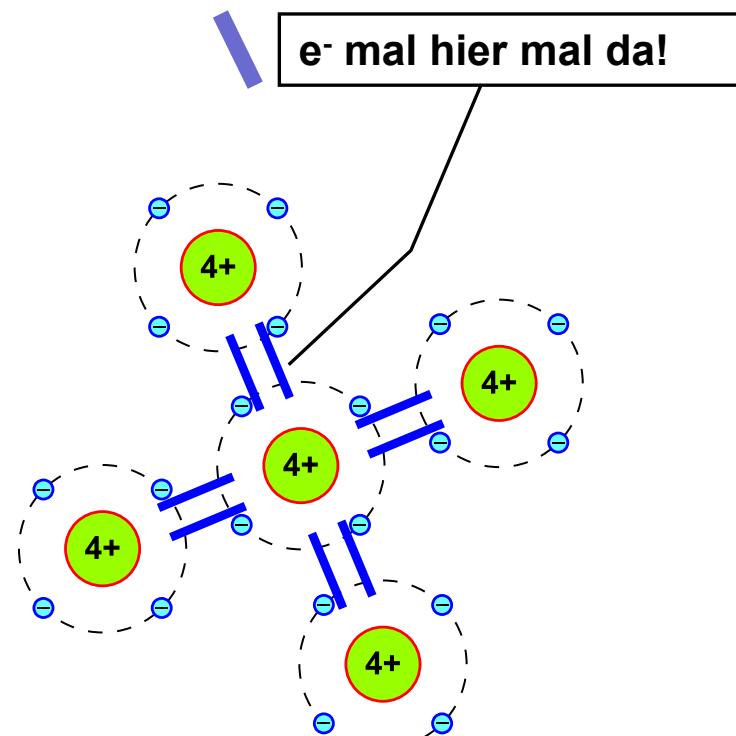
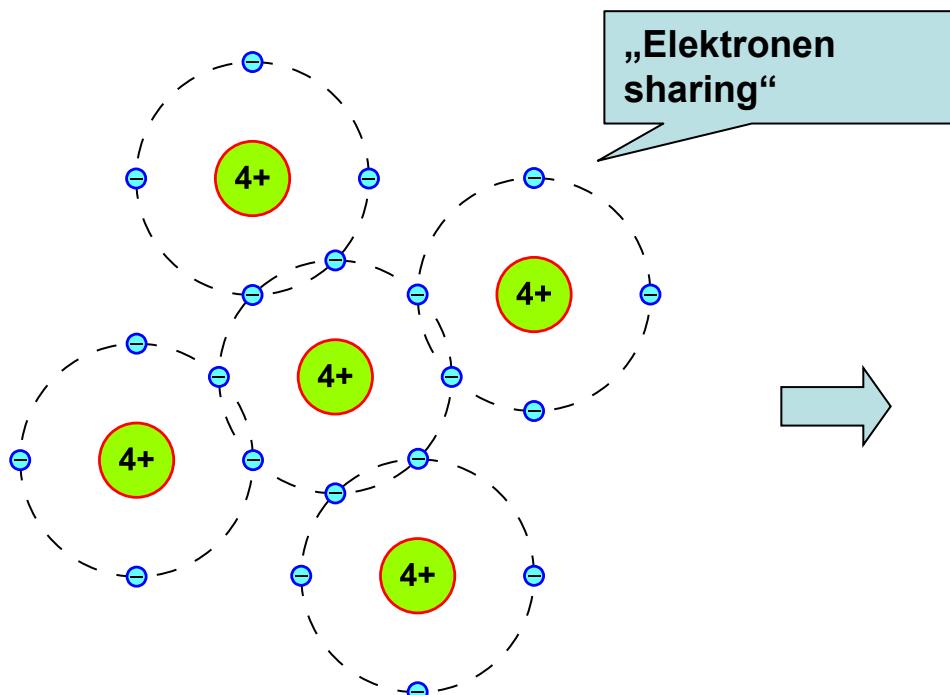
...4 (im 3p) fehlen zur Vollbesetzung
= „Edelgaskonfiguration“

14 Elektronen Silizium
4 davon Valenzelektronen
4 fehlende Elektronen für Edelgas



Elektronenpaarbindung

Elektronenpaarbindungen als Grundlage der Kristallstruktur

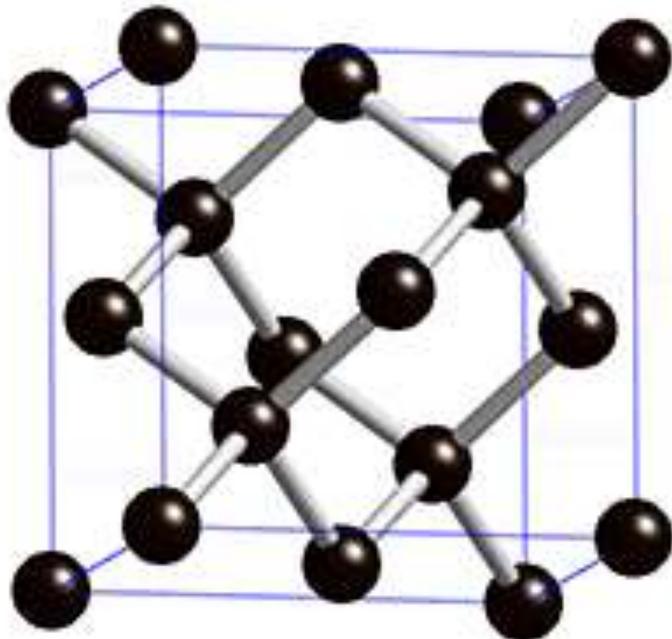


Aufbau eines Halbleiterkristalls

Dreidimensionale Darstellung der Atome in einem Silizium-Halbleiterkristall

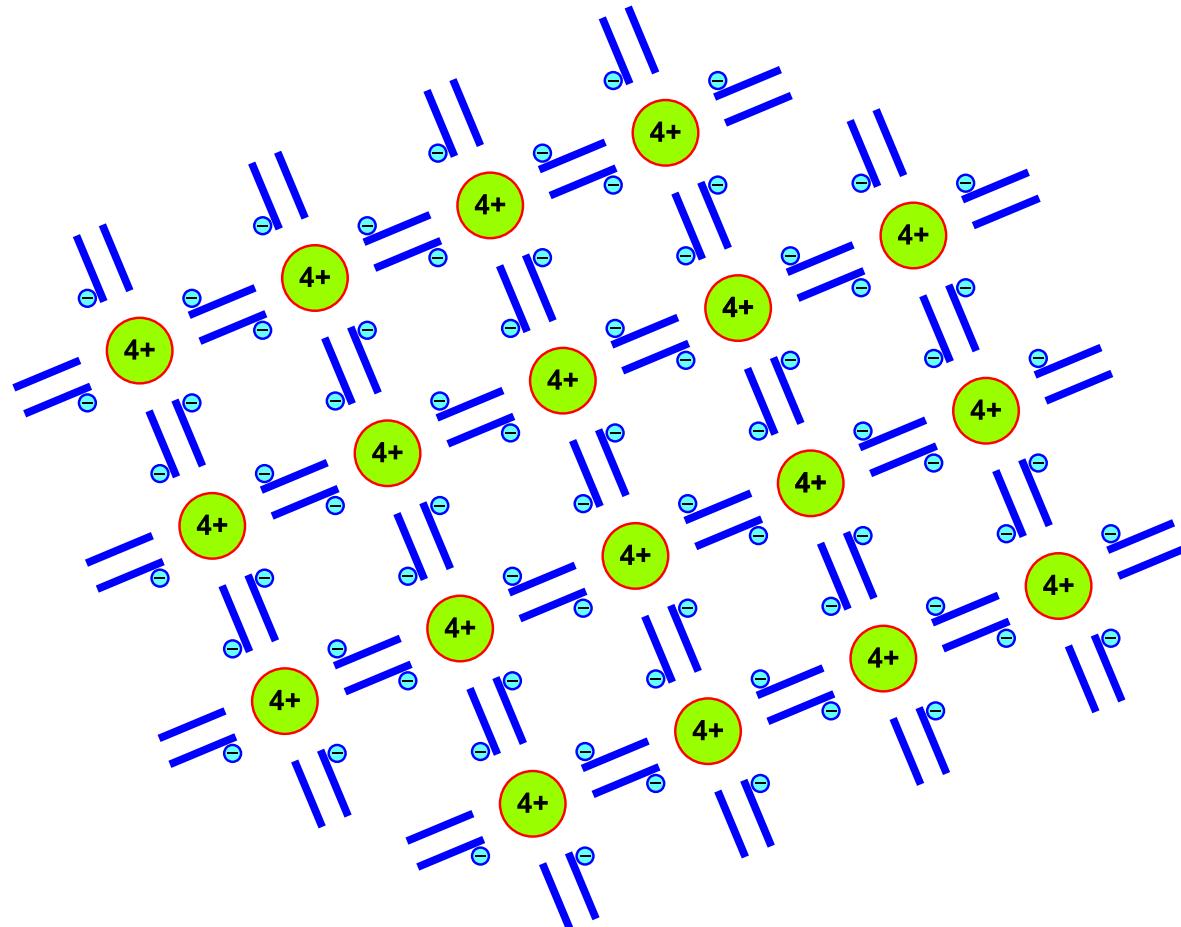
Jedes Atom hat 4 Nachbarn in gleichem Abstand

Diamantstruktur



Aufbau eines Halbleiterkristalls

Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Atome in einem Silizium-Halbleiterkristall





Aufbau von Leitern und Halbleitern

Belegung der Elektronenschalen bei verschiedenen Elementen

Kernladung	Element	K L M N O P	Metall	Halbleiter	Edelgas
2	He	Helium	2		X
5	B	Bor	2 3		
6	C	Kohlenstoff	2 4		
10	Ne	Neon	2 8		X
13	Al	Aluminium	2 8 3	X	
14	Si	Silizium	2 8 4		X
15	P	Phosphor	2 8 5		
18	Ar	Argon	2 8 8		X
29	Cu	Kupfer	2 8 18 1	X	
31	Ga	Gallium	2 8 18 3	X	
32	Ge	Germanium	2 8 18 4		X
33	As	Arsen	2 8 18 5		
36	Kr	Krypton	2 8 18 8		X
47	Ag	Silber	2 8 18 18 1	X	
49	In	Indium	2 8 18 18 3	X	
51	Sb	Antimon	2 8 18 18 5		
54	Xe	Xenon	2 8 18 18 8		X
79	Au	Gold	2 8 18 32 18 1	X	

Entscheidend ist die Anzahl der Elektronen auf der äußersten Schale
= Valenzelektronen

Silizium

Nach Sauerstoff zweithäufigstes Element der Erdkruste
 Siliziumdioxid

- Sand
- Quarz
- Achat, Jaspis, Opal



Falsche Freunde!

- Silizium → Engl. Silicon
- Silikon (Polysiloxan) → Engl. Silicone

Silizium

2

Angebot (2012)			
Produktion Deutschland	Bergwerksförderung: n. b. Raffinadeproduktion (sekundär): n. b.	Raffinadeproduktion: 25.574 t Recyclinganteil: n. b.	
Produktion weltweit	Bergwerksförderung: n. b.	Raffinadeproduktion: 2.420.000 t	
Regionale Konzentration der weltweiten Raffinadeproduktion	Top-3-Länder	Anteil	Länderrisiko
	China Brasilien Norwegen	62,0 % 5,5 % 8,3 %	-0,56 0,05 1,78
	Anteil Top-10-Länder	96,5 %	
	Hertford-Hirschman-Index	> 4.024 (hoch)	
	gewichtetes Landessiko der Raffinade	-0,10 (mäßig)	
Vorräte weltweit	Reserven: unbegrenzt		

Führende Hersteller von Polysilicium 2010

Hersteller	erwartete Produktionskapazität im Jahr 2010	Firmensitz
Hemlock Semiconductor	36 kt ^[25]	USA
Wacker Chemie	33 kt ^[26]	Deutschland
GCL-Poly	18 kt ^[27]	China (Hongkong)
OCI	17 kt ^[28]	Südkorea
MEMC Electronic Materials	8 kt ^[29]	USA
Renewable Energy Corporation ASA (REC)	12 kt ^[30]	Norwegen
Tokuyama	8,2 kt ^[31]	Japan

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

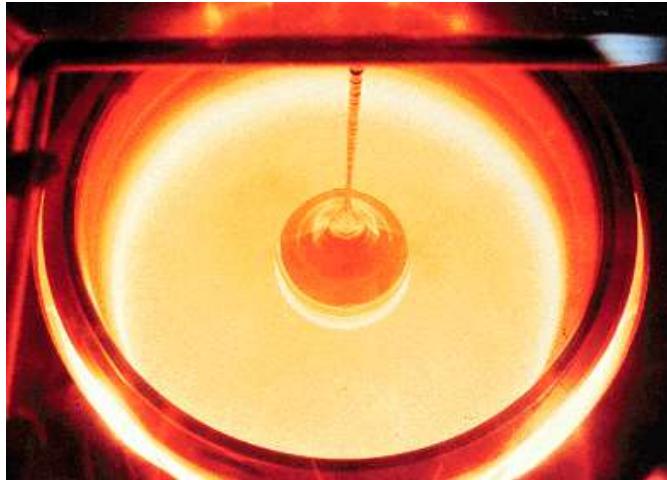
Herstellung eines Halbleiterkristalls





Aufbau von Leitern und Halbleitern

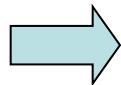
Herstellung eines Halbleiterkristalls – Czochralski-Verfahren (1916)



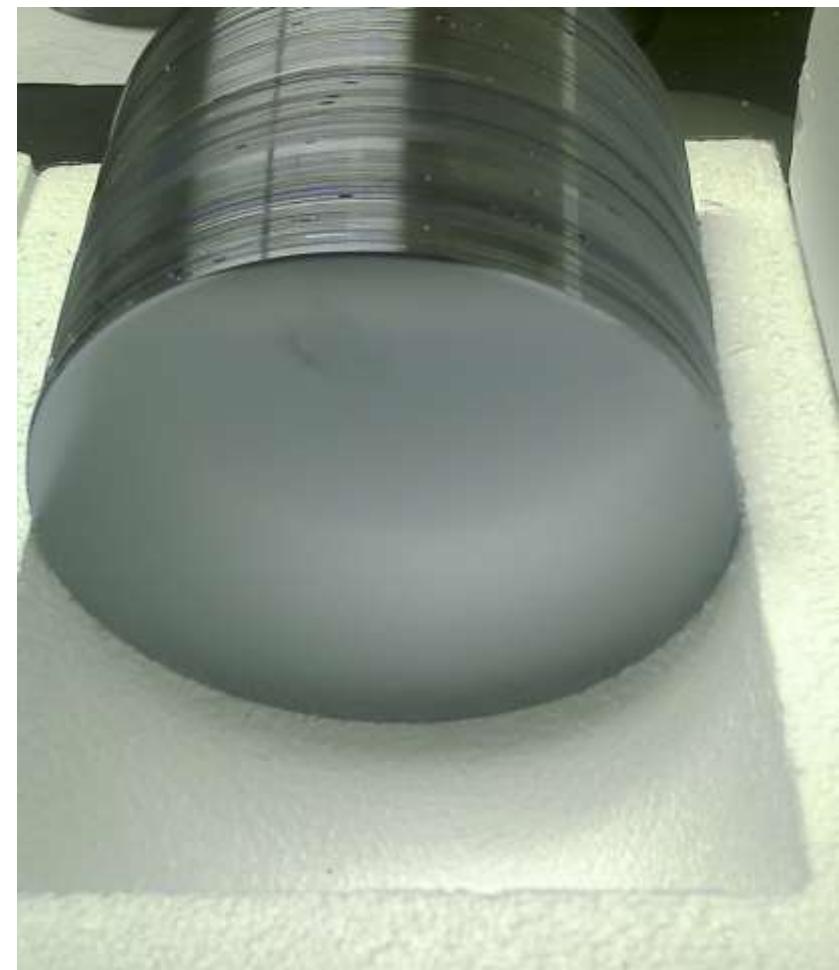


Aufbau von Leitern und Halbleitern

Herstellung eines Halbleiterkristalls



Gezogener Silizium-Einkristall



Fertiger geschnittener Silizium-Wafer

Eigenleitung von Halbleitern

Leitungsmechanismen in Halbleitern:

- Eigenleitung
- Störstellenleitung
- Paarbildung & Rekombination (noch i.F. betrachtet)

Irgendwie müssen freie
Ladungsträger
entstehen!

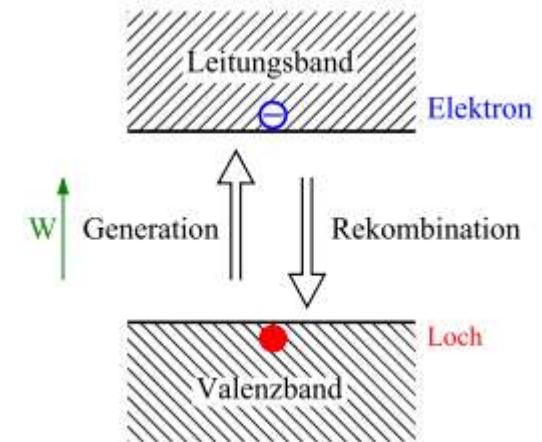
Eigenleitung von Halbleitern - Ladungsträgerkonzentration

Tiefe Temperatur

Alle Elektronen sitzen im Kristall an festen Plätzen → keine beweglichen Ladungsträger → Isolator

Energiezufuhr

- Valenzelektronen können Bandlücke überwinden
- Anschaulich: „schütteln sich frei“
- zurück bleibt positiver Atomrumpf = Defektelektron aka „Loch“
- → Eigenleitung heißt auch intrinsische Leitung



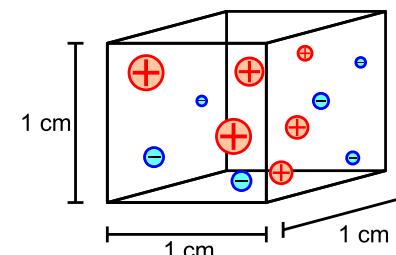
Gleichgewicht

Generation von freien Ladungsträgern (Elektronen und Löcher)

Rekombination von Löchern und Elektronen

Anzahl von Elektronen und Löchern immer gleich

Konzentration (Anzahl pro Volumen) freier positiver und negativer
Ladungsträger n_0 , p_0 identisch

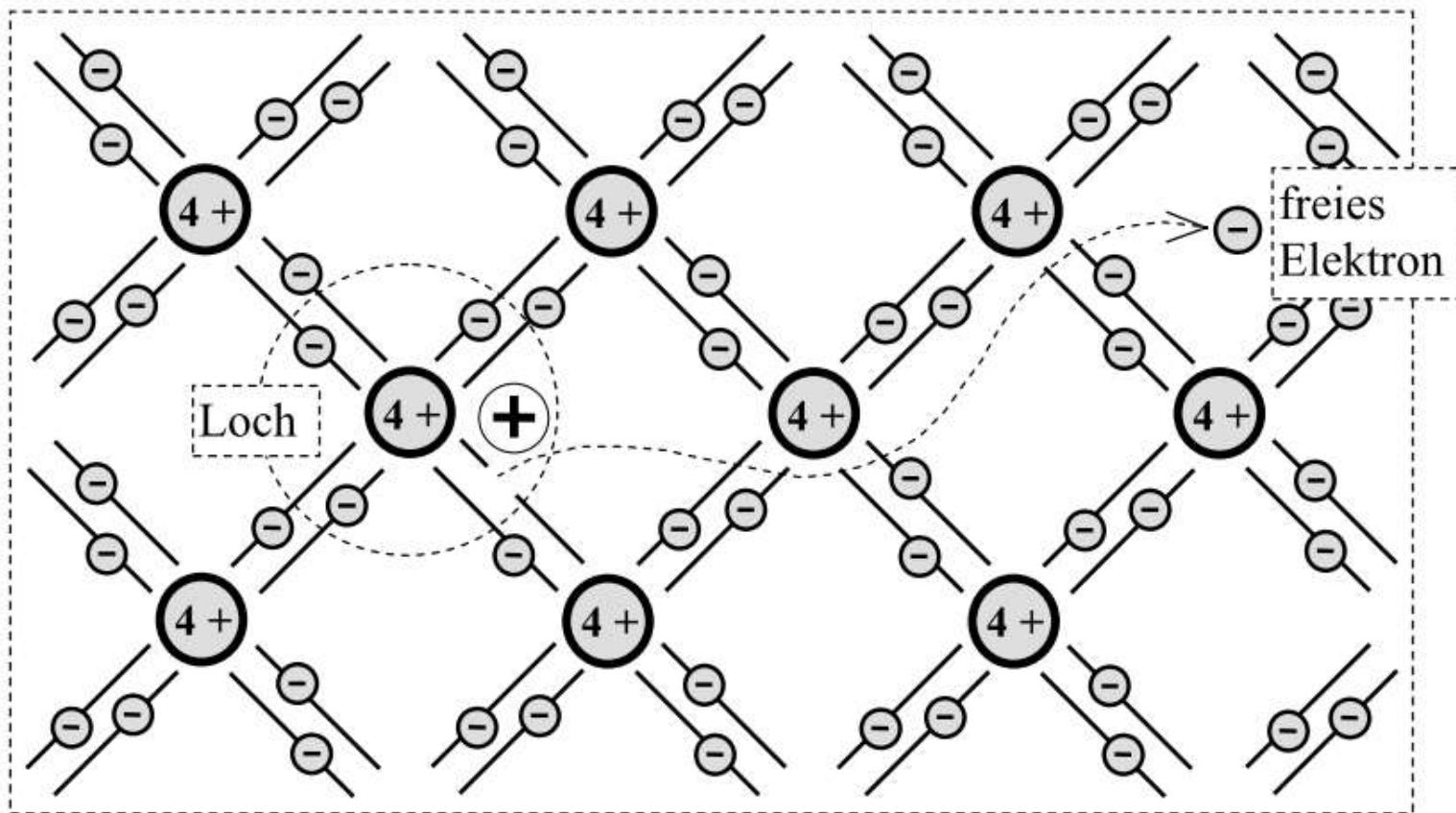


$$n_0 = p_0$$

Paarbildung

Atom → Loch + Elektron

Sowohl Loch als auch Elektron frei beweglich



Wieviel Energie steckt eigentlich in Wärmestrahlung

wieviel Energie hat Infrarotstrahlung in eV

Die Energie von Infrarotstrahlung liegt typischerweise im Bereich von 0,001 eV bis 1,7 eV.

Die Energie eines Photons wird durch die Formel gegeben:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

wobei

- $h = 4,135667696 \times 10^{-15}$ eV·s (Plancksche Konstante),
- $c = 3,0 \times 10^8$ m/s (Lichtgeschwindigkeit),
- λ die Wellenlänge in Metern ist.

Einordnung nach Wellenlänge:

- **Nahes Infrarot (NIR):** 0,7–1,4 µm → 0,89–1,77 eV
- **Mittleres Infrarot (MIR):** 1,4–3 µm → 0,41–0,89 eV
- **Fernes Infrarot (FIR):** 3–1000 µm → 0,001–0,41 eV

Massenwirkungsgesetz und Intrinsicsicht

Paarbildung erzeugt genausoviele Elektronen wie Löcher: $n_0 = p_0 = n_i$

n_i heißt Intrinsicdichte und ist Temperaturabhängig: $n_i = f(T)$

Für das Produkt gilt das Massenwirkungsgesetz $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$

Gleichgewicht zwischen Paarbildung und Rekombination:

Temperaturerhöhung verschiebt Gleichgewicht in Richtung Paarbildung

Dichte der Ladungsträger bei Eigenleitung (Intrinsicdichte)

Im thermischen Gleichgewicht gilt bei Eigenleitung:

$$f(T) = n_{i0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\left(\frac{W_g \cdot (T - T_0)}{2 \cdot k \cdot T \cdot T_0} \right)}$$

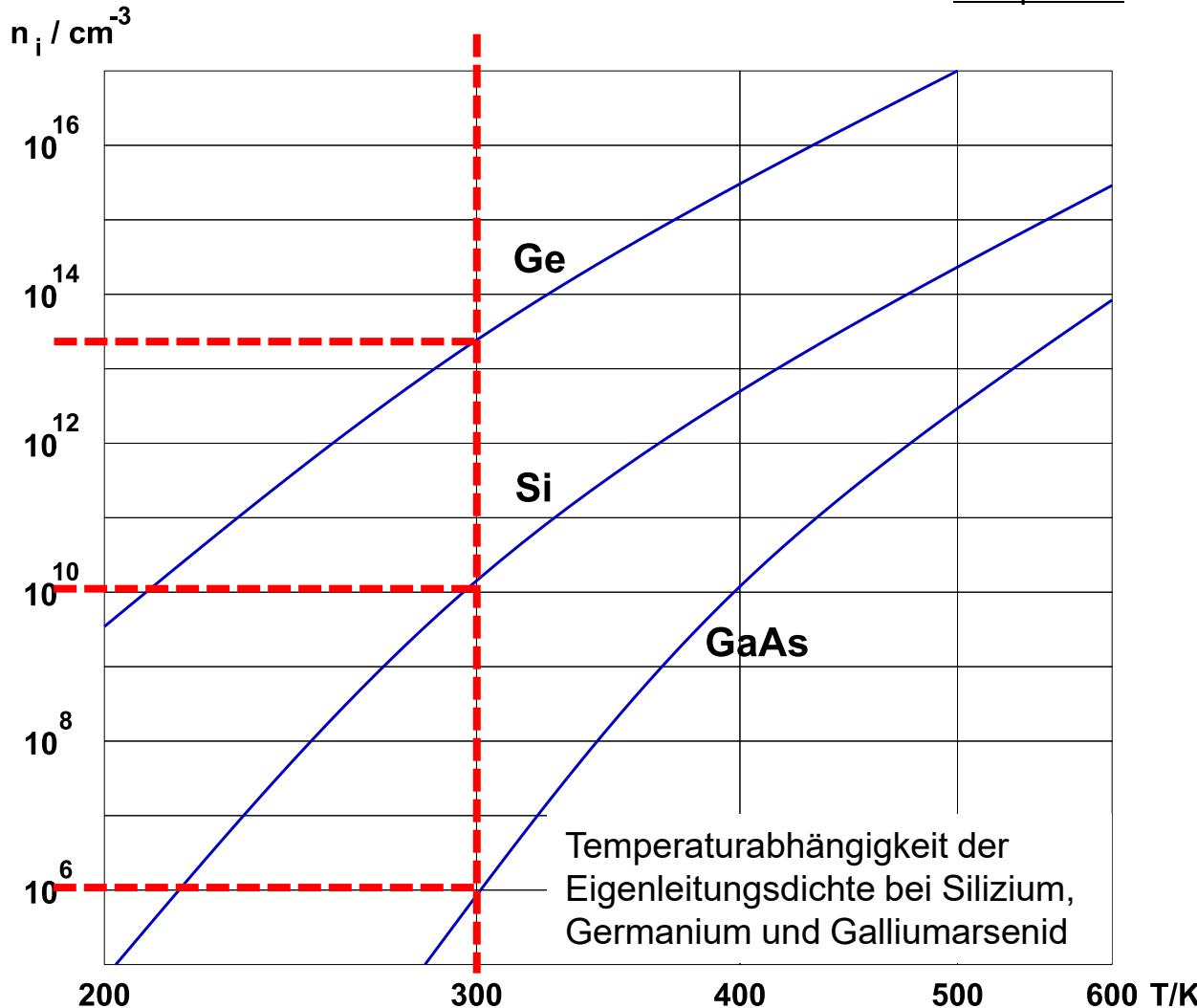
n_{i0} = Intrinsicdichte bei Bezugstemperatur T_0

W_g = Bandlücke

k = Boltzmannkonstante $\approx 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$

Intrinsicdichte

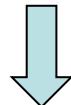
Die Intrinsicdichte n_i steigt annähernd exponentiell mit der Temperatur → el. Widerstand nimmt ab → NTC



Intrinsicdichte

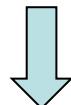
Vergleich Halbleiter und Metalle – Anzahl freier Ladungsträger n

Metalle $n: 5 \cdot 10^{21} / \text{cm}^3 < n < 5 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$



ca. Faktor 10^{11} = „11 Größenordnungen / orders of magnitude“

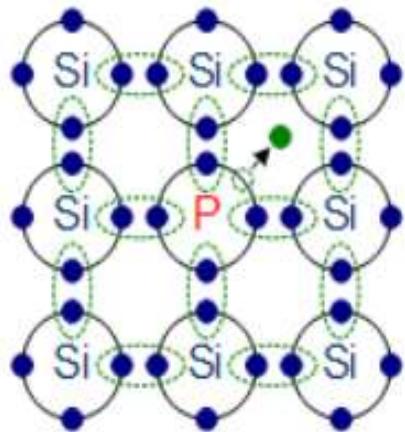
Silizium: $n_i \approx 1,5 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3$



ca. Faktor 10^3 = „3 Größenordnungen / orders of magnitude“

Germanium: $n_i \approx 2,5 \cdot 10^{13} / \text{cm}^3$

dotierte Halbleiter



n-Dotierung

Mit 5-wertigen Atomen

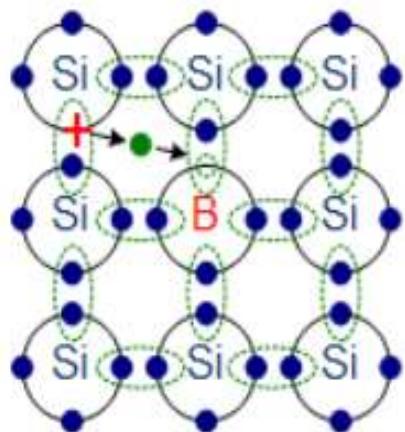
Phosphor, Arsen

Dotieratom kann 5. Valenzelektron leicht abgeben (Donator)

Es entsteht ein bewegliches Elektron + ein ortsfestes
POSITIVES Rumpfatom (...kein Loch!)

El. Leitung entsteht durch wandernde Elektronen =
Majoritätsträger

Dotierdichte
sehr gering:
 $1: 10^{14}$



P-Dotierung

Mit 3-wertigen Atomen

Bor, Indium

Dotieratom kann Elektron leicht aufnehmen (Akzeptor)

Es entsteht ein bewegliches Loch + ein negatives, ortsfestes
Rumpfatom

El. Leitung entsteht durch wandernde Löcher =
Majoritätsträger

Leitungseffekt durch Dotierung heißt
Störstellenleitung

Dotierdichte

Größenordnungen zum Vergleich

Atomdichte in Silizium

$$\text{Dichte Silizium } \rho = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

... also 1 cm^3 wiegt 2 g

$$\text{Molare Masse Silizium (aus Periodensystem): } M = 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\dots \text{ also sind } 1 \text{ cm}^3 \text{ Silizium} = 2 \text{ g} = \frac{2}{28} \text{ mol}$$

$$\text{Avogadrokonstante (Teilchen pro Mol) } N_{\text{Avogadro}} = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$$

$$\dots \text{ also sind } 1 \text{ cm}^3 \text{ Silizium} = 2 \text{ g} = \frac{2}{28} \text{ mol} = \frac{2}{28} \cdot 6 \cdot 10^{23} \approx 5 \cdot 10^{22} \text{ Atome}$$

Dotierung mit 10^{14} cm^{-3} ist also 100 Millionen mal kleiner !!

Die Anzahl intrinsischer Ladungsträger sogar 1 Billion mal (10^{12}) kleiner



Siliziumatome

Bodensee
 $10^{12} l$

„1 Billiarde“



Dotieratome

Tanktruck
 $10^4 l$

„10 Tausend“



Eigenleitung Elektronen

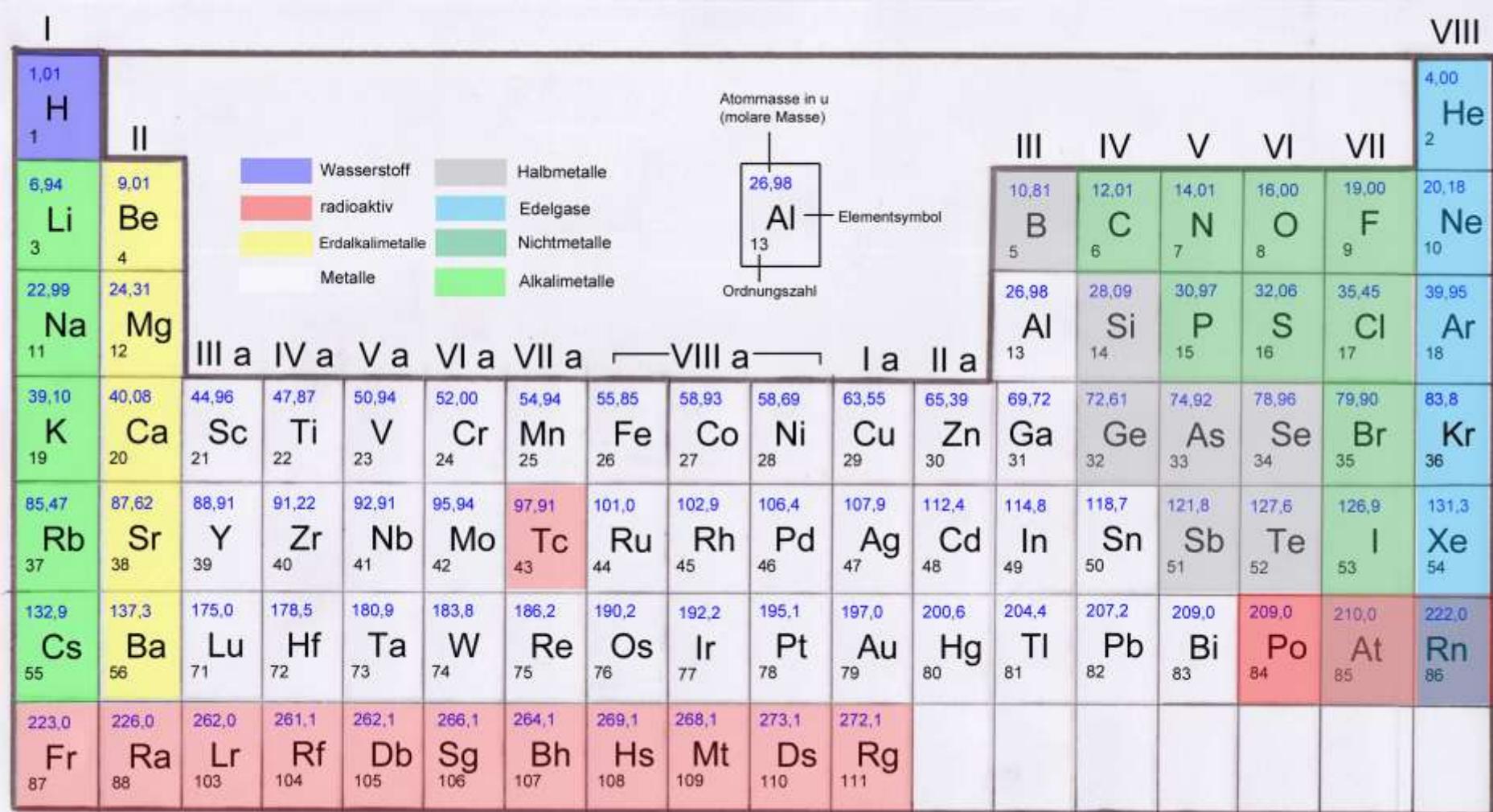
Colaflasche
1l

„1“

Atommasse in u
(molare Masse)

Elementsymbol

Ordnungszahl



I		VIII																	
1,01 H 1		26,98 Al 13	10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	4,00 He 2											
II																			
6,94 Li 3	9,01 Be 4	Wasserstoff	Halbmetalle	radioaktiv	Edelgase	Erdalkalimetalle	Nichtmetalle	Metalle	Alkalimetalle	III	IV	V	VI	VII					
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	Sc	Ti	V	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
39,10 K 19	40,08 Ca 20	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54		
85,47 Rb 37	87,62 Sr 38	175,0 Lu 71	178,5 Hf 72	180,9 Ta 73	183,8 W 74	186,2 Re 75	190,2 Os 76	192,2 Ir 77	195,1 Pt 78	197,0 Au 79	200,6 Hg 80	204,4 Tl 81	207,2 Pb 82	209,0 Bi 83	209,0 Po 84	210,0 At 85	222,0 Rn 86		
223,0 Fr 87	226,0 Ra 88	262,0 Lr 103	261,1 Rf 104	262,1 Db 105	266,1 Sg 106	264,1 Bh 107	269,1 Hs 108	268,1 Mt 109	273,1 Ds 110	272,1 Rg 111									
III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a	I a	II a												

Dotierung um Bändermodell

Dotieratome

ortsfest / lokalisiert

geringer Energieaufwand → Ionisierung

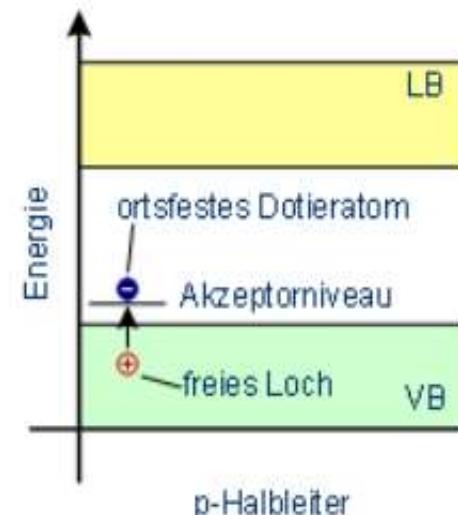
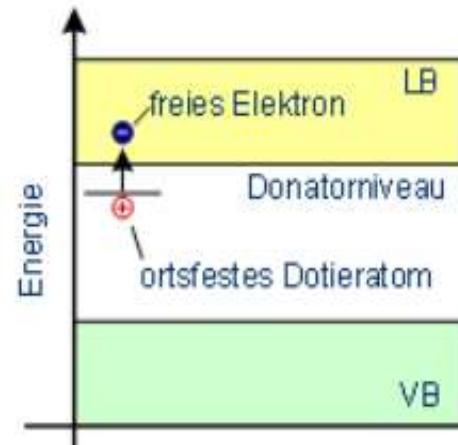
Donator: Abgabe Elektron ins Leitungsband → bewegliches Elektron im Leitungsband

Akzeptor: Aufnahme Elektron aus Valenzband → bewegliches Loch im Valenzband

Also Energieniveaus

- in Bandlücke
- aber sehr nahe an Bandkante

Warum sind die Niveaus der Dotieratome scharf und nicht Bänder wie beim Silizium?



Ladungsträgerkonzentrationen im dotierten Halbleiter

Donatoratom → Elektron (Konzentration n_0) + positives Rumpfatom (Konz. N_D^+)

Akzeptoratom → Loch (Konzentration p_0) + negatives Rumpfatom (Konz. N_A^-)

Neutralitätsbedingung: (Gleiche Anzahl oder Dichte pos. und neg. Ladungen) $p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^-$

Massenwirkungsgesetz: $p_0 \cdot n_0 = n_i^2$

Konzentration freier Ladungsträger im thermodynamischen Gleichgewicht

$$n_0 = \frac{1}{2} \cdot \left[N_D^+ - N_A^- + \sqrt{(N_D^+ - N_A^-)^2 + 4 \cdot n_i^2} \right]$$

$$p_0 = \frac{1}{2} \cdot \left[N_A^- - N_D^+ + \sqrt{(N_A^- - N_D^+)^2 + 4 \cdot n_i^2} \right]$$

Im dotierten Halbleiter immer beides

Ladungsträger durch Paarbildung (Eigenleitung)

Ladungsträger durch Dotierung (Störstellenleitung)



Leitungsmechanismen in Halbleitern

Ladungsträgerkonzentrationen im n/p-leitenden Halbleiter

Einfachdotierung

n-Dotierung

Majoritätsträger

- Elektronen
- Donatoratome bei Raumtemperatur alle ionisiert

$$n_{n0} \approx N_D^+ \approx N_D$$

Minoritätsträger

- Löcher
- Dichte aus Massenwirkungsgesetz

$$p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

p-Dotierung

Majoritätsträger

- Löcher
- Akzeptoratome bei Raumtemperatur alle ionisiert

$$p_{p0} \approx N_A^- \approx N_A$$

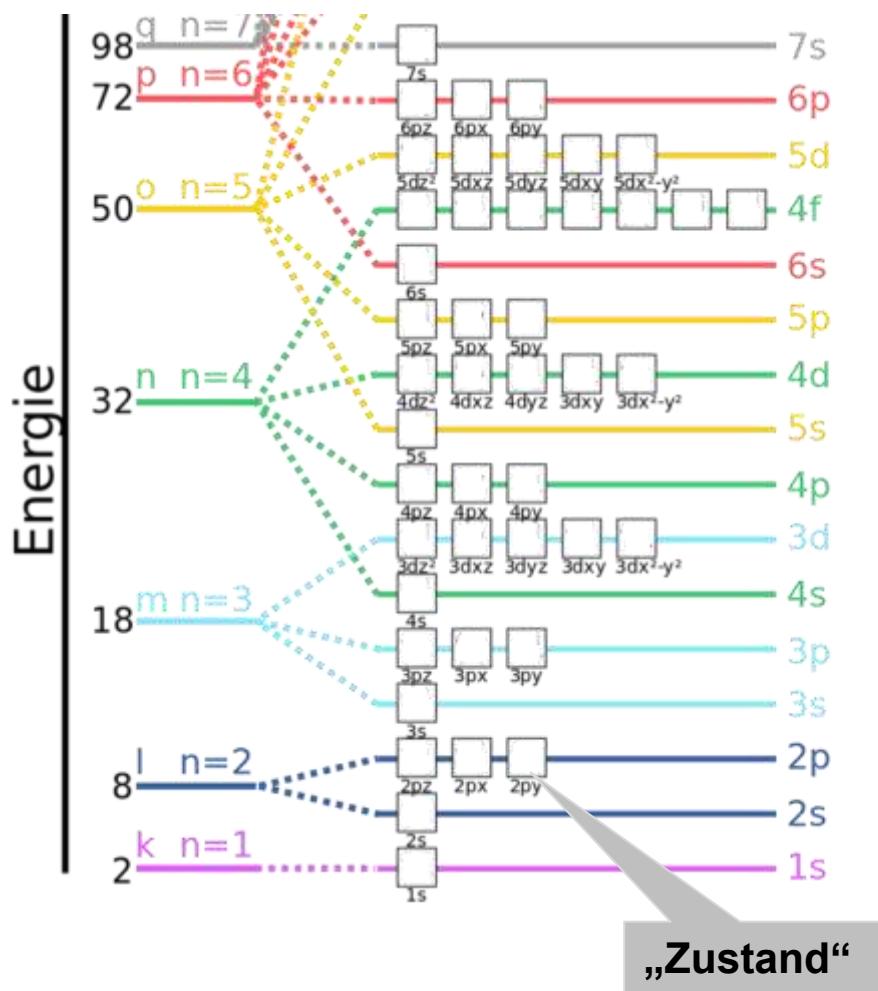
Minoritätsträger

- Elektronen
- Dichte aus Massenwirkungsgesetz

$$n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$



Zustandsdichte, Aufenthaltswahrscheinlichkeit



Zustand

- Energieniveau eines Elektrons
- „leeres Zimmer im Atomhaus“

Aufenthaltswahrscheinlichkeit

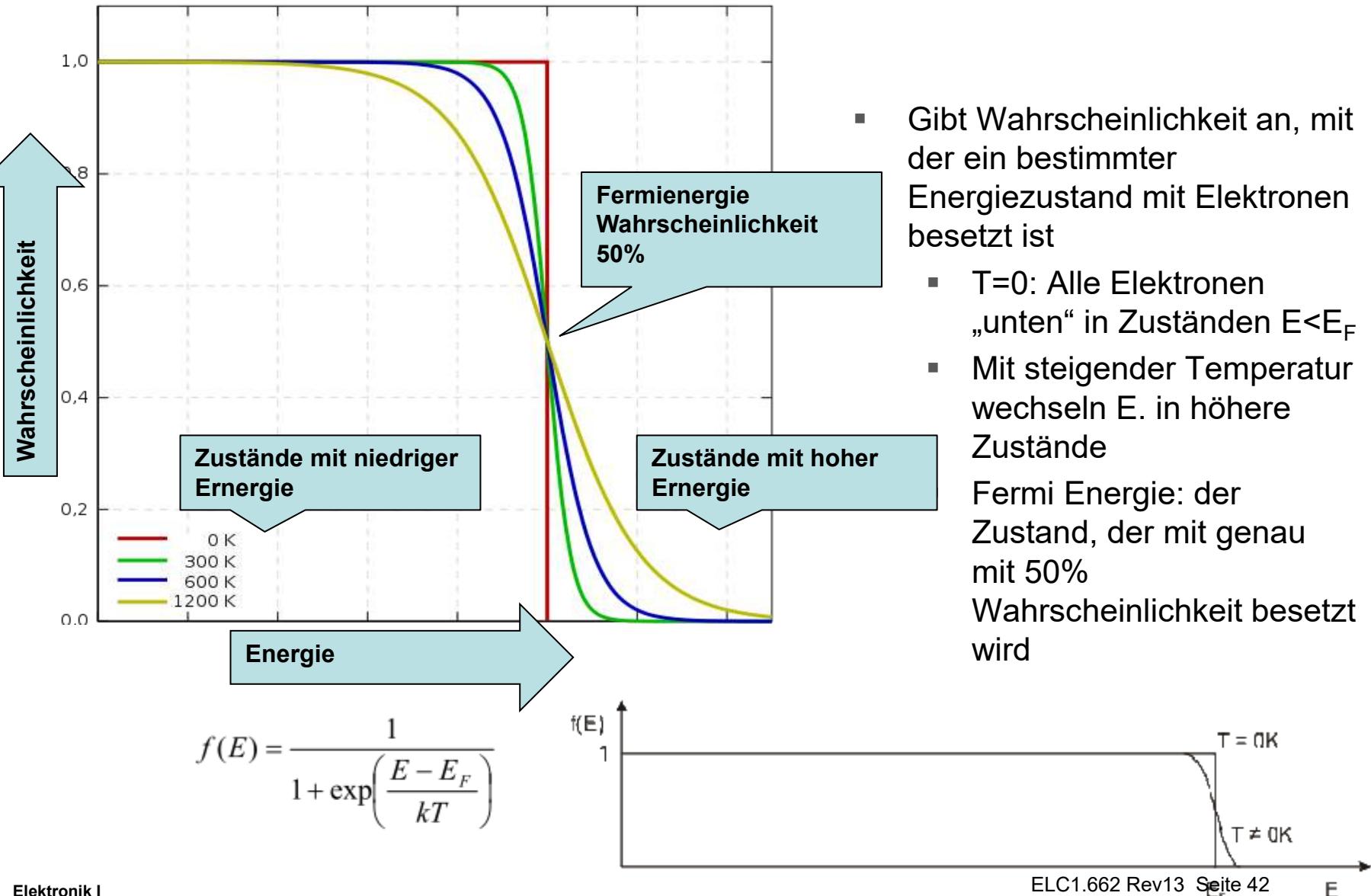
- Gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit Zustand besetzt (Zimmer bewohnt) ist

Zustandsdichte

- Gibt an wieviele solche „Zimmer“ pro cm^3 vorhanden sind

...tatsächliche Elektronendichte (Erwartungswert) ergibt sich aus Produkt: Zustandsdichte x Wahrscheinlichkeit

Fermi Dirac Verteilung

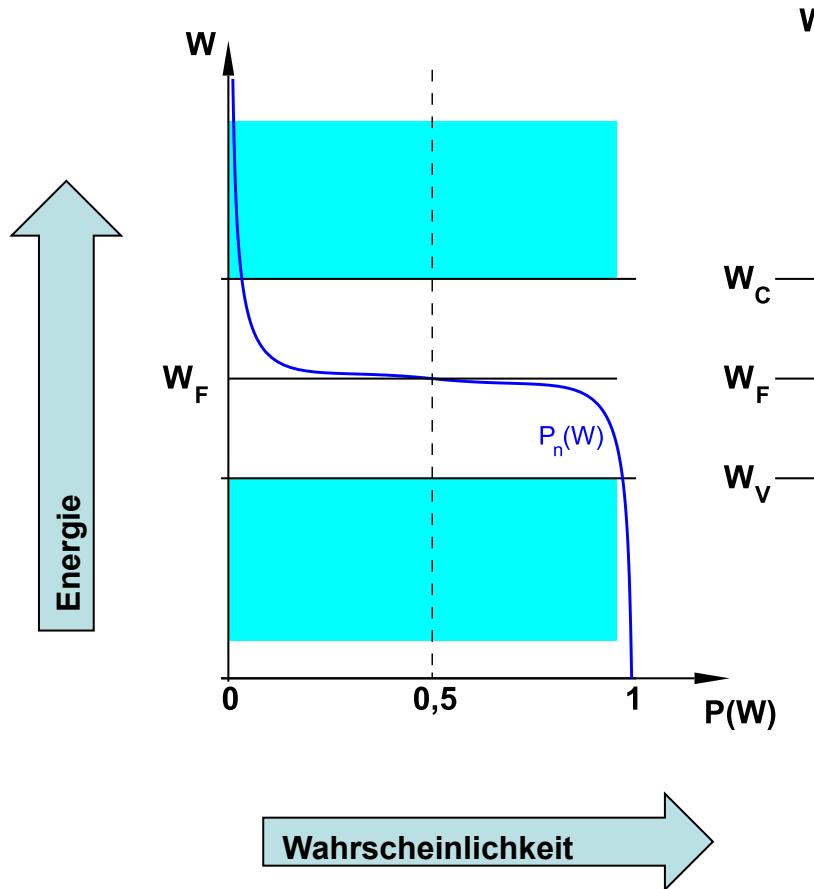


- Gibt Wahrscheinlichkeit an, mit der ein bestimmter Energiezustand mit Elektronen besetzt ist
 - $T=0$: Alle Elektronen „unten“ in Zuständen $E < E_F$
 - Mit steigender Temperatur wechseln E. in höhere Zustände
- Fermi Energie: der Zustand, der mit genau mit 50% Wahrscheinlichkeit besetzt wird

Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher

Lage des Fermi-Niveaus (beim reinen, nicht dotierten Halbleiter):

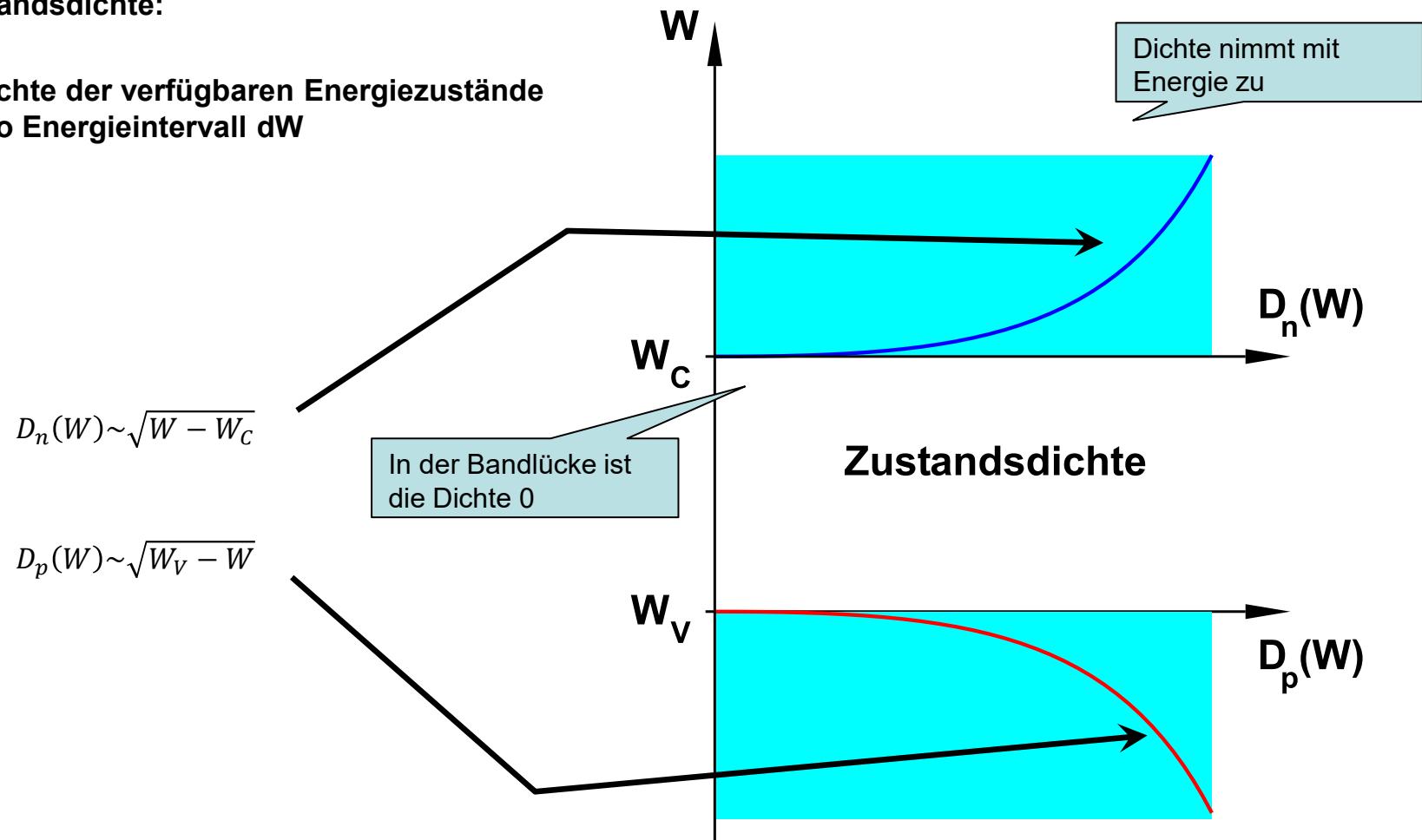
- ungefähr in der Mitte des verbotenen Bandes.



