

A close-up, circular view of a microchip, showing a grid of small, colorful rectangular elements (likely transistors or memory cells) arranged in a regular pattern. The colors range from blue and green to red and yellow, creating a vibrant, pixelated effect. The chip is mounted on a dark, circular substrate.

Mikroelektronik

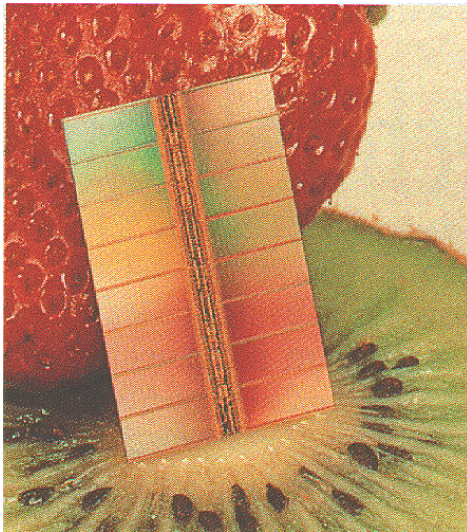
Dr.-Ing. habil. Rainer Kraus
Institut für Elektronik
Fakultät für Elektrotechnik

Universität der Bundeswehr München

Was ist Mikroelektronik?

Realisierung elektronischer Schaltungen in sehr kleinen Dimensionen:

1 Mikrometer (μm) = 10^{-6} Meter (1 Tausendstel Millimeter)



Integrierte Schaltungen

Theoretischer Entwurf:

System

Logik

Praktische Realisierung:

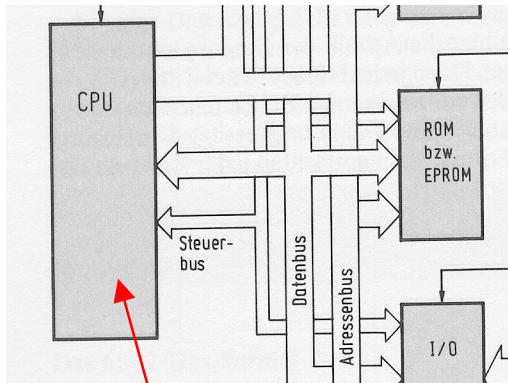
Schaltungen

Bauelemente

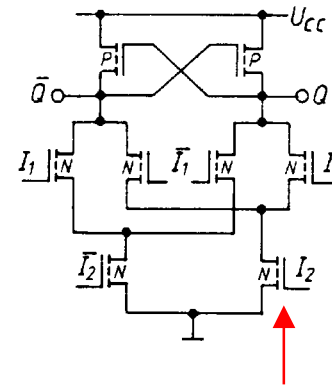
Halbleiter

Entwurfs- / Realisierungsebenen

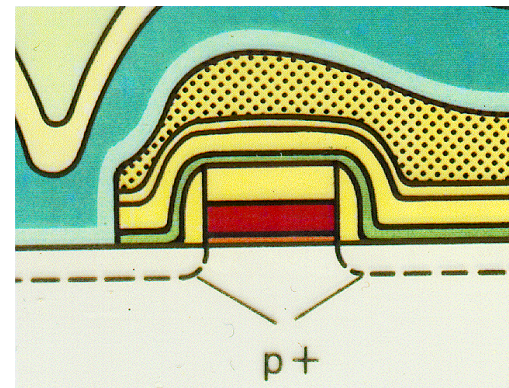
System



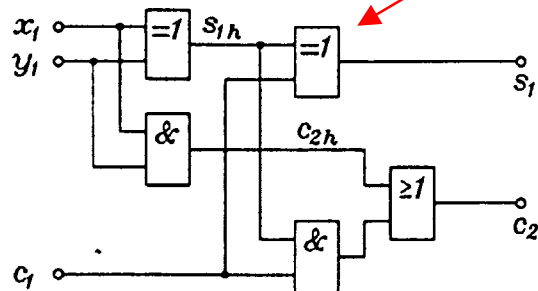
Schaltungen



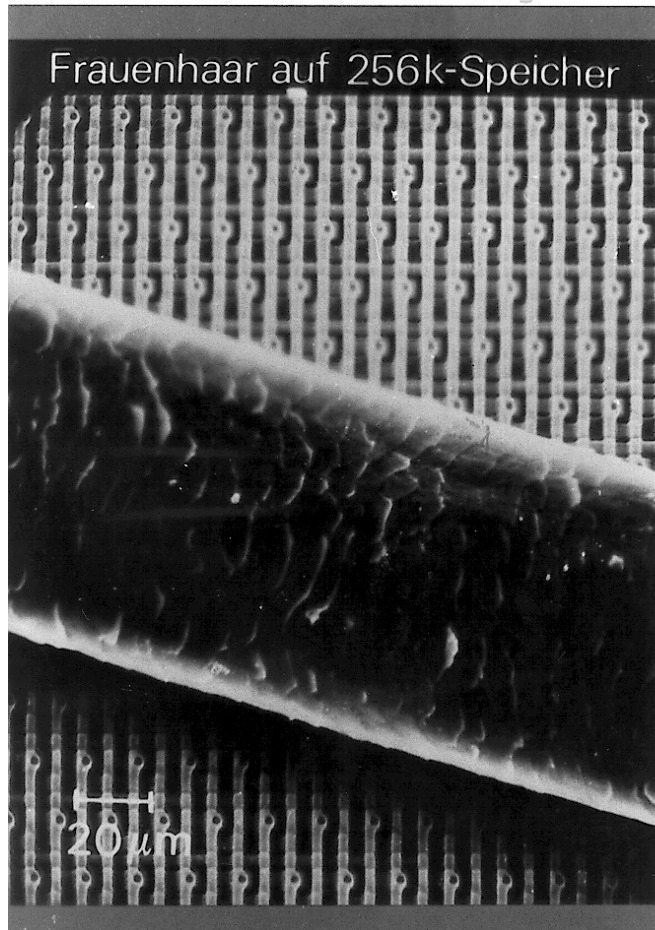
Bauelemente



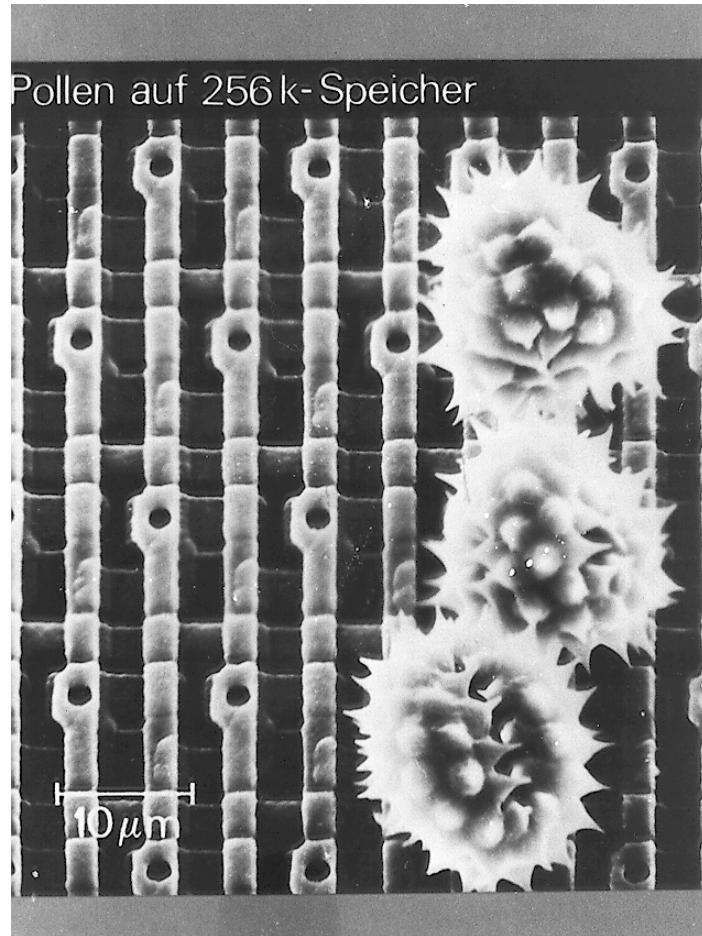
Logik



Strukturgrößen



Mikroelektronik



Rainer Kraus

Inhalt

1. Einführung

Ziele der Vorlesung

Geschichte des Transistors und integrierter Schaltungen

2. Halbleiter

Halbleiter-Materialien

Elektronen und Löcher

Energieniveaus im Halbleiter

Generation und Rekombination

Dotierung

Elektronen- und Löcherdichten bei thermodynamischem

Gleichgewicht / Nichtgleichgewicht

Diffusion, Drift, Kontinuitätsgleichung

Inhalt

3. pn – Übergang

Diffusionsspannung, Raumladungszone

Diode:

Durchlaßbereich, Sperrwirkung

Diodengleichung, Kennlinie

Schaltverhalten, Diffusionskapazität, Sperrschichtkapazität

Temperaturabhängigkeit

Bipolartransistor

4. MOSFET

MOS-Struktur:

Akkumulation, Verarmung, Inversion

Einsatzspannung

Transistor:

Kanal zwischen Source und Drain

Transistorgleichung, Kennlinien, Widerstandsbereich, Sättigung

Temperaturabhängigkeit

Inhalt

5. Digitalschaltungen

Inverter: MOSFET mit Widerstand

CMOS-Inverter: Übertragungsfunktion, Schaltverhalten, Leistungsverbrauch

Logik-Gatter (NOR, NAND, XOR), Flip-Flop

6. Halbleiter-Speicher

Speichertypen und deren Speicherzellen:

SRAM, DRAM, PROM, EPROM, EEPROM

Aufbau, Adressierung, Dekodierung, Datenpfad, I/O, Lesen, Schreiben

7. Analogschaltungen

MOSFET und Widerstand als Verstärker

Kleinsignalverhalten des MOSFETs

Differenzverstärker

Inhalt

8. Technologie (Herstellung von ICs)

Herstellung von einkristallinem Silizium

Epitaxie, Poly-Silizium

Diffusion, Implantation

Oxidation

Metallisierung, Kontakte

Lithographie (Masken, Belichten)

Ätzen

9. CAD (Schaltungs- und Bauelemente- Entwurf)

System-, Logik-, Schaltungs-, Device-, Prozeßsimulation

Layout, Testen

10. Ausblick

Zukünftige Entwicklungen, Grenzen der Technologie

Nanoelektronik

Praktikum

Messungen

- Dioden
- MOS – Transistoren
- CMOS – Gatter

Schaltungssimulationen

- Einführung in PSpice
- CMOS – Inverter
- CMOS – Gatter
- Hierarchisches Design
- Verstärker

Layout für Integrierte Schaltungen

- CMOS – Gatter

Geschichte des Transistors

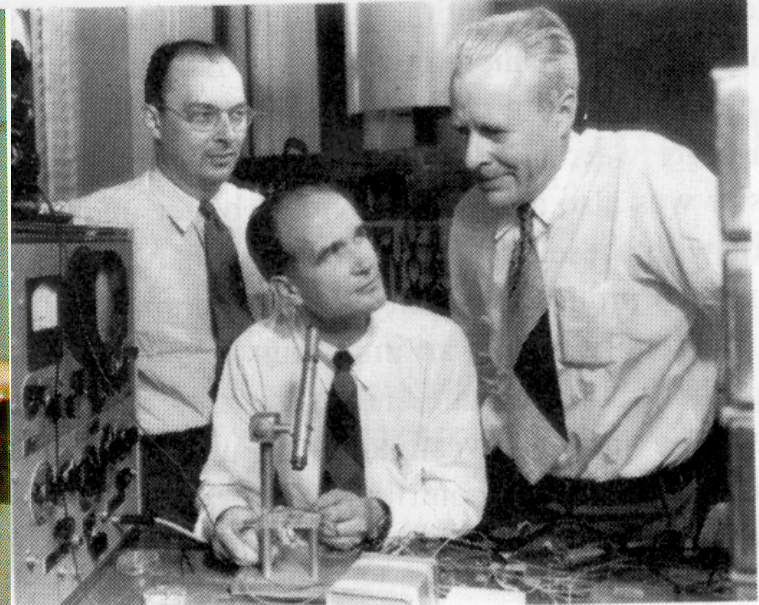
1874 Ferdinand Braun entdeckt Gleichrichterwirkung eines Punktkontaktes von Metall auf Halbleiter (Diode)

1926 Konzept eines Feldeffekttransistors (FET) von Lilienfeld erfunden und patentiert

Der erste FET entsteht aber erst Ende der 50'er Jahre, allgemeine Nutzung 15 Jahre später (Materialprobleme)

1947 Erster Transistor (Bipolar) in den Bell Laboratorien (New Jersey) von Bardeen und Brattain erfunden

Der erste Transistor



Bardeen Shockley Brattain

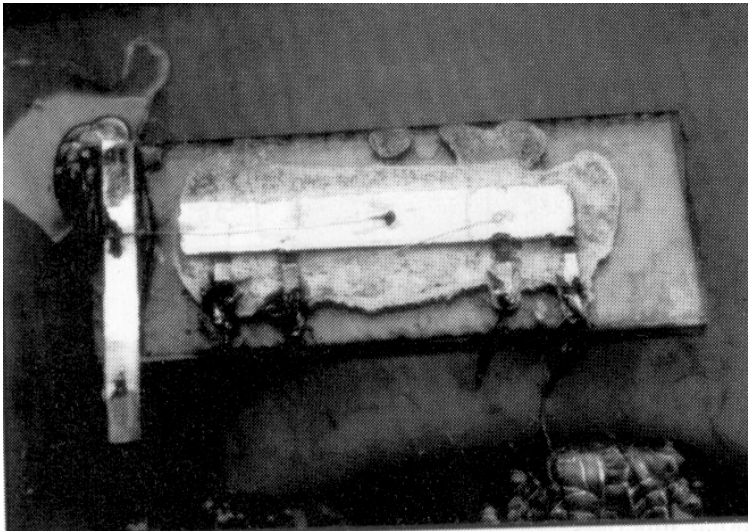
Bardeen, Brattain: Erfinder des Transistors

