

# Mikroelektronik 2 Vorlesungsmitschriebe

Florian Leuze

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>1 Grundlagen</b>	<b>6</b>
1.1 SI-Basiseinheiten . . . . .	6
1.2 Vorsatzzeichen . . . . .	6
1.3 Misc . . . . .	7
1.3.1 Atome . . . . .	7
<b>2 Vorlesungsmitschriebe</b>	<b>8</b>
2.1 10. April 2018: Vorlesung 1 . . . . .	8
2.1.1 Halbleitertypen . . . . .	8
2.1.2 Silizium: Das Material der Mikroelektronik . . . . .	8
2.1.2.0.1 Halbleiterklassen . . . . .	8
2.1.2.0.2 Bindungen - Elektronenpaarbindung . . . . .	8
2.2 17. April 2018: Vorlesung 2 . . . . .	10
2.2.1 Silizium: Das Material der modernen Mikroelektronik . . . . .	10
2.2.1.0.1 Transistortypen . . . . .	10
2.2.1.1 Weltmarkt . . . . .	10
2.2.1.2 Fünf Gründe für die Dominanz von Silizium . . . . .	10
2.2.2 Some facts . . . . .	11
2.3 24. April 2018: Vorlesung 3 . . . . .	12
2.3.1 Die Arbeitsweise des Computers . . . . .	13
2.3.2 Standard Gatter . . . . .	14
2.4 08. Mai 2018: Vorlesung 4 . . . . .	15
2.4.1 Areniusplot . . . . .	15
2.4.2 Verlustleistung . . . . .	15
2.4.3 Moores Law . . . . .	16
2.4.4 Some facts . . . . .	16
2.5 15. Mai 2018: Vorlesung 5 . . . . .	17
2.5.1 Komplementär . . . . .	17
2.5.2 Speichertypen . . . . .	18
2.5.3 Thyristoren . . . . .	18
2.5.4 Bindung und Strukturen . . . . .	18
2.5.5 Some facts . . . . .	19
2.6 Einschub Graphen/Kohlenstoffnanoröhrchen . . . . .	20
2.6.1 Kristallstrukturen und Eigenschaften von Graphit . . . . .	20

---

## INHALTSVERZEICHNIS

---

2.6.2	Graphen . . . . .	20
2.6.3	Kohlenstoffnanoröhren . . . . .	21
2.6.3.1	Strukturen . . . . .	21
2.7	29. Mai 2018: Vorlesung 6 . . . . .	22
2.7.1	Monokristallines Si . . . . .	22
2.7.2	Atomaufbau . . . . .	22
2.7.3	Some facts . . . . .	23
2.8	29. Mai 2018: Vorlesung 7 . . . . .	24
2.8.1	Die Bohrschen Postulate . . . . .	24
2.8.2	Bohrsches Atommodell für das Wasserstoffatom . . . . .	24
2.8.3	Some facts . . . . .	26
2.9	05. Juni 2018: Vorlesung 8 . . . . .	28
2.9.1	Quanten . . . . .	28
2.9.1.1	Erweiterte Bohrsche Postulate . . . . .	28
2.9.2	Dipolmoment . . . . .	30
2.9.3	Some facts . . . . .	30
2.10	26. Juni 2018a: Vorlesung 9a . . . . .	31
2.10.1	Metalle und metallische Leitfähigkeit . . . . .	31
2.10.2	Bandstruktur . . . . .	31
2.10.3	Metallische Bindung . . . . .	31
2.10.4	Ohmsches Gesetz . . . . .	33
2.10.5	Homogen dotiertes Silizium . . . . .	34
2.10.6	Some facts . . . . .	34
2.11	26. Juni 2018b: Vorlesung 9b . . . . .	36
2.11.1	PN-Übergang . . . . .	36
2.11.2	Schottky-Kontakt . . . . .	38
2.11.2.1	Metall/n-Typ Halbleiter Übergang . . . . .	38
2.12	07. Juli 2018: Vorlesung 10 . . . . .	40
2.12.1	Schottky-Kontakt . . . . .	40
2.12.1.0.1	Metall/p-Typ Halbleiter Übergang . . . . .	40
2.12.2	MISFET . . . . .	41
2.12.3	Bipolartransistor . . . . .	42
2.12.3.1	Aufbau . . . . .	42
2.12.3.2	Symbolik . . . . .	43
2.12.4	Some facts . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Vortragsübungen</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>Anhänge</b>	<b>46</b>
4.1	Hilfstabellen . . . . .	46
4.1.1	Abkürzungen/Formelzeichen . . . . .	46
4.1.2	Wichtige Donatoren und Akzeptoren . . . . .	48
4.1.3	Effektive Massen . . . . .	49
4.1.4	Bandlücken wichtiger Materialien . . . . .	49
4.1.5	Eckdaten wichtiger Halbleiter . . . . .	49
4.1.6	Niederfeld- und Niederdotierungsbeweglichkeiten ( $T = 300K$ )	50
4.1.7	Konstanten . . . . .	50

---

4.1.8 Formelverzeichnis . . . . .	50
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>51</b>

## Versionierung

Datum	Vers.	Kürzel	Änderung
08.06.2018	0.1	FL	Erzeugung Dokument; Erzeugung Inhaltsverzeichnis; Erzeugung Versionierung; Erzeugung Literaturverzeichnis;
10.08.2018	0.2	FL	Vorlesung 1 - 3
13.08.2018	0.3	FL	Vorlesung 4 - 5
15.08.2018	0.4	FL	Einschub Graph./Kohl.stoff.n.röhr.; Vorlesung 6-7
16.08.2018	0.4.1	FL	Korrektur Formelzeichen; Vorlesung 6 - 9a
17.08.2018	0.5	FL	Vorlesung 9b - Vorlesung 10; Änderung Layout

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Halbleiterklassen . . . . .	9
2.2	Wabenstruktur . . . . .	9
2.3	AND-Gatter (deutsche Darstellung) . . . . .	14
2.4	AND-Gatter (international) . . . . .	14
2.5	NAND-Gatter (deutsche Darstellung) . . . . .	14
2.6	NAND-Gatter (international) . . . . .	14
2.7	Areniusplot . . . . .	15
2.8	Kennlinie komplementär (Schulze 2018) . . . . .	17
2.9	Monokristalline Graphitlage (Schulze 2018) . . . . .	18
2.10	Strukturen von Kohlenstoffnanoröhrchen(Chandrasekhar 2018) . . .	21
2.11	Gravitation . . . . .	22
2.12	Coulombkraft . . . . .	22
2.13	Atommodell/Bahnen (Tobi 2018) . . . . .	24
2.14	Kraftwirkung auf Elektron (Tobi 2018) . . . . .	24
2.15	Bahnwechsel (Tobi 2018) . . . . .	26
2.16	Dipolmoment eines Elektrons . . . . .	30
2.17	Impulsraum (Schulze 2018) . . . . .	31
2.18	Ortsraum (Schulze 2018) . . . . .	31
2.19	Kugelschale . . . . .	32
2.20	Potentielle Energie im Ortsraum 2D (Schulze 2018) . . . . .	33
2.21	Potentielle Energie im Ortsraum 1D (Schulze 2018) . . . . .	33
2.22	Homogene Halbleiter U/I Kurve . . . . .	34
2.23	Homogene Halbleiter Konzentration . . . . .	34
2.24	Homogene Halbleiter Raumladungszone . . . . .	36
2.25	Homogene Halbleiter Bandverbiegung . . . . .	37
2.26	Schottky Kontakt Metall/n-Typ vor der Diffusion (Schulze 2018) .	39
2.27	Schottky Kontakt Metall/n-Typ während der Diffusion (Schulze 2018)	39
2.28	Schottky Kontakt Metall/n-Typ Bänder (vor Kontakt) . . . . .	39
2.29	Schottky Kontakt Metall/n-Typ Bänder (nach Kontakt) (Schulze 2018)	39
2.30	Schottky Kontakt Metall/p-Typ vor der Diffusion (Schulze 2018) .	40
2.31	Schottky Kontakt Metall/p-Typ während der Diffusion (Schulze 2018)	40
2.32	Schottky Kontakt Metall/p-Typ Bänder (nach Kontakt) (Schulze 2018)	41
2.33	Aufbau Misfet (Schulze 2018) . . . . .	41
2.34	MISFET Inversionskanal (Schulze 2018) . . . . .	42

## *ABBILDUNGSVERZEICHNIS*

---

2.35 MISFET Ersatzschaltbild (Schulze 2018) . . . . .	42
2.36 Aufbau NPN Bipolartransistor (Schulze 2018) . . . . .	43
2.37 Symbolik Bipolartransistor (Schulze 2018) . . . . .	43

# Kapitel 1

## Grundlagen

### 1.1 SI-Basiseinheiten

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
Meter	m	Einheit der Länge
Kilogramm	kg	Einheit der Masse
Sekunde	s	Einheit der Zeit
Ampere	A	Einheit der Stromstärke
Kelvin	K	Einheit der Temperatur
Mol	mol	Einheit der Stoffmenge
Candela	cd	Einheit der Lichtstärke

### 1.2 Vorsatzzeichen

Name	Zeichen	Zehnerpotenz	Name	Zeichen	Zehnerpotenz
Yotta	Y	$10^{24}$	Dezi	d	$10^{-1}$
Zetta	Z	$10^{21}$	Centi	c	$10^{-2}$
Exa	E	$10^{18}$	Milli	m	$10^{-3}$
Peta	P	$10^{15}$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Tera	T	$10^{12}$	Nano	n	$10^{-9}$
Giga	G	$10^9$	Piko	p	$10^{-12}$
Mega	M	$10^6$	Femto	f	$10^{-15}$
Kilo	k	$10^3$	Atto	a	$10^{-18}$
Hekto	h	$10^2$	Zepto	z	$10^{-21}$
Deka	da	$10^1$	Yokto	y	$10^{-24}$

## 1.3 Misc

### 1.3.1 Atome

- Atome sind im Grundzustand neutral
- Ändert sich die Zahl der Elektronen spricht man von Ionisierung:
  - positives Ion = Kation (weniger Elektronen)
  - negatives ion = Anion (mehr Elektronen)
- Elektron  $q_e = -e$ , Elektronenmasse:  $m_e = 9,109\dots \cdot 10^{-31} kg$
- Proton  $q_p = +e$ , Protonenmasse:  $m_p = 1,672\dots \cdot 10^{-27} kg$

# Kapitel 2

## Vorlesungsmitschriebe

### 2.1 10. April 2018: Vorlesung 1

#### 2.1.1 Halbleitypen

- organische HL:
  - Kohlenwasserstoffverbindung
  - lange Ketten
- anorganische HL:
  - elementare HL
  - HL-Legierungen

Beispiele siehe Vorlesungsfolien.

Verbinungshalbleiter im stöchioetrischen Verhältnnis 1:1 sind Gallium-Schwermetall, Stickstoff-isol. Gas. Halbleiterlegierungen bestehen aus Materialien die bereits halbleitende Eigenschaften besitzen. Verbindungshalbleiter dagegen bestehen nicht zwangsläufig nur aus Materialien die bereits einzeln halbleitend sind.

#### 2.1.2 Silizium: Das Material der Mikroelektronik

##### 2.1.2.0.1 Halbleiterklassen

**Definition 2.1.1.** *Halbeiter: Ein Material, das grundsätzlich leitfähig ist und dessen Verhalten bei Erhitzung metallischer und beim absoluten Nullpunkt isolierend wird.*

##### 2.1.2.0.2 Bindungen - Elektronenpaarbindung

Beim Nullpunkt sind alle Bindungen fest. Bei Erhitzung muss um das die Bindung zu lösen dem Elektron so viel Energie zugefügt werden, dass es aus der Bindung heraus "geschossen" wird.

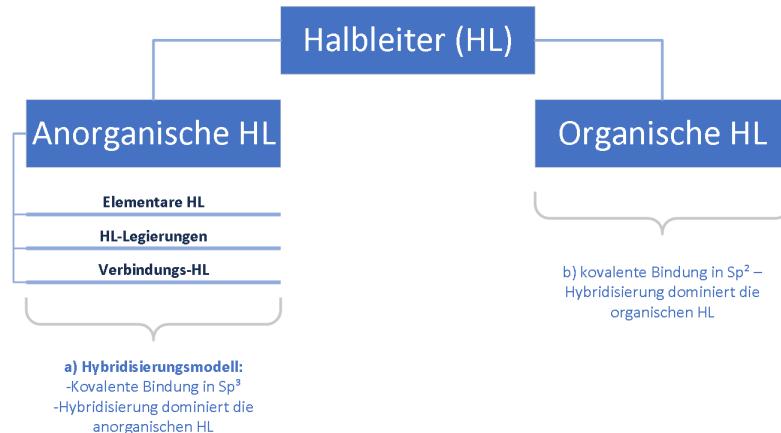


Abbildung 2.1: Halbleiterklassen

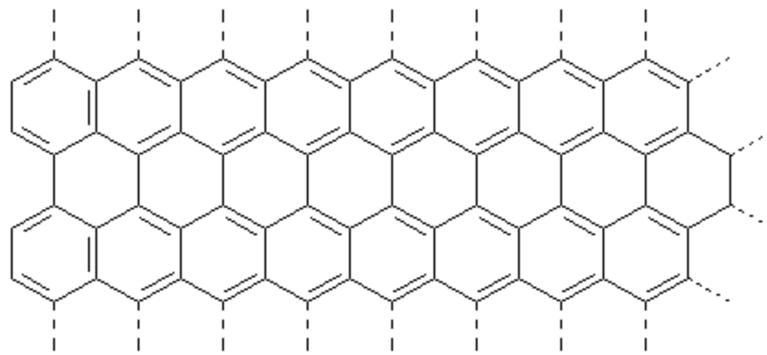


Abbildung 2.2: Wabenstruktur  
(o.A. n.d.)