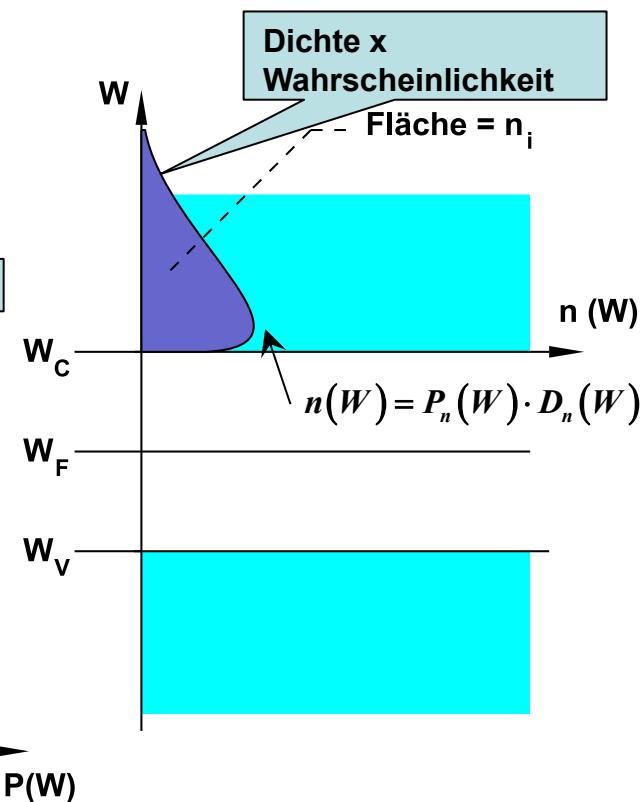
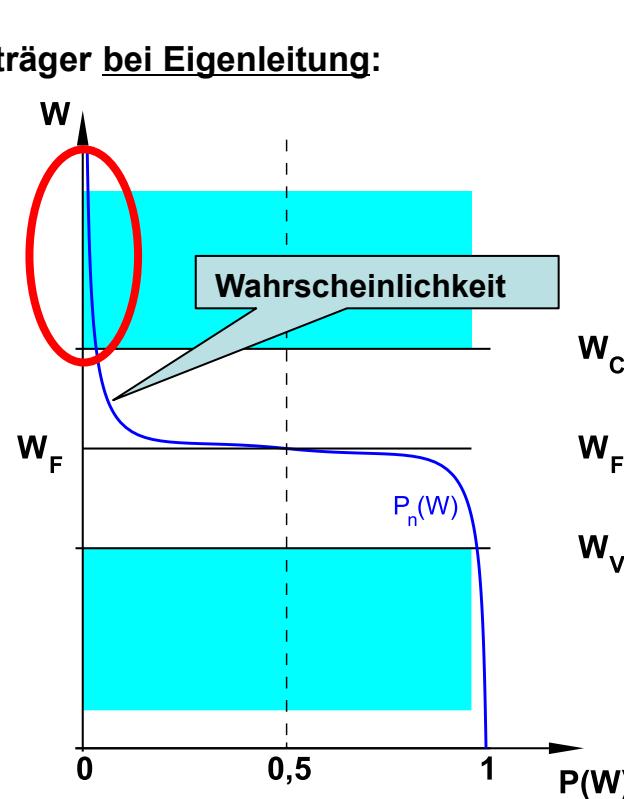
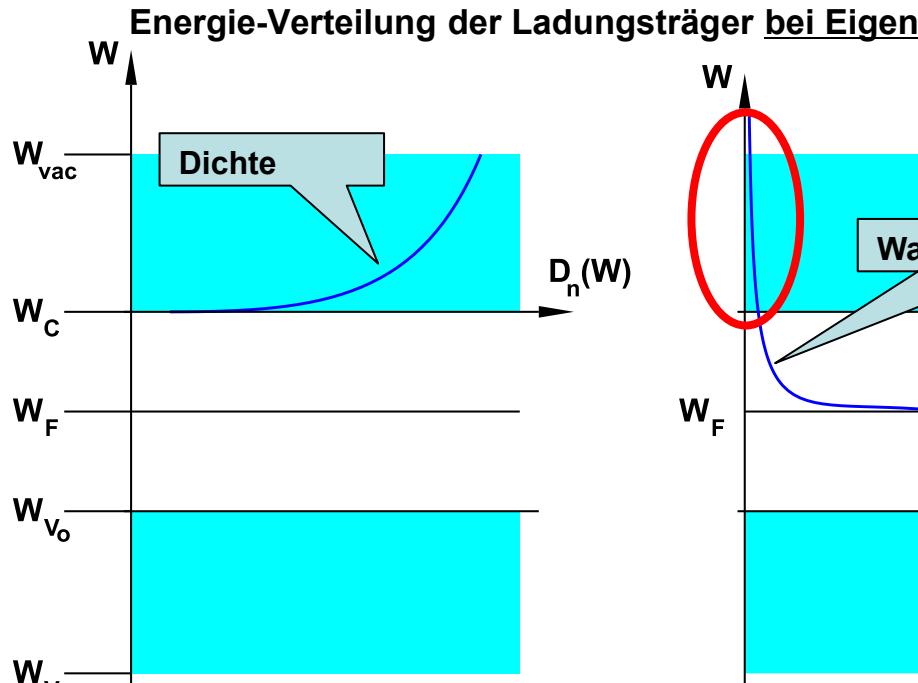
Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher

Zustandsdichte:

- Dichte der verfügbaren Energiezustände pro Energieintervall dW



Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher

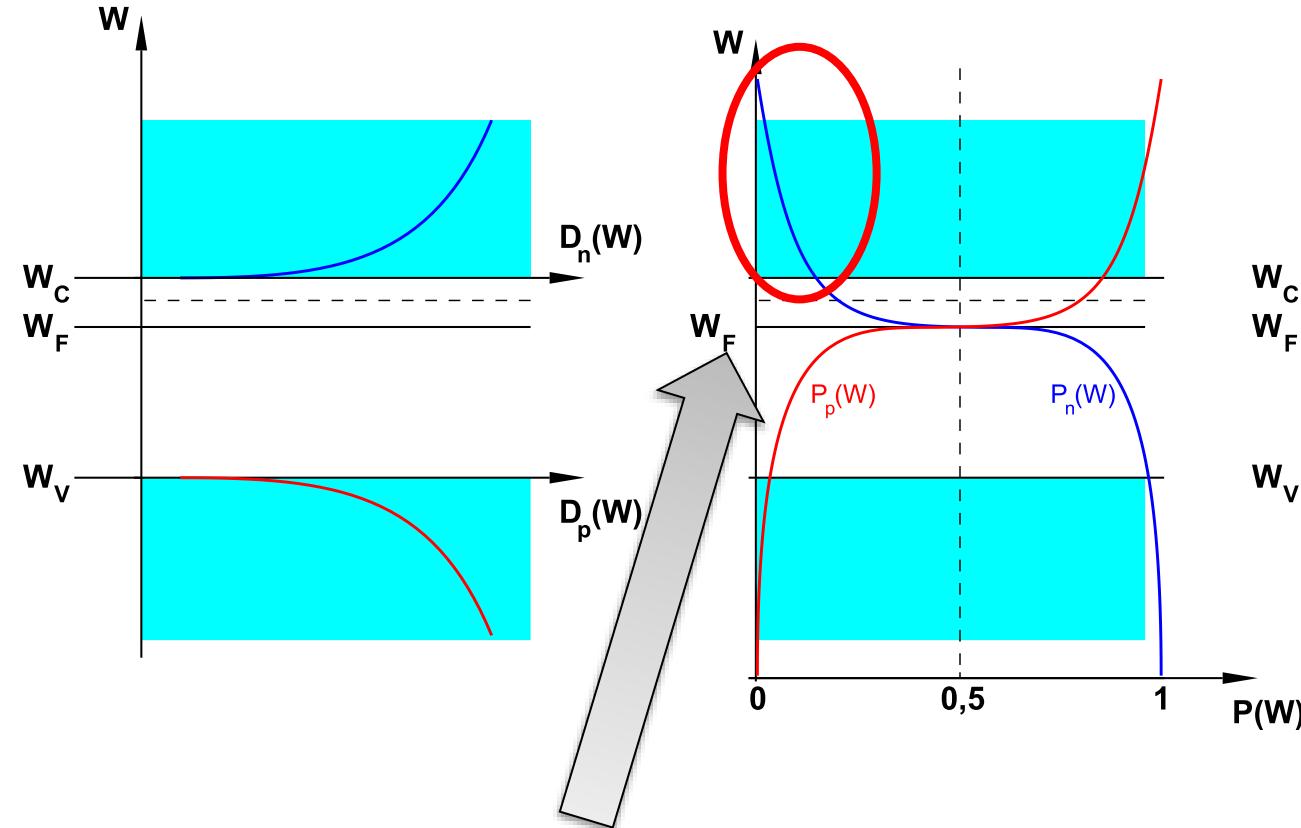


- **Gesamtkonzentration freier Elektronen:**
(Integration über das gesamte Leitungsband)

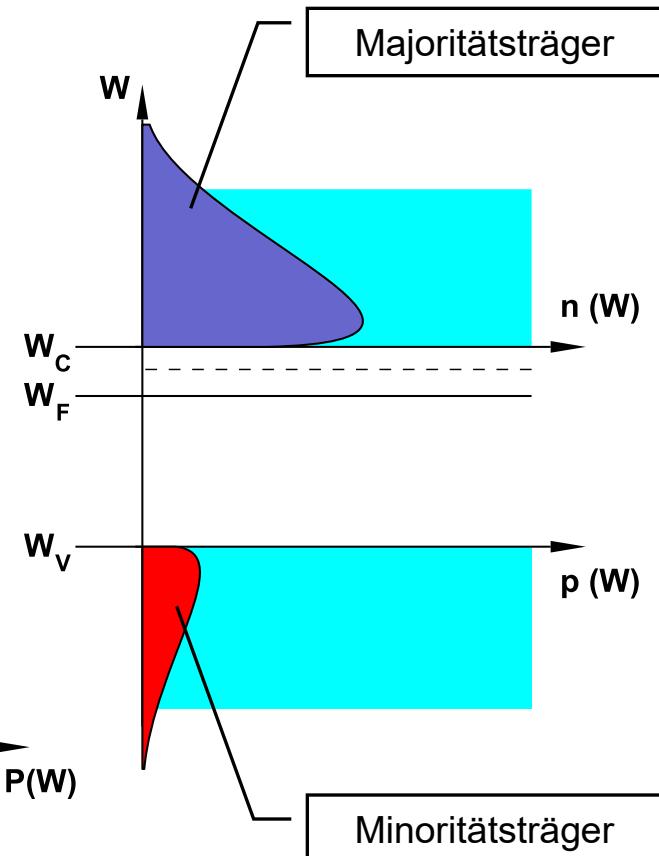
$$n_0 = \int_{W_c}^{W_\infty} n(W) \cdot dW \approx \int_{W_c}^{W_{vac}} P_n(W) \cdot D_n(W) \cdot dW \approx n_i$$

Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher

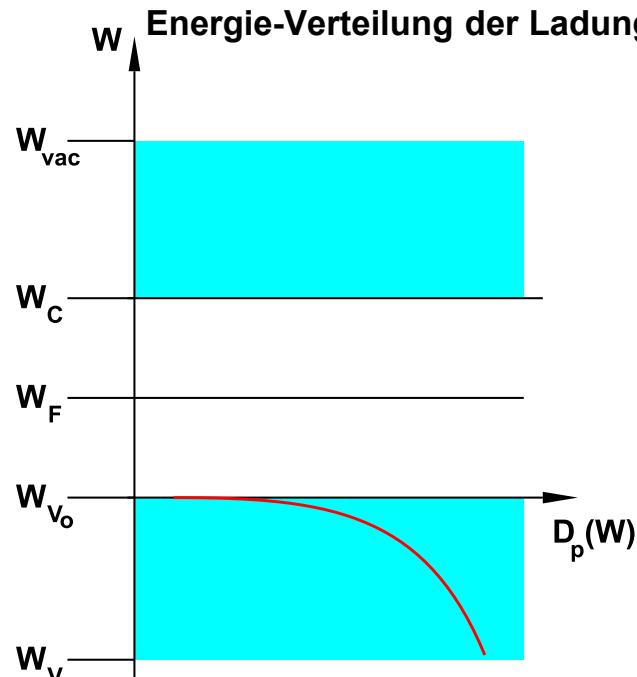
Energie-Verteilung der Ladungsträger im n-Halbleiter:



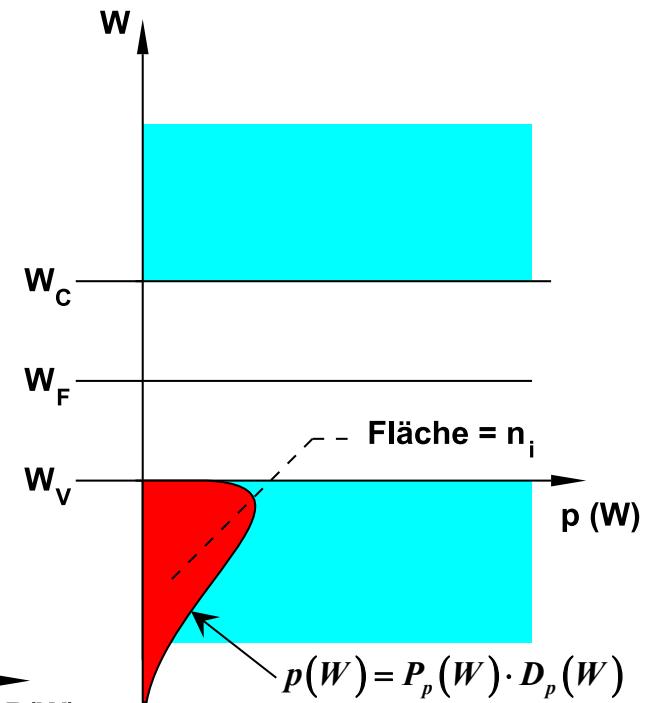
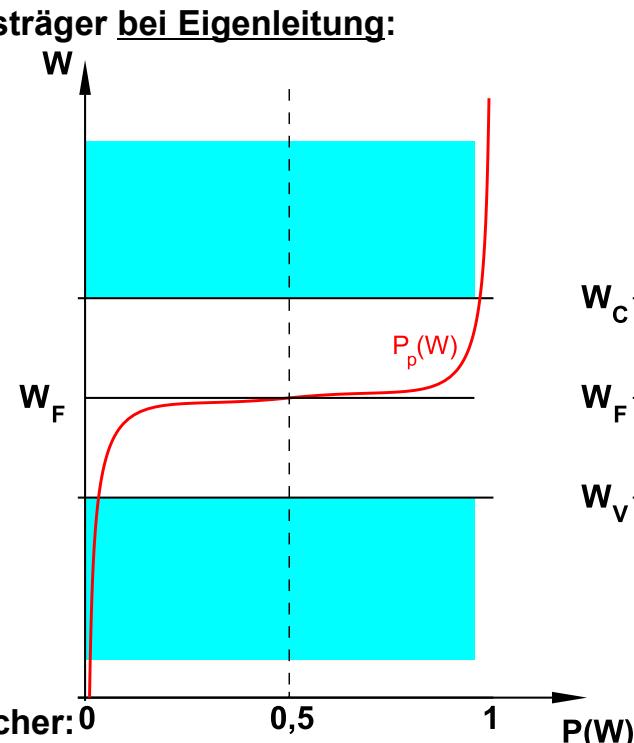
Viel mehr Elektronen im Leitungsband
 → Fermi-Energie MUSS höher liegen als im undotierten Fall



Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher



- **Gesamtkonzentration der Löcher: 0**
(Integration über das gesamte Valenzband)



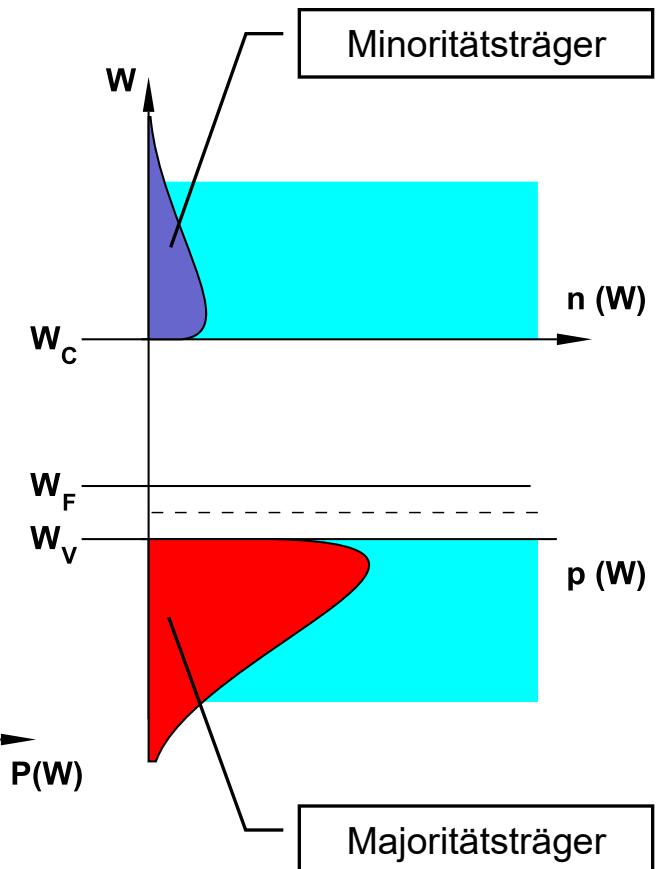
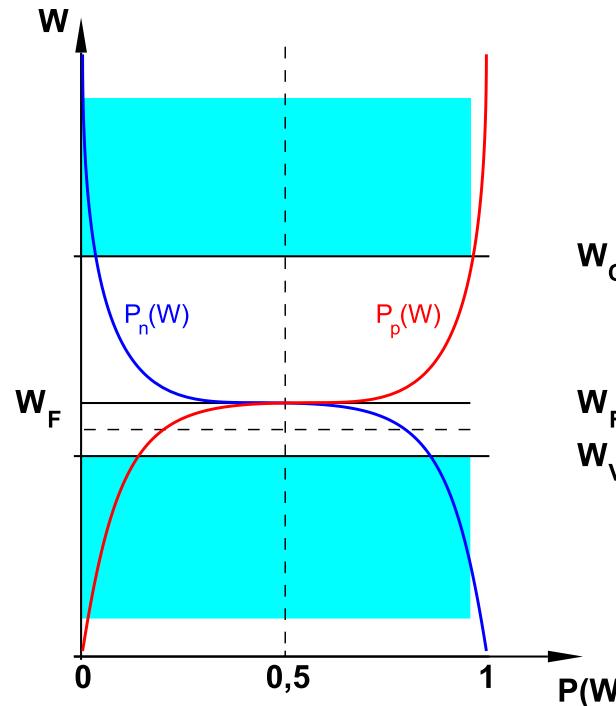
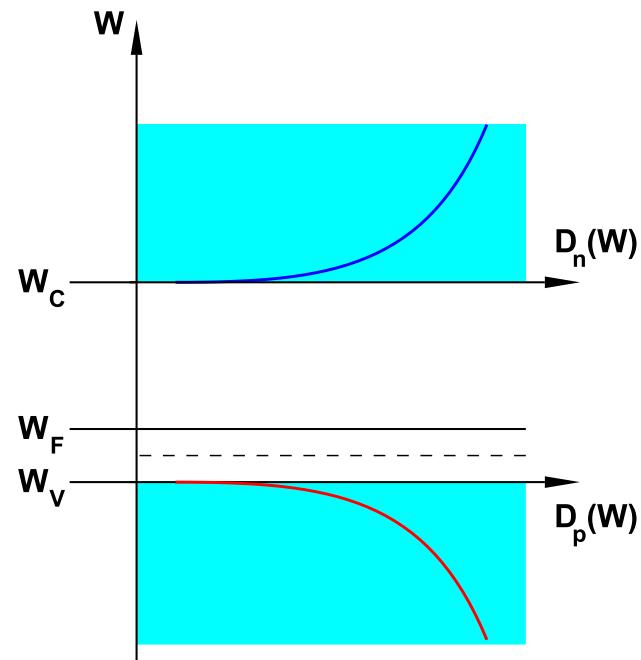
$$p_0 = \int_{W_{vu}}^{W_{vo}} p(W) \cdot dW \approx \int_{W_{vu}}^{W_{vo}} P_p(W) \cdot D_p(W) \cdot dW \approx n_i$$



Leitungsmechanismen in Halbleitern

Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher

- Energie-Verteilung der Ladungsträger im p-Halbleiter:





Leitungsmechanismen in Halbleitern

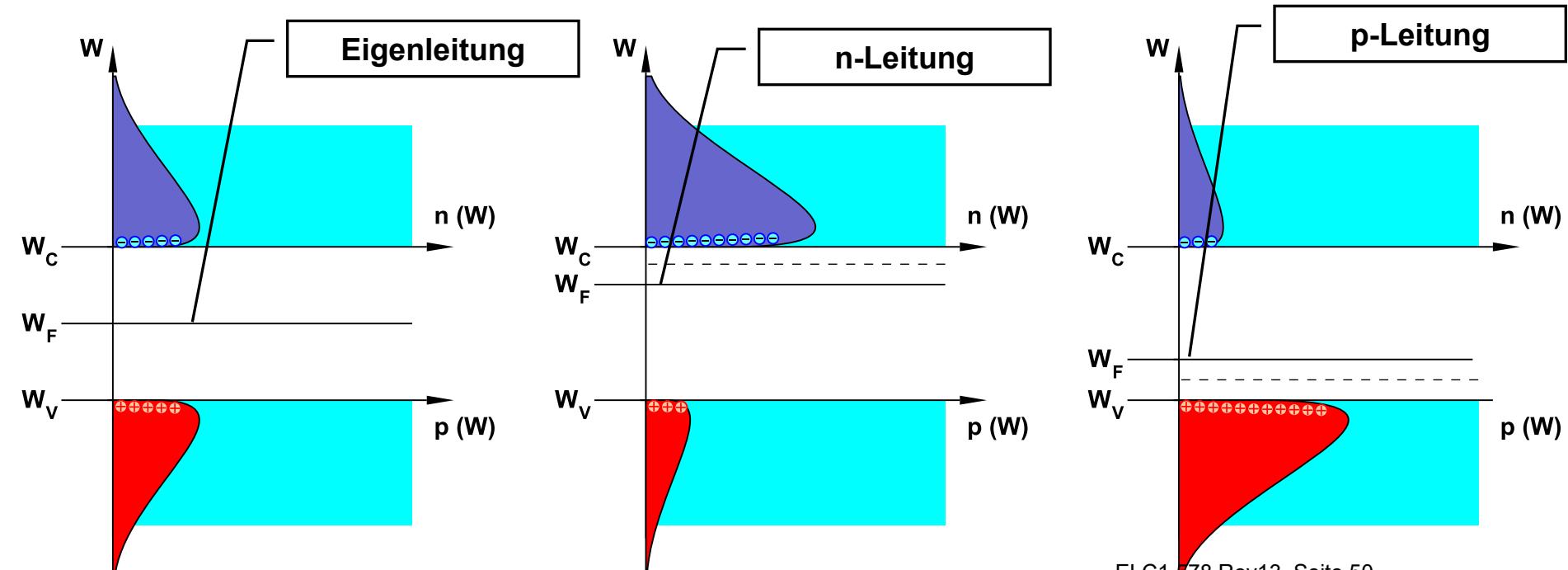
Energie-Verteilung der freien Elektronen und der Löcher

Vergleich – Ladungsträgerverteilung innerhalb der Bänder

- Energieterme in der Nähe der Bandkanten bevorzugt
- Im Inneren der Bänder kaum bewegliche Ladungsträger

Fermi-Energie

- Undotiert: Mitte der Bandlücke
- n-dotiert: Zum Leitungsband hin verschoben
- p-dotiert: Zum Valenzband hin verschoben



Grundlagen der Halbleitertechnik

2.2 Der pn-Übergang

Übersicht – Inhalte

2.2 Der pn-Übergang

- pn-Übergang mit / ohne äußere Spannung
- Diffusionsspannung
- Sperrsichtweite / Sperrsichtkapazität
- Durchbruch im pn-Übergang
- Gesamtkennlinie des pn-Übergangs
- Schaltverhalten des pn-Übergangs

Der pn-Übergang

2 Brocken dotiertes Silizium

p-dotiert



...z.B. Bor

Was ist drin (bei Raumtemperatur)

- **Löcher durch Störstellen, beweglich, viele**
- Negative Akzeptorionen, unbeweglich, viele
- Elektronen aus Eigenleitung, beweglich, wenige

n-dotiert



...z.B. Phosphor

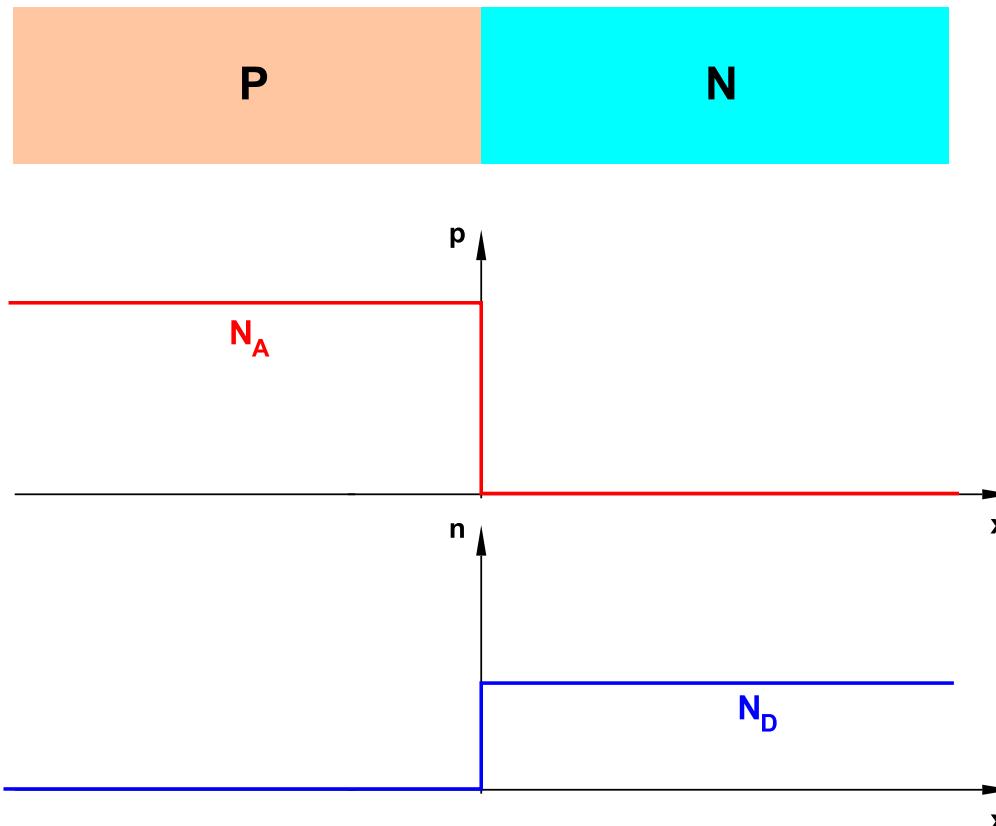
Was ist drin (bei Raumtemperatur)

- **Elektronen durch Störstellen, beweglich, viele**
- Positive Donatorionen, unbeweglich, viele
- Löcher aus Eigenleitung, beweglich, wenige

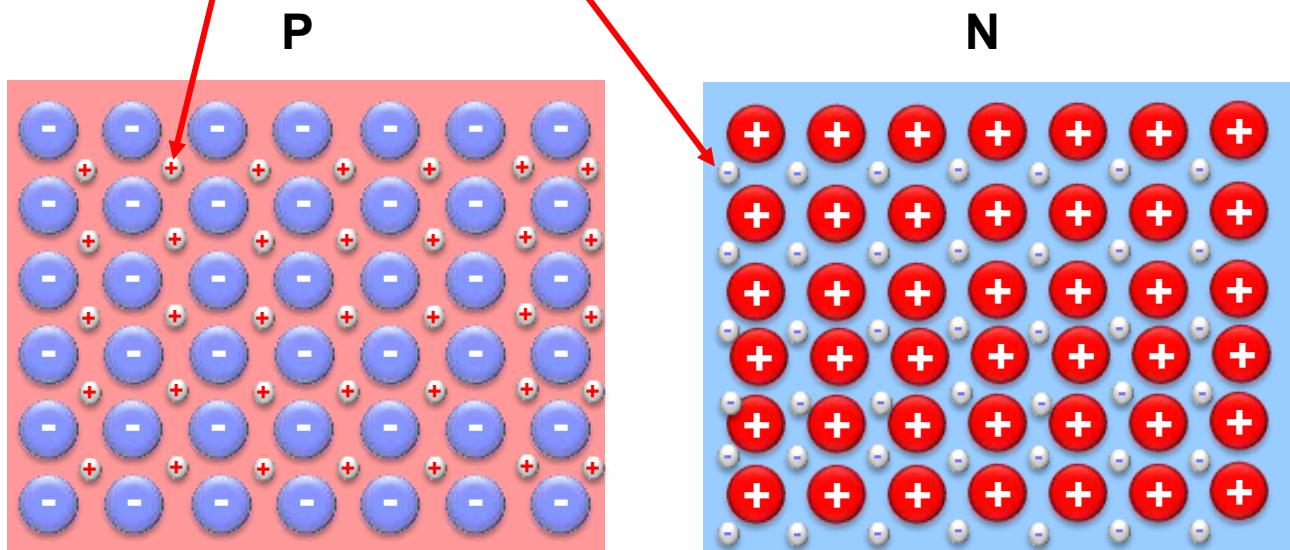
pn-Übergang ohne äußere Spannung

Der ideale abrupte pn-Übergang:

- p-Zone und n-Zone sind jeweils homogen dotiert
- Dotierungskonzentrationen ändern sich an der Grenzfläche sprunghaft.



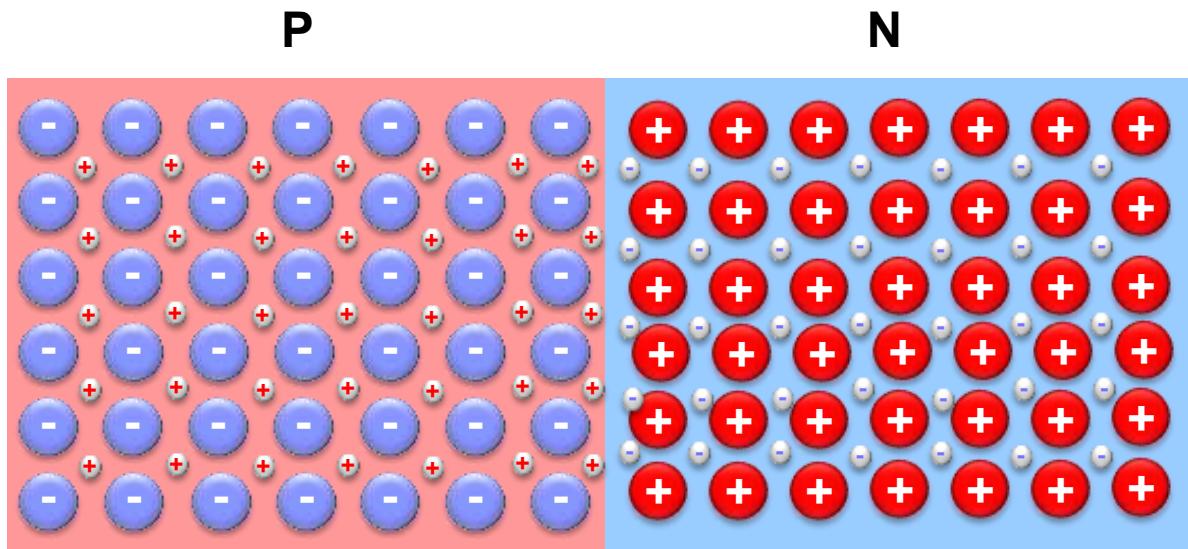
	Ladung	Beweglich	Pro cm ³
Siliziumatome	0	Nein	10^{22}
Eigenleitung - Elektronen - Si+ / Löcher	Negativ Positiv	Ja (Ja)	10^{10} 10^{10}
Störstellen - Löcher / Elektronen - Störstellenionen	Positiv / Negativ Negativ / Positiv	Ja Nein	10^{14} 10^{14}



Ohne äußere Spannung

Diffusion der Majoritätsträger wegen Konzentrationsgefälle an Grenzschicht

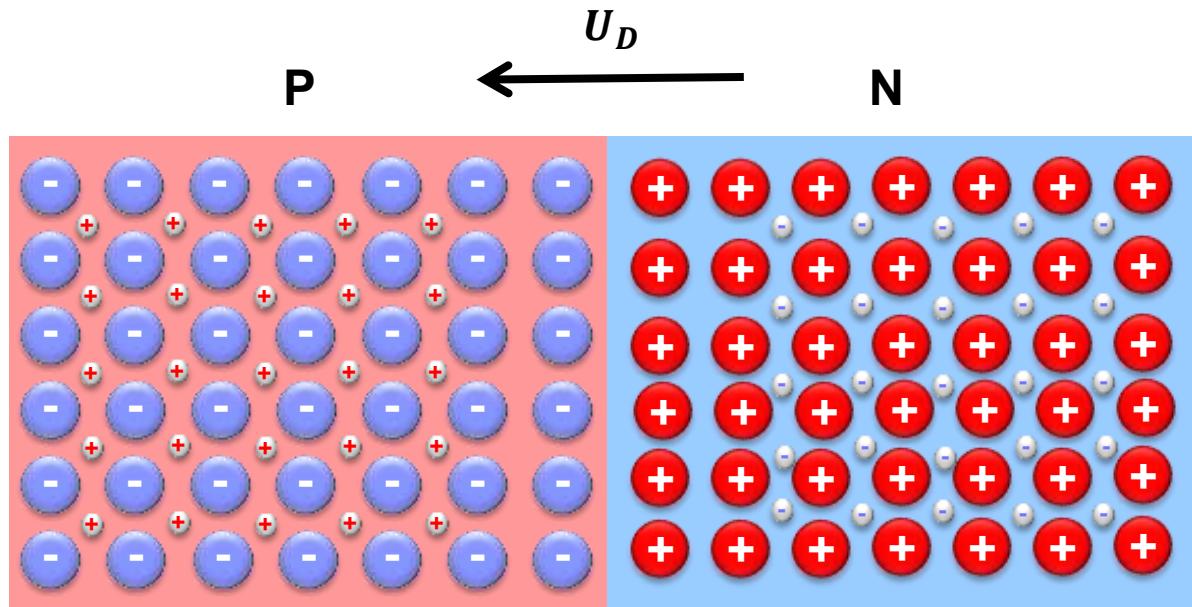
Rekombination mit Majoritätsträgern auf Gegenseite



Stationärer Zustand ohne äußere Spannung

Raumladungszone durch Störstellenrumpfatome

Elektrisches Feld behindert weitere Diffusion von Majoritätsträgern



Energiebänder-Modell – (spannungsloser pn-Übergang)

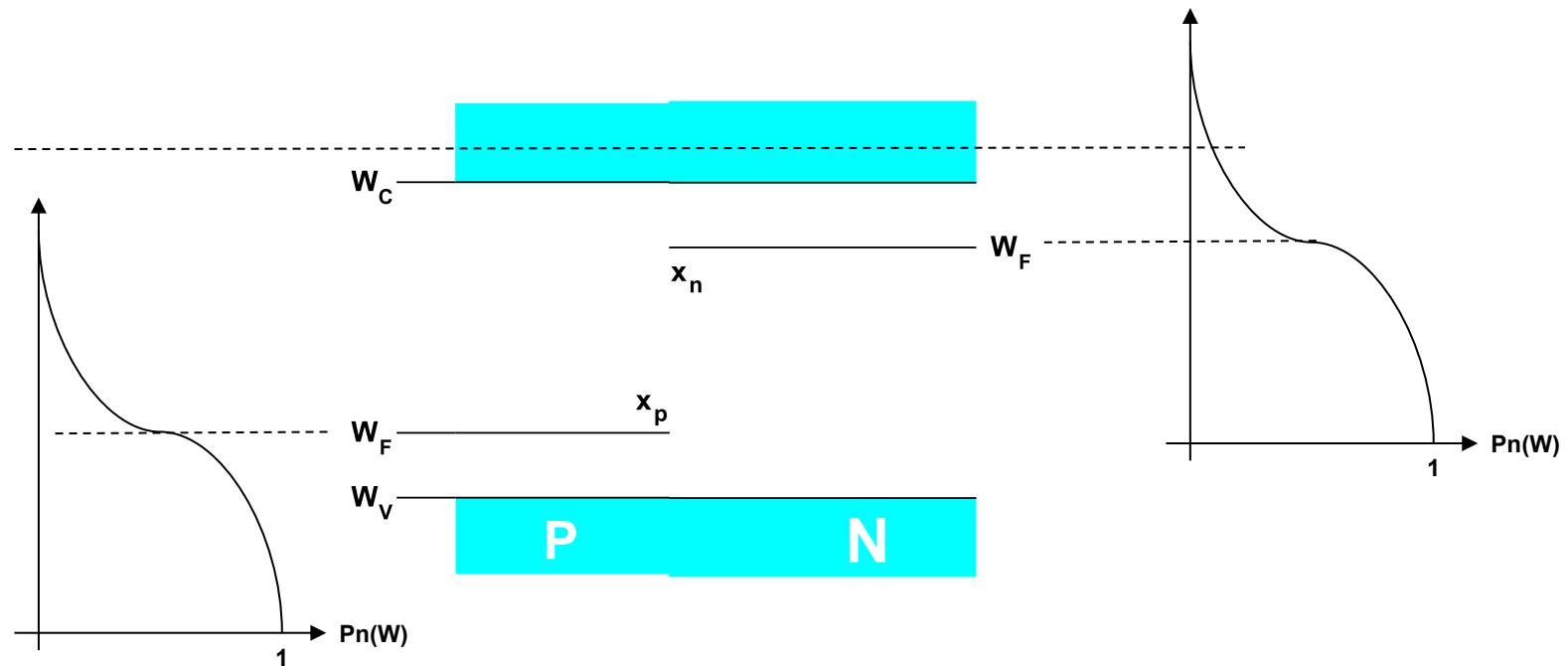
p und n Halbleiter getrennt → verbunden



Energiebänder-Modell – (spannungsloser pn-Übergang)

An der Stoßstelle zwischen p und n springt Ferminiveau

- Aufenthaltswahrscheinlichkeit „springt“
- Kein Gleichgewicht. Es kommt zum Ausgleich (...Diffusion)
- ..solange bis thermodyn. Gleichgewicht erreicht – Ferminiveau dann durchgängig

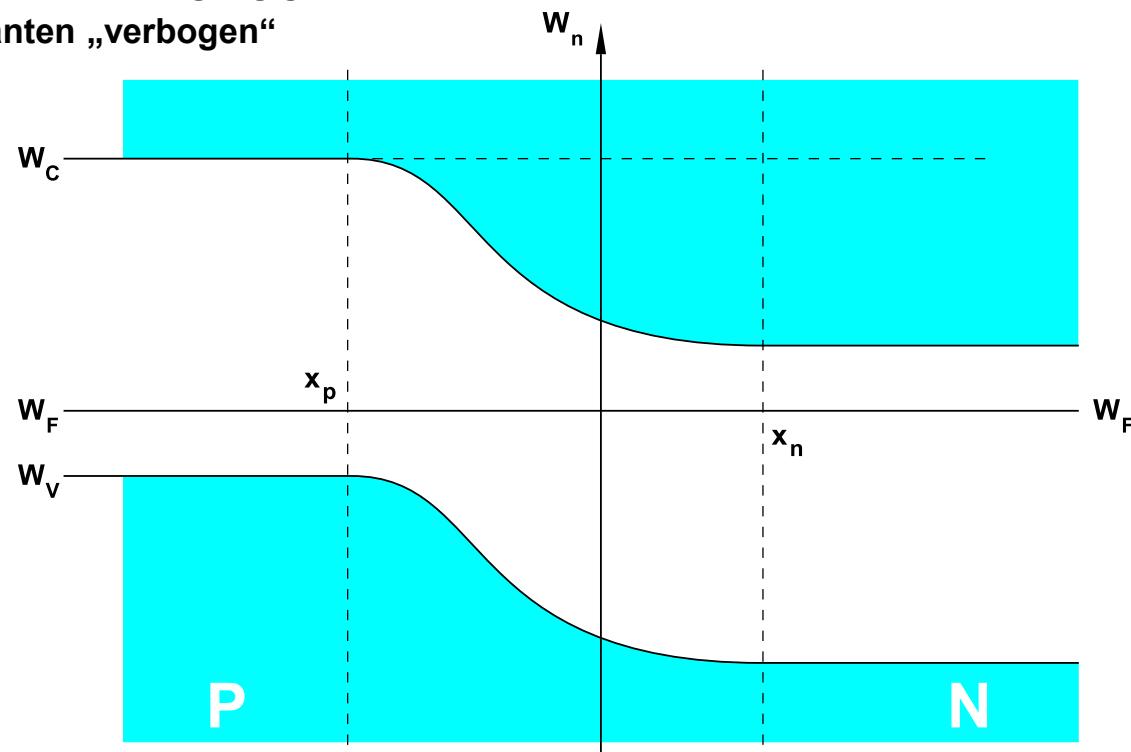


Energiebänder-Modell – (spannungsloser pn-Übergang)

Neuer Gleichgewichtszustand

Ferminiveau durchgängig

Bandkanten „verbogen“



Diode in Flusspolung „forward bias“

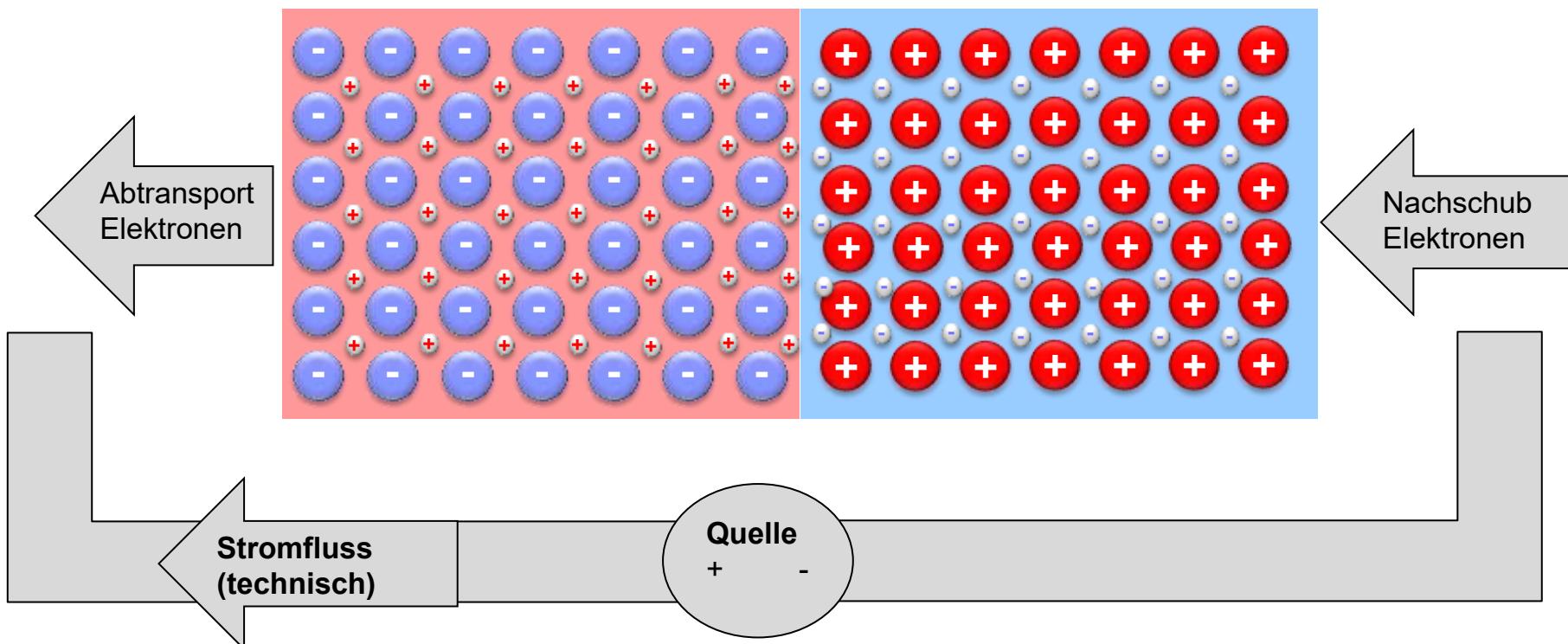
Voraussetzung: E-Feld der Raumladungszone komplett durch äußere Spannung kompensiert → Raumladungszone verschwunden

Massive Diffusion der Majoritätsträger wegen des Konzentrationsgefälle an Grenzschicht

Rekombination mit Majoritätsträgern auf Gegenseite. Ausgleich der Ladungsträger durch Quelle → Stromfluss

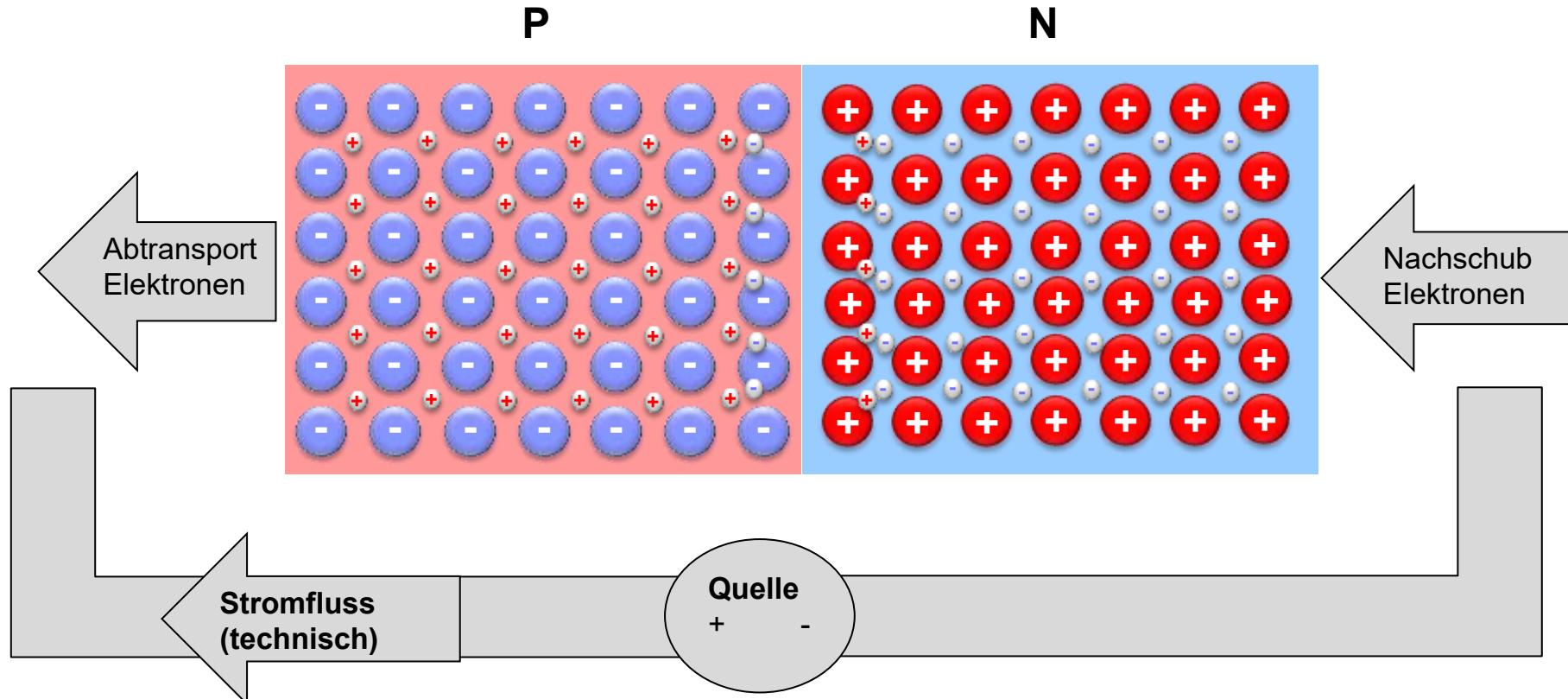
P

N



Diode in Flusspolung „forward bias“ - Diffusionladung

Diffundierte Majoritätsträger sind jetzt Minoritätsträger und Rekombinieren – ABER NICHT SOFORT
...sondern „leben noch“ die „Transitzeit“ bis sie Rekombinieren
Solange ist die Anzahl der Minoritätsträger erhöht = DIFFUSIONSLADUNG



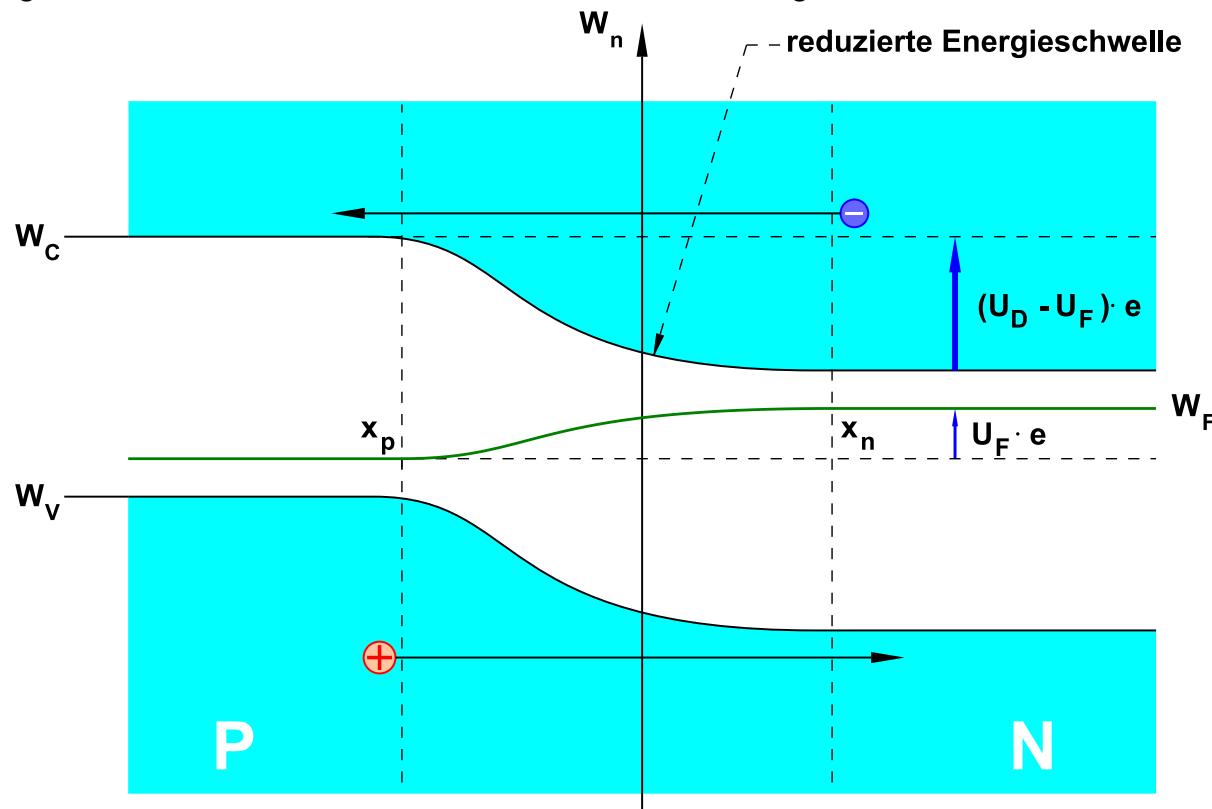
pn-Übergang mit äußerer Spannung

Energiebänderschema des pn-Übergangs bei Flusspolung:

Reduzierte Energiebarriere zwischen p- und n-Zone: $\Delta W = U_F \cdot e$

Fermi-Niveau ebenfalls um ΔW zunehmend verschoben

Majoritätsträger diffundieren zunehmend durch die Raumladungszone.

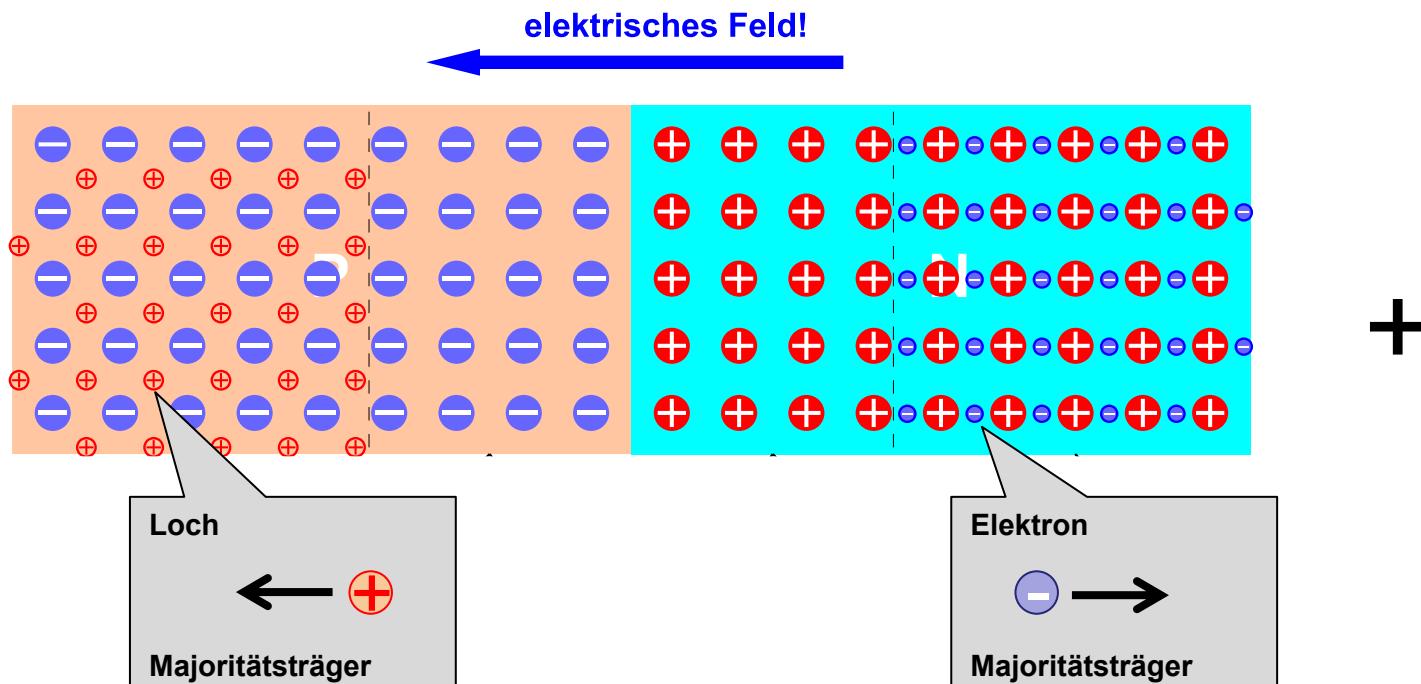


pn-Übergang Sperrpolung

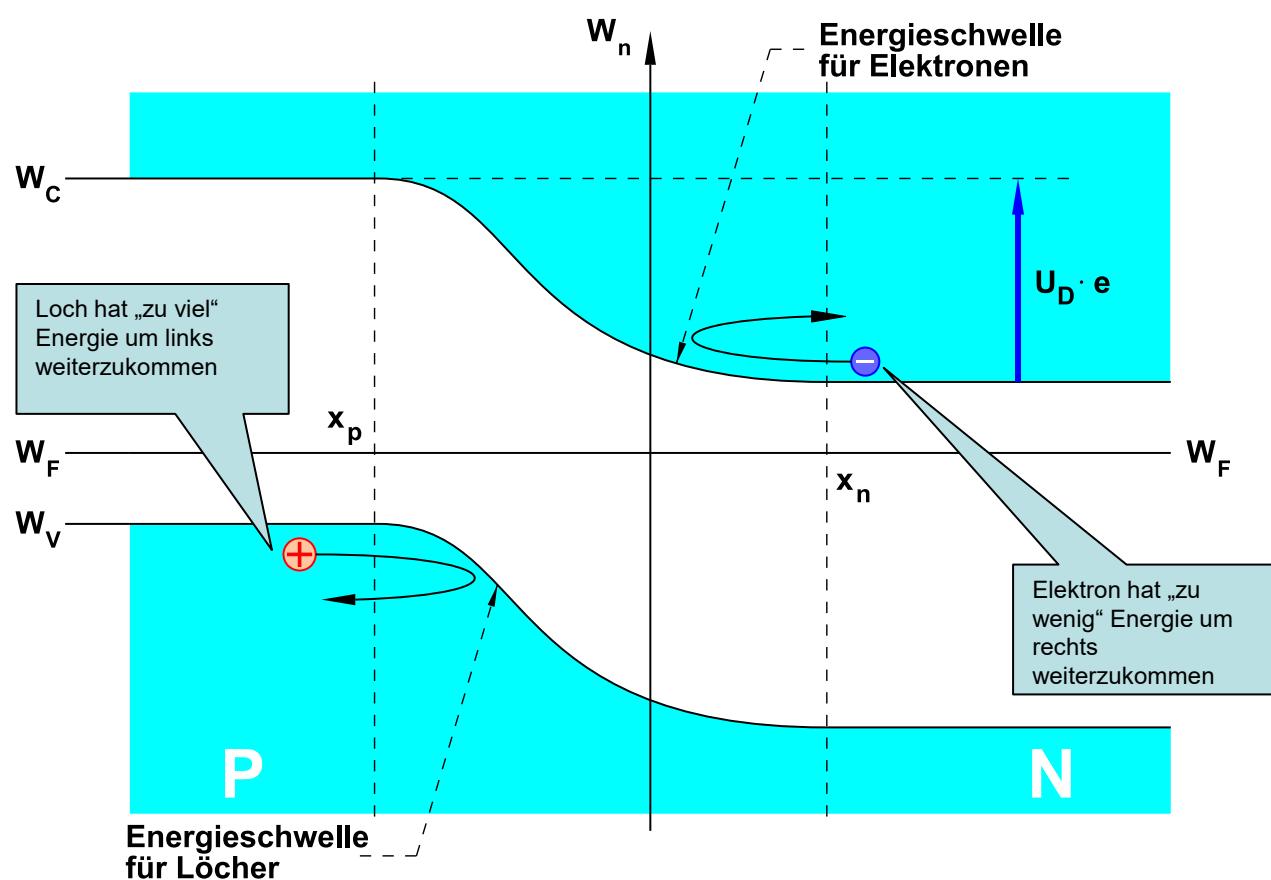
Äußere Spannung erhöht Spannung am pn-Übergang

Majoritätsträger werden nach außen gezogen

Sperrsicht vergrößert sich



Energiebänder-Modell



kein Übergang von n- nach p-Gebiet für freie Elektronen im Leitungsband

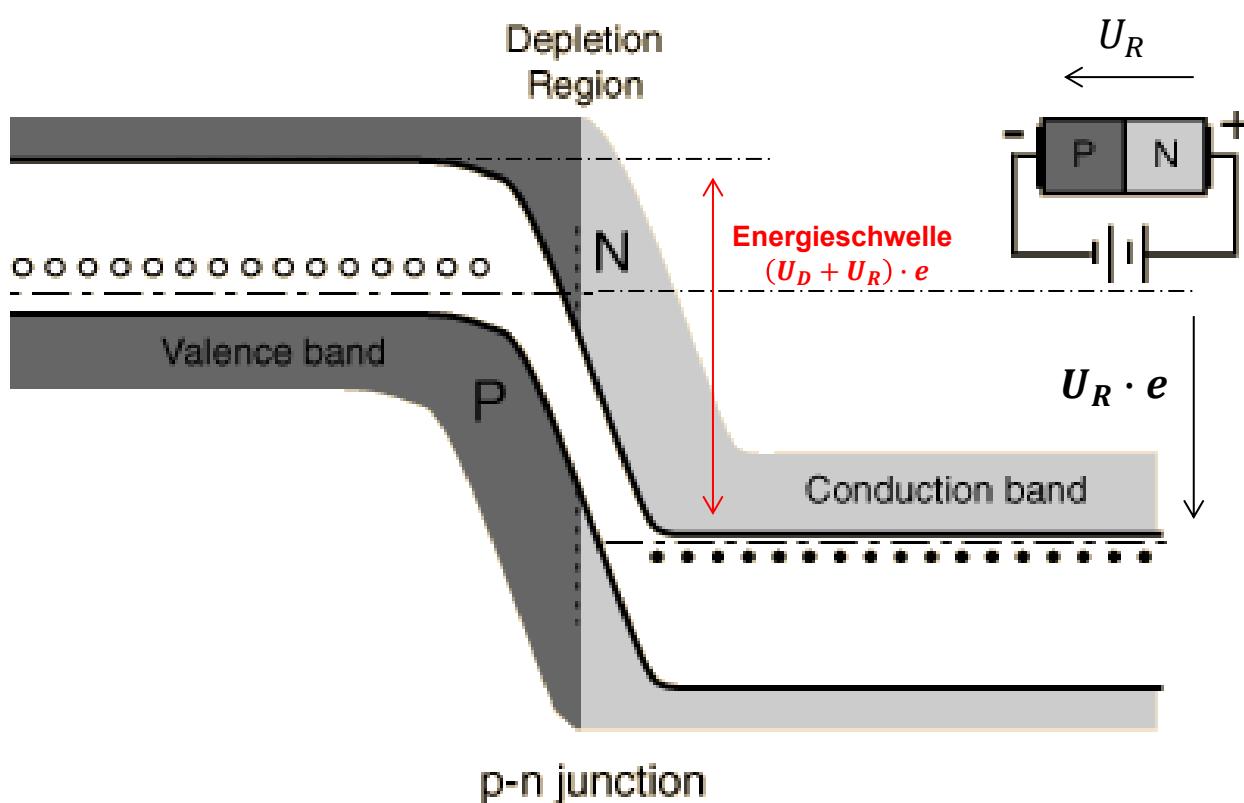
Energieschwellen $\Delta W = U_D \cdot e$ zu überwinden

analog für die Löcher im Valenzband des p-Gebiets

U_D heißt Diffusionsspannung

$$U_d = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$$

Bändermodell Sperrpolung



Fermi-Niveau verbiegt sich nach „unten“

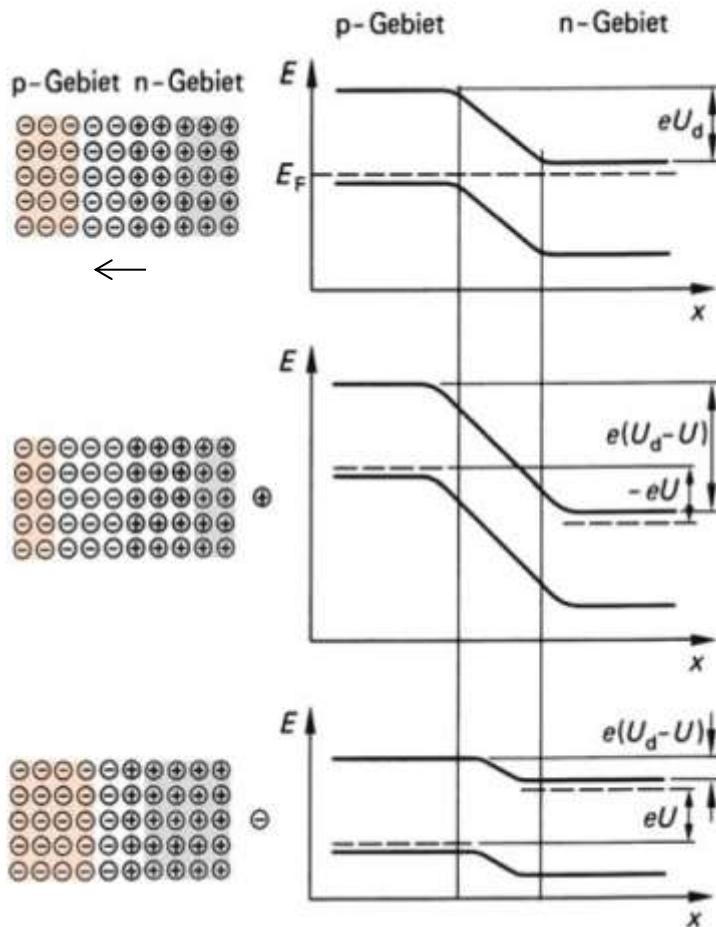
Energieschwelle steigt an

Majoritätsträger

- können Schwelle praktisch nicht überwinden

(Minoritätsträger aber schon!)

