
Physik 1

(PH1-B-REE1)

Michael Erhard

Thema heute

5. Atomphysik 2 (Quantenphysik)

5.1 Teilchencharakter des Lichtes

5.2 Atom-Licht-Wechselwirkung

5.3 Wellencharakter von Teilchen

5.4 Bohr'sche Atommodell

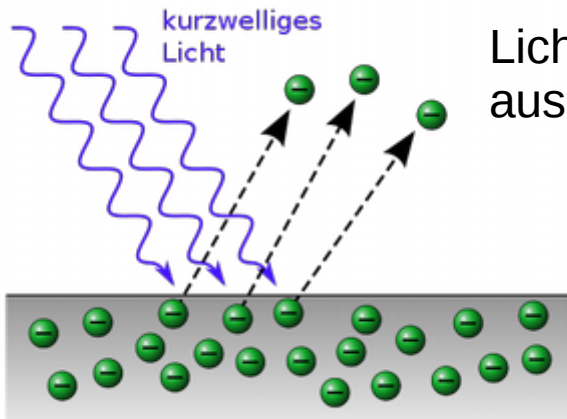
5.5 Quantenzahlen

5.6 Bändermodell für Festkörper und Halbleiter

5.7 Photoeffekt und Photoionisation

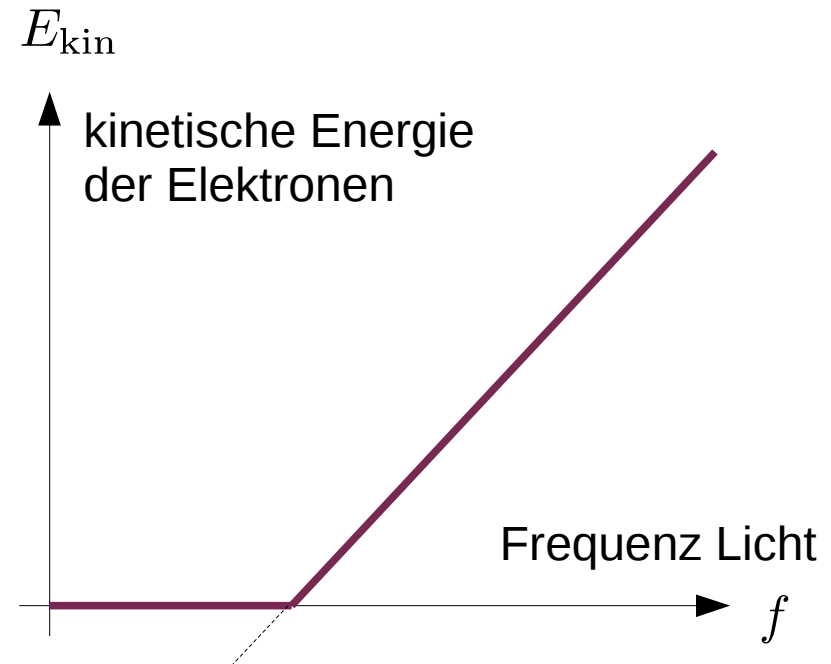
5.1 Teilchencharakter des Lichts

Äußerer Photoeffekt



Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Photoelektrischer_Effekt

Licht „löst“ Elektronen aus Metall



Ergebnis: die Energie der austretenden Elektronen hängt nur von der Frequenz (Wellenlänge) des Lichts und nicht der Strahlungsintensität ab

→ Licht gibt Energie nur in Portionen, d.h. quantisiert ab.

Nobelpreis 1921, Albert Einstein v.a. auch für Interpretation des Photoeffekts.

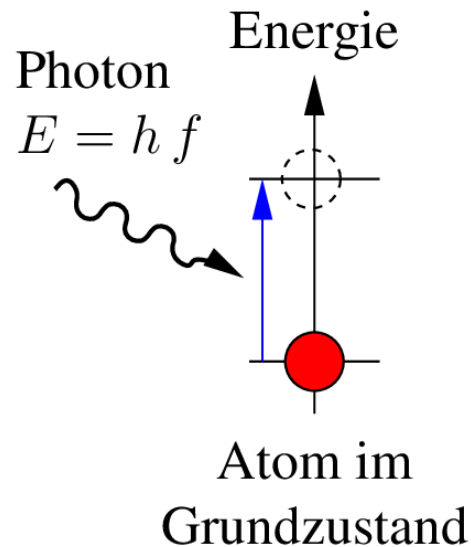
5.1 Teilchencharakter des Lichts

Für die Energie des Photons gilt

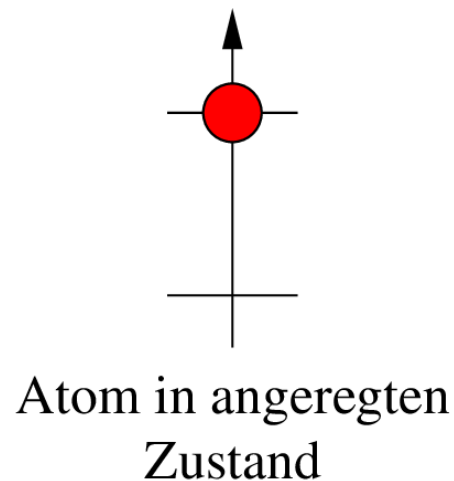
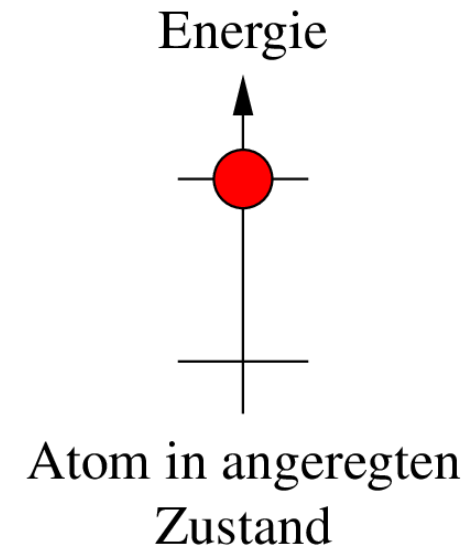
$$E = h f$$

h ... Plank'sches Wirkungsquantum, $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
 f ... Frequenz des Photons

