



# Elektronik 1, Foliensatz 8: Halbleiter

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU-Clausthal (E1F8.pdf)  
26. Januar 2022



## Halbleiter

- 1.1 Bewegliche Elektronen und Löcher
- 1.2 Leiter und Nichtleiter
- 1.3 Dotierte Halbleiter

## pn-Übergang

- 2.1 Stromlos
- 2.2 Sperrbereich
- 2.3 Durchlassbereich

## 2.4 Durchbruchbereich

## 2.5 Schaltverhalten

## Bipolartransistor

### 3.1 Transistoreffekt

### 3.2 Übersteuerung

## MOS-Transistor

### 4.1 Feldeffekt

### 4.2 Aktiver Bereich

### 4.3 Abschnürbereich

## Aufgaben



# Halbleiter



# 1. Halbleiter

Ziel des Abschnitts ist zu erkennen, dass die behandelten Halbleiterbauteile Diode, Transistor und MOS-Transistor tatsächlich etwa das bisher unterstellte Verhalten haben und was sich physikalisch dahinter verbirgt.

Die elektrischen Leitungsvorgänge in einem Halbleiter werden im Wesentlichen von den Dichten der positiven und negativen beweglichen Ladungsträger und deren Gradienten bestimmt.

Die Dichten der beweglichen Ladungsträger hängen von den Dichten der Elektronenzustände im Valenz- und Leitungsband des Halbleiters und deren Besetzungswahrscheinlichkeiten ab, d.h. selbst ein qualitativer grober Einblick verlangt ein »Abtauchen« bis in die Quantenphysik, in der Elektronen wahlweise als Teilchen mit bekanntem Ort oder Welle mit bekannter Energie betrachtet werden können.

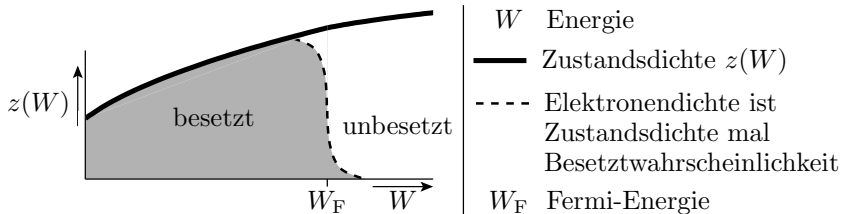
Wir durchschiffen den Physikteil so flach wie möglich.



# Bewegliche Elektronen und Löcher

## Welleneigenschaften von Elektronen

- Ein Elektron hat einen Wellenzustand (3D-Ortsfrequenz, Spin) mit einer zugeordneten Energie.
- Jeder Wellenzustand kann nur mit einem Elektron besetzt sein.
- Bei Temperatur  $T = 0$  K ist der Zustandsraum  $z(W)$  von der niedrigsten Energie bis zur Fermi-Energie  $\zeta = W_F$  gefüllt.
- Bei  $T > 0$  gibt es unbesetzte Zustände mit  $W < W_F$  und besetzte Zustände mit  $W > W_F$ .





## Besetzungswahrscheinlichkeit

- Die Besetzungswahrscheinlichkeit gehorcht der Fermiverteilung

$$p(W, T, \zeta) = \left( e^{\frac{W-\zeta}{k_B \cdot T}} + 1 \right)^{-1}$$

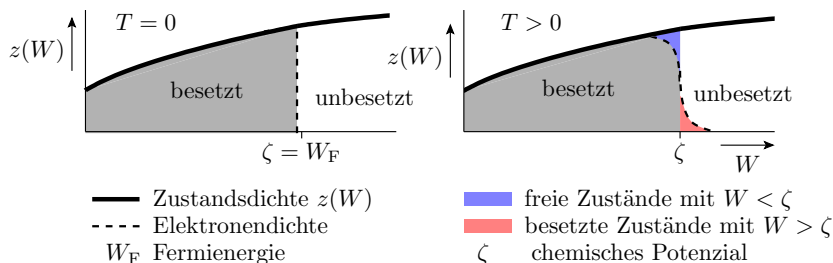
( $W$  – Energie;  $k_B$  – Boltzmannkonstante;  $T$  – Temperatur;  $\zeta$  – chemisches Potential, Rechengröße mit der Anzahl freie Zustände mit  $W < W_F$  gleich Anzahl besetzte Zustände mit  $W > W_F$ ).

- $k_B \cdot T$  ist die mittlere thermische Energie der Elektronen bei einer Temperatur  $T$ . Bei Raumtemperatur (300 K) ca. 26 meV.

$\frac{W-\zeta}{k_B \cdot T}$	-20	-10	0	10	20
$p(W, T, \zeta)$	$1 - 2 \cdot 10^{-9}$	$1 - 4,5 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-9}$

- Zustände mit  $W < \zeta - 30 \cdot k_B \cdot T$  sind alle besetzt.
- Zustände mit  $W > \zeta + 30 \cdot k_B \cdot T$  sind alle unbesetzt.
- Die Zustände dazwischen sind teilweise besetzt.

## Freie und besetzte Zustände

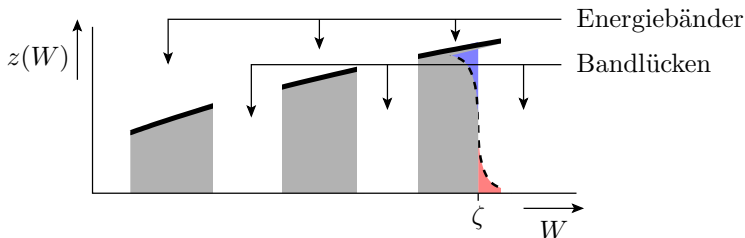


- Nur Elektronen mit energetisch benachbarten freien Zuständen sind beweglich, also nur die im Bereich der Fermi-Energie.
- Bei wenigen freien Zuständen begrenzen die »Löcher« die Dichte der beweglichen Ladungsträger und wenigen besetzten Zuständen die Dichte der besetzten Zuständen.
- Ab  $T > 0$  wird der energetische Bereich, in dem sich Elektronen bewegen können, mit zunehmender Temperatur  $T$  breiter.



## Energiebänder und Bandlücken

- Die Zustandsdichte  $z(W)$  ist nur in einem Raum ohne zusätzliche Ladungen stetig.
- In Kristallen mit einem regelmäßigen Gitter aus ortsfesten Ladungen gibt es Energiebereiche mit besetzbaren Elektronenzuständen (Bänder) getrennt durch Energiebereiche ohne besetzbare Zustände (Bandlücken).



- Nur in den äußersten Bändern mit der höchsten Energie gibt es bewegliche Elektronen.



## Bewegliche Ladungsträger

- Bei einem Driftstrom ist der thermischen Bewegung der Elektronen eine feldgetriebene gerichtete Bewegung überlagert. Thermische und Driftbewegungen bestehen aus Energieaufnahme (Beschleunigung) und Energieabgabe an das Gitter oder andere Elektronen (Abbremsen).
- Elektronen können ihre Energie nur ändern, wenn in energetischer Nachbarschaft Zustände frei sind. Nur solche Elektronen nehmen an der Driftbewegung teil.

Bewegliche Elektronen gibt es folglich nur in zwei Bändern:

- Valenzband (energetisch höchstwertiges, bei  $T = 0$  vollbesetztes Band), wenn bei  $T > 0$  ein geringer Anteil der Zustände frei ist (bewegliche Löcher).
- Leitungsband (darauffolgendes bei  $T = 0$  leeres oder teilweise besetztes Band), mit bei  $T > 0$  besetzten Zuständen.

