

# 1. Einleitung zur Halbleiterschaltungstechnik

Die **Halbleiterschaltungstechnik** und ihre Entwicklung sind heute in hohem Maße durch die Quanten- und Quantenfeldtheorie bestimmt.

Die Besonderheiten in der Halbleiterschaltungstechnik verlangen

- auf der einen Seite zunehmend **abstraktere Modelle** und
- auf der anderen Seite stark **vereinfachte Modelle**.

Also ein **reduziertes gedankliches Abbild** aller Vorgänge.

Deshalb soll in dieser Veranstaltung versucht werden in die Begriffswelt einzuführen.

- Der Beginn der Halbleiterbauelemente kann im „**Kristalldetektor**“ (vorwiegend aus Bleiglanz oder Pyrit) und seiner Nutzung (insbesondere in der Amateurtechnik) zu Beginn des 20. Jahrhunderts gesehen werden.
- Es folgten **Selengleichrichter** und **Germanium-Spitzendioden**.
- 1948 fanden John Bardeen, Walter Houser Brattain und William Shockley beim Experimentieren mit Mehrfach-Spitzendioden einen Verstärkungseffekt und im Weiteren den **Transistor**.

# Grundlagen der Halbleiterbauelemente sowie Analyse analoger und digitaler Schaltungen

	Elektronenröhre	Transistor	integrierter Transistor	Entwicklung
Beginn der Nutzung	ca. 1920	ca. 1960	ca. 1970	
Volumen der Standardelemente	20 cm <sup>3</sup> (Ø 2, H 6 cm)	40 mm <sup>3</sup> (4·5·2 mm <sup>3</sup> )	1970: 0,02 mm <sup>3</sup> (0,2·0,2·0,5 mm <sup>3</sup> ) heute: 2·10 <sup>-9</sup> mm <sup>3</sup> (0,1·0,1 µm <sup>2</sup> ·0,2 mm)	10 <sup>-6</sup> 10 <sup>-13</sup>
Lebensdauer entspr. Ausfallrate	ca. 1 a	1000 a	10 <sup>8</sup> a	10 <sup>8</sup>
Preis der Standardelemente	5 €	0,5 €	1970: 0,05 Cent heute: 1/1000 Cent (400€/40 Mio Tr.)	10 <sup>-4</sup> 5·10 <sup>-5</sup>

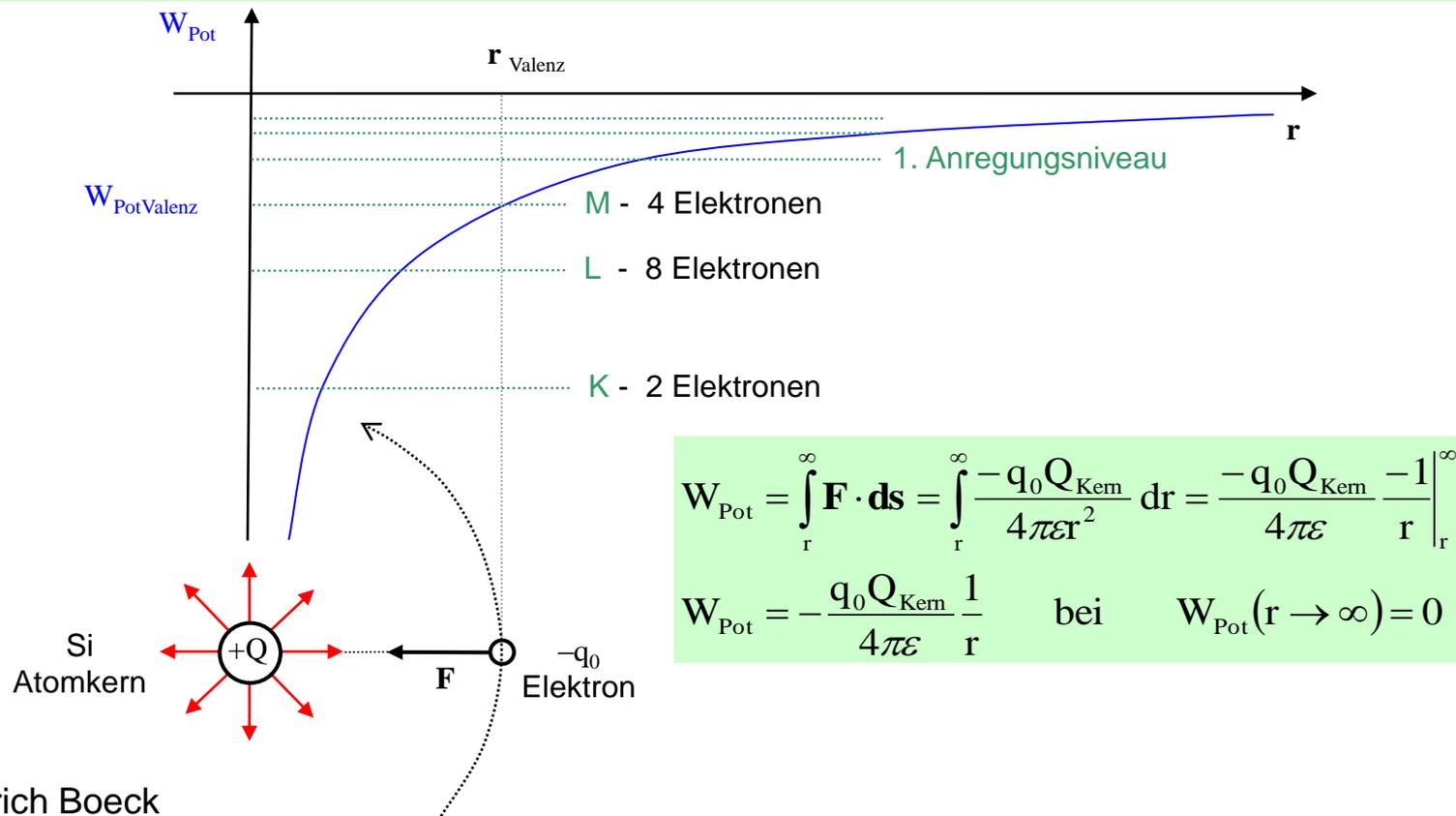
(bei PKW → Preis von einigen Cent → praktisch ewig reparatur- und wartungsfreien Betrieb → Volumen von etwa 1 ml.)

- Historisch liegen die Nutzung der **Gasentladung** und **Vakuümrohre** davor (Glimmlampe...Quecksilberdampfgleichrichter und Tyratron und Diode, Triode...Spezialröhren)
- Für die Grundlagen der Halbleiterschaltungstechnik werden
  - in die wichtigsten **Denkweisen und Modellvorstellungen** vor allem mit grafischen Hilfsmitteln einen Einblick ermöglicht,
  - Bezüge zu **praktischen Fragen** aufgezeigt sowie
  - die Gesamthematik mit Übungsaufgaben vertieft.
- Zwei Lernstationen sollen danach eigene Erfahrungen fördern.
  - Analyse von Bauelementen und Schaltungen der Informations- und Audiotechnik
  - später für die Prozesse der Energiewandlung.

