

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 ³ (Ø 2, H 6 cm)	40 mm ³ (4·5·2 mm ³)	1970: 0,02 mm ³ (0,2·0,2·0,5 mm ³) heute: 2·10 ⁻⁹ mm ³ (0,1·0,1 µm ² ·0,2 mm)	10 ⁻⁶ 10 ⁻¹³
Lebensdauer entspr. Ausfallrate	ca. 1 a	1000 a	10 ⁸ a	10 ⁸
Preis der Standardelemente	5 €	0,5 €	1970: 0,05 Cent heute: 1/1000 Cent (400€/40 Mio Tr.)	10 ⁻⁴ 5·10 ⁻⁵

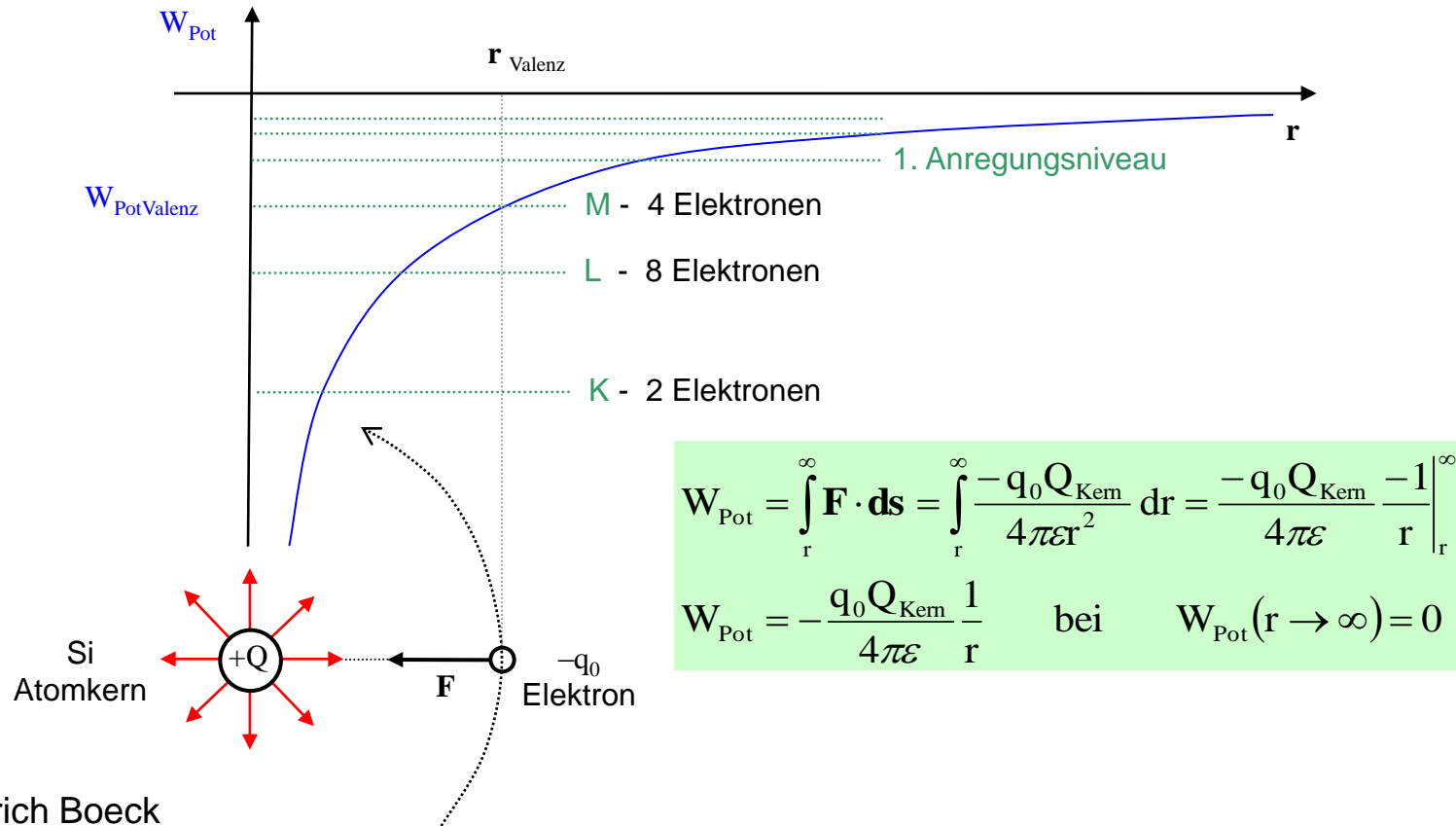
(bei PKW → Preis von einigen Cent → praktisch ewig reparatur- und wartungsfreien Betrieb → Volumen von etwa 1 ml.)

- Historisch liegen die Nutzung der **Gasentladung** und **Vakuümröhre** 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.