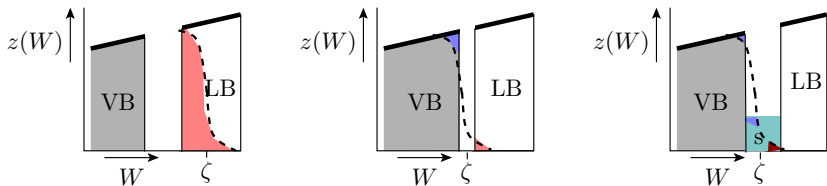


## Leiter und Nichtleiter

## Leiter

Leitfähig sind Materialien mit

- teilweise besetztem Leitungsband,
  - Kupfer hat z.B. ein bewegliches Elektron pro Atom. Aus der Dichte von  $8 \cdot 10^{22}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$  ergibt sich eine Dichte von  $n \approx 8 \cdot 10^{22}$  beweglichen Elektronen pro  $\text{cm}^3$ .
- schmaler Bandlücke, zusätzl. Zuständen in der Bandlücke<sup>1</sup>.



VB Valenzband

■ Dichte der beweglichen Löcher ( $p$ )

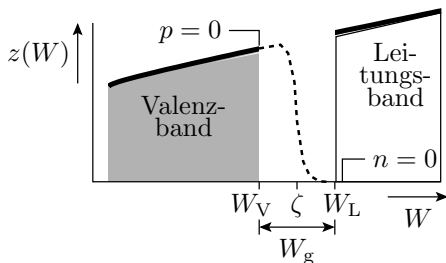
LB Leitungsband

■ Dichte der beweglichen Elektronen ( $n$ )

■ **s** zusätzliche Zustände in der Bandlücke

<sup>1</sup>durch Verunreinigungen, Fehler in der Kristallstruktur, ...

## Isolator



$W_V$  maximale Energie der Elektronen im Valenzband

$W_L$  minimale Energie der Elektronen im Leitungsband

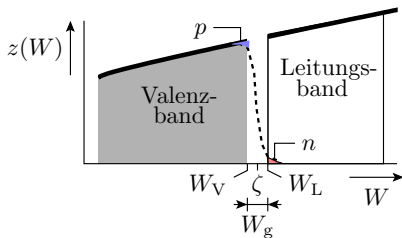
$W_g$  Bandabstand

Ein Isolator hat

- bei  $T = 0$  ein leeres Leitungsband und
- eine Bandlücke deutlich breiter  $50 \cdot k_B \cdot T$ . (Valenzband voll besetzt und Leitungsband leer.)
- Kaum Störstellen in der Bandlücke.

Bei ausreichender Energiezufuhr (hohe Temperatur/Feldstärke, hochenergetische Strahlung) werden Isolatoren zu Leitern.

## Halbleiter



Ein Halbleiter hat

- bei  $T = 0$  ein leeres Leitungsband und
- eine Bandlücke von ca.  $1 \dots 2 \text{ eV}$ , so dass das Valenzband kaum Löcher und das Leitungsband kaum Elektronen enthält. <sup>2</sup>

Undotierte Halbleiter eignen sich zur Temperaturmessung, sonst zu fast nichts.

---

<sup>2</sup>Silizium: Bandlücke von  $W_g \approx 1,1 \text{ eV}$ , Atomdichte  $\approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ , Leitungsbandelektronen- und Valenzbandlöcherdichte bei  $300 \text{ K}$   $n = p \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ . Relative Abnahme von  $n$  und  $p$  mit der Temperatur  $\approx 7\%/K$  zu.

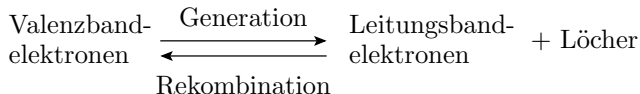


## Dotierte Halbleiter

## Generation und Rekombination

Die Bildung beweglicher Elektronen und Löcher ist ein Gleichgewichtsprozess, der dem Massenwirkungsgesetz gehorcht.

- Generation: thermische Anregung
- Rekombination: Energieabgabe



- $(n \cdot p) \uparrow \rightarrow \text{Rekombinationsrate} \uparrow \rightarrow (n \cdot p) \downarrow$
- $(n \cdot p) \downarrow \rightarrow \text{Rekombinationsrate} \downarrow \rightarrow (n \cdot p) \uparrow$

Gleichgewichtskonstante:

$$n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2$$

$(n_i$  – instrinsische Ladungsträgerdichte, für Si bei 300K

$$n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})$$





## Dotierung

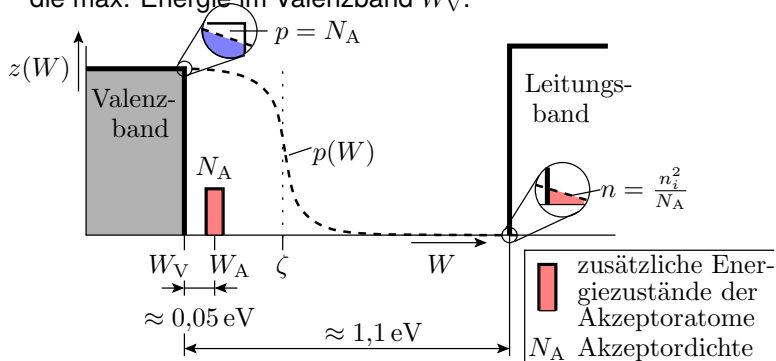
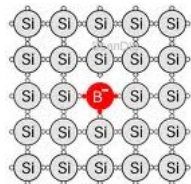
Halbleiter sind Kristalle mit einem regelmäßigen Gitter. Die technisch wichtigsten Halbleitermaterialien, Silizium und Germanium, besitzen vier Außenelektronen mit kovalenten Bindungen zu Nachbaratomen (Diamantgitter).

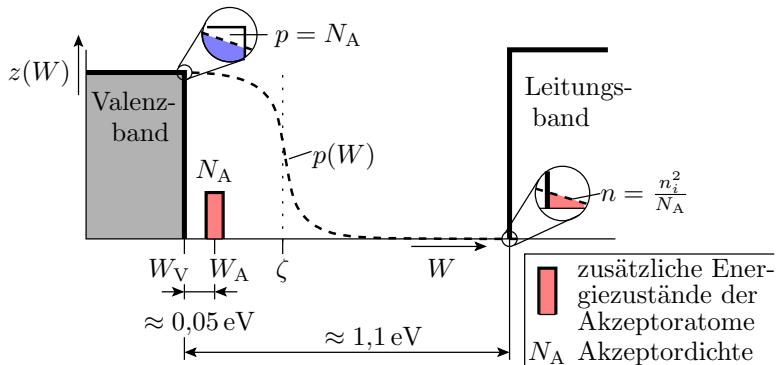
- Das Bändermodell setzt einen idealen Kristall voraus.
- Fremdatome, Gitterfehler verursachen zusätzliche Energiezustände in der Bandlücke.

Dotierung ist der gezielte Einbau von Fremdatomen zur Erzeugung zusätzlicher ortsgebundener besetzbarer Elektronenzustände an den Außenkannten der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband.

## Herstellung von p-Gebieten

- Dotierung mit Akzeptoren (Fremdatome mit 3 Außenelektronen).
- Die Energie, ein viertes Außenelektron aufzunehmen, ist nur unerheblich größer als die max. Energie im Valenzband  $W_V$ .