Spannungslos – Sperren - Leiten



Spannungslos

- Elektronen / Löcher diffundieren
- Rumpfatome bilden Raumladungszone
- E-Feld wirkt Diffusion entgegen → Gleichgewicht

Sperrrichtung (p an Minus, n an Plus)

- Elektrisches Feld in RLZ wird noch größer
- Raumladungszone wird breiter
- Energiebarriere wird größer
- Praktisch kein Stromfluss (nur Min.träger)

Durchlassrichtung (n an Minus, p an Plus)

- Energiebarriere wird kleiner
- Raumladungszone wird schmäler
- Stromfluss durch Majoritätsträger

Durchbruch bei hoher Feldstärke in Sperrpolung

Lawineneffekt:

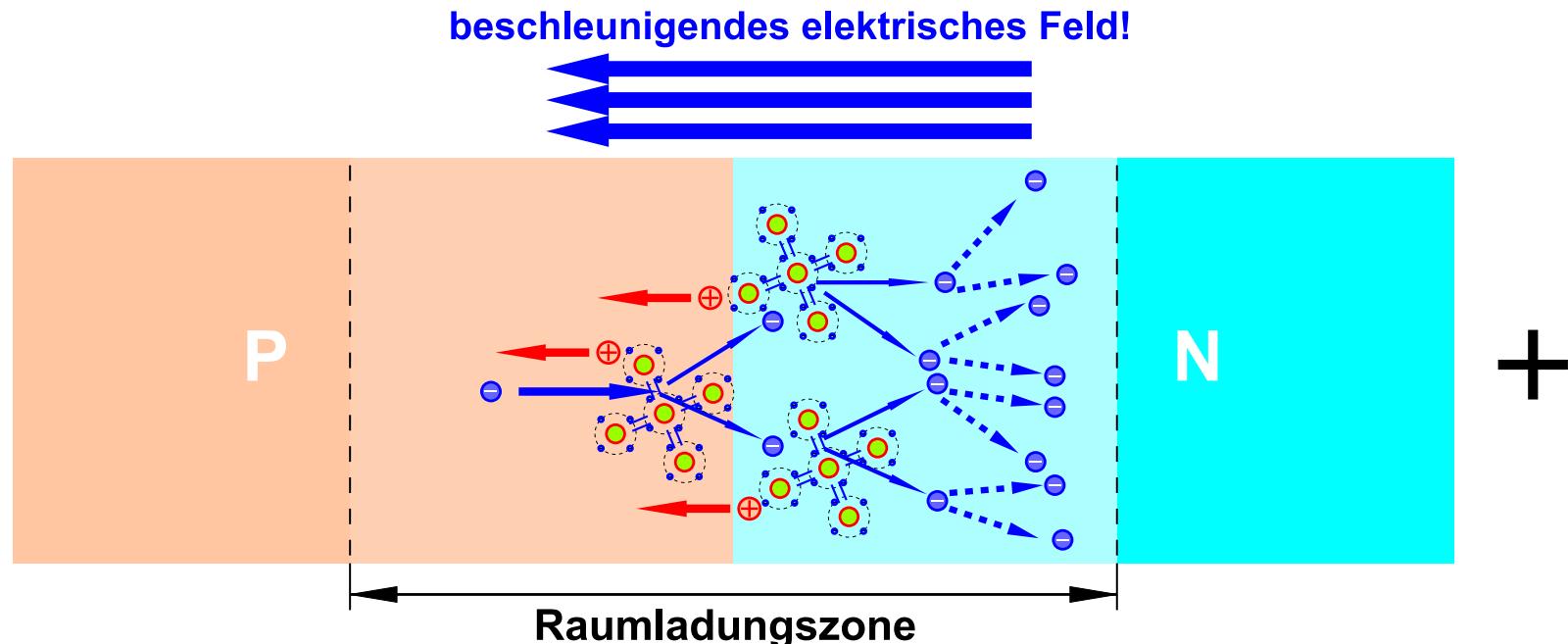
freies Elektron wird stark beschleunigt

Stoßionisation: weiteres freies Elektronen und ein Loch entstehen

weitere Energieaufnahme/Beschleunigung der Elektronen

- ausreichende Wegstrecke vorausgesetzt: „Anlauf“ → freie Weglänge im Kristallgitter. Gitterschwingung behindert das. → Einsatzspannung nimmt mit steigender Temperatur zu

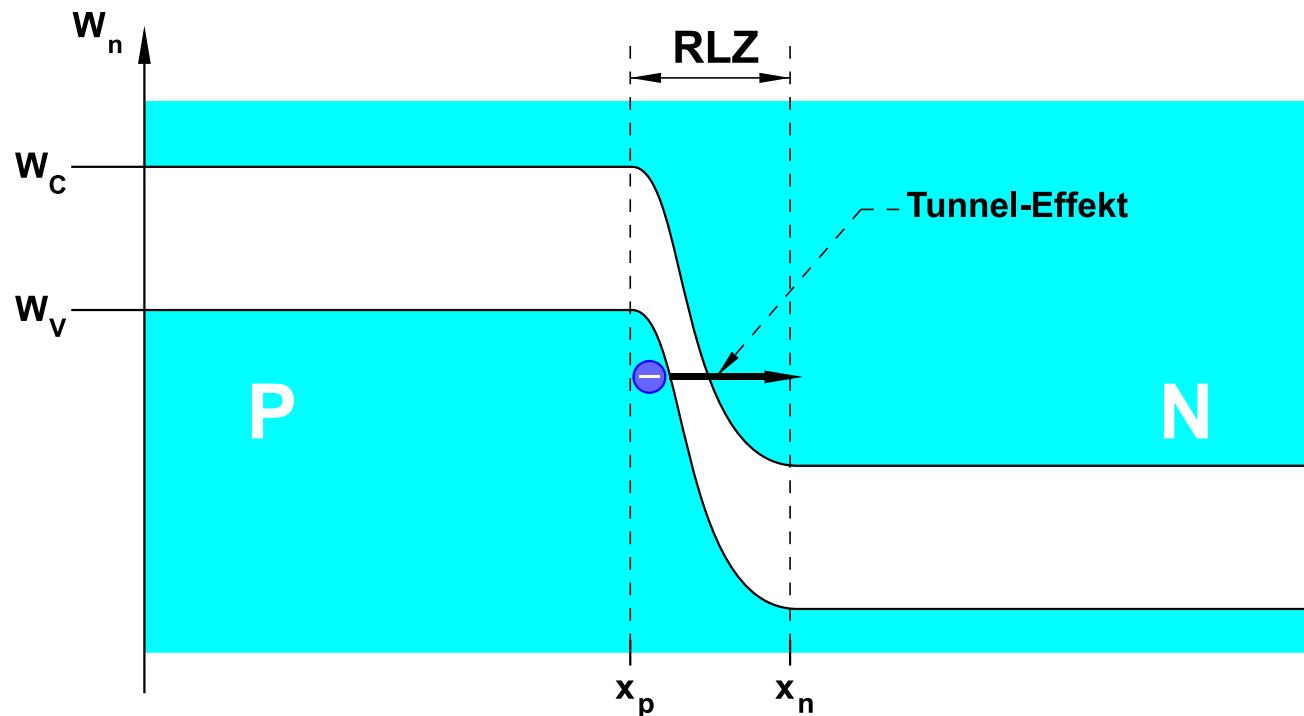
mehrmalige Wiederholung: Stoßkaskade



Durchbruch bei hoher Feldstärke in Sperrpolung

Zener-Effekt – Energiebänder-Schema :

- Durchbruchsspannung U_Z
 - $U_Z < 6 \dots 8 \text{ V}$
 - negativer Temperaturkoeffizient $\alpha_{UZ} < 0$, $\alpha_{UZ} \approx -0,1\%/\text{K}$

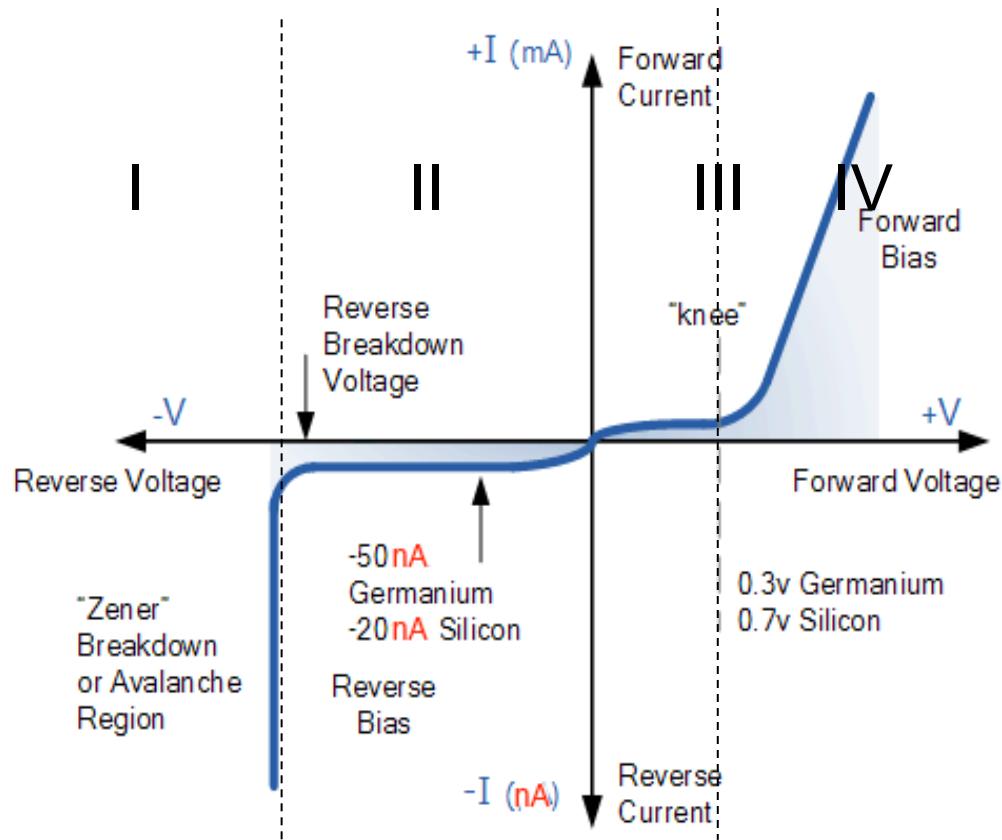


Durchbruch bei hoher Feldstärke in Sperrpolung

Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch):

- thermische Mitkopplungseffekt
- Ohne äußere Strombegrenzung
 - als Folge: thermische Zerstörung des Bauelementes.
- Vorgang ist nicht reversibel!
- Ursachen:
 - inhomogen aufgebauter pn-Übergang &
 - lokale Überhitzung

Kennlinie



Charakteristisch

Bereich III

- Kleiner Strom (Minoritätsträgerdrift) steigt flach an (w.eil RLZ schmaler wird)

Bereich IV

- Strom durch Majoritätsträger steigt exponentiell an

Bereich II

- Sperrsättigungsstrom I_S (Minoritätsträgerdrift)

Bereich I

- Durchbruch (Lawine, Zener)

Sperren

Raumladungszone

- ausgeprägt
- Si Gitteratome. Ungeladen. Unbeweglich
- Ionisierte Dotieratome. Geladen. Unbeweglich → Elektrisches Feld
- praktisch keine beweglichen Ladungsträger → „Verarmungszone“
 - Ausnahme: Durch Paarbildung entstandene Ladungsträger driften im E-Feld → Sperrstrom
 - Hohe Dichte von Majoritätsträgern am Rand der RLZ → Ladung-Isolator-Ladung = Sperrsichtkapazität

Bahngebiet

- Si Gitteratome. Ungeladen. Unbeweglich
- Ionisierte Dotieratome. Geladen. Unbeweglich
- Majoritätsträger. Geladen. Beweglich



Sperrstrom „reverse current“
steigt exponentiell mit der Temperatur

warum eigentlich?

Leiten

Raumladungszone

- verschwunden
- Majoritätsträger diffundieren auf Gegenseite (dort Minoritätsträger)

Bahngebiet

- Si Gitteratome. Ungeladen. Unbeweglich
- Ionisierte Dotieratome. Geladen. Unbeweglich
- Majoritätsträger. Geladen. Beweglich
- Eindiffundierte, „Injizierte“ Minoritätsträger von der Gegenseite → Diffusionsladung
 - rekombinieren früher oder später mit Majoritätsträgern
 - Majoritätsträger werden von der Quelle „aufgefüllt“ → Majoritätsträgerstrom



Spannungsabfall in Durchlassrichtung
„forward voltage drop“ linear
Temperaturabhängig !
Fällt mit ca. 2mV/K

Durchbruch

Erster Art

Lawinendurchbruch

- Ladungsträger werden in RLZ durch E-Feld so stark beschleunigt, dass sie aus weiteren Atomen Valenzelektronen durch Stoßionisation noch mehr Ladungsträger erzeugen → Lawine
- Gitterschwingung verkleinert freie Weglänge = „Beschleunigungs weg“ der Ladungsträger → je wärmer, desto schwieriger wird Lawinendurchbruch
- Einsatzspannung des Lawinendurchbruchs hat POSITIVEN TEMPERATURKoeffizienten

Zenerdurchbruch

- Durch tunnelnde Valenzelektronen
- Einsatzspannung des Zenerdurchbruchs hat NEGATIVEN TEMPERATURKoeffizienten

!!!! Durchbruch erster Art ist REVERSIBEL d.h. NICHTS geht kaputt !!!!

Zweiter Art

Thermischer Durchbruch

- T hoch → Sperrstrom hoch → Verlustleistung hoch → T hoch

Dioden und das Rechnen...

Einfache Schaltung, große Probleme

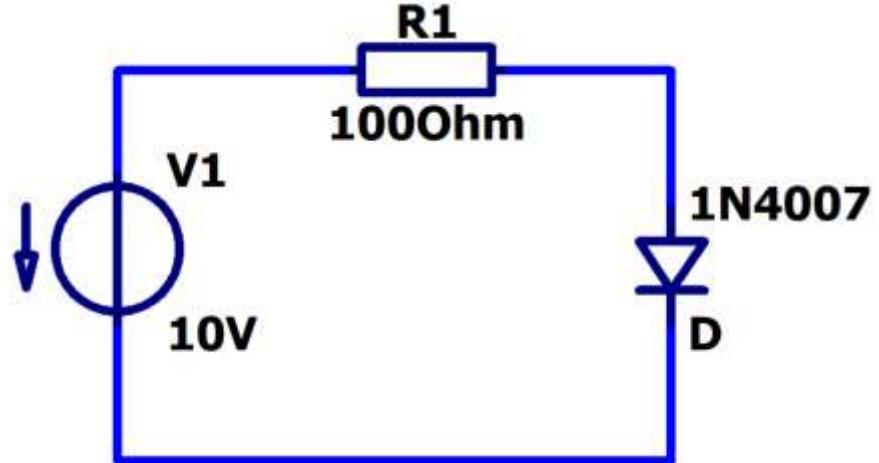
„Ermitteln“ Sie den exakten Strom im Stromkreis

...Optionen zur „Ermittlung“:

- Messen → geht in einem Schaltplan nicht
- Spannungsabfall an der Diode 0,7V und dann $I = \frac{12V - 0,7V}{100\Omega}$ ist nicht falsch, aber nicht exakt. Bei realer Diode steigt U_d mit steigendem Strom
- Grafisch. OK. Wenn man die exakte Strom-Spannungskennlinie einer 1N4007 hat.
- Rechnen

Berechnung

- Ansatz Maschenregel
- $U_1 = U_{R1} + U_D = I \cdot R1 + U_D$
- U_d aus Shockley-Gleichung $I = I_S \left(e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1 \right) \Leftrightarrow U_D = n \cdot U_T \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)$
- Nur noch nach I auflösen: $U_1 = I \cdot R1 + n \cdot U_T \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)$
- Bzw. die Nullstelle von $I \cdot R1 + n \cdot U_T \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right) - U_1$ finden



$$0 = I \cdot R_1 + n \cdot U_T \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) - U_1$$

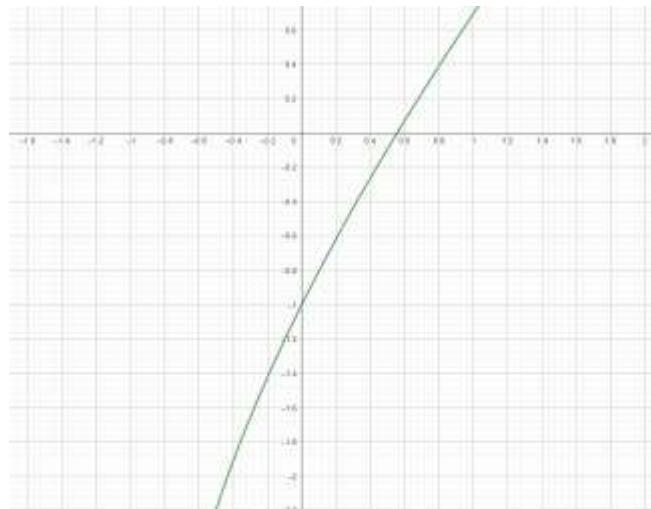
„intrinsische Gleichung“

- Kann man algebraisch umformen wie man will
- Ist nicht algebraisch Lösbar

Was nun?

- grafisch Nullstelle suchen
- Nullstelle durch Iteration bestimmen
 - z.B. Newton-Verfahren

...für Menschen eher nichts (zeitaufwendig), aber
prima für Computer



Fazit

Diese einfache Schaltung mit einer Diode, kann NICHT exakt berechnet werden.
Allenfalls Lösung durch Iteration = cleveres, schrittweises Annähern an die Lösung

- Geht nur sinnvoll mit Computern
- Spezialsoftware
- Simulationwerkzeuge

ItSpice

Do it yourself...

Simulieren Sie die Kennlinie einer Diode mit ItSpice

Vorgehen:

- Schaltplan Spannungsquelle und Diode
- Simulationsart: SWEEP
- Parameter: linear, -1V ... 1V

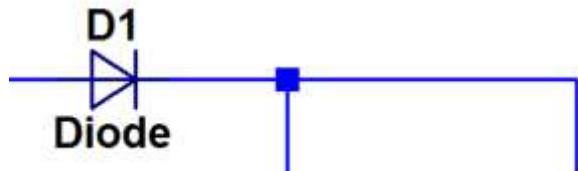
Erweitern Sie die Simulation, so dass Sie den Durchbruch 1. Art sehen

...sie sehen nichts!

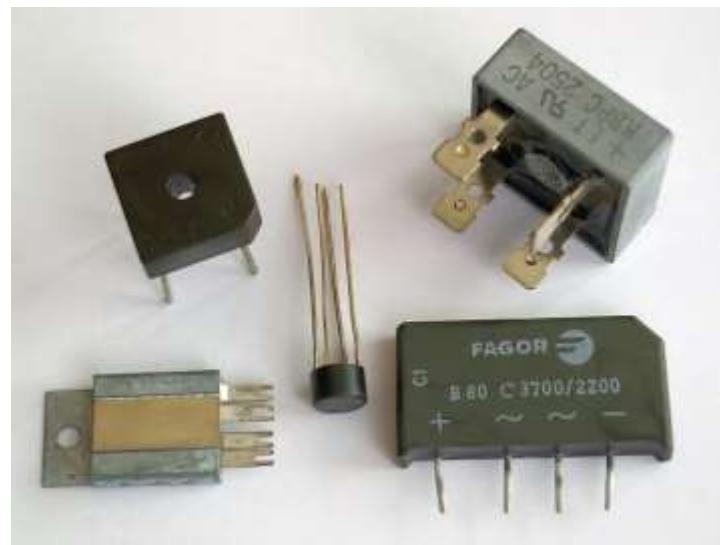
Weil ItSpice den zunächst nicht simuliert.

Zur Simulation des Durchbruchs müssen Sie folgendes machen:

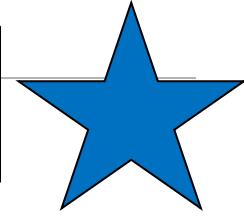
```
.model Diode D(vrev=150)
```



Gleichrichter



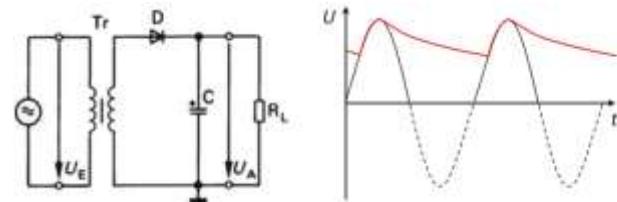
Das kennen Sie
schon aus
Elektronik 1



Wechselstromgleichrichter Schaltungen

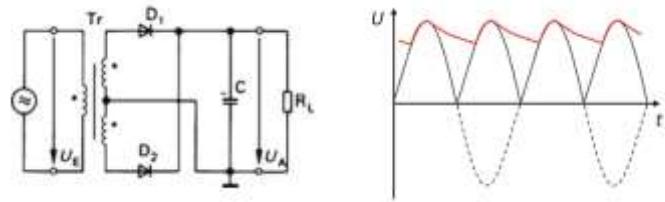
Einweggleichrichter – 1-Puls-Schaltung M1U

- 1 Diode
- 50 Hz AC \rightarrow 50 Hz „DC“ mit Lücken
- Trafo wird einseitig belastet
- Hoher Spitzenstrom
- Hohe Brummspannung



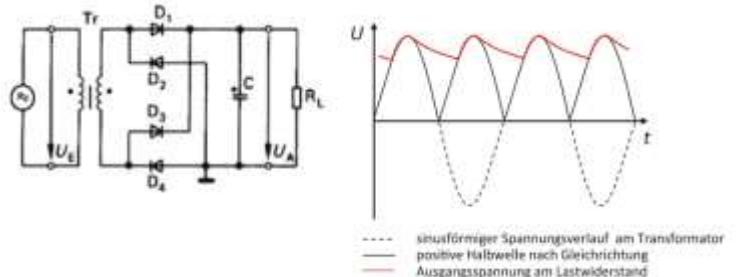
Zweiweggleichrichter – 2-Puls-Mittelpunktschaltung M2U

- 2 Dioden
- Trafo mit Mittelanzapfung
- 50 Hz AC \rightarrow 100 Hz „DC“



Zweiweggleichrichter – 2-Puls-Brückenschaltung B2U

- „Graetzschaltung“
- 4 Dioden
- 50 Hz AC \rightarrow 100 Hz „DC“



Quelle Abbildungen: [1]

Drehstrom

Das kennen Sie schon



Drehstrom

- 3 sinusförmige „Strang“-Spannungen, Amplitude \hat{U}
- 120 Grad Phasenversatz

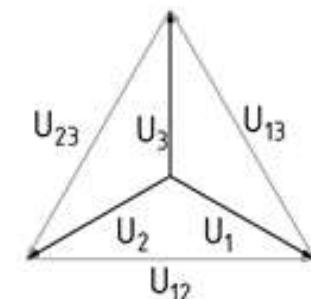
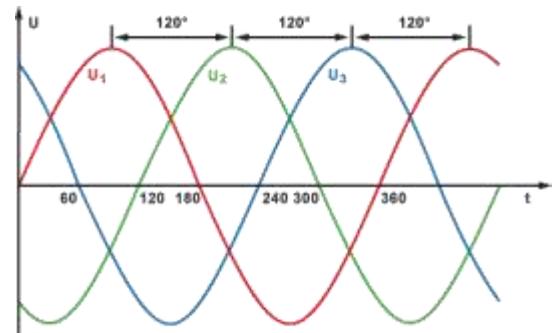
Sternschaltung

- Alle 3 Spannungen haben gemeinsamen Nullpunkt (=Neutralleiter)

Dreiecksschaltung

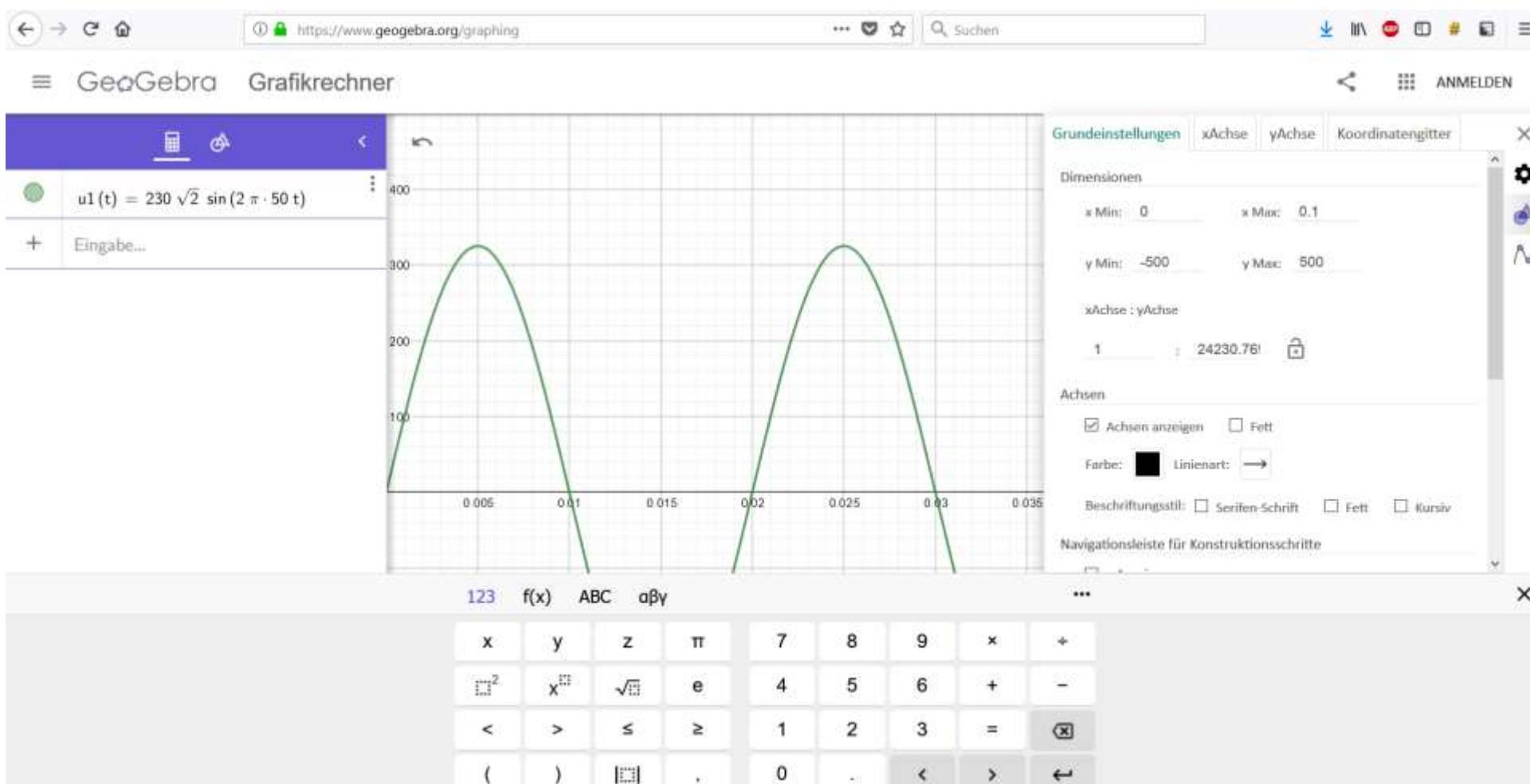
- Spannungen werden im Dreieck „verkettet“
- Verkettete Spannung / Außenleiterspannung / Dreiecksspannung
 - Differenz zweier Strangspannungen
 - Amplitude: $\hat{U}\sqrt{3}$

Verkettete Spannung ist das $\sqrt{3}$ -fache der Strangspannung



U_1, U_2, U_3 : Strangspannungen
 U_{12}, U_{13}, U_{23} : verkettete Spannungen

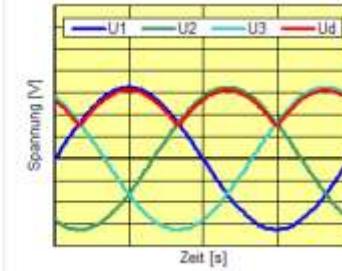
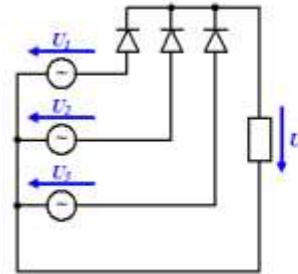
Do It Yourself



Drehstromgleichrichter

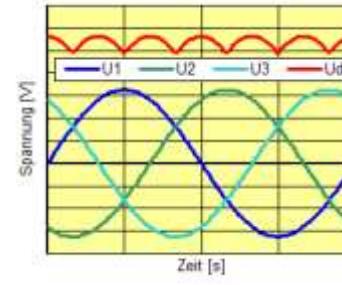
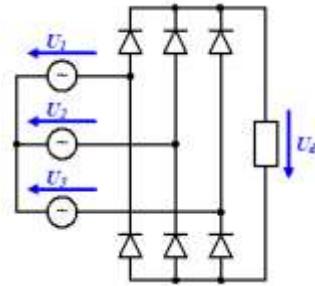
3-Puls-Schaltung M3U

- 3 Dioden
- 50 Hz AC → 150 Hz „DC“



6-Puls-Schaltung B6U

- 6 Dioden
- 50 Hz AC → 300 Hz „DC“



12-Puls-Schaltung B6U 2P

- 12 Dioden
- 2 x 6-Puls-Gleichrichter + Trafo, einer Stern, einer Dreieck
- Achtung: Trafos müssen unterschiedliche Windungsverhältnisse haben
- ... 600 Hz

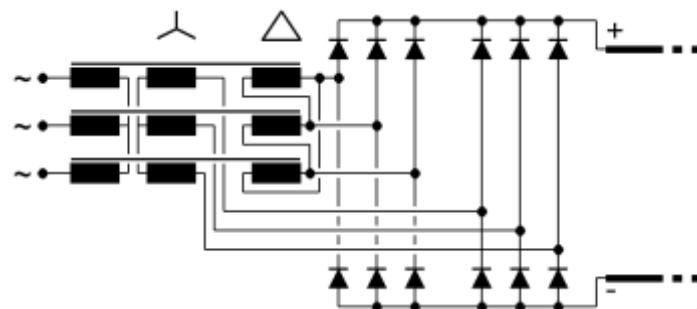


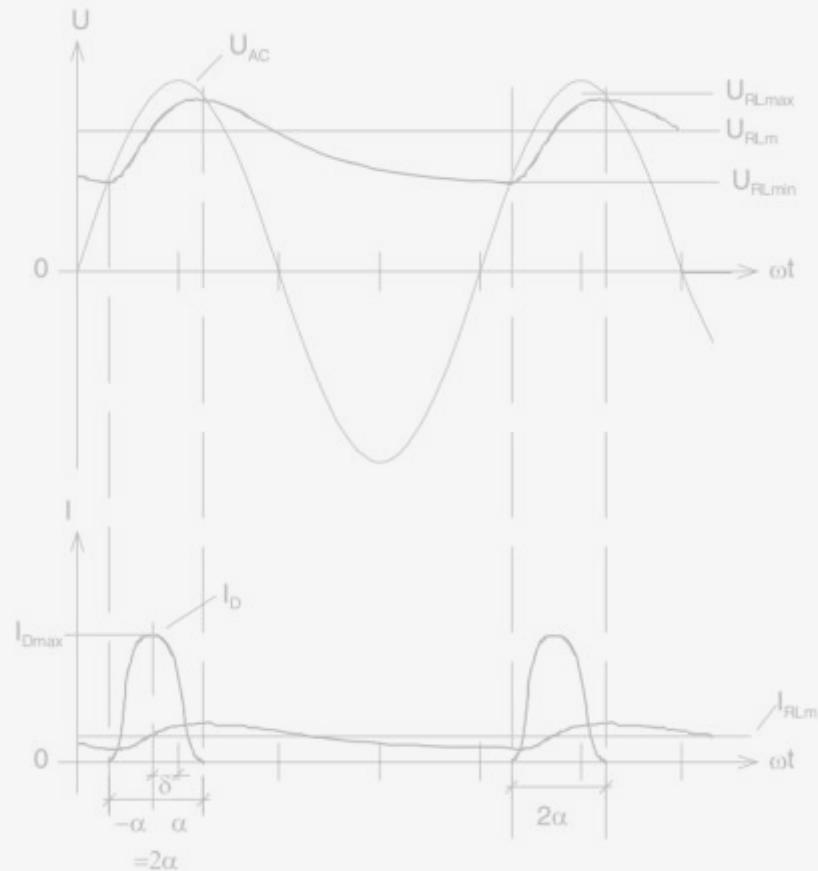
Bild: <http://www.energie.ch/gleichrichter>

Glättung genauer betrachtet



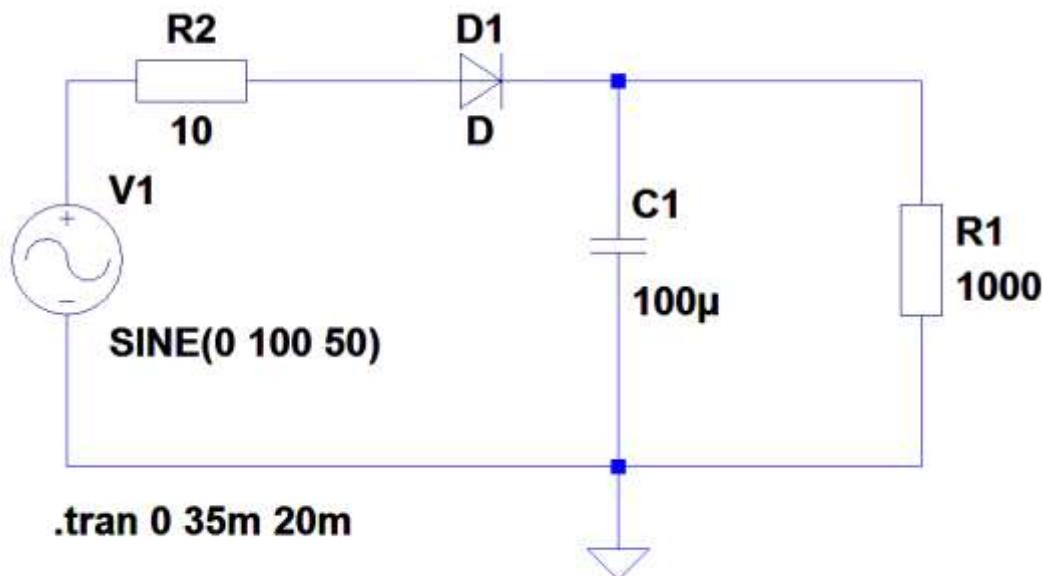
- Diode leitet wenn Trafospannung größer als Kondensatorspannung $U_{AC} > U_C$
- Nur dann fließt Strom in Kondensator und Last → Stromflusswinkel
- Stromfluss bewirkt Spannungsabfall am Innenwiderstand des Transformators
- Stromfluss NICHT sinusförmig, sondern pulsartig → Oberwellen

- RC Glied aus Kondensator und Innenwiderstand lässt Strom nacheilen
- ...Ladung des Kondensators mit „sinusartiger“, vom Strom abhängiger Spannung → schwer, wenn überhaupt, lösbar DGL



Quelle: Krucker, HTI Burgdorf Analoge System 1 (ELA4)

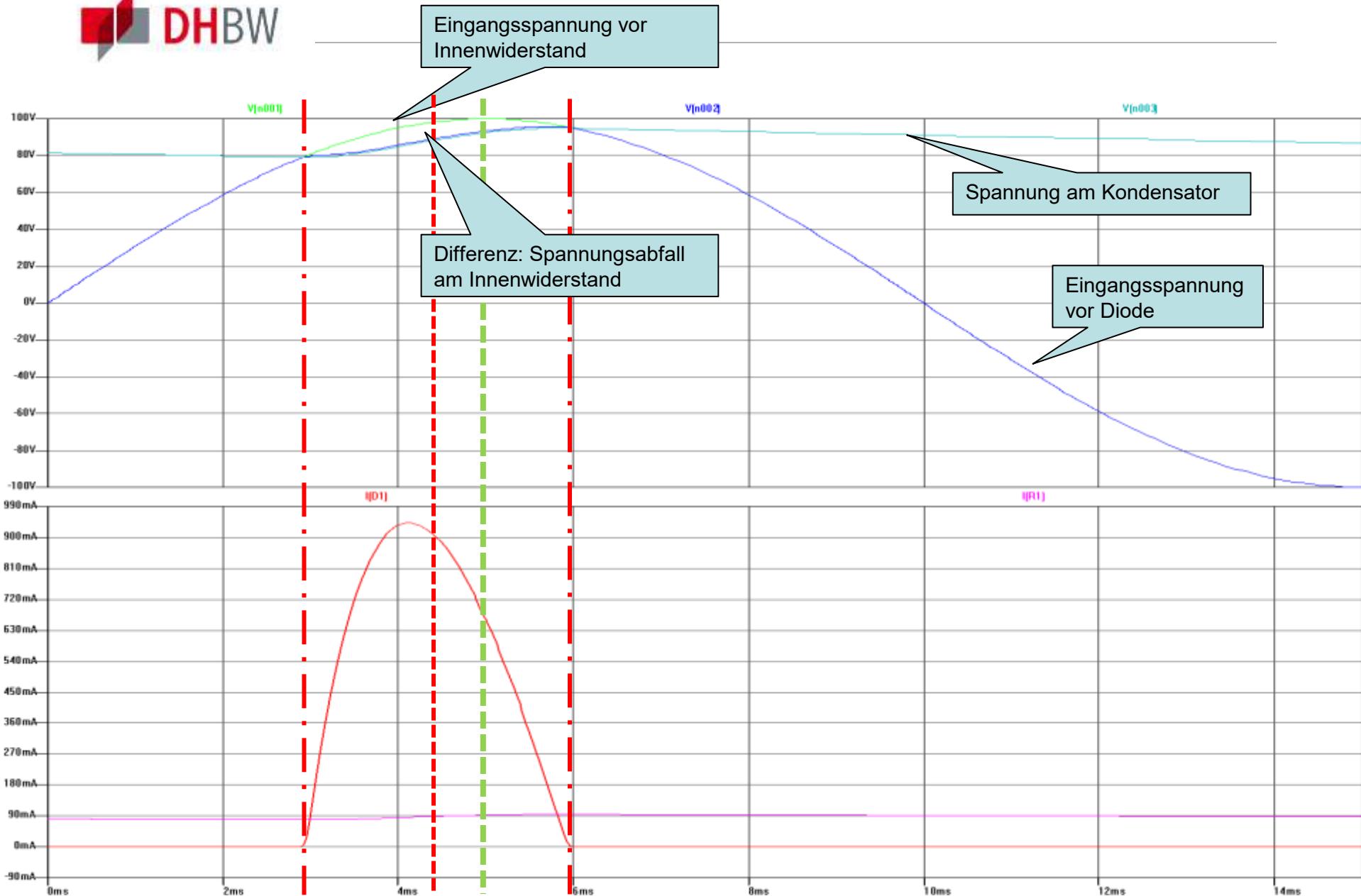
Übung

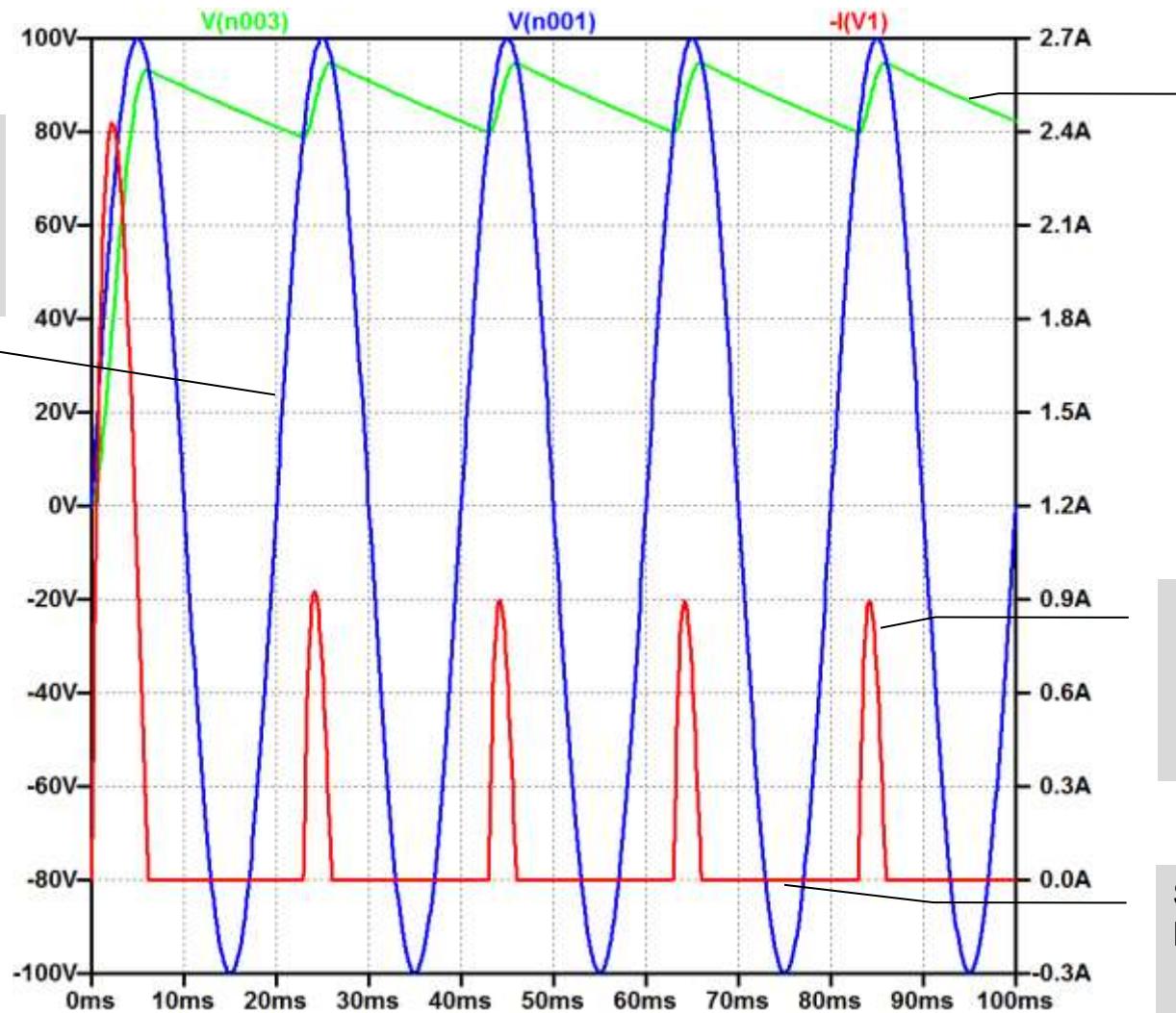


Erstellen mit mit Itspice die nebenstehende Schaltung

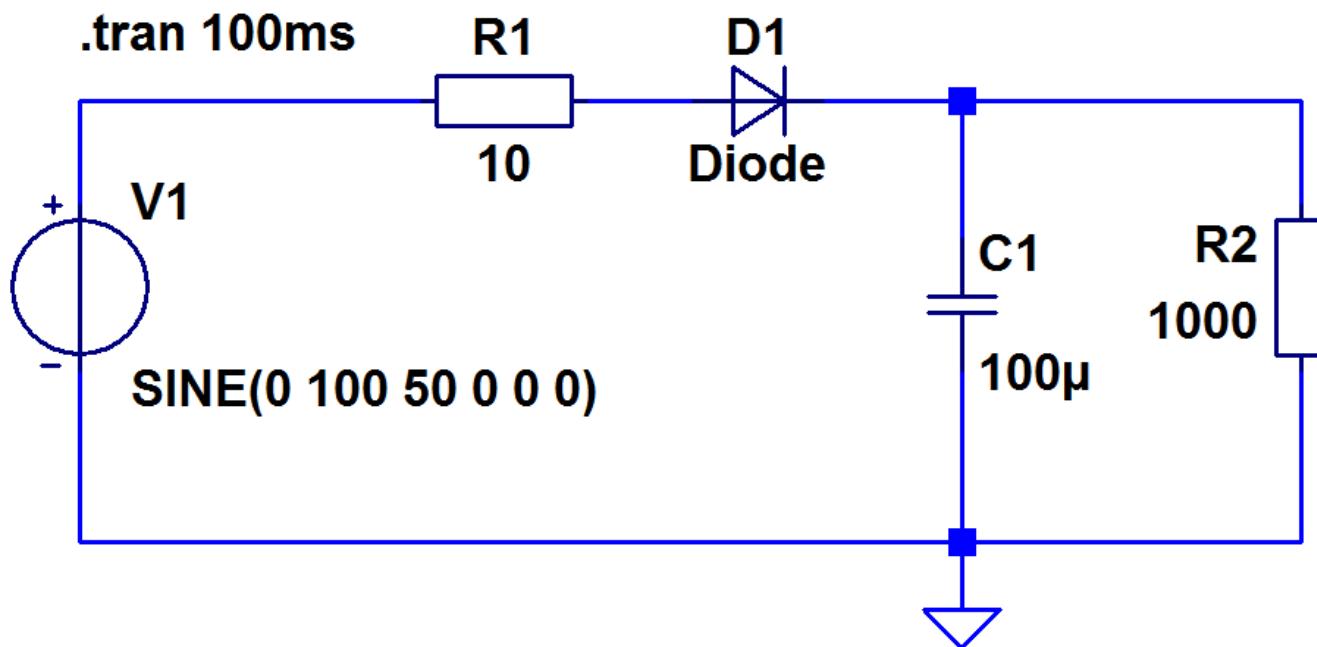
- Simulieren Sie die Spannung am Kondensator und den Eingangsstrom
- variieren Sie die Kapazität des Siebkondensators
- variieren Sie die Quellenimpedanz
- wie wirkt sich ein praktisch immer vorhandener Serienwiderstand des Siebkondensators aus?

Fazit: wie muss ein Gleichrichter aufgebaut sein, damit die Brummspannung möglichst gering ist?





Probieren Sie mal das hier!

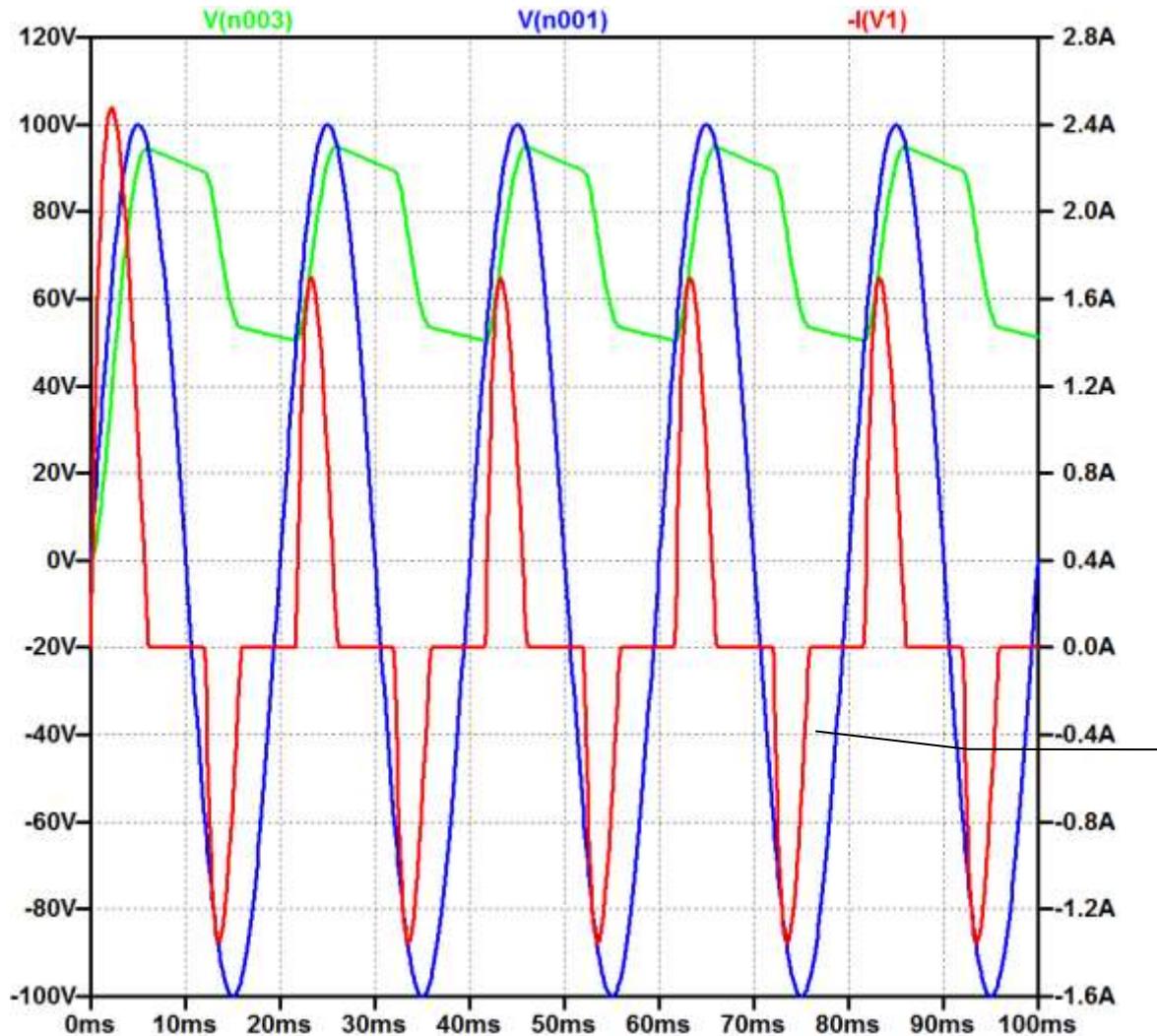


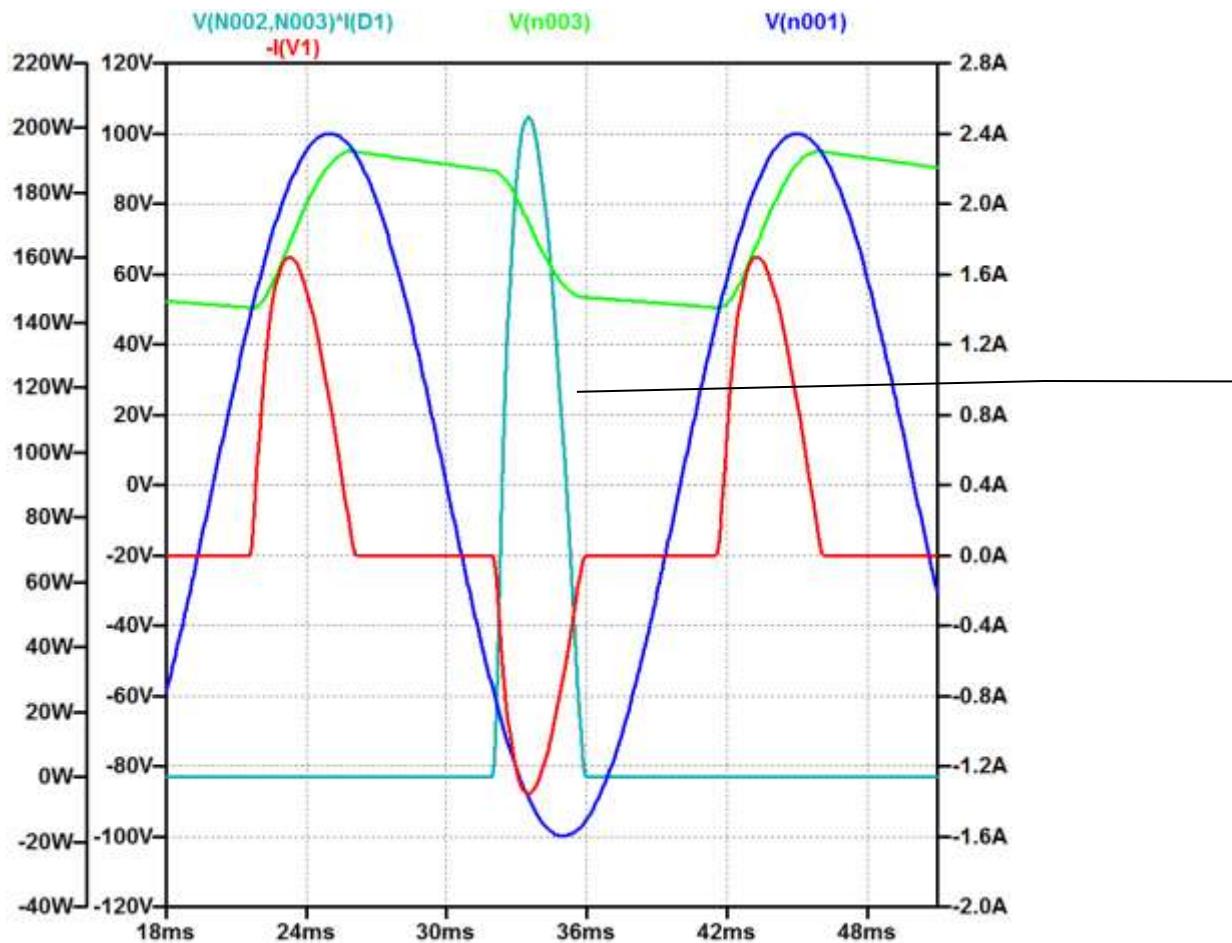
Jetzt wird Durchbruchsspannung berücksichtigt!