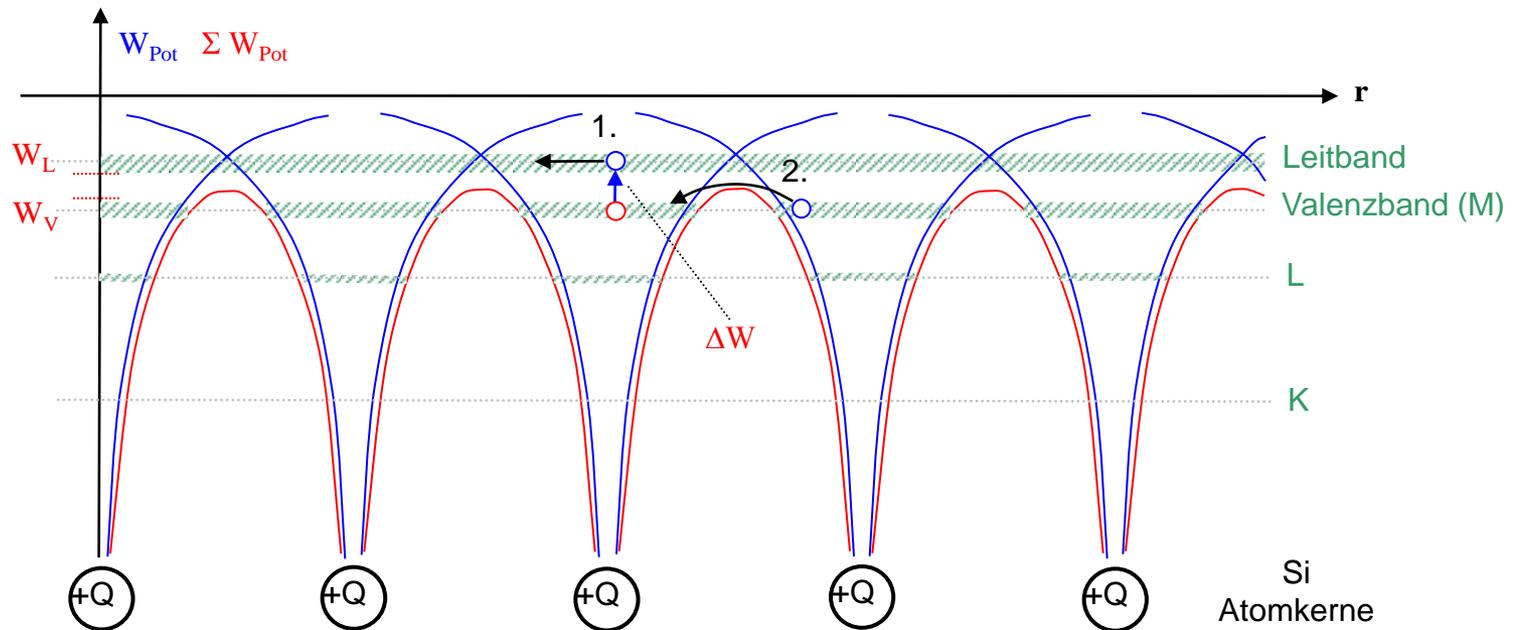
## 2. Halbleiterbauelemente

### 2.1 Physikalische Grundlagen für Festkörper

Der **Ausgangspunkt** zur Beschreibung der Leitungsmechanismen in Festkörpern ist das **Atommodell**, ( vereinfacht: Coulomb'sches Gesetz und Bedingungen für stabile erlaubte Bahnen).



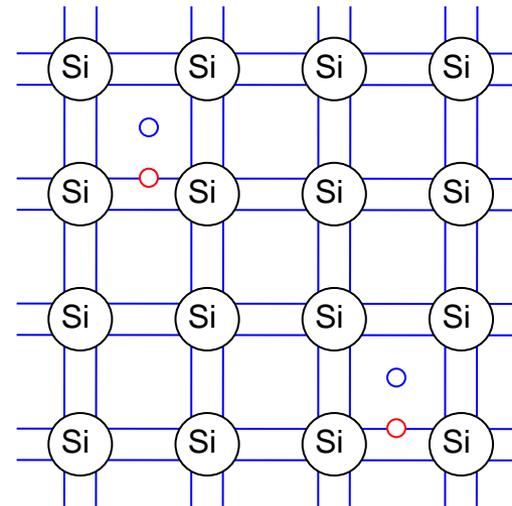
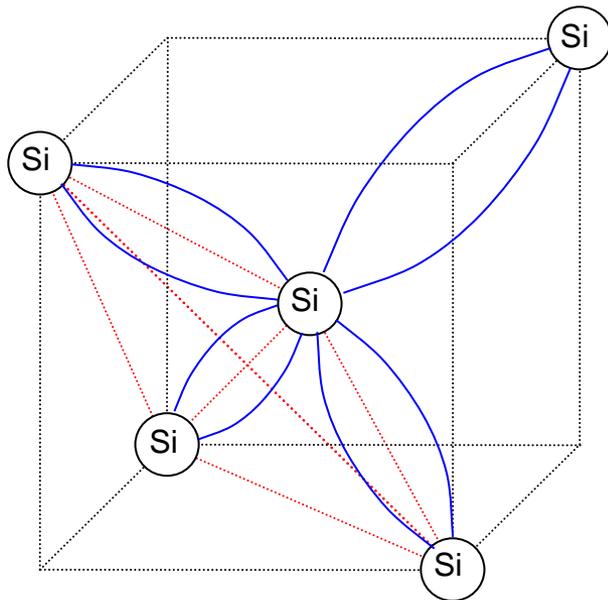
Der Übergang zu einer periodischen Anordnung von Atomen im **Kristall** ergibt eine Darstellung der Leitungsmechanismen in Festkörpern.



- 1. Elektronenleitung im Leitband** Elektronen bewegen sich ohne Energieveränderung, sind nicht mehr an ein Siliziumion gebunden, werden durch elektrisches Feld **gegen** Feldrichtung bewegt. Leitung hängt von **Anzahl Elektronen** pro Volumen „ $n$ “ im Leitband und **Beweglichkeit** „ $b_n$ “ ab.
- 2. Löcherleitung im Valenzband** Elektronen springen über geringe Energiebarriere auf unbesetzte Stelle, also unbesetzten Stellen (**die Löcher**) springen entgegengesetzt, werden durch elektrisches Feld **in** Feldrichtung bewegt. Leitung hängt von **Anzahl Löcher** pro Volumen „ $p$ “ im Valenzband und **Beweglichkeit** „ $b_p$ “ ab.

**Leitfähigkeit:**  $\kappa = q_0 (b_n n + b_p p)$

Für Halbleiter sind unbedingt **hochreine** Einkristalle erforderlich.



Grundstruktur des Siliziumkristalls – mit tetraedrischen  $sp^3$ -Bindungen – ist ein **kubisches Kristallsystem** (Diamantstruktur).

Die ebene Darstellung zeigt die Kristallbindung.

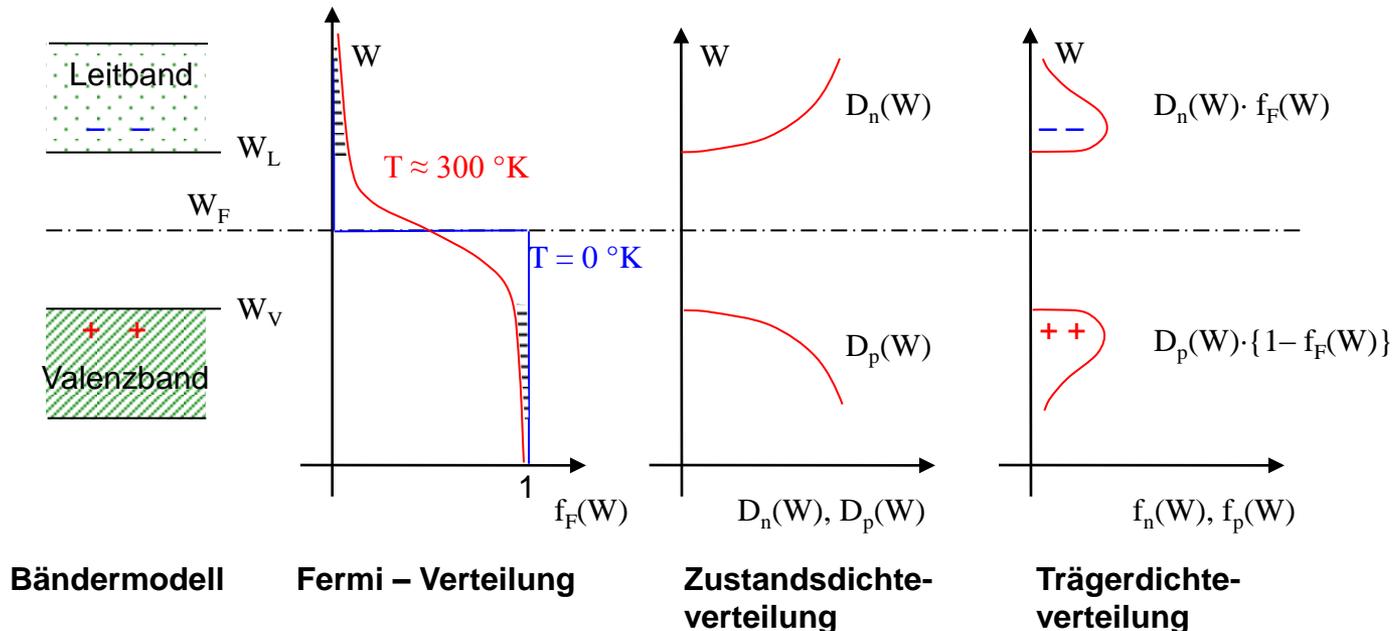
Jeweils **vier Valenzelektronen werden paarweise gemeinsam genutzt** (ideale Achterbelegung).

Wärmeenergie als Anregungsenergie → Elektronen gelangen ins Leitband.  
 Sie lassen unbesetzte Stelle zurück, Elektronen-Loch-Paar → **Generation**.  
 Fällt ein Elektron ins Leitband zurück, wird Loch beseitigt → **Rekombination**.

**Photonen** und elastische **Stöße** → Generation von Elektronen-Loch-Paaren.  
 Rekombination → überschüssige Energie als **Photon** oder **Phonon**

**Dynamischen Prozesses** →  $n$  und  $p$  (Dichte Elektronen bzw. Löcher pro Volumen)  
 Beschreibung durch statistische Methode von **Fermi**.

**Fermi – Verteilung:**  $f_F = \{1 + \exp[(W - W_F)/kT]\}^{-1}$



Das **Ferminiveau**  $W_F$  wird im thermischen Gleichgewicht aus der **Neutralitätsbedingung** bestimmt.