- Das elektrochemische Potenzial  $\zeta$  stellt sich so ein, dass Löcherdichte gleich Akzeptordichte

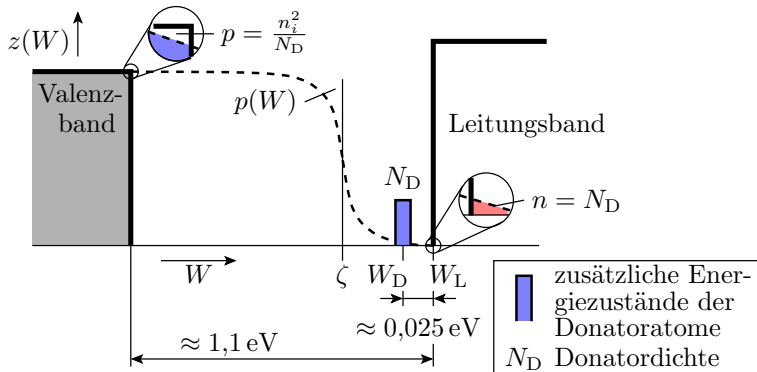
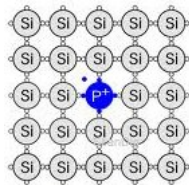
$$p = N_A \gg n_i$$

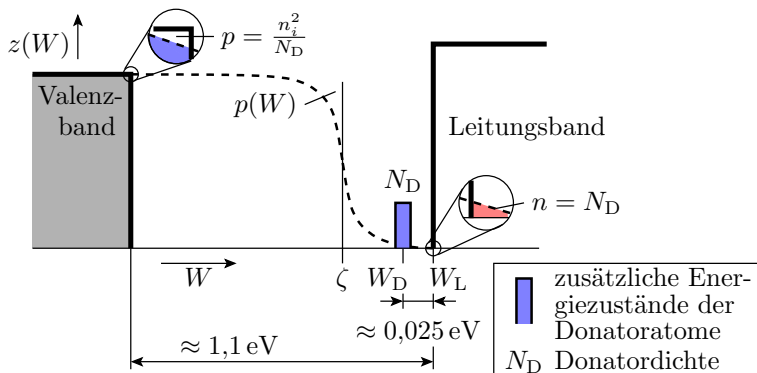
- und die Dichte der beweglichen Elektronen gleich

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \ll n_i$$

## Herstellung von n-Gebieten

- Dotierung mit Donatoren (Fremdatome mit 5 Außenelektronen).
- Die Energie, das fünfte Außenelektron abzugeben, ist  $\approx q \cdot U_T$  kleiner als die minimale Energie im Leitungsband  $W_L$ .





- Das elektrochemische Potenzial  $\zeta$  stellt sich so ein, dass die Elektronendichte im Leitungsband gleich der Donatordichte

$$n = N_D \geq n_i$$

- und die Dichte der Löcher gleich ist:

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n_i$$



In einem p-Gebiet

- sind die Löcher mit der eingestellten Dichte  $p = N_A$  die Majoritätsladungsträger.
- Die Akzeptoratome mit dem vierten besetzten Außenelektron bilden ortsfeste negative Ladungen.
- Die beweglichen Elektronen mit der Dichte  $n = n_i^2/N_A$  sind die Minoritätsladungsträger.

In einem n-Gebiet

- sind die beweglichen Leitungsbandelektronen mit der eingestellten Dichte  $n = N_D$  die Majoritätsladungsträger.
- Die Donatoratome mit einem abgegebenen Außenelektron bilden ortsfeste positive Ladungen.
- Die Löcher im Valenzband mit der Dichte  $p = n_i^2/N_A$  sind die Minoritätsladungsträger.

Typische Dotierdichten:  $N_{A/D} = 10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

- Majoritätsdichte:  $p/n = 10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- Minoritätsdichte bei 300 K:  $n/p = \frac{n_i^2}{N_{A/D}} = 1 \dots 10^6 \text{ cm}^{-3}$  ( $n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ).

## Beispiel



Dotierung eines Halbleitergebiets mit  $10^{18}$  Phosphoratomen je Kubikzentimeter.

- Dichte der beweglichen Elektronen bei  $T = 300\text{ K}$ ?
- Dichte der beweglichen Löcher bei  $T = 300\text{ K}$ ?

---

Lösung:

- Phosphor hat fünf Außenelektronen, Donator.
- Majoritätsladungsträger Elektronen, Majoritätsdichte gleich Donatordichte:

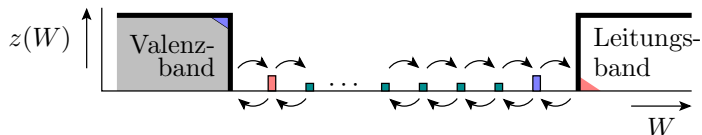
$$n = N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- Minoritätsladungsträger Löcher, Minoritätsdichte gleich  $n_i^2$  durch Majoritätsdichte:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2}{10^{18} \text{ cm}^{-3}} = 4 \text{ cm}^{-3}$$

## Tiefe Störstellen

In der ganzen Bandlücke verteilte ungewollte Energiezustände durch Gitterfehler, Verunreinigungen, ...



- Akzeptorniveaus    ↗ Energieaufnahme
- Donatorniveaus    ↘ Energieabgabe
- tiefe Störstellen

- In der Regel erfolgt die Energieaufnahme und -abgabe in kleinen Schritten über die tiefen Störstellen.
- Je größer die Dichte der tiefen Störstellen, desto schneller werden Gleichgewichtsstörungen  $n \cdot p \neq n_i^2$  abgebaut.



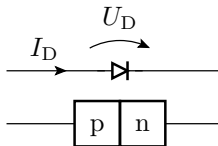


- Gleichgewichtsstörungen entstehen z.B. durch Zu- oder Abfluss beweglicher Ladungsträger.
  - Wichtige Kenngrößen von Halbleiterbauteilen, z.B.
    - hohe Stromverstärkung von Bipolartransistoren,
    - geringe Sperrströme von Dioden und
    - lange Datenhaltezeiten in DRAMs
- verlangen, dass die Gleichgewichtsstörungen lange (bis zu Millisekunden) erhalten bleiben. Das verlangt eine hohe Reinheit.
- Die Reinheit des Halbleiters lässt sich fertigungstechnisch schwer einstellen. Das ist eine der Ursachen für die großen Streuungen wichtiger Bauteileigenschaften.



# pn-Übergang

### pn-Übergang



- Ladungsträgerdichte/Dotierdichte
- p-Gebiet (Löcher/Akzeptoren):

$$p = N_A \approx 10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- Ladungsträgerdichte/Dotierdichte n-Gebiet (Elektronen/Donatoren):

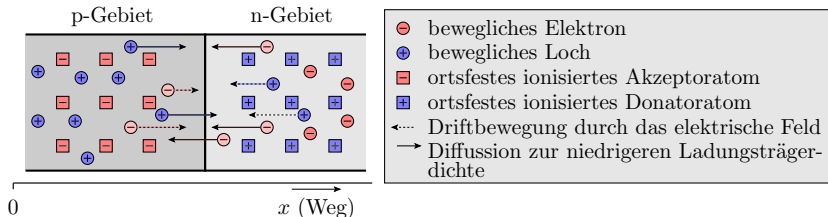
$$n = N_D \approx 10^{13} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- Arbeitsbereiche:
  - Sperrbereich
  - Durchlassbereich
  - Durchbruchbereich.