Shockley: Theorie des Bipolartransistors

1956 Nobel-Preis

Erste Integrierte Schaltungen

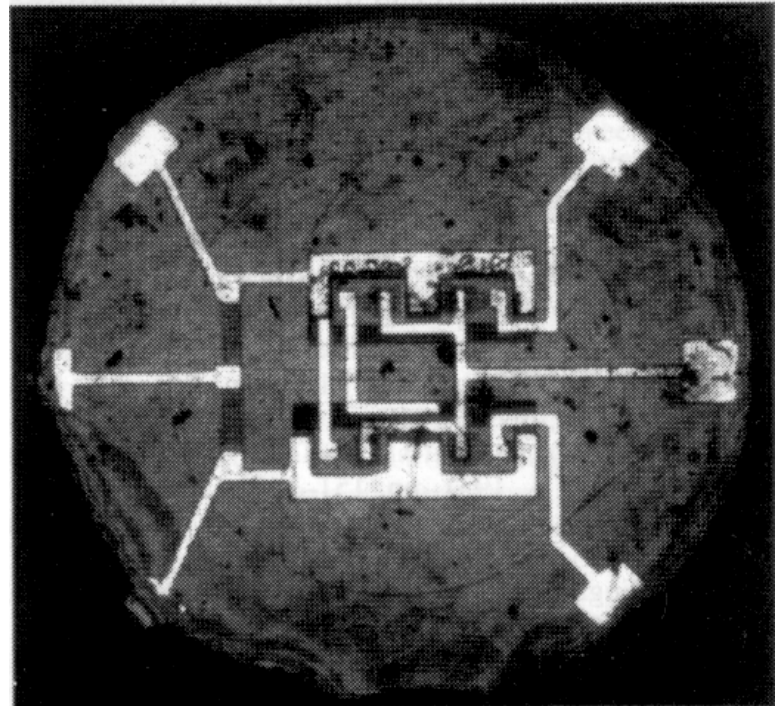
Ende 50'er Jahre
Texas Instruments



Transistor, Widerstand,
Kapazität

Mikroelektronik

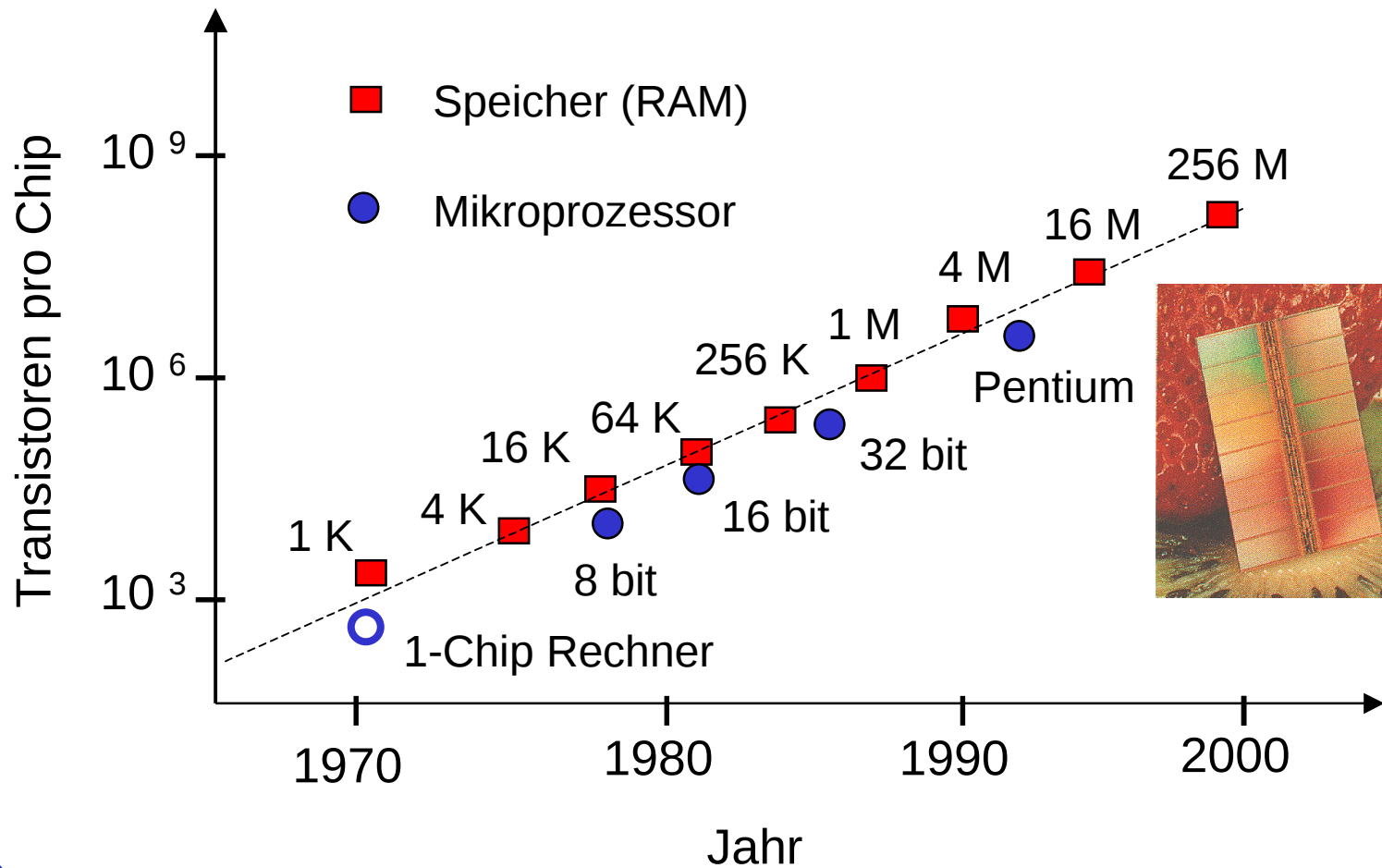
1961 Fairchild RTL IC



Hergestellt mit Photomasken, Oxidation,
Diffusion von Dotierstoffen

Rainer Kraus

Entwicklung der Integration



Halbleiter

Leiter (Metalle):

Elektronen im Material frei beweglich (ungebunden)

Nichtleiter (Isolatoren):

Elektronen fest an Atome gebunden, unter Normalbedingungen keine freie Bewegung im Material möglich

Halbleiter:

Bewegungsmöglichkeit der Elektronen variabel
(bei $T=0$ nichtleitend),
Leitfähigkeit gezielt beeinflussbar (Dotierung) und steuerbar

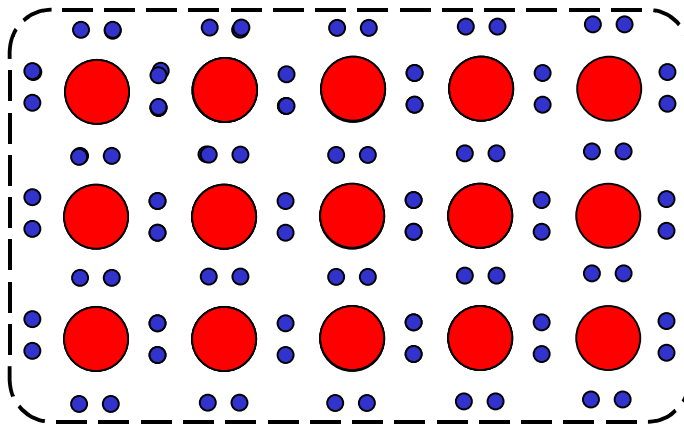
Halbleiter - Kristall

4-wertige Elemente (Gruppe IV : C, Si, Ge, Sn, Pb)

4 Elektronen in äußerer Schale (Valenzelektronen)

Kristalle: 1 Atom hat 4 Nachbaratome,

2 Elektronen gemeinsam mit jedem Nachbarn
(Valenzbindung)



Atomkern + Elektronen
der inneren Schalen

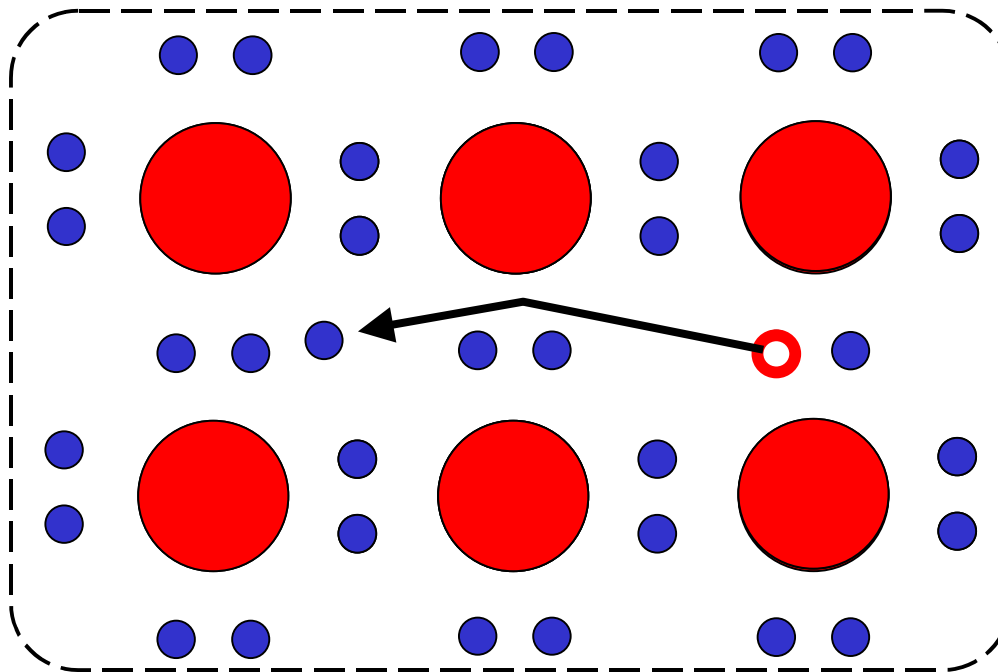


Valenzelektron

Leitungselektronen und Löcher

Aus Bindung gelöstes Elektron (thermische Energie, Gitterschwingungen):
frei im Kristall bewegliches Leitungselektron

Zurückbleibende Bindungslücke: Loch



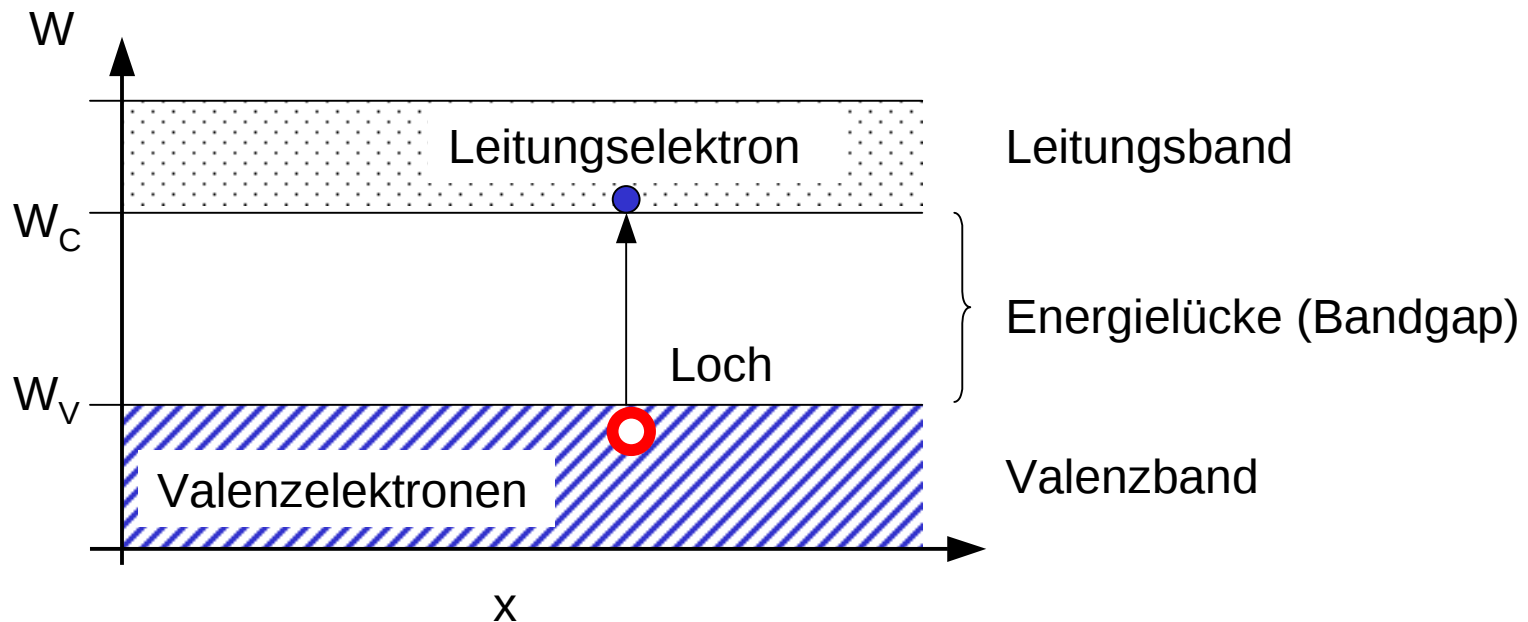
○ Loch
(Bindungslücke)