Kein thermisches Gleichgewicht (bei Stromfluss)  $\rightarrow$  Ferminiveau ist „verbogen“.

Beweglichkeit  $b_n$  im Elektronengas zwischen den Atomen  $\rightarrow$  **freien Weglänge**

Freie Weglänge ist im Mittel desto kürzer

- je **mehr Elektronen** vorhanden sind,
- je **dichter die Atome** im Kristall angeordnet sind oder
- je **stärker die Atome** um ihre Gitterposition durch ihre Wärme **schwingen**.

Beweglichkeit der Löcher  $b_p$   $\leftarrow$  zu überspringende Energiebarriere

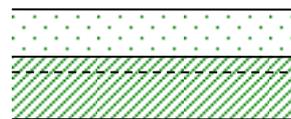
Deutlich geringer als  $b_n$

Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit  $\leftarrow$

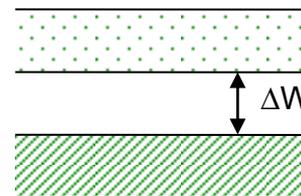
- Zunahme von freien Elektronen ( $n$ ) und Löchern ( $p$ )
- Abnahme der Beweglichkeit ( $b_n, b_p$ )



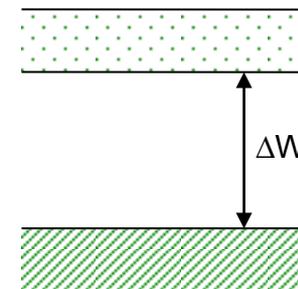
**Leiter 1:**  
Valenzband nur teilweise besetzt  
z.B. 1-wertige Metalle (Na)



**Leiter 2:**  
Valenz- und Leit-band überlappend  
z.B. 2-wertige Metalle (Cu)

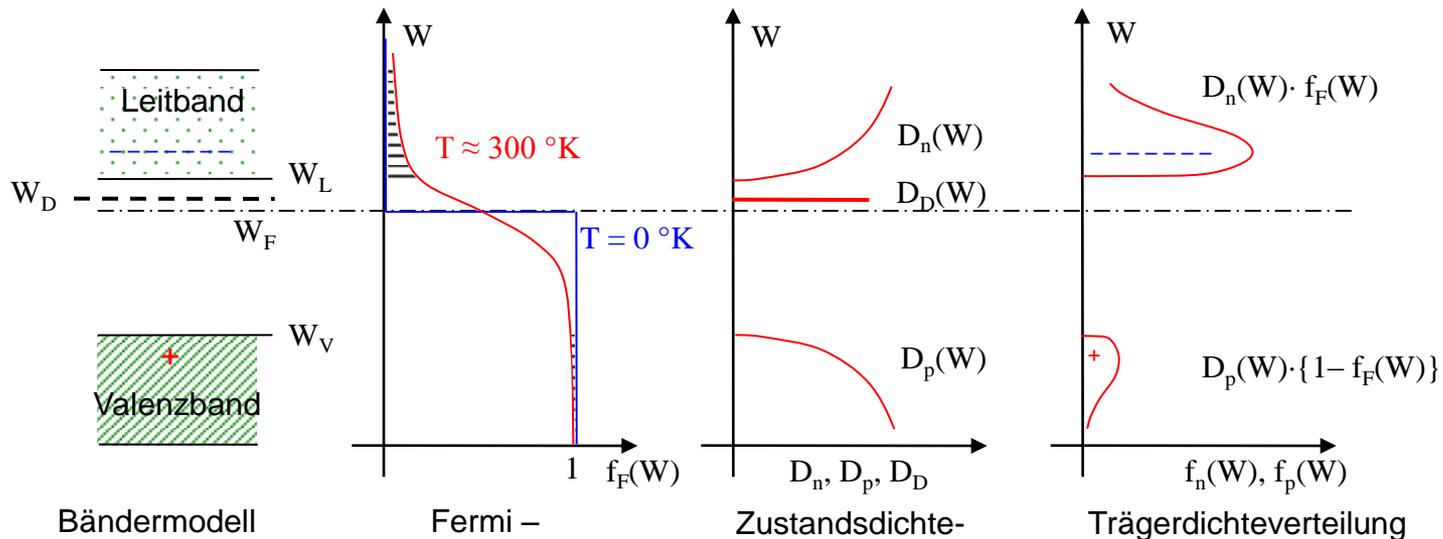
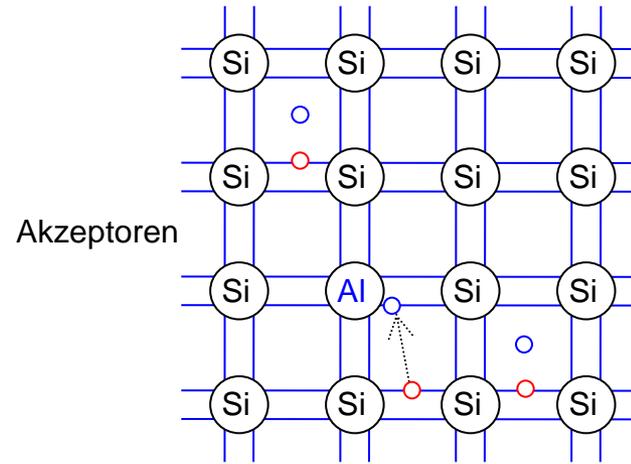
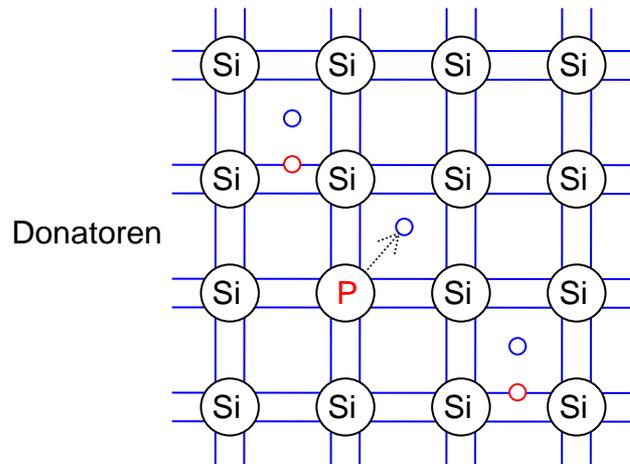


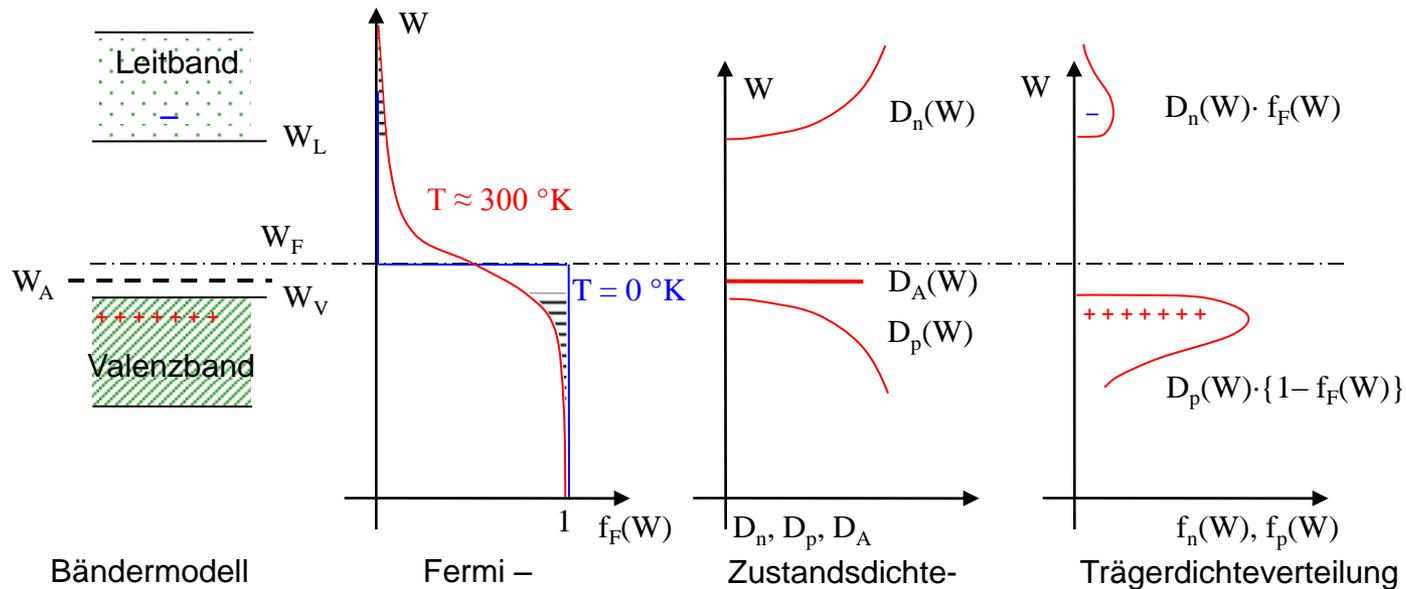
**Halbleiter:**  
 $\Delta W \approx 1 \text{ eV}$



**Isolator:**  
 $\Delta W > 3 \dots 7 \text{ eV}$

Das Bändermodell ermöglicht den Einfluss von Dotierungen (gewollte Störstellen) des Einkristalls zu untersuchen.