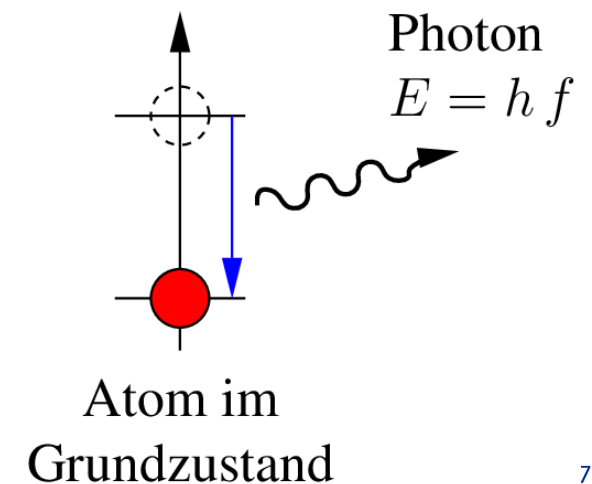
5.2 Atom-Licht-Wechselwirkung



1. Absorption



2. Emission



5.2 Atom-Licht-Wechselwirkung

Emissionsspektren von
Gasentladungslampen

Helium



Natrium



Quecksilber

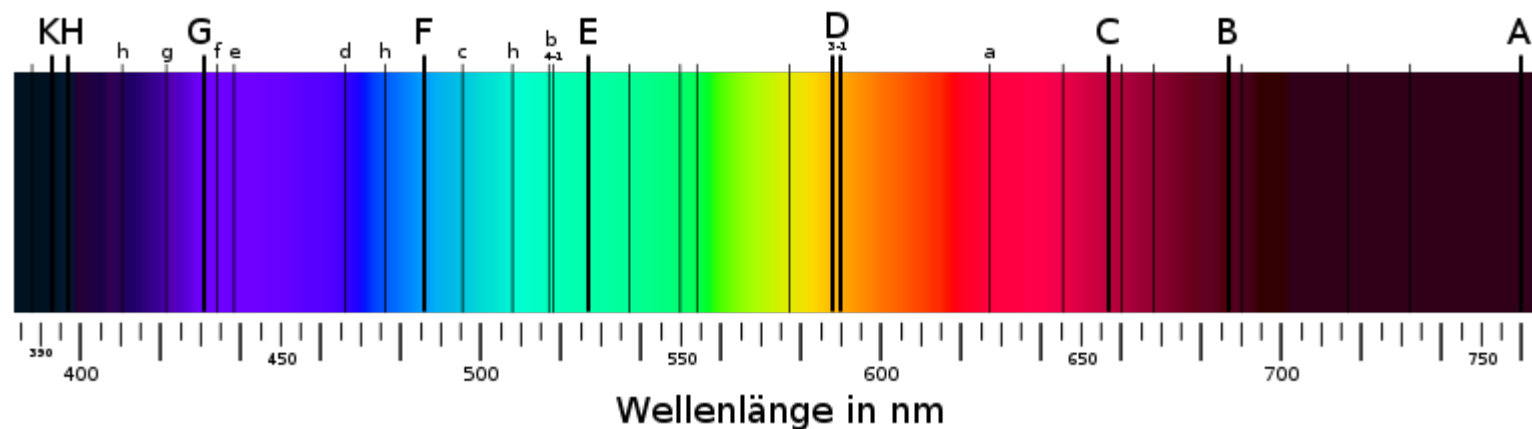


Bildquelle: http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/software/hydrogenlab/Atomphysik/08_Stunde/Spektralanalyse/Spektrallinien.htm

8

5.2 Atom-Licht-Wechselwirkung

1814 Beobachtung von Resonanzabsorptionslinien im Spektrum der Sonne durch Fraunhofer



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fraunhofer_lines_DE.svg

Singulett

Triplet



<http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/junge/mint/index.html>

5.3 Wellencharakter von Teilchen

Beugung von Elektronen an Kristallgitter und
Beobachtung von Interferenzen (vgl. Gitterbeugung)
→ Wellencharakter von Elektronen

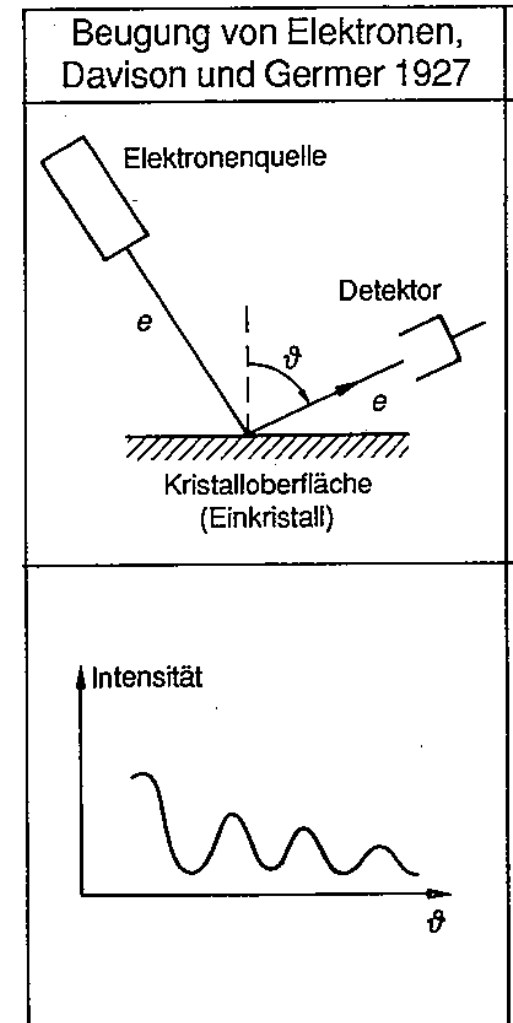
De-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$

h ... Plank'sches Wirkungsquantum

m ... Teilchenmasse

v ... Teilchengeschwindigkeit



Quelle: Hering et. al., Physik für
Ingenieure, VDI Verlag 1992

11

5.3 Zusammenfassung Quanteneffekte

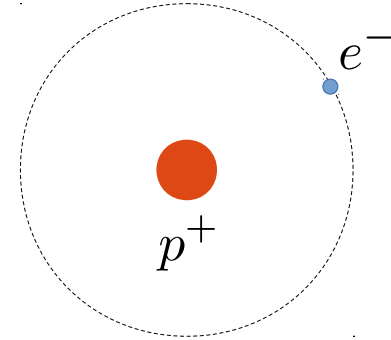
	Welle	Teilchen
Licht	<p>Beugung am Gitter</p> $\lambda = \frac{c}{f}$	<p>Photoeffekt Comptonstreuung Schwarzkörperstrahlung</p> $E_{\text{photon}} = h f$
Materie	<p>Beugung von Elektronen am Kristallgitter</p> $\lambda_{\text{DeBroglie}} = \frac{h}{m v}$	<p>Spuren in Nebelkammer</p>

5.4 Bohr'sche Atommodell

Beispiel Wasserstoff: klassisch: Elektron auf Kreisbahn

Probleme:

- „beliebige“ Energien möglich (keine Niveaus)
- Elektron strahlt ständig elektromagnetische Wellen ab



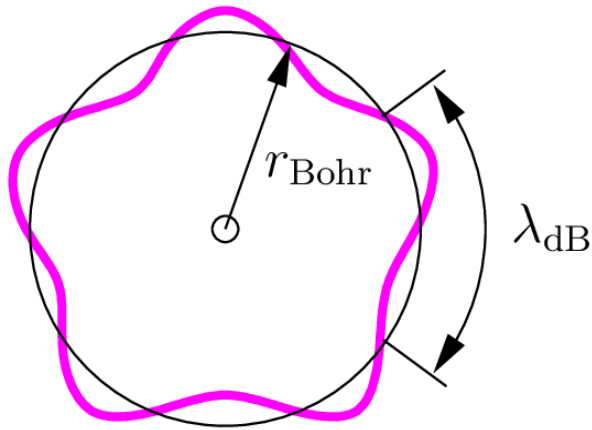
Postulate von Bohr (1913)

- 1) Elektronen können den Atomkern nur auf bestimmten Bahnen strahlungslos umlaufen. Diese sind durch Quantenbedingungen festgelegt.
- 2) Strahlung wird nur beim Übergang zwischen zwei stationären Zuständen absorbiert oder emittiert, es gilt

$$h f = E_1 - E_2$$

5.4 Bohr'sche Atommodell

1. Die Umlaufbahn ist das n -fache ($n \in \mathbb{N}$) der de-Broglie-Wellenlänge.



$$2\pi r = n\lambda_{\text{dB}} = n \frac{h}{mv}$$

m ... Masse Elektron

v ... Geschwindigkeit Elektron

2. Zentripetalkraft = Coulombkraft $F_{\text{zentripetal}} = F_{\text{coulomb}}$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

e ... Elementarladung

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

5.4 Bohr'sche Atommodell

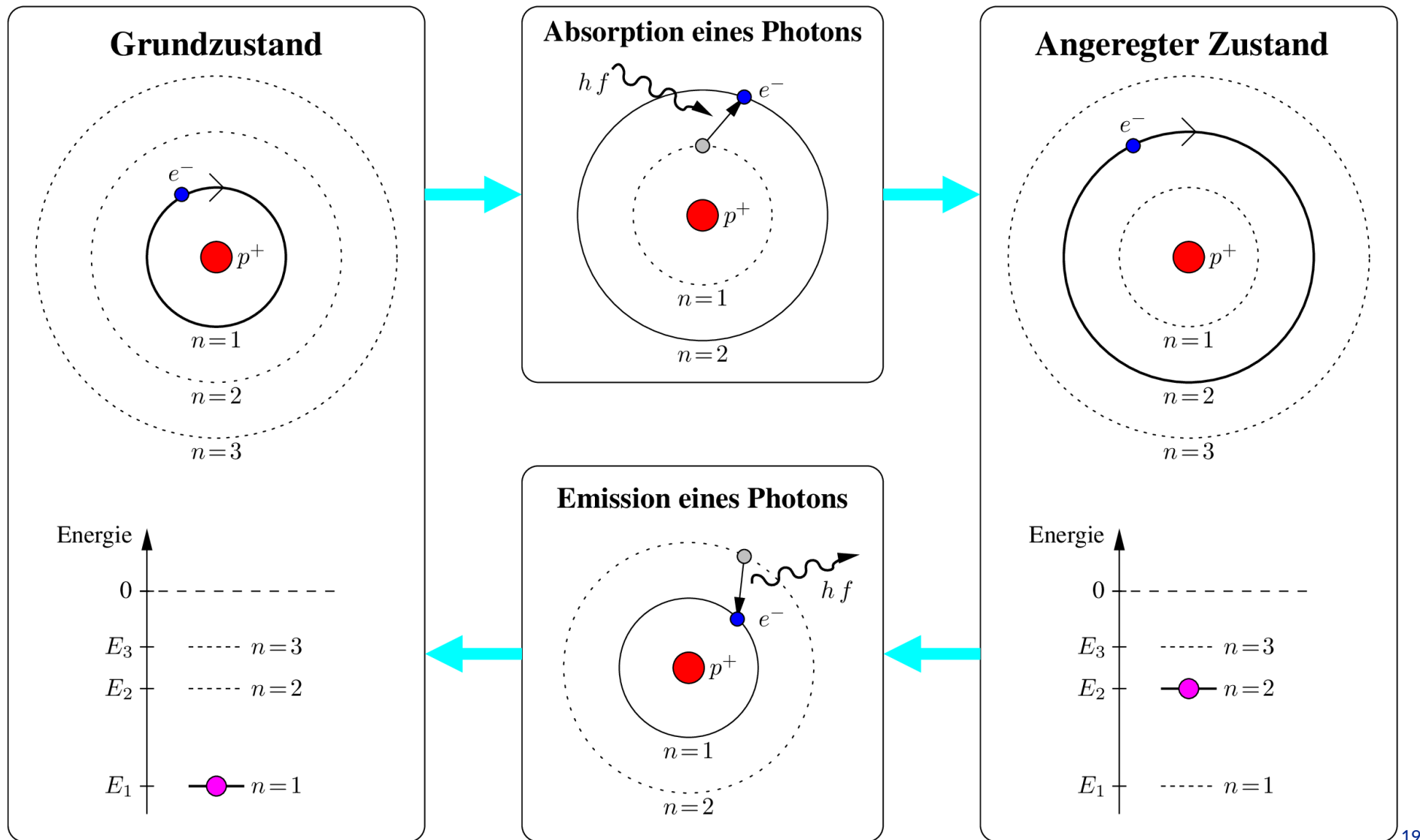
Für den Radius der Bahnen ergibt sich

$$r = \underbrace{\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{4\pi\epsilon_0}{me^2}}_{r_{\text{Bohr}}} n^2 = r_{\text{Bohr}} n^2 \quad \text{mit} \quad r_{\text{Bohr}} = 52,9 \text{ pm}$$

Damit erhalten wir

n	r_{Bohr}
1	53 pm
2	216 pm
3	417 pm

5.4 Bohr'sche Atommodell



5.4 Energien Bohrmodell

Energie des Elektron = kinetische + potentielle Energie

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot,coulomb}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Man kann nun zeigen dass gilt

$$E = E_0 \frac{1}{n^2} \quad \text{mit} \quad E_0 = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_{\text{Bohr}}} \approx -13,6 \text{ eV}$$