Positive Ladung des
ionisierten Atoms wird
Loch zugeordnet

Energiebänder

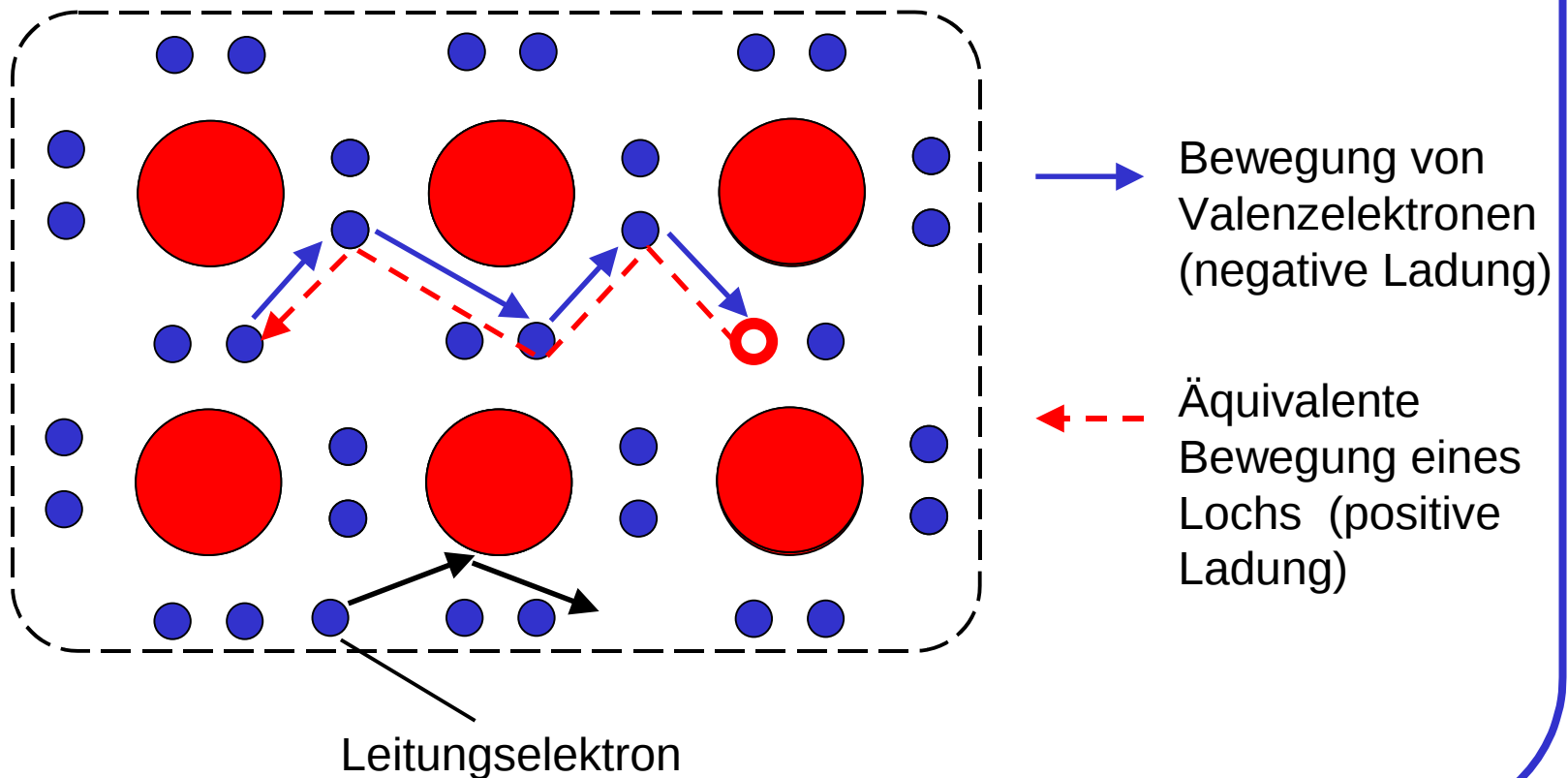
Freie und gebundene Elektronen auf unterschiedlichen Energieniveaus, dazwischen Energielücke (Mindestenergie zum Lösen einer Bindung)

Quantenphysik: Energiebänder des Halbleiters



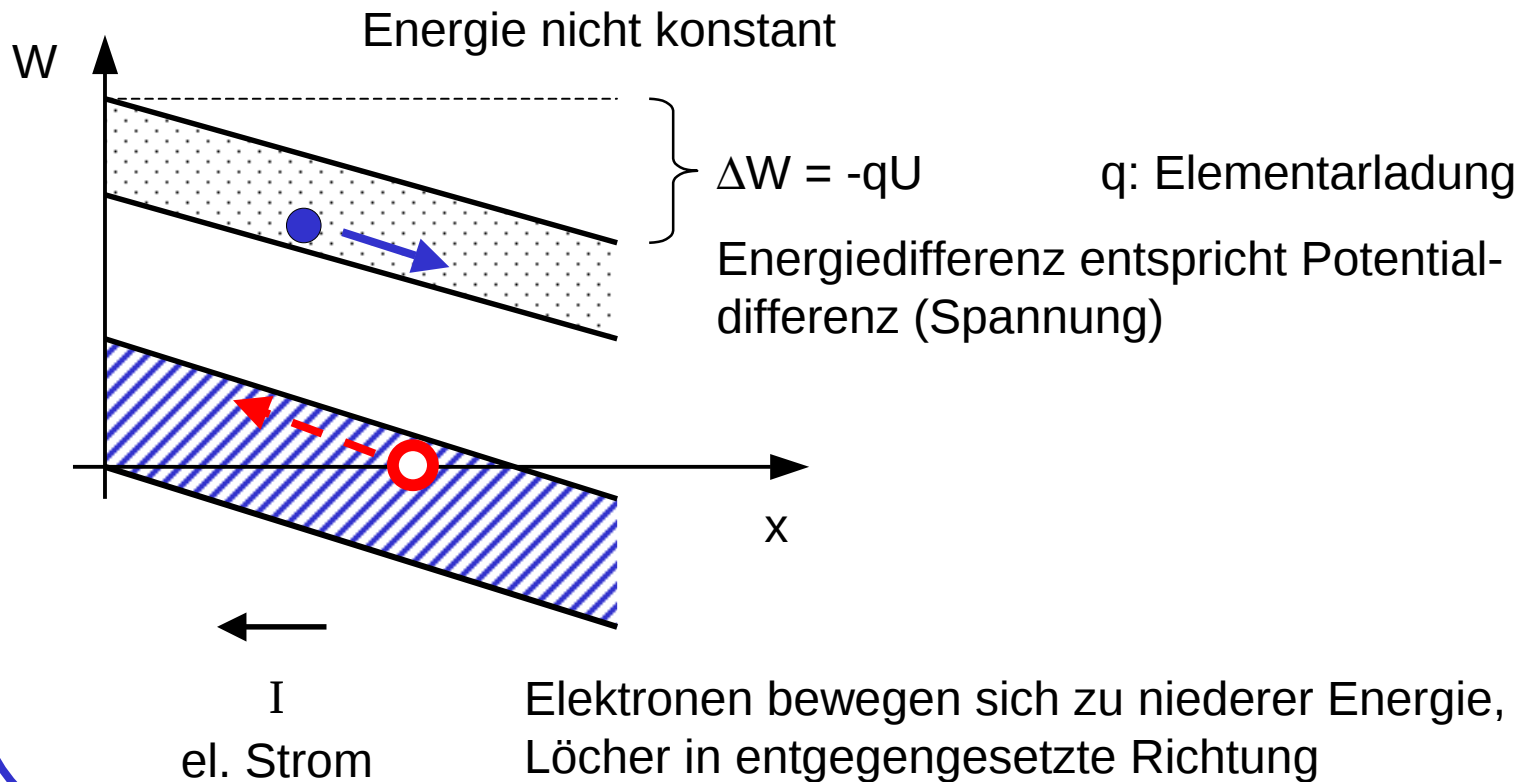
Löcherbewegung

Valenzelektronen können sich zu einem freien Bindungsplatz bewegen, dies ergibt Wandern eines Lochs



Leitfähigkeit

Leitfähigkeit des Kristalls entsteht durch Leitungselektronen und Löcher



Energiebänder und Leitfähigkeit

Leiter:

keine Lücke zwischen Leitungs- und Valenzband
oder: Valenzband nicht voll mit Elektronen besetzt

Halbleiter:

Energielücke durch thermische Energie überwindbar

Nichtleiter:

Valenzband voll und Lücke zwischen Leitungs- und Valenzband sehr groß (thermische Energie nicht ausreichend)

Halbleiter - Materialien

Elemente der Gruppe IV (4 Elektronen in äußerer Schale):

C, Si, Ge

Kombination von Elementen verschiedener Gruppen
(Compound Semiconductor):

III und V (3 bzw. 5 Elektronen in äußerer Schale)

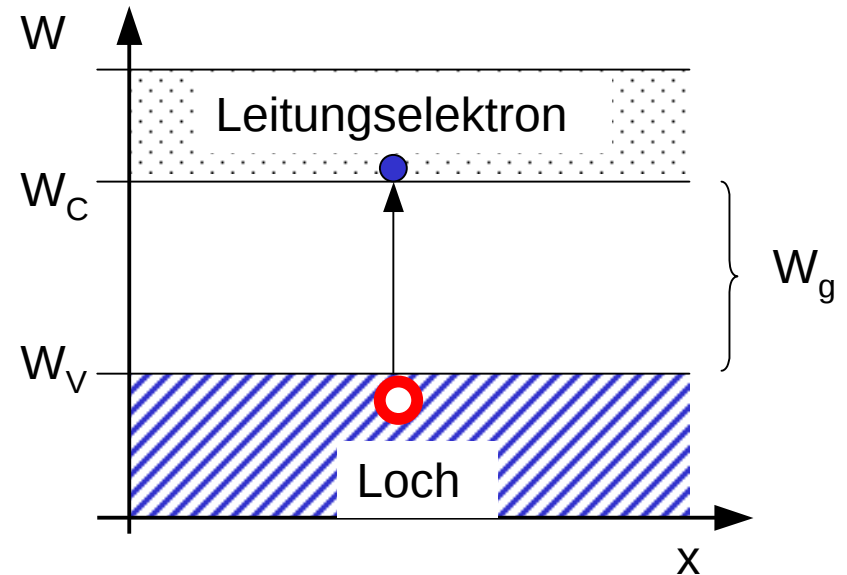
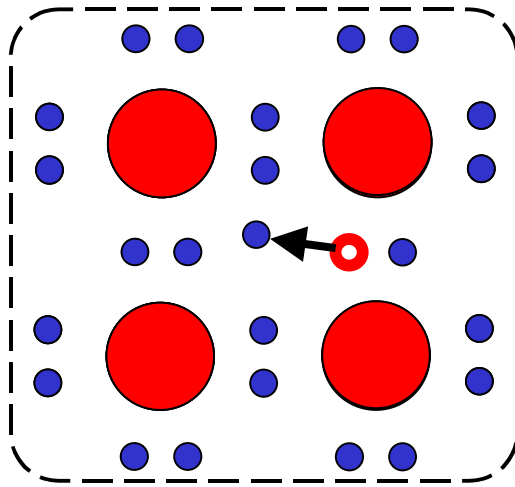
Beispiel: Gallium-Arsenid (GaAs)

II und VI etc.