## 2.2 17. April 2018: Vorlesung 2

**Bemerkung 2.2.1.** Zu (2.1.2.0.2): *Elektronenpaarbindungen entsprechen Doppelbindungen.*

Üblich ist  $Sp^3$  Hybridisierung, Kohlenstoff kann aber auch  $Sp^2$  Hybride bilden.

### 2.2.1 Silizium: Das Material der modernen Mikroelektronik

#### 2.2.1.0.1 Transistortypen

**Definition 2.2.1.** *BJT: Bipolar Junction Transistor bzw. Bipolartransistor CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor*

**Bemerkung 2.2.2.** *Transistortypen: NPN bzw. komplementär dazu PNP.*

**Definition 2.2.2.** *Transistor: Transfer Resistor*

**Definition 2.2.3.** *Complementary: Innen Elektronen, aussen Löcher. Kleiner Elektronenstrom an der Basis um großen Strom anzutreiben.*

#### 2.2.1.1 Weltmarkt

- 95% Si-basiert, davon knapp 90% CMOS
- 90% aller hergestellten Bauelemente sind Transistoren
- Von 10€ wird 1€ weltweit mit Halbleitern verdient
- Nach Sauerstoff ist Silizium das zweithäufigste Element (Sand = Siliziumdioxid, im Allgemeinen wird Quarzsand aus dem Bergbau verwendet, siehe Mikro 1)
- 1kg Si < 10€ im Vergleich zu 4000€ - 5000€ um 500gr Arsen zu gewinnen
- Bei einer Umstellung auf GaAs könnte man ca. 10 Tage die Fertigung aufrecht erhalten, danach wären alle Rohstoffe verbraucht
- FET Technologie funktioniert mit Germanium nicht, nur mit Silizium

#### 2.2.1.2 Fünf Gründe für die Dominanz von Silizium

- 1) Si ist ein Elementarhalbleiter
  - Substrat entspricht Wafermaterial
  - Leichte Substratherstellung
- 2) Man findet Si praktisch "wie Sand am Meer" (wenn auch nicht ganz da hauptsächlich Quarzsand verwendet wird)

- → Kostengünstig, ünbegrenzt "verfügbar
  - Bipolar: Löcherstrom und Elektronenstrom
  - Atome pro cm:  $10^{23}$
  - Nicht unterhalb der intrinsischen Grenze  $\sim 10^{10}$ , gilt aber bei Raumtemperatur (was hab ich damit gemeint?)
- 3) Si lässt sich in einem sehr weiten Bereich von  $10^{15} - 10^{20} \frac{1}{cm^3}$  dotieren
  - 4) Si ist ungiftig
  - 5) Si bildet mit SiO<sub>2</sub> einen elektrisch perfekten Isolator  $\Rightarrow$  MOSFET-Technologie möglich
  - 6) Schutz der Investition
    - Moderne Halbleiter-Fabrik kostet ungefähr 3 Milliarden €
    - Betrieb ca. 2 Millionen €

### 2.2.2 Some facts

- Der erste Transistor wurde 1938 von Robert W. Pohl und Rudolf Hilsch der erste Transistor aus Kalium-Bromid hergestellt. Das Material war aber eher ungeeignet, da es wasserlöslich ist.
- Der BP (Bipolar) Transistor ist sehr viel schneller als der MOSFET, daher in vor allem in der HF (Hochfrequenz) Technik häufig genutzt
- MOSFETs können als normally on/off umgesetzt werden. Am gebräuchlichsten ist normally off

## 2.3 24. April 2018: Vorlesung 3

- 1) Natürliche Zahlen  $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots, \infty\}$   
Natürliche Zahlen sind natürlich da sie einfach 'da' sind. Alle anderen Zahlenmengen sind aus den natürlichen Zahlen heraus gebaute Konstrukte.
- 2) Verknüpfungen werden definiert (allgemein \*)
  - Additiv
  - Multiplikativ

$$a * b \rightarrow c$$

Bei der Verknüpfung darf die Menge nicht verlassen werden (Abgeschlossenheit), d.h.  $a, b \in \mathbb{N} \Rightarrow c \in \mathbb{N}$ .

Addition und Multiplikation sind in  $\mathbb{N}$  abgeschlossen, Division und Subtraktion allerdings nicht. Zur Erweiterung der Menge müssen das neutrale Element und das inverse Element definiert werden (siehe HM1).

	Erweiterung von $\mathbb{N}$ zu $\mathbb{Z}$	Erweiterung von $\mathbb{N}$ zu $\mathbb{Q}$
– Neutrale Elemente	$a - a =: 0$ $a + 0 = 0 + a = a$	$a \cdot a^{-1} = e$ $e \cdot a = a \cdot e = a$

- 3) Begriffe: Gruppe, Ringe, Körper
  - Die einfachste algebraische Struktur ist die Gruppe. Dann kommt der Ring und danach der Körper.
  - Gruppe: Vereinigung einer Zahlenmenge und einer Verknüpfung
  - Abelsche Gruppe: Ist eine Gruppe weiterhin kommutativ ist sie abelsch
  - Ring: Vereinigung aus einer Zahlenmenge und zwei Verknüpfungen (additiv und multiplikativ); Wortherkunft: Verbund von Elementen die untereinander unterschiedlich sind aber eine Aufgabe erfüllen(z.B. Verbrecherring)
  - Körper: Alle Eigenschaften von Ringen und zusätzlich Distributivität.
- 4)  $\mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}$ : Cauchy-Folge (erzeugt Reelle Zahlen, konvergiert gegen jede denkbare irrationale Zahl)
- 5) Komplexe Zahlen

$$\begin{aligned} \sqrt{b} &=? \text{ für } b < 0 \\ a : a * a &= b \\ \sqrt{-1} &=: i \text{ bzw. in der Elektrotechnik oftmals } j \\ \Rightarrow \mathbb{C} : \mathbb{Z} &= a + ib \quad a, b \in \mathbb{R} \\ \operatorname{Re}\{Z\} &= a \quad \operatorname{Im}\{Z\} = b \end{aligned}$$

$\Rightarrow$  Vorteil: Real- und Imaginärteil immer getrennt

6) Gibt es n-dimensionale Zahlen?

$$y = a + ib + kc, \quad \sqrt{i} = \sqrt{k} = -1, \quad a, b, c \in \mathbb{R}$$

Fügt man noch einen weiteren Term an erhält man die Quaternionen mit denen gerechnet werden kann.

7) Abbildungen:

$$\{M\}f : M \rightarrow N\{N\}$$

**Definition 2.3.1.** *Algebra: Aus dem arabischen von al-ğabır abgeleitet. Es bedeutet im übertragenen Sinne 'das Zusammenfügen gebrochener Teile', kann aber auch einfach als 'Rechnen' interpretiert werden.*

### 2.3.1 Die Arbeitsweise des Computers

Notwendig für ein Computer auf Basis von Binärzahlen:

$$\mathbb{R} \xrightarrow{f} B, \quad \text{mit } B \text{ als Menge der Binärzahlen}$$

Notwendige Bedingung damit die Abbildung geeignet ist:  $f$  muss ein *bijektiver Homomorphismus* sein, was nichts anderes als ein *Isomorphismus*.

**Definition 2.3.2.**

*Morphologie: Struktur (Form)*

*Homo: Gleich im Sinne von ähnlich*

*Iso: Gleich im Sinne von identisch*

*Homomorphismus: Ähnlich in der Struktur*

*Isomorphismus: Identisch in der Struktur*

D.h. es muss bewiesen werden, dass die Menge der binären Zahlen die gleiche algebraische Struktur aufweisen, wie die Menge der reellen Zahlen aus der sie konstruiert wurde (also ein Zahlenkörper). Dazu:

$$\begin{aligned} a, b \in \mathbb{R} \quad & a * b = c \\ f(a) = b_a \quad & f(b) = b_b \quad b_a * b_b = \tilde{x} \\ & \Rightarrow c = f^{-1}(\tilde{x}) \end{aligned}$$

Beispiel:

$$\begin{aligned} a = 13, \quad a \in \mathbb{R} \\ B : b_a = \sum_{i=-n}^{+m} \alpha_i 2^i \quad \alpha_i \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

Darstellung:

$$\begin{array}{c}
 Z_m Z_{m-1} \dots Z_0, Z_{-1} \dots Z_{-n} \\
 2^3 \quad 2^2 \quad 2^1 \quad 2^0 \\
 \Rightarrow 13 \rightarrow \frac{8 \quad 4 \quad 2 \quad 1}{1 \quad 1 \quad 0 \quad 1} \Rightarrow 13 \rightarrow 1101
 \end{array}$$

Die Algebra auf der Menge der Binärzahlen wird *boolesche Algebra* genannt (Logik).

### 2.3.2 Standard Gatter

Das AND-Gatter:

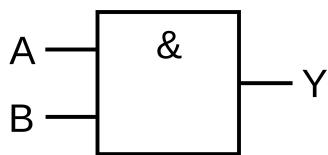


Abbildung 2.3: AND-Gatter (deutsche Darstellung)

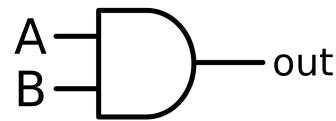


Abbildung 2.4: AND-Gatter (international)

AND	A(In 1)	B(In 2)	Y(Out)
	0	0	0
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1

Verknüpft man ein AND-Gatter mit einer Negation erhält man das NAND-Gatter (über das sämtliche logische Verknüpfungen realisiert werden können):

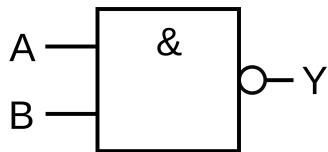


Abbildung 2.5: NAND-Gatter (deutsche Darstellung)

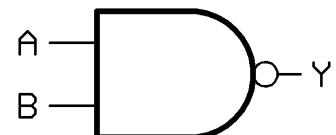


Abbildung 2.6: NAND-Gatter (international)

AND	A(In 1)	B(In 2)	Y(Out)
	0	0	1
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0

## 2.4 08. Mai 2018: Vorlesung 4

### 2.4.1 Areniusplot

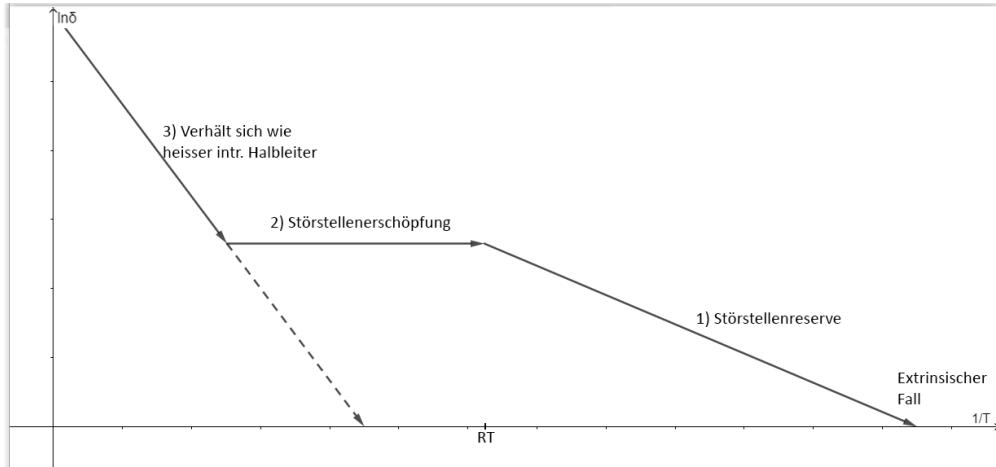


Abbildung 2.7: Areniusplot

Der Areniusplot (hier dotiert) stellt die Temperatur und die Leitfähigkeit ins Verhältnis (Achtung,  $\ln \sigma$  und  $\frac{1}{T}$ ). Es gilt:

$$n(t) \sim e^{-\frac{E}{K_B T}}$$

Die gestrichelte Linie stellt das Verhalten dar, das ein intrinsischer Halbleiter hätte.

- 1) Störstellenreserve: Die Dotieratome (z.B. Phosphor) geben ihre zusätzliches Elektron ab. Das läuft solange ab bis alle Dotieratome ihr Elektron abgegeben haben.
- 2) Störstellenerschöpfung: Dotieratome haben alle ihr zusätzliches Elektron abgegeben, Energie ist aber noch zu niedrig um weitere Bindungen aufzubrechen.
- 3) Energie ist hoch genug, dass Bindungen zwischen Silizium und Phosphor aufbrechen, Halbleiter wird mit Elektronen so stark überschwemmt dass die Dotierung keine Rolle mehr spielt (daher Verhalten wie im intrinsischen Fall) und es gilt  $n \sim p$ .