Und damit

n	E
1	-13,6 eV
2	-3,4 eV
3	-1,5 eV
4	-0,85 eV

5.4 Franck-Hertz-Versuch (Nobelpreis 1925)

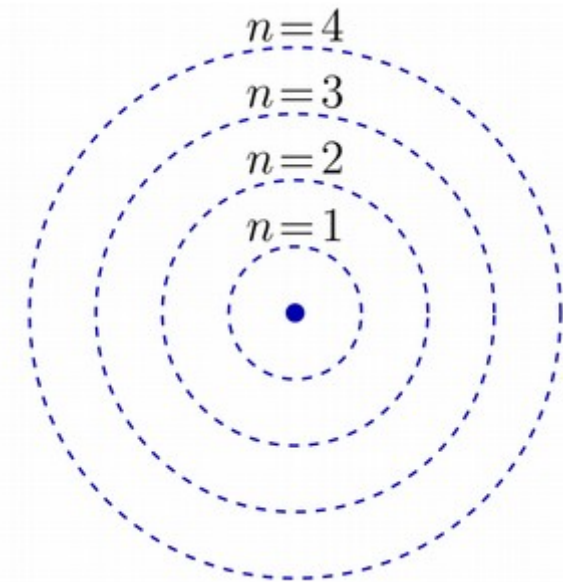
- *An Tafel erklären!*
- *Vorführen und Bestimmung der Anregungsenergie*

5.5 Quantenzahlen

- Charakterisierung des Zustandes eines Elektrons
- Jeder Zustand wird durch vier Quantenzahlen n, l, m, s beschrieben
- Jeder Zustand kann nur von einem Elektron angenommen werden (Pauli-Prinzip) → Auffüllen von Schalen bei mehreren Elektronen

5.5.1 Hauptquantenzahl

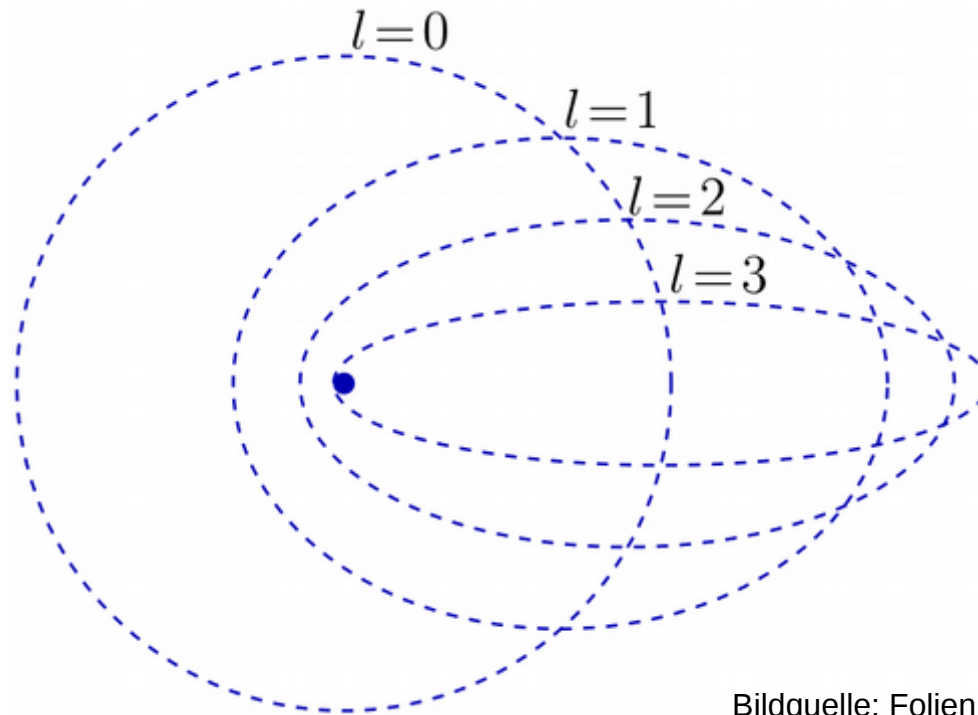
- Werte $n = 1, 2, 3, \dots$
- Zahl des Orbit um Atomkern
- Gibt „Energie der Kreisbahn“ an



5.5 Quantenzahlen

5.5.2 Nebenquantenzahl l

- Form des Orbits um den Atomkern (Exzentrizität der Ellipse)
- kann n Werte annehmen $l = 0, \dots, (n - 1)$

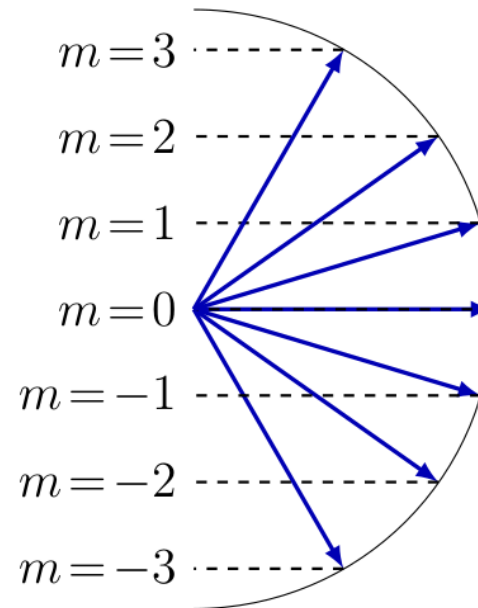
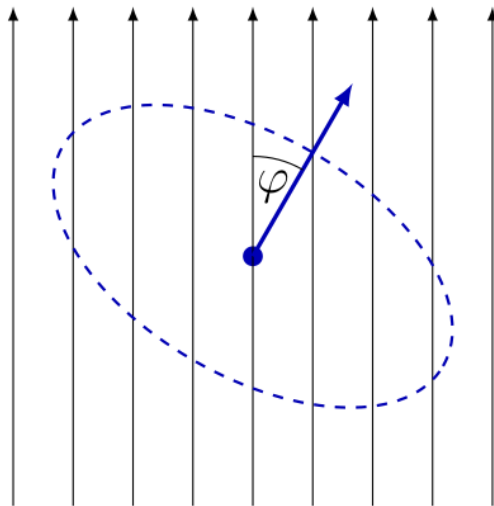


Bildquelle: Folien R. Heß

5.5 Quantenzahlen

5.5.3 Magnetische Quantenzahl m

- Räumliche Orientierung der Ellipsen
- kann $2l + 1$ Werte annehmen $m = -l, -(l - 1), \dots, 0, (l - 1), l$