Warum bricht die Diode trotz Eingangsamplitude 100V (< 150V !!) durch?

Denken Sie auch mal über die Verlustleistung an der Diode nach...

- Leiten
- Sperren
- Durchbruch

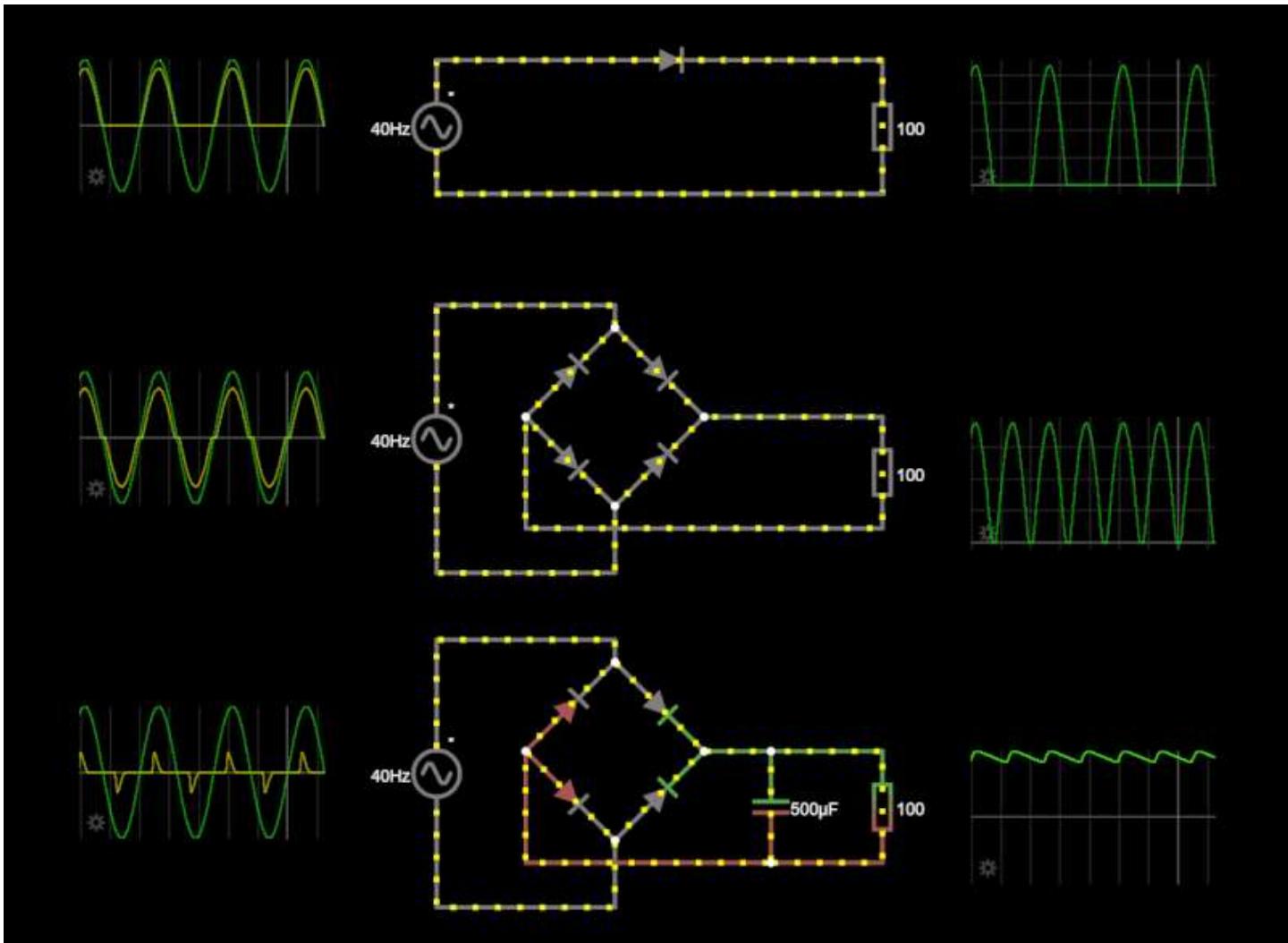




Verlustleistung an
Diode

„ALT Rechtsklick auf
Diode“

Zusammenfassung Gleichreichter



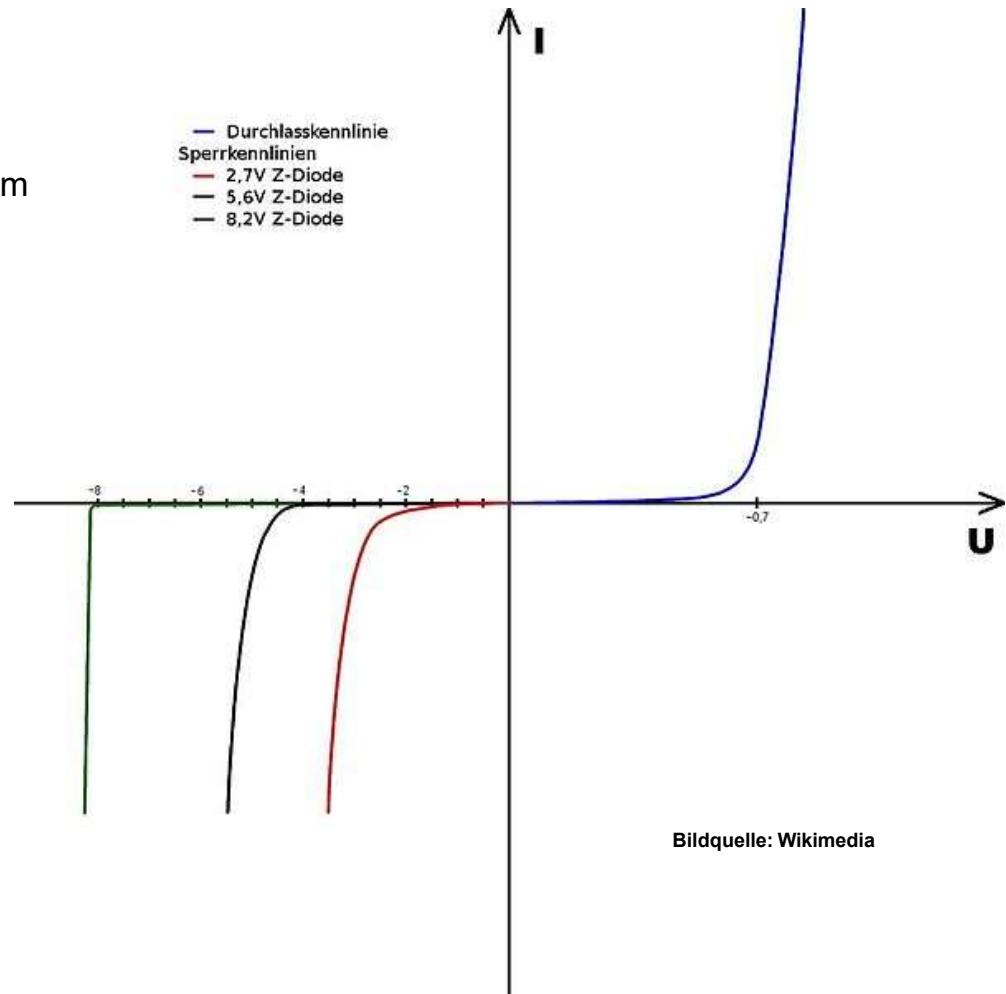
Z-Dioden

Nutzen Durchbruch 1. Art im Sperrbereich

Spannung ist dort praktisch unabhängig vom Strom

Anwendung

- Konstantspannungsquelle
- Sperrbetrieb!
- Vorsicht Verlustleistung!
- Strom begrenzen (mit Vorwiderstand)



Übung Spannungsstabilisierung mit Z-Diode

Spannungsstabilisierung mit Z-Diode BZX79C...

- Ausgangsspannung 10V
- Max. Eingangsspannung 50V



Fragen

- Welche Z-Diode wird eingesetzt
- Wie sieht der Schaltplan aus
- Wie groß muss der Vorwiderstand sein
- Welche Verlustleistung entsteht maximal im Vorwiderstand
- Welcher Strom kann maximal entnommen werden bei 50 V Eingangsspannung
- Wie hoch muss die Eingangsspannung mindestens sein, wenn die Schaltung 1 mA liefern soll? Wie hoch ist in diesem Fall der Wirkungsgrad
- Diskutieren Sie die Grenzen einer solchen Konstantspannungsquelle

BZX79C2V4 - BZX79C56

Zener Diodes

Tolerance = 5%



Absolute Maximum Ratings *

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation @ $T_L \leq 75^\circ\text{C}$, Lead Length = 3/8"	500	mW
	Derate above 75°C	4.0	mW/ $^\circ\text{C}$
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

* These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

Electrical Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Device	Zener Voltage (Note 1)			Leakage Current		T_C (mV / $^\circ\text{C}$)		C (pF) $V_Z = 0, f = 1\text{MHz}$	
	Min.	Max.	I_Z (mA)	Max.	I_R (μA)	V_R (V)	Min.	Max.	
BZX79C2V4	2.2	2.6	5	100	100	1	-3.5	0	255
BZX79C2V7	2.5	2.9	5	100	75	1	-3.5	0	230
BZX79C3V0	2.8	3.2	5	95	50	1	-3.5	0	215
BZX79C3V3	3.1	3.5	5	95	25	1	-3.5	0	200
BZX79C3V6	3.4	3.8	5	90	15	1	-3.5	0	185
BZX79C3V9	3.7	4.1	5	90	10	1	-3.5	+0.3	175
BZX79C4V3	4	4.6	5	90	5	1	-3.5	+1	160
BZX79C4V7	4.4	5	5	80	3	2	-3.5	+0.2	130
BZX79C5V1	4.8	5.4	5	60	2	2	-2.7	+1.2	110
BZX79C5V6	5.2	6	5	40	1	2	-2	+2.5	95
BZX79C6V2	5.8	6.6	5	10	3	4	0.4	3.7	90
BZX79C6V8	6.4	7.2	5	15	2	4	1.2	4.5	85
BZX79C7V5	7	7.9	5	15	1	5	2.5	5.3	80
BZX79C8V2	7.7	8.7	5	15	0.7	5	3.2	6.2	75
BZX79C9V1	8.5	9.6	5	15	0.5	6	3.8	7	70
BZX79C10	9.4	10.6	5	20	0.2	7	4.5	8	70
BZX79C11	10.4	11.6	5	20	0.1	8	5.4	9	65
BZX79C12	11.4	12.7	5	20	0.1	8	6.0	10	65

Wichtig für uns:

- Max Verlustleistung P_D
- Temperaturkoeffizient T_C
- Minimaler Diodenstrom I_Z

Lösungsansatz

Bei 50V Eingangsspannung müssen 50V-10V am Vorwiderstand abfallen

Bei 50V (= maximale Eingangsspannung) fließt dann auch der maximale Strom I_{max}

→ Vorwiderstand $R=U/I$

Wie aber wird I_{max} gewählt??

...maximale Verlustleistung der Diode ist Obergrenze (500mW)

$P_v = U_{diode} \cdot I_{max}$ → daraus I_{max} berechnen (50mA)

→ R (800 Ohm)

Verlustleistung im Vorwiderstand = Strom * Spannungsabfall (50mA * 40 V =2W)

Maximaler Strom

...Gesamtstrom ist I_{max}

...teilt sich am Ausgang auf Diode und Last

...für Diode muss $I_Z \cdot min$ (5 mA aus Datenblatt) übrig bleiben. Also max. Ausgangsstrom = $I_{max} - I_Z$
($I_{L,max} = 45$ mA)

Minimale Eingangsspannung bei 1 mA Last

...Spannung an der Diode muss mindestens 10 V betragen

$U_{diode} = U_{eingang} - R \cdot I$ wobei $I = I_Z \cdot min + 1mA$

...Auflösen nach Ueingang. Ergebnis: $10V + 800\Omega \cdot 6mA = 14V$

Zusammenfassung Spannungsstabilisierung mit Z-Diode

+

- Einfache Schaltung
- Wenige Komponenten
→ Zuverlässig
- Niedrige Kosten
- Mit speziellen Z-Dioden und Temperaturstabilisierung extrem präzise Referenzspannungen machbar

-

- Nur kleine (mA) Ausgangsströme möglich
- Sehr schlechter Wirkungsgrad
- Hohe Verluste im Leerlauf
- Eingeschränkter Eingangsspannungsbereich

Als einfache Konstantspannungsquelle mit geringem oder verschwindendem Strombedarf unschlagbar

Als Energiequelle ungeeignet

TVS Dioden / Überspannungsschutz

Bauelemente deren Widerstand ab einer bestimmten Spannung schlagartig ansteigt

- TVS/Supressordioden (= spezielle Z-Dioden) → sehr schnell
- Varistoren / MOVs → eher träge aber hohe Energien
- Funkenstrecken → robust, hohe Spannungen

Kenndaten

- Einsatzspannung
- Max. Stoßstrom
- Max. Leistung (kurzzeitig)
- Max. Energie
- Bidirektional / undirektional

ACHTUNG: Solche Bauelemente brauchen IMMER zusätzliche Strombegrenzung (durch Widerstände oder Sicherungen)

Typischer Standard-Testimpuls (Strom)



Unterscheidung Anstiegszeit tr und 50%-Dauer tp. Z.B.

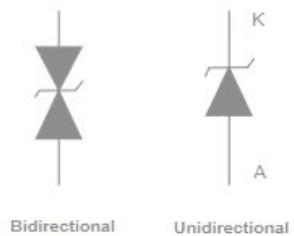
- 8/20us
- 10/1000us

TVS Diode Beispiel BZW04

Quelle: ST micro

Features

- Peak pulse power:
 - 400 W (10/1000 µs)
 - up to 2.3 kW (8/20 µs)
- Stand-off voltage range from 5.8 V to 376 V
- Unidirectional and bidirectional types
- Operating T_j max: 175 °C
- High power capability at T_j max.: up to 230 W (10/1000 µs)
- Lead finishing: matte tin plating



Type	I_{RM} max at V_{RM}		V_{BR} at I_{BR} ⁽¹⁾		10 / 1000 µs			8 / 20µs			αT	C
	25 °C		Min.		$V_{CL}^{(2)(3)}$	$I_{PP}^{(4)}$	R_D	$V_{CL}^{(2)(3)}$	$I_{PP}^{(4)}$	R_D		
					μA	V	mA	V	A	Ω	Max.	Typ.
BZW04-5V8/B	1000	5.8	6.45	10	10.5	38.0	0.088	13.4	174	0.036	5.7	3500
BZW04-28/B	1	28.2	31.4	1	45.7	8.8	1.24	59.0	39	0.621	9.8	510
BZW04-48/B	1	47.8	53.2	1	77.0	5.2	3.50	100	23	1.79	10.3	320
BZW04-58/B	1	58.1	64.6	1	92.0	4.3	4.79	121	19	2.61	10.4	270
BZW04-299/B	1	273	304	1	438	1.2	85.0	564	4.0	57.0	11.0	85
BZW04-376/B	1	376	418	1	603	0.8	176	776	3.0	105	11.0	70

Grundlagen der Halbleitertechnik

2.3 Metall-Halbleiter-Übergänge

Metall-Halbleiter-Übergänge

Sowohl

- Metall / n-Halbleiter
 - Metall / p-Halbleiter
- möglich.

Je nach Metall und Dotierungsdichte entstehen

- Gleichrichtende Übergänge (Schottky-Diode)
- Ohmsche Übergänge (zur Kontaktierung von Halbleitern)

Metall

Besitzen immer eine hohe Zahl an unbesetzten Zuständen (sonst könnten Elektronen sich im Metall nicht bewegen)

- Im Valenzband. D.h. VB ist nur teilweise besetzt
- Im Leitungsband, wenn keine Bandlücke besteht

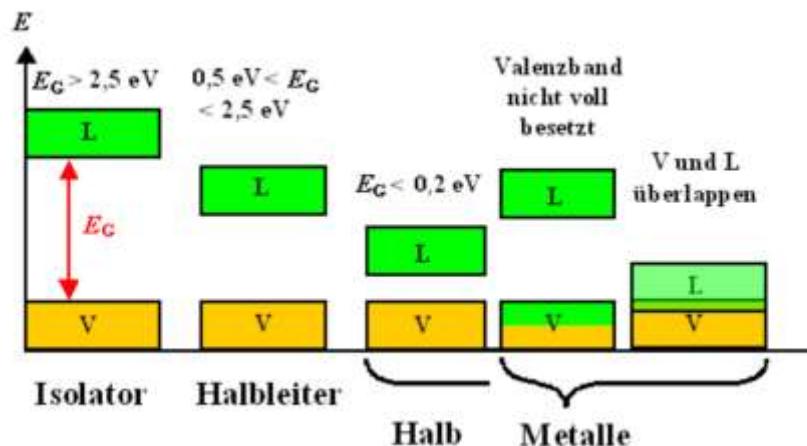
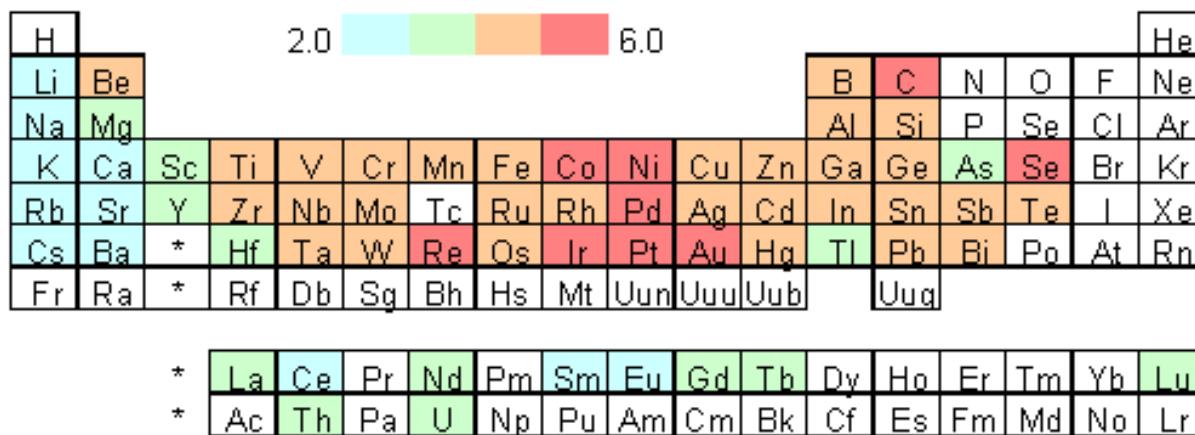


Abbildung: Verschieden Festkörper im Bändermodell. Bei 0K: orange besetzte Zustände, grün unbesetzte Zustände

Austrittsarbeit

Die Arbeit die MINDESTENS aufgewandt werde muss, um ein (Valenz-)Elektron aus einem ungeladenen Festkörper zu lösen.

Work functions of the elements in eV

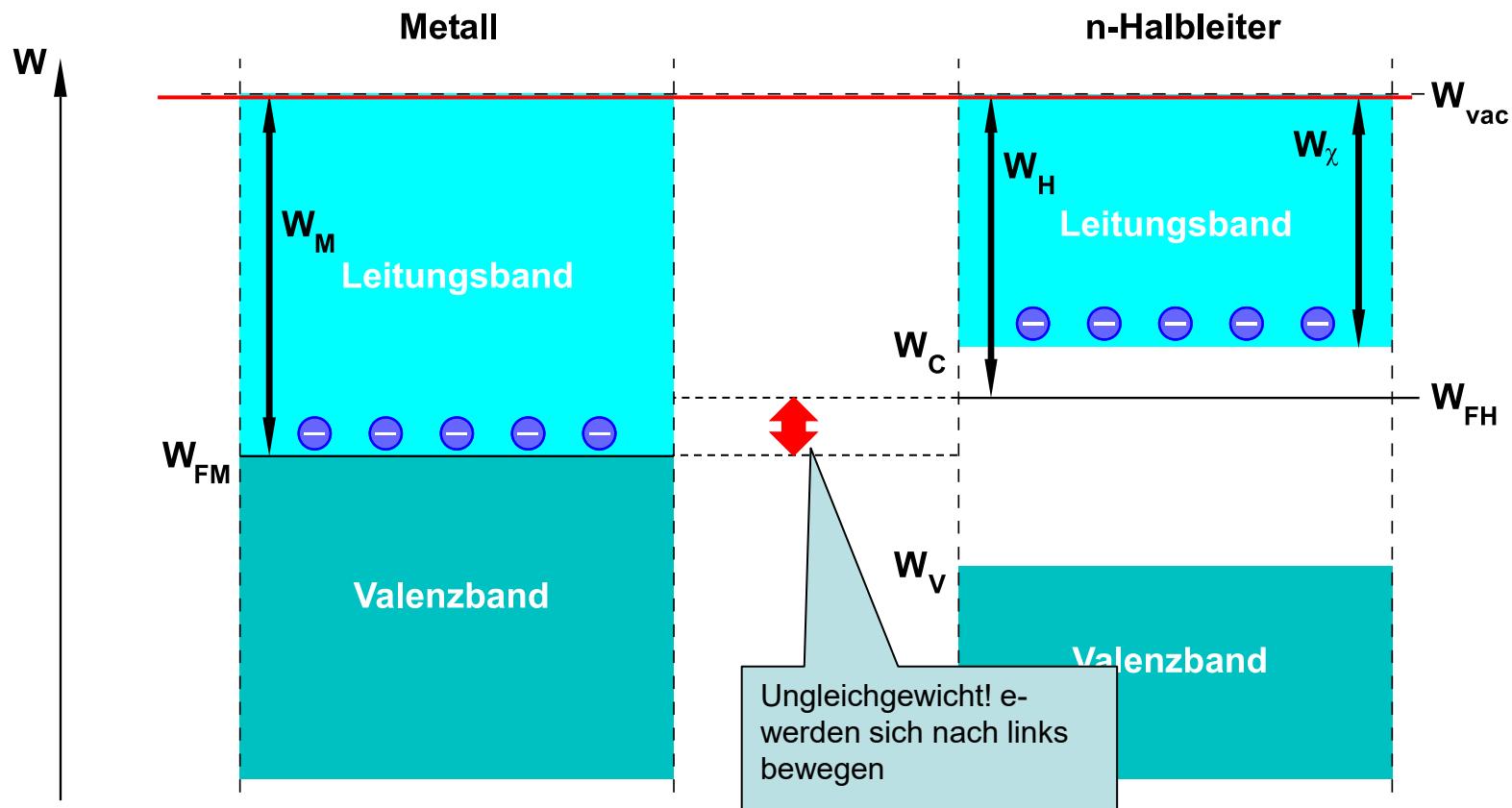


source: CRC Handbook, 61st Ed. (information compiled 1977)

Metall-Halbleiter-Übergänge

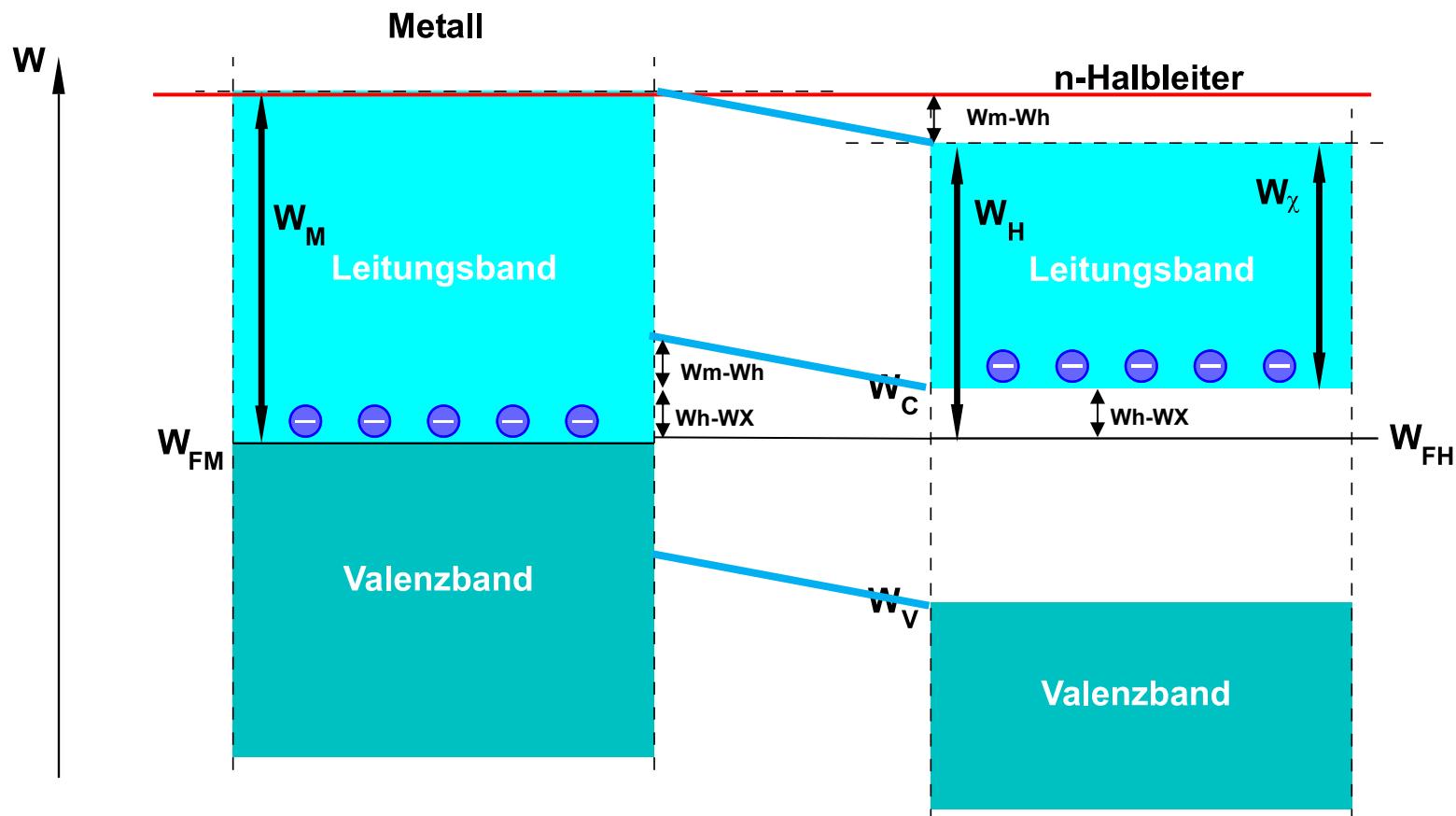
- W_M , W_H : Abstand der jeweiligen Fermi-Energie von Vakuumenergie
- W_x : Abstand Leitungsbandunterkante – Vakuumenergie. „Elektronenaffinität“

Die Arbeit die verrichtet werden muss um ein Elektron unendlich weit vom Atom zu entfernen
Bei Si: 4,05 eV



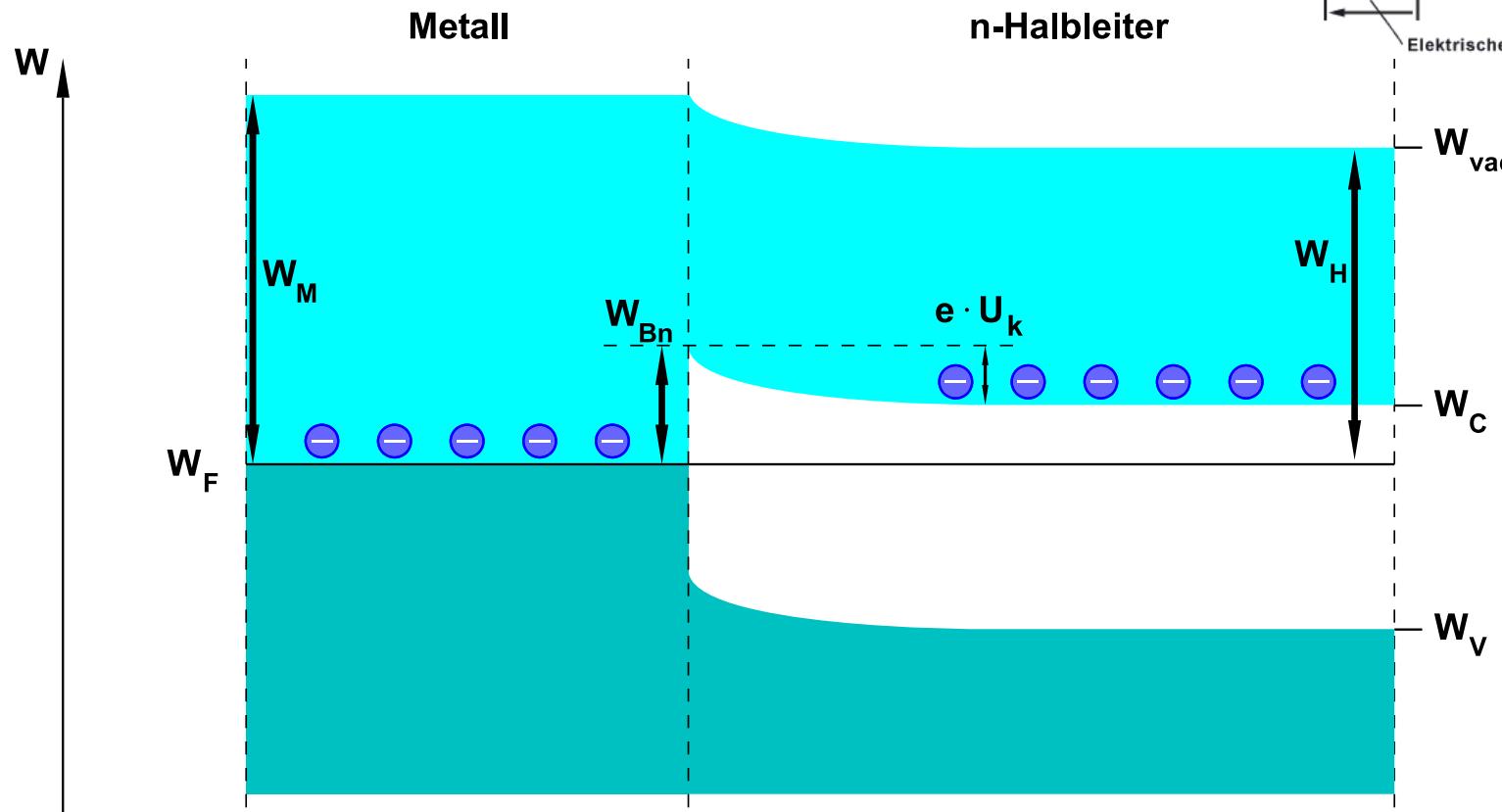
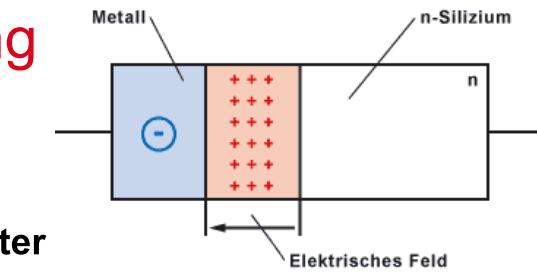
Metall-Halbleiter-Übergänge

- W_M , W_H : Abstand der jeweiligen Fermi-Energie von Vakuumenergie
- W_χ : Abstand Leitungsbandunterkante – Vakuumenergie. „Elektronenaffinität“



Schottky-Kontakt / Metall-Halbleiter-Übergang

Ohne äußere Spannung – Gleichgewicht + Bandverbiegung

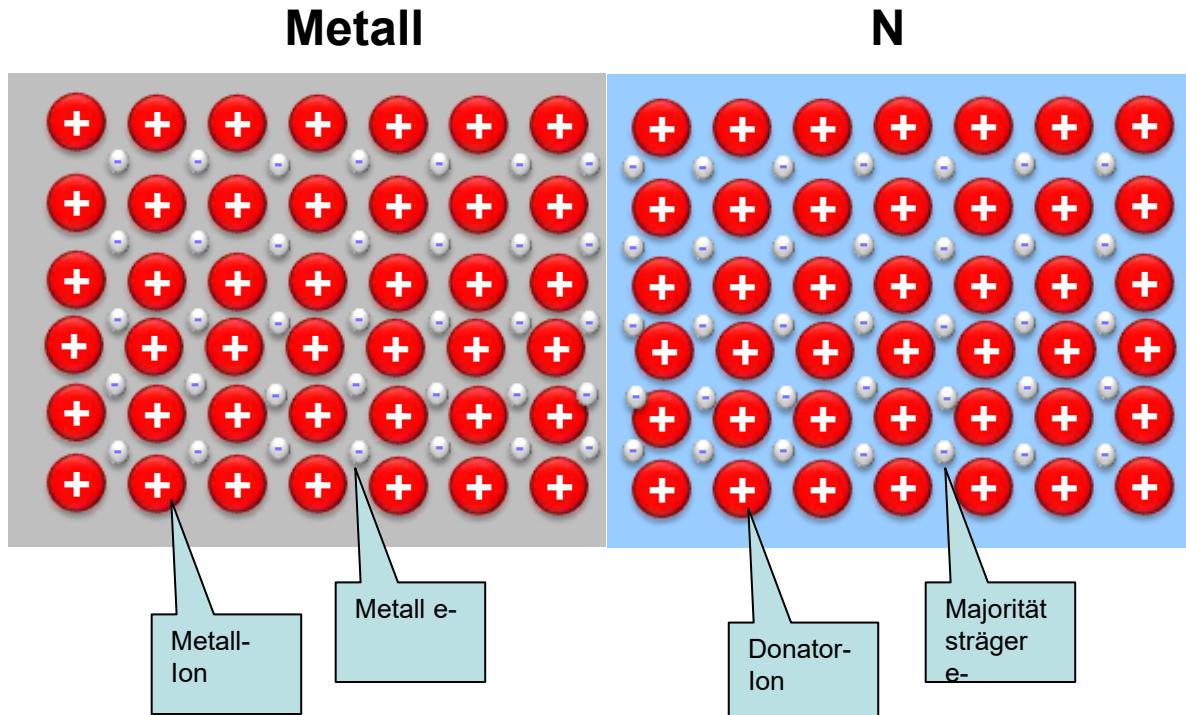


M-HL Übergang ohne äußere Spannung

Elektronen bewegen sich in das Metall, weil dort viele energetisch niedrigere, unbesetzte Zustände sind.

Hinterlassen pos. Donator-Ionen → Raumladung

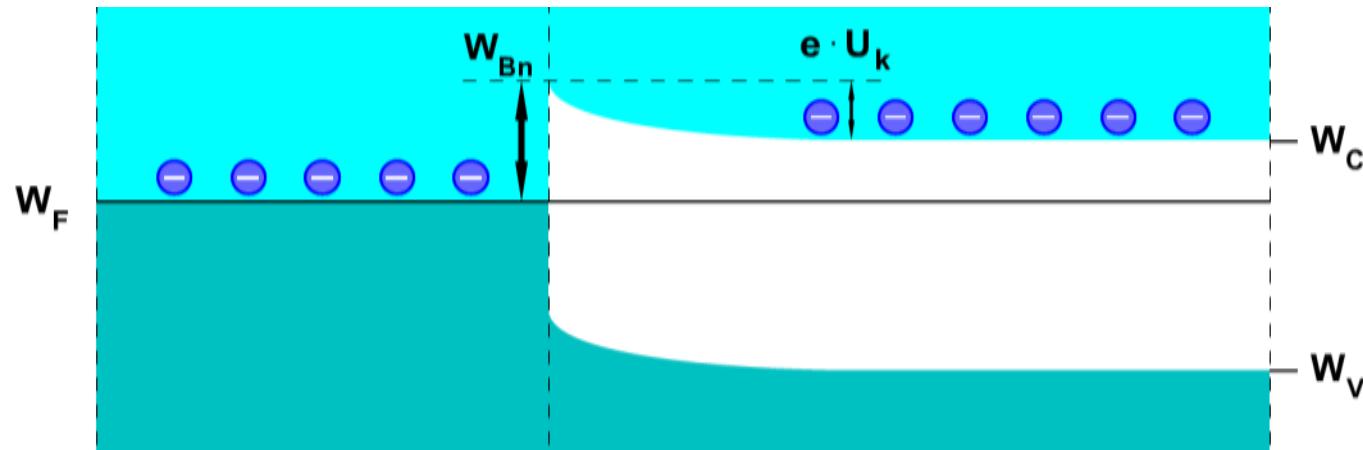
Besetzen frei Metall-Zustände am Übergang → Oberflächenladung



Zwei Energieschwellen

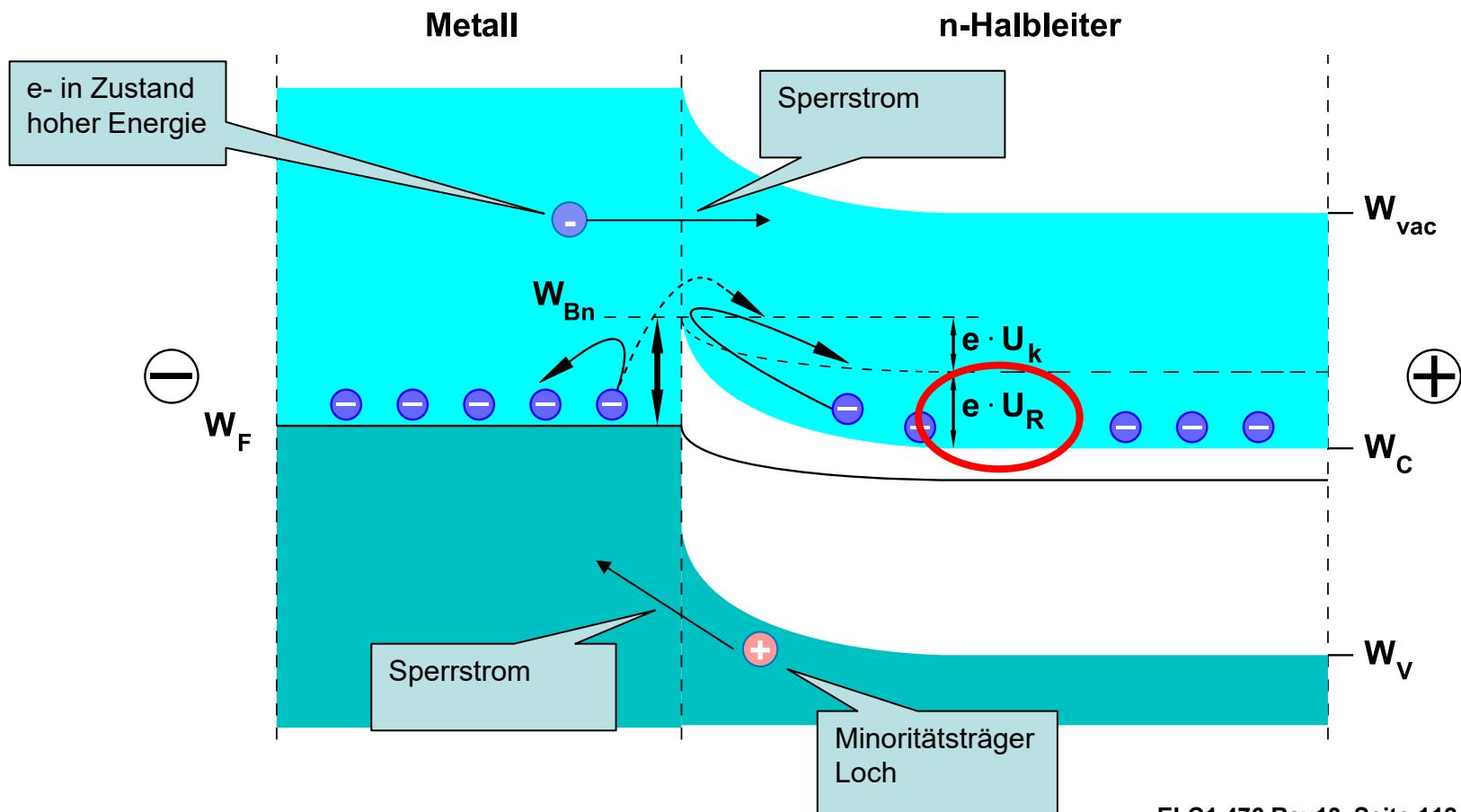
- Energieschwelle für e-
 - Metall → n-HL
 - Schottky-Barriere W_{Bn}

 - $W_{Bn0} = W_M - W_\chi$
- Energieschwelle für e-
 - n-HL → Metall:
 - $e \cdot U_k = W_M - W_\chi$



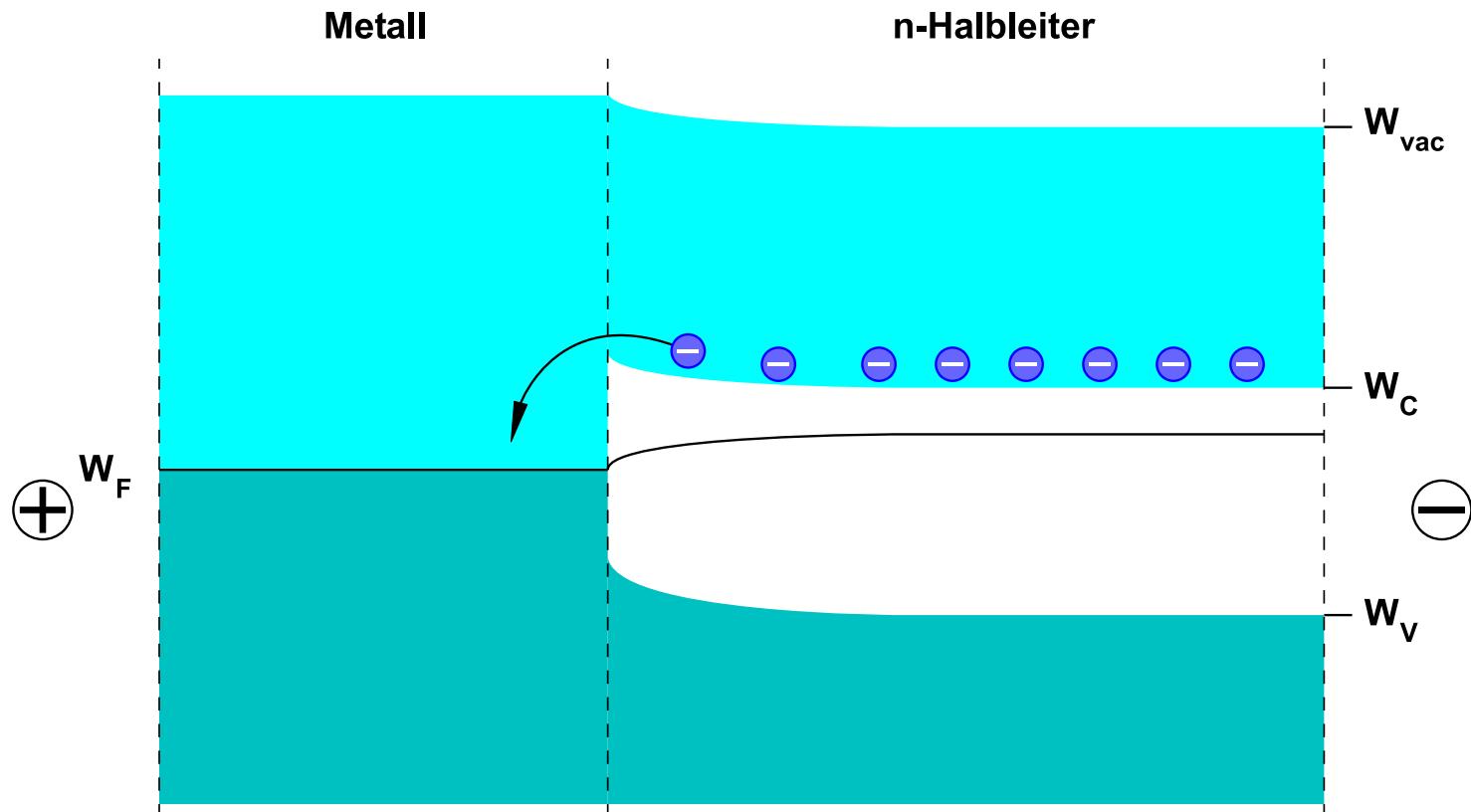
Sperrpolung U_R

- Schottkybarriere unverändert, Energieschwelle im n-HL wird höher
- Zus. Sperrstrom durch „heisse“ Elektronen im Metall, die Schottkybarriere überwinden



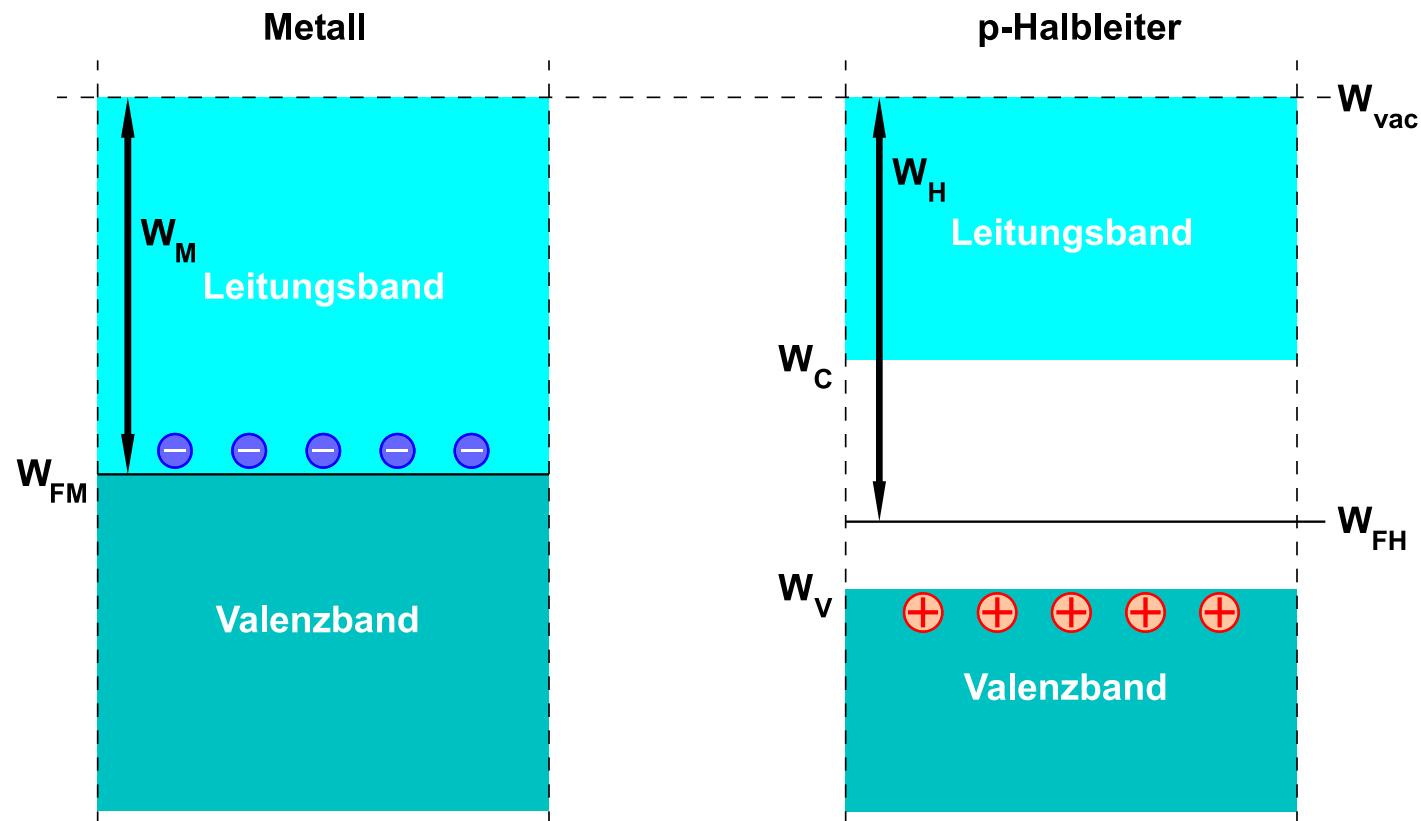
Flusspolung

Schottkybarriere unverändert, Energieschwelle im n-HL fast verschwunden



Metall p-HL

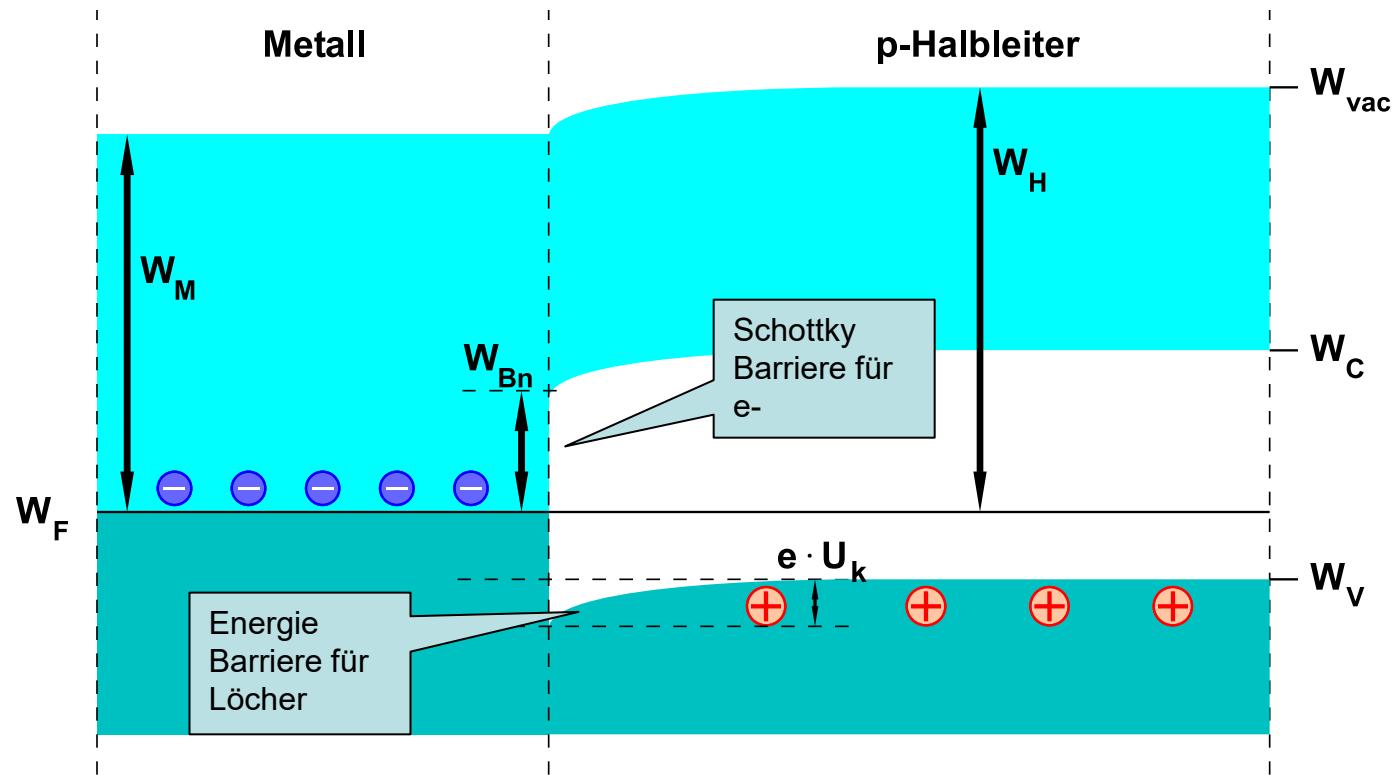
p-Halbleiter-Metall-Übergang



$$(W_M < W_H)$$

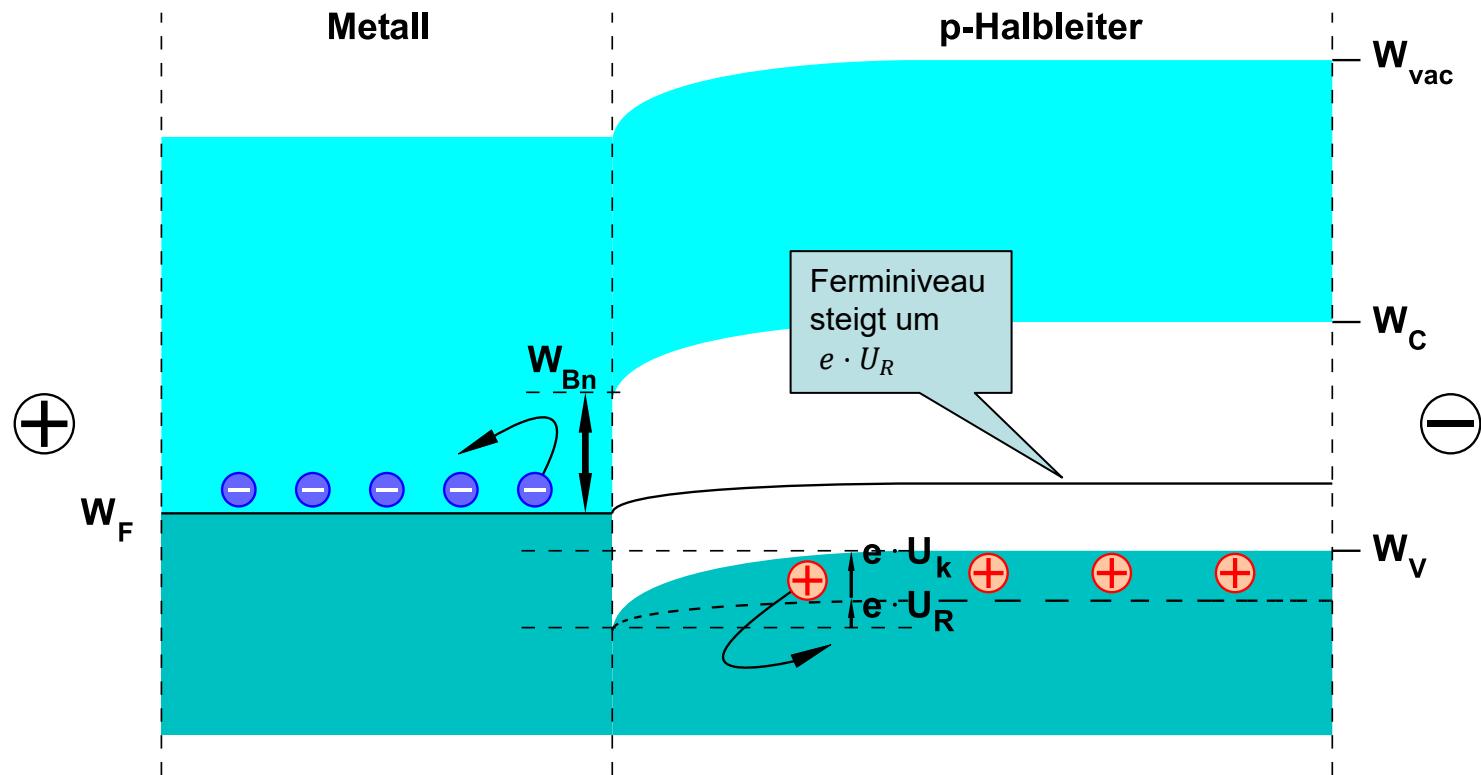
Ohne äußere Spannung

- Gleichgewicht
- Ferminiveau durchgehend / Verbiegung der Bänder



Sperrpolung

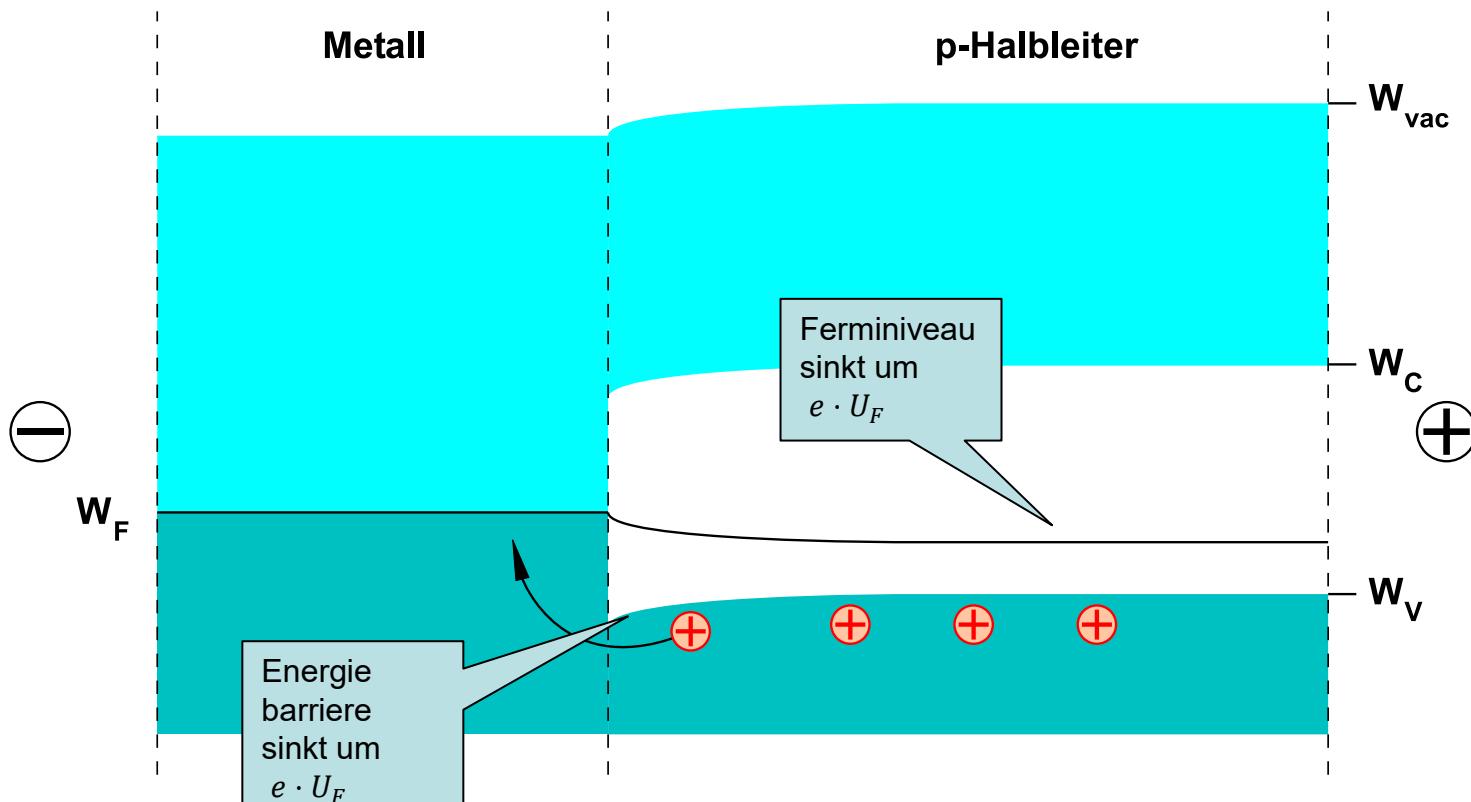
- Energiebarriere wird um $e \cdot U_R$ erhöht
- Schottkybarriere unverändert
- Löcher können Energiebarriere, Elektronen Schottkybarriere NICHT überwinden