Im Bereich 1) arbeitet der Chip nicht mehr zuverlässig. Gewünscht ist der Bereich um  $RT$  (Raumtemperatur).

### 2.4.2 Verlustleistung

Durch permanente Miniaturisierung wurde die Leistung der Chips höher, dabei wird aber auch mehr Abwärme durch Verlustleistung produziert. Abschätzung der Verlustleistung in einem N(P)Mos-Inverter. Folgende Annahmen sind zu treffen:

- 1) N-Inverter miteinander verschaltet
- 2) Pro Takt sind  $\frac{N}{2}$  der FETs im Off- bzw. On-Zustand
- 3)  $I_{stat} = I$

$$\Rightarrow P_{total} \cong \frac{N}{2} I \cdot V_{cc} + N \cdot I_{dyn} V_{cc} \quad (2.4.2.1)$$

Hier ist die Verlustleistung als Funktion der Anzahl der Inverterstufen gegeben.

### 2.4.3 Moores Law

- Formuliert durch Gordon E. Moore in 1965
- Beobachtung: Vervierfachung der Anzahl der Transistoren auf einem Chip alle drei Jahre

### 2.4.4 Some facts

- Erstes kommerzielles transistorbasiertes Produkt: Texas Instruments Taschenrechner
- Schmelztemperatur Si:  $1400^\circ$
- 1 Angström entspricht  $1 \cdot 10^{-10}m$
- Bei Transistorgrößen  $< 5\text{nm}$  überwiegen quantenmechanische Eigenschaften  
 $\Rightarrow$  undeterministisches Verhalten

## 2.5 15. Mai 2018: Vorlesung 5

$$(2.4.2.1) = \frac{N}{2} I \cdot V_{cc} + N \cdot C_L \cdot f \cdot V_{cc}^2$$

Umbau von MOS in CMOS  
→

$$P_{total} \cong NC_L f V_{cc}^2 \quad (2.5.0.1)$$

Wachstum von  $N$  und  $F$  ist exponentiell, daher werden die Chips immer heißer, was immer effizienteres Kühlen erforderlich macht. Die Lösung ist der CMOS, da hier der statische Verluststrom weg fällt (da der CMOS im ausgeschalteten Zustand so gut sperrt, dass praktisch kein Strom fließt). Somit wird auch die Temperatur in der der HL in den intrinsischen Modus verfällt später erreicht.

### 2.5.1 Komplementär

**Definition 2.5.1.** Zwei elektronische Bauelemente heißen *komplementär* zueinander, wenn der Verlauf der Kennlinie erhalten bleibt, sich jedoch das Vorzeichen invertiert.

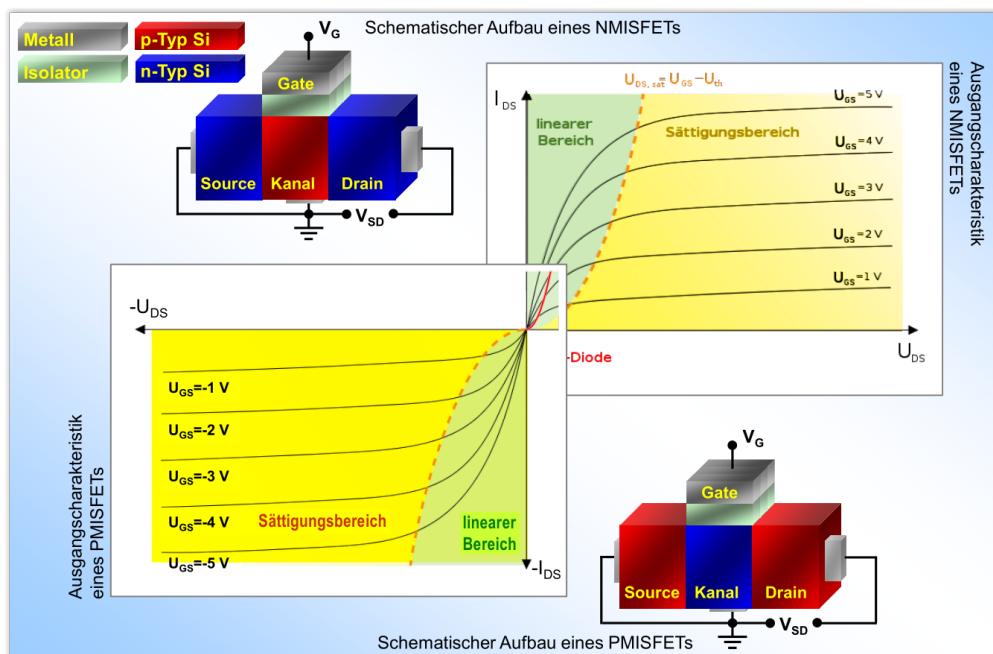


Abbildung 2.8: Kennlinie komplementär (Schulze 2018)

Aus (2.5.0.1) folgt wiederum

$$\rightarrow \frac{P_{total}}{C_L V_{cc}^2} = N \cdot f = konstant \quad (2.5.1.1)$$

Hierbei spricht man vom "Power Delay Produkt". Zwischen  $N$  und  $f$  findet ein "Tradeoff statt. Da das Produkt konstant ist, kann keiner der beiden Faktoren

beliebig erhöht werden. Wird  $N$  erhöht so muss  $f$  gesenkt werden und umgekehrt. Das "Power Delay Produkt" kann weiterhin wie folgt beschrieben werden:

$$\text{Power Delay Produkt: } \ln(Nf) = \ln(N) + \ln(f) = \ln(\text{konst}) = \text{konst} \quad (2.5.1.2)$$

## 2.5.2 Speichertypen

Die meistgenutzten Speichertypen sind:

SRAM	DRAM
<u>Static Random Access Memory</u>	<u>Dynamic Random Access Memory</u>
Schneller aber teurer Flip Flop basiert	Langsamer aber günstiger Kondensatorbasiert

## 2.5.3 Thyristoren

- Verschachtelung von PNP und NPN Bipolartransistoren
- Drei PN Übergänge und damit drei Schottky Kontakte
- Einmal angeschaltet geht der Thyristor erst bei 0V wieder aus
- Anwendungsgebiet: Hochspannung  $\sim 800kV$

## 2.5.4 Bindung und Strukturen

Die Elemente Kohlenstoff, Silizium, Germanium und weitere haben die gleiche Kristallstruktur, verhalten sich aber unterschiedlich. Graphit lässt sich selbst in unterschiedliche Strukturen bringen die alle ein anderes Leitverhalten vorweisen. Polykristallin ist Graphit leitend, monokristallin lässt sich das Verhalten nur noch durch einen Tensor beschreiben.

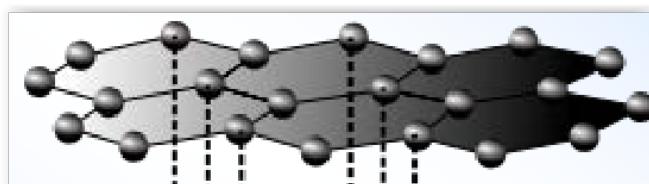


Abbildung 2.9: Monokristalline Graphitlage (Schulze 2018)

Legt man ein elektrisches Feld horizontal an weißt das Material eine extrem gute Leitfähigkeit auf. Legt man das Feld vertikal an so wirkt das Material wie ein Isolator. Man spricht hier von einem anisotropen Leitverhalten.

### Definition 2.5.2.

*Iso: gleich*

*Trop: Raum*

*Isotrop leitend: Im Raum in allen Richtungen gleich leitend*

*Anisotrop leitend: Im Raum in unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich gut leitend → Leitfähigkeitstensor*

### 2.5.5 Some facts

- PNP üblicherweise breiter als NPN da die Beweglichkeit von Löchern kleiner als die von Elektronen ist  
→ bei gleicher Baugröße treibt ein PNP Transistor weniger Strom als ein NPN Transistor
- Eine Elektronenpaarbindung ist eine kovalente Bindung
- Zinn ist ein sogenannter Zero-Bandgap Halbleiter, also ein Halbleiter bei dem die Bandlücke  $0\text{eV}$  beträgt. Er verhält sich somit metallisch und wird auch als Halbmetall bezeichnet.

## 2.6 Einschub Graphen/Kohlenstoffnanoröhrchen

### 2.6.1 Kristallstrukturen und Eigenschaften von Graphit

Graphit lässt sich in unterschiedlichen Strukturen vorfinden, die allesamt unterschiedliche Eigenschaften, insbesondere mit Bezug auf das Verhalten als Leiter, Halbleiter oder nichtleiter, haben. Von amorphem Kohlenstoff spricht man, wenn die Atome ohne eine langreichweitige Ordnung vernetzt sind. Weder aus der Ferne, noch aus der Nähe erkennt man eine Struktur im Material.

Um einen polykristallinen Graphitblock herzustellen, komprimiert man mehrere Bruchstücke eines Graphitkristalls zu einer festen Struktur. Bei der Betrachtung in der Nähe erkennt man so eine perfekte Kristallstruktur, bei der Betrachtung aus der Ferne jedoch sieht man allerdings die abrupten Übergänge der einzelnen Bruchstücke. Dadurch ist polykristalliner Graphit schlechter leitfähig als in monokristalliner Form.

Ein monokristalliner Graphitblock ist ein gewachsener Graphitkristall, der sowohl in der Nähe als auch in der Ferne eine perfekte Kristallstruktur aufweist. Die Leitfähigkeit eines solchen monokristallinen Graphitblocks ist abhängig von der Lage des elektrischen Felds bezüglich zu den einzelnen Kristallschichten. Zur korrekten Beschreibung ist ein Tensor zweiter Ordnung nötig. Parallel zu den Schichten weist ein monokristalliner Graphitblock eine sehr gute, beinahe metallische Leitfähigkeit von  $0,03 \cdot 10^6 \frac{S}{cm}$  auf (vgl. Weinschenk n.d.). Vertikal zu den Schichten verhält er sich nahezu wie ein Isolator.

### 2.6.2 Graphen

Mit Graphen bezeichnet man ein 1 Atom dickes, hexagonales Kohlenstoffgitter. So gesehen ist Graphen eine Kristallschicht eines monokristallinen Kohlenstoffblocks. Dabei zeigt Graphen Eigenschaften, die es für eine mechanische und elektrotechnische Nutzung interessant machen. Es ist einerseits mit  $3.35 \text{ \AA}$  und einer Dichte von  $0,77 \frac{mg}{m^2}$  ultimativ dünn, weist aber andererseits eine mit  $42 \frac{N}{m}$  im Vergleich zu Stahl ( $0,4 \frac{N}{m}$ ) sehr hohe Bruchstärke auf (vgl. Chandrasekhar 2018). Weiterhin zeichnet sich das Material durch eine elektrische Leitfähigkeit von  $0,96 \cdot 10^6 \frac{S}{cm}$  aus und übertrifft damit die Leitfähigkeit von Kupfer mit  $0,60 \cdot 10^6 \frac{S}{cm}$  deutlich (vgl. Chandrasekhar 2018). Ähnlich verhält es sich bei der thermischen Leitfähigkeit, bei der Graphen mit  $\approx 5000 W K^{-1} m^{-1}$  ebenfalls deutlich leitender als Kupfer mit  $\approx 400 W K^{-1} m^{-1}$  ist (vgl. Chandrasekhar 2018).

### 2.6.3 Kohlenstoffnanoröhren

Die Wände einer Kohlenstoffnanoröhre bestehen wie Graphen aus einer 1 Atom dicken Kohlenstofflage. Somit kann man sich Kohlenstoffnanoröhren wie ein kleines Stück Graphen, dass zu einer Röhre aufgerollt wurde, vorstellen. Üblicherweise liegen die Durchmesser der Röhren in einem Bereich von  $1 - 50\text{nm}$ , die kleinsten bisher hergestellten Röhren haben einen Durchmesser von  $0,4\text{nm}$ (vgl. Fujita & Suzuki 2013). Dabei sind in der Herstellung Längen von bis zu einem halben Meter realisierbar (vgl. Fujita & Suzuki 2013).

Es sind zwei Unterarten von Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT = carbon nanotubes) zu unterscheiden, mit denen ein hoher Grad an struktureller Perfektion erreicht werden kann. Sogenannte single-walled nanotubes (SWNTs) bestehen aus einer einzelnen Kristalllage, die zu einem Zylinder aufgerollt ist. Multi-walled nanotubes (MWNTs) bestehen dagegen aus einer konzentrischen Anordnung mehrerer SWNTs. Aufgrund dieser Anordnung können unterschiedliche Leityertypen erzeugt werden und somit das grundsätzliche Verhalten der CNTs angepasst werden.(Vgl. Baughman, Zakhidov & de Heer 2002)

#### 2.6.3.1 Strukturen

Je nach Verscherung bzw. Atomanordnung der Kristalllage der Röhrchen ist es möglich die Leitfähigkeit stark zu beeinflussen. Man spricht hier hauptsächlich von drei Typen. Armchair CNTs weisen ein metallisches Verhalten auf, Zigzag CNTs dagegen halbleitende Eingeschafeten (vgl. Chandrasekhar 2018). Die folgende Graphik zeigt die unterschiedlichen Strukturen der Wabenanordnung, die auch namensgebend für die jeweiligen Typen ist.