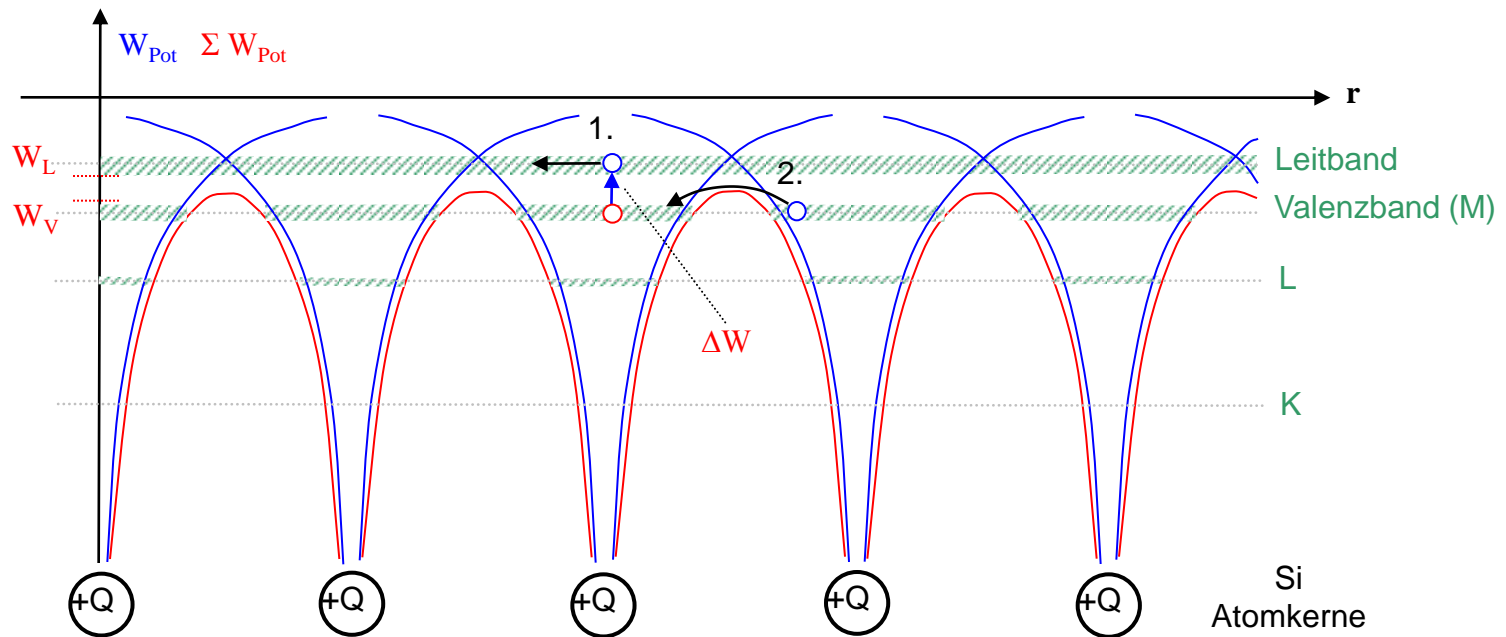
2. Halbleiterbauelemente

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).



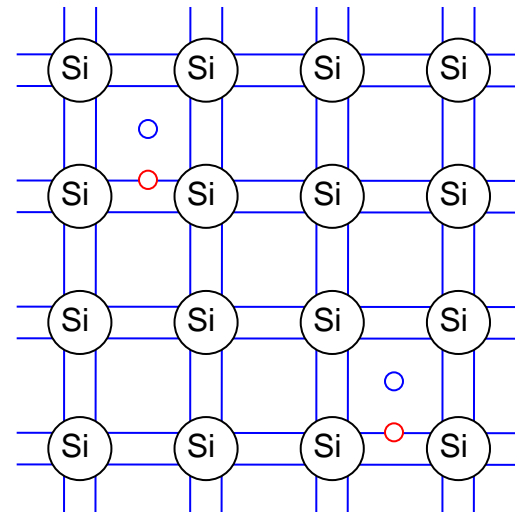
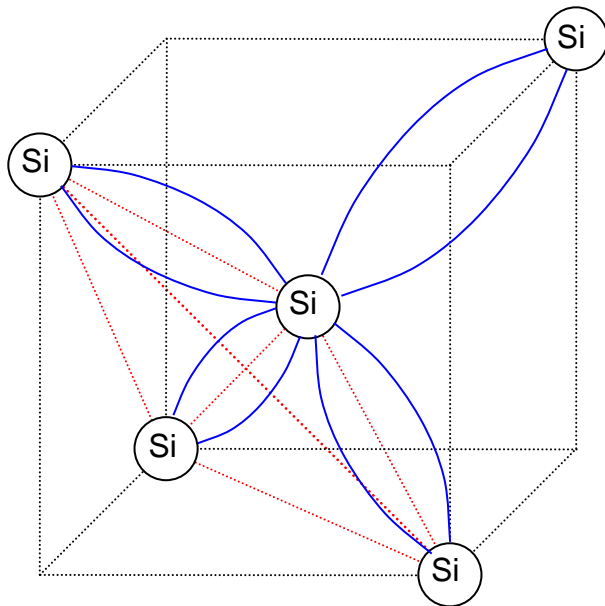
Der Übergang zu einer periodischen Anordnung von Atomen im **Kristall** ergibt eine Darstellung der Leitungsmechanismen in Festkörpern.



- 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.

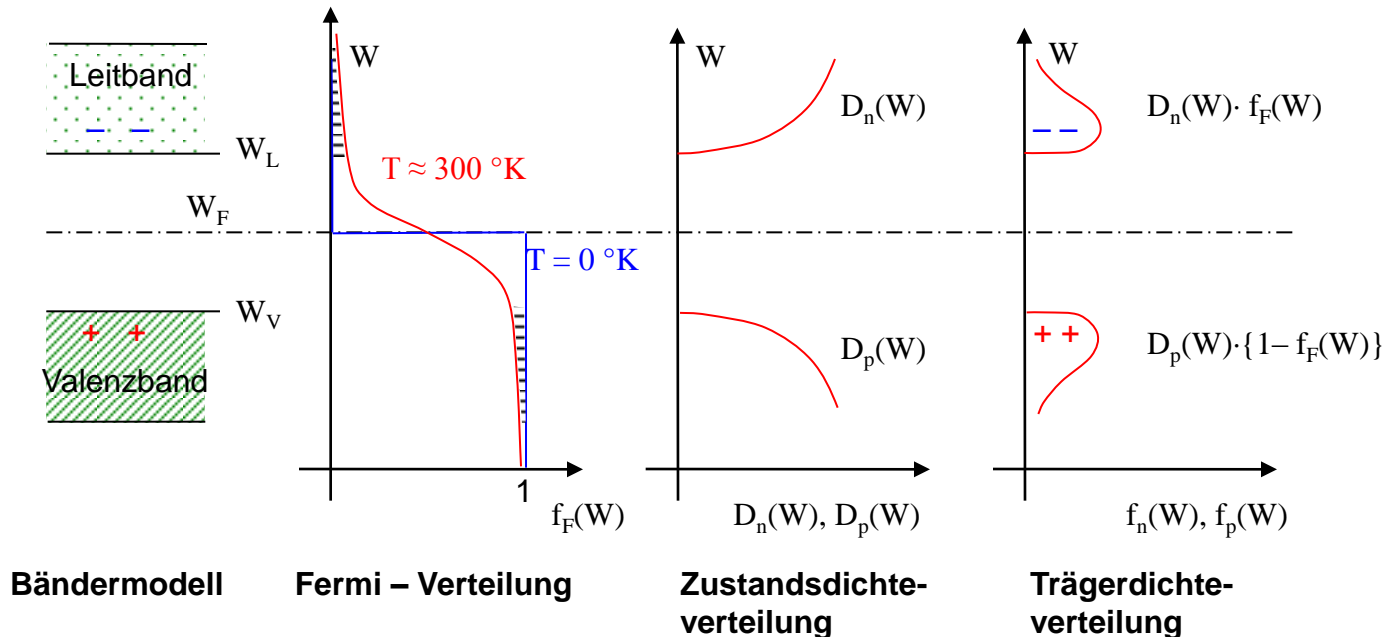
Jeweils **vier Valenzelektronen werden paarweise gemeinsam genutzt** (ideale Achterbelegung).