Bindung über je 2 Valenzelektronen mit 4 Nachbarn (wie bei Gruppe IV)

Generation

Erzeugen eines (Leitungs-) Elektron - Loch - Paares



Zufuhr der erforderlichen Energie:

thermische Generation: therm. Schwingungen des Kristallgitters

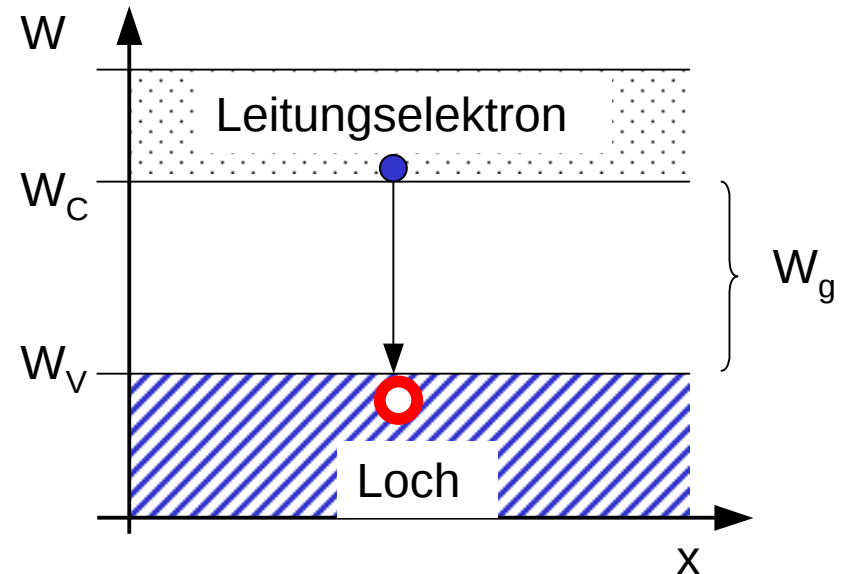
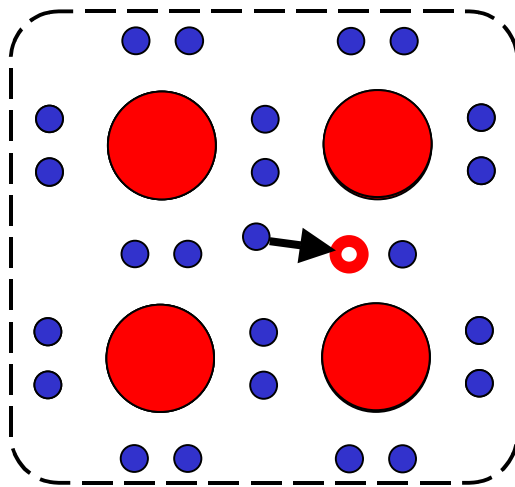
optische Anregung: Absorption eines Lichtquants (Photons),
Photodiode, Solarzelle

Stoßionisation: Leitungselektron mit hoher Energie stößt mit
Valenzelektron und reißt es aus Bindung

Rekombination

Verschwinden eines (Leitungs-) Elektron - Loch - Paares

freies Elektron wird wieder gebunden



Abgabe der Energie (Differenz zwischen Leitungs- und Valenzband)

z.B. Erzeugen eines Photons (Leuchtdiode)

Intrinsicdichte

Thermodynamisches Gleichgewicht:

Temperatur konstant im Halbleiter, nur thermische Generation:

Generationsrate = Rekombinationsrate

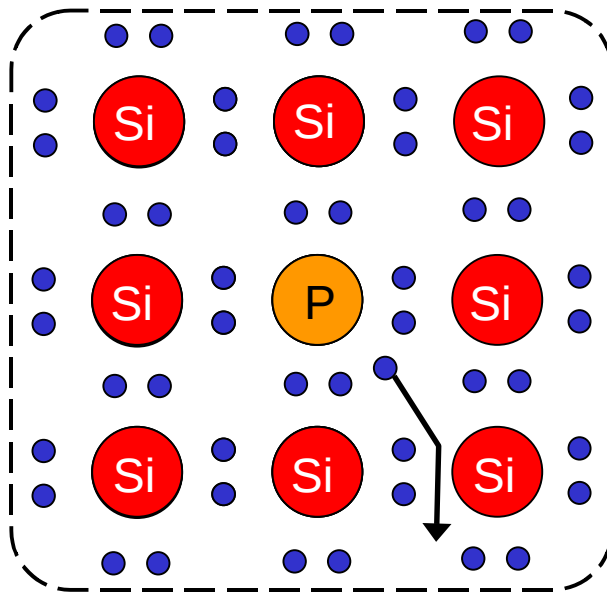
Reiner (intrinsischer) Halbleiter:

Dichte der Leitungselektronen = Dichte der Löcher = Intrinsicdichte n_i

$$n_o = p_o = n_i = C \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right) \quad C : \text{materialabhängige Konstante}$$

Dotierte Halbleiter

Dotierung: Einbau von bestimmten Fremdatomen in Kristallgitter,
z.B. 5-wertiges Element (Phosphor) in Siliziumkristall:



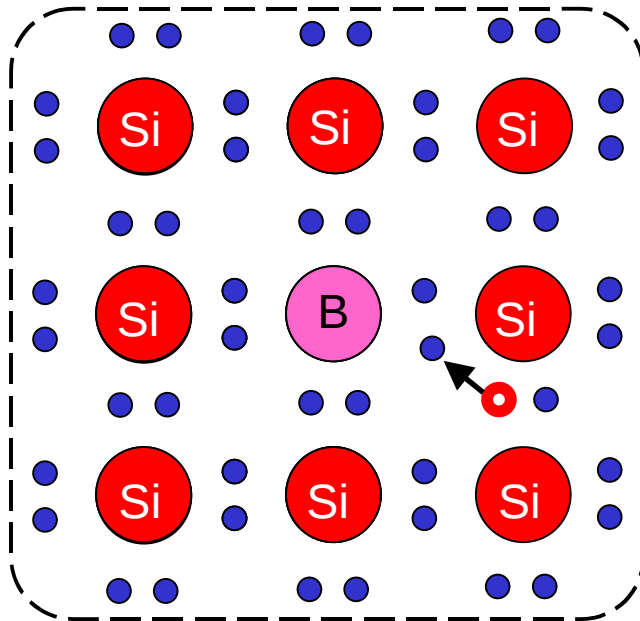
5. Elektron des Phosphoratoms
wird nicht für Bindung mit Si-
Nachbarn benötigt, löst sich leicht
von Atom und bewegt sich frei im
Kristall

Dotierung mit 5-wertigen
Elementen : zusätzliche Leitungs-
elektronen

Donatoren : Dotierelemente, die
Elektronen abgeben

Dotierung mit Akzeptoren

Einbau von 3-wertigem Element (Bor) in Silizium-Kristall:

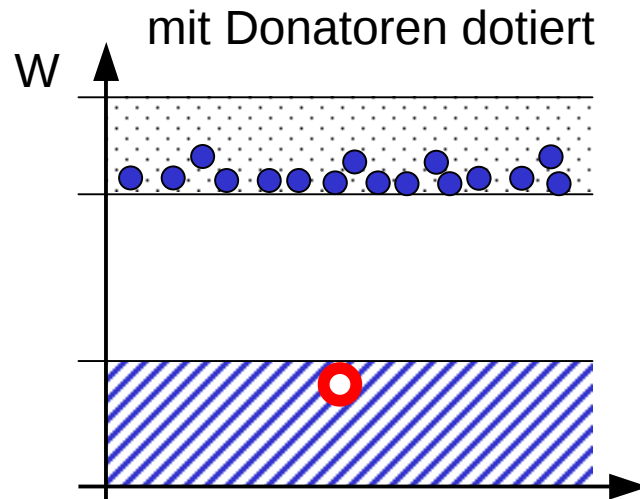


Bor fehlt ein Elektron für vollständige Bindung mit Si-Nachbarn, Bindungslücke kann durch Elektron eines Nachbarn gefüllt werden

Dotierung mit 3-wertigen Elementen : zusätzliche Löcher

Akzeptoren : Dotierelemente, die Elektronen aufnehmen

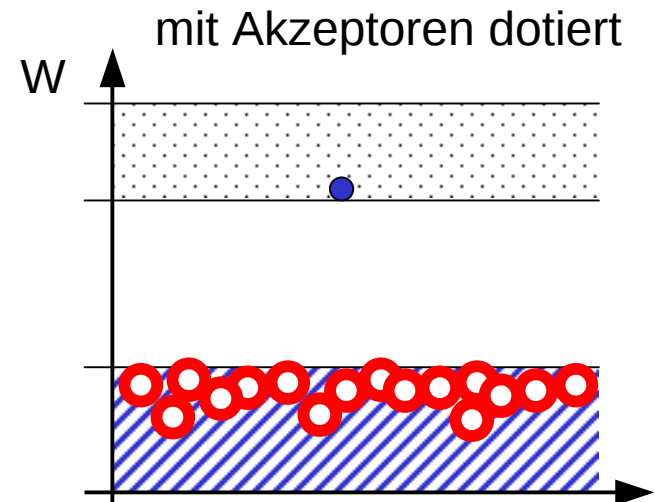
Elektronen / Löcher im dotierten Halbleiter



Zunahme der Leitungselektronen
Abnahme der Löcher

Thermodynamisches
Gleichgewicht:

$$p_o n_o = n_i^2$$



Zunahme der Löcher
Abnahme der Leitungselektronen

n- / p- Halbleiter

n - Halbleiter :

Dotierung mit Donatoren der Konzentration N_D

$$n_o = N_D \quad p_o = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Majoritäts-träger

Minoritäts-träger

p - Halbleiter :

Dotierung mit Akzeptoren der Konzentration N_A

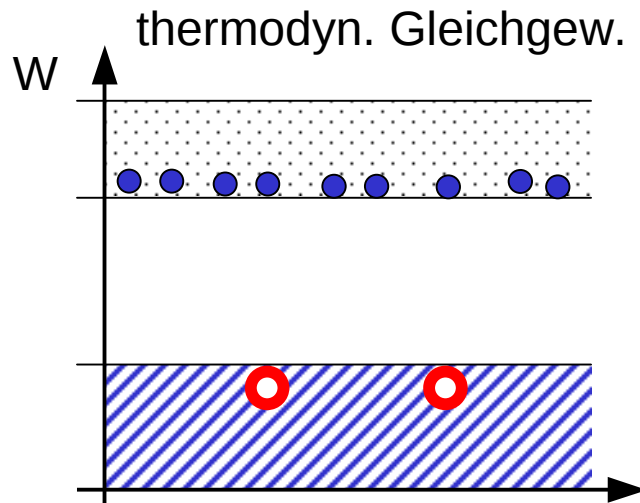
$$p_o = N_A \quad n_o = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Majoritäts-träger

Minoritäts-träger

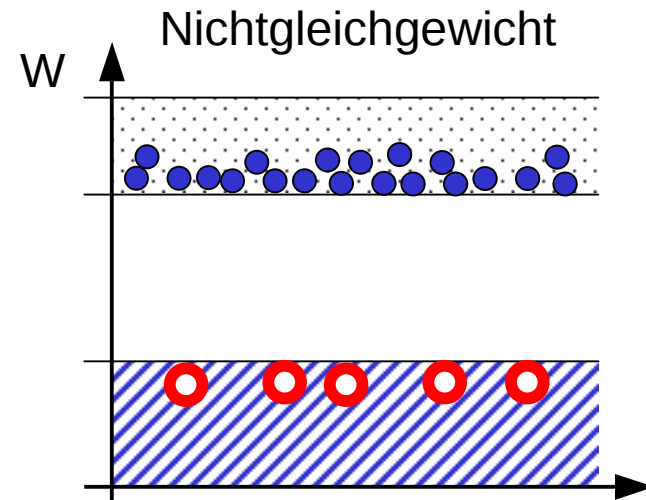
Gleichungen gelten, wenn alle Dotieratome ionisiert sind (alle Donatoren ein Elektron abgegeben - alle Akzeptoren ein Elektron aufgenommen haben), solange Dotierung nicht extrem hoch, ist dies bei Raumtemperatur der Fall

Halbleiter im Nichtgleichgewicht



$$p_o n_o = n_i^2$$

bleibt Halbleiter im Nichtgleichgewicht neutral, gilt:



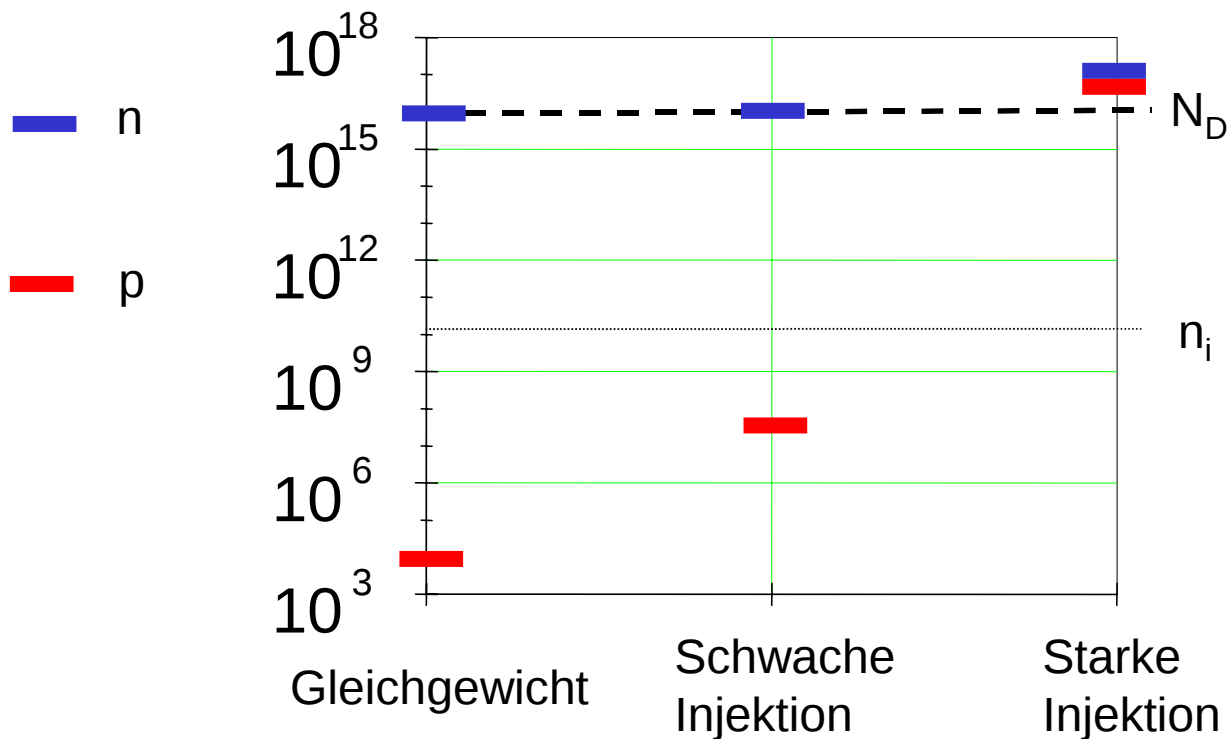
$$p n \neq n_i^2$$

$$n - n_o = p - p_o$$

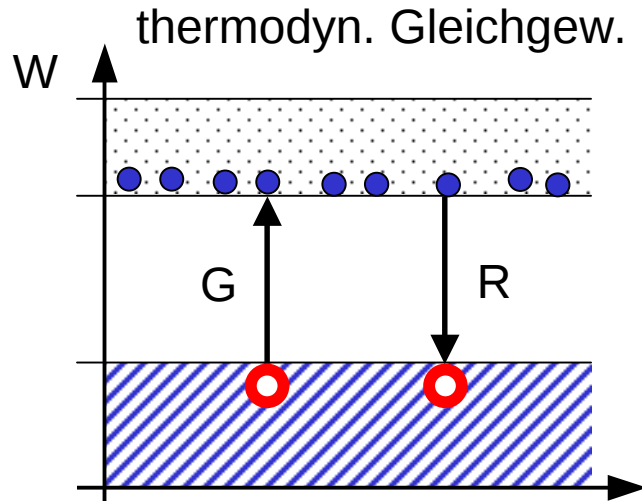
Schwache / Starke Injektion

Erhöhung der Ladungsträgerdichten (Leitungselektronen- und Löcherdichten) durch (nicht-thermische) Generation oder **Injektion**

