

# Schalttechnik & Logikgatter

Benjamin Tröster

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

21. November 2021

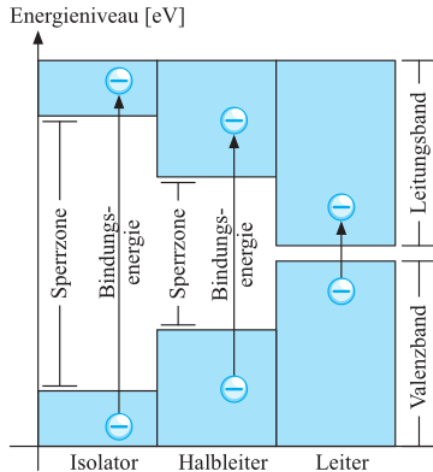
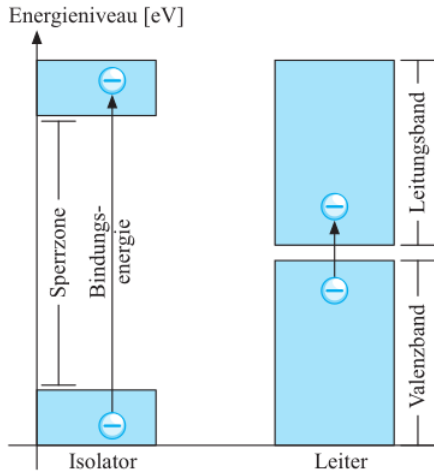
# Fahrplan

Wiederholung

Halbleiter

Transistor

# Leiter & Bändermodell



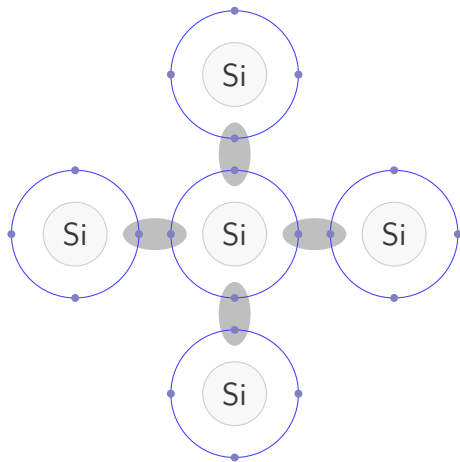
- ▶ Aufnahme und Abgabe von Energie bestimmt, ob Elektron zwischen Schalen wechseln kann
- ▶ Elektronen, die z. B. aufgrund thermischer Erhitzung Energie aufnehmen, bewegen sich in Richtung der äußeren Schalen.
- ▶ Überschreitung des Energieniveau, so verliert das Elektron seine Bindung
  - ▶ Valenzelektron wird ein freies Leitungselektron
- ▶ Lösen des Elektron aus Atom → Bindungsenergie aufgebracht werden
- ▶ Unterscheidet sich zwischen verschiedenen chemischen Substanzen stark!
  - ▶ Isolatoren, z. B. Hartgummi sehr hoch
  - ▶ Kupfer/Silber, sehr geringe Energiemenge ausreichend, um freie Leitungselektronen zu erzeugen

# Reine Halbleiter

- ▶ Spezielle Festkörper: sowohl Isolator wie auch elektrischer Leiter
- ▶ Eigenschaft aufgrund chemisch/physikalischen Struktur
- ▶ Bindungsenergie: Material bei geringen Temperaturen zu Isolator
- ▶ Aber Bindungsenergie klein genug, um bei mäßigen Temperaturen größeren Anzahl Elektronen überwunden zu werden
  - ▶ Bsp.: Germanium eine Temperatur von ca. 50 °C gute elektrische Leitfähigkeit

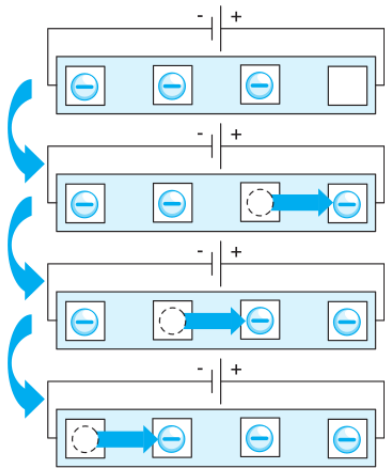
# Siliziumgitter

- ▶ Struktur des Siliziumkristalls
- ▶ Jedes Atom ist von 4 weiteren Atomen umgeben
- ▶ Jeweils zwei gemeinsam genutzte Valenzelektronen eine stabile Verbindung