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

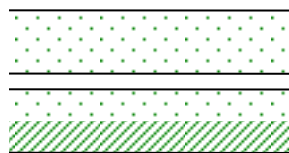
- je **mehr Elektronen** vorhanden sind,
- je **dichter die Atome** im Kristall angeordnet sind oder
- je **stärker die Atome** um ihre Gitterposition durch ihre Wärme **schwingen**.

Beweglichkeit der Löcher b_p \leftarrow zu überspringende Energiebarriere

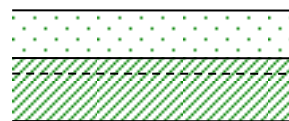
Deutlich geringer als b_n

Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit \leftarrow

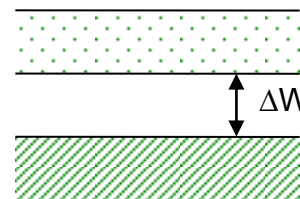
- Zunahme von freien Elektronen (n) und Löchern (p)
- Abnahme der Beweglichkeit (b_n, b_p)



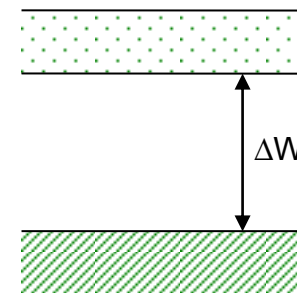
Leiter 1:
Valenzband nur teilweise besetzt
z.B. 1-wertige Metalle (Na)



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

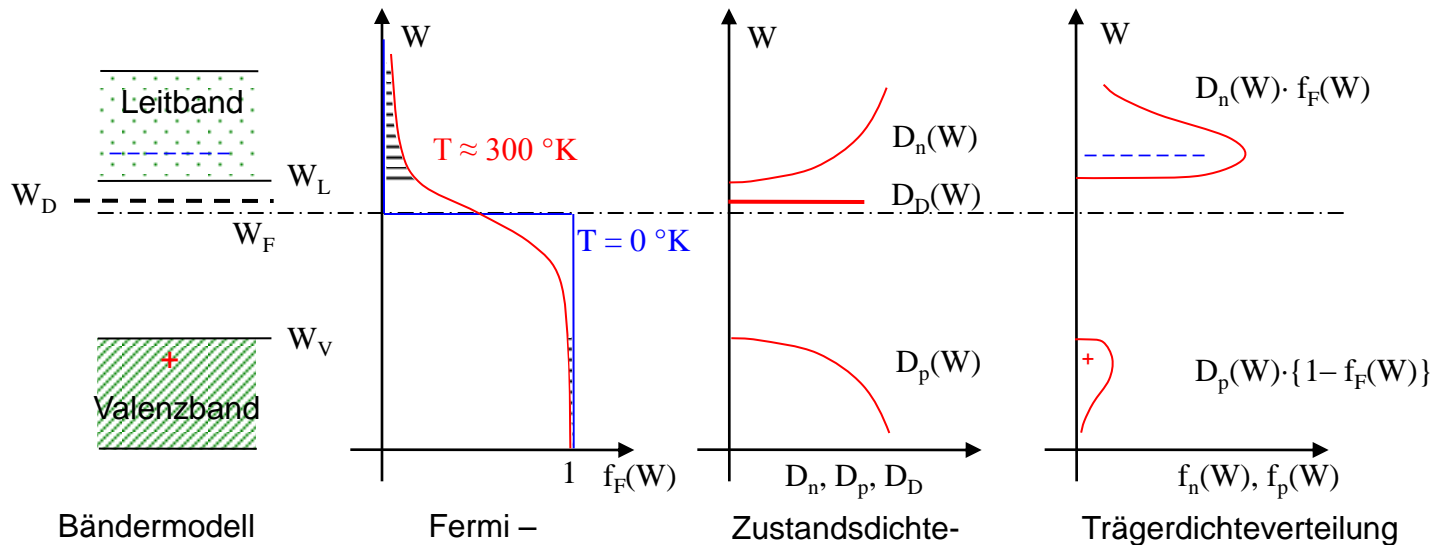
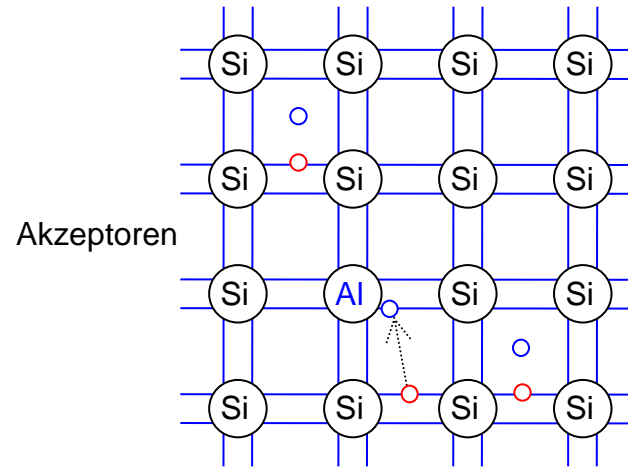
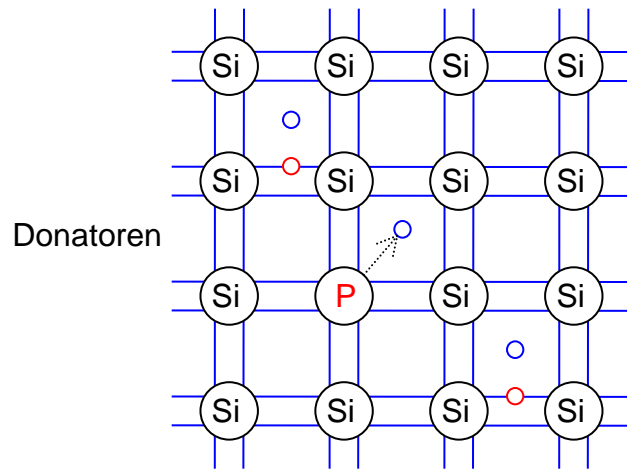