$$\text{Neutralität: } n - n_o = p - p_o$$

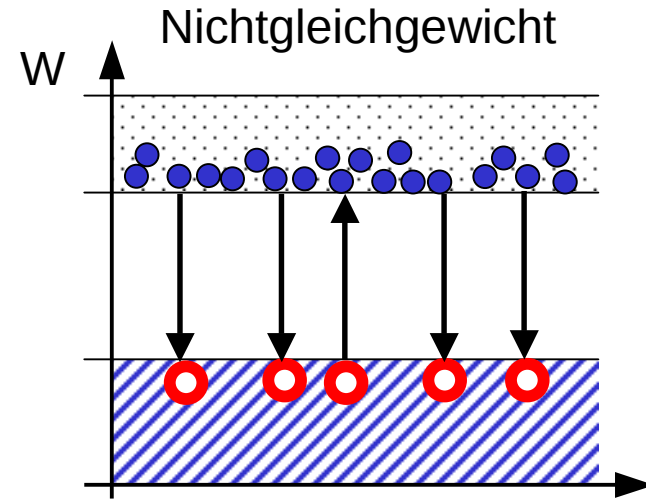


Generation - Rekombination



Schwache Injektion:

n-Halbleiter



p-Halbleiter

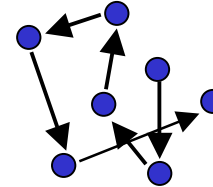
$$U = R - G = \frac{p - p_o}{\tau_p}$$

$$U = \frac{n - n_o}{\tau_n}$$

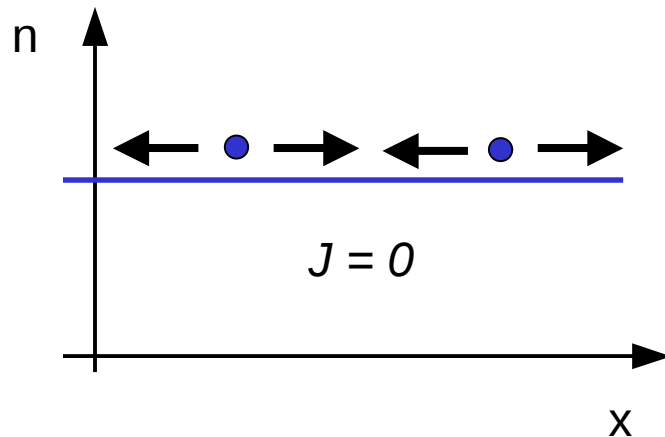
τ_p τ_n : Lebensdauer der Löcher bzw. Elektronen

Diffusion

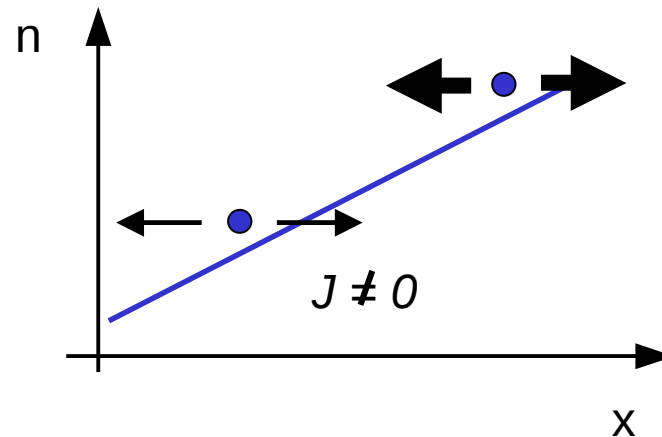
Irreguläre thermische Teilchenbewegung:



Homogene Dichte:

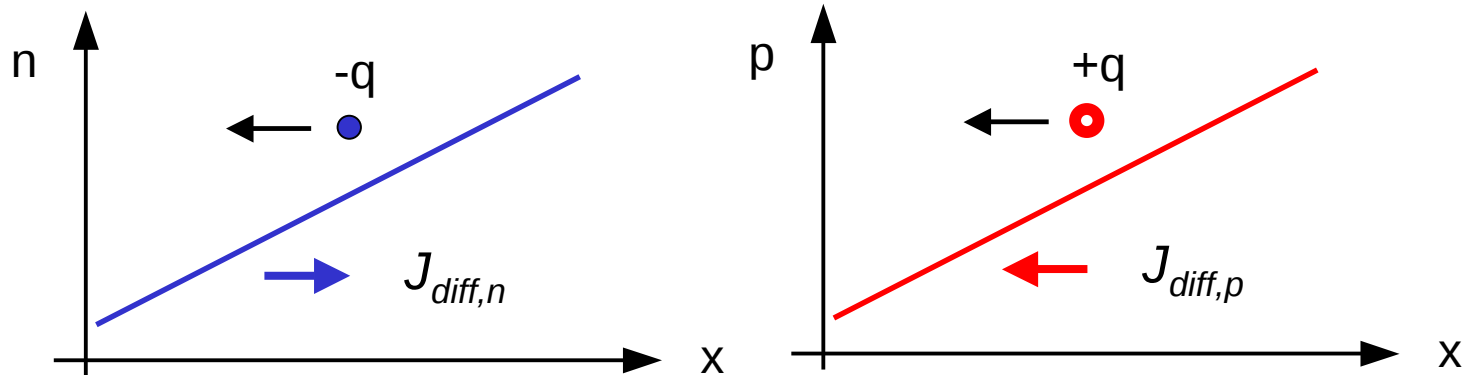


Dichte nicht konstant:



Diffusionsstrom

Diffusionsstrom ist proportional zum Gradienten der Ladungsträgerdichte



$$J_{diff,n} = -qD_n \left(-\frac{\partial n}{\partial x} \right)$$
$$= qD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

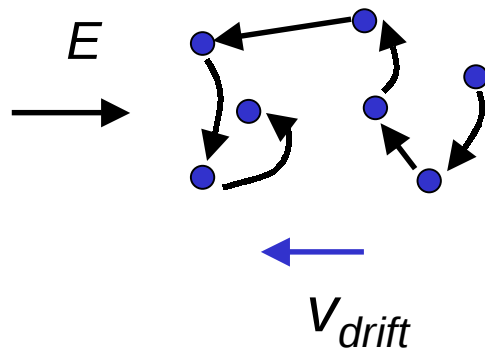
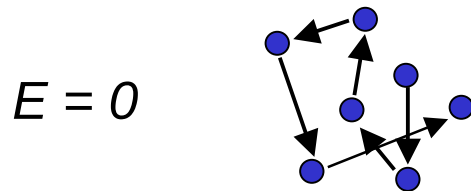
$$J_{diff,p} = qD_p \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right)$$
$$= -qD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

D_n D_p : Diffusionskonstanten von Elektronen bzw. Löchern

Drift

In elektrischem Feld wirkt Kraft auf Elektronen: $F = -qE$

Beschleunigung entgegengesetzt zur Feldrichtung
Abbremsen durch Stöße mit Kristallgitter



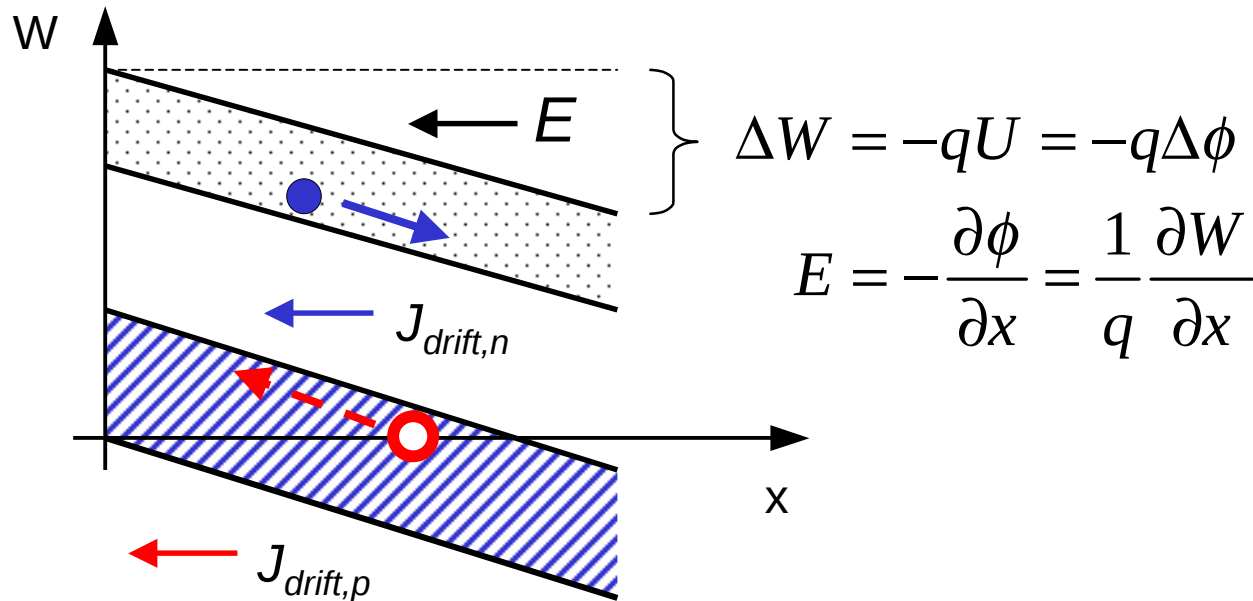
Driftgeschwindigkeit:

mittlere Geschwindigkeit in
definierte Richtung

$$v_{drift} = -\mu_n E$$

μ_n : Beweglichkeit der Elektronen

Driftstrom



$$J_{drift,n} = -qn v_{drift} = qn \mu_n E$$

$$J_{drift,p} = qp \mu_p E$$

μ_p : Beweglichkeit der Löcher

$$\mu_p \approx \frac{1}{3} \mu_n \quad (\text{Silizium})$$

Gesamtströme

Halbleitergebiet mit Querschnittsfläche A (1-dim. Fall):

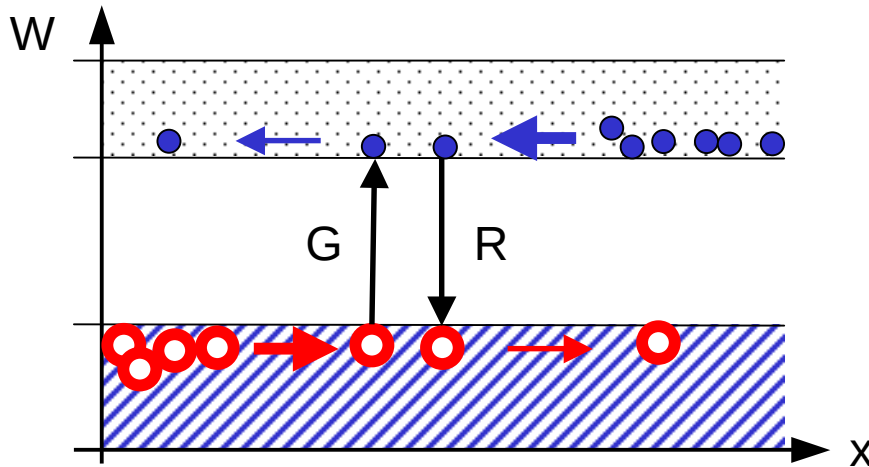
$$I_n = AJ_n = qA\mu_n nE + qAD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$I_p = AJ_p = qA\mu_p pE - qAD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

Schwache Injektion: Driftstrom der Minoritätsträger vernachlässigbar

z.B. p - Halbleiter:
$$I_n = qAD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