Bilanz der Trägerkonzentrationen → **Massenwirkungsgesetz** des Halbleiters

$$n \cdot p = n_i^2 \quad \text{bei Eigenleitung} \quad n_0 p_0 = n_i^2 \quad \text{und} \quad n_0 = p_0$$

Zusätzlich **Ladungsbilanz:**

$$n + N_{A-} = p + N_{D+}$$

**Majoritätsträger** und **Minoritätsträger**

**Bändermodell** mit Fermi-niveau → wirksame Methode,  
exakte Untersuchungen →

- quantenphysikalisch: Atom-, Kristallaufbau, Bindungen, Zustandsdichten
- thermodynamisch: Verteilungsfunktionen, Gleichgewichtsverhältnisse
- elektrisch: Raumladung, Feld, Spannung mit ihren räumlichen Funktionen

# Grundlagen der Halbleiterbauelemente sowie Analyse analoger und digitaler Schaltungen

Kennwerte bei 300 °K		$\Delta W$	$b_n$	$b_p$	n, p (Eigenleitung)
Germanium	Ge	0,67 eV	3900 cm <sup>2</sup> /Vs	1900 cm <sup>2</sup> /Vs	2,33 10 <sup>13</sup> cm <sup>-3</sup>
Silizium	Si	1,12 eV	1500 cm <sup>2</sup> /Vs	600 cm <sup>2</sup> /Vs	1,6 10 <sup>10</sup> cm <sup>-3</sup>
Galliumarsenid	GaAs	1,43 eV	8500 cm <sup>2</sup> /Vs	400 cm <sup>2</sup> /Vs	1,3 10 <sup>6</sup> cm <sup>-3</sup>
Kupfer	Cu	-	40,6 cm <sup>2</sup> /Vs	-	8,4 10 <sup>22</sup> cm <sup>-3</sup>

## Aufgabe 2.1.1

Nach ( 2.1 ) kann die Leitfähigkeit  $\kappa$  für Eigenleitung und Zimmertemperatur (300 °K) aus den Angaben der obigen Tabelle berechnet werden.

**Frage 1:** Wie groß wird  $\kappa$  von Ge, Si, GaAs und zum Vergleich Cu?

**Frage 2:** Welcher Strom fließt durch ein Bauelement von 0,1 mm Dicke und 0,1·0,1 mm<sup>2</sup> Fläche bei einer Spannung von 5 V für diese Materialien?

**Zusatzaufgabe:** Diskutiere die Ergebnisse!

(Zum Vergleich:  $\kappa_{\text{Ge}} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ,  $\kappa_{\text{Si}} = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ,  $\kappa_{\text{GaAs}} = 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$  und  $\kappa_{\text{Cu}} = 56 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$  mit  $\text{m}/\Omega\text{mm}^2 = 10^6 \text{ 1}/\Omega\text{m}$ )

## Aufgabe 2.1.2

Eine Probe Silizium aus der obigen Tabelle wird mit einer Phosphorkonzentration von  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  dotiert.

**Frage 1:** Wie groß sind n und p sowie  $\kappa$ ?

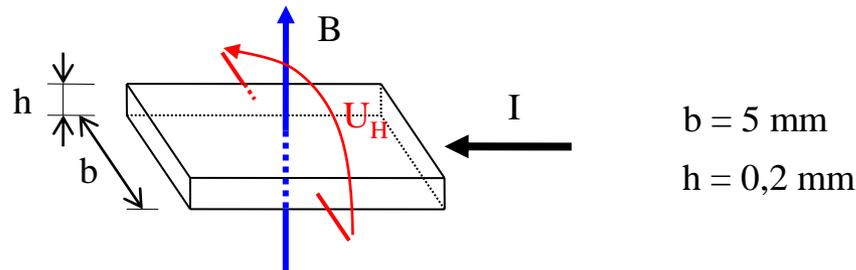
**Hinweis:** Nutze ( 2.3 ) und ( 2.4 ), vernachlässige die Änderung der Beweglichkeiten!

**Frage 2:** Bei der gleichen Probe (Länge 8 mm Fläche 1 mm<sup>2</sup>) wird ein Widerstand von 400  $\Omega$  gemessen, wie groß ist die tatsächliche Beweglichkeit  $b_n$ ?

**Hinweis:** Nach den Erfahrungen mit Frage 1 kann die Löcherleitfähigkeit vernachlässigt werden.

## Aufgabe 2.1.3

Aus der Siliziumprobe von Aufgabe 2.1.2 wird ein Hallsensor hergestellt. Durch den Sensor fließt ein Strom von 1 mA und senkrecht zum Strom wirkt ein Magnetfeld von 2000 T.



**Frage:** Wie groß ist die Hallspannung  $U_H$ ?

**Hinweis:** In obiger Anordnung ist  $S = I A_{\perp} = q_0 v_D n$  und  $F = q_0 v_D B$  sowie  $U_H = b E = b F/q_0$ .

## Aufgabe 2.1.4

Ein Fotowiderstand soll aus Silizium hergestellt werden und eine möglichst große Widerstandsänderung und Empfindlichkeit aufweisen.

**Frage 1:** Sollte hoch, niedrig oder nicht dotiert werden?

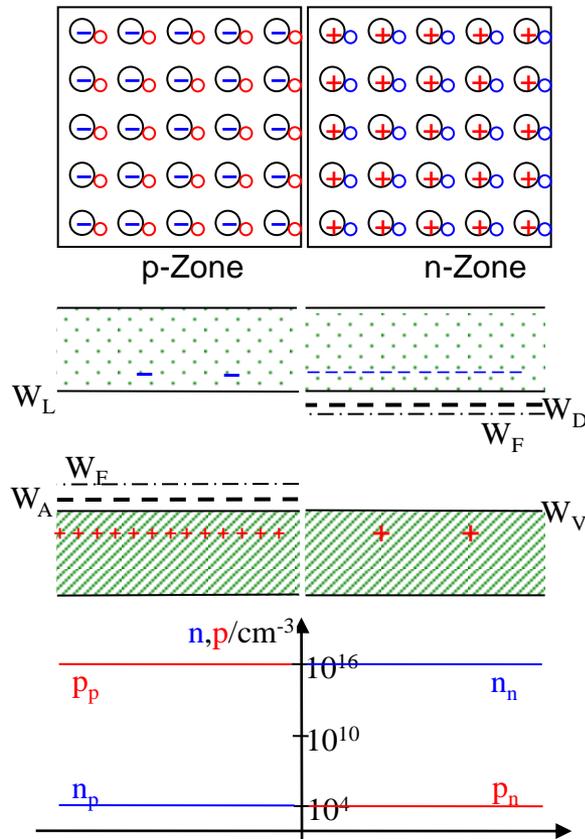
## Aufgabe 2.1.5

Ein Thermowiderstand soll aus Silizium hergestellt werden und mit steigender Temperatur besser leiten (bei ca.  $1000 \Omega$  für  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

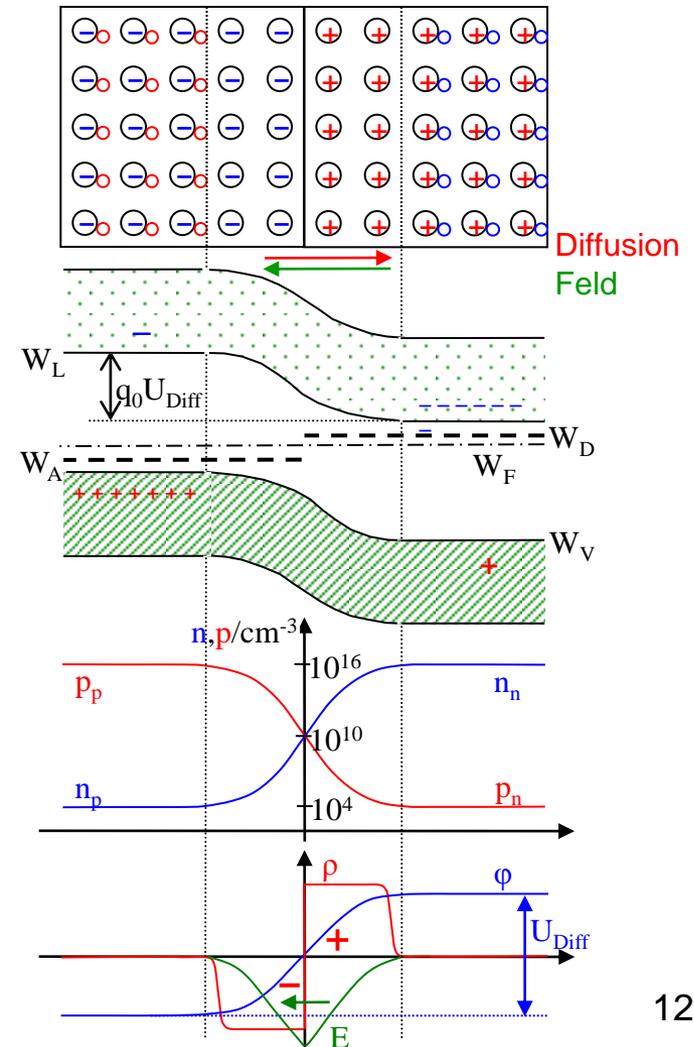
**Frage 2:** Sollte hoch, niedrig oder nicht dotiert werden?