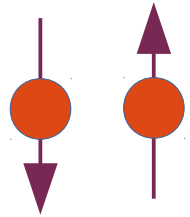
Bildquelle: Folien R. Heß

25

5.5 Quantenzahlen

5.5.4 Spinquantenzahl s

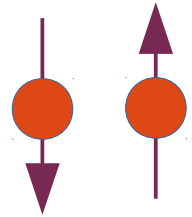
- Elektron hat Spin („Eigendrehimpuls“)
- Spin kann zwei Richtungen annehmen $s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$



5.5 Quantenzahlen

5.5.4 Spinquantenzahl s

- Elektron hat Spin („Eigendrehimpuls“)
- Spin kann zwei Richtungen annehmen $s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$



5.5.5 Anzahl der Unterzustände für Hauptquantenzahlen

n	l	m	s	Anzahl
1	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2
2	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	8
	1	-1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$	
3	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	18
	1	-1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$	
	2	-2, -1, 0, +1, +2	$\pm\frac{1}{2}$	

Vergleiche
Periodensystem
der Elemente

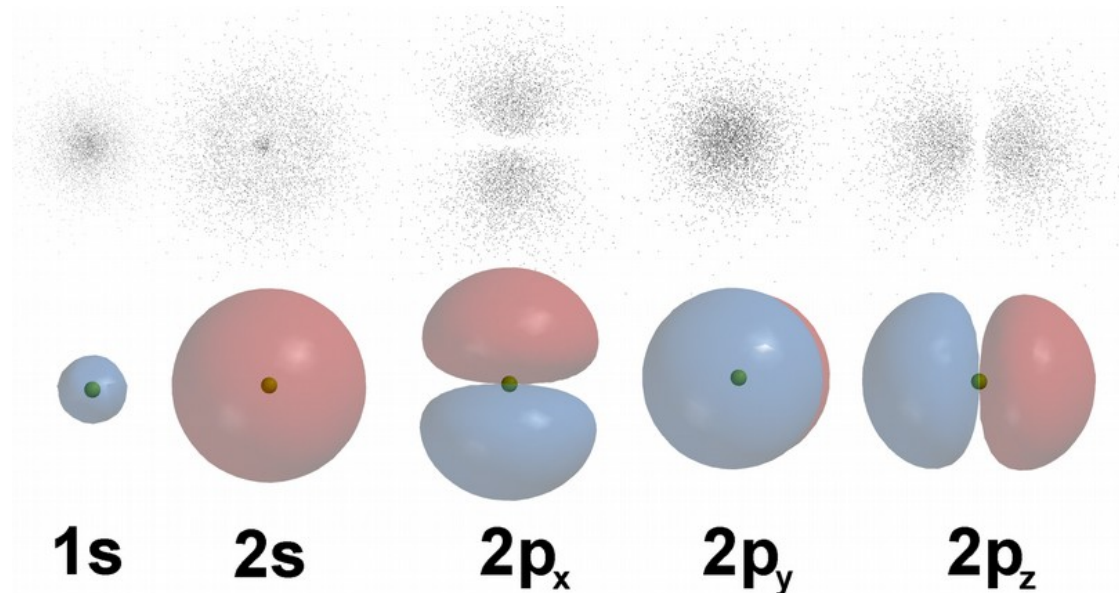
5.5 Ausblick: Quantenzahlen

Quantenmechanik: löse Schrödinger-Gleichung für *Zentralpotential*

$$\hat{H}\Psi(r, \theta, \phi) = E\Psi(r, \theta, \phi)$$

\hat{H}	...	Hamiltonoperator
$\Psi(r, \theta, \phi)$...	Wellenfunktion,
E	...	Energie

Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte $|\Psi(r, \theta, \phi)|^2$



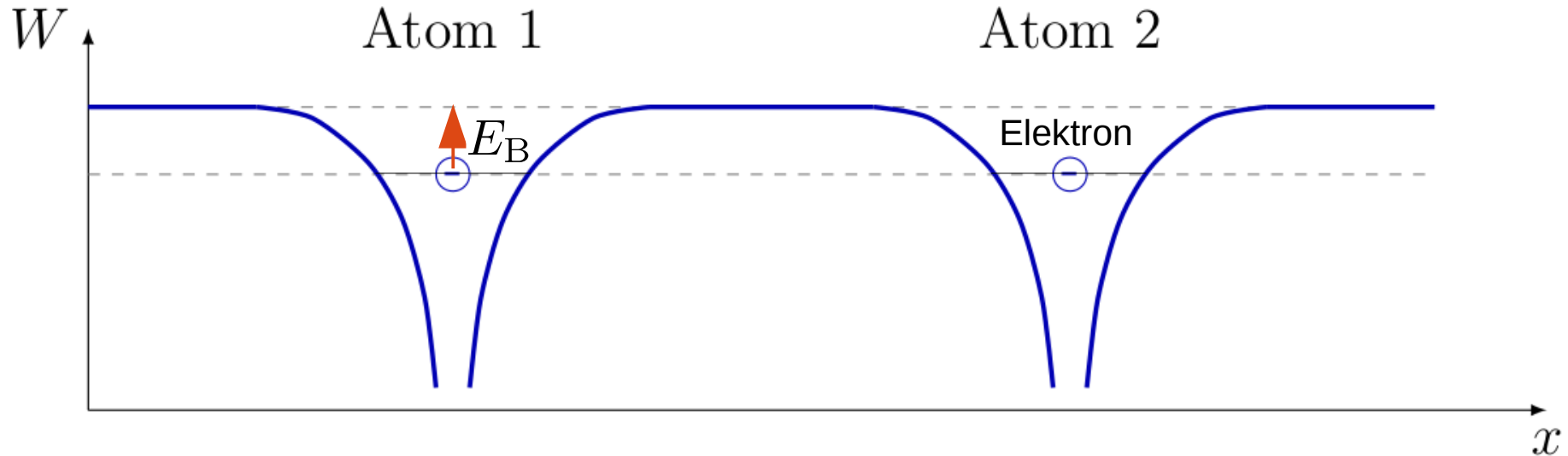
Quelle: www.wikipedia.de/wiki/Atomorbital

28

5.6 Bändermodell für Festkörper und Halbleiter

- Elektronen sind mit der Bindungsenergie E_B gebunden
- sie benötigen die Energie E_B , um das Atom zu verlassen
- Valenzelektronen eines Atoms = Elektronen der äußeren Schale