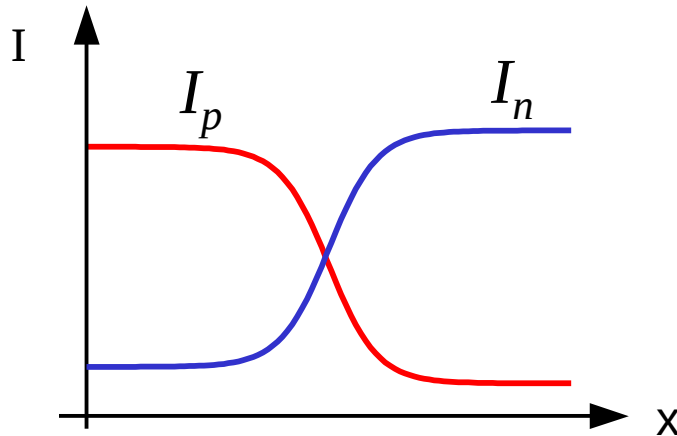
Kontinuitätsgleichungen



Zeitliche Änderungen der Ladungsträgerdichten:

$$\frac{dn}{dt} = G - R + \frac{1}{qA} \frac{\partial I_n}{\partial x}$$

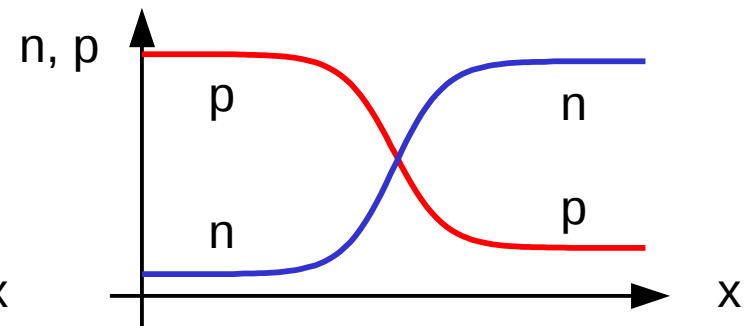
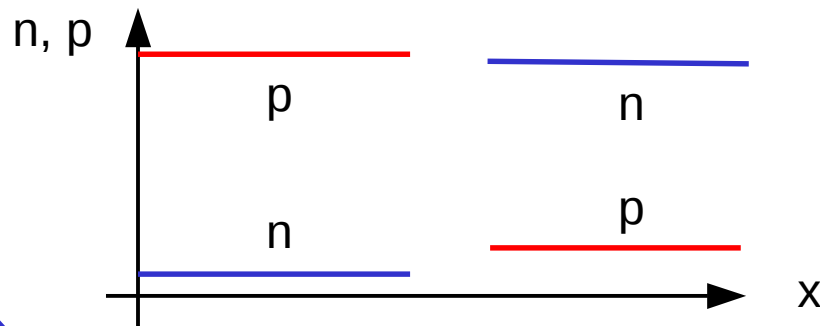
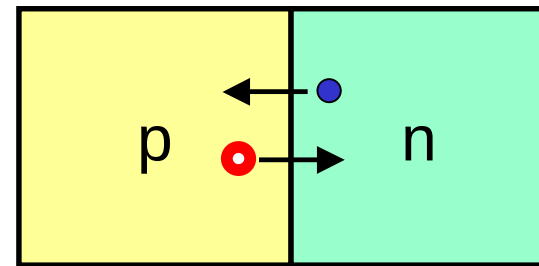
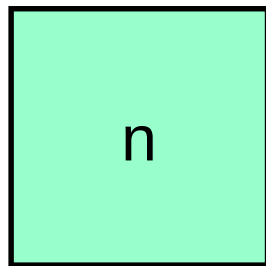
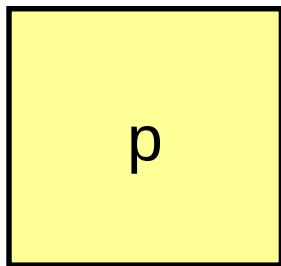
$$\frac{dp}{dt} = G - R - \frac{1}{qA} \frac{\partial I_p}{\partial x}$$



pn - Übergang

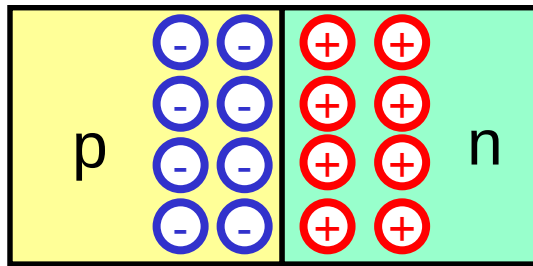
Kontakt von p- und n- Halbleitergebieten:

Diffusion von Löchern und Elektronen über den pn-Übergang
aufgrund des Dichteunterschieds

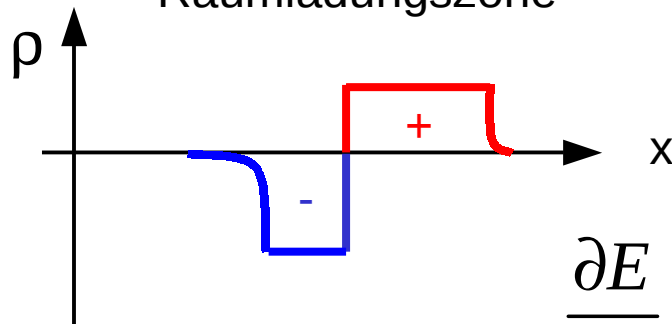


Raumladungszone

Akzeptor-
ionen Donator-
ionen

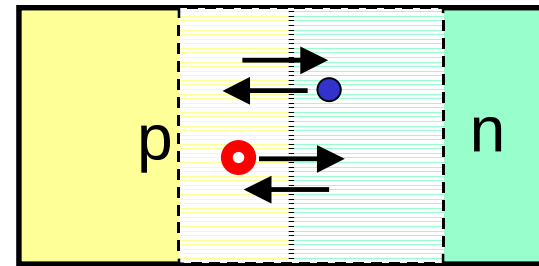


Raumladungszone

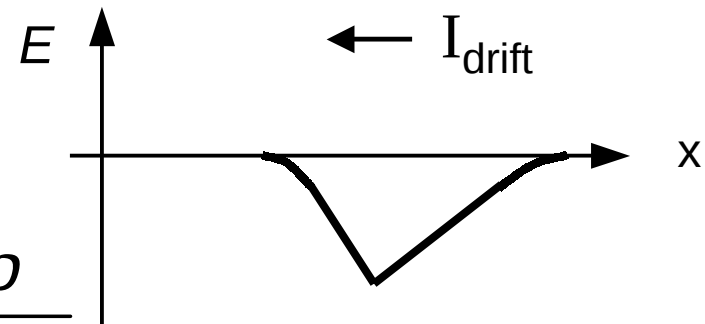


$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon_o \epsilon_{Si}}$$

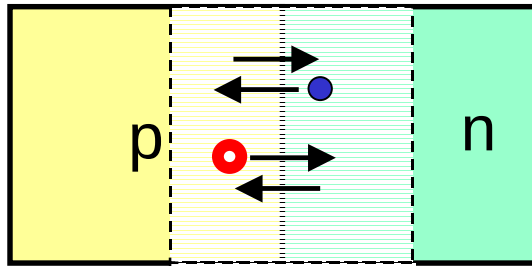
Kompensation von
Diffusion und Drift



I_{diff} $\rightarrow$
 $\leftarrow$ I_{drift}

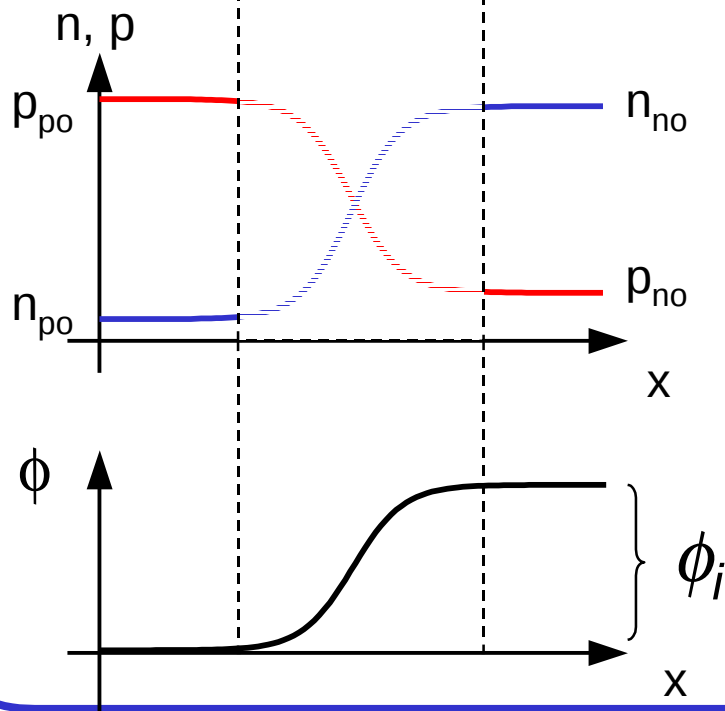


Diffusionsspannung



$$I_n = 0$$

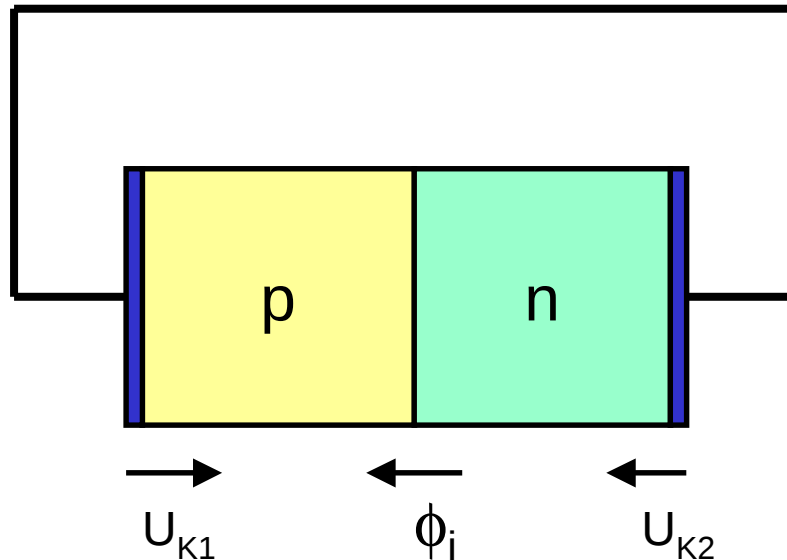
$$E = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad D_n = \frac{kT}{q} \mu_n$$



$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_n - \phi_p \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \end{aligned}$$

Diode

p- und n-Gebiet mit Metall kontaktiert:

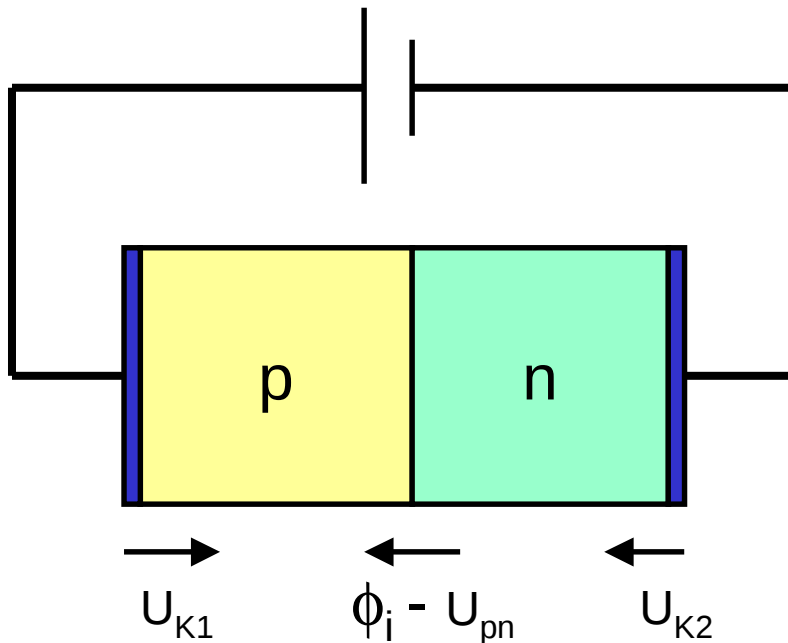


Potentialdifferenz zwischen Metall und Halbleiter: Kontaktspannung

$$U_{K1} + \phi_i + U_{K2} = 0$$

Diodenspannung

U_{pn} : an Diode angelegte Spannung



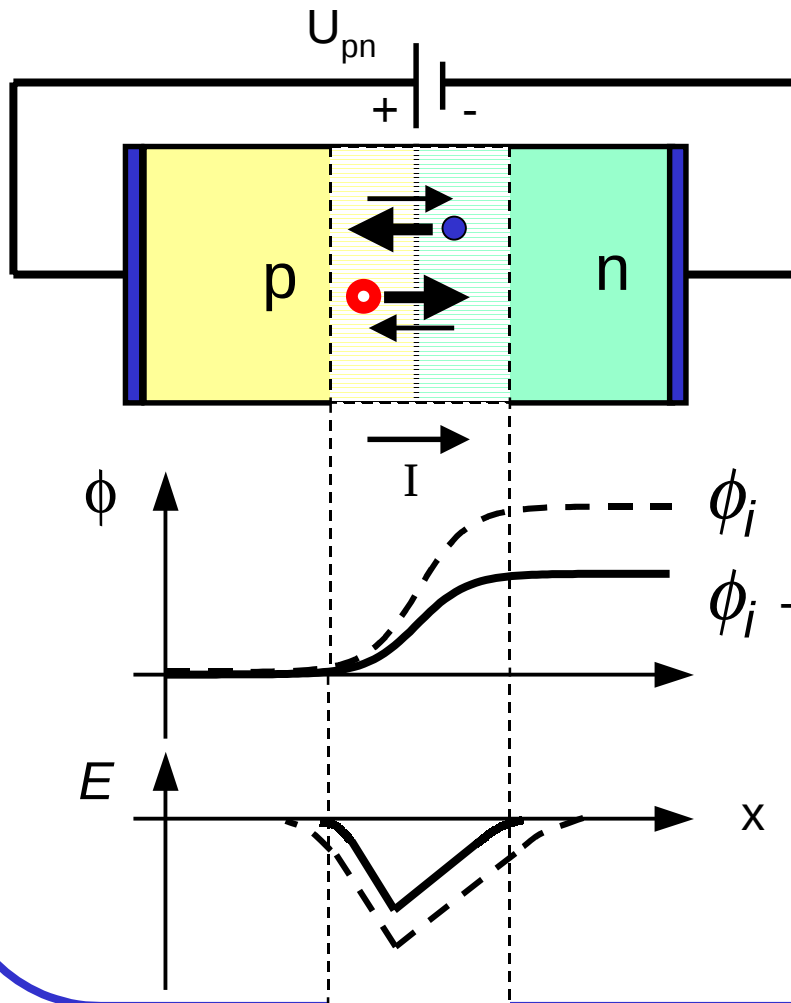
Kontaktspannungen
konstant bei
schwacher Injektion