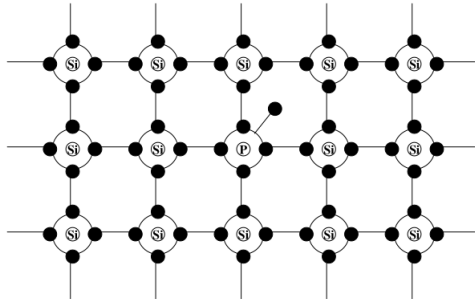
# Eigenleitung im Halbleiterkristall

- ▶ Freigesetzten Leitungselektronen richten sich im elektrischen Feld aus
- ▶ Freie Elektronen wandern in Richtung der positiven Spannungsquelle
- ▶ Gleichzeitig entstehende Elektronenlöcher bewegen sich in entgegengesetzter Richtung auf den Minuspol zu



# Elektronenüberschussleiter: $n$ -Leiter

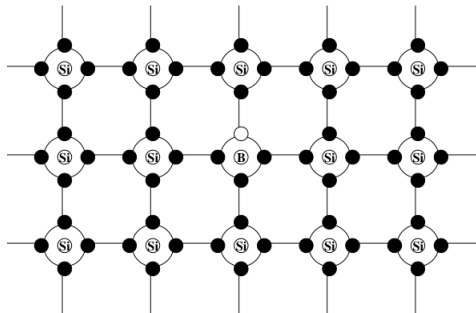
- ▶ Struktur eines Elektronenüberschussleiters ( $n$ -Leiter)
- ▶ Einbau von Phosphoratomen zusätzliche Valenzelektronen im Gitter
- ▶ Zusätzliche Elektronen können sich nahezu ungehindert durch die Kristallstruktur bewegen





# Elektronenmangelleiter: $p$ -Leiter

- ▶ Struktur eines Elektronenmangelleiters ( $p$ -Leiter)
- ▶ Einbau von Aluminiumatomen/Bohr entstehen künstliche Elektronenlöcher
- ▶ Elektronenlöcher wirken, wie positive Ladungsträger

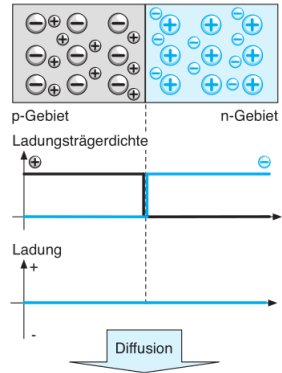


# Leiter/Halbleiter

- ▶ Halbleiter sind Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit geringer als von Leitern und größer als von Nichtleitern sind
- ▶ Halbleiter wie Silizium und Germanium verfügen über eine Kristallstruktur
- ▶ Die Kristallstruktur wird mit hoher Reinheit hergestellt
- ▶ Auf ca.  $10^{10}$  Atome kommt ein Fremdatom
- ▶ Die Eigenleitfähigkeit von Halbleitern basiert auf:
  - ▶ Verunreinigung
  - ▶ Aufbrechen von Kristallbindungen
  - ▶ Oberflächen-Leitfähigkeit

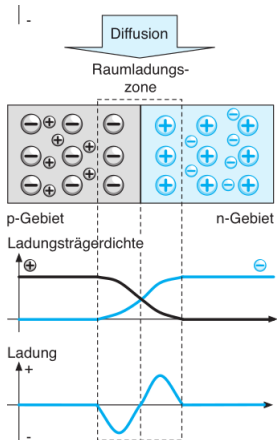
# Halbleiterdioden

- ▶ Dioden: spezielle Schaltelemente
- ▶ Begrenzung des Stromfluss richtungsabhängig
- ▶ In Durchlassrichtung neutral
- ▶ In Sperrrichtung als Isolator



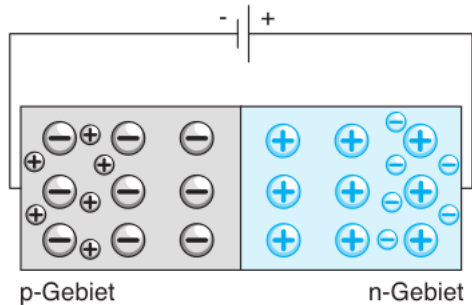
# Halbleiterdioden – $pn$ -Übergang

- ▶ Dioden: spezielle Schaltelemente
- ▶ Begrenzung des Stromfluss richtungsabhängig
- ▶ In Durchlassrichtung neutral
- ▶ In Sperrrichtung als Isolator