Zwei freie Atome mit je einem Valenzelektron



5.6 Bändermodell für Festkörper und Halbleiter

Überlappung der Potentiale bei Übergang von Einzelatomen zu Festkörper

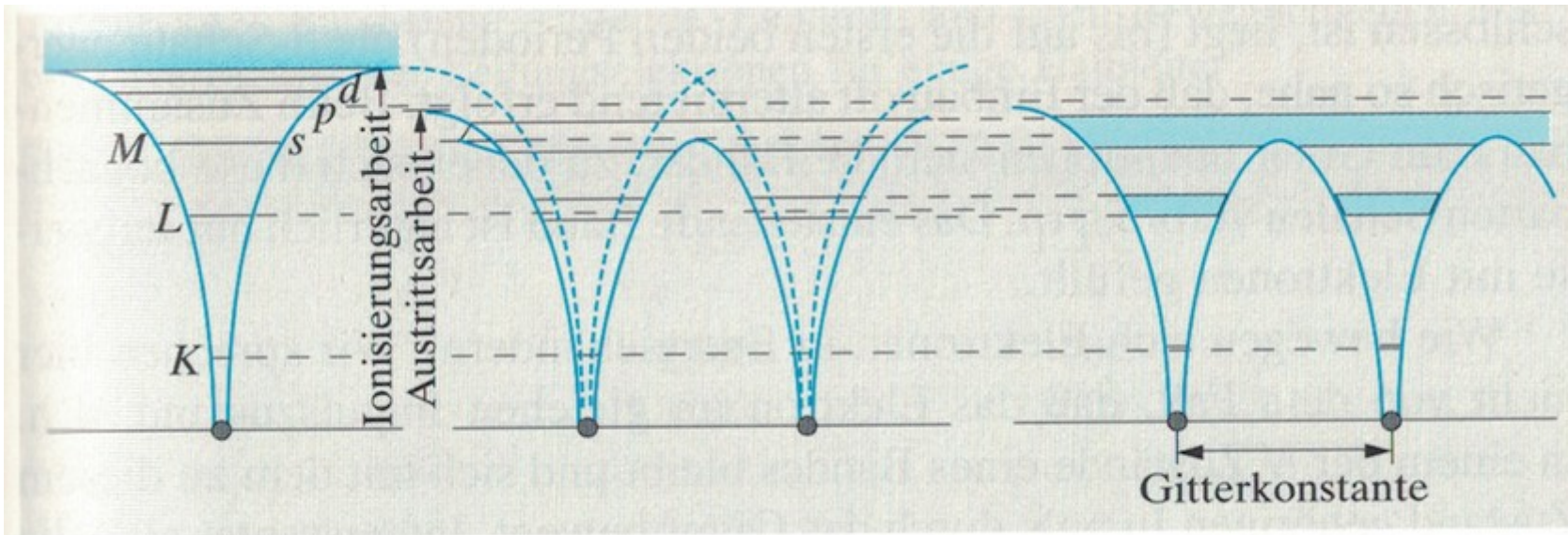
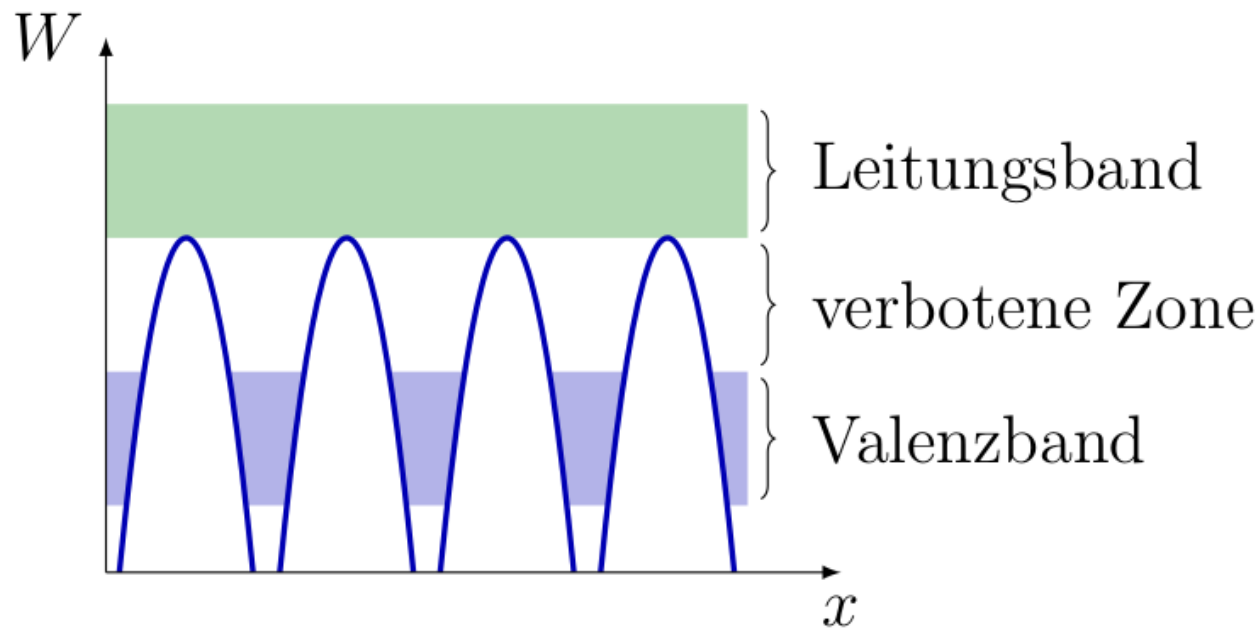


Abb. 14.51. Wenn die Einzelatome einander näherkommen, überlagern sich nicht nur ihre Potentiale zu einer Galerie von Rundbögen, sondern die ursprünglich scharfen Elektronenzustände verbreitern sich. Im *rechten Teilbild* ist rechts die Atomkette fortgesetzt zu denken, links liegt die Kristalloberfläche. Dort kann man auch die Austrittsarbeit für die Elektronen ablesen