Potentialdifferenz
zwischen n- und p-
Gebiet:

$$\phi_n - \phi_p \approx \phi_i - U_{pn}$$

Durchlaßbereich



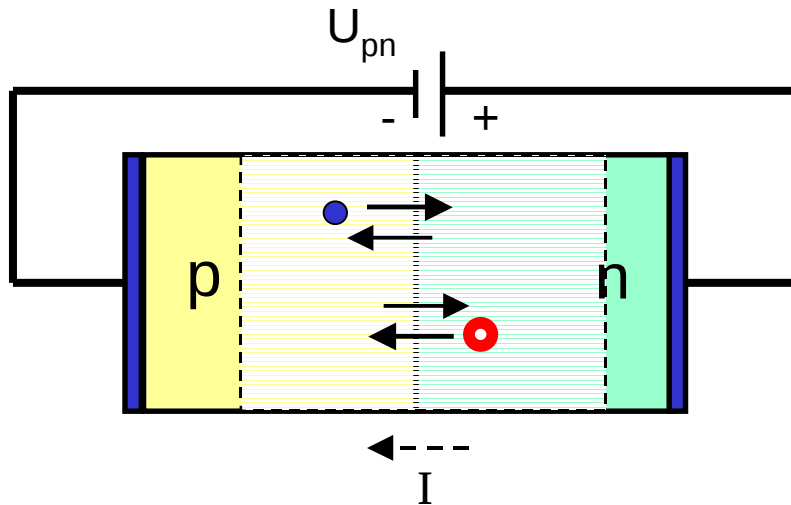
**Diodenspannung U_{pn}
positiv:**

Raumladungszone kleiner,
E-Feld kleiner als bei $U_{pn} = 0$

Driftströme von Elektronen
und Löchern kleiner als
Diffusionsströme

Diodenstrom I von p nach n

Sperrbereich



resultierender Nettostrom sehr gering, da von geringer Dichte der Minoritätsträger bestimmt

Sperrstrom

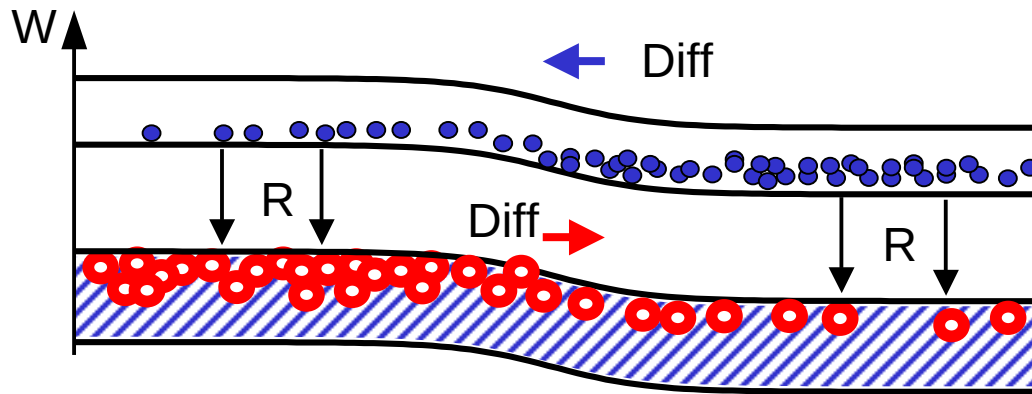
Diodenspannung U_{pn} negativ:

Raumladungszone größer,
E-Feld größer als bei $U_{pn} = 0$

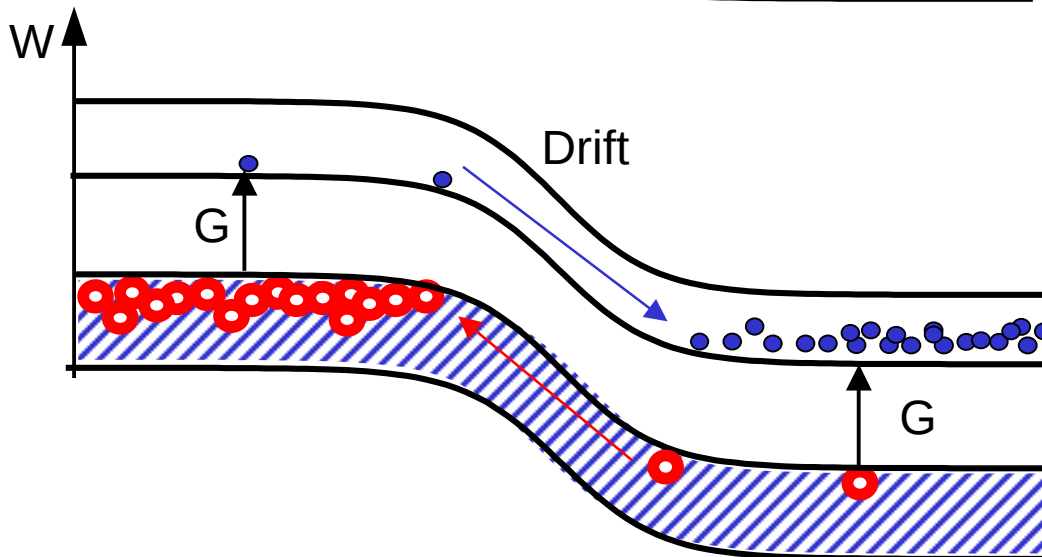
Driftstrom überwiegt
Diffusionstrom

Strom von n nach p

Durchlaß - / Sperrwirkung



$$U_{pn} > 0$$



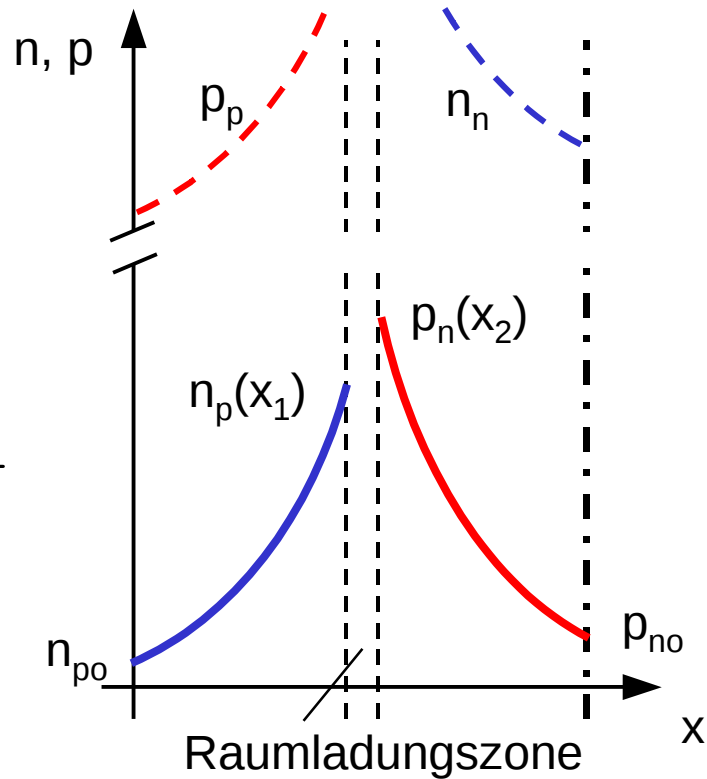
$$U_{pn} < 0$$

Ladungsträgerdichten

$$\phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n(x_2)}{n_p(x_1)}$$

$$\begin{aligned} U_{pn} &= \phi_i - (\phi_n - \phi_p) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} - \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n(x_2)}{n_p(x_1)} \\ &\approx \frac{kT}{q} \ln \frac{n_p(x_1)}{n_{po}} \end{aligned}$$

$$n_p(x_1) = n_{po} \exp\left(\frac{q}{kT} U_{pn}\right)$$



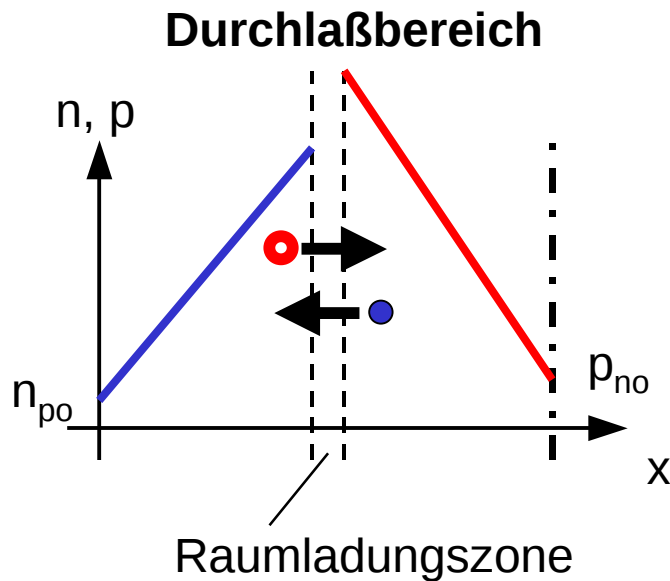
$$p_n(x_2) = p_{no} \exp\left(\frac{q}{kT} U_{pn}\right)$$

Ströme

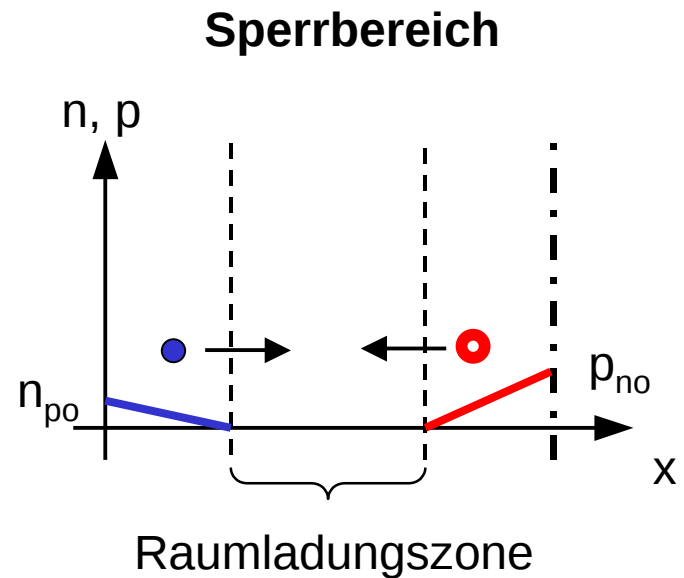
Ströme der Minoritätsträger nur Diffusionsströme (bei schwacher Injektion)

$$\text{p-Gebiet: } I_n = qAD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad \text{n-Gebiet: } I_p = -qAD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

Sehr kurze Diodengebiete: linearer Verlauf von n und p ,
da Rekombination vernachlässigbar



Mikroelektronik



Rainer Kraus

Stromkomponenten

$$I = I_n(x_1) + I_p(x_2)$$

$$I_n(x_1) = qAD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

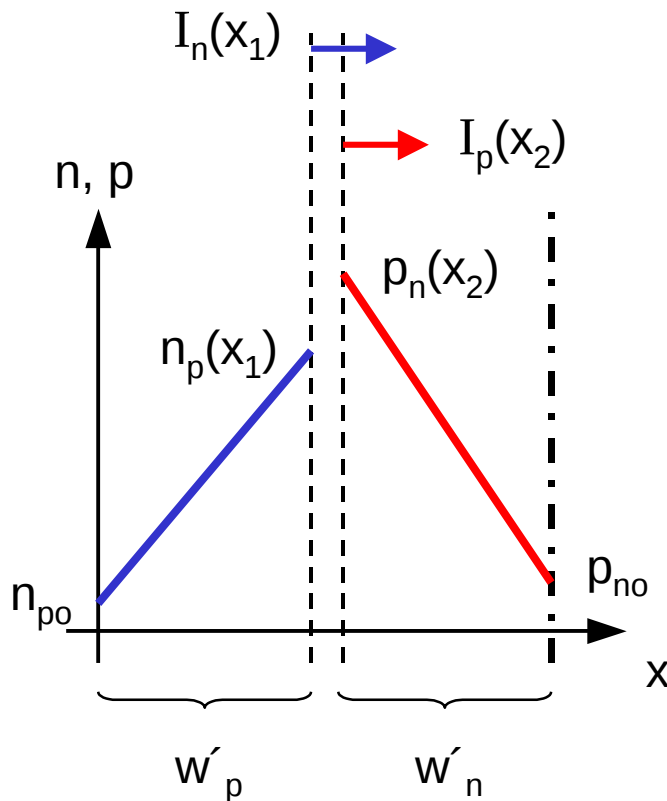
$$= qAD_n \frac{n_p(x_1) - n_{po}}{w'_p}$$

$$= qAD_n \frac{n_{po}}{w'_p} \left(\exp\left(\frac{q}{kT} U_{pn}\right) - 1 \right)$$

$$I_p(x_2) = -qAD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$= qAD_p \frac{p_n(x_2) - p_{no}}{w'_n}$$