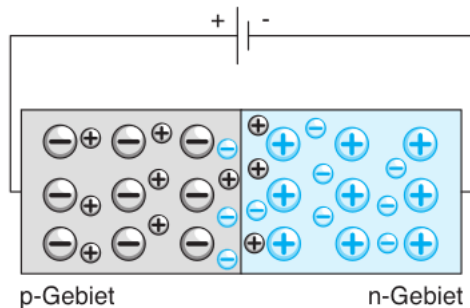
# Halbleiterdioden – $pn$ -Übergang

- ▶ Dioden: spezielle Schaltelemente
- ▶ Begrenzung des Stromfluss richtungsabhängig
- ▶ In Durchlassrichtung neutral
- ▶ **In Sperrrichtung als Isolator**
  - ▶ Anlegen einer Spannung in Sperrrichtung
  - ▶ Minuspol:  $p$ -Schicht, Pluspol  $n$ -Schicht
  - ▶ Ladungsträger Richtung Spannungspole weggezogen
  - ▶ D.h. Vergrößerung Sperrschicht  $\rightarrow$  Isolator



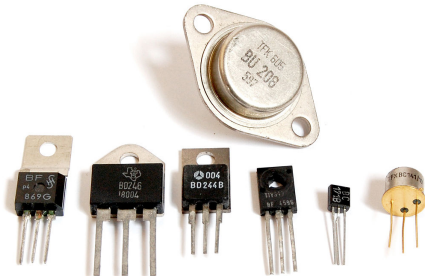
# Halbleiterdioden – *pn*-Übergang

- ▶ Dioden: spezielle Schaltelemente
- ▶ Begrenzung des Stromfluss richtungsabhängig
- ▶ **In Durchlassrichtung neutral**
  - ▶ Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung
  - ▶ Pluspol: *p*-Schicht, Minus *p*-Schicht
  - ▶ Freie Ladungsträger bewegen sich aufeinander zu
  - ▶ D.h. Rekombination i.d. Sperrschicht → Leiter
- ▶ In Sperrrichtung als Isolator



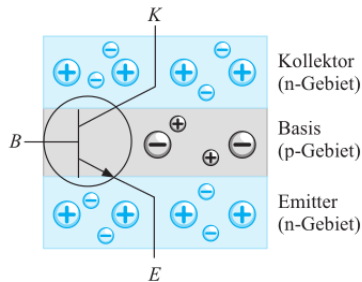
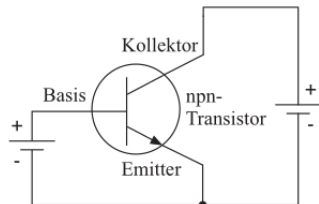
# Transistor – Transfer Resistor

- ▶ Gist: steuerbarer Widerstand
- ▶ Kann elektrisches Signal verstärken
- ▶ Digital ansteuerbar zum Ein- oder Ausschalten
- ▶ Bipolare Transistoren
  - ▶ *n*p*n*-Transistor
  - ▶ *p*n*p*-Transistor
- ▶ Unipolare Transistoren – Feldeffekttransistor
  - ▶ J-FET
  - ▶ MOS-FET



# nnp-Transistor

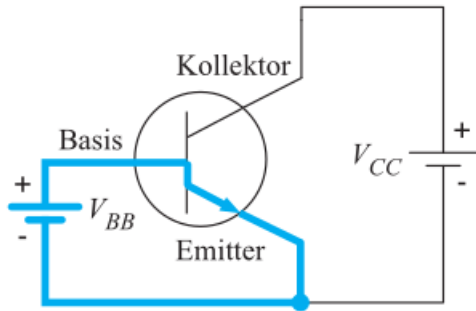
- ▶ Emitter & Kollektor dienen Zufluss bzw. Abfluss der Elektronen
- ▶ Basis: Steueranschluss regelt den Stromfluss zwischen Emitter und Kollektor
- ▶ Steueranschluss verstärkende Wirkung:
  - ▶ Geringe Änderung Stromfluss auf Emitter-Basis-Strecke
  - ▶ → große Änderung des Stromflusses auf Emitter-Kollektor