# Stromlos

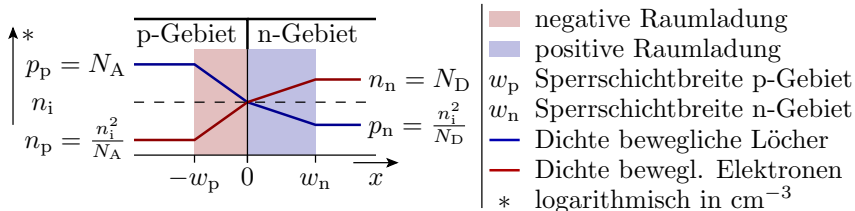
### Stromloser pn-Übergang



An einem stromlosen pn-Übergang

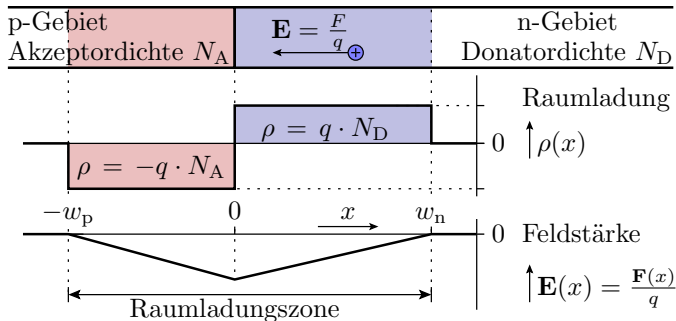
- diffundieren die beweglichen Ladungsträger in Richtung niedrigerer Konzentration, d.h. in das andere Gebiet und
- hinterlassen im p-Gebiet ortsfeste negativ geladene Akzeptor- und im n-Gebiete negativ geladenen Donatoratome.

Die Raumladung verursacht ein elektrisches Feld, das einen zur Diffusion entgegengerichteten Driftstrom zur Folge hat.



- Ohne einen von außen eingespeisten Strom ( $I_D = 0$ ) lädt sich der Übergangsbereich so auf, dass der Driftstrom den Diffusionsstrom kompensiert.
- Die theoretisch bei der Kontaktierung des p- mit dem n-Gebiet entstehende Gleichgewichtsstörung  $n \cdot p \gg n_i^2$  ist nach kurzer Zeit durch Rekombination abgebaut.
- Entlang des gesamten Übergangs gilt  $n \cdot p = n_i^2$ .
- Im Übergangsbereich  $p \approx n \approx n_i$  sind die Dichten der beweglichen Ladungsträger um viele Zehnerpotenzen kleiner als die Dotierdichten.

### Raumladung und Feldstärke

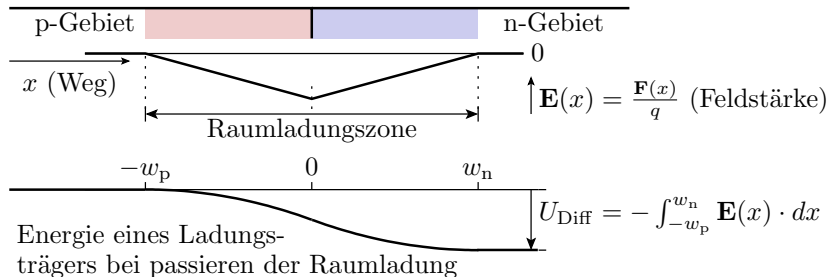


- Die Raumladungszone ist durch Diffusion und Rekombination fast frei von beweglichen Ladungsträgern. Raumladung proportional zur Akzeptor- bzw. Donatordichte:

$$p - \text{Gebiet} : \rho \sim N_A; \quad n - \text{Gebiet} : \rho \sim N_D$$

- Die der Betrag der Feldstärke nimmt linear zum Übergang zu.

### Potenzial und Diffusionsspannung

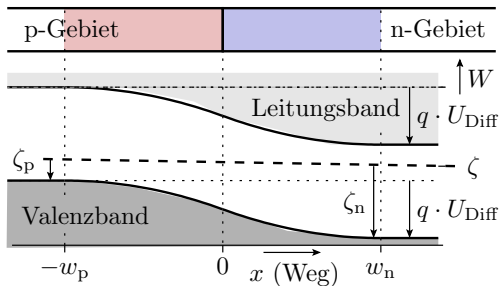


Bei der Überwindung des elektrischen Feldes vom p- zum n-Gebiet durch die Raumladungszone nimmt das Potential der Ladungsträger um die Diffusionsspannung ab:

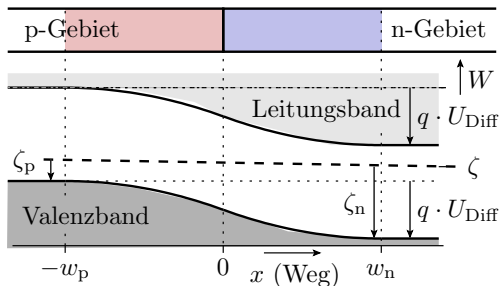
$$U_{\text{Diff}} = - \int_{-w_p}^{w_n} \mathbf{E}(x) \cdot dx$$



### Bänderverbiegung



- Definition des chemischen Potential  $\zeta$  als »Energie null«. Die Energie der Bandkanten wird dadurch ortsabhängig (Bänderverbiegung).
- Löcher haben in Abhängigkeit von  $x$  die Energie der Oberkante des Valenzbands.
- Bewegliche Elektronen haben die Energie der Unterkante des Leitungsbands.



- Die Diffusionsspannung als »Energie pro Ladung« ist die Differenz der chemischen Potentiale im p- und n-Gebiet geteilt durch die Elementarladung  $q$ :

$$U_{\text{Diff}} = \int_{w_n}^{-w_p} \mathbf{E}(x) \cdot dx = \frac{\zeta_n - \zeta_p}{q}$$

- Die Dichten  $n(x)$  und  $p(x)$  ergeben sich aus dem Abstand der jeweiligen Bandkante zum chemischen Potenzial  $\zeta$ .



# Sperrbereich

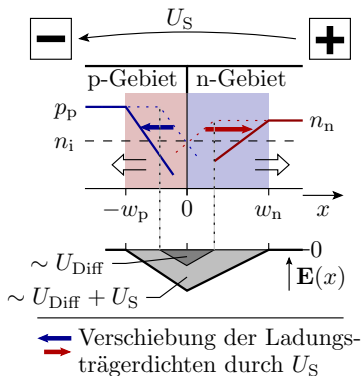
## Sperrbereich

Die von außen angelegte Spannung  $U_S$  schwächt den Driftstrom in Richtung Übergang bzw. kehrt ihn um von der Sperrschicht weg.

Breite und Feldstärke erhöhen sich so, dass sich die Spannung beim passieren der Sperrschicht zusätzlich zur Diffusionsspannung um die Sperrspannung  $U_S$  erhöht:

$$\int_{w_n}^{-w_p} \mathbf{E}(x) \cdot dx = U_{\text{Diff}} + U_S$$

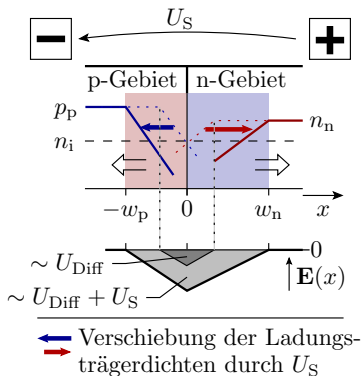
Sperrschichtbreite und maximale Feldstärke nehmen je etwa mit der Wurzel der Sperrspannung  $U_S$  zu.



- In der Sperrschicht entsteht ein Ungleichgewicht  $n \cdot p \ll n_i^2$ .
- Die generierten Ladungsträger werden durch das Feld in der Sperrschicht abgesaugt und bilden einen Sperrstrom  $I_S$ .
- Der Sperrstrom nimmt proportional zur Breite der Raumladungszone und damit mit der Wurzel der Sperrspannung zu:

$$I_S \sim \sqrt{U_S + U_{\text{Diff}}}$$

- Bei sehr reinen Halbleitern mit wenig tiefen Störstellen ist der Sperrstrom vernachlässigbar.