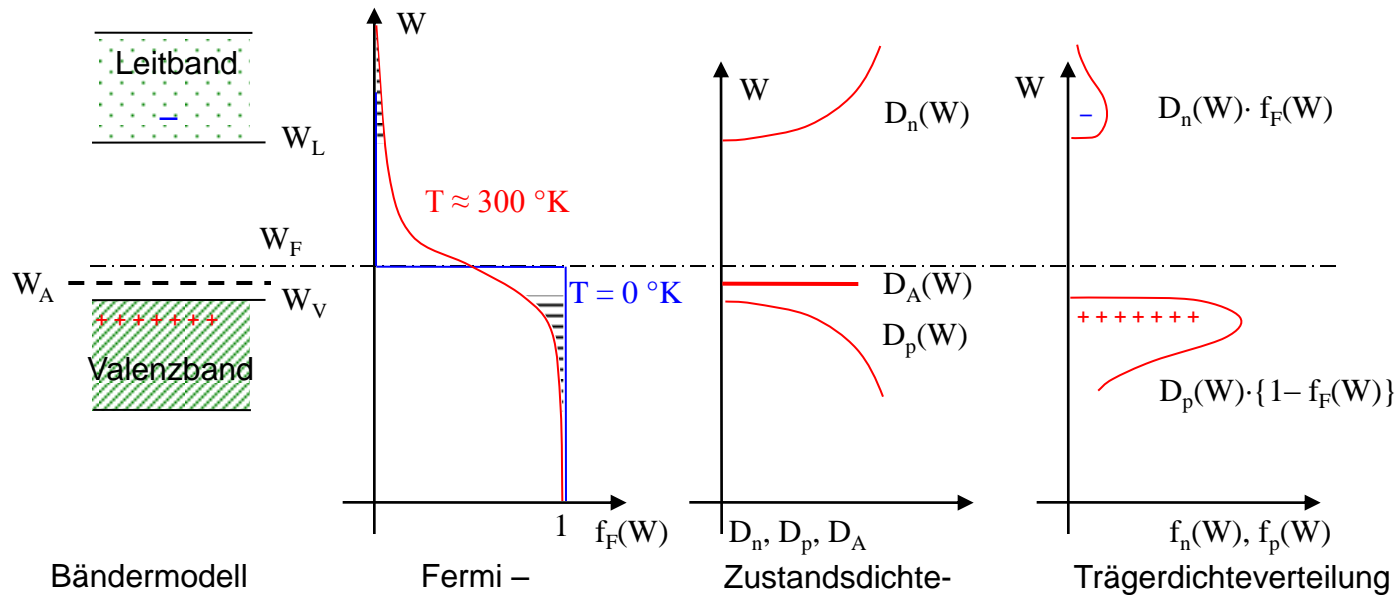
Halbleiter:
 $\Delta W \approx 1 \text{ eV}$



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		ΔW	b_n	b_p	n, p (Eigenleitung)
Germanium	Ge	0,67 eV	3900 cm ² /Vs	1900 cm ² /Vs	2,33 10 ¹³ cm ⁻³
Silizium	Si	1,12 eV	1500 cm ² /Vs	600 cm ² /Vs	1,6 10 ¹⁰ cm ⁻³
Galliumarsenid	GaAs	1,43 eV	8500 cm ² /Vs	400 cm ² /Vs	1,3 10 ⁶ cm ⁻³
Kupfer	Cu	-	40,6 cm ² /Vs	-	8,4 10 ²² cm ⁻³

Aufgabe 2.1.1

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

Frage 1: Wie groß wird κ 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 mm² 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} cm^{-3} dotiert.

Frage 1: Wie groß sind n und p sowie κ ?

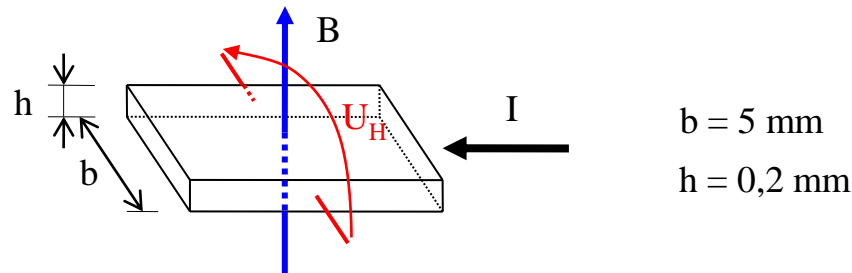
Hinweis: Nutze (2.3) und (2.4), vernachlässige die Änderung der Beweglichkeiten!

Frage 2: Bei der gleichen Probe (Länge 8 mm Fläche 1 mm²) wird ein Widerstand von 400 Ω 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?