## 2.2 PN – Übergang

Die zwei Leitfähigkeitstypen ergeben die Möglichkeit, einen Übergang von einem Leitfähigkeitstyp zum anderen herzustellen.



- Elektron (beweglich)
- Loch (beweglich)
- ⊖ Akzeptor (Ion feststehend)
- ⊕ Donator (Ion feststehend)



Gefälle der Konzentrationen → **Diffusion** der Ladungsträger in Richtung geringere Konzentration

Raumladungszone im Bereich des Übergangs → zwischen Ladungen wirkt **elektrisches Feld**

Zwischen der Diffusionsbewegung und der Bewegung infolge der Kräfte des Feldes der Raumladung stellt sich ein **Gleichgewicht** ein.

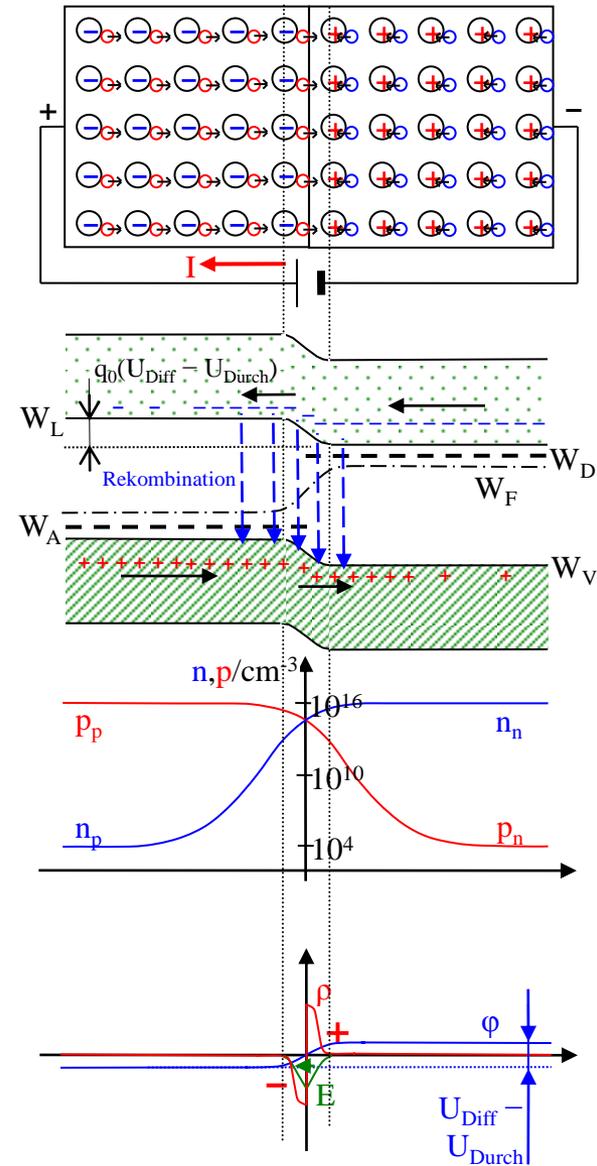
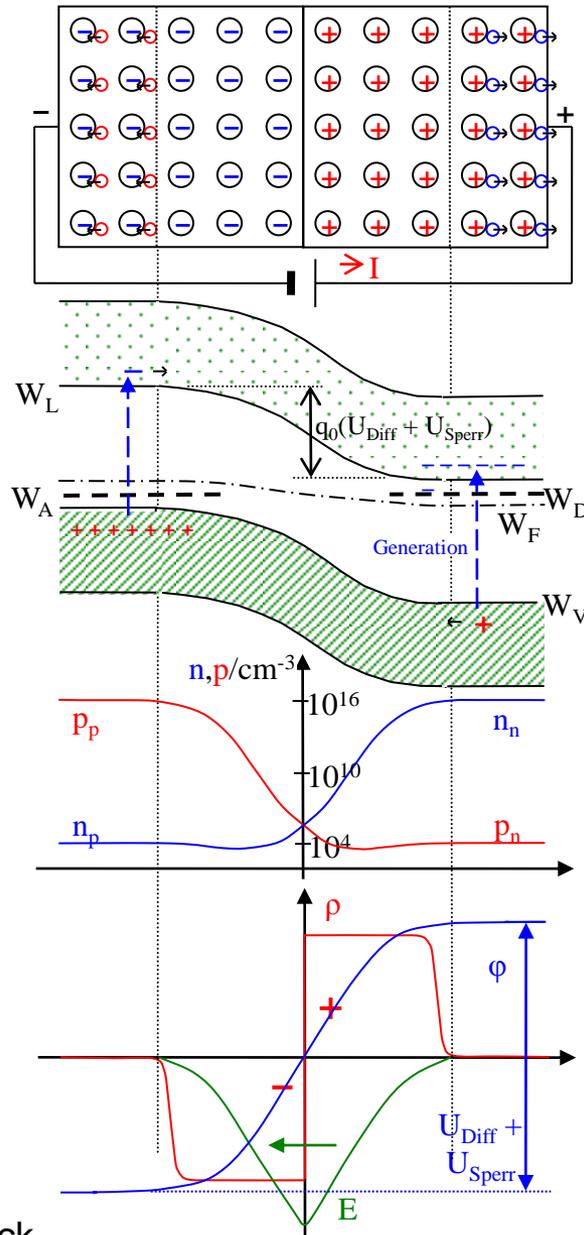
Aus  $n$  und  $p$  → Raumladungsdichte  $\rho$  → das elektrische Feld  $E$  → Potential  $\varphi$

$$E(x) = D(x)/\varepsilon = \int_{\text{ElektrodeP-Zone}}^x \rho(x)/\varepsilon dx \qquad \varphi = - \int_{\text{ElektrodeP-Zone}}^x \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

Die Spannung zwischen den Enden beider Halbleiterzonen infolge des Gleichgewichts wird **Diffusionsspannung**  $U_{\text{Diff}}$  genannt.

- Bei einer **äußeren Spannung** werden durch den Stromfluss von den Kontakten
- **entweder** weitere Ladungen **abgeführt**, Ausdehnung der Raumladungszone, Sperrrichtung, relativ kleiner Strom **oder**
  - **nachgeliefert**, Abbau der Raumladungszone, Durchlassrichtung, hoher Strom

# Grundlagen der Halbleiterbauelemente sowie Analyse analoger und digitaler Schaltungen



Bei Stromfluss wird das Gleichgewicht in der Sperrschicht durch weiteren Abzug von Trägern bzw. Ladungsträgerzufuhr (Trägerinjektion) gestört.

Das Fermi-niveau verbiegt sich infolge des Nichtgleichgewichts:

→ Sperrrichtung Bandverbiegung um Sperrspannung stärker

→ Durchlassrichtung Bandverbiegung um Durchlassspannung geringer

Maschensatz (im Uhrzeigersinn gesehen).

im PN-Übergang	+ Elektroden	+ außerhalb	= 0
$-(U_{\text{Diff}} + U_{\text{Sperr}})$	$+ U_{\text{Elektroden}}$	$+ U_{\text{Außen(Sperr)}}$	= 0
$-(U_{\text{Diff}} - U_{\text{Durch}})$	$+ U_{\text{Elektroden}}$	$- U_{\text{Außen(Durch)}}$	= 0

Strom aus den Anteilen der Diffusion und des Feldes

$$I(x) = I_{\text{Diff } n}(x) + I_{\text{Feld } n}(x) + I_{\text{Diff } p}(x) + I_{\text{Feld } p}(x) = \text{const}$$

An den Elektroden besteht Strom nur aus Majoritätsträgern.

$$I = I_{\text{Feld } p}(\text{P-Elektrode}) = I_{\text{Feld } n}(\text{N-Elektrode})$$

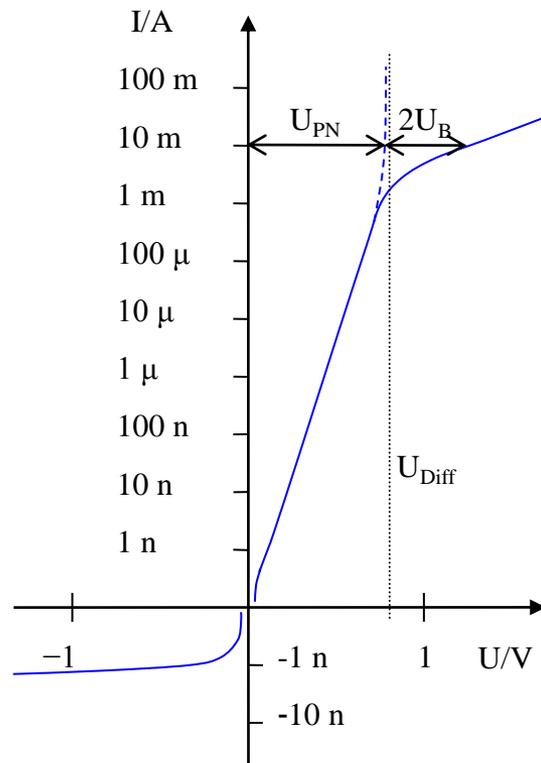
Aus Leitfähigkeit  $\kappa$ , Potentialverlauf, Fermi- und Trägerdichteverteilung ( $n$ ,  $p$ ) wird die Kennlinie des PN-Übergangs bestimmt.