Flusspolung

Übergang bei Flusspolung:

- Anlegen einer positiven Spannung U_F
- Es fließt ein Löcher- aber kein Elektronenstrom



Zwischenfazit

Schottky-Übergänge

- Metall n-Halbleiter mit $W_M > W_H$
- Metall p-Halbleiter mit $W_M < W_H$

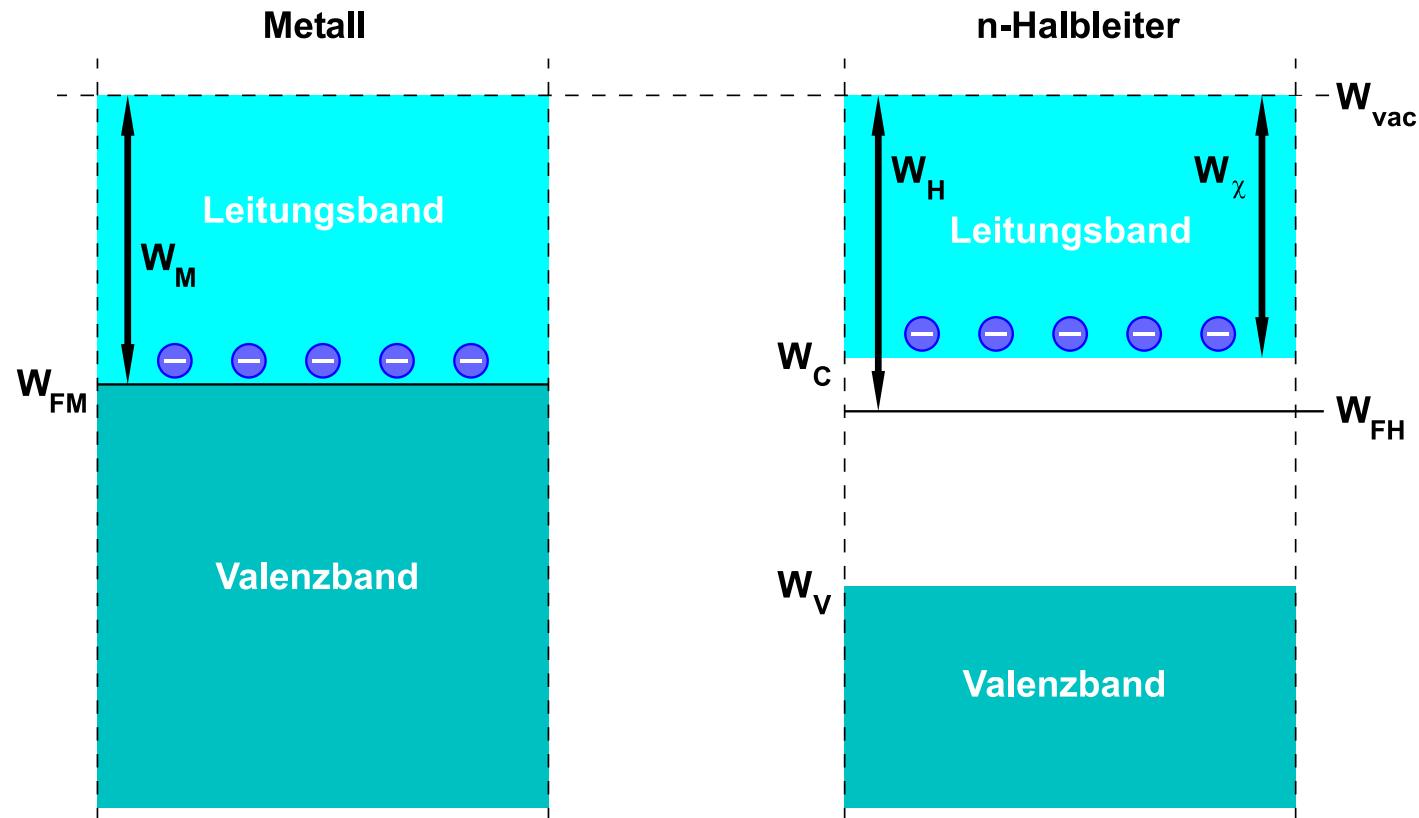


haben ebenfalls gleichrichtende Wirkung

	pn	Schottky
Sperrsichtweite		geringer
Sperrsättigungsstrom		höher
Knickspannung	0,7V (Si)	0,4V (Si-Metall)
Kapazität		geringer
Durchbruchspannung		geringer

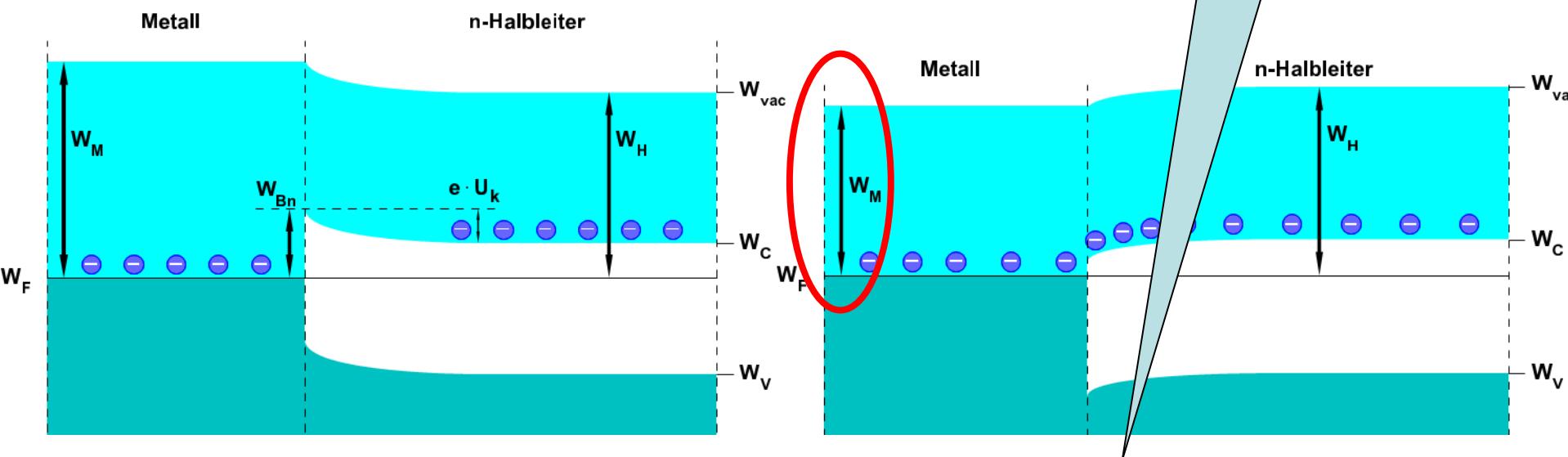
Ohmscher-Kontakt

- $W_M < W_H$
- Metall und n-dotierter Halbleiter – unverbunden



Ohmscher-Kontakt Metall n-Halbleiter

Übergang ohne äußere Spannung:

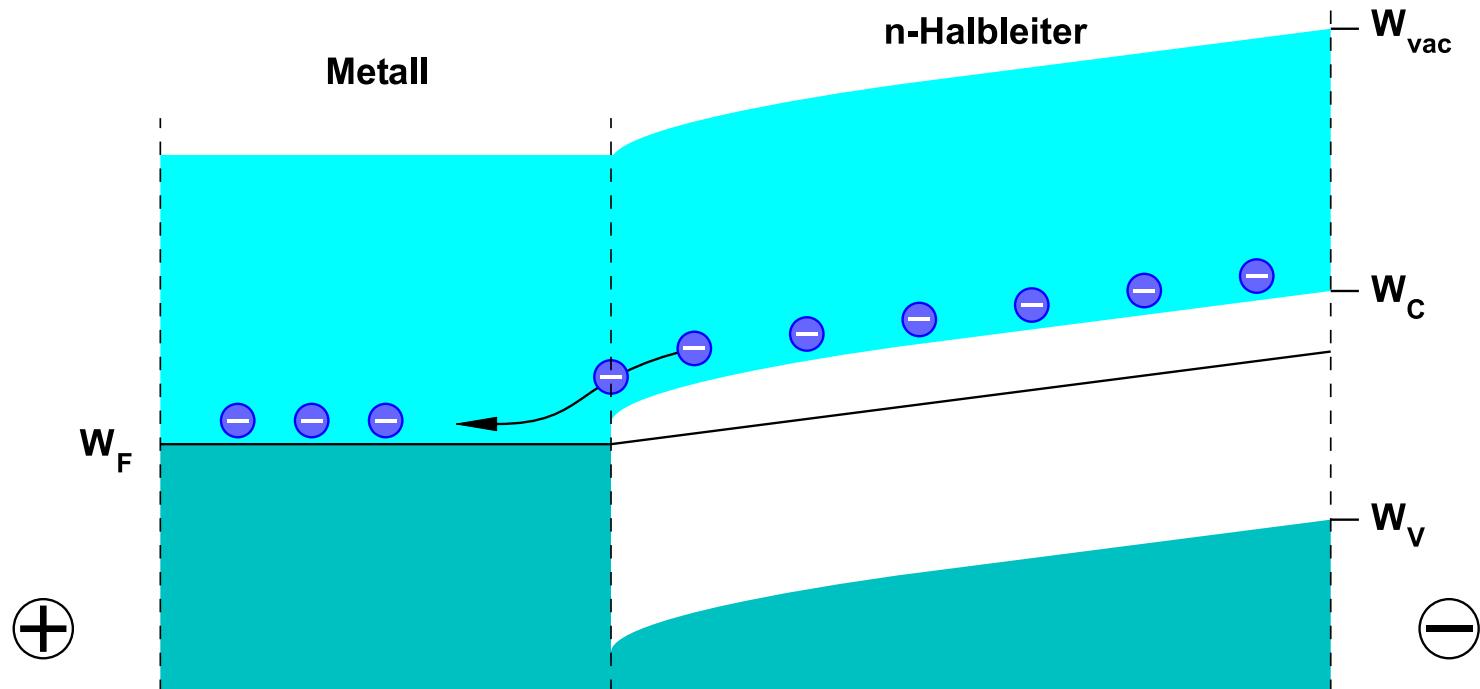


Bandverbiegung „nach oben“
 → Schottky & Energiebarriere

Bandverbiegung „nach unten“
 → keine Barrieren

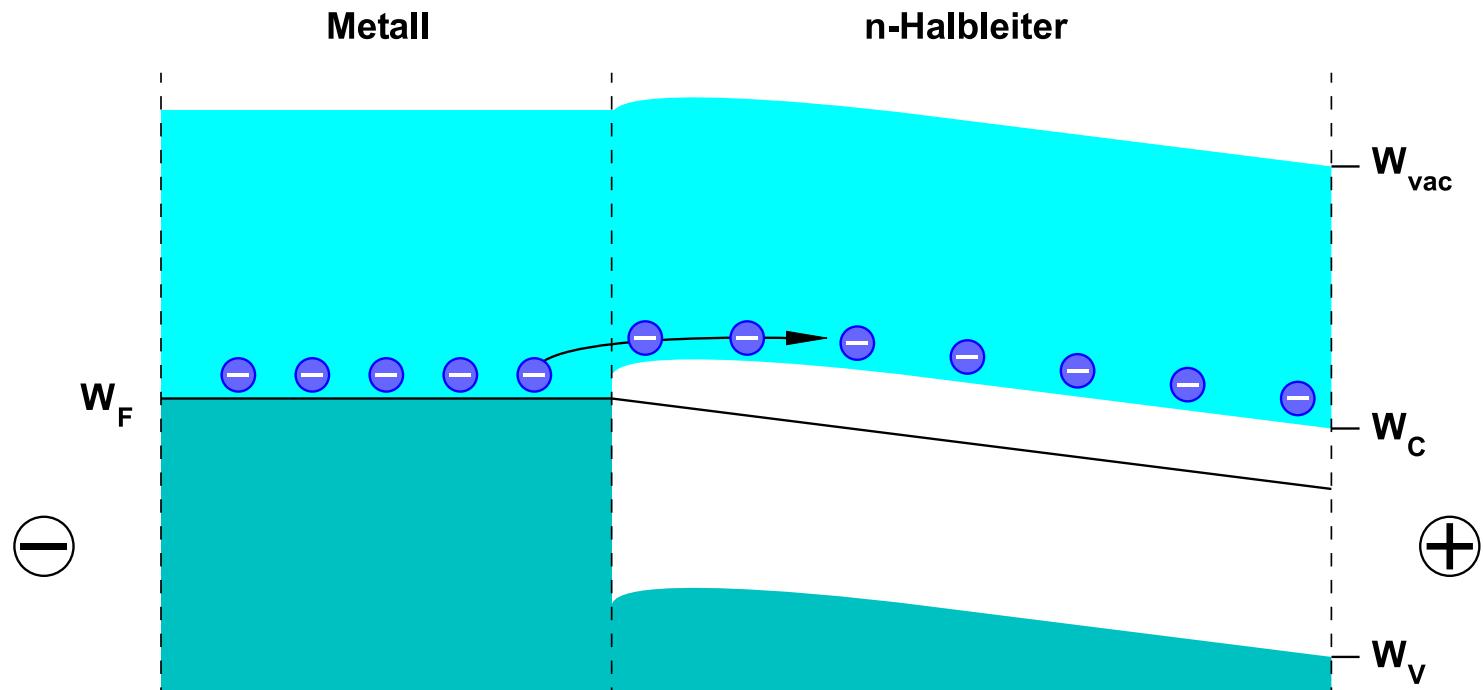
Ohmscher-Kontakt

Übergang mit äußerer Spannung (Minuspol der Spannung am Halbleiter):



Ohmscher-Kontakt

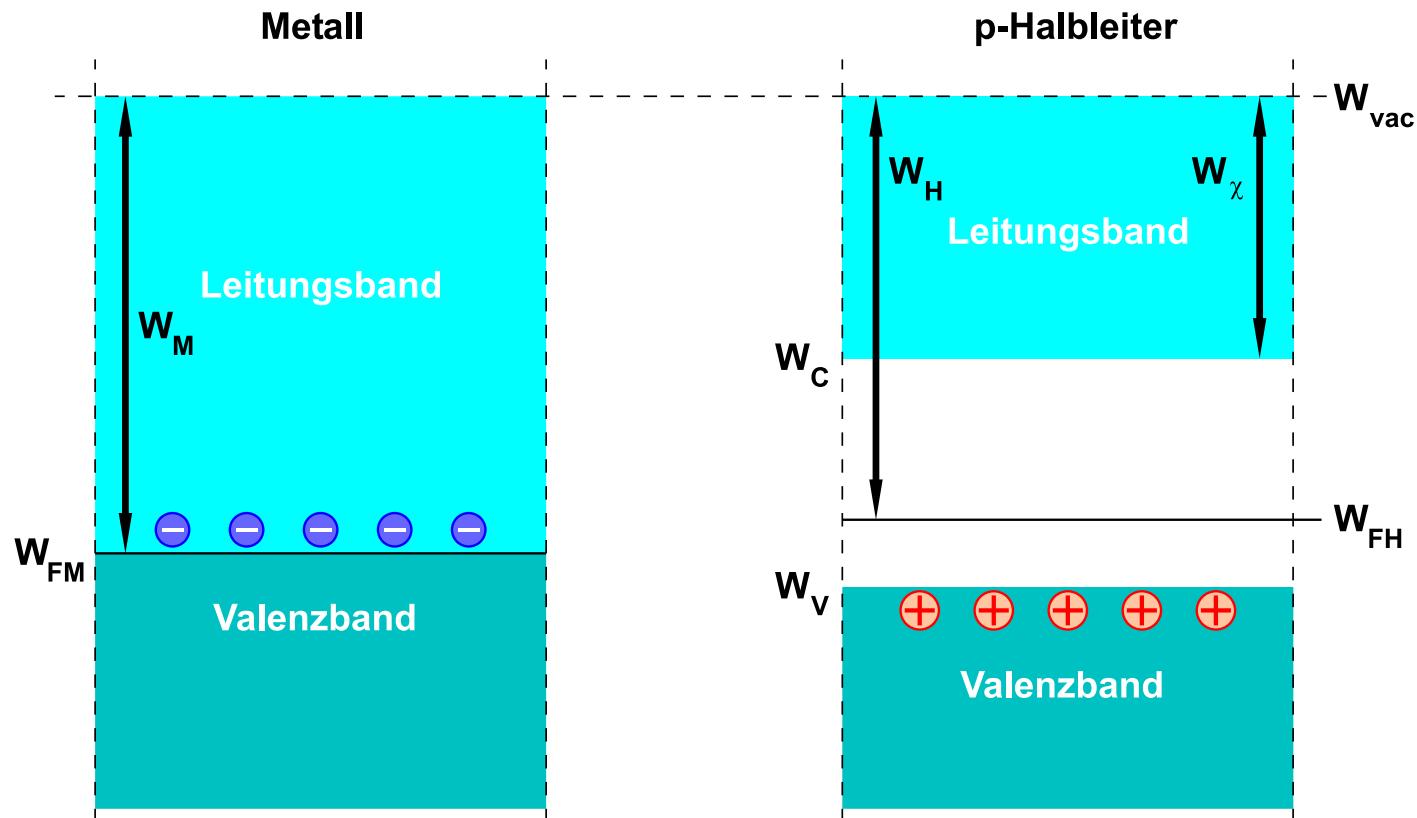
Übergang mit äußerer Spannung (Minuspol am Metall):



Ohmscher-Kontakt

Ohmscher-Kontakt:

- Metall und p-dotierter Halbleiter ($W_M > W_H$) – unverbunden

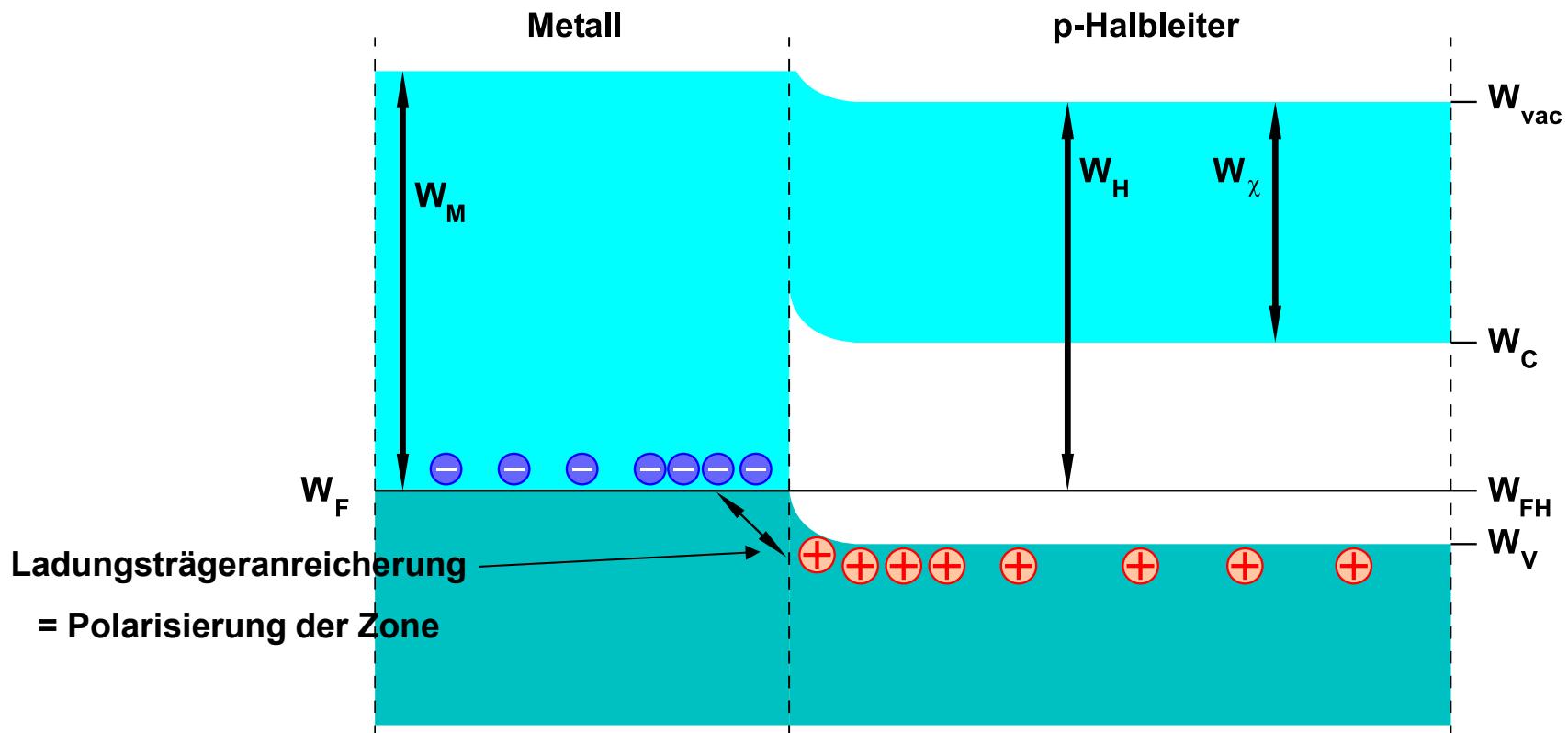




Ohmscher-Kontakt

Übergang von p-Halbleiter zu Metall ($W_M > W_H$)

- Übergang ohne äußere Spannung:

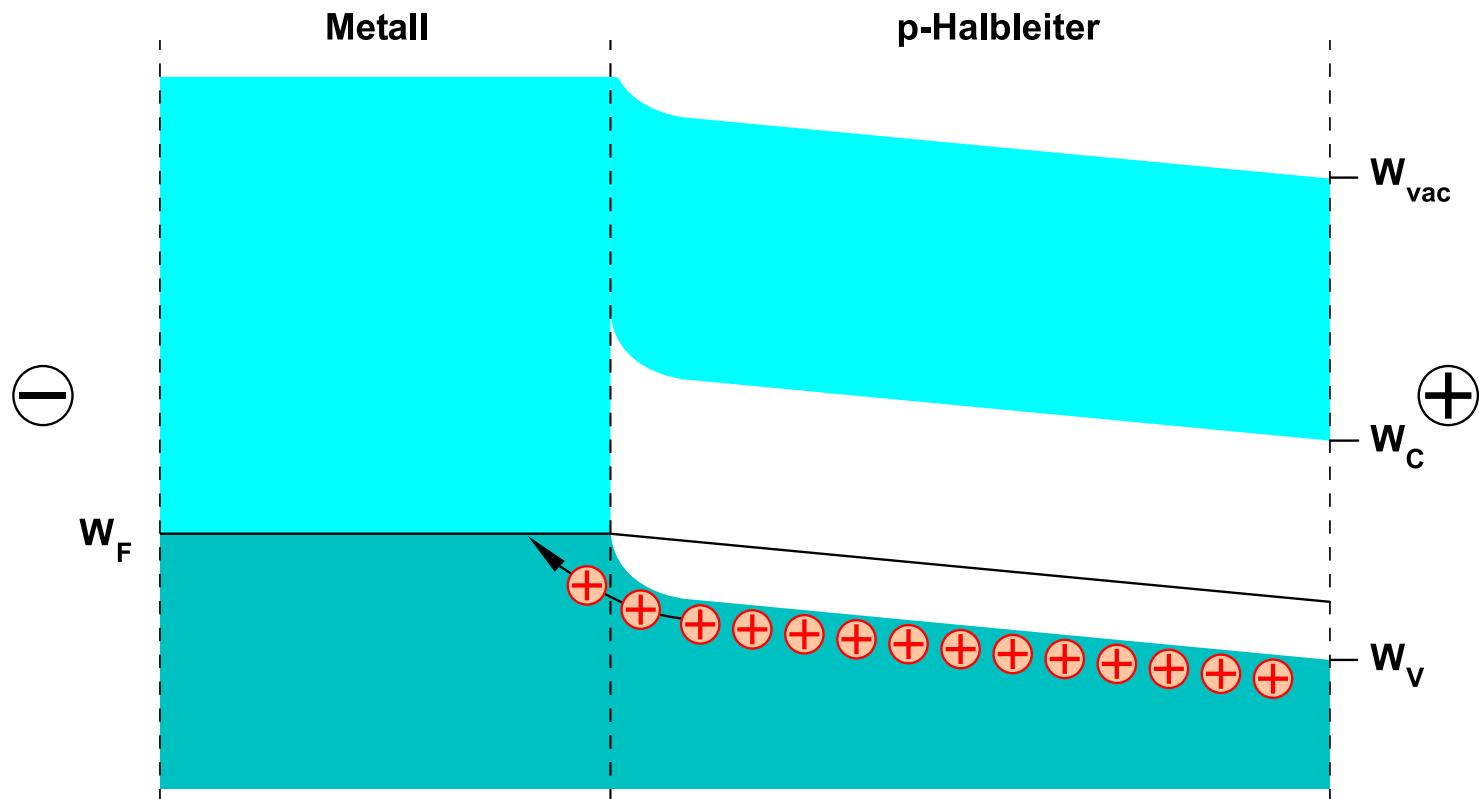




Ohmscher-Kontakt

Übergang von p-Halbleiter zu Metall ($W_M > W_H$)

- Übergang mit äußerer Spannung (Pluspol der Spannung am Halbleiter):

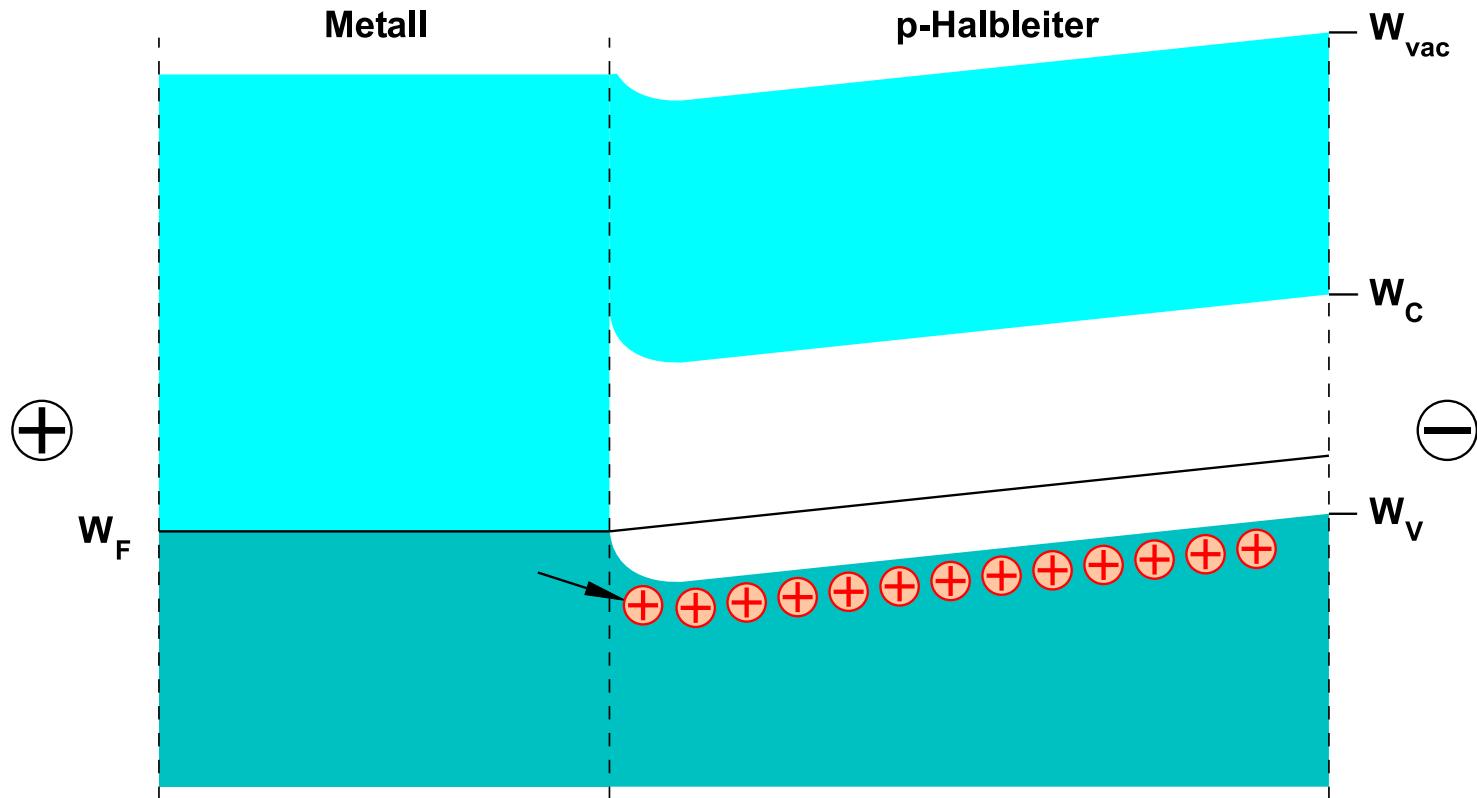




Ohmscher-Kontakt

Übergang von p-Halbleiter zu Metall ($W_M > W_H$)

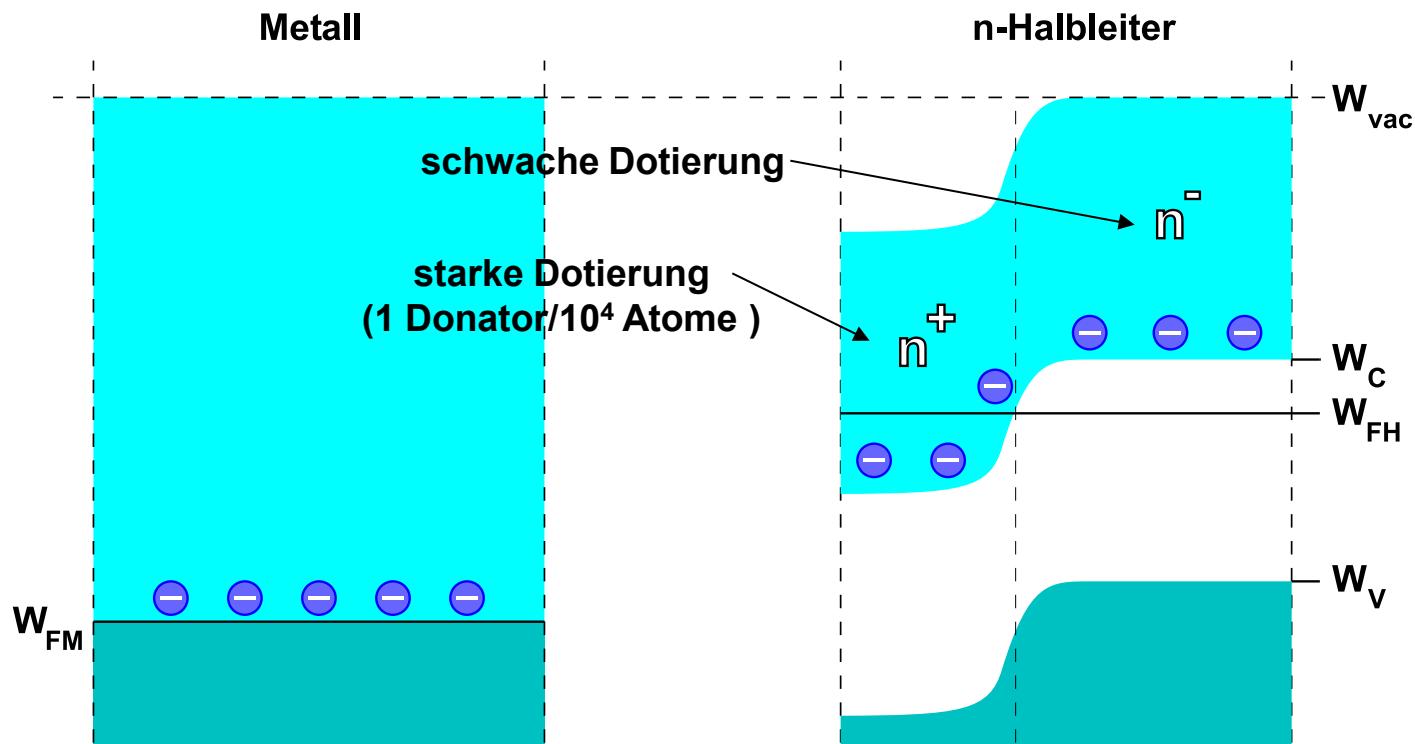
- Übergang mit äußerer Spannung (Pluspol am Metall):





Ohmscher Kontakt durch hochdotierte Halbleiterzwischenschicht

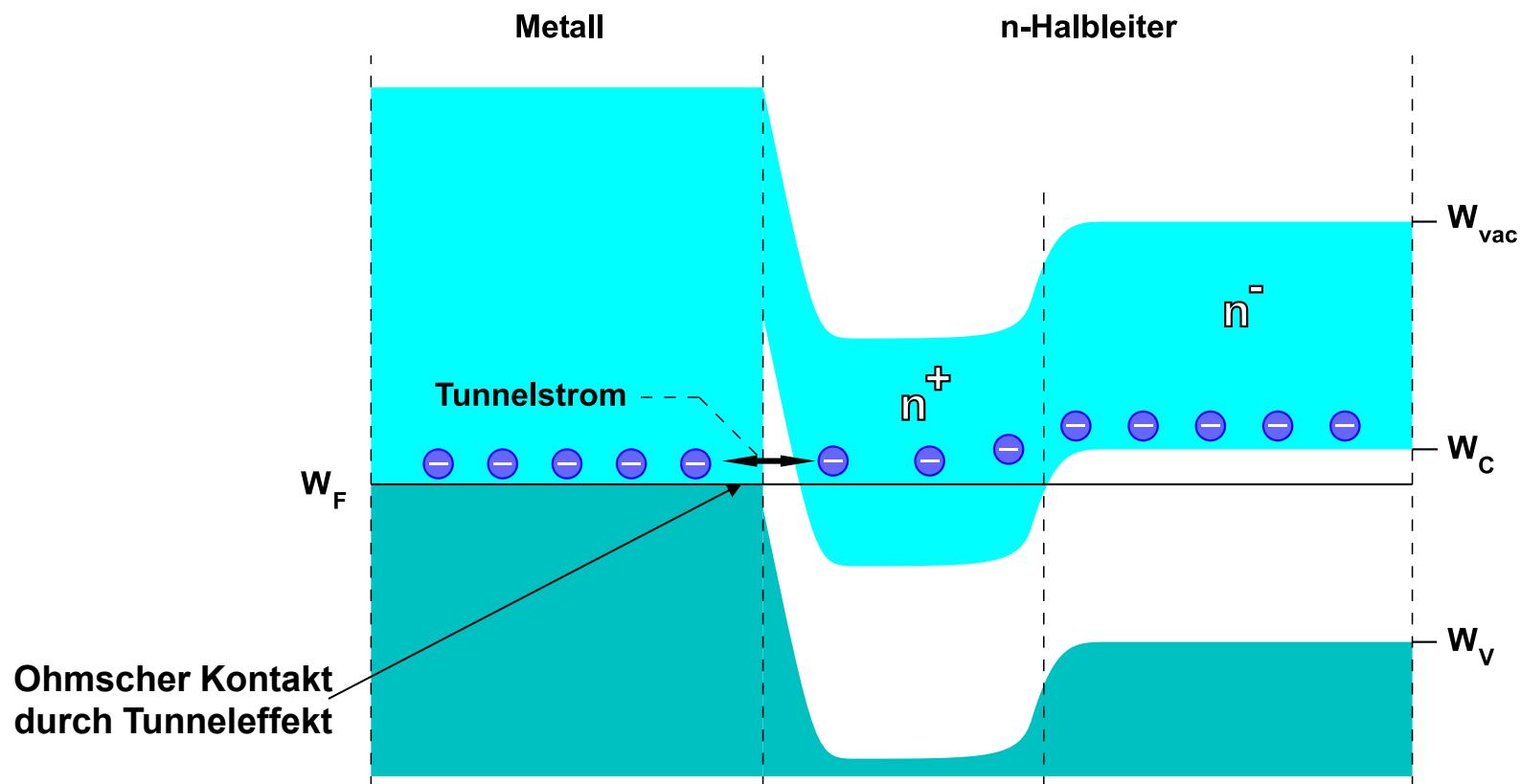
- Realisierung ohmscher Kontakte:
 - Einfügen einer sehr hochdotierten dünnen Halbleiterzwischenschicht
 - Fermi-Niveau im Leitungsband des Halbleiters („entarteter“ Halbleiter)





Ohmscher Kontakt durch hochdotierte Halbleiterzwischenschicht

- Realisierung ohmscher Kontakte (Forts.):

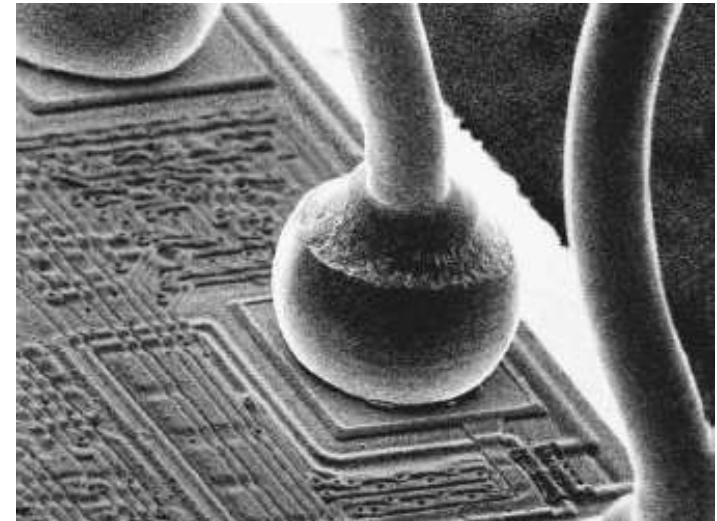
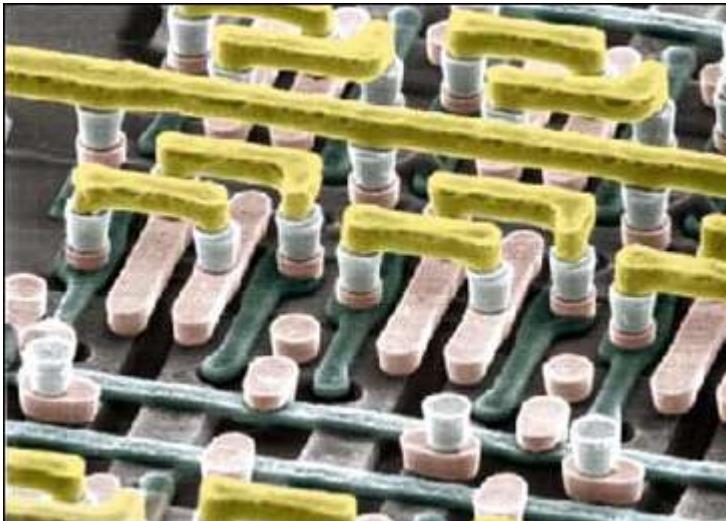




Anwendungsgebiete Ohmscher-Kontakte

- **Anwendungsgebiete:**

- Kontaktierung und Verdrahtung
- Aluminium/Kupfer-Metallisierungenlagen und Bondingkontakte auf Chips



Dynamisches Verhalten / Schalten

Dynamisches Verhalten

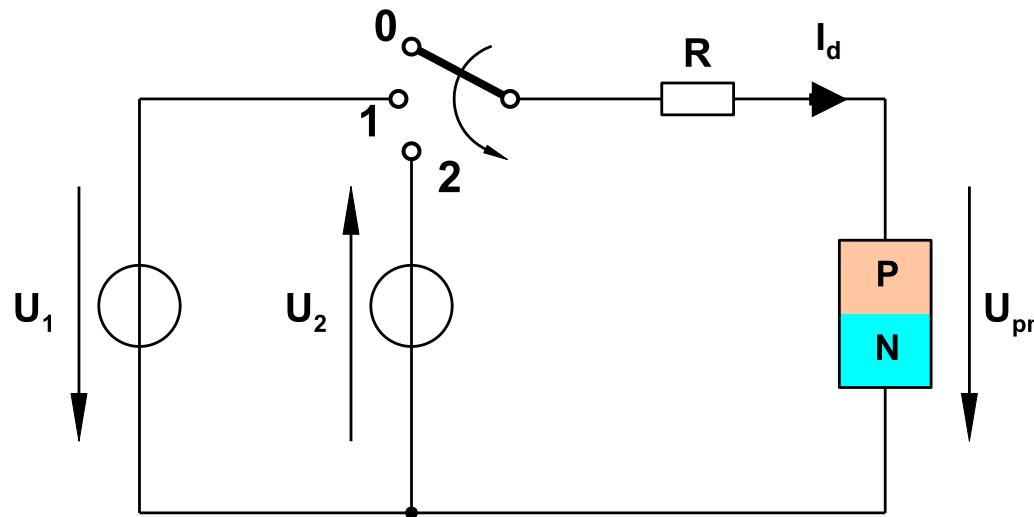
Schalten

Kein Vorgang ist unendlich schnell...

Übergang Leiten→Sperren

Übergang Sperren→Leiten

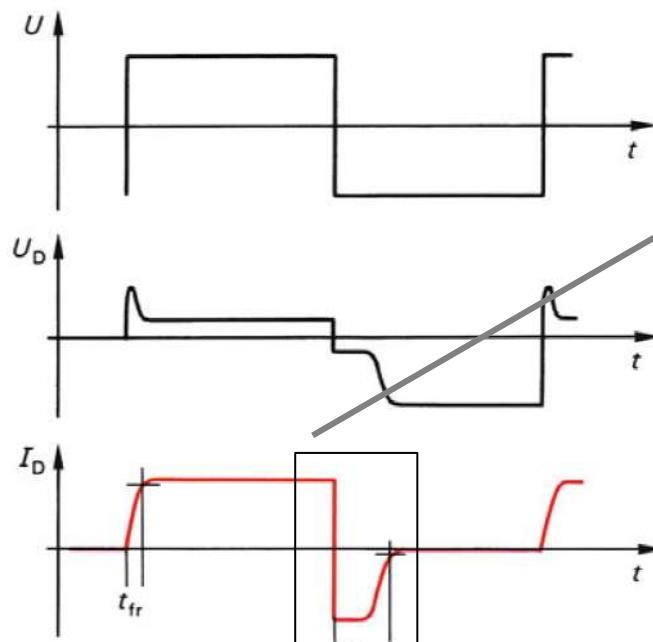
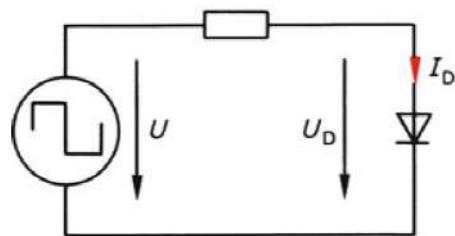
Schalten



Schalterstellungen
 0 offen
 1 Flusspolung
 2 Sperrpolung

Erwartung:
 Strom I_d hört sofort auf zu fließen, wenn von 1 auf 2 umgeschaltet wird

Beobachtung



Ausräumzeit der Diffusionsladung

Laden der Sperrsichtkap.

Verzugszeiten beim Gleichrichten unerwünscht.
Sperrverzug entlädt Siebkondensator
 Einschaltverzug lädt verzögert
→ Effizienz sinkt (mit steigender Frequ.)

Bildquelle: [Her]

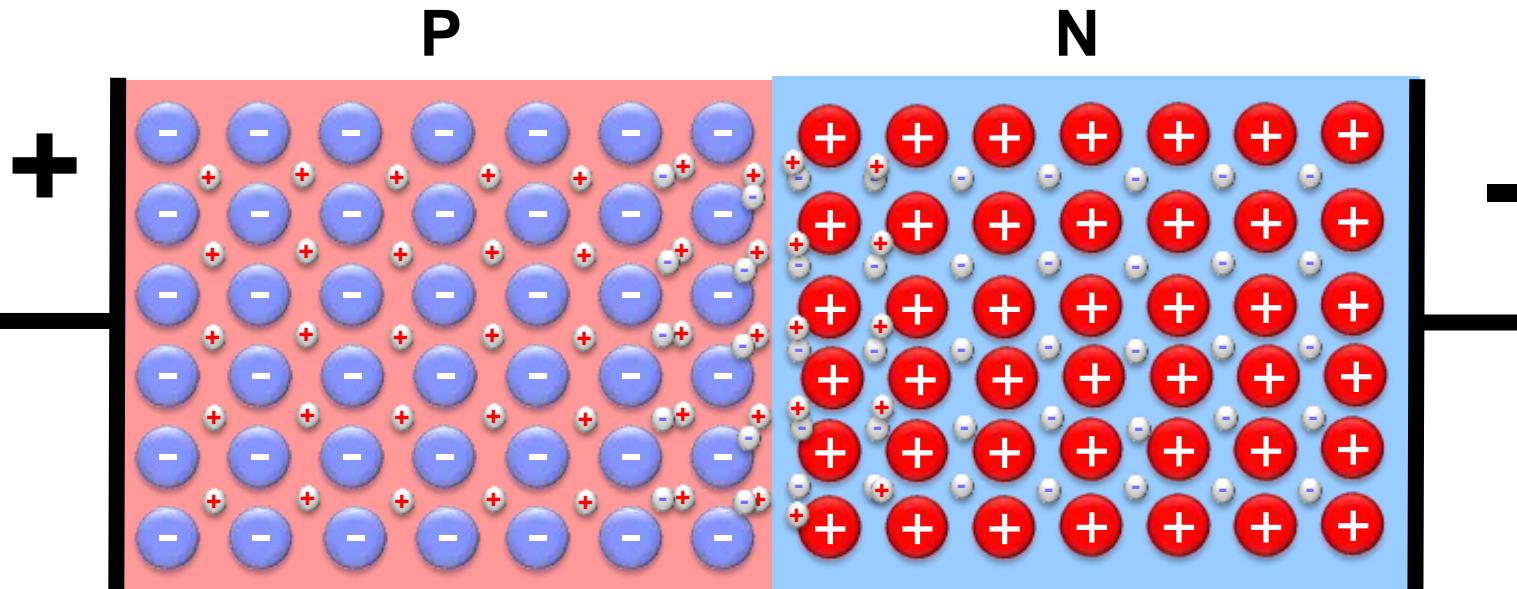
Durchlasspolung / Forward Bias

Raumladungzone verschwunden

Majoritätsträger überqueren Grenzfläche (sind auf Gegenseite Minoritätsträger)

Rekombinieren mit Majoritätsträgern der Gegenseite (aber nicht sofort!!!!)