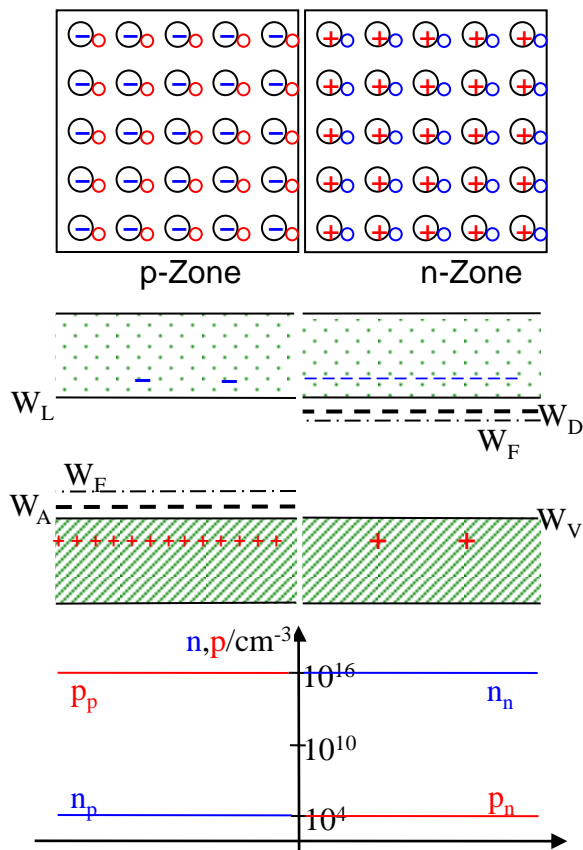
Aufgabe 2.1.5

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

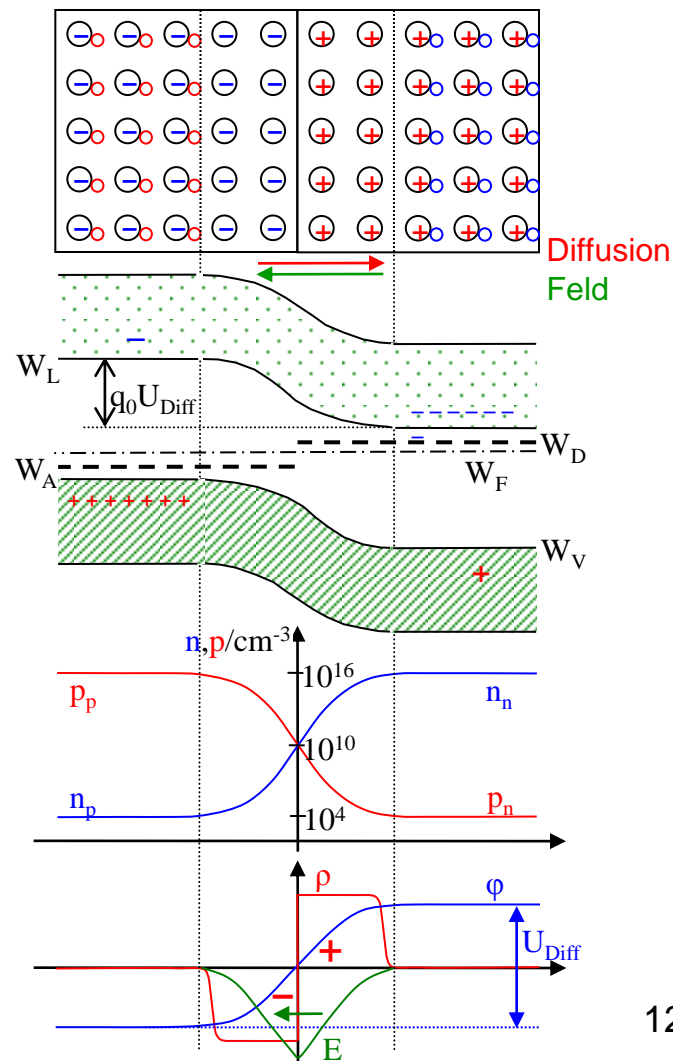
Frage 2: Sollte hoch, niedrig oder nicht dotiert werden?

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.

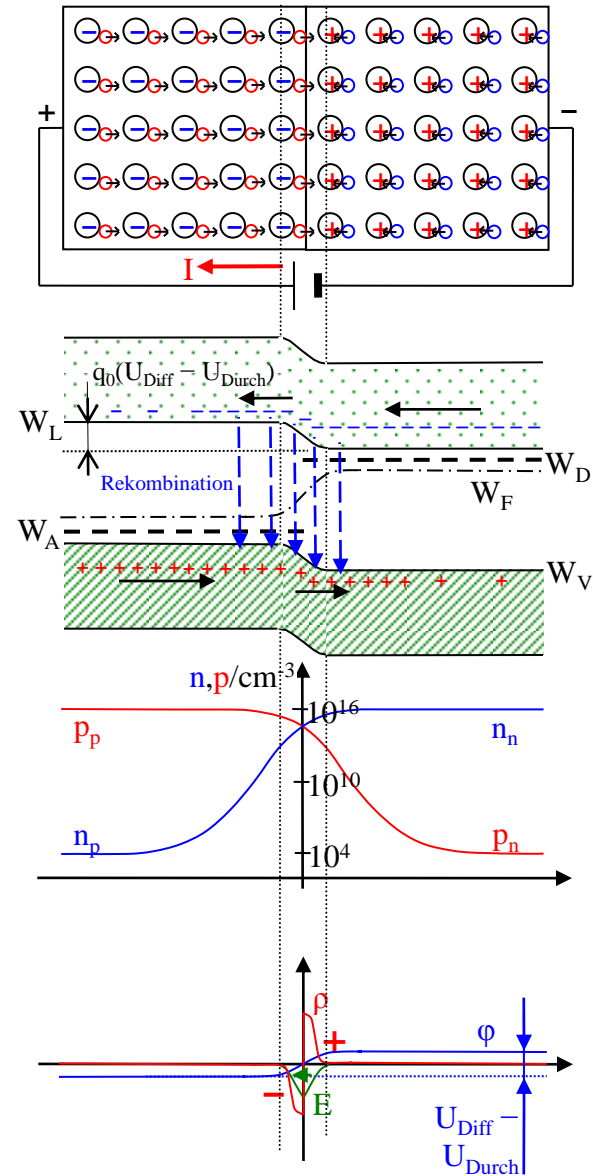
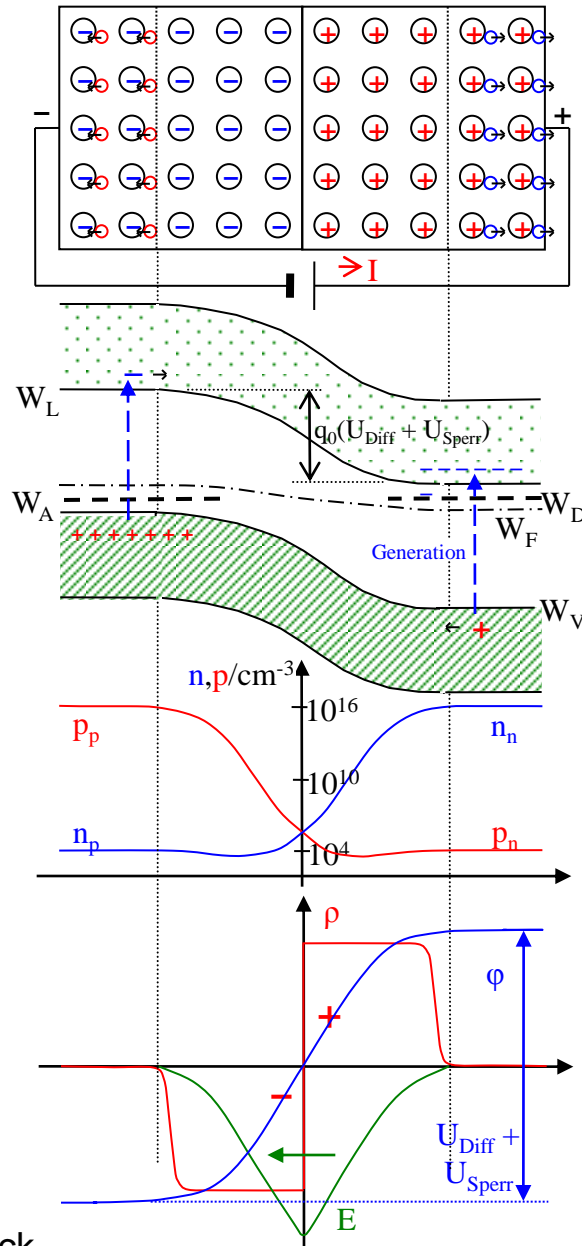
Aus n und p → Raumladungsdichte ρ → das elektrische Feld E → Potential φ

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

Die Spannung zwischen den Enden beider Halbleiterzonen infolge des Gleichgewichts wird **Diffusionsspannung** U_{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.