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad \text{Wagner'sche Kennlinienformel für } U \ll U_{\text{Diff}}$$

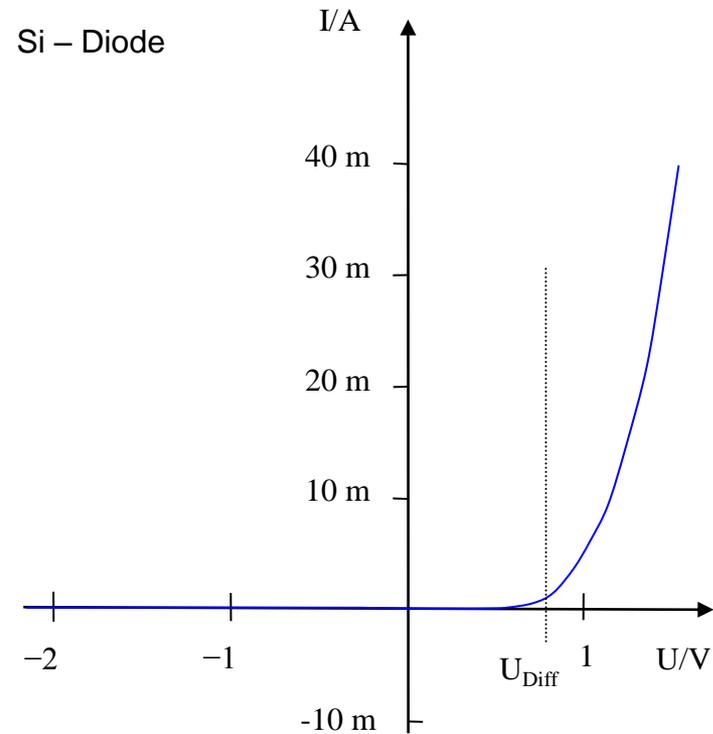
Für  $U \approx U_{\text{Diff}}$  sind Bandverbiegungen abgebaut  $\rightarrow$  weitere  $\uparrow U$  über Bahngebiete

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU_{\text{Diff}}}{kT}} - 1 \right) \frac{1}{4} \left[ \coth^2 \left( \frac{U_{\text{Diff}} - U_{\text{PN}}}{2kT/q} \right) - \coth^2 \left( \frac{U_{\text{Diff}}}{2kT/q} \right) \right]$$

$$U = U_{\text{PN}} + 2U_B = U_{\text{PN}} + 2 \frac{kT}{q} \left[ \coth \left( \frac{U_{\text{Diff}} - U_{\text{PN}}}{2kT/q} \right) - \coth \left( \frac{U_{\text{Diff}}}{2kT/q} \right) \right]$$



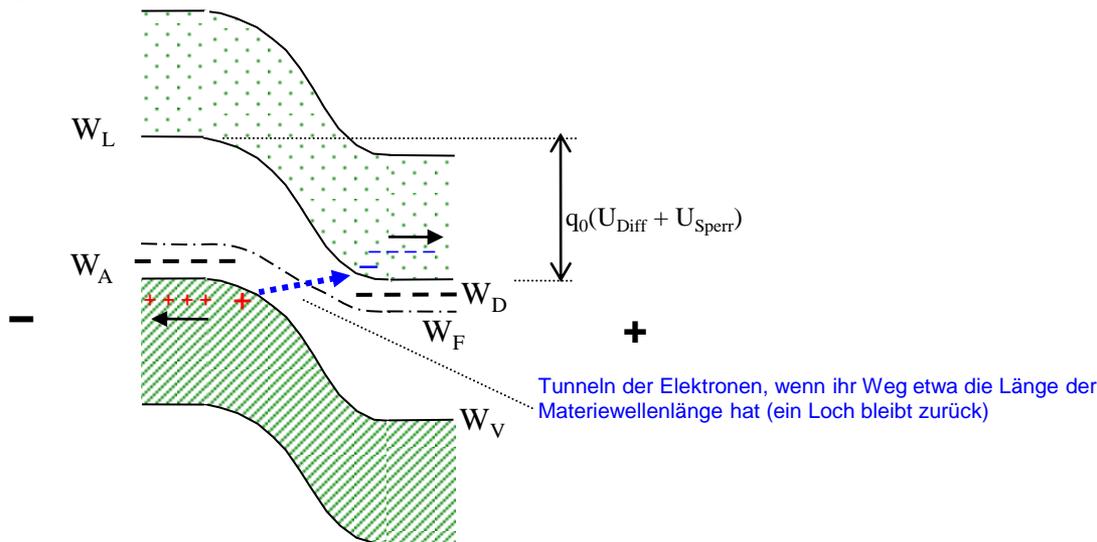
Si - Diode



Parameter  $I_0$  und  $U_{\text{Diff}}$  aus **zwei Messpunkten** der Kennlinie bestimmen.

Technologische Erfordernisse und Einflüsse → Abweichungen → durch einen Korrekturfaktor  $\alpha$  vor  $kT$  in den Exponenten ausgleichen → **dritten Messpunkt**

- Hohe Feldkräfte reißen Ladungsträger aus ihrer Bindung – **Zehner effekt**.
- Bewegungsenergie der Elektronen im Feld → Stoßionisation mit lawinenartigem Anstieg der Trägerkonzentration – **Avalanche effekt**.
- Schmale Übergänge, hohe Sperrspannung → Elektronen „tunneln“ durch Welleneigenschaften von Valenzbandkante zur Leitbandkante – **Tunneleffekt**.



Nutzung: Zehnerdioden zur Spannungsstabilisierung (ca. 3 ... 50 V)

Avalanchdioden zum Überspannungsschutz (ca. 150 ... 1000 V).

## Metall – Halbleiter – Übergänge

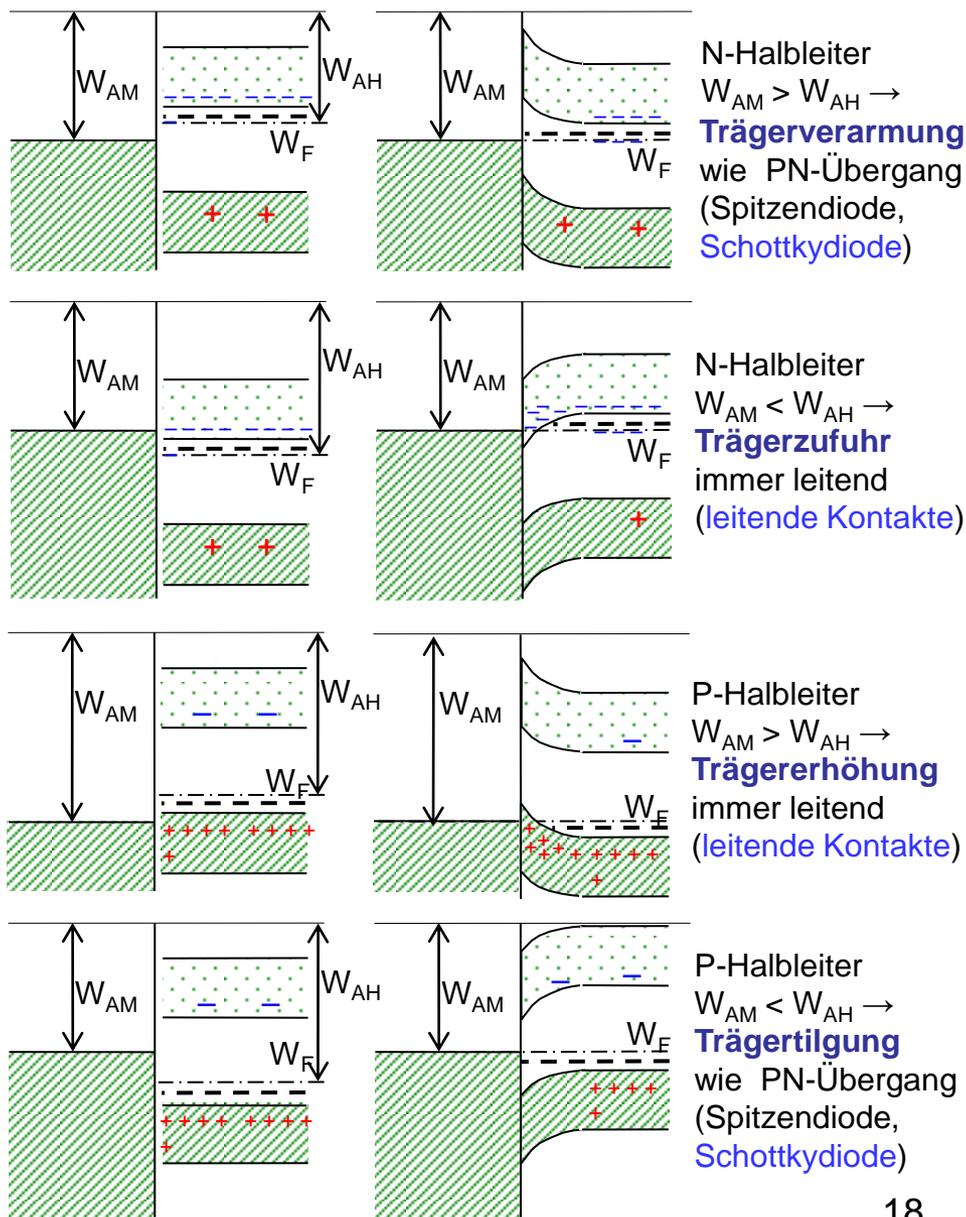
- Schottkydioden und
- Grundlage für leitende Kontakte an Halbleiterbauelementen