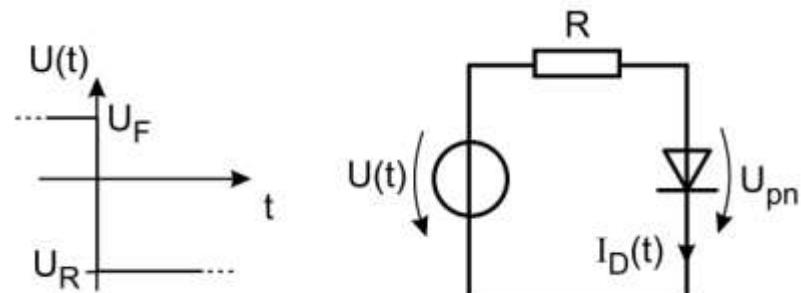
Majoritätsträger fließen aus Quelle nach → Stromfluß



Übergang Sperren

Minoritätsträger

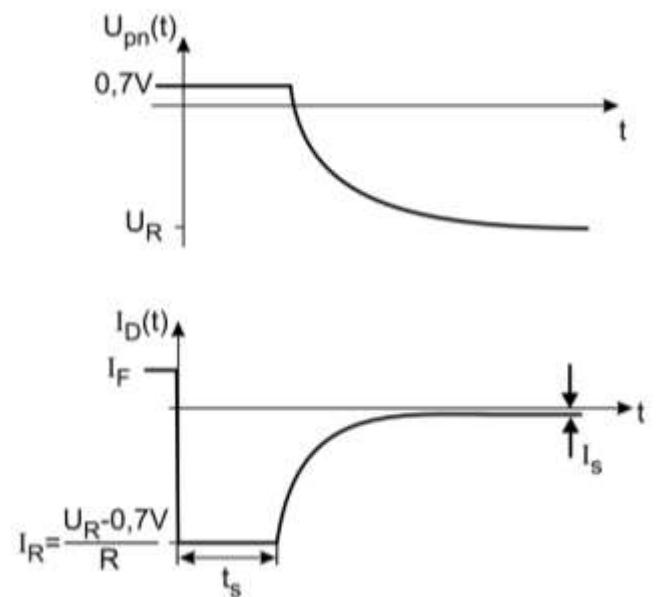
- Überschuss muss abgebaut werden
 - Diffusionsladung
 - umso höher, je höher Durchlassstrom war
- Spannung über Diode ändert sich während „Ausräumen“



Raumladungszone

- Muss aufgebaut werden
 - Bewegliche Ladungsträger müssen „ausgeräumt“ werden
 - = Sperrsichtladung
 - umso höher, je breiter die RLZ also je höher die Sperrspannung
- Spannung über Diode ändert sich Fluss- auf Sperrspannung

- Erst wenn das passiert ist sperrt Diode tatsächlich
- bis dahin fließt weiter Strom
- Verzögerungszeit heißt Sperrverzugszeit (**Reverse Recovery**)



Einschalten

Diode geht vom Sperr- in Durchlassbetrieb

Sperren

- Ausgeprägte Raumladungszone
- kein Stromfluss

Leiten

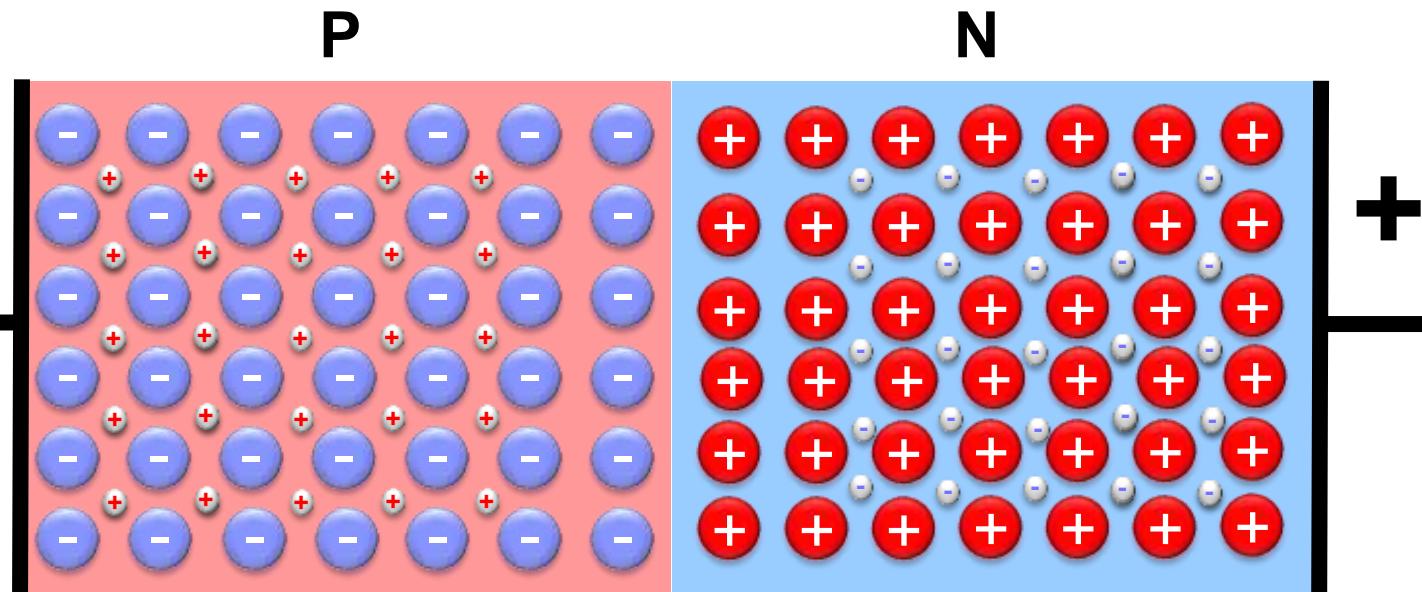
→ Raumladungszone wird abgebaut

- Ladungsträger (Majorität) müssen „nachströmen“ um RLZ zu neutralisieren
- Ladungsmenge: Sperrsichtladung

Sperren

Raumladungszone

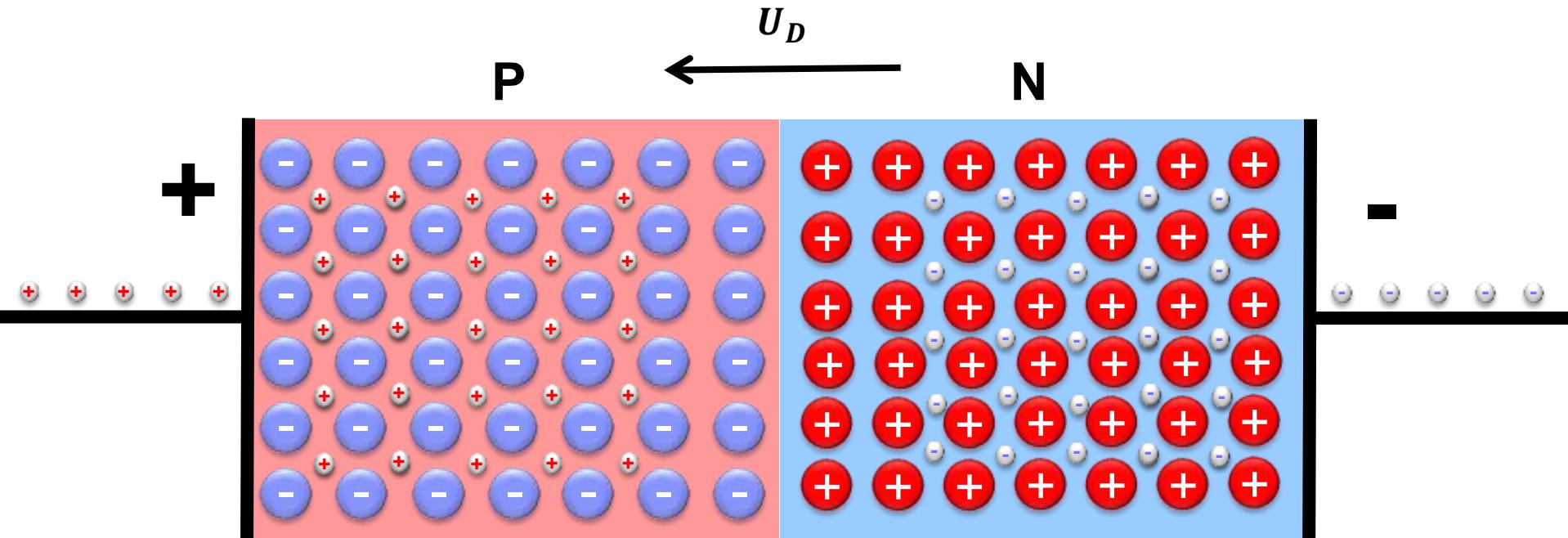
kein (wesentlicher) Stromfluß



Übergang Sperren-Leiten

Raumladungszone wird abgebaut

Majoritätsträger werden aus Quelle „nachgeschoben“



Übergang Leiten

Raumladungszone

- Muss abgebaut werden
 - durch aus dem Bahngebiet nachfließende Majoritätsträger
 - Sperrsichtladung abbauen
 - umso höher, je breiter die RLZ war, also je höher Sperrspannung war

Leiten → Sperren → Leiten

Leitender Zustand

- RLZ ist verschwunden
- Elektronen aus n-Gebiet (Majoritätsträger) überqueren pn-Übergang in p-Gebiet. Sind dort Minoritätsträger bis sie mit Löchern rekombinieren
- Löcher aus p-Gebiet (Majoritätsträger) überqueren pn-Übergang in n-Gebiet. Sind dort Minoritätsträger bis sie mit Elektronen rekombinieren
- MINORITÄTSTRÄGERÜBERSCHUSS / DIFFUSIONSLADUNG durch noch nicht rekombinierte Ladungsträger

Plötzliches Anlegen von Sperrspannung

- Überzählige Minoritätsträger (Diffusionsladung) müssen „ausgeräumt“ werden
- RLZ muss aufgebaut werden / „Sperrsichtkapazität laden“
- Strom fließt noch kurze Zeit weiter
- „Ausräumzeit“, „Sperrverzugszeit“, „Reverse Recovery Time“ ($t_{rr} = 2 - 200\text{ns}$)

Plötzliches Anlegen von Durchlassspannung

- Majoritätsträger müssen Sperrsicht „auffüllen“, erst dann beginnt die Diffusion (Sperrsicht-kapazität entladen)
- Einschaltverzögerungszeit „Forward Recovery Time“ ($t_{fr} = 0,5 - 50\text{ns}$)

Temperaturabhängigkeiten

Praktisch alle Parameter der Diode sind stark temperaturabhängig!

Durchlassspannung

- Sinkt bei Raumtemperatur um 2 mV/Grad

Sperrsstrom / Leakage Current

- Durch Minoritätsträger
- Steigt mit der Temperatur exponentiell
- Ca. Verdoppelung alle 10 Grad

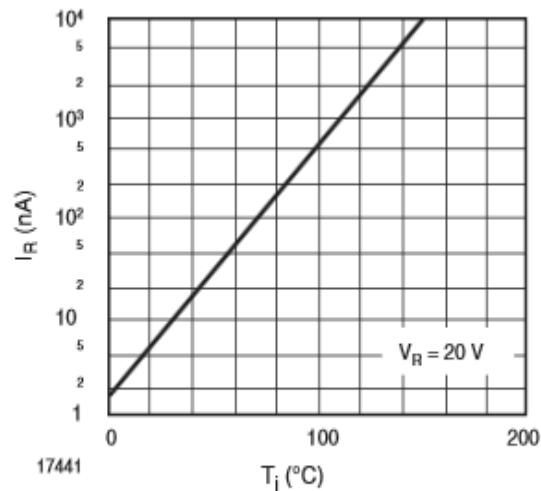
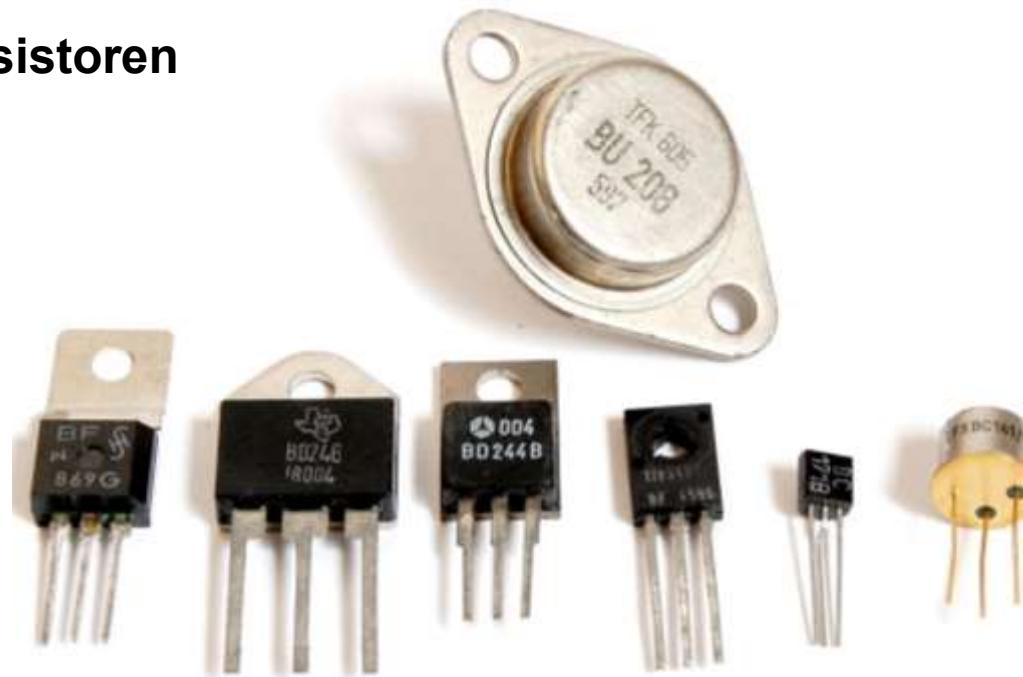


Fig. 5 - Leakage Current vs. Junction Temperature

Bipolar Transistoren



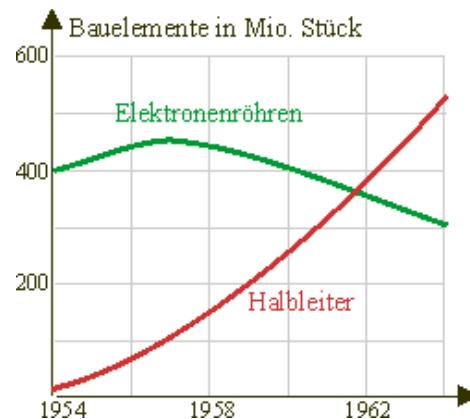
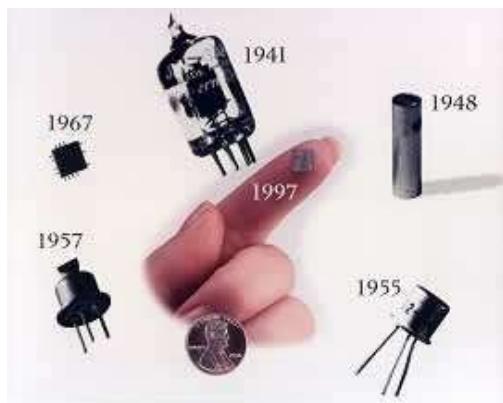
www.dhbw-mannheim.de

Literatur

[Her]	Hering, Bressler, Gutekunst: „Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, Springer Verlag 2014
[Tie]	Tietze, Schenk: „Halbleiter-Schaltungstechnik“, Springer Verlag
[Rei]	Reisch: „Elektronische Bauelemente“, Springer Verlag
[Goe]	Göbel: „Einführung in die Halbleiterschaltungstechnik“, Springer Verlag
[Boe]	Böhmer: „Elemente der angewandten Elektronik“, Springer Verlag

Einführung

- Erfunden 1947
- Name fälschlich von ursprünglichem Verständnis
- Bauteil wäre eine stromgesteuerte Spannungsquelle $U = \text{Konstante} \times I$
- ...Transresistanz → Transistor
- Heute aber: Transistor = spannungsgesteuerte Stromquelle



Spannungslos

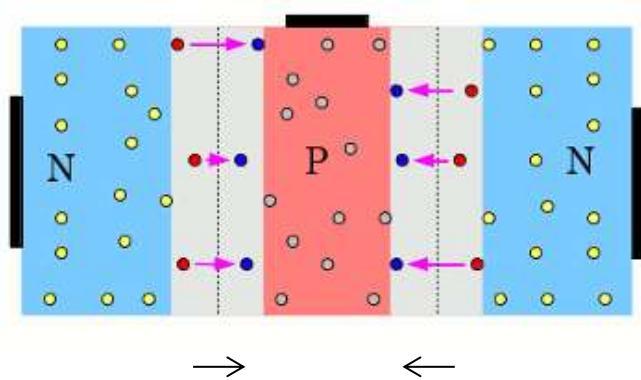


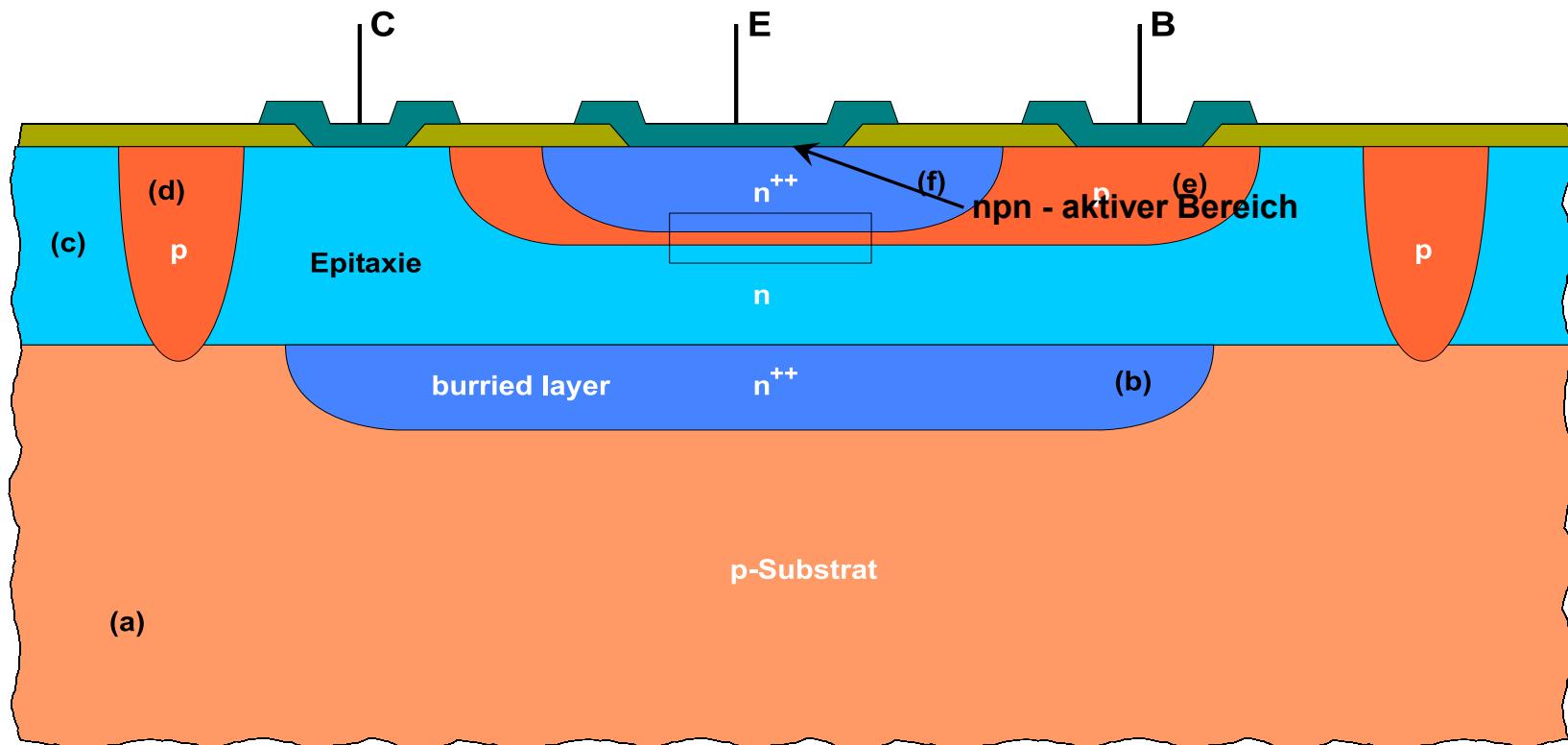
Bild: homofaciens.de

- pn Übergänge wie gehabt
- Elektronen und Löcher diffundieren über Grenzflächen
- Rekombinieren
- Hinterlassen ionisierte Gitteratome → Raumladungszonen



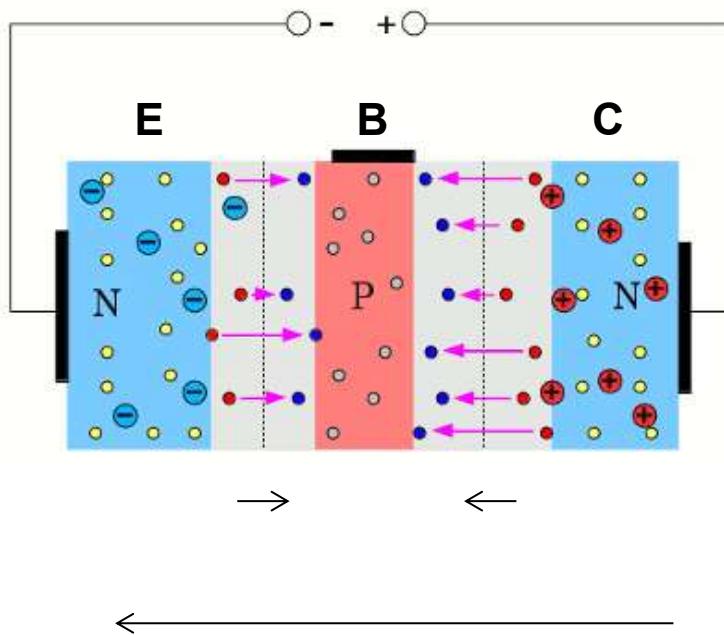
Tatsächlich sieht der Aufbau anders aus
▪ Basis dünn
▪ Emitter stark dotiert
▪ Kein „Stapel“

Tatsächlicher Aufbau eines Planar-Epitaxial-npn-Transistors



Aufbau am Beispiel eines modernen npn-Transistors, der als Teil eines integrierten Schaltkreises in planarer Epitaxialtechnik hergestellt ist.

Spannung zwischen Emitter und Kollektor



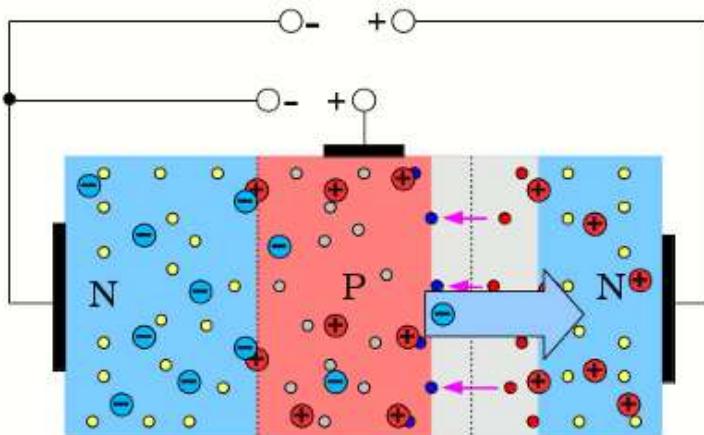
Quelle zwischen Kollektor und Emitter

CB-Übergang

- Spannung in Sperrrichtung CB-Diode
- RLZ wird größer

Kein Stromfluss

Spannung an der Basis



Mittlerer Schicht (p) werden Elektronen entzogen

- Emitter-Basis pn-Übergang wird leitend
- Elektronen werden in Basis injiziert. Schicksale
- Rekombination mit Löchern → Basistrom
- Direkt zum Basisanschluss fließen → Basisstrom
- Diffusion durch die Basis bis zur Basis-Kollektor RLZ
 - Dort starkes elektrisches Feld , das Elektronen zum Kollektor hin beschleunigt
 - **Basis-Kollektor Übergang wird auch leitend**

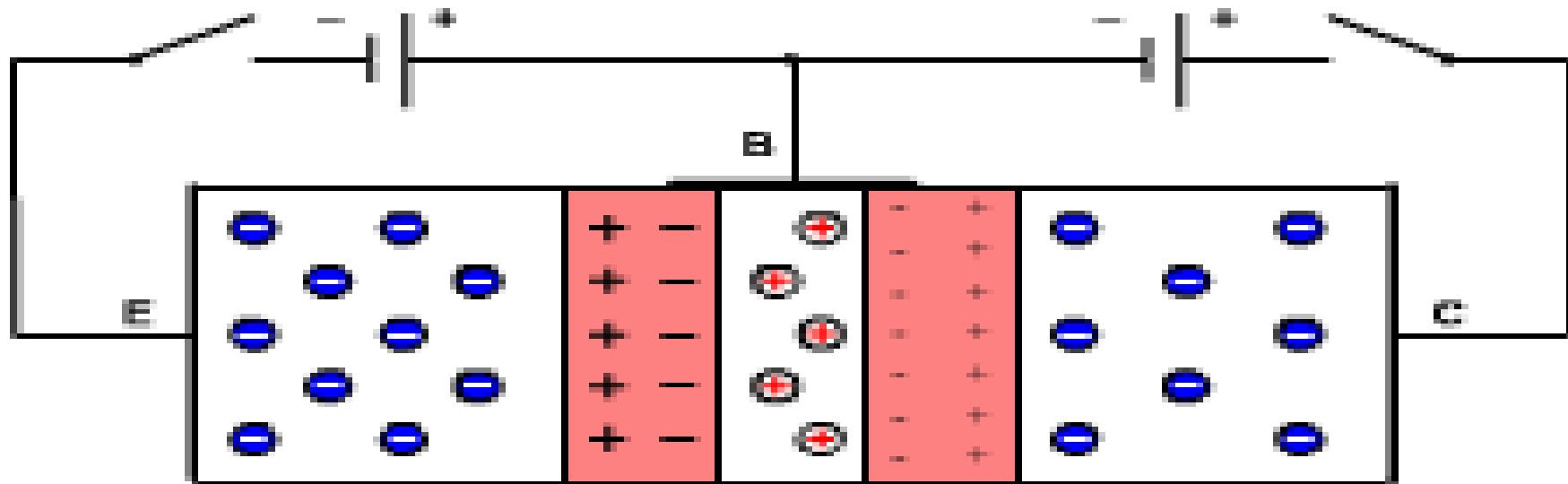
Early-Effekt

- Wird U_{CE} vergrößert
- RLZ der CB-Diode (sperrt!) wird breiter
- Basis wird noch schmäler
„Basisbreitenmodulation“
- I_C wird größer
- → schwache Steigung der $I_C=f(U_{CE})$ -Geraden

...wird U_{CE} immer weiter erhöht

- Spannungsdurchbruch der CB-Diode

■ p-n-Transistormodell



Der p-n-Transistor im sogenannten Zonenmodell

(Überlappungskern ohne Abstoßung von eingeschlossenen Elektronen)

Der rechte Block hat zwei Elektronen. Es soll beide und einen aus dem linken Block entfernen.

Der mittlere Block ist die Basiszone. Ein p-dotiertes Sauerstoff-Magnesium-Zentrum.

Der linke Block ist ein N-dotiertes Silizium-Zentrum. Es soll gezeigt werden, dass es Elektronenabstoßung gibt.

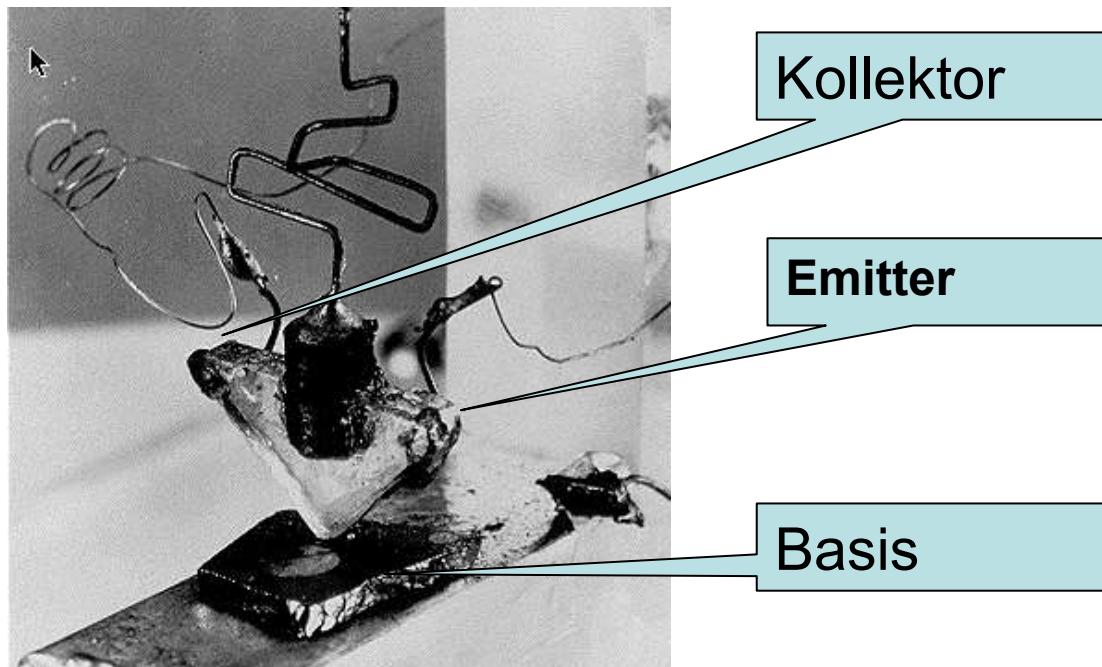
Um dies zu demonstrieren, zwischen den n- und p-dotierten Zentren soll die potentielle Energie der beiden Gaußschichten mit der entsprechenden Potentiellenergie verglichen werden.

Lösungsweg: [Klick hier](#)

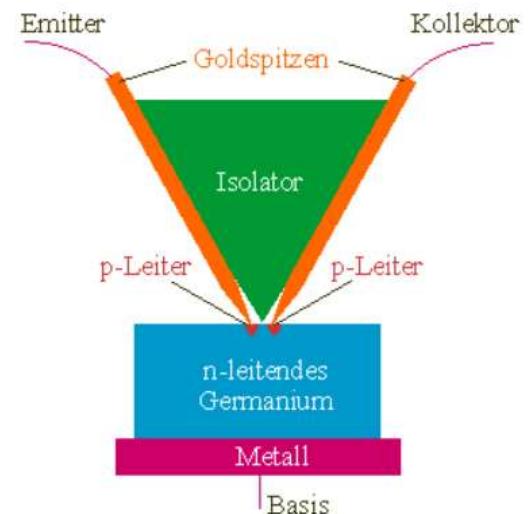
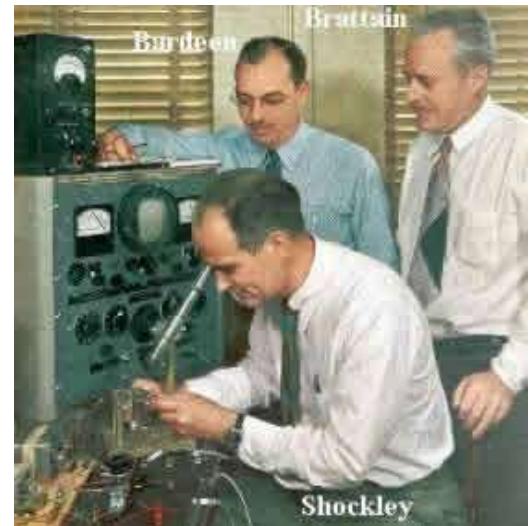
© Dr. Michael Schäfer, www.michaelschaefer.de

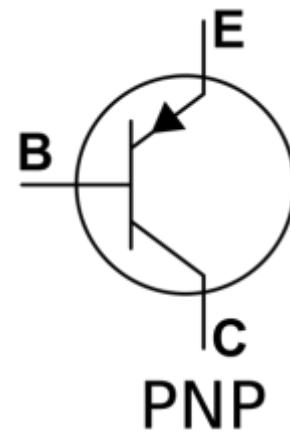
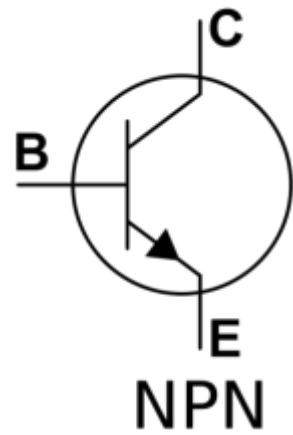


Schalsymbol

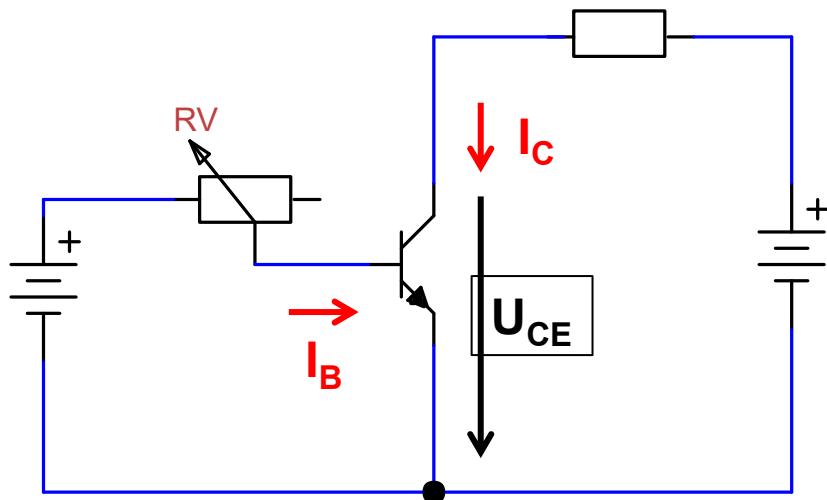


Erster Transistor von Bardeen, Shockley und Brattain 1947





Stromverstärkungs-Kennlinie $I_C(I_B)$

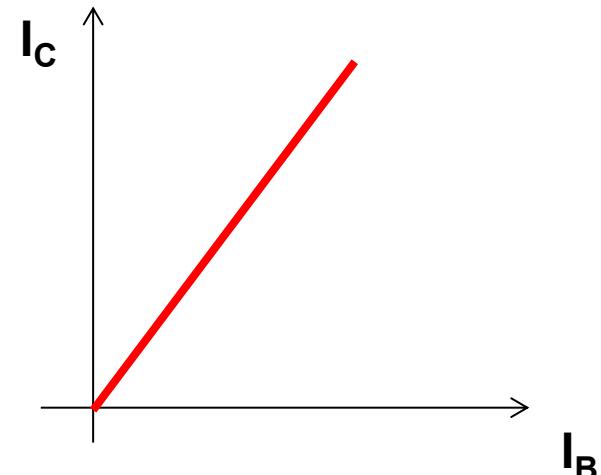


Stromverstärkung

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

...abhängig von

- Kollektor-Emitter Spannung U_{CE}
- Temperatur
- Frequenz



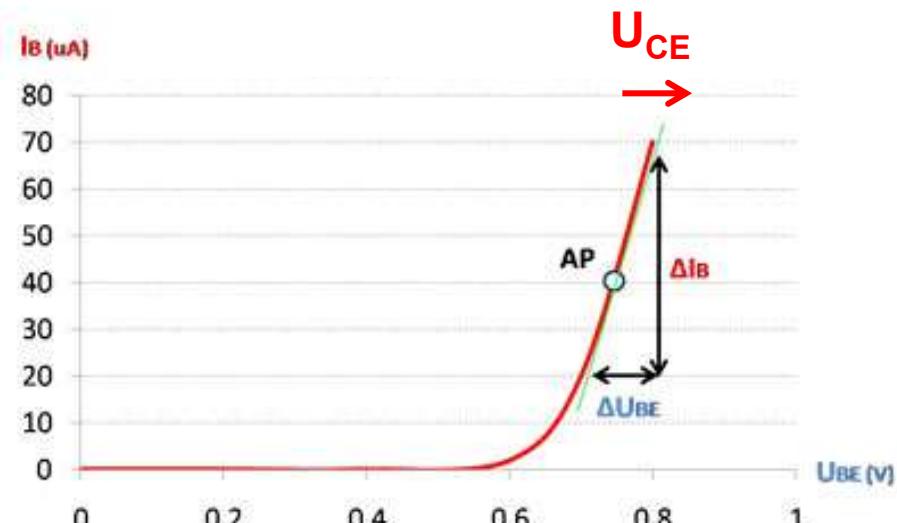
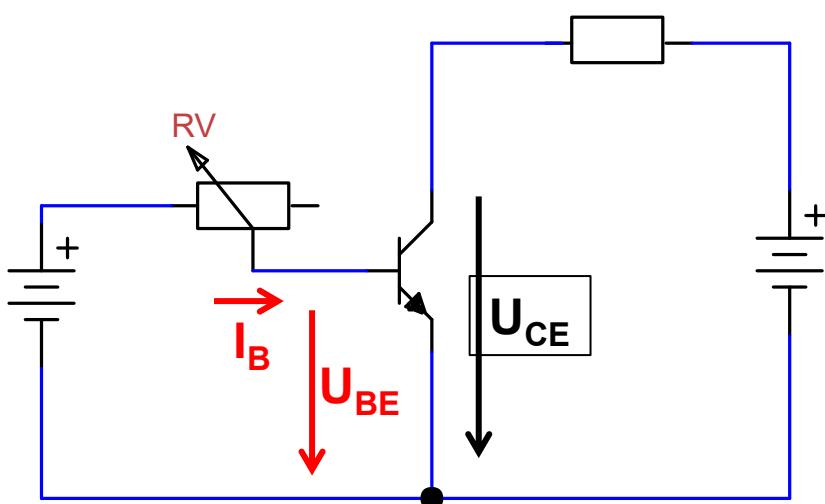
Differentielle Stromverstärkung

$$\beta = \left. \frac{dI_C}{dI_B} \right|_{U_{CE}=\text{konst}}$$

Transitfrequenz:

$$\beta(f_T) = 1$$

Eingangskennlinie $I_B = f(U_{BE})$



Diode...

Shockley Gleichung

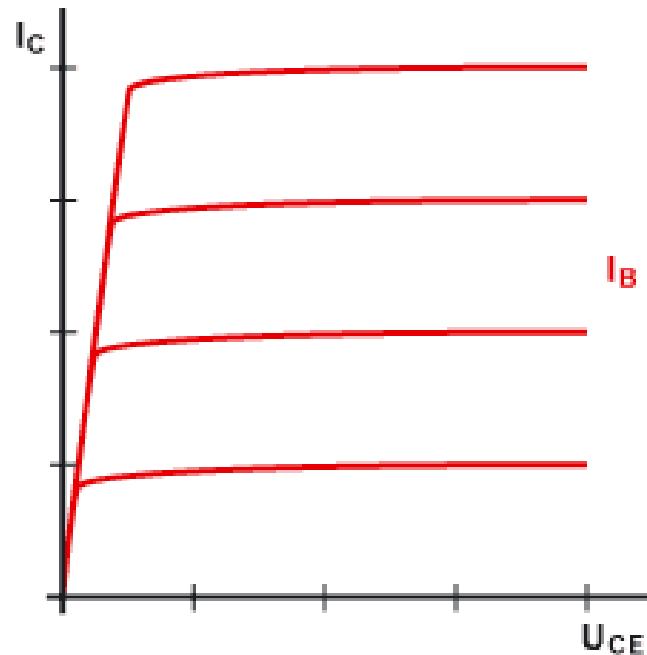
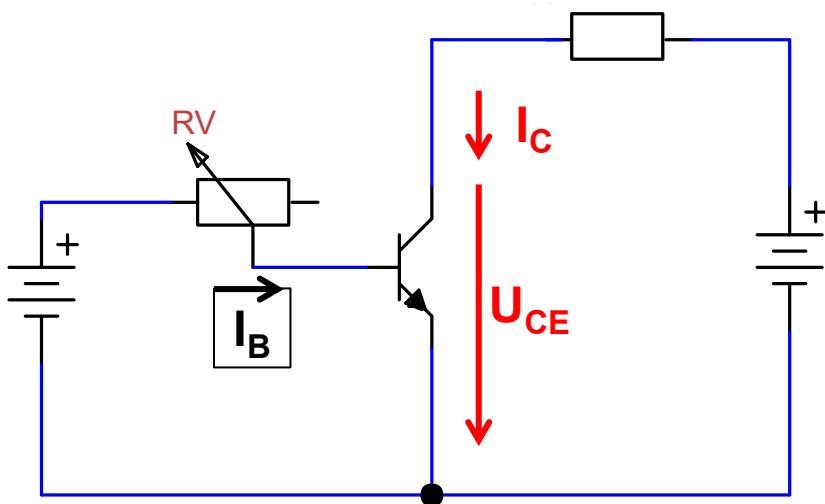
$$I_B = I_{B0} \cdot \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

I_B geringfügig Abhängig von U_{CE}

Differentieller Eingangswiderstand

$$r_{BE} = \left. \frac{dU_{BE}}{dI_B} \right|_{UCE=konst}$$

Ausgangskennlinie $I_C = f(U_{CE})$



4 Betriebsarten

- Sperren ($I_B=0$)
- Normalbetrieb ($I_B>0, U_{CB}>0$)
- Übersteuerung ($U_{CB}<0$)
- Sättigung ($U_{CE}=U_{CE_SAT}$)

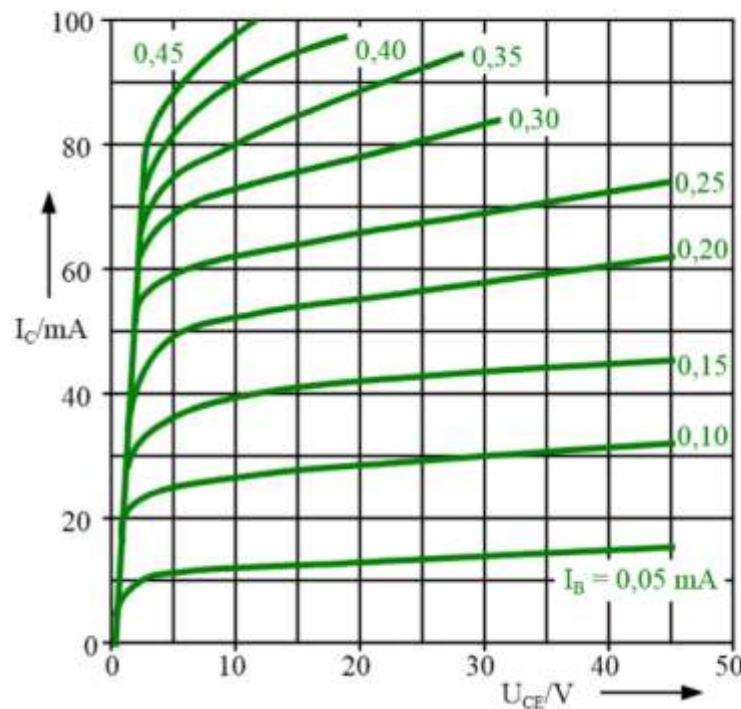
**Differentieller
Ausgangswiderstand**

$$r_{CE} = \left. \frac{dU_{CE}}{dI_C} \right|_{IB}$$

Ausgangskennlinie

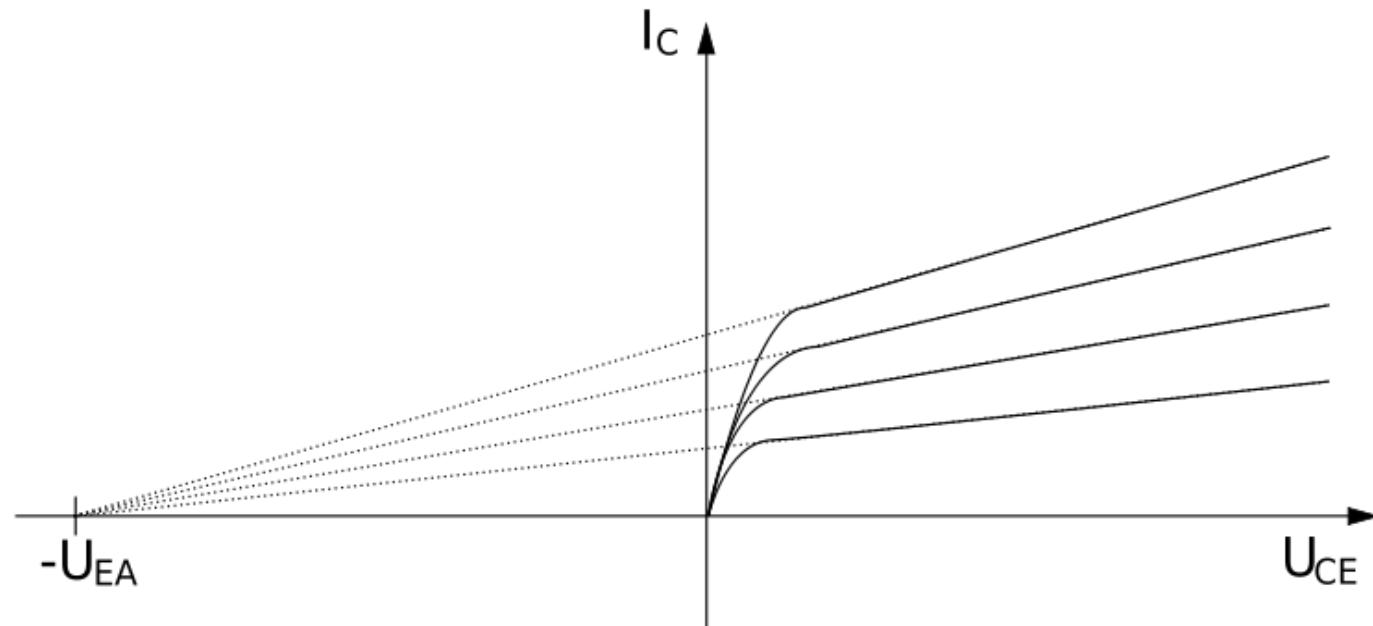
- Der Zusammenhang von dem Basisstrom I_B und dem Kollektorstrom I_C (Stromsteuerkennlinie).

Ausgangskennlinie des NPN-Transistors BCY 59



Ausgangskennlinie - Early Effekt

- I_C nicht ganz konstant, sondern leicht steigend mit U_{CE}
- RLZ der CB Diode verbreitert sich mit steigender U_{CE} → Basis wird schmäler (wird moduliert) → Strom steigt
- „Basisweitenmodulation“



Quelle: wikipedia

Spannungsrückwirkung-Kennlinie $U_{BE} = f(U_{CE})$

Rückwirkung der Kollektorspannung auf die Basisspannung

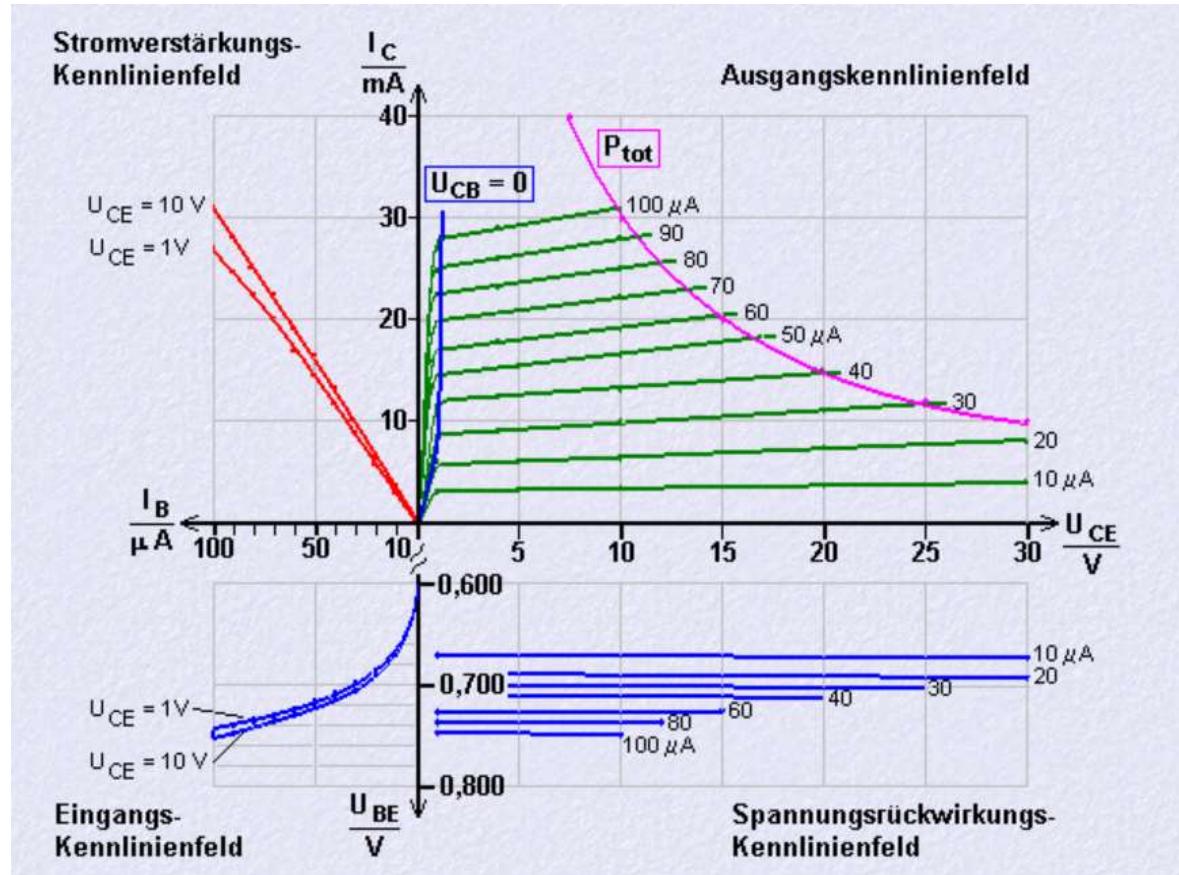
... vorhanden, aber sehr gering (und unerwünscht)

Differentieller Rückwirkungsfaktor

$$D = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B}$$

Einfluss auf Schaltungen im Allgemeinen vernachlässigbar

4-Quadranten Kennlinienfeld



Einzelne Kennlinienfelder werden so gedreht, dass sie mit den gemeinsamen Achsen in ein Schaubild passen

Wozu das nützlich ist, sehen wir gleich

Reduziertes Transportmodel

Beschreibt das Gleichstromverhalten

- Dioden werden als ideal angenommen
- Sperrströme werden vernachlässigt

$$I_C = B \cdot I_B = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

$$I_B = \frac{I_C}{B} = \frac{I_S}{B} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

$$I_E = -(I_C + I_B) = -(1 + B)I_B$$

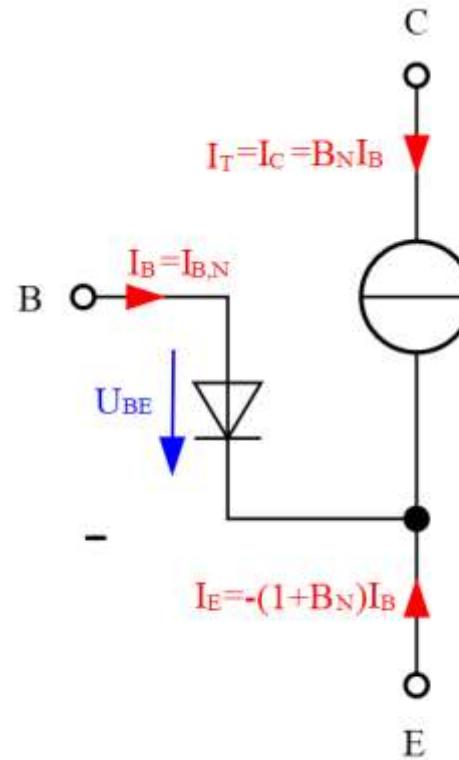


Bild: wikipedia

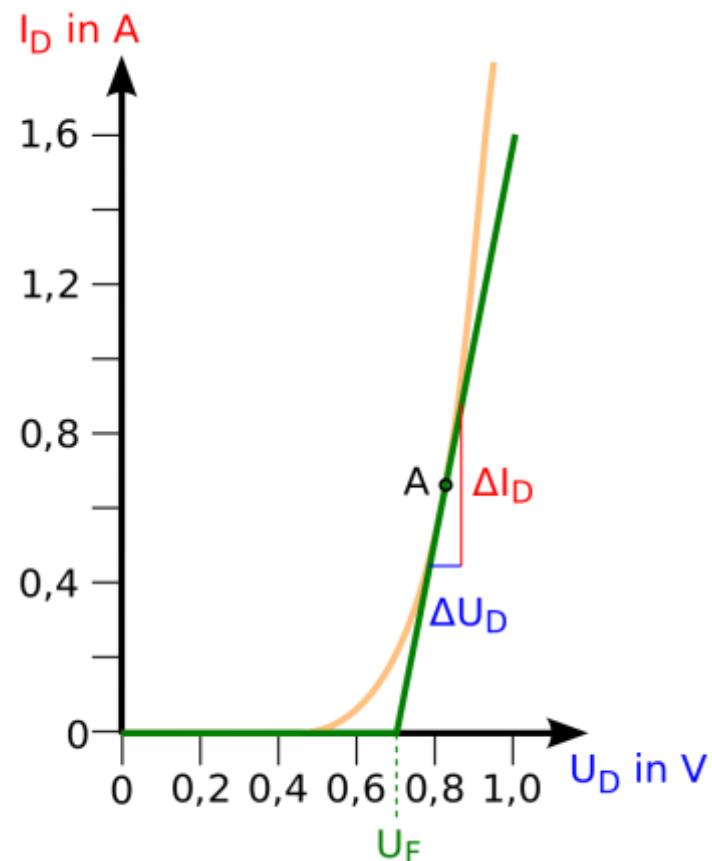
Großsignal / Kleinsignal

Großsignal

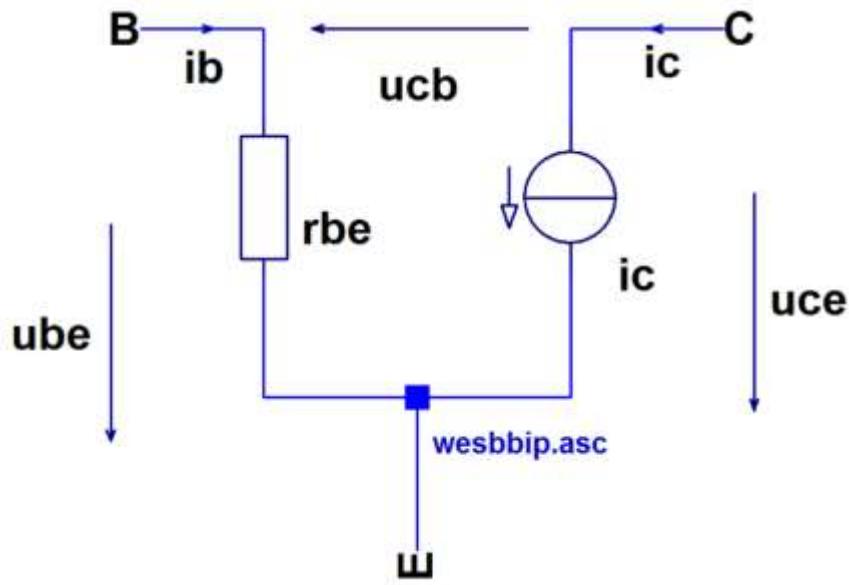
- Gleichspannung
- Absolut
- Bestimmt Verhalten von Baugruppe
- Stellt Arbeitspunkt ein
- Auch nichtlinear

Kleinsignal

- Meist Wechselgrößen
- Verändern Verhalten der Baugruppe NICHT
- Lineares Verhalten
- Differentielles Verhalten um einen kleinen Bereich des Arbeitspunktes herum



Wechselstrom Ersatzschaltbild (WESB)



ACHTUNG LINEARISIERUNG

- BE-Diode $\rightarrow r_{be}$
- ESB gilt nur für differentielle Spannungs- / Stromänderungen
- Parameter können vom Arbeitspunkt abhängig sein

Gleichungen

$$i_b = \frac{u_{be}}{r_{be}}$$

$$i_c = \beta \cdot i_b$$

Parameter

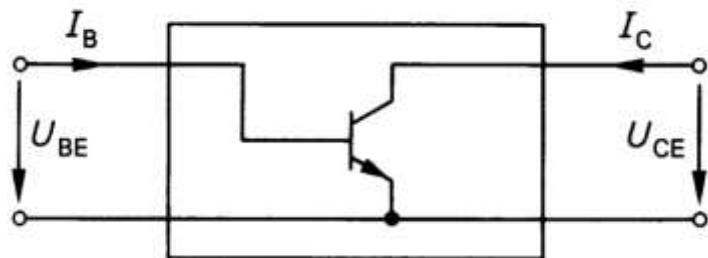
Differentielle Stromverstärkung $\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$

Differentieller Basis-Emitter-Widerstand: $r_{be} = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_b}$

Transistor als Vierpol / Kleinsignal ESB



Nur Kleinsignal

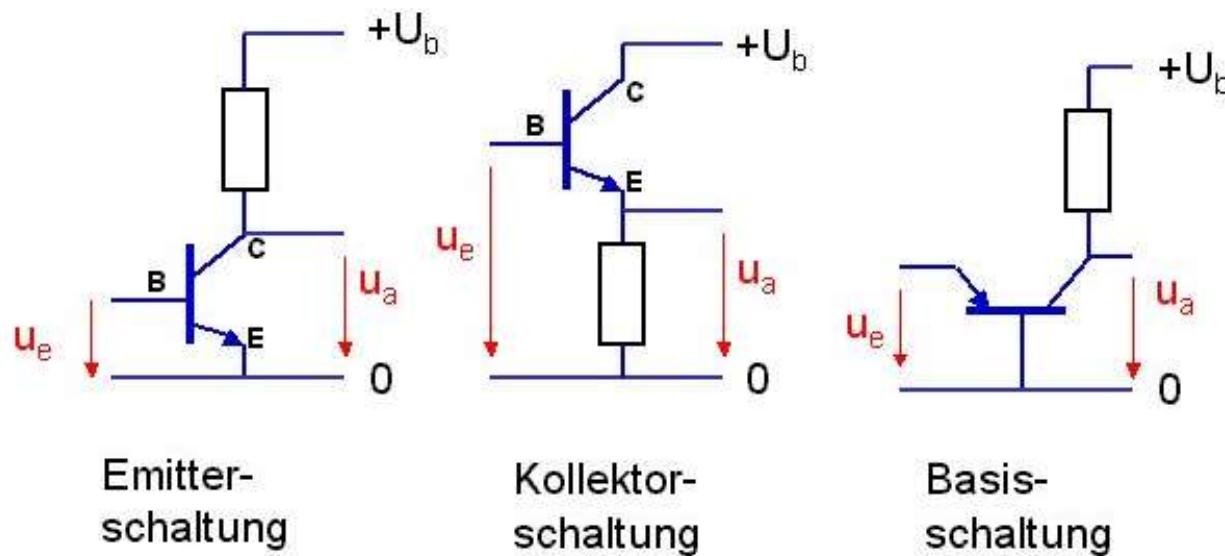


Abhängigkeiten (Differentiell)

- I_B von U_{BE} → Eingangsimpedanz r_{BE}
- I_C von U_{CE} → Ausgangsimpedanz $\frac{1}{g_a}$
- I_C von I_B → Stromverstärkung β
- I_B von I_c → Rückwirkung D

Grundschaltungen

Schaltung nach dem Anschluss benannt der WEDER als Eingang NOCH als Ausgang dient