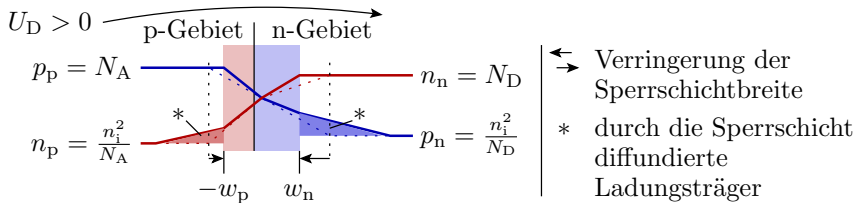




# Durchlassbereich



## Durchlassbereich

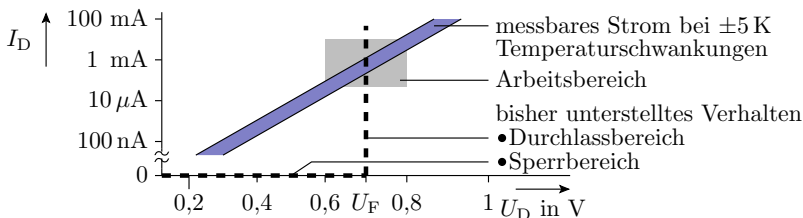


Eine Spannung in Durchlassrichtung  $U_D > 0$  schwächt das Feld,

- verringert den Driftstrom und
- lässt Ladungsträger als Minorität bis zum Ende der Raumladungszone im anderen Gebiet diffundieren.

Hinter der Raumladungszone  $n \cdot p \gg n_i^2$ . Weiterbewegung durch Diffusion und Rekombination. Das Gleichgewicht  $n \cdot p = n_i^2$  wird spätestens an den Kontakten, an denen es eine hohe Dichte von Gitterfehlern (tiefe Störstellen) gibt, erreicht.

# Strom-Spannungs-Beziehung



- $I_D$  nimmt in Durchlassrichtung näherungsweise exponentiell mit der Spannung zu:

$$I_D \approx I_S \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \quad \text{mit} \quad U_T = \frac{k_B \cdot T}{q}$$

( $U_T$  – Temperaturspannung;  $I_S$  – Bauteilparameter;  $p$  Elementarladung) und hat eine hohe Temperaturabhängigkeit.

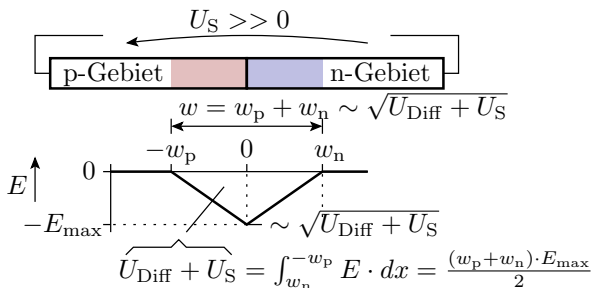
- Das bisherige Modell  $U_D = U_F$  für den Durchlassbereich und  $I_D = 0$  für den Sperrbereich ist nur eine grobe Näherung.



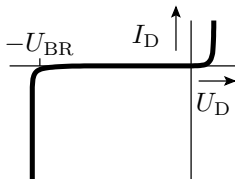
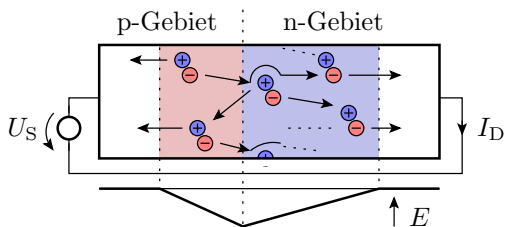


# Durchbruchbereich

## Durchbruchbereich (Lawinendurchbruch)



- Mit Zunahme der Sperrspannung  $U_S$  nimmt die Sperrschichtbreite und die maximale Feldstärke in der Sperrschicht zu.
- Ab  $U_S$  größer der Durchbruchspannung  $U_{\text{BR}}$  ...



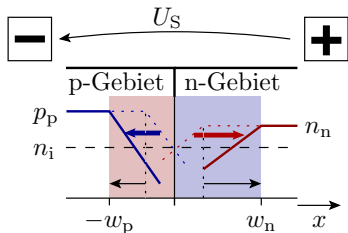
Ab  $U_S = -U_D > U_{BR}$

- nehmen die generierten Ladungsträger bis zum nächsten Gitterzusammenstoß genug Energie auf, um ein Valenzbandelektron ins Leitungsband anzuheben. Generierung neuer Elektronen-Loch-Paare.
- Lawinenartige Vervielfachung der Dichte der beweglichen Elektronen und Löcher.
- Exponentielle Stromzunahme mit der Sperrspannung  $U_S$ .

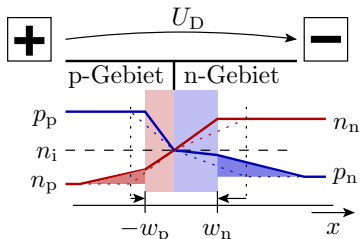


# Schaltverhalten

Wirkung einer Sperrspannung



Wirkung einer Durchlassspannung

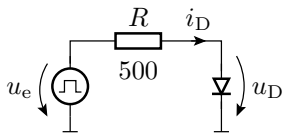


Im Sperrbereich Plattenkondensator, spannungsabhängiges  $C$ :

- Sperrspannung  $\uparrow \rightarrow$  Sperrschichtbreite  $\uparrow \rightarrow$  Sperrschichtkap.  $\downarrow$
- Annäherung durch eine konstante Kapazität.

Im Durchlassbereich haben die in das andere Gebiet diffundierten Ladungsträger eine Aufenthaltsdauer  $t_T$ , bis sie rekombiniert und abgefließen sind. Für diese Zeit fließt der Durchlassstrom auch ohne Spannung weiter.

## Schaltverhalten

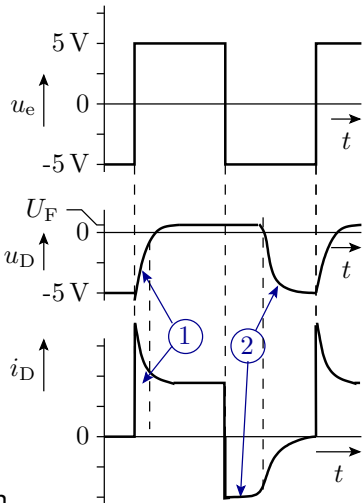


- ① Umladen der Sperrschichtkap.
- ② Abbau der Diffusionsladung

Einschalten: näherungsweise  
Annäherung an die stationären

Werte  $U_D^{(+)} = U_F$  und  $I_D^{(+)} = \frac{u_e - U_F}{R}$   
mit abklingenden Exponentialfunktionen.

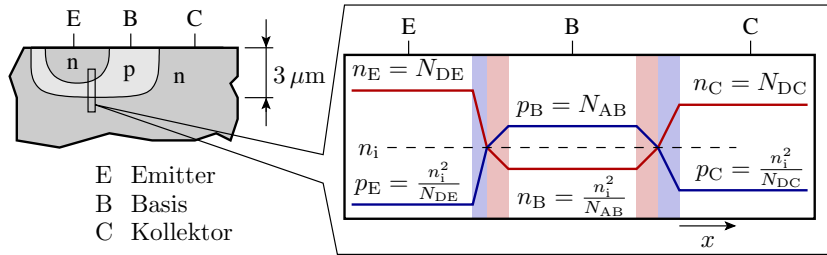
Ausschalten: Zusatzverzögerung für Abbau der Diffusionsladung.