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

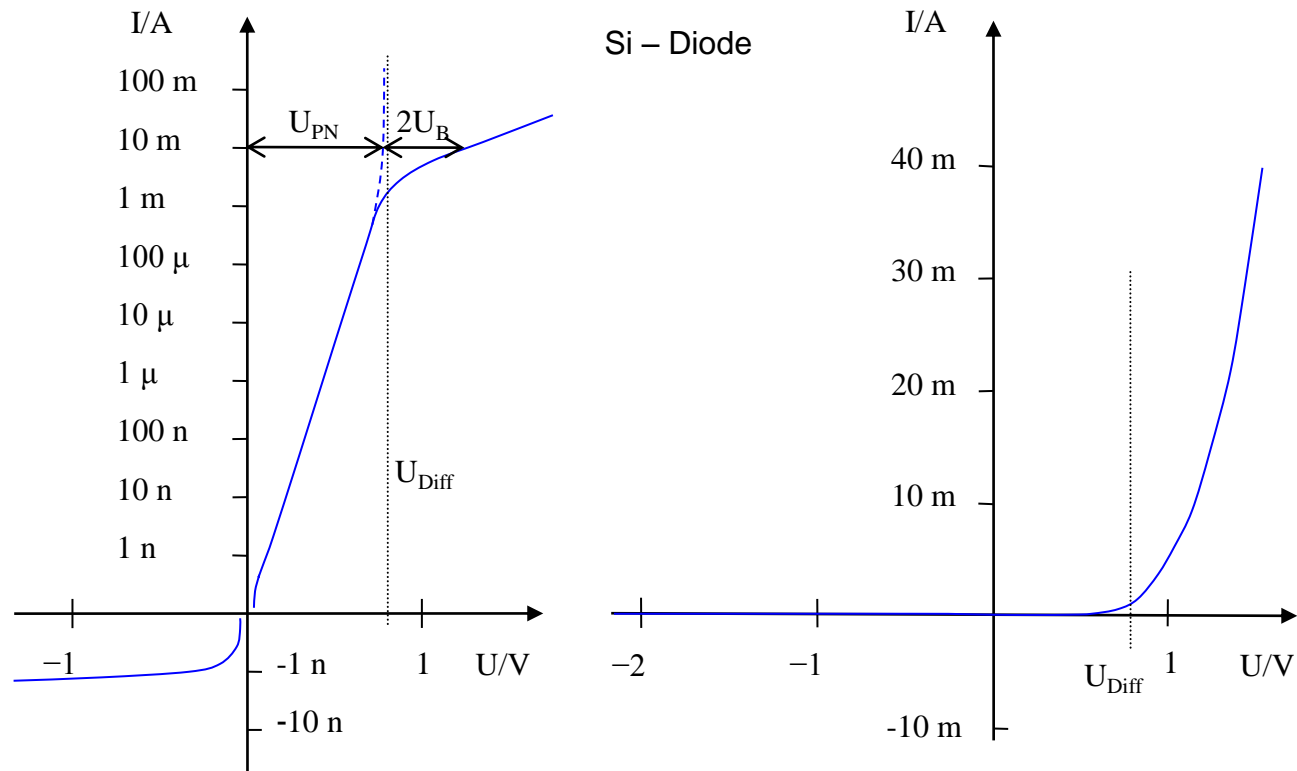
Aus Leitfähigkeit κ , Potentialverlauf, Fermi- und Trägerdichteverteilung (n , p) wird die Kennlinie des PN-Übergangs bestimmt.

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

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

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

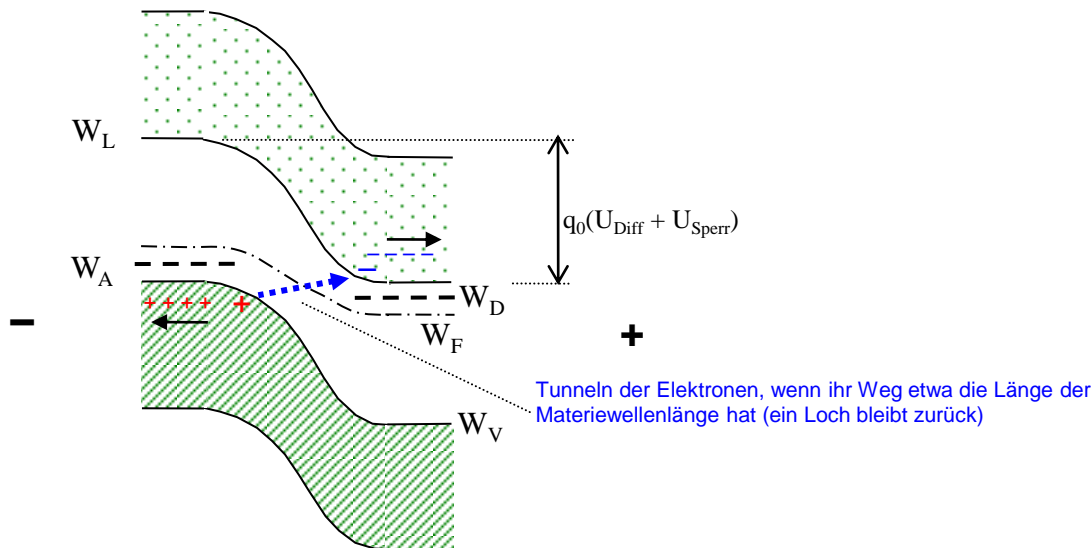
$$U = U_{\text{PN}} + 2U_{\text{B}} = U_{\text{PN}} + 2 \frac{kT}{q} \left[\coth \left(\frac{U_{\text{Diff}} - U_{\text{PN}}}{2kT/q} \right) - \coth \left(\frac{U_{\text{Diff}}}{2kT/q} \right) \right]$$



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

Technologische Erfordernisse und Einflüsse → Abweichungen → durch einen Korrekturfaktor α 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