Quelle: Gerthsen Physik, Springer, 18. Auflage 30

5.6.1 Bändermodell eines Isolators

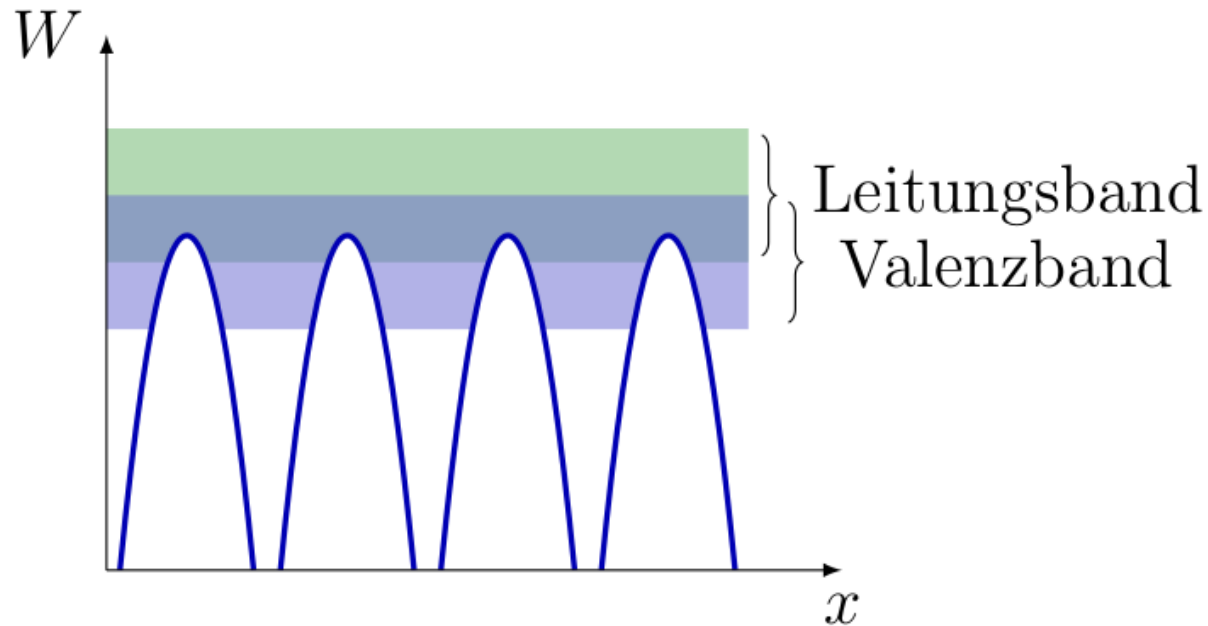
- Valenzband und Leitungsband sind getrennt
- Abstand $> 3\text{eV}$, in dieser „Lücke“ kann sich kein Elektron aufhalten



Quelle: Folien R. Heß

5.6.2 Bändermodell eines Leiters

- Valenzband und Leitungsband gehen ineinander über
- Es ist keine Energie nötig, um ein Elektron ins Leitungsband zu bewegen
- Beispiele: Aluminium, Kupfer

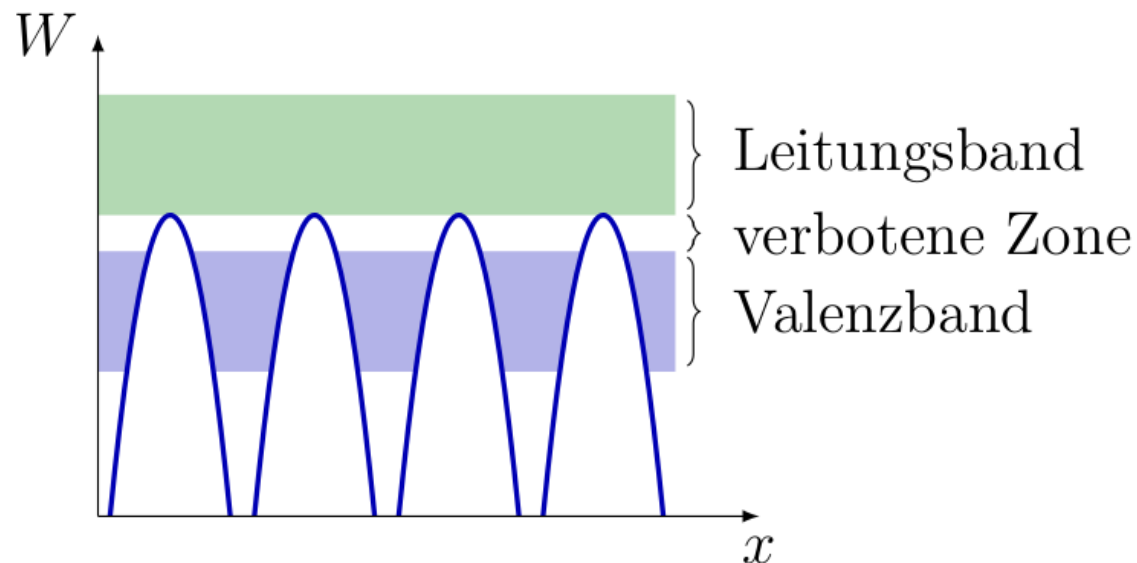


Quelle: Folien R. Heß

32

5.6.3 Bändermodell eines Halbleiters

- Valenzband und Leitungsband sind getrennt
- Abstand zwischen den Bändern gering, etwa 1eV
- Beispiele: Silizium (1,1eV Abstand), Germanium (0,66eV Abstand)
- Bandabstand kann durch Dotierung (Verunreinigung) reduziert werden



Quelle: Folien R. Heß

33

5.7.3 Ausblick: Leitungsmechanismen

Dotierte Halbleiter

	Eigenleitung	Störstellenleitung	
		n-dotiert (Elektronenleitung)	p-dotiert (Löcherleitung)
Elemente	Gruppe IV vier Valenzelektronen: C, Si, Ge, Sn	Gruppe V fünf Valenzelektronen: N, P, As, Sb (Donatoren)	Gruppe III drei Valenzelektronen: B, Al, Ga, In (Akzeptoren)
Kristallgitter			
Bändermodell			

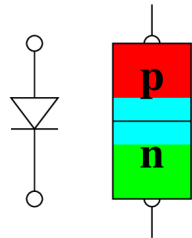
Bild 9-40. Leitungsmechanismen in Halbleitern.

Quelle: Hering, Martin, Stohrer, Physik für Ingenieure, VDI Verlag, 14. Auflage

40

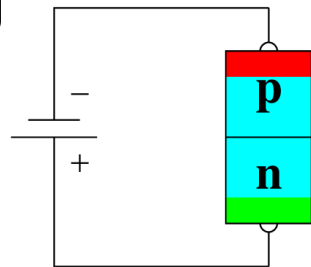
5.7.3 Ausblick: PN-Übergang

Neutral (0V)