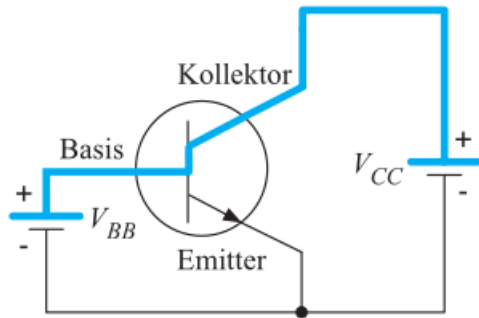
## *npn*-Transistor: Basis-Emitter-Strecke

- ▶ *pn*-Übergang ist in Durchlassrichtung gepolt
- ▶ Ermöglicht in Abhängigkeit zur angelegten Spannung einen Stromfluss im Basisstromkreis



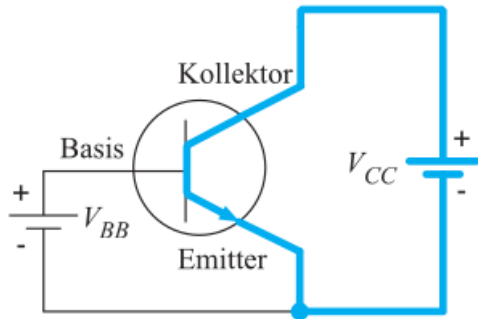
# *npn*-Transistor: Basis-Kollektor-Strecke

- ▶ Basis besitzt gegenüber Kollektor negatives elektrisches Potenzial
- ▶ Stromfluss wird durch den in Sperrichtung gepolten *pn*-Übergang unterbunden



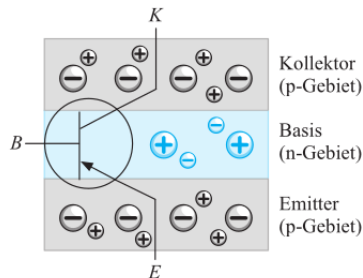
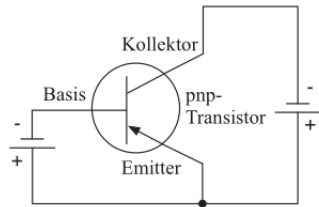
# *npn*-Transistor: Emitter-Kollektor-Strecke

- ▶ Zwischen Emitter und Kollektor stellt sich ein Stromfluss ein
- ▶ Stärke proportional mit der Stärke des Basisstroms zunimmt



# *pnp*-Transistor: Emitter-Kollektor-Strecke

- ▶ Zusammensetzung der Halbleiter „invers“ zu *pnp*
- ▶ Basis *n*-Gebiet
- ▶ Emitter und Kollektor dagegen *p*-Gebiet
- ▶ Positive Spannung am Emitter eine Flut von Elektronenlöchern aus dem *p*-Leiter in das *n*-Gebiet
- ▶ Negative Spannung : fließt geringer Teil der Defektelektronen über Basis ab
- ▶ Großteil der Elektronenlöcher wird durch die starke negative Kollektorspannung in die obere *p*-Schicht gezogen
- ▶ → fließt als Kollektorenstrom ab