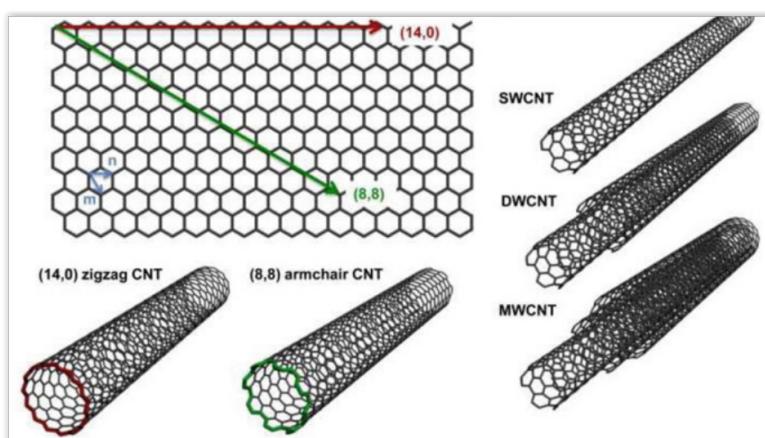


Abbildung 2.10: Strukturen von Kohlenstoffnanoröhrchen(Chandrasekhar 2018)

Eine weitere gängige Form Chiral CNTs. Dabei handelt es sich um Armchair CNTs, die verschert aufgerollt wurden. Chiral CNTs weisen wie Zigzag CNTs halbleitende Eigenschaften auf.

## 2.7 29. Mai 2018: Vorlesung 6

**Definition 2.7.1.** *Morph: Form*

*a: ohne*

*Amorph: Ohne Form*

Polykristallin	Monokristallin
Nur in Nahordnung wie ein gewachsener Kristall In Fernordnung unregelmäßig	Einzelner komplett gewachsener Kristall Nah- und Fernordnung absolut regelmäßig

### 2.7.1 Monokristallines Si

$$\vec{j} = \underbrace{\vec{\sigma}}_{\text{Bei monokristallinem Si Tensor 2. Ordnung}} \vec{\varepsilon} \quad (2.7.1.1)$$

Trägheitstensor für monokristallines Si:

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \vec{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & \vec{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.7.1.2)$$

### 2.7.2 Atomaufbau

Vergleich zur Mechanik und Elektrodynamik:

$$\text{Gravitation: } \vec{F}_G = -\gamma \frac{M_1 M_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} \quad (2.7.2.1)$$

$$\text{Coulombkraft: } \vec{F}_e = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} \quad (2.7.2.2)$$



Abbildung 2.11: Gravitation



Abbildung 2.12: Coulombkraft

Vermutung: Elektronen umkreisen Atomkern wie Planeten die Sonne → nach Kepler also in einer Elipsenbahn.

**Definition 2.7.2.**

*Mono: Ein*

*Chrom: Farbe*

*Monochromatisch: Einfarbig*

### 2.7.3 Some facts

- Im Periodensystem nach unten werden die Atome räumlich größer
- Zinn hat bis  $13^{\circ}C$  die gleiche Kristallstruktur wie Silizium, danach baut es sich zu sogenanntem Beta-Zinn um, das dieselbe Struktur wie Metall hat.
- Isotope: Bei Isotopen sind die Anzahl der Protonen gleich der Anzahl von Neutronen = der Anzahl von Elektronen. Isotope sind damit die Grundzustände von Atomen
- Beschleunigt bewegte Ladungen geben Energie in Form von EM-Wellen (elektromagnetischen Wellen) ab
- Größenordnung zwischen Atomen: Angström
- Größenordnung im Atomkern:  $10^{-15}m$
- Eine Glühlampe gibt nicht monochromatisches Licht ab
- Spektren vergaßter Elemente sind charakteristisch → Elemente können eindeutig erkannt werden
- Frauenhofer-Linien im Sonnenspektrum durch Wasserstoff und Helium absorbiert → Elemente können aus dem Spektrum genau die Frequenzen absorbieren, die sie emittieren (Absorptionsspektrum)<sup>2</sup>

## 2.8 29. Mai 2018: Vorlesung 7

### 2.8.1 Die Bohrschen Postulate

Postulat 1: In den Atomen bewegen sich die Elektronen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik auf diskreten Kreisbahnen mit den Energien  $E_n$ .

Postulat 2: Die Bewegung des Elektrons erfolgt strahlungslos. Beim Übergang des Elektrons von einem stationären Zustand mit der Energie  $E_a$  in einen stationären Zustand niedriger Energie  $E_e$  wird ein Photon emittiert.

### 2.8.2 Bohrsches Atommodell für das Wasserstoffatom

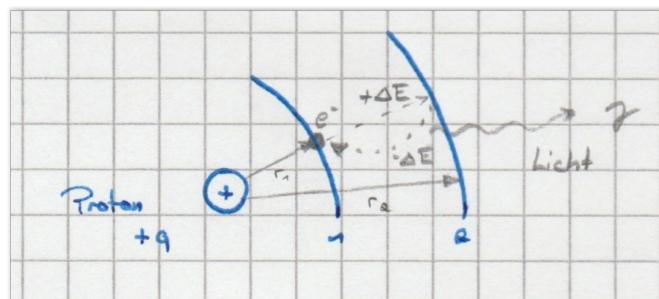


Abbildung 2.13: Atommodell/Bahnen (Tobi 2018)

Herleitung zur Energie der Bahnradien

$$\vec{F}_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}|^3} \vec{r} \quad (2.8.2.1)$$

$$Q_1 = +q, \quad Q_2 = -q, \quad \vec{r} = \vec{r}_1$$

$$\vec{F}_{c,1} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{|\vec{r}_1|^2} \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_2|} \Rightarrow |\vec{F}_{c,1}| = F_{c,1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{|\vec{r}_1|^2} \quad (2.8.2.2)$$

Es gilt

$$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} = \frac{1}{2} m |\vec{v}|^2 + E_{pot} = (*) \quad (2.8.2.3)$$

Mit  $\vec{p} = m \vec{v}$  folgt:

$$(*) = \frac{|\vec{p}|^2}{2m} + E_{pot} \quad (2.8.2.4)$$



Abbildung 2.14: Kraftwirkung auf Elektron (Tobi 2018)

Es gilt:

$$W = \int_1^2 \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (2.8.2.5)$$

**Definition 2.8.1.** Ist die nötige Arbeit unabhängig vom Weg den das Teilchen zurücklegt spricht man von einem konservativen Kraftfeld.

D.h.:

$$\text{Konservatives Feld } \rightarrow \oint \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} = 0 \quad (2.8.2.6)$$

$$\Leftrightarrow \text{rot } \vec{F}(\vec{r}) = \vec{\nabla} \times \vec{F}(\vec{r}) = 0 \leftarrow \text{Wirbelfreies Feld} \quad (2.8.2.7)$$

$$\Leftrightarrow \vec{F}(\vec{r}) = -\text{grad} \Phi(\vec{r}) = \vec{\nabla} \phi(\vec{r}) \quad (2.8.2.8)$$

Damit gilt:

$$\vec{F}_c(\vec{r}) = -\text{grad} E_{pot,c} \quad (2.8.2.9)$$

$$\Rightarrow E_{pot,c} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}|} \quad (2.8.2.10)$$

$$\Rightarrow E_{pot,c,1} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{|r_1|^2} \quad (2.8.2.11)$$

und somit folgt

$$\vec{F}_c(\vec{r}) = - \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} E_{pot,c,1} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial E_{pot,c,1}}{\partial x} \\ \frac{\partial E_{pot,c,1}}{\partial y} \\ \frac{\partial E_{pot,c,1}}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.8.2.12)$$

Es gilt aufgrund des Vergleichs zum Planetenmodell weiter

$$\vec{F}_c = \vec{F}_{zp} = m \vec{a}_{zp} \quad (2.8.2.13)$$

Annahme: Das Elektron bewegt sich gleichförmig auf einer Kreisbahn. Dann ist

$$v v a_{zp} = \frac{v_1^2}{r_1} \quad (2.8.2.14)$$

Wir versuchen nun die Gleichung auf die Form  $1/2mv^2$  zu bringen:

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r_1^2} = m \frac{v_1^2}{r_1} \\ &\Rightarrow \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r_1} \\ &\Rightarrow E_{ges,1} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r_1} - \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r_1} \\ &= -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r_1} \end{aligned} \quad (2.8.2.15)$$

Bzw. verallgemeinert

$$E_{ges,i} = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r_i} \quad , i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.8.2.16)$$

Beim Wechsel von einer äusseren auf eine innere Bahn wird also Energie (in Form eines Photons) frei, beim Wechsel von einer inneren auf eine äussere Bahn muss Energie aufgebracht werden.

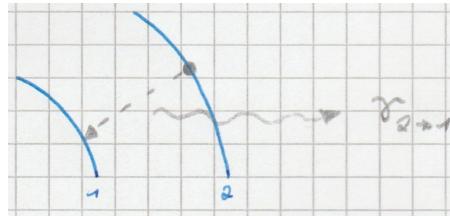


Abbildung 2.15: Bahnwechsel (Tobi 2018)

$$\begin{aligned} E_{\gamma_{2 \rightarrow 1}} &= E_{ges,2} - E_{ges,1} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \end{aligned} \quad (2.8.2.17)$$

Bzw. allgemein

$$E_{\gamma_{a \rightarrow e}} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q^2 \left( \frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_a} \right) \quad (2.8.2.18)$$

Damit allerdings sind alle Bahnradien bisher erlaubt, es liegt keine Einschränkung vor. Das würde heißen, dass das Atom das komplette Spektrum emittieren würde (also nicht diskret wäre). Es stellt sich zunächst die Frage, mit welcher Frequenz die Energie  $E_{\gamma_{a \rightarrow e}}$  emittiert wird.

Idee: Nutzung der Erkenntnisse zum äusseren photoelektrischen Effekt:

$$E_{\gamma_{a \rightarrow e}} \stackrel{?}{=} h \cdot f_{a \rightarrow e} \quad c_0 = \lambda f \quad (2.8.2.19)$$

### 2.8.3 Some facts

- Systemarten

Systemart	Anzahl Teilchen
Mikroskopisch	Maximal 3 Teilchen
Mesoskopisch	~ 100 - 1000 Teilchen
Makroskopisch	~ Millionen und mehr Teilchen

Bei Makroskopischen Systemen wird statistisch gearbeitet. D.h. es wird der Mittelwert des Systems untersucht um so das Problem auf ein Ein-Teilchen Problem zu reduzieren.

- Die Intensität einer Welle hängt vom Quadrat der Amplitude ab

- Die Energie einer EM-Welle hängt von der Frequenz und Intensität ab
- Grenzfrequenz lässt sich mit klassischer Physik nicht richtig erklären
- Einstein hat bei der Untersuchung des photoelektrischen Effekts den Begriff des Photons geprägt
- Mehr Intensität  $\Rightarrow$  mehr Photonen  $\Rightarrow$  Photon  $\cong h \cdot f$   $\Rightarrow$  abhängig von der Frequenz

## 2.9 05. Juni 2018: Vorlesung 8

**Definition 2.9.1.** Planksches Wirkungsquantum:

$$[h] = 1 \text{ Js} = 1 \text{ Nms} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ ms} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 1 \underbrace{\text{kg}}_{\text{Masse}} \underbrace{\frac{\text{m}}{\text{s}}}_{\text{Geschwindigkeit}} \underbrace{\text{m}}_{\text{Strecke}}$$

$$\Rightarrow h \sim \underbrace{\text{m} \cdot \text{v}}_p \cdot l = p \cdot l$$

Bekannt ist die Kombination aus Impuls und Strecke bereits vom Drehimpuls:

$$\vec{L} := \vec{r} \times \vec{p} \quad (2.9.0.1)$$

Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung steht  $\vec{p}$  immer senkrecht auf  $\vec{r}$

$$\Rightarrow |\vec{L}| = mvr$$

Die Annahme liegt also Nahe, dass es sich bei dem plankschen Wirkungsquantum um einen Bahndrehimpuls handelt.

### 2.9.1 Quanten

Was ist ein Quantum? Ein Quantum ist eine Grundportion bzw. kleines Einheit. Ein Photon ist ein Energiequantum.

Alltag	Quantenphysik
Kontinuierliche Größen	Alles besteht aus Grundquanten und alles ist ein natürliches Vielfaches davon

#### 2.9.1.1 Erweiterte Bohrsche Postulate

Postulat 1: In den Atomen bewegen sich die Elektronen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik auf diskreten Kreisbahnen mit den Energien  $E_n$ .

Postulat 2: Die Bewegung des Elektrons erfolgt strahlungslos. Beim Übergang des Elektrons von einem stationären Zustand mit der Energie  $E_a$  in einen stationären Zustand niedriger Energie  $E_e$  wird ein Photon der Frequenz  $f = \frac{(E_a - E_e)}{h}$  emittiert, wobei  $h$  das Planksche Wirkungsquantum ist.

Postulat 3: Der Drehimpuls eines Elektrons in einem stationären Zustand nimmt nur diskrete Werte  $2 \cdot \pi \cdot m \cdot v \cdot r = n \cdot h$  an, wobei  $n$  eine natürliche Zahl ist.