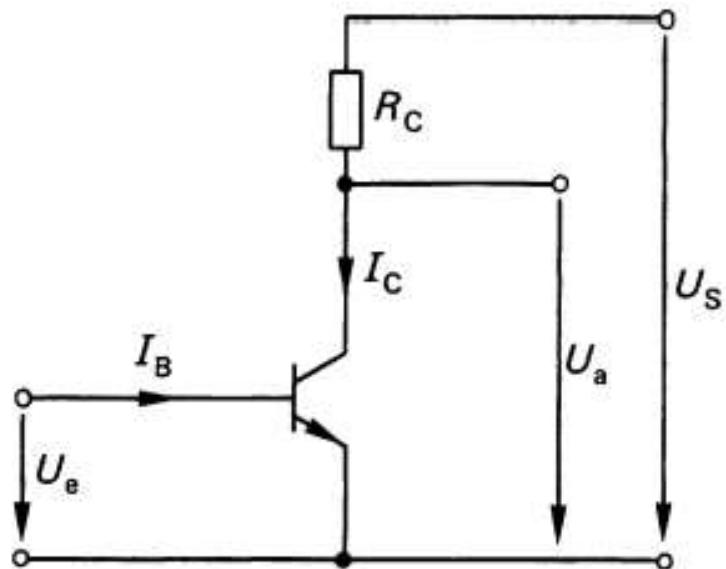


Emitter-schaltung

Kollektor-schaltung

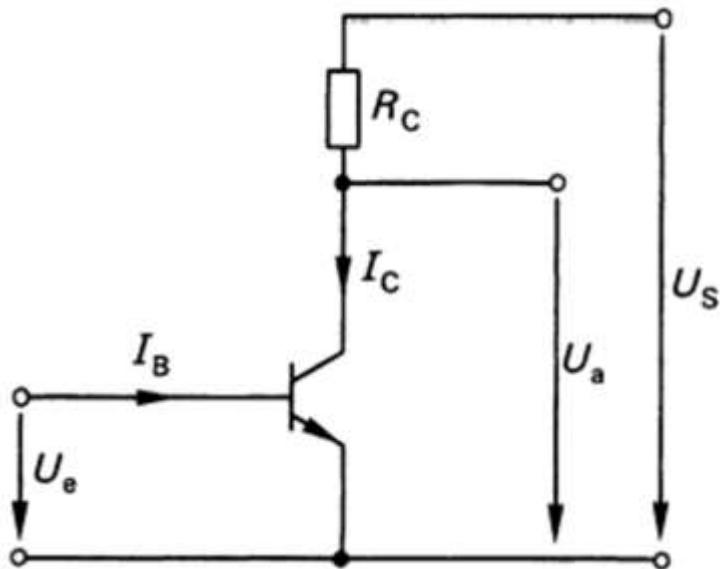
Basis-schaltung

Emitterschaltung



Versorgungsspannung U_S
Eingangsspannung U_E
Ausgangsspannung U_A
Kollektorwiderstand R_C

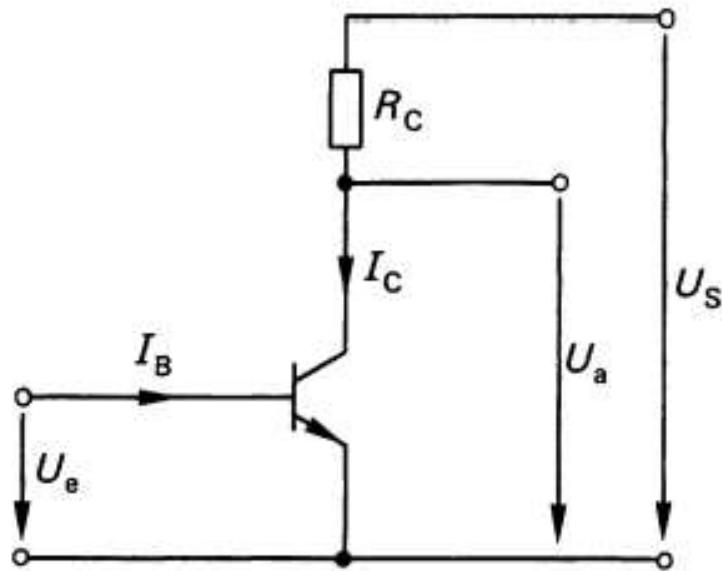
Sperren



Sperren

- Basistrom < 0
- BE Diode sperrt
- CB Diode sperrt
- IC nur Reststrom

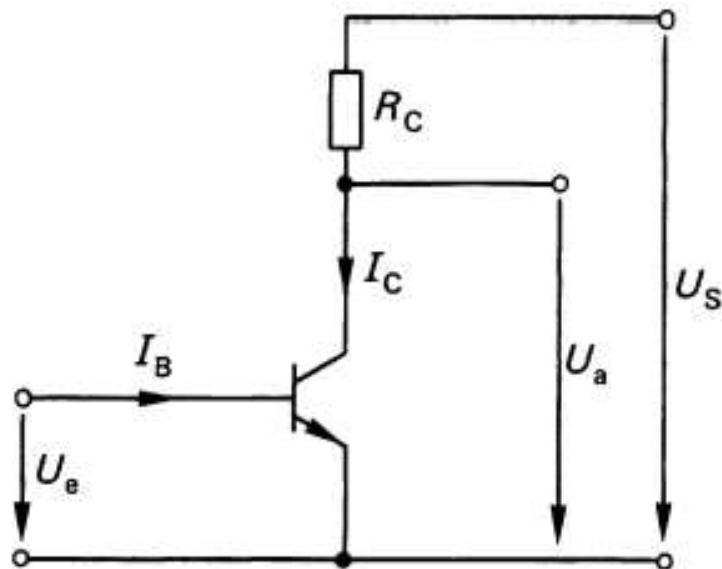
Normalbetrieb



Normalbetrieb / Aktiver Betrieb

- BE Diode leitet
- CB Diode sperrt
- $I_C \sim I_B$, U_{CE} fällt

Übersteuerung

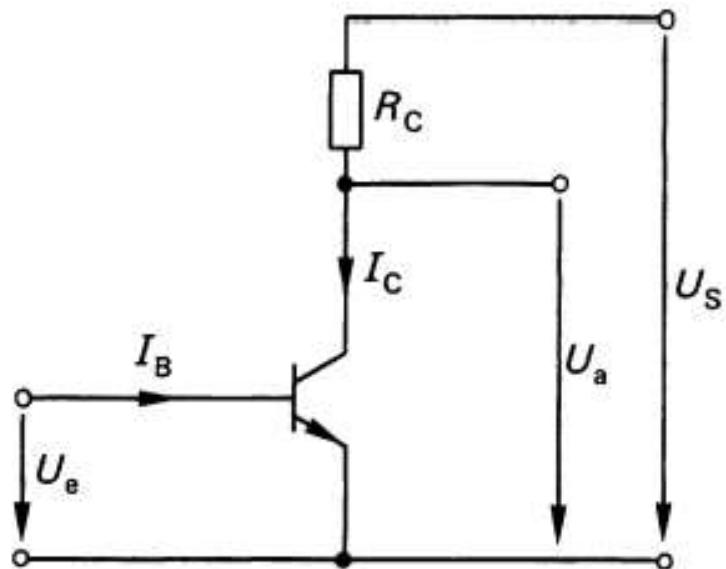


Übersteuerungsgrenze

- $U_{CE} = U_{BE}$
- $U_{BC} = 0$
- $U_a = U_{BE}$

Übersteuerung

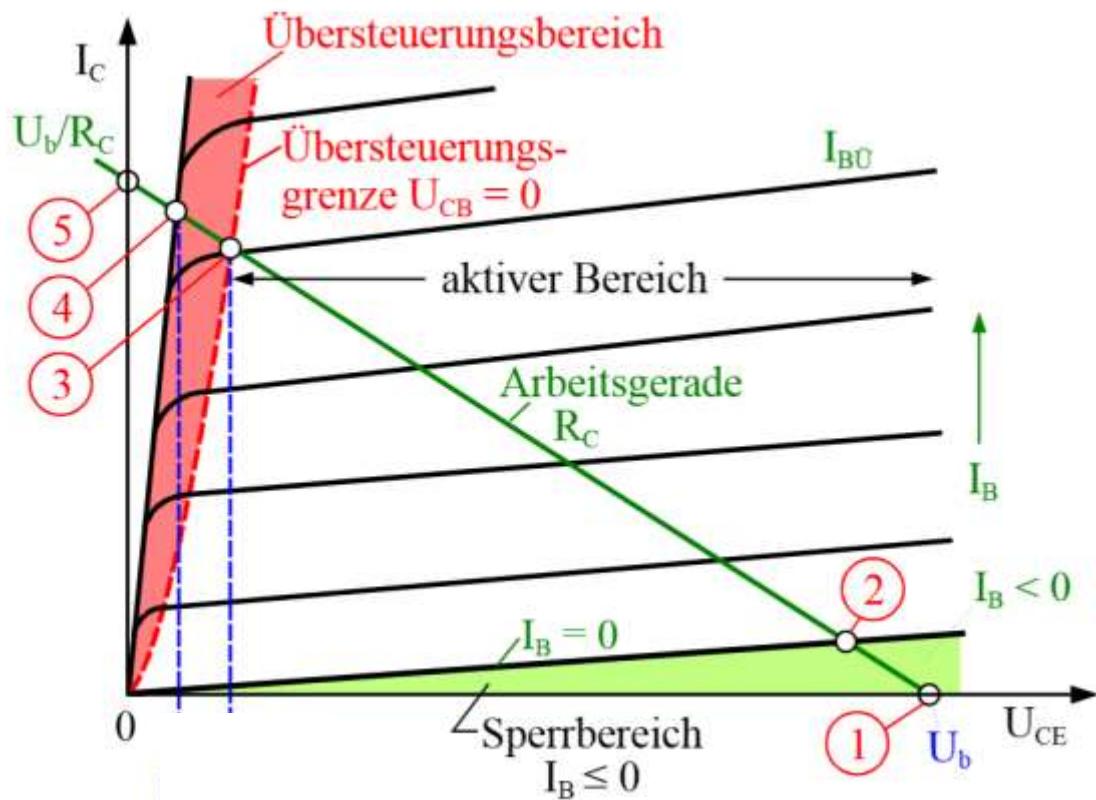
Sättigung



Sättigung

- $U_{CE} = U_{CE_SAT}$
- U_{CB} negativ
- CB Diode voll leitend
- BE Diode voll leitend
- I_C nimmt nicht mehr zu
- CE Strecke hat niederohmigsten Zustand erreicht

Betriebsbereiche



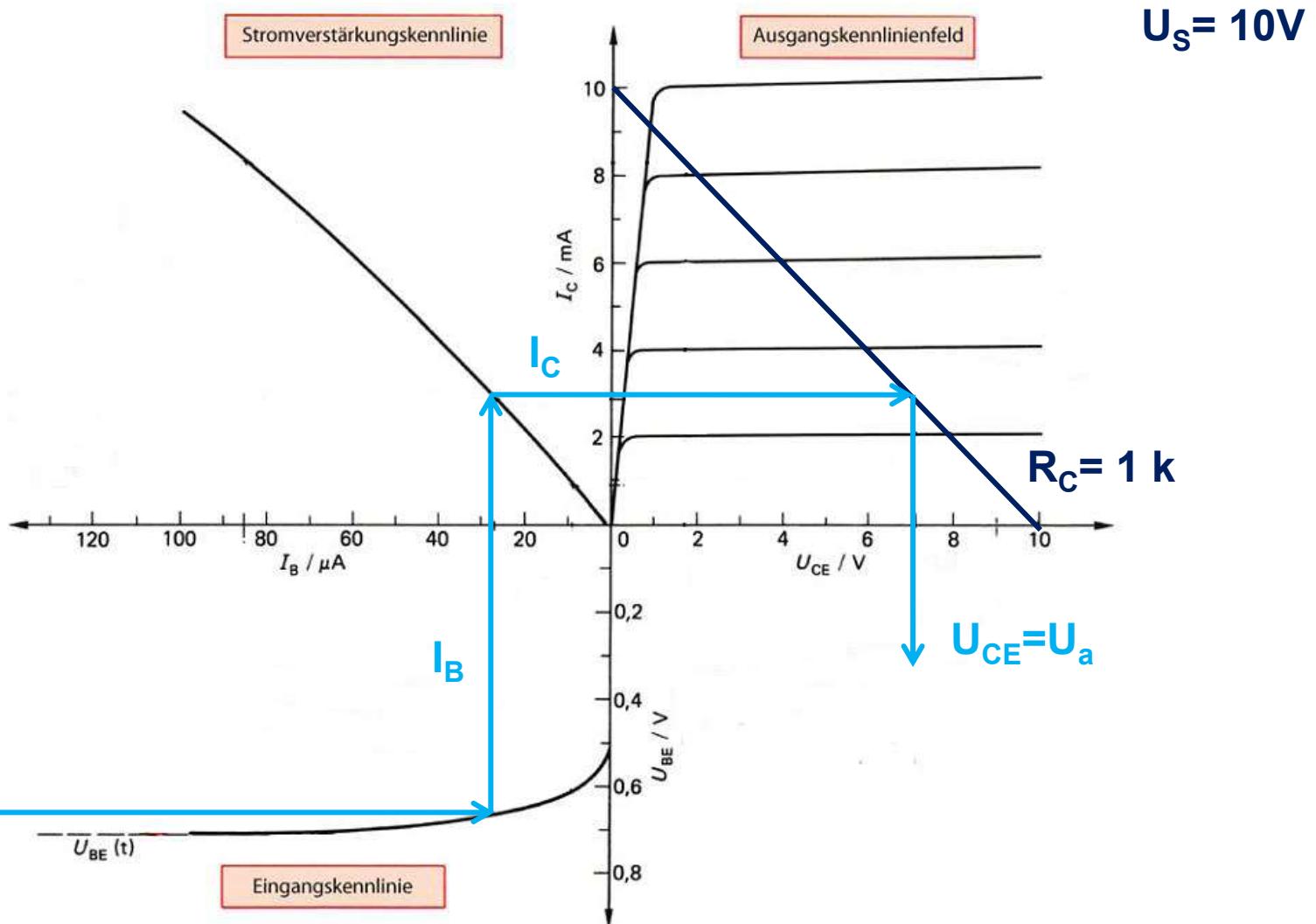
1-2 Sperren

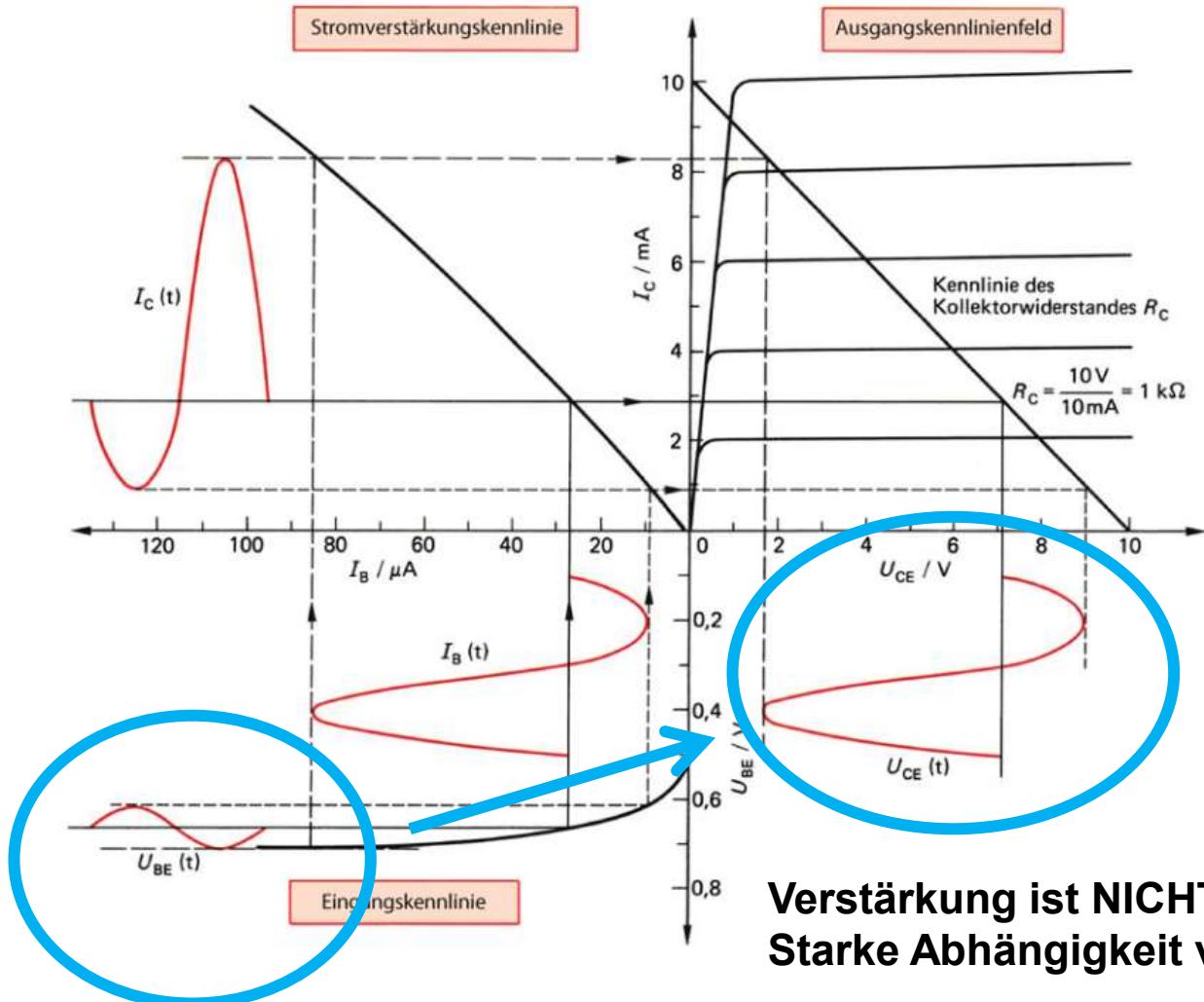
2-3 Normalbetrieb / Aktiver Betrieb

3 Übersteuerungsgrenze

3-4 Übersteuerung

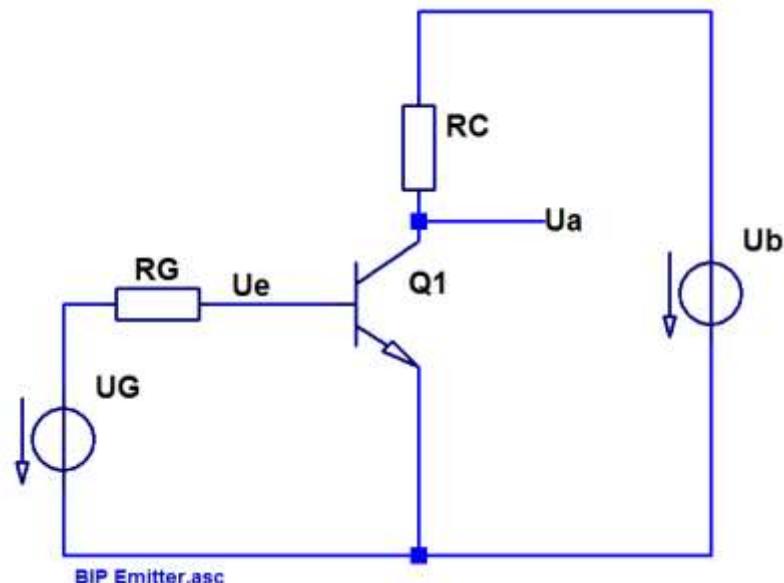
4 Sättigung



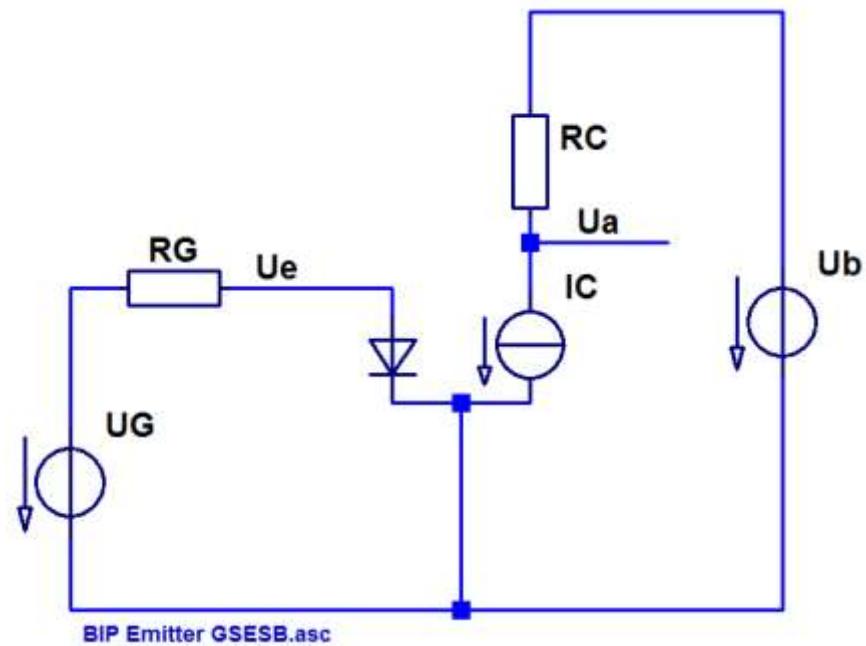


**Verstärkung ist NICHT linear !
Starke Abhängigkeit vom Arbeitspunkt**

Emitterschaltung - Großsignalverhalten



Emitterschaltung



Emitterschaltung Großsignal ESB

Emitterschaltung Gleichungen - Normalbetrieb

Basistrom – BE-Diode

$$I_B = I_{B0} \cdot (e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)$$

$\dots U_{BE} \gg U_T$ (~ 26 mV bei Raumtemperatur)

$$\rightarrow I_B = I_{B0} \cdot (e^{\frac{U_{BE}}{U_T}})$$

Kollektorstrom

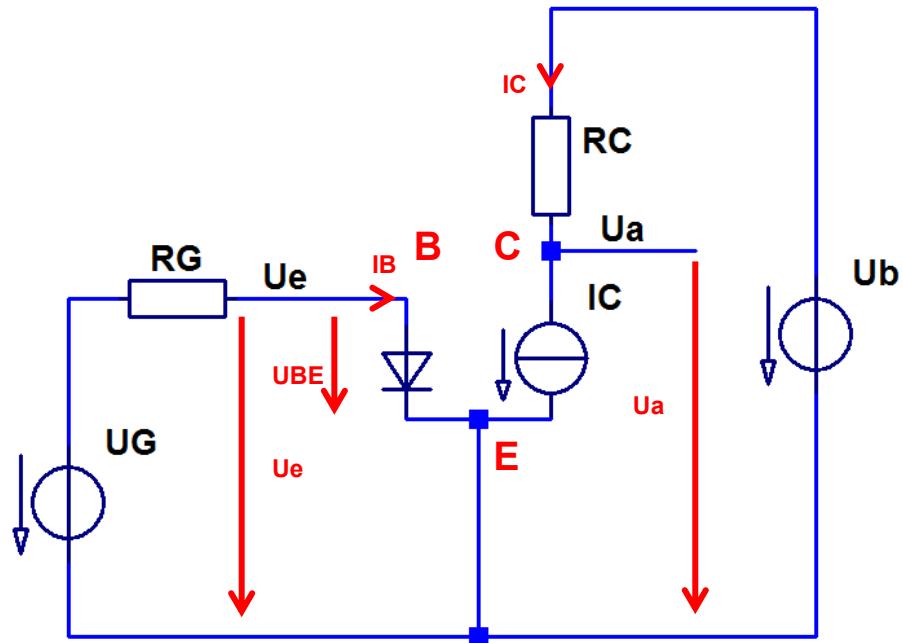
$$I_C = B \cdot I_{B0} \cdot (e^{\frac{U_{BE}}{U_T}})$$

Ausgangsspannung ($I_a=0$)

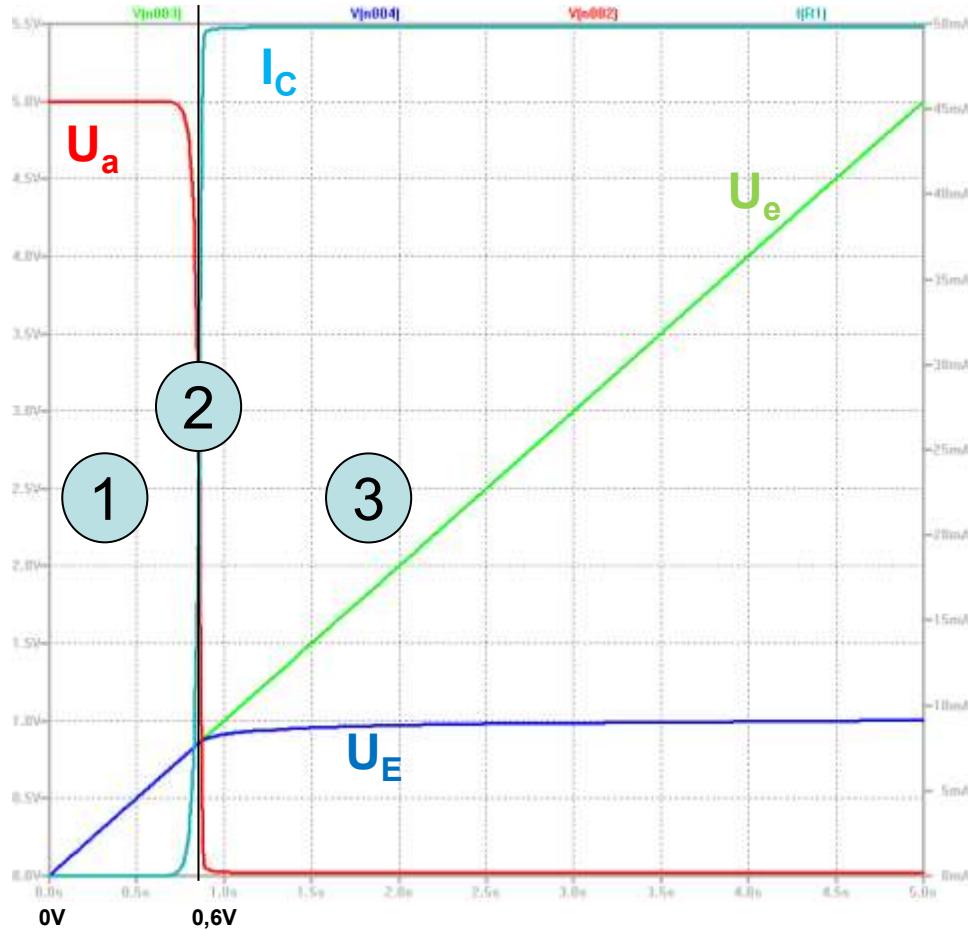
$$U_a = U_{CE} = U_b - I_c \cdot R_C$$

Eingangsspannung

$$U_e = U_{BE} = U_g - I_B R_g \approx U_g$$



Großsignal – $U_a(U_e)$



1 Sperren

$U_e = U_{BE} < 0,6V$

$I_B \sim 0$, I_C = Reststrom

2 Übergang (sehr schmal!!)

$I_B > 0$

I_C steigt

U_A fällt

3 Sättigung

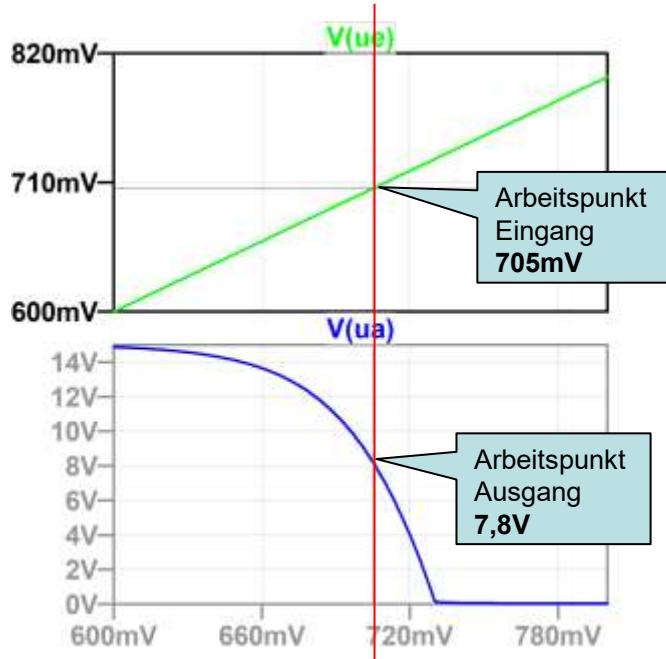
I_C maximal

U_A minimal

Emitterschaltung – Arbeitspunkt – nichtlineare Kennline

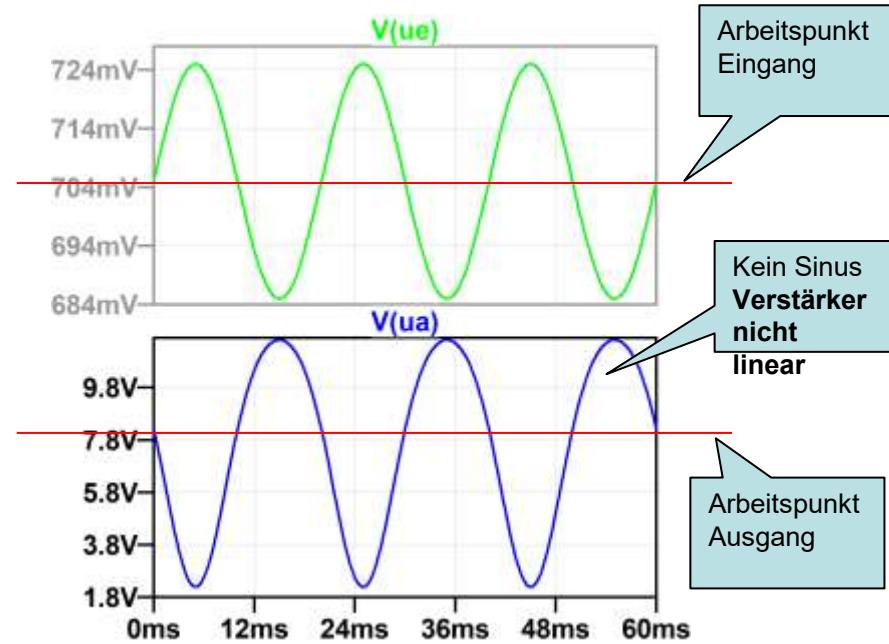
DC-Sweep Simulation

- Gleichspannung 600mV – 800mV



Transient Simulation

- Sinusschwingung
- 20 mV Amplitude
- Offset 705 mV = Arbeitspunkt





WESB Emitterschaltung

...alles differentiell → Kleinbuchstaben

Ungesteuerte Quellen → Kurzschluss

Kondensatoren → Kurzschluss

Ungesteuerte Stromquellen →

Unterbrechung

Spulen → Unterbrechung

$$i_B = \frac{u_{BE}}{r_{BE}}$$

$$i_C = \beta \cdot i_B = \beta \cdot \frac{u_{BE}}{r_{BE}}$$

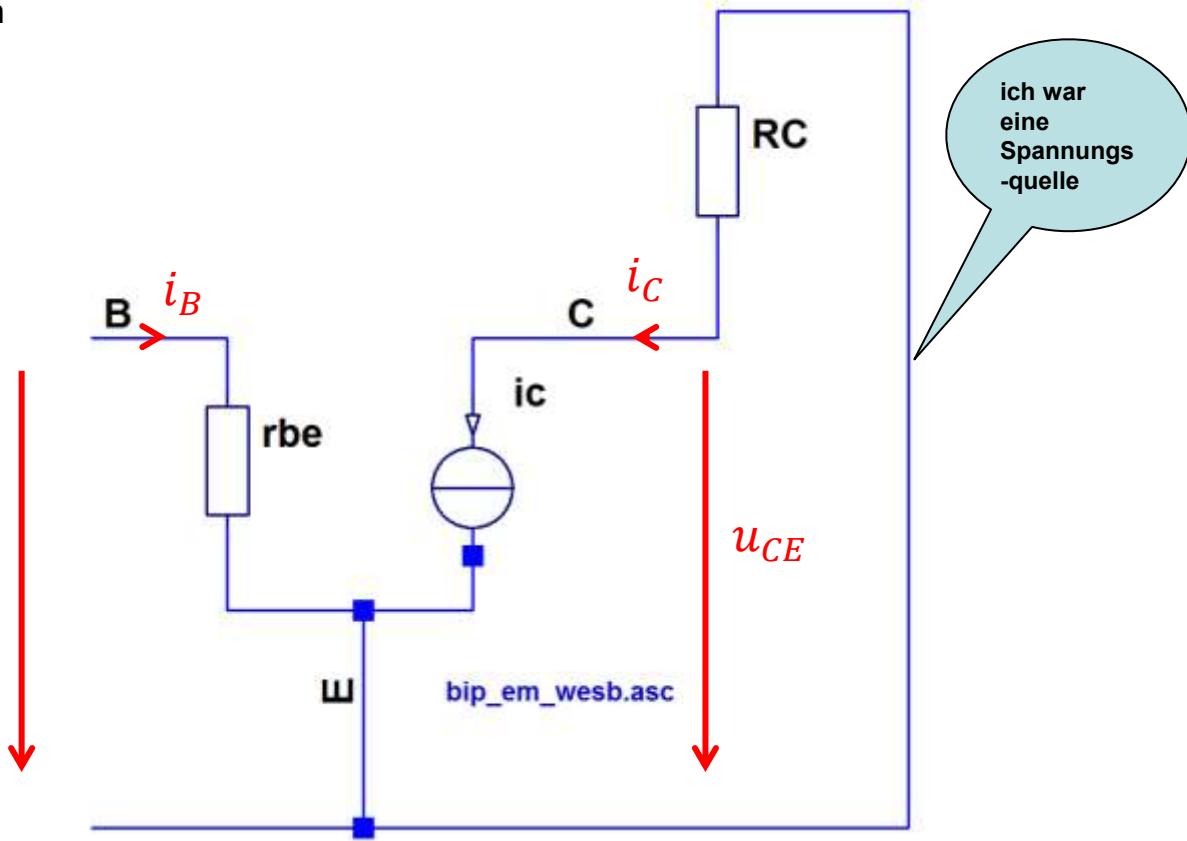
$$u_{CE} = -R_C \cdot i_C = -R_C \cdot \beta \cdot \frac{u_{BE}}{r_{BE}}$$

Spannungsverstärkung

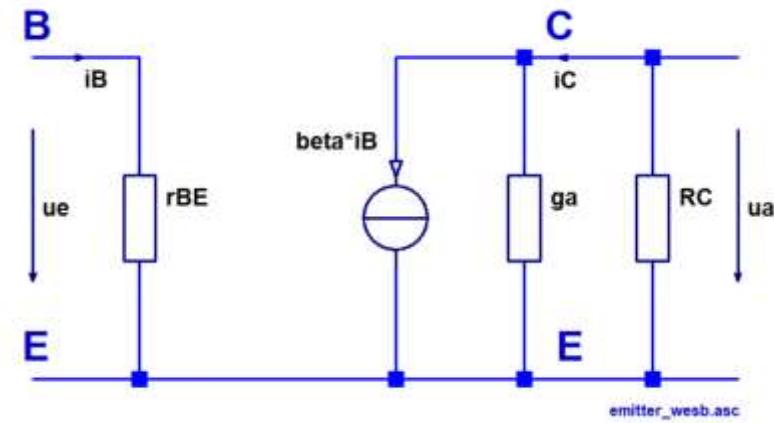
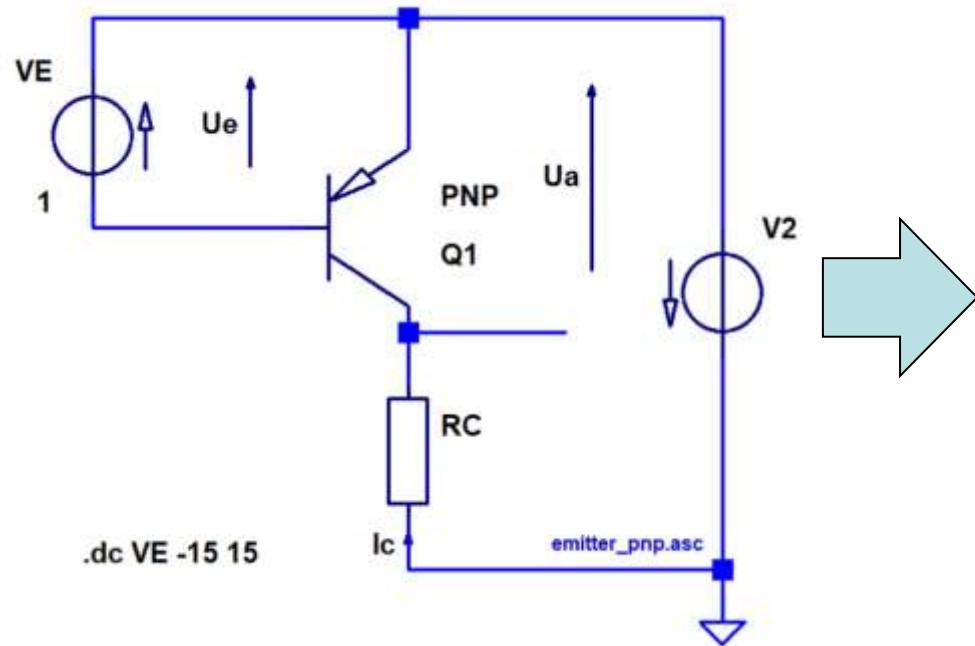
$$v_u = \frac{u_{CE}}{u_{BE}} = -R_C \cdot \frac{\beta}{r_{BE}}$$

Eingangswiderstand

$$r_e = \frac{u_e}{i_e} = \frac{u_{BE}}{i_b} = r_{BE}$$



Ergänzung WESB Emitterschaltung mit PNP



WESB sieht für npn und pnp identisch aus!

Fazit Emitterschaltung

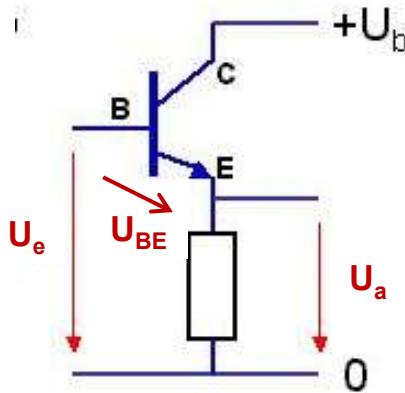
Kleinsignalparameter Emitterschaltung

- **Spannungsverstärkung** $v_u = -\beta \cdot \frac{R_C}{r_{be}}$
- **Eingangswiderstand** $r_e = r_{BE}$
- **Ausgangswiderstand** $r_a \approx R_C$



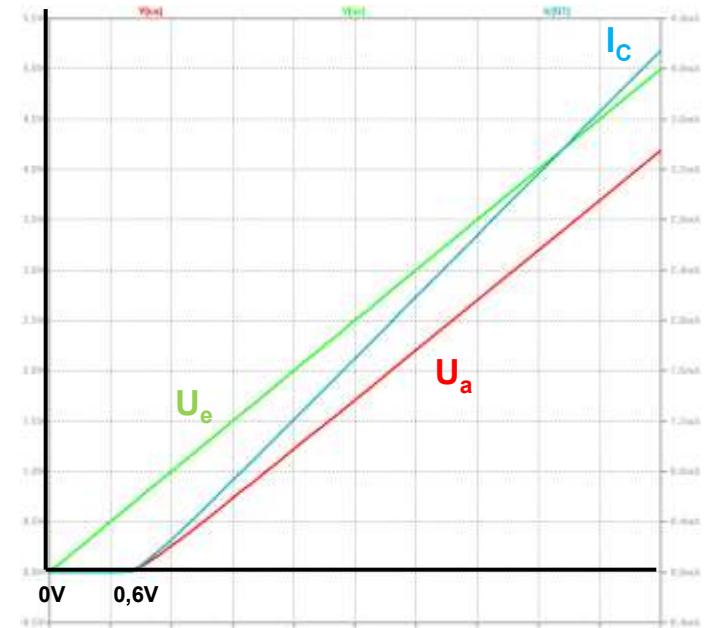
- Eingangssignal wird am Ausgang verzerrt wiedergegeben
 - Überlagerte Eingangsgleichspannungen verschieben Arbeitspunkt, bis zur Funktionslosigkeit oder Zerstörung
 - Temperaturänderungen wirken sich wie überlagerte Eingangsgleichspannungen aus
- Sehr starke Abhängigkeit vom Arbeitspunkt
- Nicht stabil

Kollektorschaltung / Emitterfolger



$$U_e = U_{BE} + U_a$$

$$U_a = U_e - U_{BE} \approx U_e - 0,7V$$

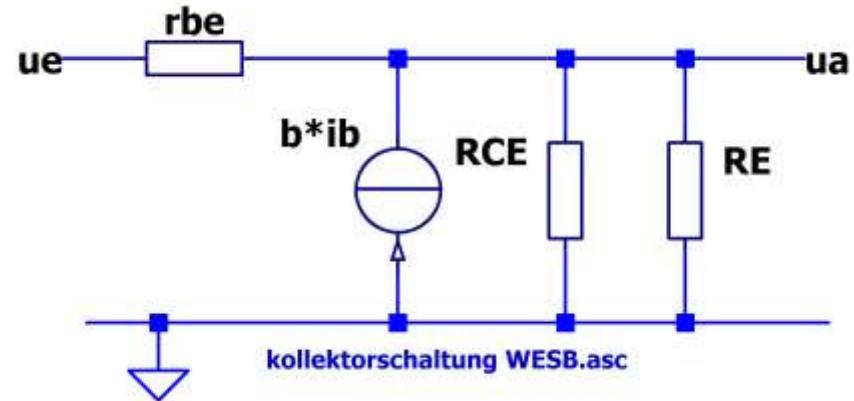
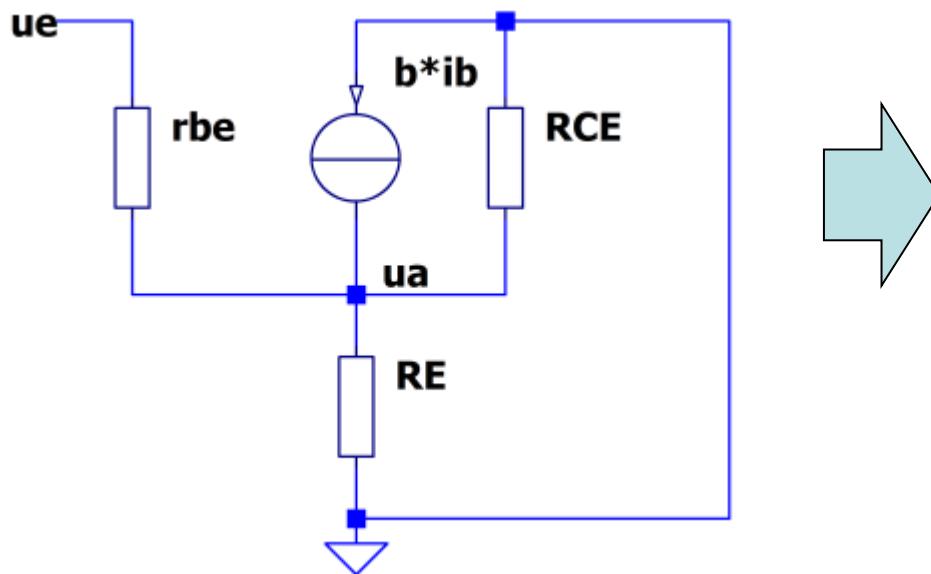
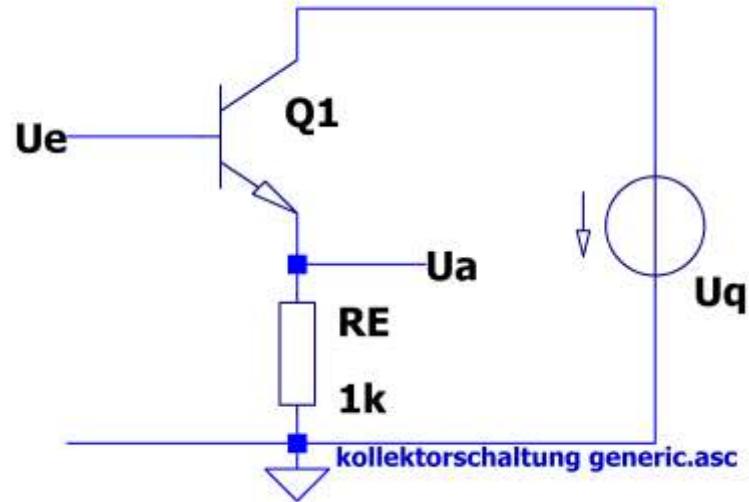


Kleinsignalparameter Kollektorschaltung

- Spannungsverstärkung $v_u \approx 1$
- Eingangswiderstand $r_e \approx \beta \cdot R_E$
- Ausgangswiderstand $r_a \approx \left(\frac{R_g + r_{BE}}{\beta} \right)$



Kollektorschaltung WESB



Differentielle Spannungsverstärkung

$$v_u = \frac{u_a}{u_e}$$

$$R'_E = R_E || R_{CE}$$

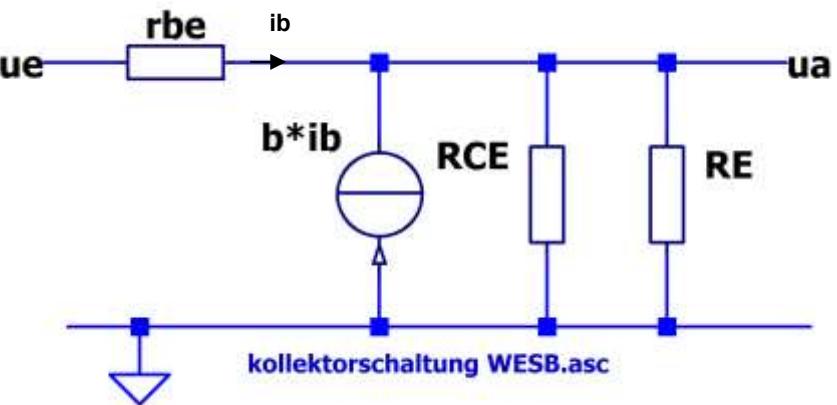
$$u_a = i_B \cdot (1 + \beta) \cdot R'_E$$

$$i_B = \frac{u_e - u_a}{r_{BE}}$$

$$u_a = \frac{u_e - u_a}{r_{BE}} \cdot (1 + \beta) \cdot R'_E$$

$$\frac{u_a}{u_e} = v_u = \frac{\frac{R'_E(1 + \beta)}{r_{BE}}}{1 + \frac{R'_E(1 + \beta)}{r_{BE}}}$$

≈ 1

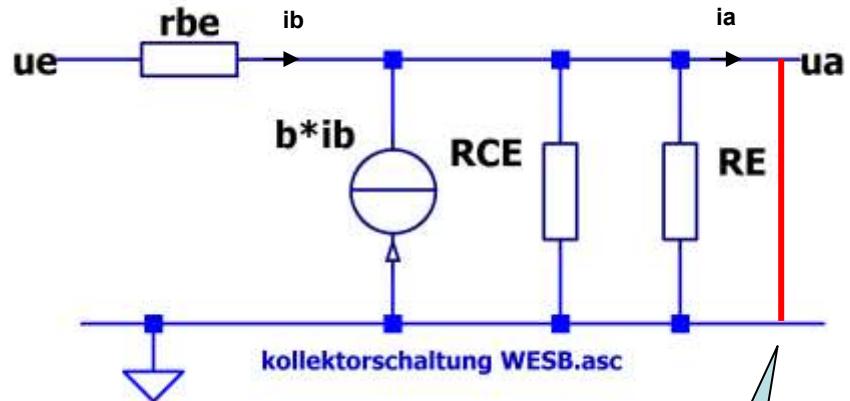


Differentielle Stromverstärkung

$$v_i = \frac{i_a}{i_e} = \frac{i_a}{i_b}$$

$$i_a = i_b + \beta i_b$$

$$v_i = \frac{i_a}{i_e} = 1 + \beta$$



Kurzschluss am Ausgang!

RCE und RE spielen dann
keine Rolle mehr

Differentieller Ausgangswiderstand

$$r_a = \frac{u_a}{i_a}$$

$$R'_E = R_E || R_{CE}$$

$$u_a = (i_B \cdot (1 + \beta) + i_a) \cdot R'_E$$

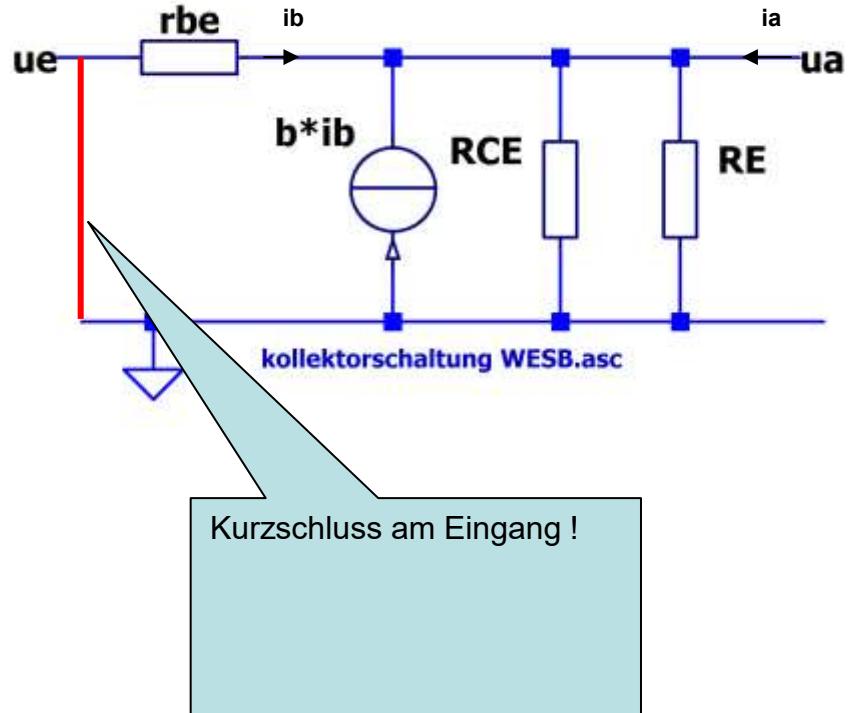
$$i_B = \frac{-u_a}{r_{BE}}$$

$$u_a = \left(\frac{-u_a}{r_{BE}} \cdot (1 + \beta) + i_a \right) \cdot R'_E$$

$$u_a \left(1 + \frac{1}{r_{BE}} \cdot (1 + \beta) R'_E \right) = i_a \cdot R'_E$$

$$\frac{u_a}{i_a} = \frac{R'_E}{1 + \frac{1}{r_{BE}} \cdot (1 + \beta) R'_E}$$

$$r_a = \frac{\frac{r_{BE}}{(1 + \beta)} R'_E}{\frac{r_{BE}}{(1 + \beta)} + R'_E} = R'_E \parallel \frac{r_{BE}}{(1 + \beta)}$$



Differentieller Eingangswiderstand

$$r_e = \frac{u_e}{i_b}$$

$$R'_E = R_E || R_{CE}$$

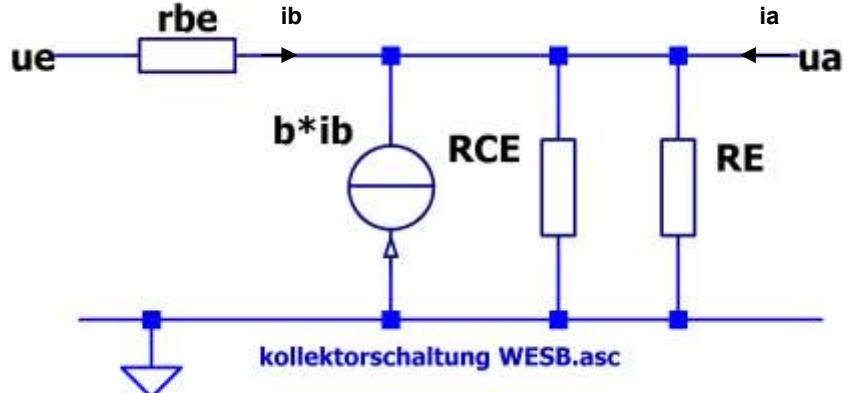
$$u_a = i_B \cdot (1 + \beta) \cdot R'_E$$

$$i_b = \frac{u_e - u_a}{r_{BE}} \Leftrightarrow u_a = u_e - i_b r_{be}$$

$$\Leftrightarrow u_e - i_b r_{be} = i_b \cdot (1 + \beta) \cdot R'_E$$

$$\Leftrightarrow u_e = i_b \cdot (1 + \beta) \cdot R'_E + i_b r_{be}$$

$$\Leftrightarrow \frac{u_e}{i_b} = (1 + \beta) \cdot R'_E + r_{be}$$

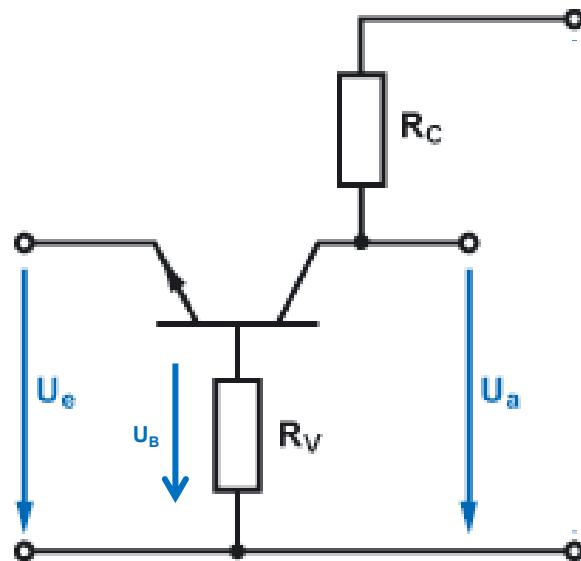


Kurzzusammenfassung

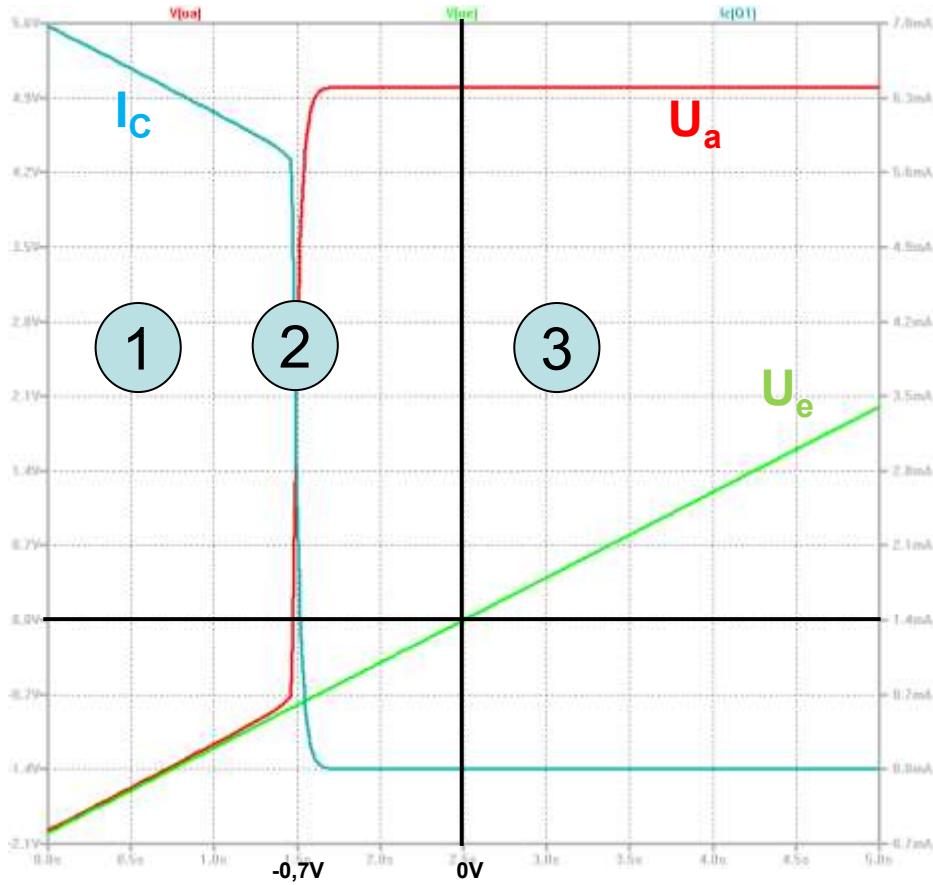
	Emitter	Kollektor	Basis	
v_u	100	1	125	
v_i	100	100	1	

$\beta_e = 100$; $h_{22e} = 50 \mu S$; $F_T = 300 \text{ MHz}$; $I_E = 5 \text{ mA}$; $U_T = 40 \text{ mV}$; $r_{be} = 800 \Omega$

Basisschaltung



Ue-Ua-Kennlinie Basisschaltung



1 Sättigung (!)

U_e negativ
 EB Diode leitet, Basisstrom über R_V in Quelle
 $U_a > U_B \rightarrow$ CB-Diode leitet
 $U_{CE} = U_{CE_SAT} \rightarrow U_a \sim U_e$

2 Übergang

$U_e \sim -0.7V$
 CB Diode sperrt
 Normalbetrieb
 I_c fällt exponentiell, U_a steigt

3 Sperren

$U_e > -0.7V$
 BE Diode sperrt
 $I_B \sim 0, I_C \sim 0$

Differentielle Spannungsverstärkung

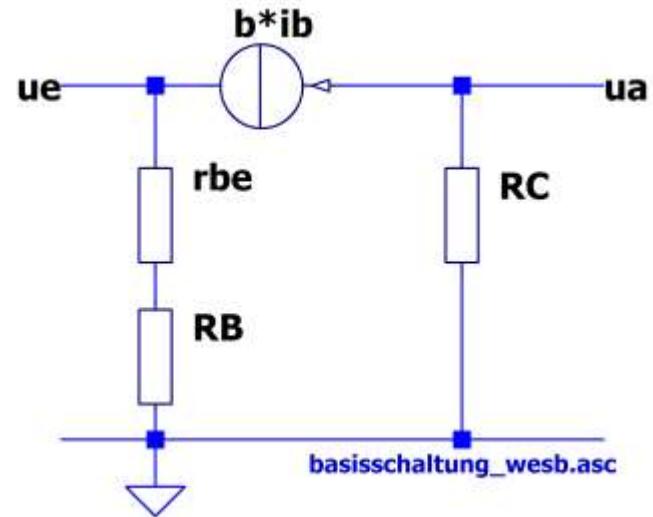
$$v_u = \frac{u_a}{u_e}$$

$$u_a = -i_B \beta R_C$$

$$i_B = -\frac{u_e}{R_B + r_{BE}}$$

$$u_a = \frac{u_e}{R_B + r_{BE}} \beta R_C$$

$$\frac{u_a}{u_e} = v_u = \frac{\beta R_C}{R_B + r_{BE}}$$



Differentielle Stromverstärkung

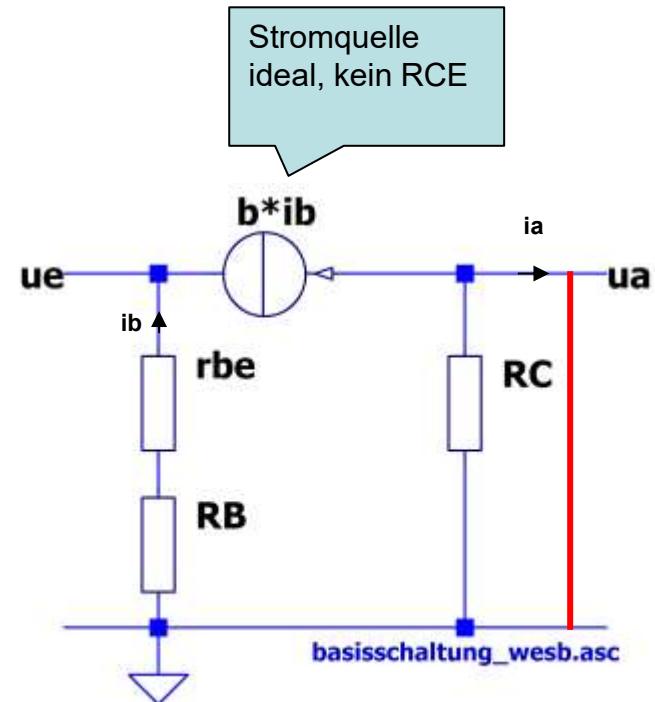
$$v_i = \frac{i_a}{i_e}$$

$$i_a = -i_b \beta$$

$$i_e = -i_b \beta - i_b$$

$$\frac{i_a}{i_e} = v_i = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

≈ 1



Kurzschluss am Ausgang!