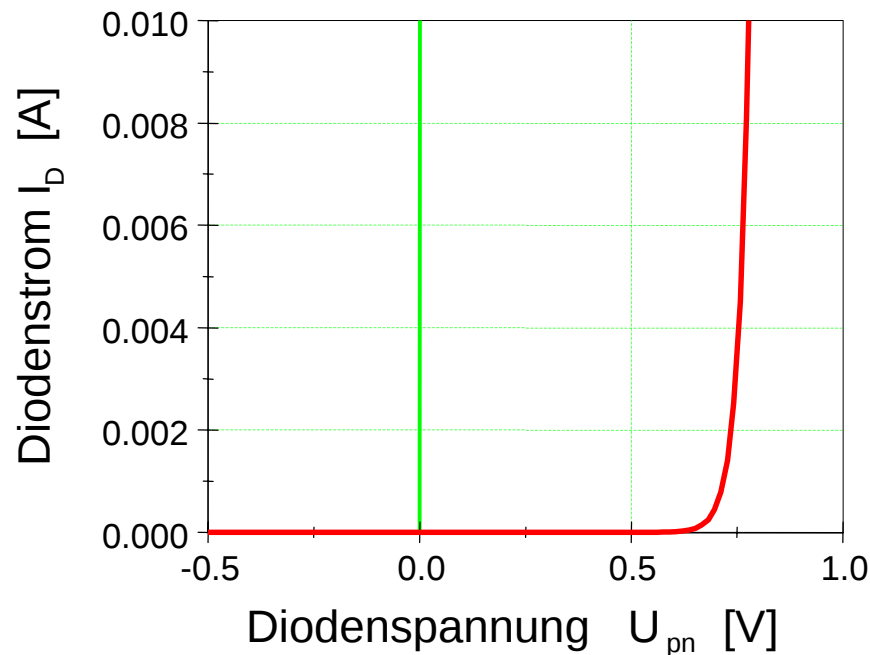
$$= qAD_p \frac{p_{no}}{w'_n} \left(\exp\left(\frac{q}{kT} U_{pn}\right) - 1 \right)$$



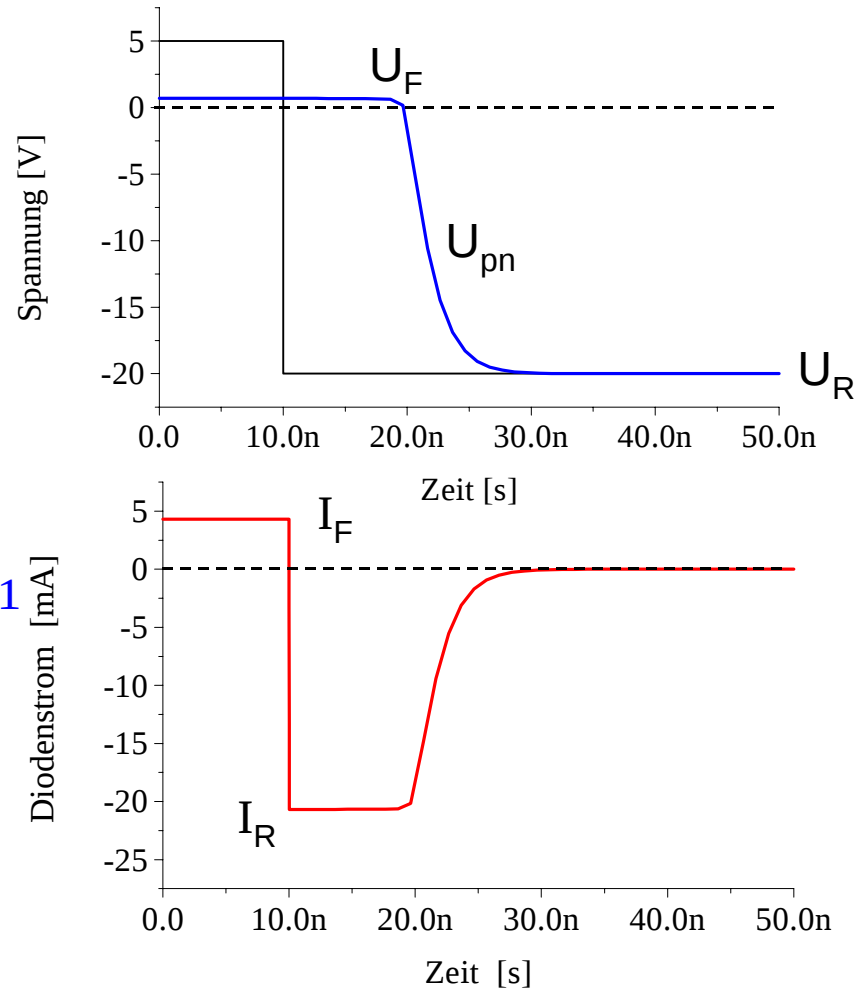
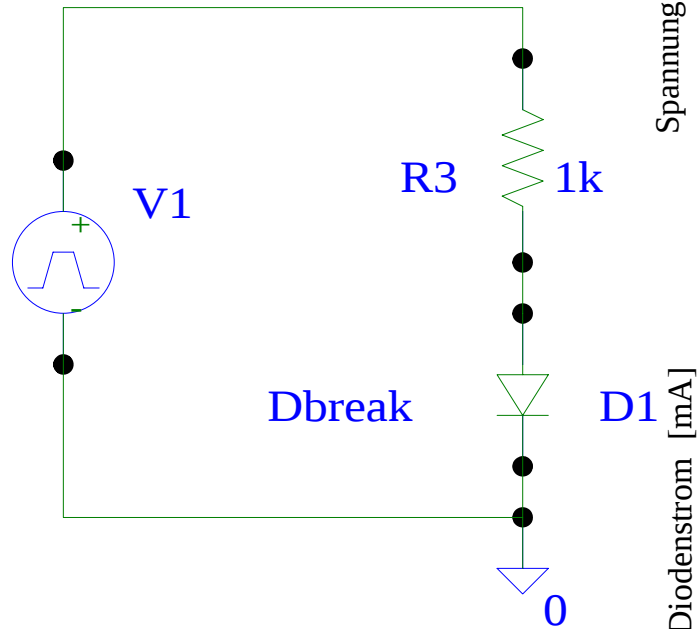
Diodenstrom

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{q}{kT} U_{pn} \right) - 1 \right)$$

$$I_S = qA \left(\frac{D_n}{w'_p} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{w'_n} \frac{n_i^2}{N_D} \right)$$



Schaltverhalten



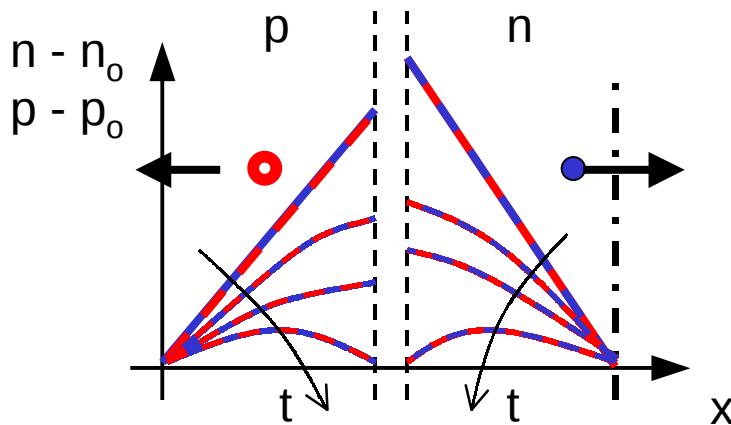
Kapazitäten

$$I = I_{DC} + \frac{dQ}{dt}$$

$$C = \frac{dQ}{dU}$$

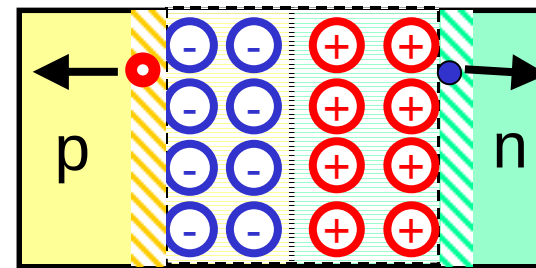
$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

Diffusionskapazität



$$U_{pn} \geq 0$$

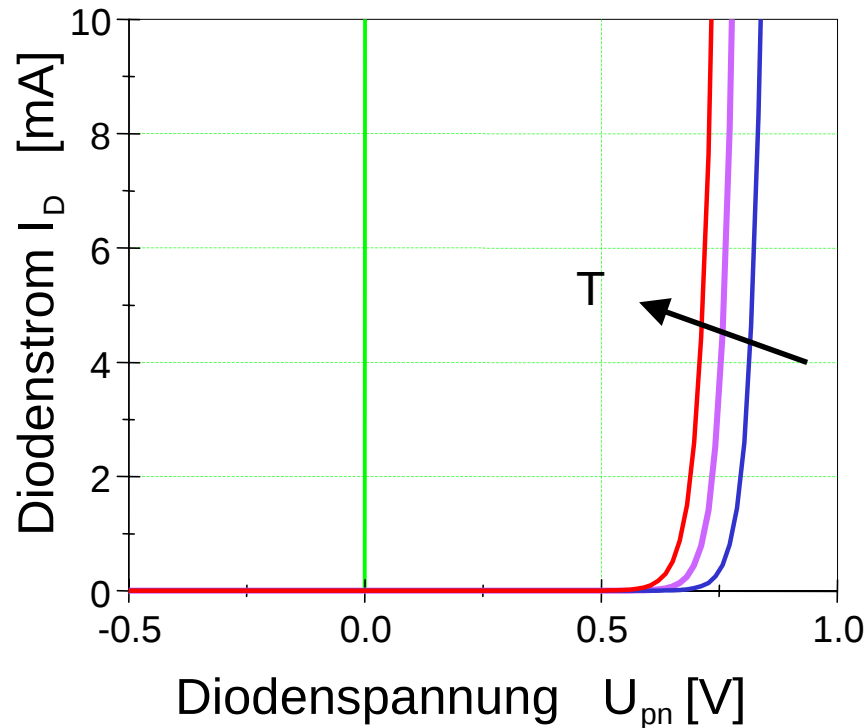
Sperrschichtkapazität



Raumladungszone

$$U_{pn} < 0$$

Temperaturverhalten

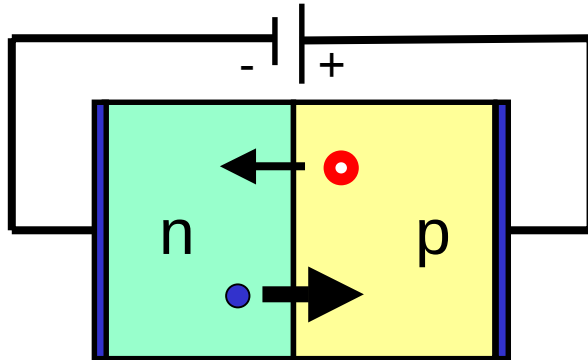


$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{q}{kT} U_{pn} \right) - 1 \right)$$

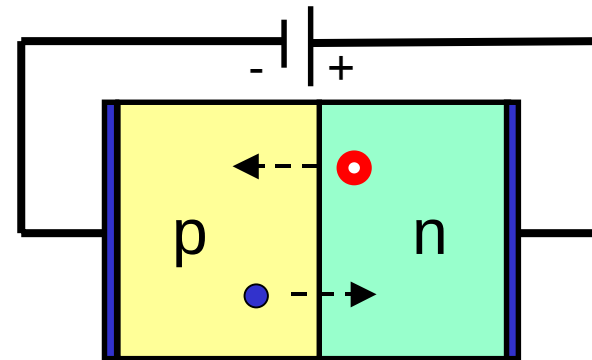
$$I_S = qA \left(\frac{D_n}{w'_p} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{w'_n} \frac{n_i^2}{N_D} \right)$$

$$n_i = C \exp \left(- \frac{W_g}{2kT} \right)$$

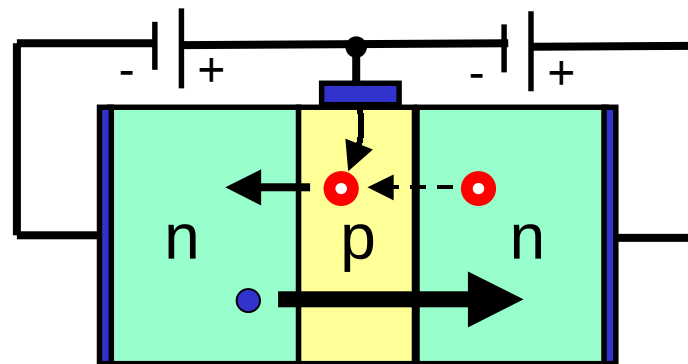
Bipolarer Transistor



pn in Durchlaßrichtung



pn in Sperrichtung



Emitter Basis Kollektor