Formt man das dritte Postulat um erhält man:

$$2 \cdot \pi \cdot m \cdot v \cdot r = n \cdot h$$

$$2\pi pr = nh$$

$$\text{Bahnumfang des Elektrons} \rightarrow 2\pi r = \frac{nh}{p} = n \frac{h}{p} \quad (2.9.1.1)$$

Also sind nur solche Bahnen zulässig, die ein Vielfaches von  $\frac{h}{p}$  sind. Was ist das?:

$$\text{Wellenlänge: } \lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow \text{Impuls: } p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.9.1.2)$$

Damit ist der Bahnradius ein vielfaches der Wellenlänge. Das entspricht dem Verhalten einer stehenden Welle. Hier scheitert die klassische Mechanik, denn dabei wäre für ein massebehaftetes Teilchen keine Wellenlänge vorgesehen ist.

**Definition 2.9.2.** *Dirac-Konstante:*

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (2.9.1.3)$$

$$\begin{aligned} mvr &= n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \\ \Rightarrow r_n &= n^2 \hbar^2 4\pi \varepsilon_0 \frac{1}{mq^2} \quad , n \in \mathbb{N}_{\setminus \{0\}} \\ \Rightarrow r_n &= n^2 r_1 \\ r_1 &= \hbar^2 4\pi \varepsilon_0 \frac{1}{mq^2} = 0,0529 nm \end{aligned}$$

$r_1$  wird Bohrscher Radius genannt. Im Wasserstoffatom ist es der kleinste zulässige Radius. Setzt man dies in (2.8.2.17) ein und stellt (2.8.2.19) nach der Frequenz um, erhält man

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{a \rightarrow b}} &= \frac{E_{\gamma_{a \rightarrow b}}}{h} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q^2}{h} \left( \frac{mq^2}{n_e^2 4\pi \varepsilon_0 \hbar^2} - \frac{mq^2}{n_a^2 4\pi \varepsilon_0 \hbar^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q^2}{h} \frac{mq^2}{4\pi \varepsilon_0 \frac{h^2}{(2\pi)^2}} \left( \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2} \right) = \frac{mq^4}{8\varepsilon_0^2 8\pi^3 \frac{h^3}{8\pi^3}} \left( \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2} \right) \\ &= \frac{mq^4}{(4\pi \hbar)^3 \varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_a^2} \right) \end{aligned} \quad (2.9.1.4)$$

Die so berechneten Spektrallinien stimmen exakt mit denen von Wasserstoff überein. Damit ist es recht wahrscheinlich, dass die Rechnung richtig ist. Je schwerer die Atome werden, desto weniger exakt ist das Modell allerdings. Im Kristall kommen die Atome mikroskopisch nah zusammen. Dabei fächern sich die energetischen Zustände zu Energiebändern auf. Die Energiedifferenzen zwischen den Radien geben dabei die Bandlücken an.

### 2.9.2 Dipolmoment

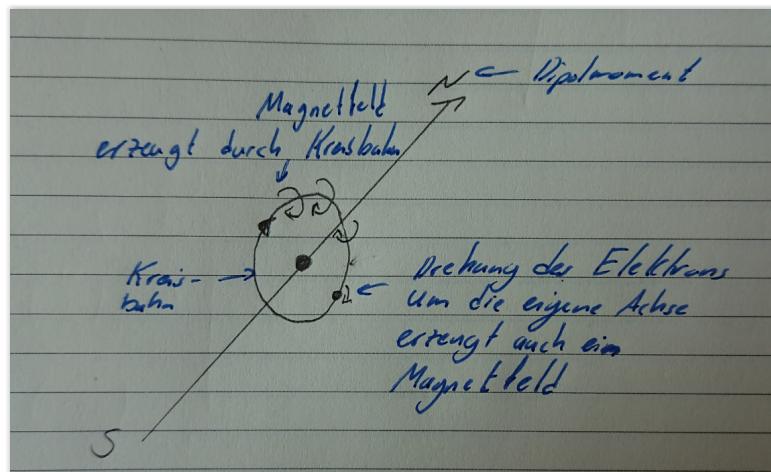


Abbildung 2.16: Dipolmoment eines Elektrons

Die Bewegung des Elektrons entlang der Kreisbahn erzeugt ein Magnetfeld, die Drehung um die eigene Achse (Spin) erzeugt wiederrum auch ein eigenes Magnetfeld. Zusätzlich zu den Bahnradien gibt es nach Somemrfeld  $n - 1$  stabile Ellipsen in denen sich Elektronen befinden können. Dabei spricht man von Energieschalen.

### 2.9.3 Some facts

- PTB = Physikalisch Technische Bundesanstalt, im Prinzip ein Eichinstitut
- Pauliprinzip: Jeder Zustand (auch einzelne Spins) ist entweder frei oder durch nur ein Elektron besetzbar

## 2.10 26. Juni 2018a: Vorlesung 9a

### 2.10.1 Metalle und metallische Leitfähigkeit

Metalle zeichnen sich insbesondere durch

- Hohe elektrische Leitfähigkeit die mit steigender Temperatur abnimmt
- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Duktilität (Verformbarkeit, Schmiedbarkeit)
- Metallischer Glanz (Spiegelglanz)

aus. Weiterhin leiten Metalle elektromagnetische Wellen nicht.

### 2.10.2 Bandstruktur

Zur kompletten Beschreibung der Bandstruktur würde man eine Dimension für die Energie, drei für den Impuls und drei für den Ort benötigen. Zur Darstellung unterteilt man oft in den Impuls- sowie den Ortsraum.

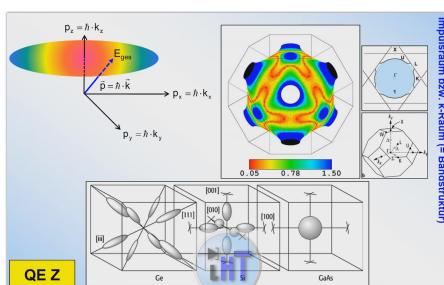


Abbildung 2.17: Impulsraum  
(Schulze 2018)

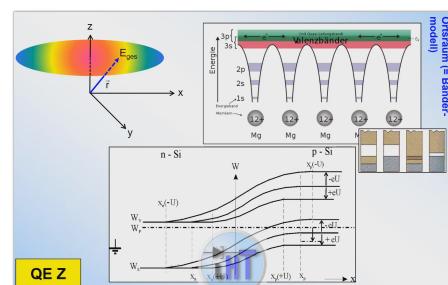


Abbildung 2.18: Ortsraum  
(Schulze 2018)

### 2.10.3 Metallische Bindung

Bei metallischer Bindung entsteht ein sogenanntes Fermi-Gas. Im statistischen Mittel gibt jedes Atom im Metall 1-2 Elektronen in einen sogenannten Fermi-See bzw. in das sogenannte Fermi-Gas ab. Aufgrund des Verhaltes eines Gases lassen sich thermodynamische Prinzipien anwenden. Die Metalle halten durch die Coulombkraft zusammen. Das Metall besteht im Prinzip aus positiv geladenen Metallionenrümpfen die von einem negativen Fermi-See umspült sind.

Zunächst der Versuch der Illustrierung einer Bandstruktur in einem Universum in dem es nur ein einzelnes Elektron gibt.

$$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} \quad (2.10.3.1)$$

Die potentielle Energie wird zu 0, da es keine weiteren Objekte gibt die eine Kraftwechselwirkung mit dem Elektron haben. Daher gilt  $E_{ges} = E_{kin}$ . Bei diesem Gedankenexperiment sind alle Energien positiv da es keine weiteren Teilchen und

somit keine Bindungen gibt. Also gilt:

$$0 \leq E_{ges} = E_{kin} < E_{max}$$

Mit

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \frac{1}{2}m|\vec{v}|^2 = \frac{|\vec{p}|^2}{2m} \\ \vec{p} &= \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \Rightarrow E_{kin} = \frac{1}{2m} \left( \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \right)^2 = \frac{1}{2m} (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) \\ \Leftrightarrow 2mE_{kin} &= p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 \\ \Rightarrow konst. &= p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 \end{aligned}$$

Hierbei handelt es sich um eine Kugelgleichung.

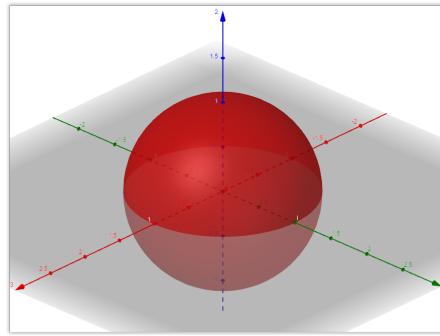


Abbildung 2.19: Kugelschale

D.h. die Lösungsmenge sind alle Vektoren die auf diese Kugelschale zeigen. Damit ist unklar in welche Richtung sich das Elektron bewegen wird. Es ist Übersichtlicher ist das Orstmodell. Da das Bohrsche Atommodell zweidimensional ist bleibt im Karthesischen System noch eine Dimension frei, die mit der Energie genutzt werden kann. So lässt sich die gesamte potentielle Energie die ein Teilchen in einer Ebene von positiv geladenen Metallionen haben kann. Dabei gilt:

$$E_{pot,kristall} = \sum_i E_{pot,i} \quad (2.10.3.2)$$

mit

$$E_{pot,i} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_{rel}} \frac{Zq^2}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \quad (2.10.3.3)$$

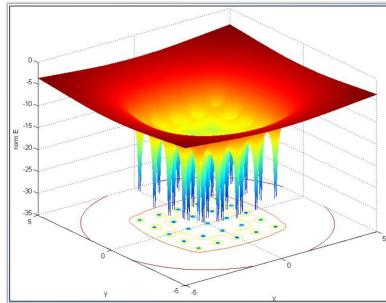


Abbildung 2.20: Potentielle Energie im Ortsraum 2D (Schulze 2018)

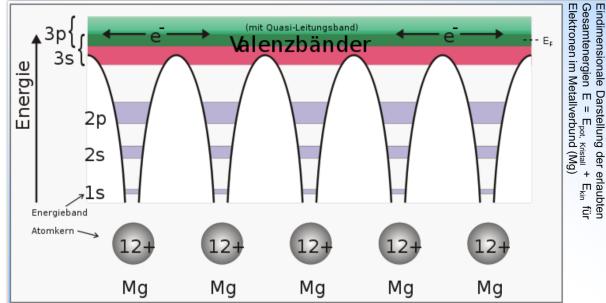


Abbildung 2.21: Potentielle Energie im Ortsraum 1D (Schulze 2018)

Hat das Teilchen genügend Energie wird es “über die Löcher springen“ und nicht in die Trichter fallen (vgl. Kugel über Trichter). Betrachtet man den Querschnitt von (2.20) erhält man (2.21). Ist ein Teilchen mal in einen Trichter gefallen wird es ohne Zugabe von Energie nicht mehr herauskommen.

#### 2.10.4 Ohmsches Gesetz

Es gilt

$$\vec{j} = \sigma \vec{\varepsilon} \quad (2.10.4.1)$$

$$U = RI \quad (2.10.4.2)$$

$$\sigma = qn\mu \quad (2.10.4.3)$$

Mit  $n$  als Ladungsträgerdichte und  $\mu$  als Ladungsträgerbeweglichkeit. Um ohmsches Verhalten (also eine lineare Strom/Spannungs Kennlinie) zu erhalten, muss überall die gleiche Ladungsträgerkonzentration vorhanden sein und es muss sich eine für alle gleiche Driftgeschwindigkeit ergeben, also

$$n = \text{konst.}$$

$$\vec{v}_D = \text{konst.}$$

Damit lässt sich die Kirchhoffssche Regel, die mit

$$\sum_i I_i = 0 \quad (2.10.4.4)$$

gegeben ist, erklären. Da die Ladungsträgerkonzentration überall konstant sein muss kann sich die Konzentration im Knoten nicht erhöhen. In einem Metall verhält sich das Elektronensystem also wie eine inkompressible Flüssigkeit.

Hierzu betrachten wir die Kontinuitätsgleichung in differentieller Form

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (2.10.4.5)$$

Die Gleichung wird in integrierter Form für große Volumina und in differentieller Form für infinitesimal kleine Volumina genutzt. Die Divergenz auf  $\vec{j}$  angewendet

ist hierbei die Betrachtung der Differenz dessen was aus dem Knoten heraus und hinein fließt. Dies kann negativ, positiv oder Null sein.

Positiv	Quelle
Negativ	Senke
Null	Neutral

Die Kirchhoffsche Regel ist ein Spezialfall, der sich nur ergibt wenn die Divergenz auf  $\vec{j}$  angewandt Null ist, denn dabei muss auch der erste Teil der Summe Null sein.

### 2.10.5 Homogen dotiertes Silizium

Ein so dotierter Halbleiter ergibt einen linearen U/I Zusammenhang. Ein n-dotierter Halbleiter hat dabei eine steilere Steigung als der p-dotierte Halbleiter. Man würde erwarten das beim Zusammenführen beider Halbleiter ein Ohmsches Verhalten vorliegt, also wieder eine Gerade heraus kommt. Dem ist aber nicht so, da sich dabei eine Diodenkennlinie gibt. Das erklärt sich dadurch, dass die Konzentrationen von Löchern und Elektronen in beiden Halbleitern extrem unterschiedlich sind und somit ein sehr hoher Konzentrationsgradient vorhanden ist. Dadurch unterscheidet es sich deutlich von klassisch ohmschen Widerständen.