# Bipolartransistor

## Aufbau



Merkmale eines Bipolartransistors:

- Schichtfolge p-n-p oder n-p-n.
- Geringe Basisbreite.
- Der Emitter ist um Zehnerpotenzen höher als die Basis dotiert.

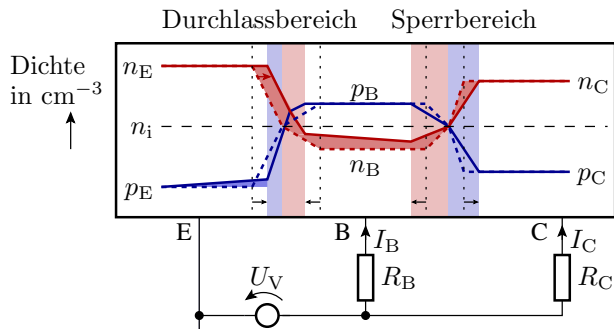




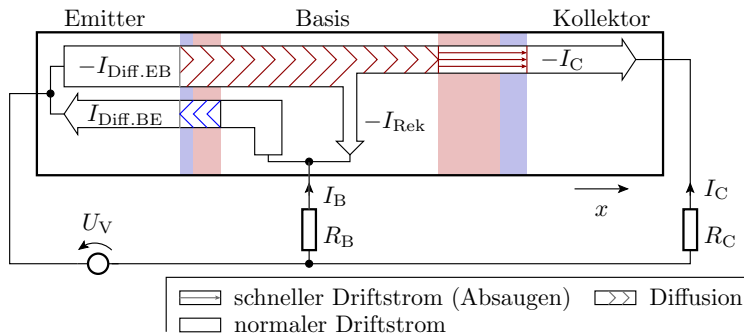
# Transistoreffekt

### Transistoreffekt (nnp-Transistor)

- Emittierelektronen diffundieren in die Basis (schnell<sup>3</sup>),
- diffundieren als Minorität durch das Basisgebiet zum gesperrten BK-Übergang (langsam) und
- werden vom dort herrschenden Feld abgesaugt.



<sup>3</sup>Hoher Dichtegradient in der Sperrschicht.



Der überwiegende Teil der in die Basis diffundierenden Ladungsträger kommt am Kollektor an. Zu Aufrechterhaltung von  $U_{BE}$  für die Diffusion vom Emitter zu Basis müssen an der Basis zwei Stromanteile nachgeliefert werden:

- der Strom  $I_{\text{Diff.BE}}$  durch die von der Basis zum Emitter diffundierenden Ladungen und
- der Strom  $I_{\text{Rek}}$  durch die Rekombination in der Basis.



Diffusionsströme verhalten sich proportional zu ihren Dotierungen:

$$\frac{I_{\text{Diff.BE}}}{N_B} = - \frac{I_{\text{Diff.EB}}}{N_E}$$

( $N_B$  – Basisdotierung;  $N_E$  – Emitterdotierung). Der Anteil der in der Basis rekombinierenden Ladungsträger ist das Verhältnis aus der mittleren Transitzeit  $t_{\text{Tr}}$  durch die Basis und der mittleren Lebensdauer  $\tau_L$  des Minoritätsüberschusses in der Basis:

$$I_{\text{Rek}} \approx - \frac{t_{\text{Tr}}}{\tau_L} \cdot I_{\text{Diff.EB}}$$

Die Summe beider Basisströme beträgt:

$$I_B = -I_{\text{Diff.EB}} \cdot \left( \frac{t_{\text{Tr}}}{\tau_L} + \frac{N_B}{N_E} \right)$$

Mit der Näherung  $I_C \approx -I_{\text{Diff.EB}}$  ist die Stromverstärkung:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \approx \frac{1}{\frac{N_B}{N_E} + \frac{t_{\text{Tr}}}{\tau_L}} \quad (1)$$

Hohe Stromverstärkung verlangt

- kurze Transitzeit  $t_{\text{Tr}}$  durch die Basis,
- Hohe Lebensdauer  $\tau_L$  für  $n \cdot p \gg n_i^2$  in der Basis und
- Basisdotierung viel kleiner Emitterdotierung:  $N_B \ll N_E$ .



### Inversbetrieb

Prinzipiell können Kollektor und Emitter ihre Funktion tauschen. Wenn

- der Basis-Kollektor-Übergang in Durchlassrichtung und
- der Emitter-Basis-Übergang in Sperrrichtung betrieben wird

kommt es auch zum Transistoreffekt. Die vom Kollektor in die Basis diffundierenden Ladungsträger diffundieren überwiegend weiter zum Emitter. Die Stromverstärkung beträgt analog zu Gl. 1:

$$\beta_I = \frac{I_E}{I_B} \approx \frac{1}{\frac{N_B}{N_C} + \frac{t_{TF}}{\tau_L}}$$

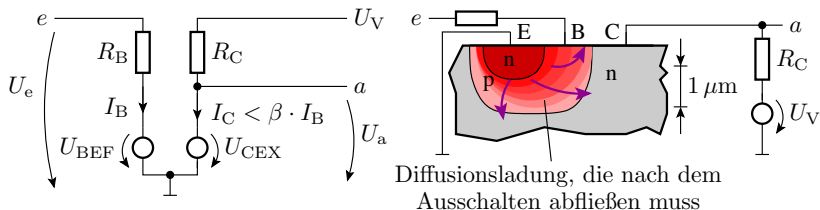
Im Inversbetrieb ersetzt die deutlich niedrigere Kollektordotierung  $N_C$  die Emitterdotierung  $N_E$ . Die Stromverstärkung ist entsprechend deutlich geringer (Richtwert:  $\beta_I \approx 0,05 \cdot \beta$ ).



# Übersteuerung

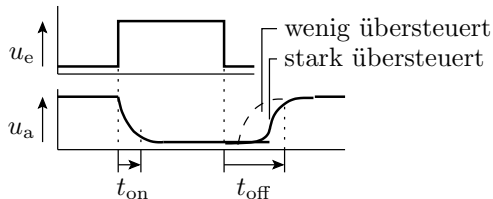
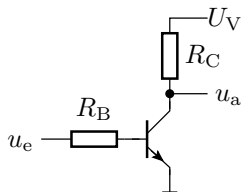
### Übersteuerungsbereich

Bei Übersteuerung ist die Basis-Kollektor-Spannung schwach positiv. Die vom Emitter in die Basis diffundierenden Ladungsträger gelangen nur zum geringen Teil zum Kollektor. Der Rest diffundiert zum Basisanschluss und rekombiniert spätestens dort. Keine weitere Abnahme von  $U_a$  mit steigendem  $U_e$ .



Die stark überhöhte Diffusionsladung bei Übersteuerung verlängert die Ausschaltzeit erheblich.

## Übersteuerung und Schaltgeschwindigkeit

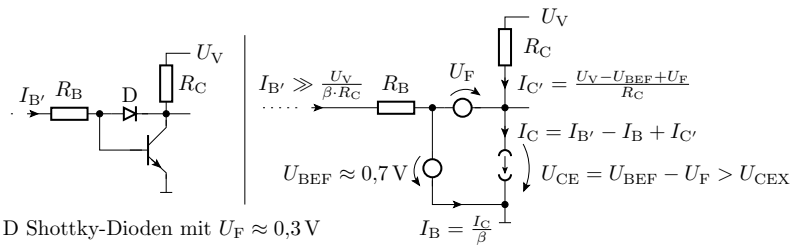


Die Schaltung sei so dimensioniert, dass der Transistor bei kleinem  $u_e$  ausschaltet und bei großem  $u_e$  übersteuert.