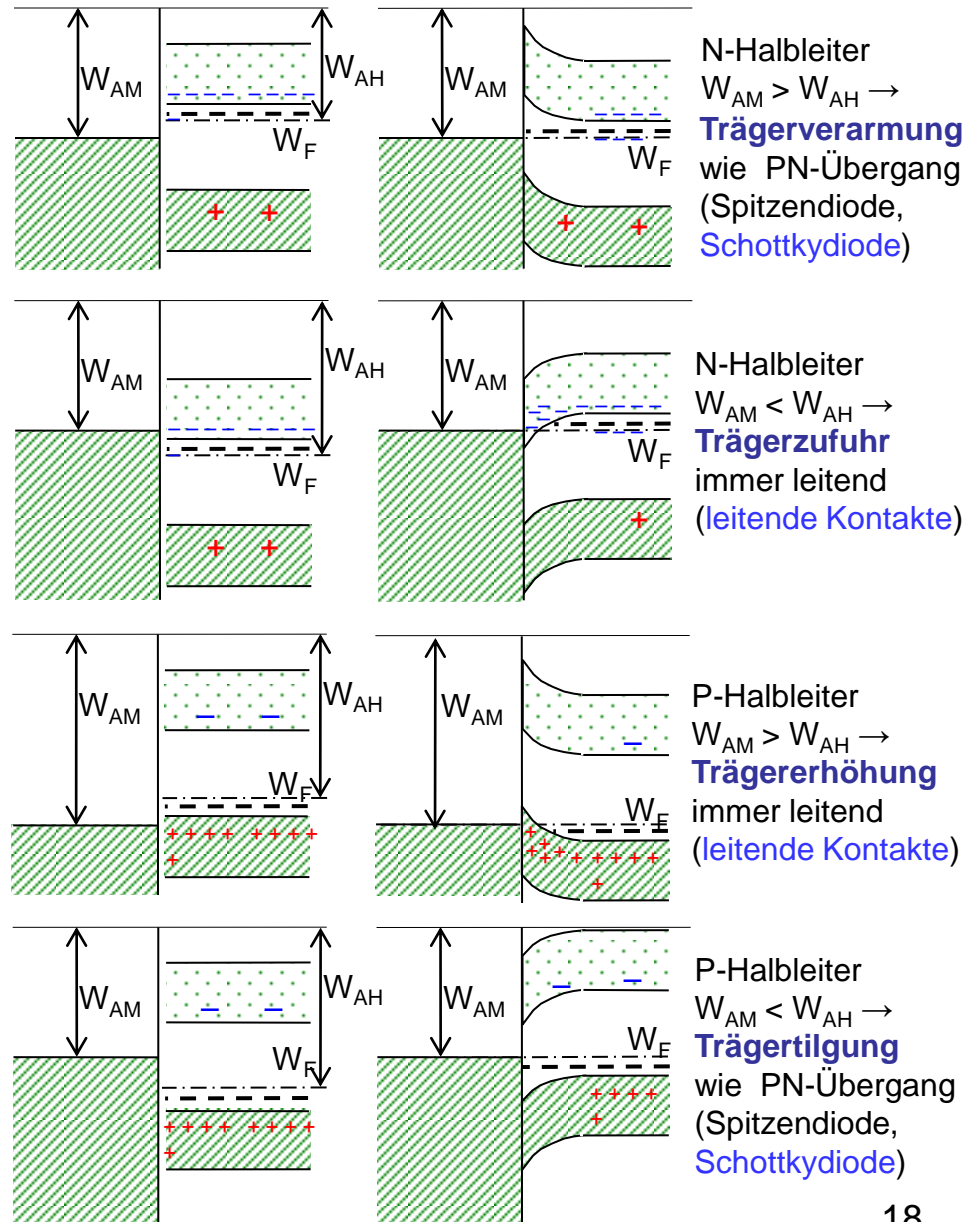
- Schottkydioden und
- Grundlage für leitende Kontakte an Halbleiterbauelementen

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.

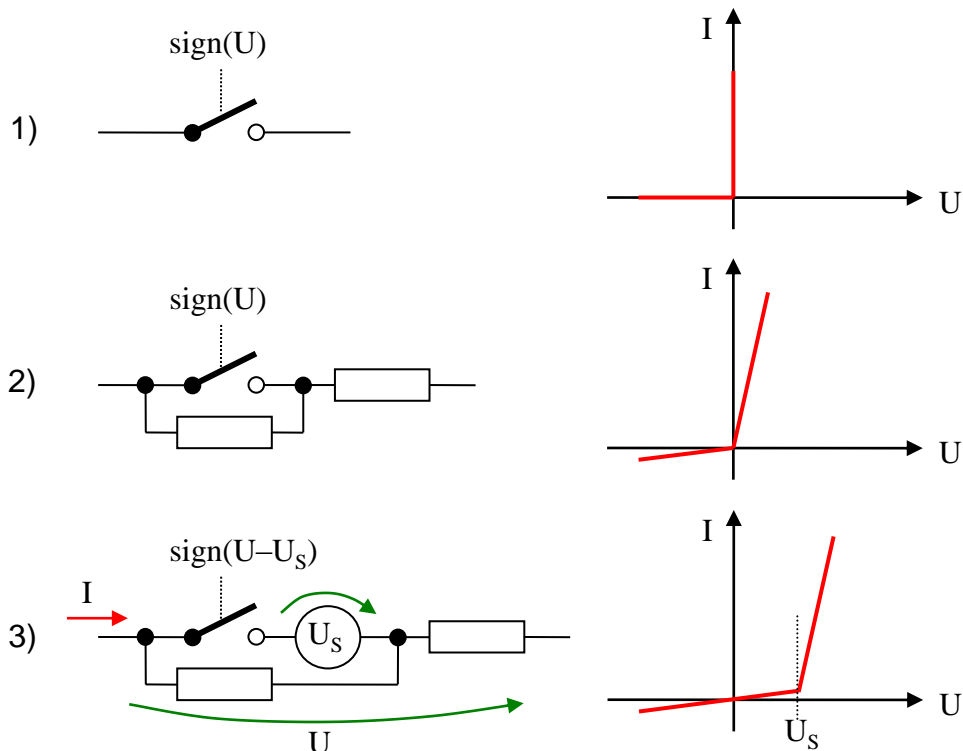
Auf der Oberfläche des Einkristalls

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

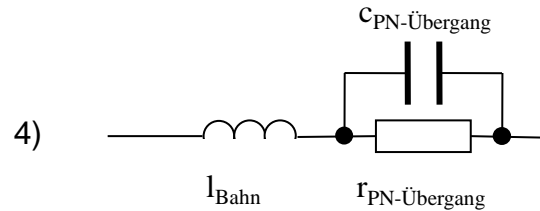


In der Schaltungstechnik zweckmäßig Ersatzschaltungen zu verwenden.