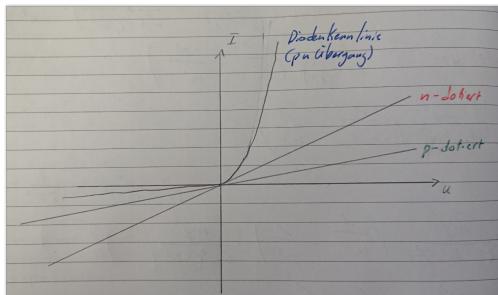


Abbildung 2.22: Homogene Halbleiter  
U/I Kurve

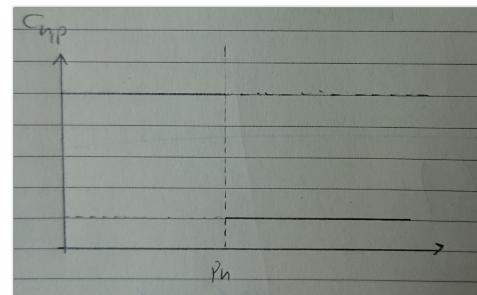


Abbildung 2.23: Homogene Halbleiter  
Konzentration

Dabei gilt:

$$n \approx N_D \quad p \approx N_A \quad (2.10.5.1)$$

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.10.5.2)$$

### 2.10.6 Some facts

- Elemente gehen nur solche chemische Verbindungen ein, dass sie möglichst in Edelgaskonfiguration kommen, also abgeschlossene Aufenschalen haben

- Im Periodensystem stehen Metalle meistens in sogenannten Übergangsgruppen bzw. Nebengruppen. Hier ist es schwierig zu sagen ob ein Element Elektronen aufnehmen oder abnehmen sollte um Edelgaskonfiguration zu erreichen
- In Materie befinden sich ca.  $10^{23} \text{ cm}^{-3}$  Atome, gibt nun jedes dieser Atome 1-2 Elektronen in den Fermi-See abgibt erhalten wir ca.  $1 - 2 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$  Elektronen  $\Rightarrow$  sehr hohe Leitfähigkeit
- Zu 99% besteht Materie aus nichts
- Komplette Bandstruktur wäre ein 7D Bild
- Metalle werden nach Dichte klassifiziert (Leicht- und Schwermetall)
- In einem Metall ist der letzte bei  $T = 0K$  noch besetzte energetische Zustand das Fermi-Niveau
- Die Elektronen die bei einem Metall hauptsächlich für die Leitfähigkeit eine Rolle spielen sind die Nahe des Fermi-Niveaus, da dort die Hauptmasse der Elektronen ist

## 2.11 26. Juni 2018b: Vorlesung 9b

### 2.11.1 PN-Übergang

In einem ohmschen Knoten gilt  $\operatorname{div} = 0$ , d.h.  $n = \text{konst.}$ . Die Diffusion wird durch die Fickschen Gesetze beschrieben. Das erste Ficksche Gesetz besagt, bei Vorhandensein eines Konzentrationsgradienten kommt es zu einem Diffusionsstrom, der von der höheren zur niedrigeren Konzentration fließt bis sämtliche Konzentrationsunterschiede ausgeglichen sind. Bei dem in (2.23) illustrierten Fall, würde es zu einem Diffusionsstrom kommen, da gigantische Konzentrationsunterschiede vorliegen. Der Ladungszustand des Gesamtsystems bleibt dabei beim Kontakt beider Materialien neutral. Der Diffusionsstrom nach Kontakt setzt sich dabei aus zwei Teilen zusammen. Zum einen ein Elektronenstrom von der N-Typ zur P-Typ Seite und ein genau entgegengesetzt gerichteter Löcherstrom.

Setzt man ein infinitesimal kleines Volumen direkt an den PN Übergang benötigt man zwei Kontinuitätsgleichungen zur korrekten Beschreibung. Eine für Elektronen und eine für Löcher. Dabei wird klar, dass das selbe Volumen sowohl eine Quelle als auch eine Senke sein kann (je für Elektronen und Löcher). Hier im Beispiel ist das Volumen eine Quelle für Löcher und eine Senke für Elektronen. Betrachtet man also die Divergenz des Löcherstroms stellt sich heraus, dass es eine positive Divergenz ist (es fließen mehr Löcher heraus als hinein). Damit weiterhin (2.10.4.5) war bleibt muss damit die Dichte der Löcher im Volumen negativ sein also physikalisch abnehmen.

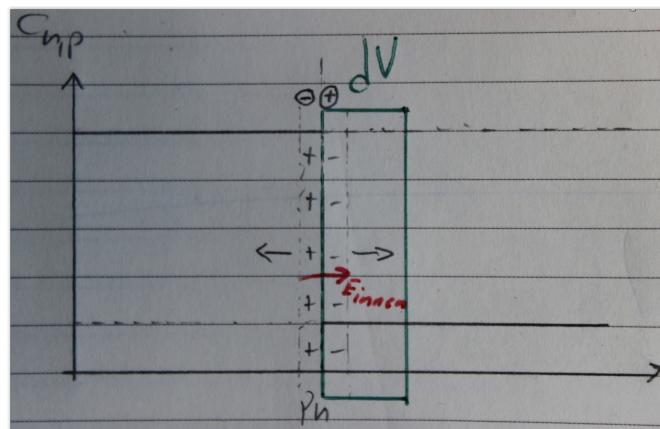


Abbildung 2.24: Homogene Halbleiter Raumladungszone

Die Schlussfolgerung daraus ist wiederum, dass sich auf einer Seite eine positive Überschussladung generiert (und zwar mit jedem Elektron, das hier im Beispiel von links nach rechts diffundiert, denn so wird im linken HL eine positive Ladung nicht mehr kompensiert). Dasselbe passiert durch das diffundieren der Löcher von rechts nach links, sodass sich eine negative Überschussladung generiert. Dadurch baut sich ein elektrisches Feld auf, dass von + nach - zeigt. Während die Diffusion weiter abläuft steigt das elektrische Feld immer weiter an. Dieses elektrische Feld wirkt dabei genau entgegengesetzt der Diffusion. Diffundieren im Beispiel Elektronen nach rechts wirkt gleichzeitig durch das innere elektrische Feld

eine Kraft, die versucht die Elektronen zur positiven Seite der RLZ (Raumladungszone) zu beschleunigen. Würde dieses elektrische Feld nicht entstehen, würde die Diffusion ablaufen bis der Konzentrationsgradient Null wäre.

Nach der Schottkyschen Parabelnäherung gibt es in der Raumladungszone keine freien Ladungsträger, da sie durch das elektrische Feld direkt heraus beschleunigt werden würden. Nach einiger Zeit ist das elektrische Feld so groß, dass die Diffusion nicht mehr ablaufen kann. Der Gradient ist zwar weiterhin ungleich Null, dennoch wird die Diffusion aufgehalten obwohl weiterhin Diffusionsdruck vorherrscht. Betrachten wir (2.22) erneut erkennt man, dass der Strom in Vorwärtsrichtung um Größenordnungen größer als der in Rückwärtsrichtung ist. In Vorwärtsrichtung ist das äußere elektrische Feld dem inneren gerade entgegengesetzt gerichtet. Damit wird das innere elektrische Feld geschwächt, die RLZ wird kleiner und das innere el. Feld behindert den Diffusionsstrom weniger. Weiterhin ist die Leitfähigkeit direkt proportional zur Anzahl der strömenden Ladungsträger. Wurde zum Beispiel mit  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  auf beiden Seiten dotiert dann werden so in Vorwärtsrichtung jeweils  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  Löcher und Elektronen in jeweils die andere Seite transportiert  $\Rightarrow$  großer Strom.

In Rückwärtsrichtung wird das innere elektrische Feld gestärkt und die Raumladungszone wird immer größer. Dadurch wird der Diffusionsstrom immer stärker behindert. Der dabei dann noch vorhandene Strom wird Rekombinations- und Generationsmechanismen die immer in einem Halbleiter ablaufen ( $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  Elektronen/Löcherpaare). Generiert sich innerhalb der RLZ ein Elektronen/Lochpaar, wird das Paar durch das elektrische Feld sofort voneinander getrennt und in entgegengesetzte Richtungen weggesaugt.

Stellt man sich nun die Frage, wodurch in (2.22) das exponentielle Wachstum entsteht betrachtet man am besten den PN-Übergang und die Bandverbiegung.

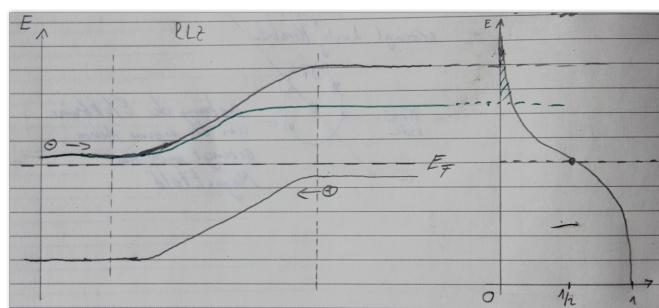


Abbildung 2.25: Homogene Halbleiter Bandverbiegung

Betrachtet man das eingezeichnete Loch bzw. Elektron stellt man fest, dass zuerst Energie zugeführt werden muss damit die "Barriere" in Form der Bandverbiegung überwunden werden kann. Legt man nun ein elektrisches Feld in Vorwärtsrichtung an wird die Raumladungszone immer kleiner. Da das innere elektrische Feld ursächlich für die Bandverbiegung ist wird entsprechend auch die Bandverbiegung immer kleiner und somit muss den Elektronen/Löchern weniger Energie zugeführt werden, damit Sie den PN-Übergang passieren können. Betrachtet man dazu die Fermi-Verteilung wird klar, dass direkt am Anfang direkt ein kleiner Strom fließt, da es einige wenige Elektronen gibt, die hochenergetisch genug sind

um die Barriere zu überwinden. Je geringer die Bandverbiegung nun wird (in grün eingezeichnet), desto höher wird die Besetzungswahrscheinlichkeit nach der Fermi-Verteilung. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt exponentiell zu. Damit nimmt auch der Stromfluss entsprechend der Diodenkennlinie exponentiell zu.

## 2.11.2 Schottky-Kontakt

### 2.11.2.1 Metall/n-Typ Halbleiter Übergang

Im Metall ist typischerweise ein Fermi-See aus frei beweglichen Elektronen vorhanden. Im N-Typ Halbleiter haben die Donator-Atome bei RTP ihr zusätzliches Elektron abgegeben. Diese Elektronen sind zunächst genauso frei beweglich wie Elektronen im Fermi-See im Metall. Vor dem Kontakt beider Materialien sind beide jeweils in sich elektrisch völlig neutral. Im Metall sind  $\sim 1 - 2 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$  freie Ladungsträger vorhanden, im Halbleiter entspricht die Elektronenkonzentration dann ungefähr der Donator- bzw. Dotierkonzentration, also z.B.  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Somit wäre die erste Vermutung, dass ein Konzentrationsgradient vorliegt und das System bei Kontakt versucht das Gefälle auszugleichen. Damit müssten vom Metall zum Halbleiter Elektronen fließen. Dem ist aber nicht so. Tatsächlich fließen vom Metall in den Halbleiter Elektronen. Für die Wahl des Metalls gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten. Das Fermi-Niveau des Metalls könnte unterhalb dem des Halbleiters, oberhalb oder gleich sein. Technisch relevant ist vor allem der Fall, in dem das Fermi Niveau des Metalls unterhalb dem des Halbleiters liegt. In Diesem Fall befindet sich der Hauptteil der Elektronen im Metall auf der Höhe der Bandlücke im Halbleiter. Es besteht dann zwar ein hoher diffusiver Druck von Seiten des Metalls, es kann aber keine Diffusion stattfinden. Die einzigen Elektronen die tatsächlich wandern können sind die, die auf Höhe des Leitungsbands des Halbleiters liegen. Dort sind aber im Metall entsprechend der Fermi-Verteilung nur sehr wenige Elektronen vorhanden. Dagegen sind im Halbleiter entsprechend der Dotierung  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  vorhanden. Dementsprechend ist ein Konzentrationsgradient vorhanden und es kommt zu einer Diffusion vom Halbleiter ins Metall. Das Metall ist allerdings im Verhalten wie eine inkompressible Flüssigkeit. Daher können nicht einfach mehr Elektronen in das Metall gebracht werden. Die aus dem Halbleiter diffundierenden Elektronen befinden sich wie in (2.27) zu sehen ist direkt an der Grenzfläche. Dies verhält sich wie eine Flächenladung beim Kondensator. Somit bildet sich eine Raumladungszone an der Kontaktfläche zwischen Metall und N-Typ Halbleiter (wobei die positive RLZ räumlich stark ausgedehnt ist), da die Donatoren als einfache positive Ionen im Halbleiter zurückbleiben und die diffundierten an der Grenzfläche zum Metall als negative RLZ verbleiben. Erhöht man die angelegte Spannung über das interne Feld hinaus kommt zum vorhandenen Diffusionsstrom noch ein Driftstrom hinzu.