- Einschaltverhalten ähnlich wie bei geschaltetem RC-Glied.
- Beim Ausschalten Zusatzverzögerung für den Abbau der Diffusionsladung.
- Je größer  $I_B$  während der Einschaltphase, desto größer die Ausschaltzeit.



## Schottky-Transistor



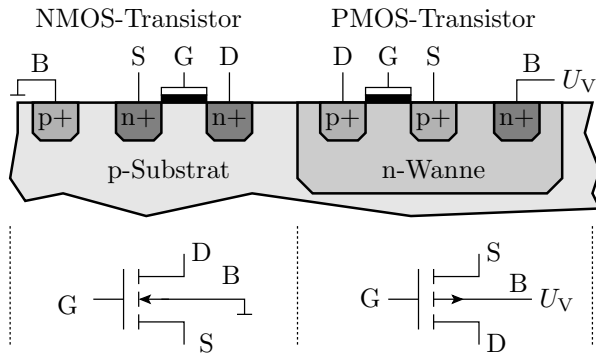
D Schottky-Dioden mit  $U_F \approx 0,3 \text{ V}$

Ein Schottky-Transistor hat eine zusätzliche Schottky-Diode zum Basis-Emitter-Übergang. Eine Schottky-Diode ist ein Metall-Halbleiter-Übergang und hat etwa nur die Hälfte der Flussspannung eines pn-Übergangs (typ. 0,3 V). Bei einem Basisstrom  $I_{B'} > \frac{I_C}{\beta}$  fließt nur so viel Strom in die Basis, dass  $U_{CEE} > U_{CEX}$  bleibt. Der Rest fließt über die Schottky-Diode in den Kollektor. Das verkürzt die Ausschaltzeit erheblich.



# MOS-Transistor

## Aufbau



Die Source-Bulk- und die Drain-Bulk-Übergänge müssen gesperrt sein, sonst Funktion wie Bipolartransistor<sup>4</sup>.

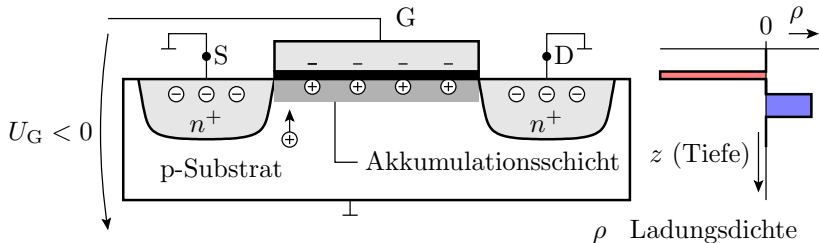
<sup>4</sup>Mit dem Substratanschluss als Basis und Source und Drain als Emitter und Kollektor.



# Feldeffekt

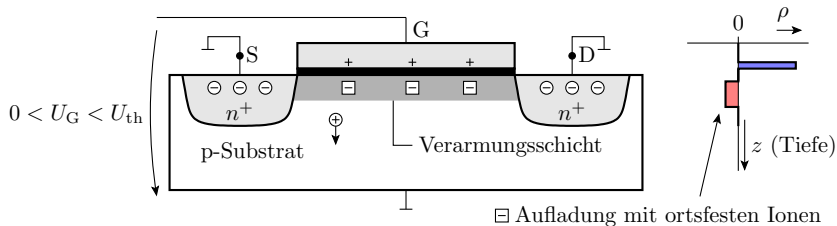
### Feldeffekt (NMOS-Transistor)

- Die Gate-Isolator-Halbleiter-Struktur bildet einen Plattenkondensator.
- Eine negative Gateladung führt zur Ansammlung positiver beweglicher Ladung unter dem Gate.
- Die pn-Übergänge von Source und Drain zum Kanal/Substrat sind gesperrt.



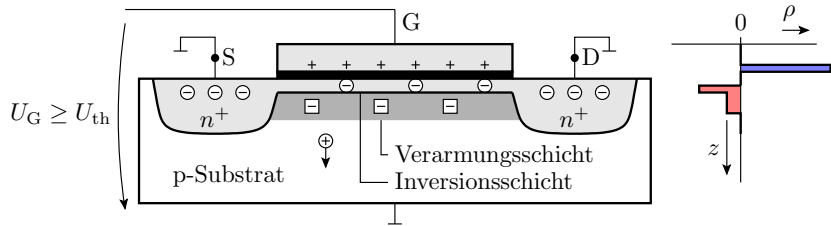
Bei positiver Gate-Kanal-Spannung kleiner der Einschaltspannung  $U_{th}$

- driften die Löcher weg und hinterlassen die ortsfesten negativ geladenen Akzeptoratom.
- Die pn-Übergänge zum Kanal bleiben gesperrt.



Bei einer Gatespannung größer der Einschaltspannung  $U_{th}$

- sinkt die Energie des Leitungsbands im Kanal unter die der Leitungsbandelektronen des Source-Gebiets.
- Vom Source diffundieren bewegliche Elektronen in den Kanal.
- Die Dichte der beweglichen Elektronen im Kanal wächst proportional zur Gate-Kanal-Spannung abzüglich der Einschaltspannung.



## Einschaltspannung

Die Einschaltspannung  $U_{th}$  eines MOS-Transistors hängt von mehreren Parametern ab, u.a.

- von der Kontaktspannung zwischen dem Gatematerial und dem Silizium,
- den Dotierungen und auch
- von Ladungen im Gateoxid und an den Grenzfläche zwischen Oxid und Halbleiter.

Bei Transistoren in CMOS-Gattern wird die Einschaltspannung  $U_{th}$  i.Allg. fertigungstechnisch auf ungefähr 20% Versorgungsspannung  $U_V$  eingestellt:

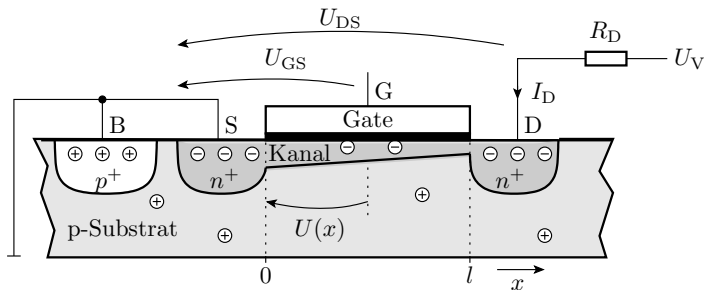
- NMOS:  $U_{th} \approx 0,2 \cdot U_V$
- PMOS:  $U_{th} \approx -0,2 \cdot U_V$





# Aktiver Bereich

## Stromgleichung für den aktiven Bereich



### Bewegliche Ladung im Kanal

$$Q_1(x) = C_1 \cdot (U_{GK}(x) - U_{th}) = C_1 \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x))$$

$Q_1(x)$  – bewegliche Ladung für ein Wegstück  $dx$ ;  $C_1$  – Gate-Kanal-Kapazität für Wegstück  $dx$ ;  $U_{GK}(x)$  – Gate-Kanal-Spannung an der Stelle  $x$ ;  $U(x)$  – Spannung von der Stelle  $x$  zum Source.)