- Verschiedene Näherungen der **statischen Kennlinie**

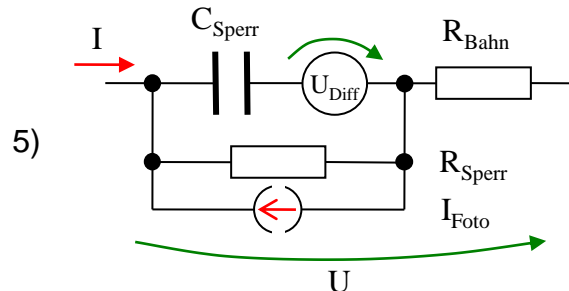


- Näherung für das **Kleinsignalverhalten**



l_{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_{Sperr} = C PN-Übergang
 R_{Bahn} = Bahnwiderstand $2U_B/I$
 R_{Sperr} = R PN-Übergang U_{PN}/I
 U_{Diff} = Diffusionsspannung const
 I_{Foto} = Fotogeneration
 (Bis auf U_{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) – ϕ (P-Elektrode) umgeformt werden ($kT/q_0 = 26 \text{ mV}$ bei etwa Raumtemperatur ca. 300 °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?

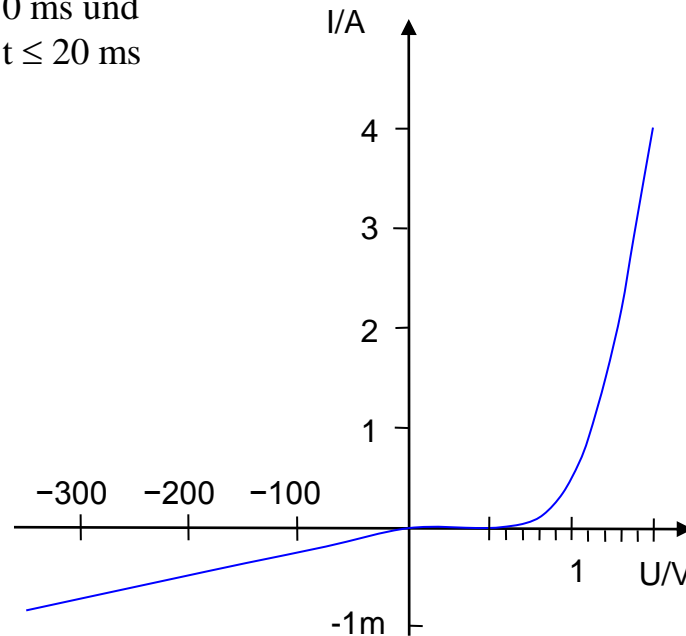
Frage 3: Wie groß ist die tatsächliche Quantenausbeute η_Q , wenn ein Wirkungsgrad von 35 % gemessen wird (einmal geben nur etwa 90 % der Rekombinationsvorgänge ein Photon ab und zum anderen wird ein großer Teil vom gleichen Material auch wieder absorbiert)?

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 ₁ /A	I ₂ /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.

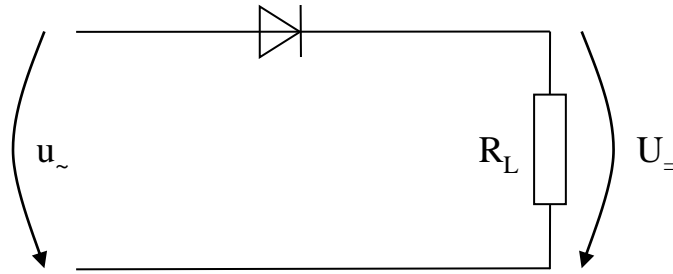
Hinweis: Bei Reihenschaltung fließt durch beide Dioden der gleiche Strom und die Spannung wird entsprechend der Kennlinien aufgeteilt. (Interpoliere zwischen den Punkten linear.)

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

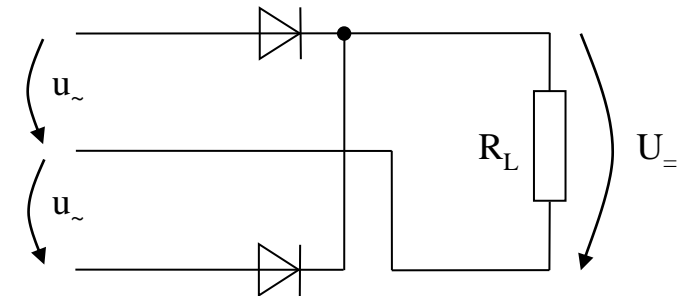
Frage 2: Ist der Einsatz dieser beiden Exemplare möglich?

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

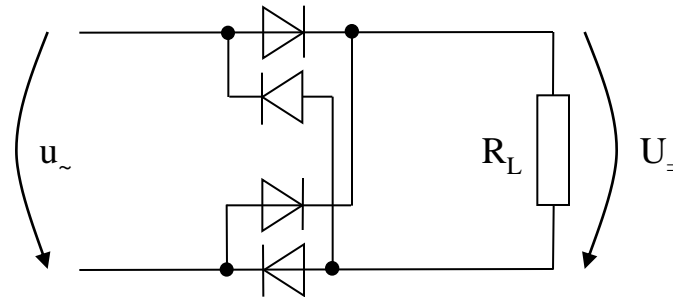
Aufgabe 2.2.6



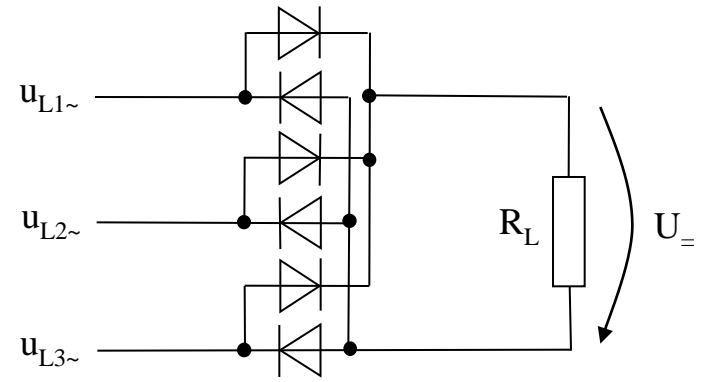
a) Einpuls- Gleichrichtung



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?