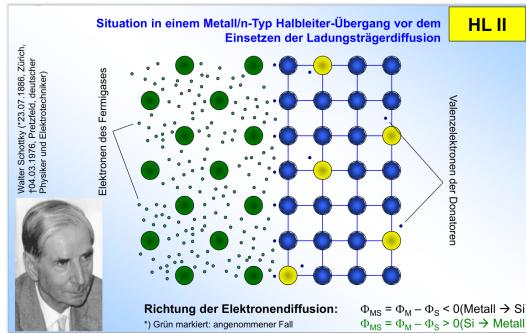


Abbildung 2.26: Schottky Kontakt Metall/n-Typ vor der Diffusion (Schulze 2018)

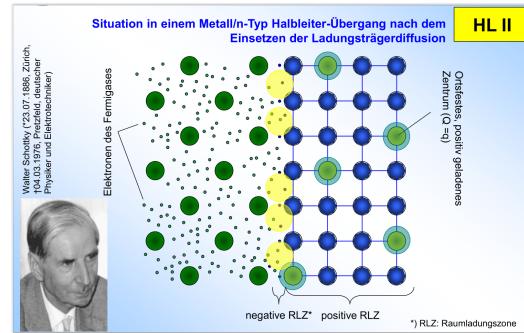


Abbildung 2.27: Schottky Kontakt Metall/n-Typ während der Diffusion (Schulze 2018)

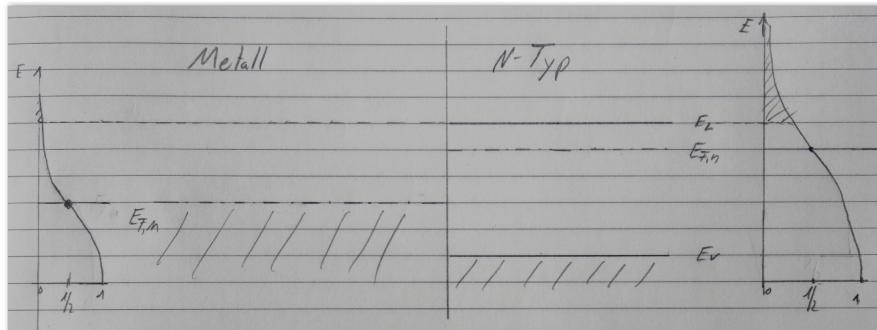


Abbildung 2.28: Schottky Kontakt Metall/n-Typ Bänder (vor Kontakt)

Für die Diffusionsrichtung gilt:

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S < 0 \Rightarrow \text{Metall} \rightarrow \text{Si} \quad (2.11.2.1)$$

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S > 0 \Rightarrow \text{Si} \rightarrow \text{Metall} \quad (2.11.2.2)$$

Nach dem Kontakt kommt es zu einer Bandverbiegung sodass ohne Zuführung von Energie die Barriere für die Elektronen nicht überwindbar ist (siehe Abbildung 2.29).

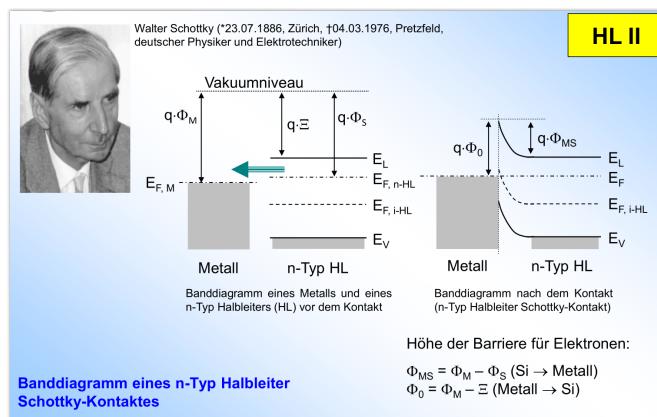


Abbildung 2.29: Schottky Kontakt Metall/n-Typ Bänder (nach Kontakt) (Schulze 2018)

## 2.12 07. Juli 2018: Vorlesung 10

### 2.12.1 Schottky-Kontakt

#### 2.12.1.0.1 Metall/p-Typ Halbleiter Übergang

Wie in Abbildung 2.30 sichtbar ist der Halbleiter nun mit Akzeptoren dotiert die jeweils ein Siliziumatom frustrieren und somit einen Akzeptorzustand erzeugen. Das Fermi-Niveau des Metalls ist nun höher als das des Halbleiters und es diffundieren Elektronen vom Metall in den Halbleiter. Wie in 2.32 dargestellt werden zunächst durch Elektronen aus dem Metall die frustrierten Siliziumatome befriedigen. Dadurch lädt sich der Halbleiter negativ auf, das Metall wiederum positiv und so entsteht eine RLZ an der Grenzfläche. Hier ist die negative Raumladungszone ausgedehnt.

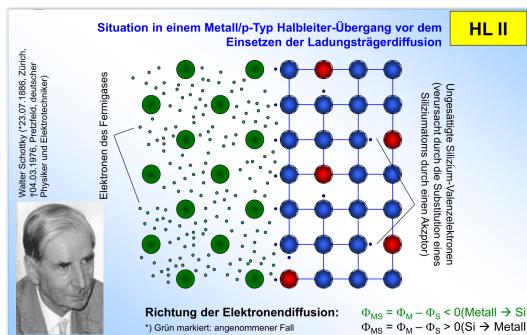


Abbildung 2.30: Schottky Kontakt  
Metall/p-Typ vor der Diffusion  
(Schulze 2018)

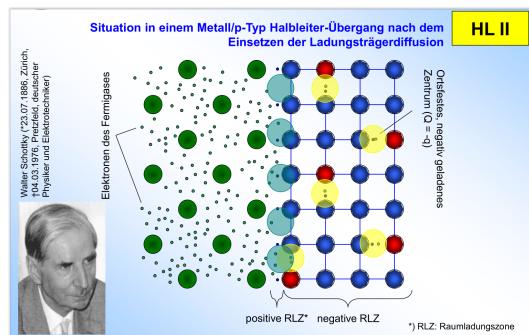


Abbildung 2.31: Schottky Kontakt  
Metall/p-Typ während der Diffusion  
(Schulze 2018)

Für die Diffusionsrichtung gilt:

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S < 0 \Rightarrow \text{Metall} \rightarrow \text{Si} \quad (2.12.1.1)$$

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S > 0 \Rightarrow \text{Si} \rightarrow \text{Metall} \quad (2.12.1.2)$$

Das Bänderdiagramm wie in 2.32 dargestellt biegen sich die Bänder nun nach unten. Auch hier ist der Vorgang wieder unipolar, denn der Stromtransport wird im P-Typ Halbleiter primär durch Löcher im Valenzband getragen. Auch hier erkennt man wieder eine Barriere die die Elektronen bzw. Löcher zunächst überwinden müssen. Wird eine äußere Spannung angelegt wird die RLZ größer und es werden noch mehr Elektronen abgesaugt.

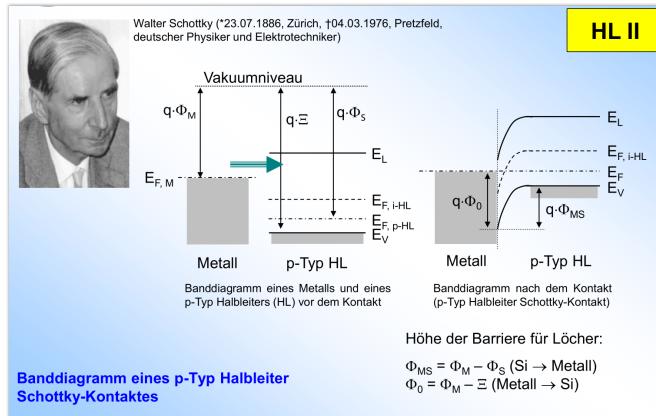


Abbildung 2.32: Schottky Kontakt Metall/p-Typ Bänder (nach Kontakt)  
(Schulze 2018)

## 2.12.2 MISFET

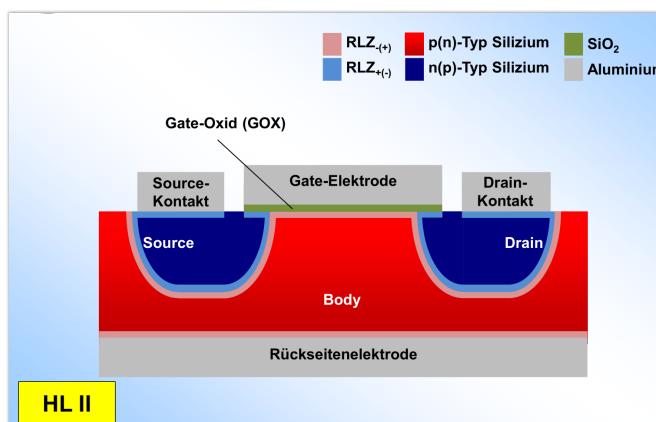


Abbildung 2.33: Aufbau Misfet (Schulze 2018)

Grundsätzlich erkennt man die Serienschaltung zweier Dioden, die gegenläufig zueinander geschalten sind (PN und NP). Damit kann eigentlich kein Stromfluss (ausser dem Sperrstrom) zustande kommen, da ein PN Übergang immer in Sperr- und einer in Durchlassrichtung ist. Legt man nun eine Gatespannung an influenziert sich ein Inversionskanal der mit Elektronen geflutet wird (siehe Abbildung 2.34). Der Kanal verhält sich wie ein  $n+$  dotiertes Gebiet. Der Widerstand durch den Inversionskanal ist dabei um Größen kleiner als über den Body und somit fließt der Strom durch den Inversionskanal. In Abbildung (2.35) ist das Ersatzschaltbild dargestellt. Betrachtet man nun die Schottky Kontakte erkennt man, dass auch eine dieser beiden Schottky Dioden immer in Sperrrichtung gepolt sein muss und somit wieder kein Stromfluss zustande kommen dürfte. Dieses Problem stellt sich bei allen Halbleiterbauelementen, nicht nur beim MIS- bzw. MOSFET.

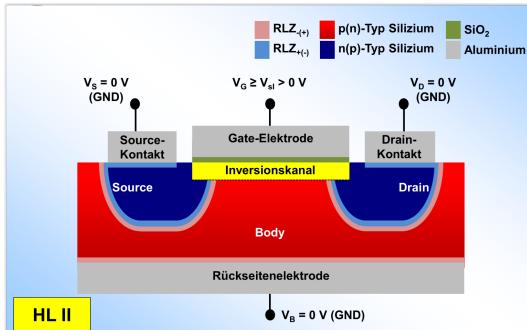


Abbildung 2.34: MISFET  
Inversionskanal (Schulze 2018)

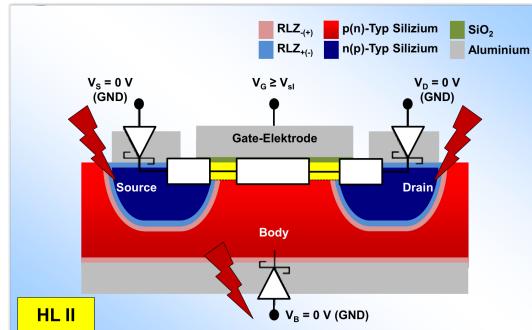


Abbildung 2.35: MISFET  
Ersatzschaltbild (Schulze 2018)

Um dieses Problem zu lösen, dotiert man den Halbleiter genau am Schottky Kontakt immer höher. Dotiert man den n-Typ Halbleiter immer höher, dann schiebt sich das Fermi Niveau immer näher ans Leitungsband. Die Barriere rutscht so immer näher an den PN-Übergang. Schiebt man die Barriere nah genug an den PN-Übergang ( $< 5\text{nm}$ ), also dotiert man extrem hoch ( $\sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$ ), verhält sich der Schottky Kontakt wie ein ohmscher Kontakt. Man spricht hier von einem ohmschen Tunneldurchgang (Quantenphysik). Die Elektronen durchtunneln die Barriere dabei einfach als wäre sie nicht vorhanden. Das Teilchen zeigt dabei Wellencharakter. Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist gegeben durch

$$|D(G)|^2 \sin e^{-2G} \quad (2.12.2.1)$$

Wobei  $G$  der Gamowfaktor ist.

$$G = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\hbar^2} \cdot (V_0 - E_{ges})} dx \quad (2.12.2.2)$$

Der Gamowfaktor ist beeinflussbar über drei Größen.

- Je kleiner die Barriere, also je näher die Integrationsgrenzen beieinander sind, desto höher ist die Tunnelwahrscheinlichkeit
- Je kleiner die Masse, desto höher desto höher ist die Tunnelwahrscheinlichkeit
- Je kleiner die Gesamtenergie relativ zur Barriehöhe ist, desto höher ist die Tunnelwahrscheinlichkeit

## 2.12.3 Bipolartransistor

### 2.12.3.1 Aufbau

In Abbildung 2.36 erkennt man deutlich, dass der BPT (Bipolartransistor) im Gegensatz zum MISFET ein asymmetrisches Bauelement ist. Der eigentliche Transistor der gelb eingeklammerte Bereich. Alles weitere ist zur reinen Kontaktierung. Die Basis ist dabei mit  $20 - 30\text{nm}$  sehr dünn. Die Basis muss entsprechend dünn

sein damit der Transistor extrem schnell schalten kann. Die herausgeführte Basis mit dem P-Typ dotierten Teil ist nur zur Kontaktierung. Ebenfalls asymmetrisch am BPT ist ungleichmäßige Dotierung. Der Emitter zeichnet sich dadurch aus die höchstdotierteste Zone zu sein. Der Kollektor (der  $n-$  markierte Bereich) ist im Gegensatz dazu sehr schwach dotiert. Z.B.:

- Emitter:  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$
- Basis:  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- Kollektor:  $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Würde man an den Kollektor direkt einen Kontakt anbringen würde sich eine Schottky Diode bilden. Um die Problematik zu umgehen nutzt man eine erneut sehr hoch dotierte Schicht die wiederrum nur zur Kontaktierung da ist.