Bändermodell des Metalls (Überschneidung: Valenzband und Leitband) reduziert sich auf Schottky'sches **Napfmodell** (bis  $W_F$  gefüllter Napf).

Auch hierbei **Gleichgewicht** zwischen Diffusion und Feld.

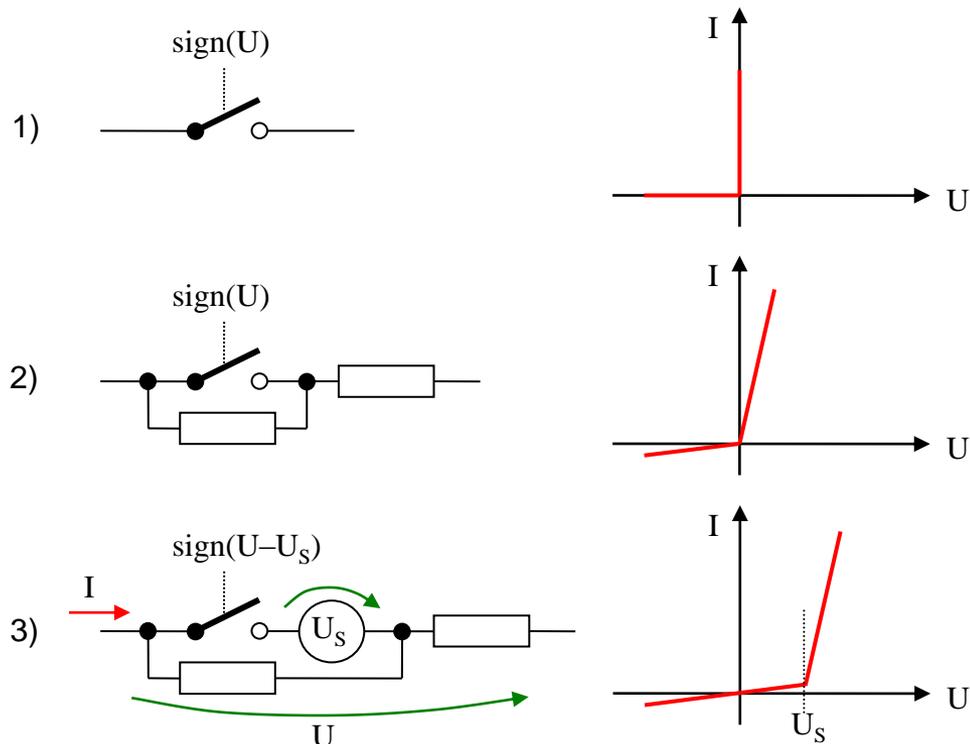
Auf der Oberfläche des Einkristalls

Diffusionsspannung und somit Schwellspannung:  
bei Schottkydioden 0,2 bis 0,3 V

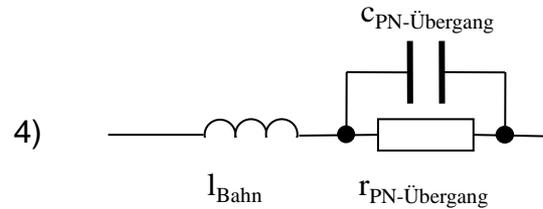


In der Schaltungstechnik zweckmäßig Ersatzschaltungen zu verwenden.

- Verschiedene Näherungen der **statischen Kennlinie**

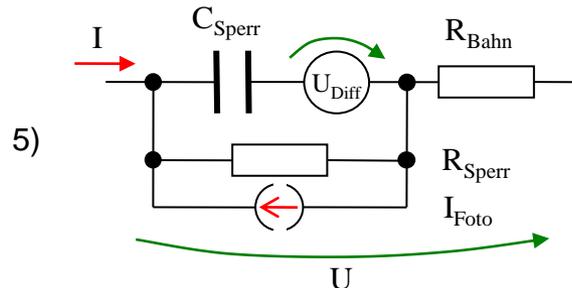


- Näherung für das **Kleinsignalverhalten**



$l_{\text{Bahn}}$  und  $r_{\text{PN-Übergang}}$  und  $c_{\text{PN-Übergang}}$  sind speziell im Arbeitspunkt bestimmte Elemente zur Annäherung an die gemessenen Kleinsignale

- **Modell:** exaktes physikalische Verhalten des PN-Übergangs so einfach wie möglich. → Großsignalverhalten und Kleinsignalverhalten



$C_{\text{Sperr}}$  = C PN-Übergang  
 $R_{\text{Bahn}}$  = Bahnwiderstand  $2U_B/I$   
 $R_{\text{Sperr}}$  = R PN-Übergang  $U_{\text{PN}}/I$   
 $U_{\text{Diff}}$  = Diffusionsspannung const  
 $I_{\text{Foto}}$  = Fotogeneration  
 (Bis auf  $U_{\text{Diff}}$  alle nichtlinear)

Dadurch können Fotostrom, Lichtstrahlung ( $P_{\text{Licht}} = I\{R_{\text{Sperr}}\} \cdot$  Quantenausbeute) sowie deren Zeitverhalten dargestellt werden.

- Ersatzschaltungen werden zur **Schaltungsberechnung** und zur Analyse der Funktionsweise von Schaltungen herangezogen.
- Insbesondere **Simulationssysteme** benutzen vorrangig verschiedene Ersatzschaltungen.
- Die Bestimmung der **Parameter der Ersatzschaltungen erfolgt Messung** bzw. aus Typparametern der Hersteller.

## Aufgabe 2.2.1

Ein Silizium PN-Übergang wurde mit  $n_A = n_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dotiert. Die Dotierungen sind bei Raumtemperatur vollständig ionisiert, so dass  $p_p = n_n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (bei  $n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ) betragen.

**Frage 1:** Wie groß sind  $n_p$  und  $p_n$ ?

**Frage 2:** Wie groß ist die Diffusionsspannung?

**Hinweis:** Die Überlegungen finden bei thermischem Gleichgewicht statt. Das Verhältnis von

$n_p/n_n = f_F(W_{L \text{ P-Elektrode}}) / f_F(W_{L \text{ N-Elektrode}})$  mit  $f_F$  nach ( 2.2 ) kann durch Einsetzen von

$W_{L \text{ P-Elektrode}} = q_0 \phi$  (P-Elektrode) und  $W_{L \text{ N-Elektrode}} = q_0 \phi$  (N-Elektrode) (vergleiche auch Abb. 2.10) und

vernachlässigen der „1“ gegenüber den Exponentialfunktionen zu  $U_{\text{Diff}} = \phi$  (N-Elektrode) –  $\phi$  (P-Elektrode) umgeformt werden ( $kT/q_0 = 26 \text{ mV}$  bei etwa Raumtemperatur ca.  $300 \text{ °K}$ ).

**Zusatzfrage 1:** Welche Schwellspannung ist bei der Kennlinie zu erwarten?

**Zusatzfrage 2:** Was ergäbe Galliumarsenid mit  $n_i = 1,3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$  bei gleicher Dotierung?

## Aufgabe 2.2.2

Eine GaAs – LED ( $\lambda = 940 \text{ nm}$ ) hat bei 20 mA eine Durchlassspannung von 1,25 V. Bei jedem Rekombinationsvorgang kann ein Photon mit  $W_{\text{ph}} = h \nu = h c/\lambda$  abgestrahlt werden (mit  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  und  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

**Frage 1:** Wie viele Rekombinationsvorgänge finden pro Sekunde statt?

**Hinweis:** Bei einem Rekombinationsvorgang ersetzt ein Elektron der Elektronenleitung (in der N-Zone) ein Loch der Löcherleitung (in der P-Zone) (vergleiche Abb. 2.11 d).