RC spielt dann keine Rolle mehr

Differentieller Eingangswiderstand

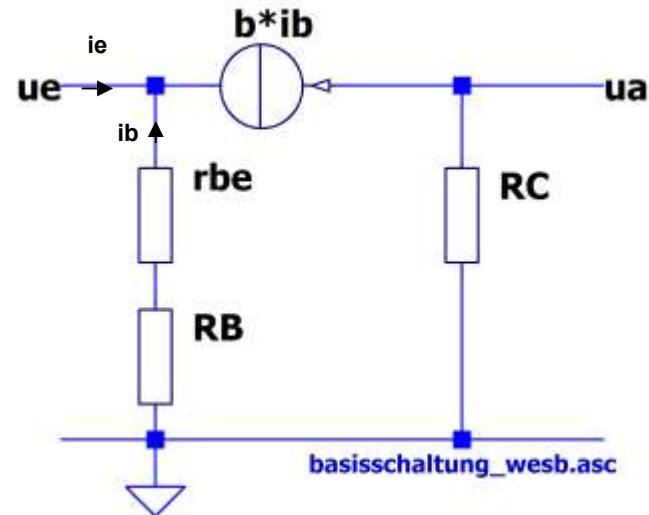
$$r_e = \frac{u_e}{i_e}$$

$$i_e = -i_b\beta - i_b = -i_b(1 + \beta)$$

$$i_B = -\frac{u_e}{R_B + r_{BE}}$$

$$i_e = \frac{u_e}{R_B + r_{BE}}(1 + \beta)$$

$$\frac{u_e}{i_e} = r_e = \frac{R_B + r_{BE}}{1 + \beta}$$



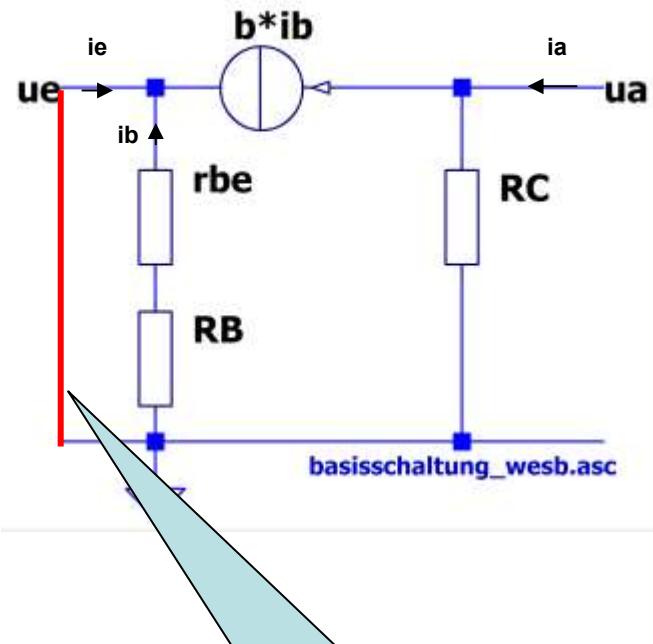
Differentieller Ausgangswiderstand

$$r_a = \frac{u_a}{i_a}$$

$$i_b = 0$$

$$i_a = \frac{u_a}{R_C}$$

$$\frac{u_a}{i_a} = r_a = R_C$$



Kurzschluss am Eingang !

Basisschaltung

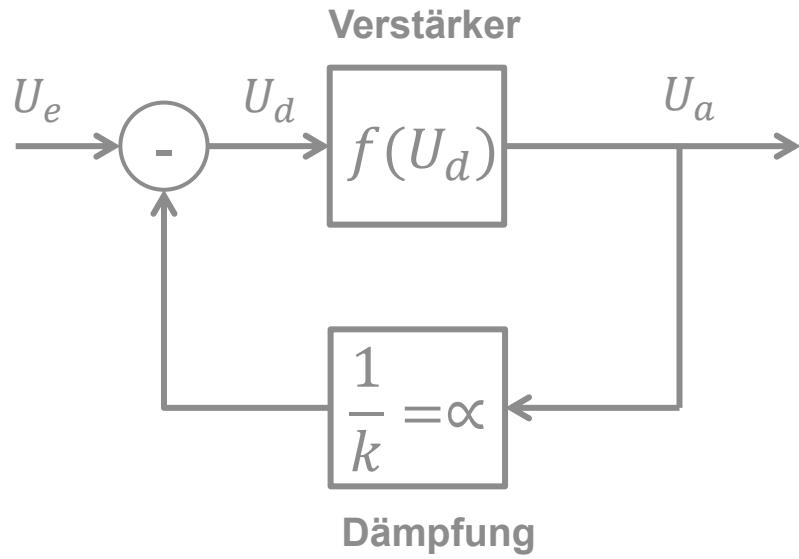
Eigenschaften

- Nur Spannungsverstärkung
- KEINE Stromverstärkung
- Geringe Ausgangsrückwirkung
- Arbeitet gut bis zu hohen Frequenzen

Kleinsignalparameter Basisschaltung

- **Spannungsverstärkung** $v_u \approx \frac{\beta \cdot R_C}{r_{be} + R_V}$
- **Stromverstärkung** $v_i \approx 1$
- **Eingangswiderstand** $r_e \approx \frac{r_{BE}}{\beta}$
- **Ausgangswiderstand** $r_a \approx R_C$

Gegenkopplung Allgemein



Linearer Verstärker $f(U_d) = v \cdot U_d$

$$U_a = v \cdot U_d$$

$$U_a = v(U_e - \alpha U_a)$$

Es gilt für $v \gg 1$

$$U_a \approx k \cdot U_e$$

...Kennlinie linear, Steigung k

Nichtlinearer Verstärker

z.B. quadratisch $f(U_d) = v \cdot U_d^2$

$$U_a = v \cdot U_d^2$$

$$U_a = v(U_e - \alpha U_a)^2$$

Auch dann gilt für $v \gg 1$

$$U_a \approx k \cdot U_e$$

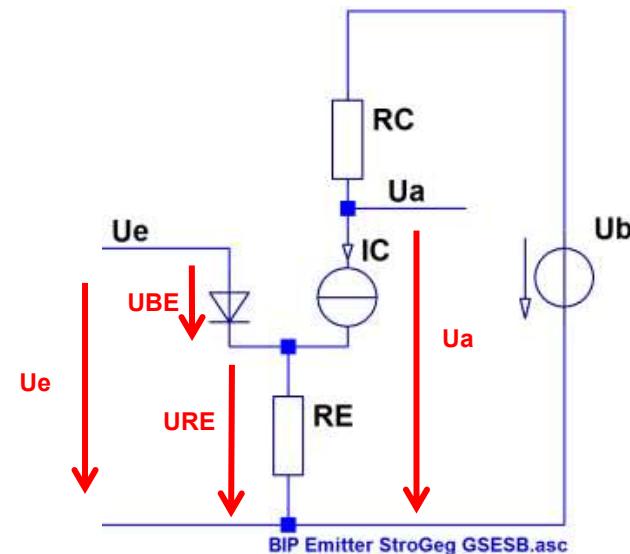
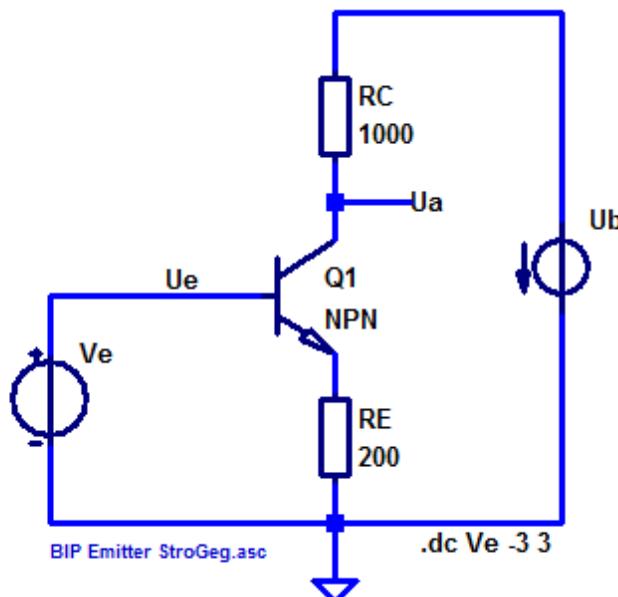
...Kennlinie linear, Steigung k

Gegenkopplung bewirkt, dass Systemeigenschaften praktisch nur durch die Rückkopplung bestimmt werden und nicht durch den Verstärker
 → Linearisierung

Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

$$U_{BE} \approx U_g - U_{RE} \quad U_g \uparrow \quad U_{BE} \uparrow \quad I_B \uparrow \quad I_C \uparrow \quad U_{RE} \uparrow \quad U_{BE} \downarrow$$

Gegenkopplung:
Rückführung der
Ausgangsgröße auf den
Eingang, so dass sie der
Eingangsgröße ENTGEGEN
wirkt



Gleichungen - Großsignal

Ausgangsspannung ($I_a=0$)

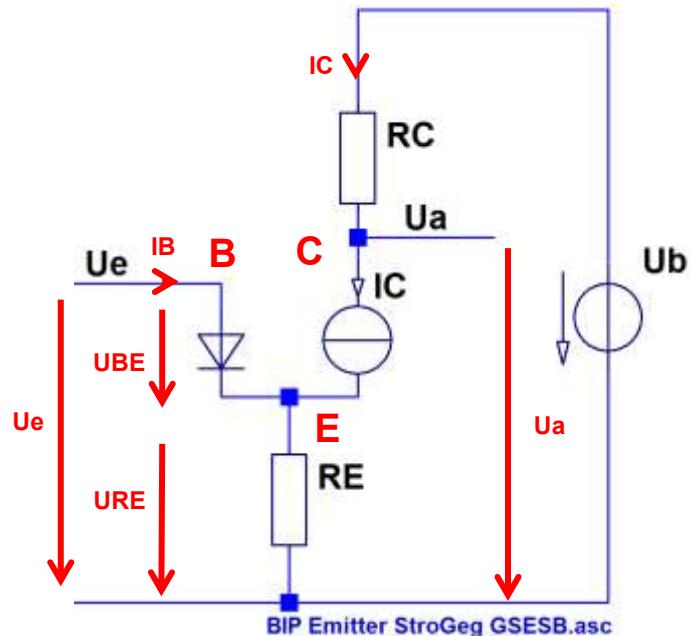
$$U_a = U_b - I_c \cdot R_C$$

Eingangsspannung

$$U_e = U_{BE} + U_{RE} = U_{BE} + (I_c + I_B)R_E \approx U_{BE} + I_C R_E$$

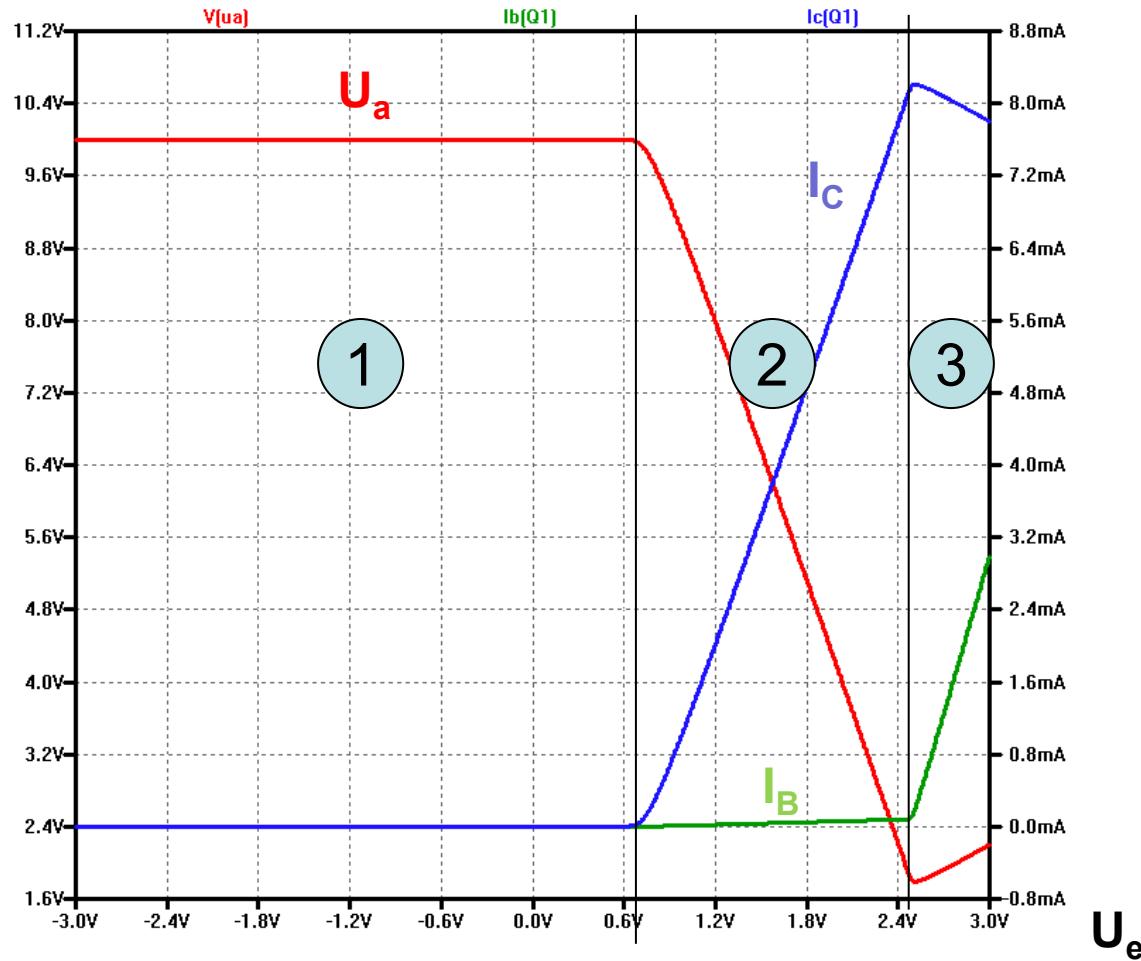
$$I_C \approx \frac{U_e - U_{BE}}{R_E}$$

$$U_a \approx U_b - \frac{R_C}{R_E} (U_e - U_{BE})$$



- Linearer Zusammenhang U_a / U_e
- Nur noch abhängig von R_C und R_E

Großsignalverhalten Emitterschaltung m. Stromgegenkopplung



1 Sperren

$U_e = U_{BE} < 0.6V$

$I_B \sim 0, I_C \sim 0$

2 Übergang (breit!)

$I_B > 0$

I_C steigt $\rightarrow U_E$ steigt $\rightarrow U_{BE} = U_e - U_E$ bleibt konstant

U_A fällt

3 Sättigung

I_C maximal bzw. fällt wegen leitender CB Diode

U_A minimal ($\sim U_E$)

Stromgegenkopplung WESB

Ausgang:

$$u_a = -i_C \cdot R_C = -i_B \cdot \beta \cdot R_C$$

Eingang:

$$\begin{aligned} u_e &= u_{BE} + u_{RE} = i_B \cdot r_{BE} + (i_B + i_c) \\ u_e &= i_B (r_{BE} + R_E + \beta R_E) \end{aligned}$$

$$i_B = \frac{u_e}{r_{BE} + R_E + \beta R_E}$$

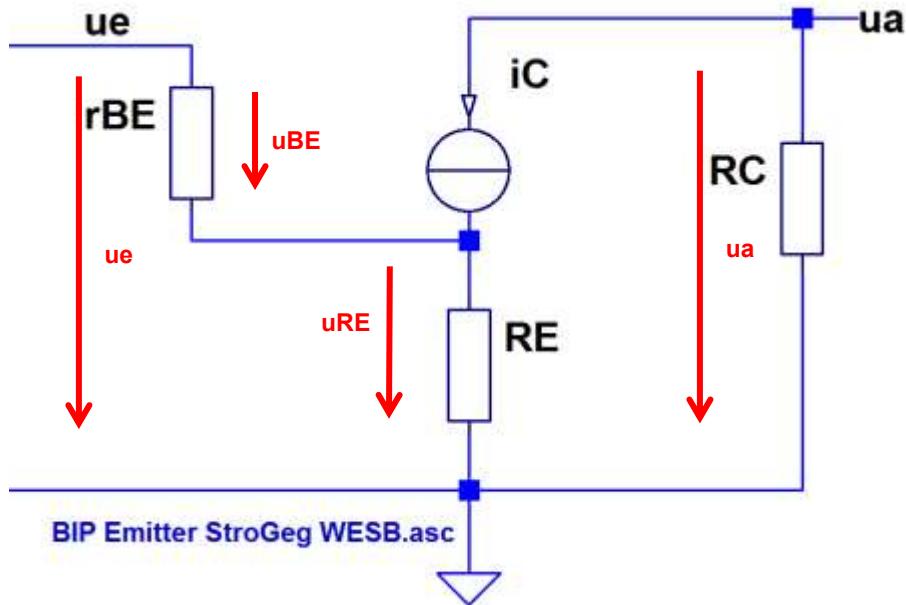
damit Ausgang

$$u_a = -\beta \cdot R_C \cdot \frac{u_e}{r_{BE} + R_E + \beta R_E}$$

$$u_a = -\beta \cdot \frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{u_e}{\frac{r_{BE}}{R_E} + (1 + \beta)}$$

$$\begin{aligned} 1 + \beta &\approx \beta, \beta \gg 1 \\ \frac{r_{BE}}{R_E} &\approx 0, \quad R_E \gg r_{BE} \end{aligned}$$

$$u_a \approx -u_e \cdot \frac{R_C}{R_E}$$

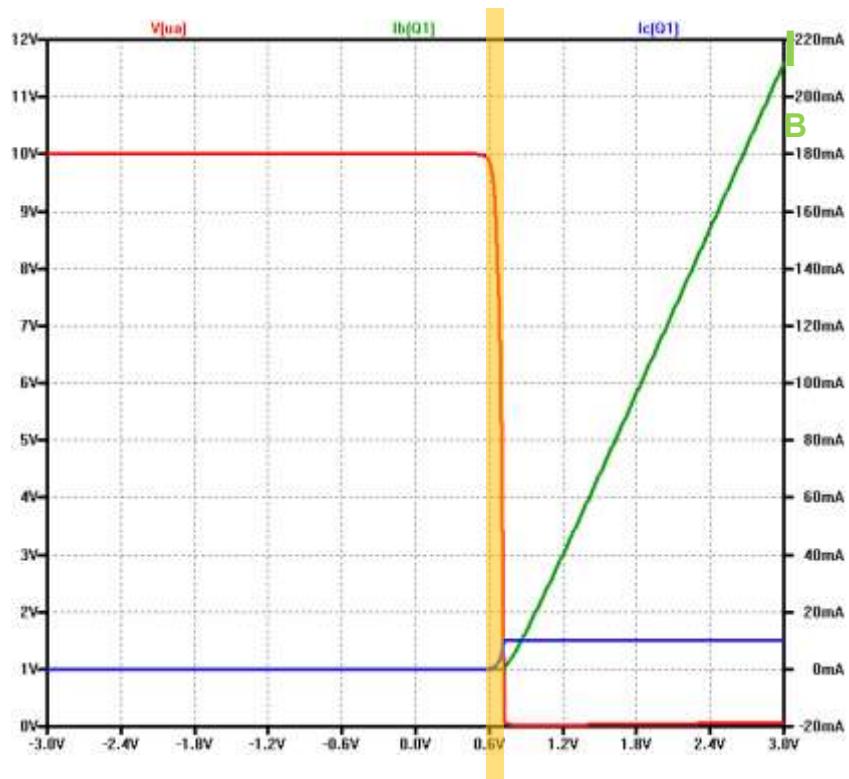


Kleinsignalparameter EmitterS. m. Strgk.

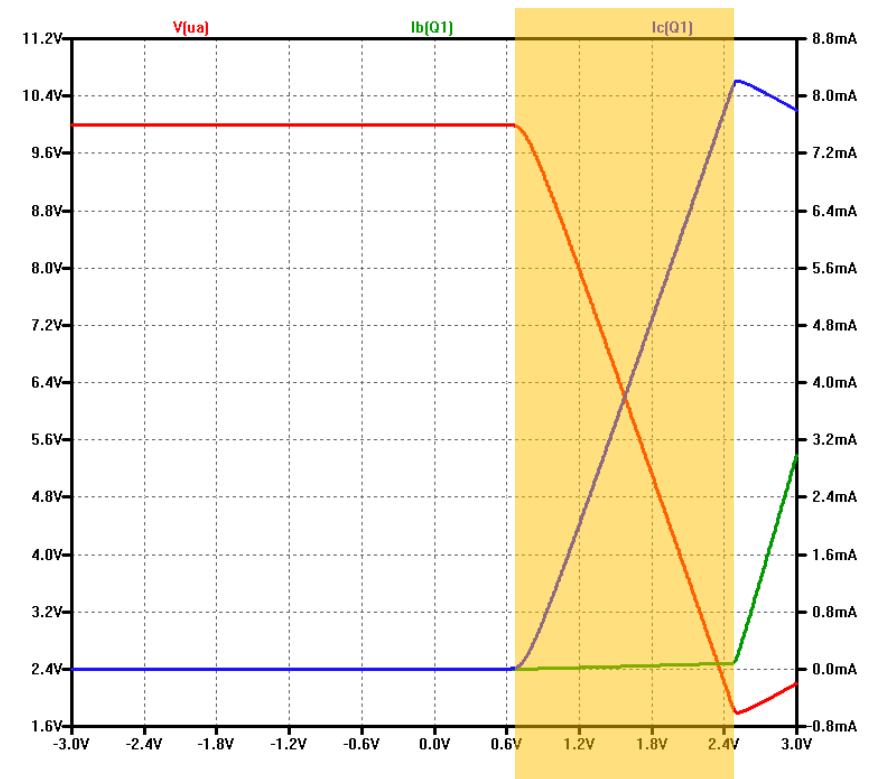
- Spannungsverstärkung $v_u \approx -\frac{R_C}{R_E}$
- Eingangswiderstand $r_e = r_{BE} + (1 + \beta) \cdot R_E$
- Ausgangswiderstand $r_a = R_C$

Übertragungsfunktion im Vergleich

Emitterschaltung



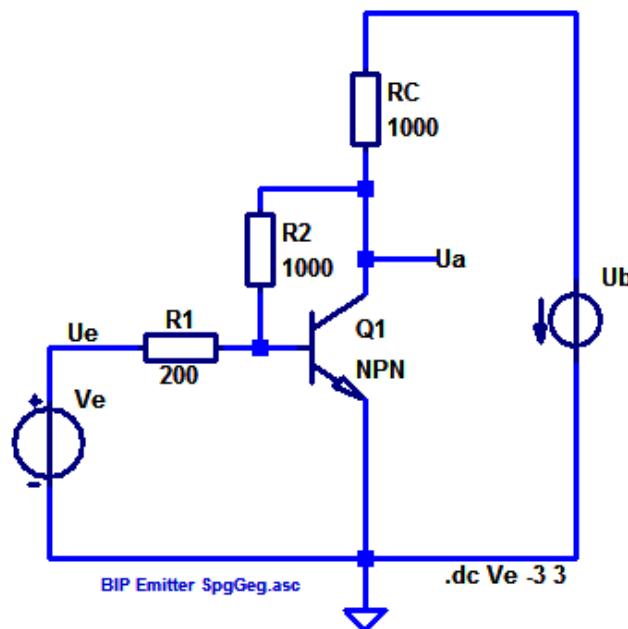
Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung



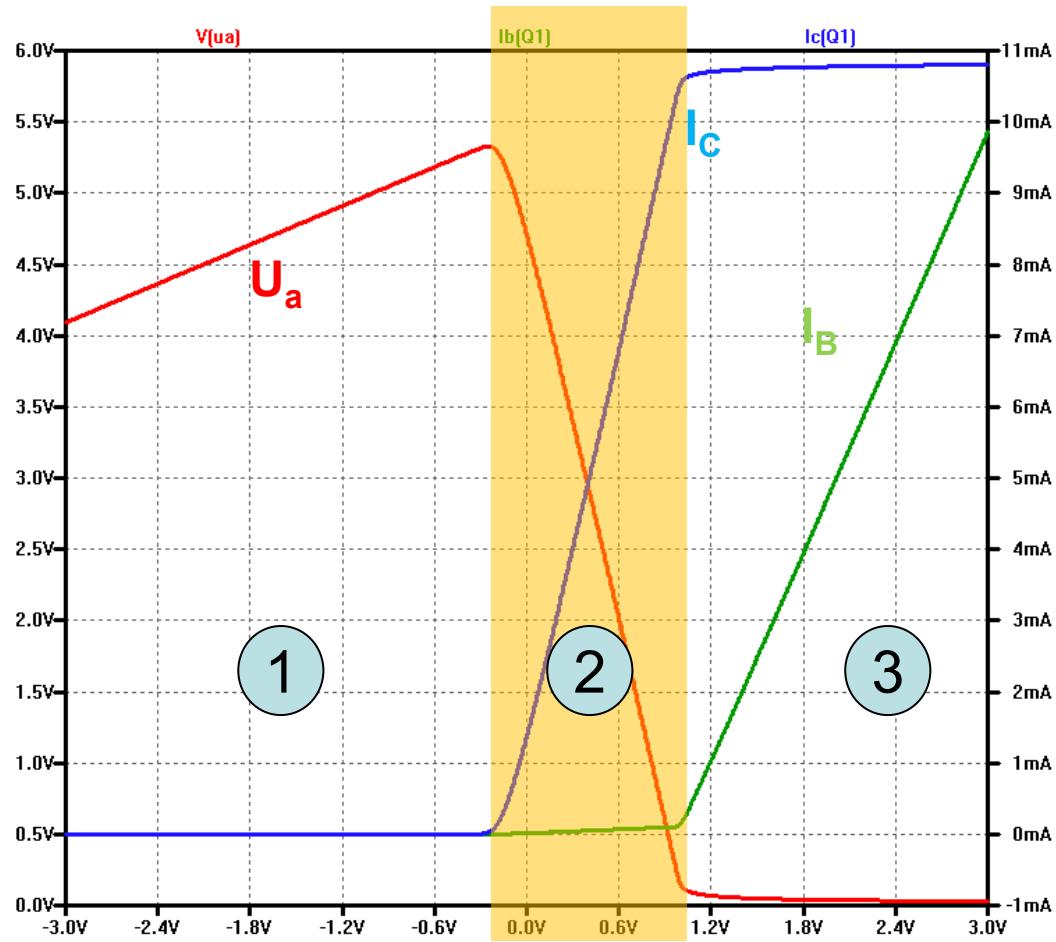
Für Verstärker nutzbarer Arbeitsbereich

Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung

Gegenkopplung $I_C \uparrow$ $U_a \downarrow$ $U_{BE} \downarrow$



Übertragungskennlinie Emitterschalt. m. SpannungsGK



1 Sperren

U_e negativ

$U_{BE} < 0.6V$ (Spannungsteiler R_2 , R_1) steigt mit U_E

$I_B \sim 0$, $I_C \sim 0$

2 Übergang (breit!)

$I_B > 0$

I_C steigt $\rightarrow U_A$ fällt $\rightarrow U_{BE}$ nur noch langsam

U_A fällt

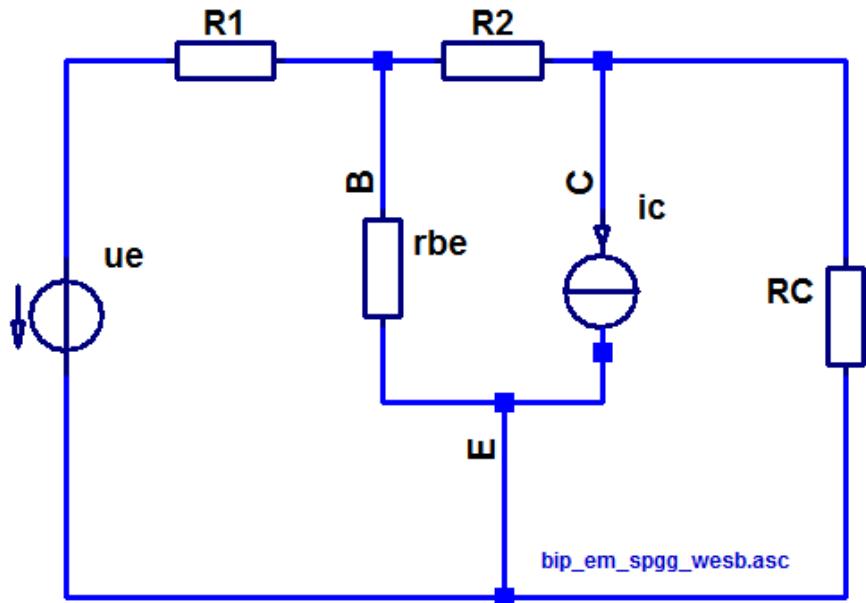
3 Sättigung / Inversion

I_C maximal bzw. fällt wegen leitender CB Diode

U_A minimal ($\sim U_E$)

Für Verstärker nutzbarer Arbeitsbereich

WESB Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung

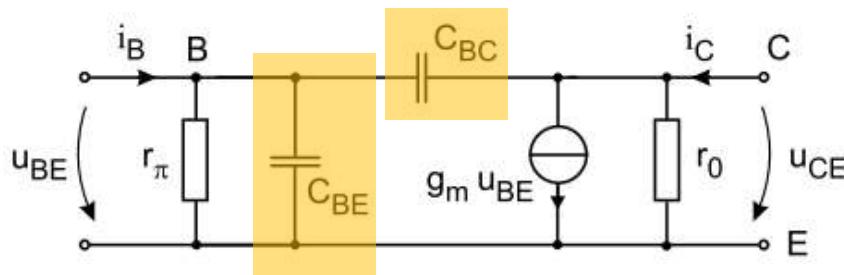


Wechselspannungs ESB

Kleinsignalparameter EmitterS. m. SpannungsGK

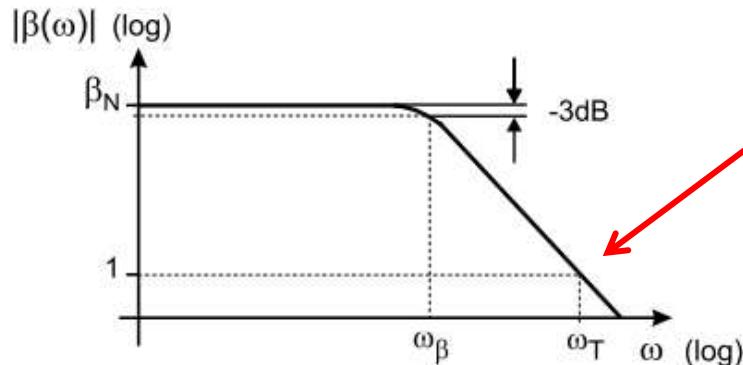
- **Spannungsverstärkung** $v_u \approx -\frac{R_2}{R_1}$
- **Eingangswiderstand** $r_e \approx R_1$
- **Ausgangswiderstand** $r_a \approx \frac{1}{S} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + \frac{R_2}{\beta}$

Frequenzverhalten Bipolar-Transistor



Giacotto-Kleinsignal Ersatzschaltbild mit Kapazitäten

Bild: [Göb]



Für höhere Frequenzen müssen Kapazitäten im ESB berücksichtigt werden

- C_{BE} Basis-Emitter (Bsp. 8pF)*
- C_{BC} Basis-Kollektor (Bsp. 4 pF)*

**Kleinsignalverstärkung nimmt mit steigender Frequenz ab
(Tiefpassverhalten)**

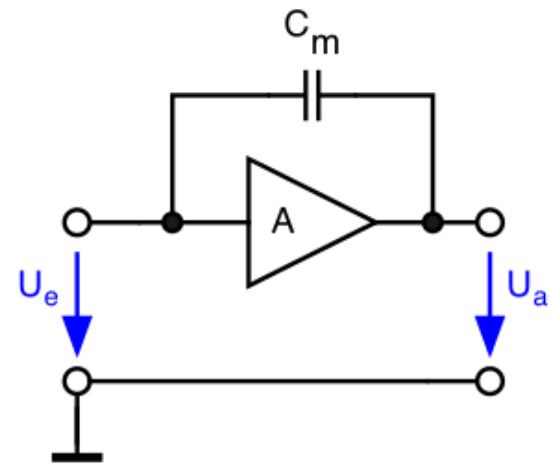
- Frequenz bei der für die Kleinsignalstromverstärkung $\beta = 1$ gilt, heißt **Transitfrequenz ω_T**

*) Kleinsignaltransistor, $U_{BE}=0,5V$, $U_{CB}=5V$

Miller Effekt

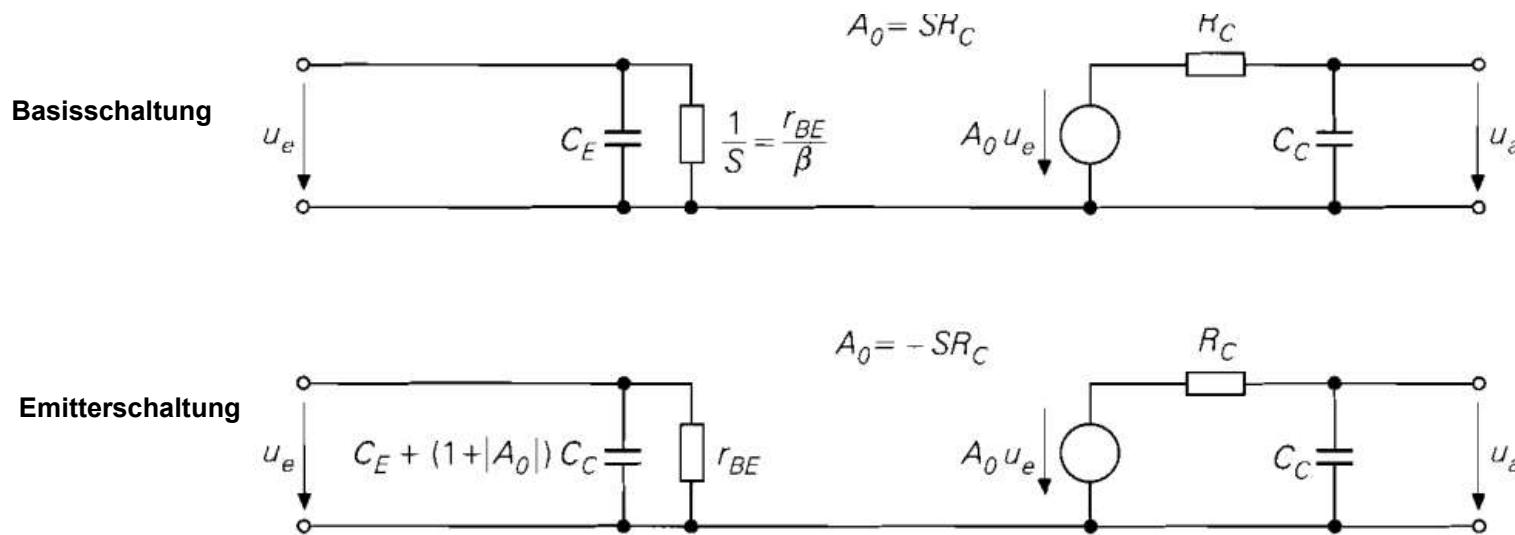
Grundsätzlicher Effekt bei invertierenden Verstärkern (z.B. Transistor in Emitter / Sourceschaltung)

- Kapazität C_m zwischen Ein- und Ausgang (Basis-Kollektor / Gate-Drain) eines invertierenden Verstärkers
- Verstärkung $-A$
- Wirkt am Eingang als vergrößerte Kapazität. $C_{in} = C_m(1 + A)$
- C_m heißt Millerkapazität
- Millerkapazität beeinflusst Frequenzgang des Verstärkers negativ
 - ..Eingangskapazität größer
 - ..Grenzfrequenz des Tiefpass niedriger



Frequenzverhalten Basisschaltung vs. Emitterschaltung

Aus Giacoletto ESB können Kleinsignal ESB der Schaltungen für höhere Frequenzen gewonnen werden



- **Wirksame Eingangskapazität der Emitterschaltung wesentlich höher als die der Basisschaltung**
- **Basisschaltung höhere Grenzfrequenz**

Kurzzusammenfassung

	Emitter	Kollektor	Basis	
v_u	100	1	125	
v_i	100	100	1	
r_e	800Ω	$100 \text{ k}\Omega$	8Ω	
r_a	1000Ω	18Ω	1000Ω	
f_t	300 MHz	300 MHz	(300 MHz)	

$\beta_e = 100; h_{22e} = 50 \mu\text{S}; F_T = 300 \text{ MHz}; I_E = 5 \text{ mA}; U_T = 40 \text{ mV}; r_{be} = 800 \Omega$

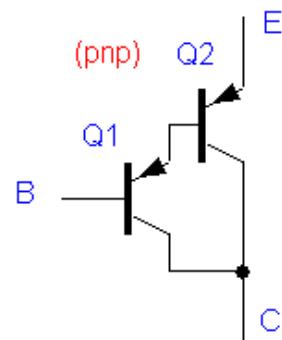
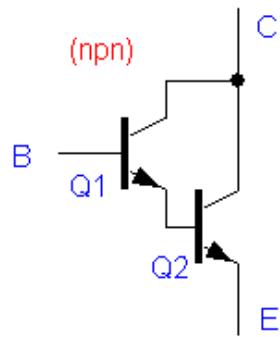
Übung

- 1) Zeichnen Sie ein vereinfachtes Kleinsignal ESB eines npn Bipolartransistors indem sie die Kollektor-Basis Rückwirkung sowie den Kollektor Ausgangsleitwert vernachlässigen.
- 2) Zeichnen Sie das Kleinsignal ESB eines npn Bipolartransistors in Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung
- 3) Zeichen Sie folgende Spannungen und Ströme im ESB aus 2) ein: i_B , u_{BE} , i_C
- 4) Berechnen Sie folgenden Größen:
 - Differentieller Eingangswiderstand
 - Differentieller Ausgangswiderstand
 - Differentielle Spannungsverstärkung
- 5) Gegeben sind $R_E=1\text{kOhm}$, $R_C=10\text{ kOhm}$, eine Versorgungsspannung von 30V sowie das Eingangssignal $u_e(t) = 1V \cdot \sin(2\pi 100s^{-1}t)$. Beschreiben Sie das Ausgangssignal

Darlingtonschaltung - Darlingtontransistor

Zur Erhöhung der Stromverstärkung

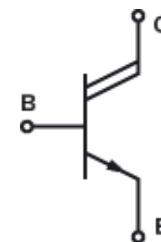
- Kleiner Transistor Q1 in Kollektorschaltung
- Treibt Basis des Leistungstransistor Q2



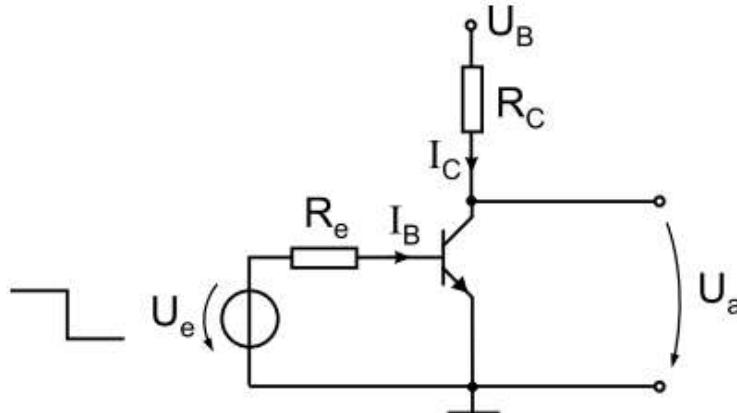
Stromverstärkung

$$B \approx B_1 \cdot B_2$$

Oft als „integrierte Schaltung“ =
Darlingtontransistor



Dynamisches Verhalten



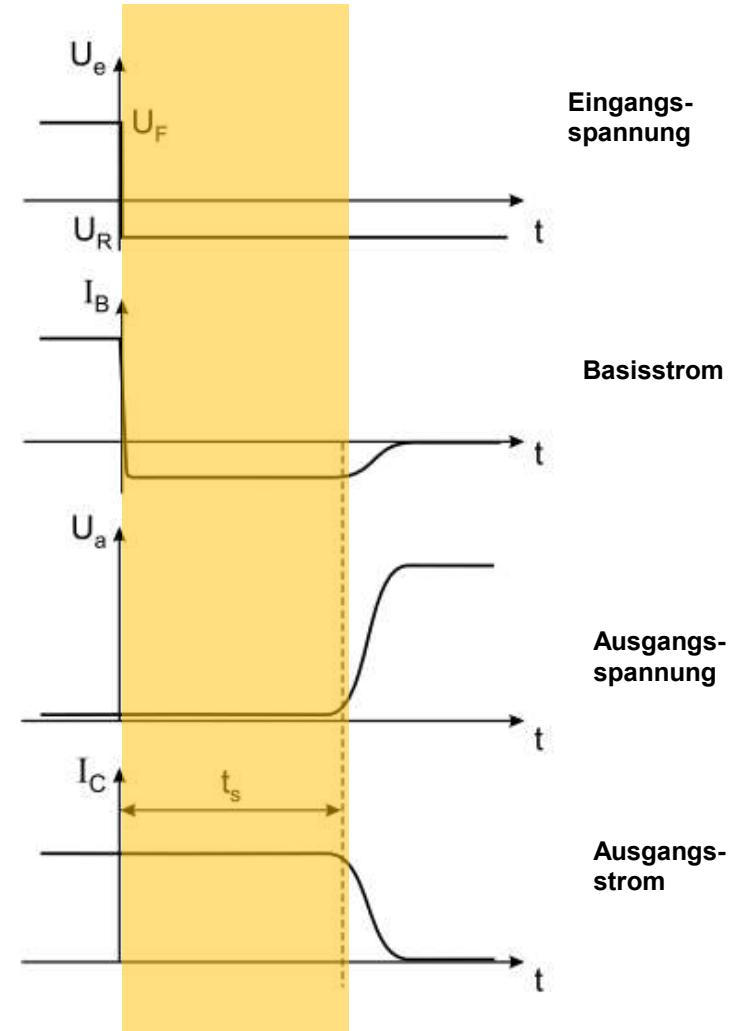
Bilder: [Göb]

Transistor wird abgeschaltet

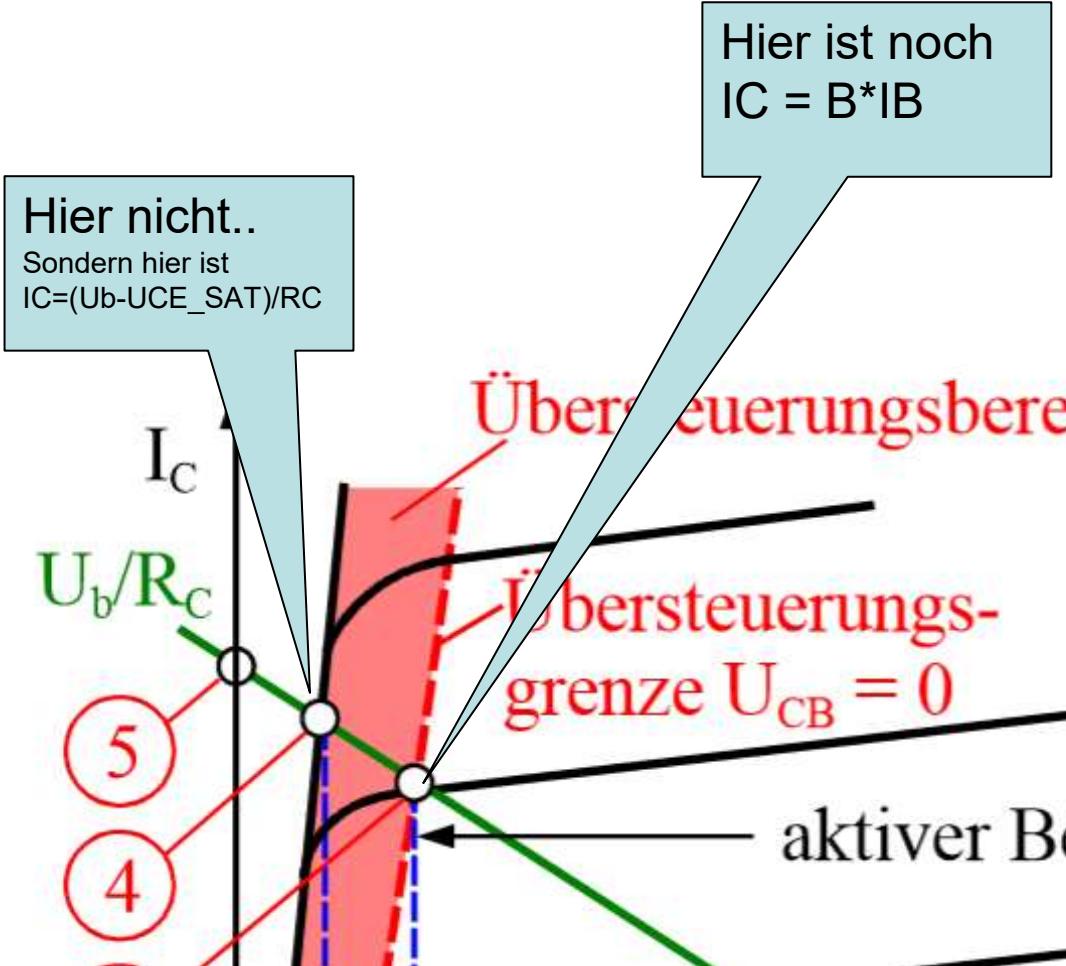
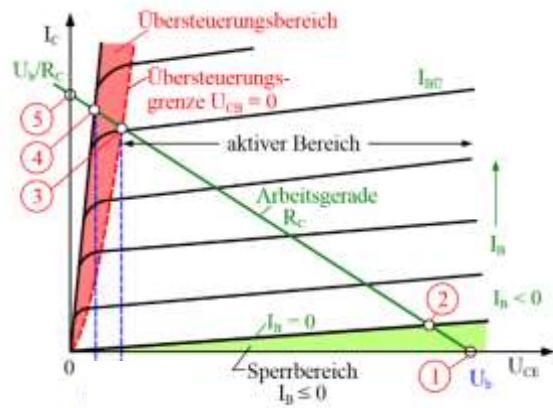
- Ladung muss aus Basis ausgeräumt werden
- Negativer Basisstrom über R_e
- Übersteuerung → Zusätzliche Ladungsträger aus leitender CB-Diode in Basis → Speicherzeit wird verlängert

Transistor wird eingeschaltet

- ..ähnlich
- Positiver Basisstrom muss Kapazitäten erst aufladen
- Je höher Basisstrom, desto schneller
- ABER: Übersteuerung verlangsamt Abschalten



Übersteuerung...



Beschleunigung des Schaltverhaltens

Grundsätzlich: Basisstrom muss in beiden Richtungen clever erhöht werden

Problem: Übersteuerung

Antisättigungsschaltung, Klemmschaltung

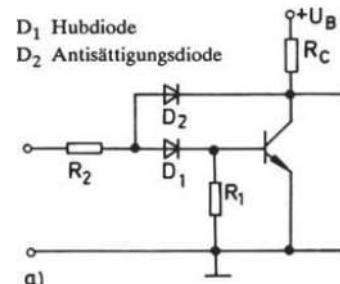
- Mit Dioden wird Übersteuerung verhindert
- 2 konventionelle Dioden oder 1 Schottkydiode (\rightarrow Schottky-Transistor)
- Basisstrom kann über Übersteuerungsgrenze erhöht werden ohne dass negative Auswirkungen beim Ausschalten eintreten

RC-Netzwerk an Basis (Speed-up Kondensator)

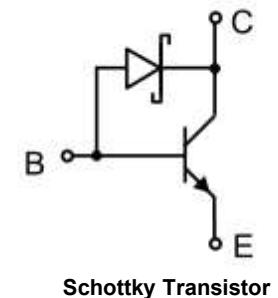
- Kondensator parallel zum Basiswiderstand
- Bewirkt beim Einschalten kurzzeitige Übersteuerung
- Bewirkt beim Ausschalten zusätzlichen Ausräumstrom

Negative Steuerspannung

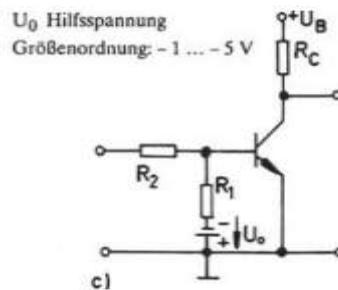
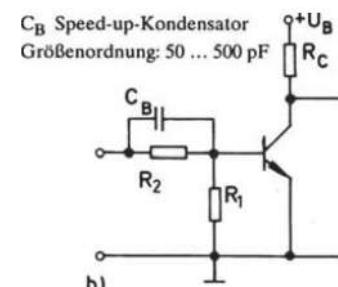
- Negative Hilfsspannung an der Basis bewirkt erhöhten Ausräumstrom



a)



Schottky Transistor



Bilder: [Goe]

Grenzdaten

...mehr zerstört das Bauteil....

Höchst zulässige Sperrspannungen für jedes Elektrodenpaar

- CE
- CB
- EB

Maximale Ströme

- Kollektor
- Basis

Leistung

- Gesamtverlustleistung

Temperatur

- An der Sperrsicht

MAXIMUM RATINGS			
Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	Vdc
Collector-Emitter Voltage	V_{CER}	70	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB}	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	7	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	15	Adc
Base Current	I_B	7	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate Above 25°C	P_D	115 0.657	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

Durchbruch

- Plötzlicher steiler Anstieg von IC bei höheren UCE
- Erster Art: Lawinendurchbruch.
 - UCE bleibt annährend konstant. Nur dann nicht zerstörend, wenn Strom ausreichend begrenzt
- Zweiter Art: Lokale Überhitzung
 - Durch hohem IC.
 - Infolge Durchbruch 1. Art
 - In der Regel zerstörend

Sicherer Arbeitsbereich / SOA

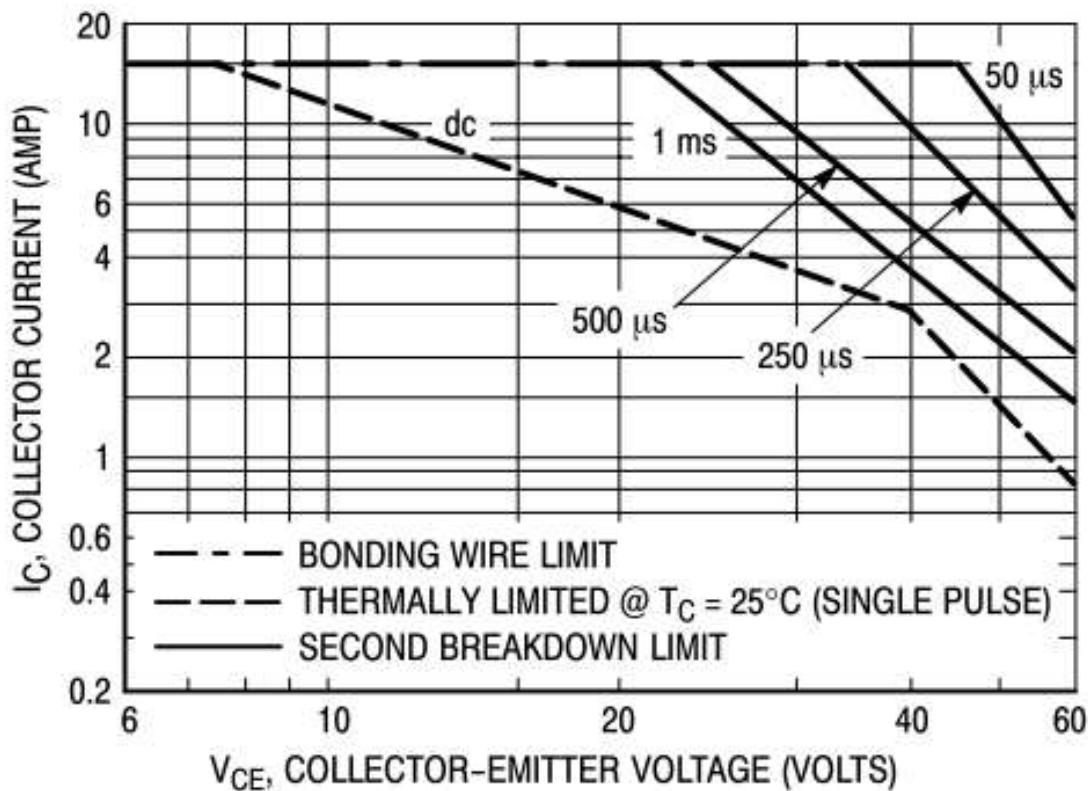


Figure 2. Active Region Safe Operating Area

Beschreibt zulässigen Arbeitsbereich
für Gleichstrom und Pulsbetrieb

Begrenzung durch

- Max. Kollektorstrom
- CE-Durchbruchspannung 1. Art
- Durchbruch 2. Art
- Max. Verlustleistung