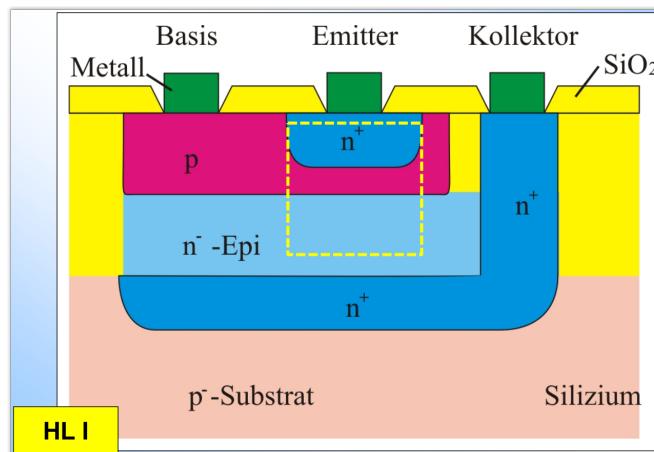


Abbildung 2.36: Aufbau NPN Bipolartransistor (Schulze 2018)

### 2.12.3.2 Symbolik

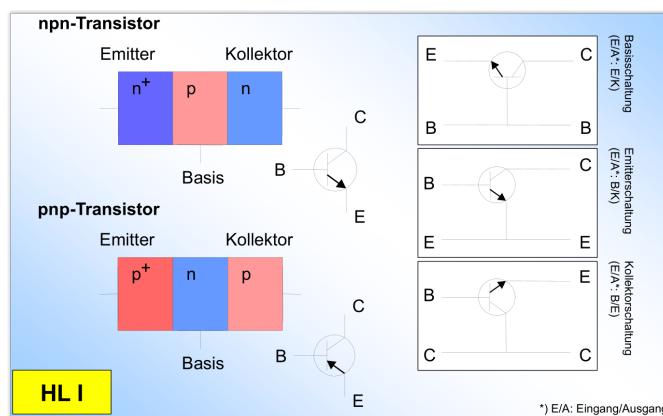


Abbildung 2.37: Symbolik Bipolartransistor (Schulze 2018)

Eselsbrücke zum Schaltzeichen: Pfeil Nach Platte = PNP

#### 2.12.4 Some facts

- Der Schottky Kontakt ist ein unipolares Bauelement (läuft im Leitungsband ab und wird hauptsächlich von Elektronen getragen).
- Schottky Dioden sind die schnellsten Dioden da  $\mu_n > \mu_p$
- Flachbandzustand: Elektrisches Feld bricht komplett zusammen
- Ist die Frequenz hoch genug dann verhält sich eine Gleichrichterdiode wie ein Widerstand und der Strom wird nicht mehr in eine Richtung gesperrt
- Auf dem Weg vom P ins N Gebiet einer PN Diode werden Löcher zu 100% in Elektronen umgewandelt. Dadurch ist der PN-Übergang langsamer als der Schottky Kontakt
- Si-Diode Ventilspannung:  $\sim 0,7V$ ; Schottky-Diode:  $\sim 0,3V$  (da RLZ nur halbseitig)
- Je höher die Dotierung, umso kleiner wird die RLZ
  - $10^{15} - 10^{16} cm^{-3} \rightarrow RLZ \sim 10^{-6} m$
  - $10^{18} cm^{-3} \rightarrow RLZ \sim \text{mehrere } 100 \cdot 10^{-9} m$
  - $10^{20} cm^{-3} \rightarrow RLZ \sim \text{wenige } 10^{-9} m$
- Der Begriff evaleszente Welle beschreibt die Totalreflexion bei Licht- und Wasserwellen mit unterschiedlich großen Spalten
- Der Bipolartransistor ist das schnellste schaltbare Bauelement

# Kapitel 3

## Vortragsübungen

# Kapitel 4

## Anhänge

### 4.1 Hilfstabellen

#### 4.1.1 Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$a$	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung
$b$	$\frac{cm^2}{Vs}$	Ladungsträgerbeweglichkeit
$d$	$m$	Dicke
$D_n$	$\frac{m^2}{s}$	Diffusionskonstante für Elektronen
$D_p$	$\frac{m^2}{s}$	Diffusionskonstante für Löcher
$e$	$C$	Elementarladung
$E$	$\frac{N}{C} = \frac{VAs}{mAs} = \frac{V}{m}$	Elektrische Feldstärke
$E_c$	$eV$	Leitungsbandkante
$E_F$	$eV$	Fermi-Energie
$E_g$	$eV$	Energie der Bandlücke
$E_v$	$eV$	Valenzbandkante
$f$	$Hz$	Frequenz
$\vec{F}$	$N = \frac{kgm}{s^2}$	Kraft
$G$	$\frac{A}{V} = \frac{1}{\Omega} = S$	Leitwert
$h$	$eVs$	Planksches Wirkungsquantum
$\hbar$	$eVs$	Dirac-Konstante

Fortsetzung auf Folgeseite

Tabelle 4.1: Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$i$	$A$	Elektrischer Strom
$j$	$\frac{A}{m^2}$	Elektrische Stromdichte
$J_n$	$\frac{A}{m^2}$	Elektronenstromdichte
$J_p$	$\frac{A}{m^2}$	Löcherstromdichte
$J_{diff}$	$\frac{A}{m^2}$	Diffusionsstromdichte
$J_{part}$	$\frac{A}{m^2}$	Partikelstromdichte
$J_{tO}$	$\frac{A}{m^2}$	Totale Stromdichte
$J_r$	$\frac{A}{m^2}$	Rekombinationsstromdichte
$J_{drift}$	$\frac{A}{m^2}$	Driftstromdichte
$l$	$m$	Länge
$L$	$m$	Minoritätsladungsträgerdiffusionslänge
$L_n$	$m$	Diffusionslänge Elektronen
$L_p$	$m$	Diffusionslänge Löcher
$n$	...	Elektronenkonzentration
$n_i$	...	Intrinsische Ladungsträgerdichte
$n_{id}$	...	Idealität einer Diode
$N_A$	$m^{-3}$	Akzeptorendichte
$N_D$	$m^{-3}$	Donatorenendichte
$N_C$	$cm^{-3}$	Effektive Zustandsdichte der Elektronen
$N_V$	$cm^{-3}$	Effektive Zustandsdichte der Löcher
$p$	...	Lochkonzentration
$q$	$C$	Probefladung (in der Regel = $e$ )
$\vec{r}$	$m$	Weg
$r$	$\Omega$	Differentieller Widerstand
$R$	$\Omega$	Widerstand
$R_F$	$\frac{\Omega}{square}$	Flächenwiderstand
$U$	$V$	Elektrische Spannung

Fortsetzung auf Folgeseite

Tabelle 4.1: Abkürzungen/Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$U_g$	$V$	Gesamtspannung
$v$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
$v_D, v_d$	$\frac{m}{s}$	Driftgeschwindigkeit
$w$	$m$	Weite bzw. Breite
$W$	$Ws = J = \frac{kgm^2}{s^2}$	Arbeit bzw. Energie
$\alpha$	$\frac{1}{\circ C}$	Temperaturkoeffizient des Ohmwiderstandes
$\nu$	$Hz$	Hier Frequenz der Welle
$\rho$	$\frac{Vcm}{A} = \Omega cm$	Spezifischer Widerstand
$\rho_e$	...	Ladungsdichte
$\kappa$	$\frac{1}{\Omega cm} = \frac{S}{cm}$	Spezifische Leitfähigkeit
$\varepsilon_0$	$\frac{As}{Vm}$	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
$\varphi$	$V$	Elektrisches Potential
$\tau$	$s$	Stoßzeit
$\tau$	$s$	Minoritätsladungsträgerlebensdauer
$\mu$	$\frac{cm^2}{Vs}$	Beweglichkeit

### 4.1.2 Wichtige Donatoren und Akzeptoren

Ch. Sym.	Name	Typ
$B$	Bor	Akzeptor
$Al$	Alluminium	Akzeptor
$Ga$	Gallium	Akzeptor
$In$	Indium	Akzeptor
$P$	Phosphor	Donator
$As$	Arsen	Donator
$Sb$	Antimon	Donator
$Bi$	Wismut	Donator

### 4.1.3 Effektive Massen

Band	Wert	Element
$\frac{m_n^*}{m_0}$	1, 08	Silizium
$\frac{m_n^*}{m_0}$	1, 561	Germanium
$\frac{m_n^*}{m_0}$	1, 067	Gallium-Arsenid
$\frac{m_p^*}{m_0}$	1, 10	Silizium
$\frac{m_p^*}{m_0}$	1, 291	Germanium
$\frac{m_p^*}{m_0}$	1, 473	Gallium

### 4.1.4 Bandlücken wichtiger Materialien

Zeichen	Wert in eV	Material
$E_{g,SiO_2}$	9	Siliziumdioxid
$E_{g,C}$	5, 47	Diamant
$E_{g,CdS}$	2, 42	Cadmiumsulfid
$E_{g,GaP}$	2, 26	Galliumphosphid
$E_{g,GaAs}$	1, 42	Gallium-Arsenid
$E_{g,InP}$	1, 35	Indiumphosphid
$E_{g,Si}$	1, 12	Silizium
$E_{g,Ge}$	0, 66	Germanium
$E_{g,InSb}$	0, 17	Indiumantimonid

### 4.1.5 Eckdaten wichtiger Halbleiter

Ch. Sym.	$E_g$ in [eV]	$N_C$ in $[cm^{-3}]$	$N_V$ in $[cm^{-3}]$	$n_i$ in $[cm^{-3}]$
Si	1, 124	$2, 81 \cdot 10^{19}$	$2, 88 \cdot 10^{19}$	$1, 04 \cdot 10^{10}$
Ge	0, 67	$1, 05 \cdot 10^{19}$	$3, 92 \cdot 10^{18}$	$1, 55 \cdot 10^{13}$
GaAs	1, 424	$4, 33 \cdot 10^{17}$	$8, 13 \cdot 10^{18}$	$2, 04 \cdot 10^6$

### 4.1.6 Niederfeld- und Niederdotierungsbeweglichkeiten ( $T = 300K$ )

$n/p$	Si	Ge	GaAs
$\mu_n \left[ \frac{cm^2}{Vs} \right]$	1340	3900	8000
$\mu_p \left[ \frac{cm^2}{Vs} \right]$	460	1900	400

### 4.1.7 Konstanten

Ze.	Wert	Bedeutung
$c$	$2,998\dots \cdot 10^8 [frac{m}{s}]$	Lichtgeschwindigkeit
$e, q$	$1,602176\dots \cdot 10^{-19} [C]$	Elementarladung
$e, q$	$1,602176\dots \cdot 10^{-19} [J]$	Elementarladung
$h$	$6,63 \cdot 10^{-34} [Js]$	Planck-Konstante
$h$	$4,136\dots \cdot 10^{-15} [eVs]$	Planck-Konstante
$\hbar$	$\frac{h}{2\pi}$	Plancksches Wirkungsquantum
$k$	$8,6173 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{eV}{K} \right]$	Boltzmann Konstante
$kT$	$25,85 [meV]$	mit der Boltzmann Konstante und $T = 300K$
$m_0$	$9,11 \cdot 10^{-31} [kg]$	Elektronenmasse
$\varepsilon_0$	$8,854\dots \cdot 10^{-12} \left[ \frac{As}{Vm} \right]$	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$\varepsilon_{Si}$	11,90	Korrekturfaktor Dielektrizitätskonstante für Silizium

### 4.1.8 Formelverzeichnis

# Kapitel 5

## Literaturverzeichnis

Baughman, R. H., Zakhidov, A. A. & de Heer, W. A. (2002), ‘Carbon nanotubes—the route toward applications’, *Science* **297**(5582), 787–792.

**URL:** <http://science.sciencemag.org/content/297/5582/787>

Chandrasekhar, P. (2018), *Conducting Polymers, Fundamentals and Applications: Including Carbon Nanotubes and Graphene*, 2nd ed. 2018 edn, Springer.

**URL:** <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-69378-1>

Fujita, S. & Suzuki, A. (2013), *Electrical conduction in graphene and nanotubes*, Wiley-VCH, Weinheim.

o.A. (n.d.), ‘Wabenstruktur’.

**URL:** <http://www.chemieunterricht.de/dc2/kristalle/images/graphen-1.gif>

Schulze, P. D. J. (2018), ‘Mikroelektronik 2 script’. Vorlesungsscript.

Tobi (2018), ‘Vorlesungsmitschrieb’.

Weinschenk, E. (n.d.), *Sammlung gemeinverständlicher wissenschaftlicher Vorträge*, Vol. N:F: 295 Ser. 13, chapter Der Graphit, seine wichtigsten Vorkommen und seine technische Verwerthung.