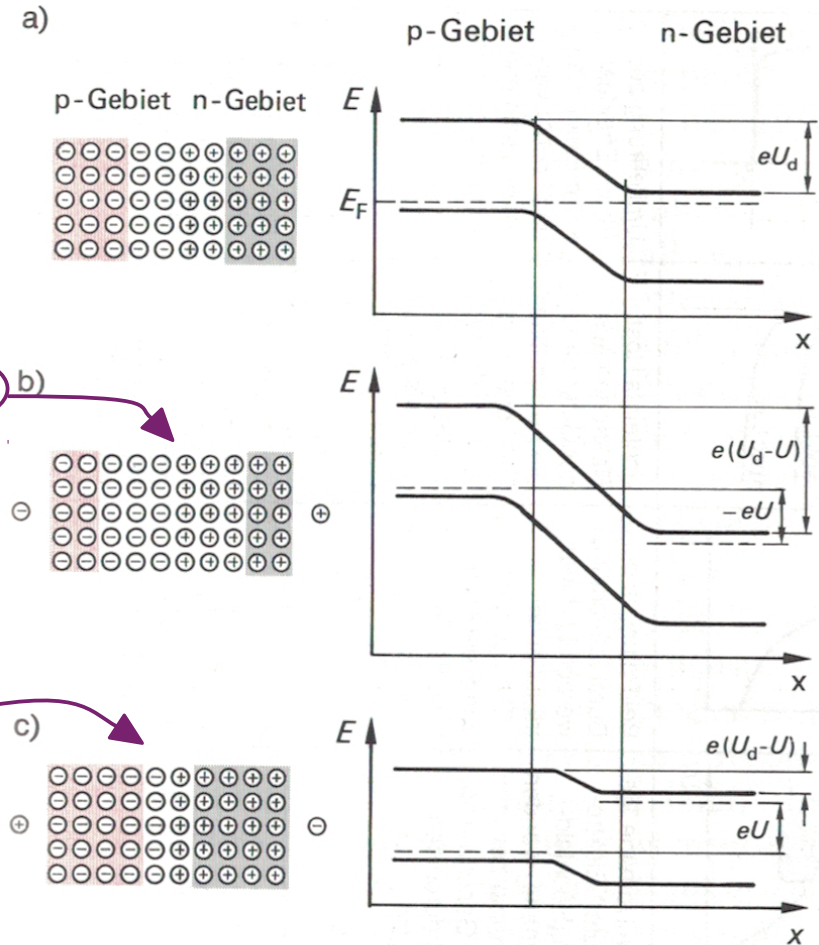


Sperr-Richtung

„nichtleitend“

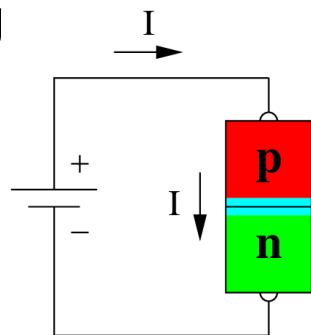


Niedrige Ladungsträgerdichte



Fluss-Richtung

„leitend“



Hohe Ladungsträgerdichte

Bild 9-45. Verteilung der Ladungsträger und Bändermodell beim pn-Übergang a) ohne äußere Spannung, b) Spannung in Sperrrichtung ($U < 0$) und c) Spannung in Flußrichtung ($U > 0$).

5.7.3 Ausblick Optoelektronik

Photodiode / Solarzelle

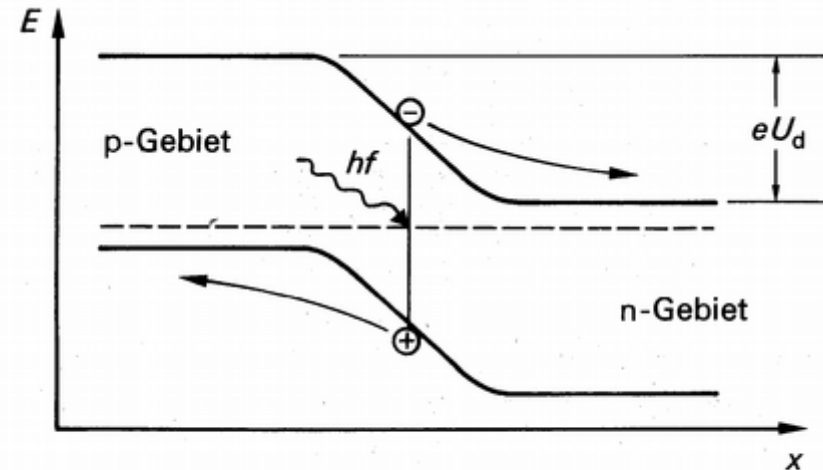
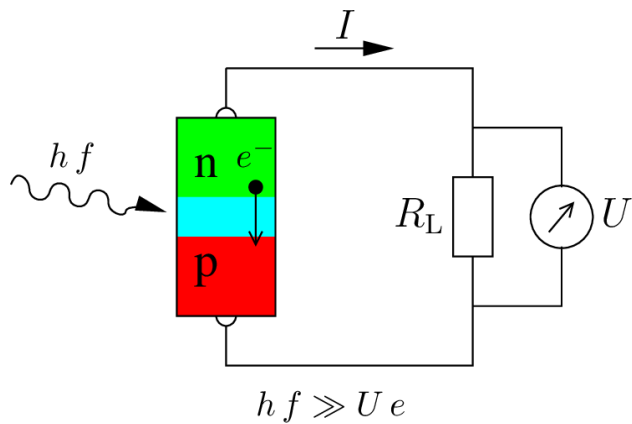


Bild 9-83. Bänderschema einer Photodiode ohne äußere Spannung.

Leuchtdiode

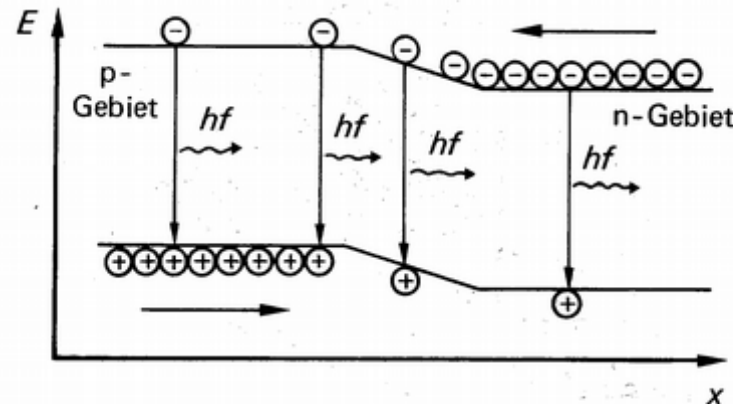
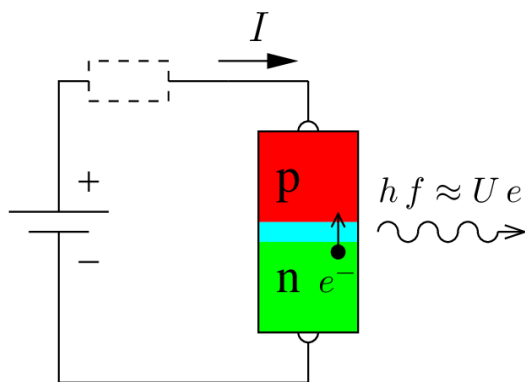


Bild 9-72. Leuchtdiode, in Flußrichtung betrieben (schematisch).