Der Drainstrom als Driftstrom ist das Produkt aus Flächenladung  $Q_1(x)$  und Driftgeschwindigkeit

$$I_D = Q_1(x) \cdot v$$

Die Driftgeschwindigkeit beweglicher Ladungsträger ist das Produkt aus Beweglichkeit  $\mu_n$  und der Feldstärke  $E_x$  in Bewegungsrichtung:

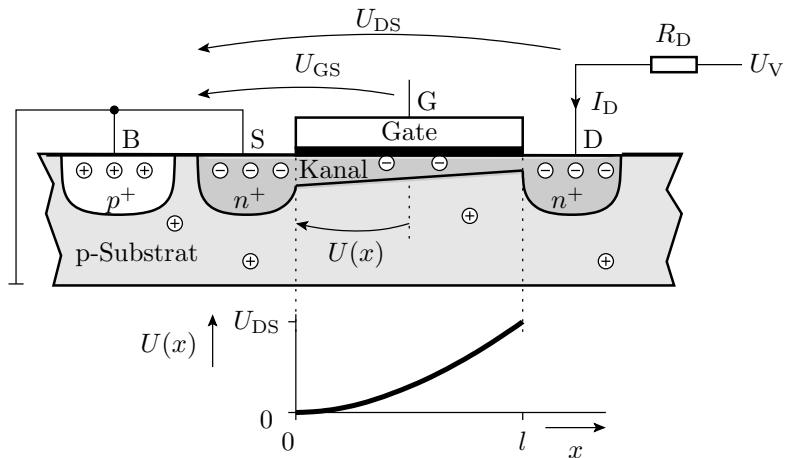
$$v = \mu_n \cdot E_x$$

Die Feldstärke ist gleich der Spannungsänderung in Bewegungsrichtung:

$$E_x = \frac{dU(x)}{dx}$$

Alle Gleichungen zusammen ergeben die nachfolgende Differentialgleichung:

$$I_D = C_1 \cdot \mu_n \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$



$$I_D = C_1 \cdot \mu_n \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$

$$I_D = C_1 \cdot \mu_n \cdot (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$

Die Integration beider Gleichungsseiten über die gesamte Kanallänge

$$I_D \cdot \int_0^l dx = C_1 \cdot \mu_n \cdot \int_0^l (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot \frac{dU(x)}{dx} \cdot dx$$

ergibt links die Kanallänge und rechts das Integral des Spannungsabfalls über dem Kanal:

$$I_D \cdot l = C_1 \cdot \mu_n \cdot \int_{\varphi(0)}^{\varphi(l)} (U_{GS} - U_{th} - U(x)) \cdot dU(x)$$

Mit  $\varphi(0) = 0$  und  $\varphi(l) = U_{DS}$  ergibt sich die bereits genutzte Gleichung für den aktiven Bereich

$$I_D = \frac{C_1 \cdot \mu_n}{l} \cdot \left( (U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right)$$

mit der Steilheit:  $K = \frac{C_1 \cdot \mu_n}{l}$



Gate-Kanal-Kapazität  $C_1$  für ein Wegstück  $dx$  beträgt nach dem Plattenkondensatormodell

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{\text{ox}} \cdot w}{d_{\text{ox}}}$$

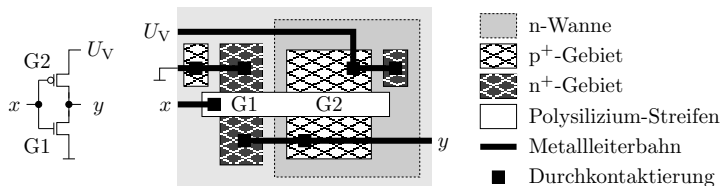
( $\varepsilon_{\text{ox}}$  – Dielektrizitätskonstante des Gateoxids;  $d_{\text{ox}}$  – Dicke des Gateoxids;  $w$  – Kanalbreite). Eingesetzt in die Gleichungen zuvor:

$$K = \mu_n \cdot \frac{\varepsilon_{\text{ox}}}{d_{\text{ox}}} \cdot \frac{w}{l}$$

Sie verhält sich die Steilheit proportional zum Breite-zu-Länge-Verhältnis  $w/l$ .

### PMOS-Transistor

Ein PMOS-Transistor verhält sich fast genauso wie ein NMOS-Transistor, nur das der Drainstrom und alle Spannungen negativ sind und dass die Löcherbeweglichkeit nur etwa halb so groß wie die Beweglichkeit der Leitungsbandelektronen ist. In einem CMOS-Gatter sind deshalb die PMOS-Transistoren doppelt so breit wie die NMOS-Transistoren.

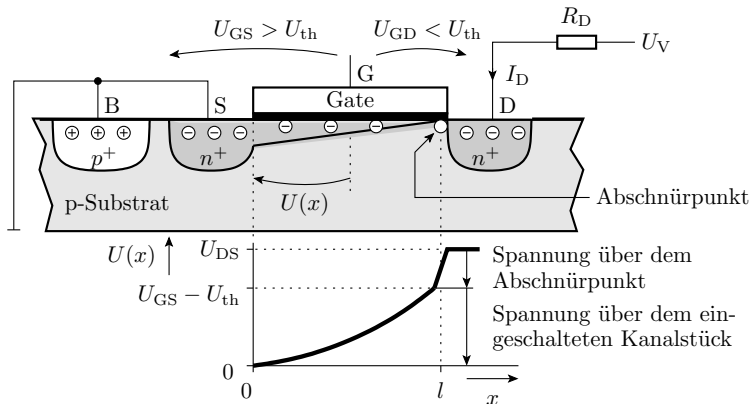




# Abschnürbereich



## Abschnürbereich



Wenn der Kanal auf der Source-Seite ein- und auf der Drainseite ausgeschaltet ist, fällt die restliche Spannung  $U_{DS} - U_{GS} + U_{th}$  über dem eingeschnürten Kanalstück ab.



Die Länge des Abschnürbereichs regelt sich so ein, dass die ankommenden Ladungsträger zum Drain abfließen können.

Der ankommende Strom  $I_D$  hängt nicht von der Spannung über dem Abschnürpunkt ab, sondern ist für alle  $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$  genauso groß wie am Bereichsumschaltunkt  $U_{DS} = U_{GS} - U_{th}$ :

$$\begin{aligned} I_D &= K \cdot \left( (U_{GS} - U_{th}) \cdot (U_{GS} - U_{th}) - \frac{(U_{GS} - U_{th})^2}{2} \right) \\ &= \frac{K}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 \end{aligned}$$

Die bisher verwendeten Stromgleichungen

$$I_D = \begin{cases} 0 & U_{GS} \leq U_{th} \\ K \cdot \left( (U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right) & (U_{GS} > U_{th}) \wedge (U_{DS} \leq U_{GS} - U_{th}) \\ \frac{K}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 & (U_{GS} - U_{th}) \wedge (U_{DS} > U_{GS} - U_{th}) \end{cases}$$

basieren auf der Annahme, dass die Breite des Abschnürbereichs gegenüber der Kanallänge  $l$  vernachlässigbar ist.



# Aufgaben



### Aufgabe 8.1: Halbleiter

- 1 Unter welchen Bedingungen ist ein Elektron in einem Festkörper beweglich?
- 2 Was ist ein bewegliches Loch?
- 3 Wie wird die Dichte der beweglichen Elektronen in einem n-Gebiet eingestellt?
- 4 Welche Akzeptordichte und welche Dichte von beweglichen Elektronen besitzt ein p-Gebiet mit einer Löcherdichte von  $p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  bei  $T = 300 \text{ K}$ ?



### Aufgabe 8.2: Bipolartransistor

- 1 Warum wird das Basisgebiet eines Bipolartransistors um mehrere Zehnerpotenzen schwächer als das Emittergebiet dotiert?
- 2 Warum muss das Basisgebiet eines Transistor sehr dünn sein?
- 3 Welchen Nachteil hat die Übersteuerung von Bipolartransistoren in Logikgattern?