**Frage 2:** Wie groß ist die elektrisch verbrauchte Leistung und wie groß die Leistung des Photonenstroms, wenn alle Rekombinationsvorgänge ein Photon abgeben und ihr Licht vollständig die Diode verlassen kann?

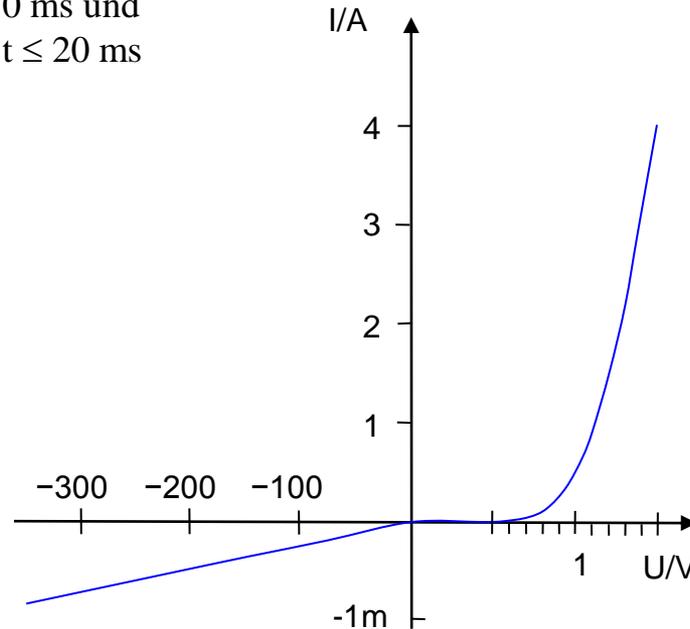
**Frage 3:** Wie groß ist die tatsächliche Quantenausbeute  $\eta_Q$ , wenn ein Wirkungsgrad von 35 % gemessen wird (einmal geben nur etwa 90 % der Rekombinationsvorgänge ein Photon ab und zum anderen wird ein großer Teil vom gleichen Material auch wieder absorbiert)?

## Aufgabe 2.2.3

Bei einer Einweggleichrichtung wird für die Diode folgender Strom gemessen:

$$i = 3 \text{ A} \sin(2 \pi t / 20 \text{ ms}) \quad 0 \leq t \leq 10 \text{ ms} \text{ und}$$

$$i = 0,8 \text{ mA} \sin(2 \pi t / 20 \text{ ms}) \quad 10 \leq t \leq 20 \text{ ms}$$



U/V	I/A
-325	0,8 m
0	0
0,7	0,05
0,85	0,2
1	0,5
1,2	1,5
1,5	4

Die Kennlinie der Diode zeigt die Abbildung und die nebenstehende Tabelle.

(Für eine Simulation könnten die Messpunkte direkt als nichtlineare Kennlinie eingegeben werden.)

**Frage 1:** Wie sieht die Spannung an der Gleichrichterdiode aus?

**Hinweis:** Es ist bei dieser nichtlinearen Kennlinie nur eine grafische Lösung sinnvoll (oder eine Simulation mit irgendeiner Kennliniennachbildung).

**Frage 2:** Welche Verluste entstehen an der Diode (welche Kühlung ist notwendig)?

## Aufgabe 2.2.4

Zwei Gleichrichterdioden sollen parallel geschaltet werden, um einen Strom von 5 A zu ermöglichen. Beide Dioden sind für einen Dauerstrom von  $I_{FM} = 3$  A zugelassen. Die Kennlinien zeigt die nebenstehende Tabelle.

**Hinweis:** Bei Parallelschaltung liegt an beiden Dioden die gleiche Spannung und der Strom wird entsprechend der Kennlinien aufgeteilt. (Interpoliere zwischen den Punkten linear.)

**Frage 1:** Wie ergibt sich die Stromaufteilung bei 5 A Gesamtstrom?

**Frage 2:** Ist der Einsatz dieser beiden Exemplare möglich?

U/V	I <sub>1</sub> /A	I <sub>2</sub> /A
-325	1,5 m	0,8 m
0	0	0
0,7	0,05	0,05
0,85	0,2	0,2
1	0,7	0,5
1,2	1,9	1,5
1,5	5,5	4

## Aufgabe 2.2.5

Die beiden Dioden aus Aufgabe 2.2.4 sollen in Reihe geschaltet werden, um eine Sperrspannung von 500 V zu ermöglichen. Beide Dioden sind für eine Dauersperrspannung von  $U_{RM} = 350$  V zugelassen.

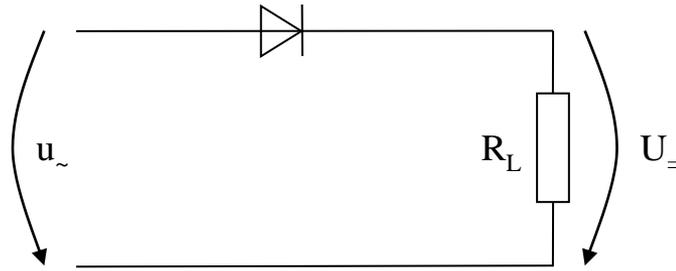
**Hinweis:** Bei Reihenschaltung fließt durch beide Dioden der gleiche Strom und die Spannung wird entsprechend der Kennlinien aufgeteilt. (Interpoliere zwischen den Punkten linear.)

**Frage 1:** Wie ergibt sich die Spannungsaufteilung bei 500 V Gesamtspannung?

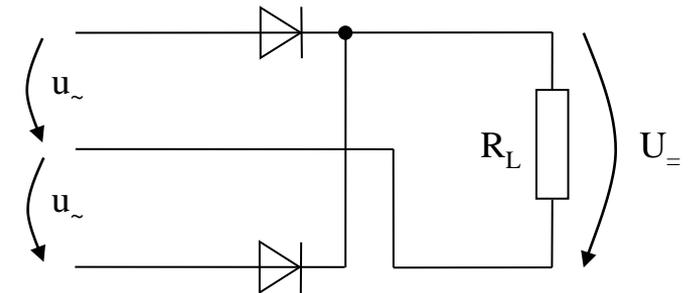
**Frage 2:** Ist der Einsatz dieser beiden Exemplare möglich?

**Zusatzaufgabe:** Wie könnte eine Messstrategie aussehen, Aufgabe 2.2.4 und Aufgabe 2.2.5 praktisch zu lösen, ohne die Dioden zu gefährden?

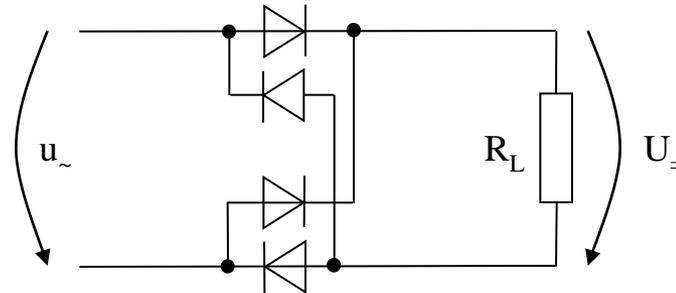
## Aufgabe 2.2.6



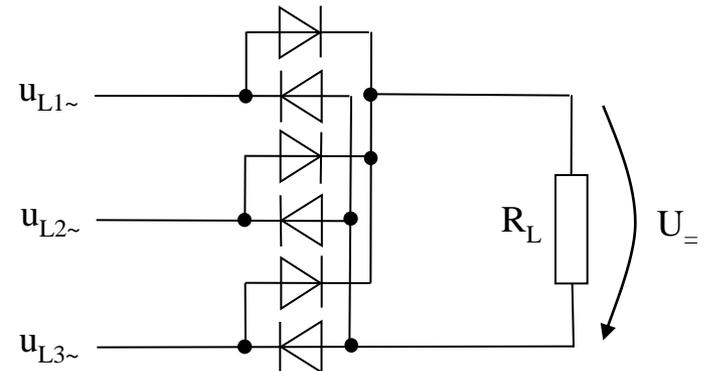
a) Einpuls- Gleichrichtung



a) Zweipuls- Gleichrichtung



c) Vierpuls- Gleichrichtung



d) Sechspuls- Gleichrichtung

Die Pulszahl ergibt sich aus Anzahl Wege, von denen Pulse (z.B. eine Halbwelle) kommen.

In den Beispielen bedeuten  $u_{\sim} = u_{L1\sim} = \hat{U} \cdot \sin(\omega t)$ ,  $u_{L2\sim} = \hat{U} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$  sowie  $u_{L3\sim} = \hat{U} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$ . Die Dioden können genähert werden.

Frage: Wie sieht für die Beispiele  $U_{\sim}$  (ohne Siebung!) aus?