# Buffer-Schaltungen mit *npn*-Transistor

## buffer

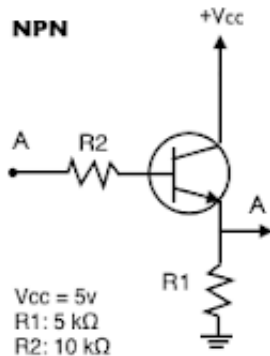
truth table

A	Out=A
0	0
1	1

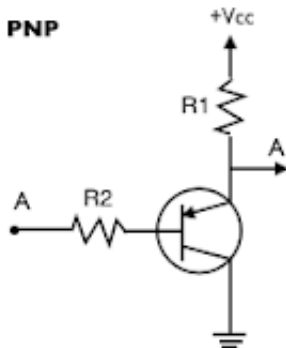
symbol



NPN



PNP



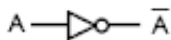
# Not-Schaltungen mit *npn*-Transistor

## Not

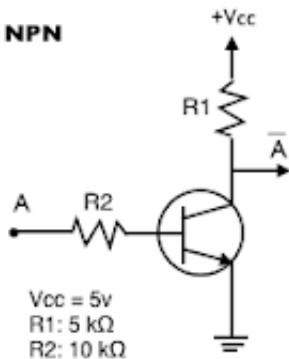
truth table

A	Out= $\bar{A}$
0	1
1	0

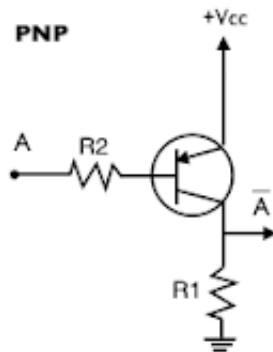
symbol



NPN



PNP



# AND-Schaltungen mit *npn*-Transistor

## NPN And

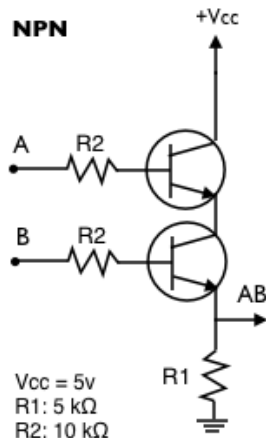
truth table

A	B	$AB = \overline{\overline{A} + \overline{B}}$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

symbol



NPN



# NAND-Schaltungen mit *npn*-Transistor

## NPN Nand

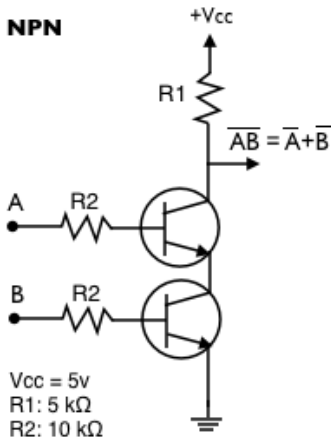
truth table

A	B	$\overline{AB} = \overline{A+B}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

symbol



NPN





# OR-Schaltungen mit *npn*-Transistor

## NPN Or

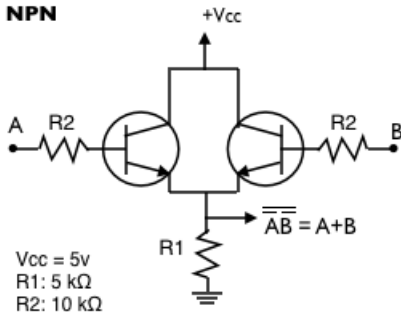
truth table

A	B	$\overline{\overline{A+B}}$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

symbol



NPN



# NOR-Schaltungen mit *npn*-Transistor

## PNP Nor

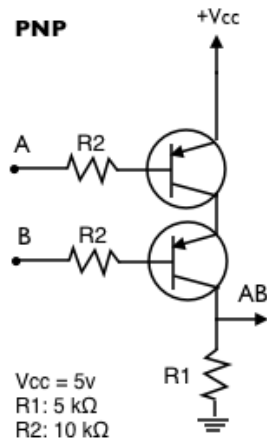
truth table

A	B	$\overline{A+B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

symbol

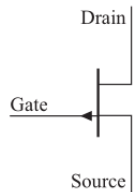
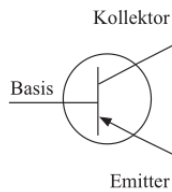
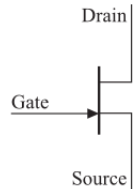
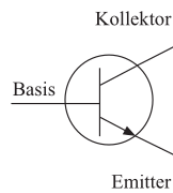


PNP



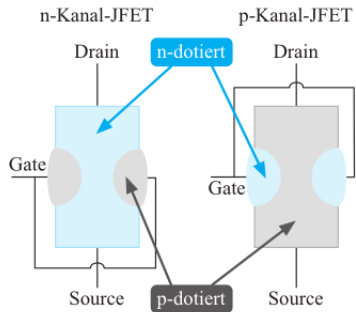
# Feldeffekttransistoren: JFET

- ▶ Funktional Äquivalent
- ▶ Gate-Anschluss JFET entspricht der Basis
- ▶ Drain-Anschluss ist der Kollektor
- ▶ Source-Anschluss dem Emitter

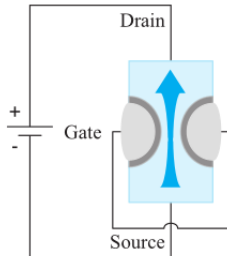


# Feldeffekttransistoren: JFET

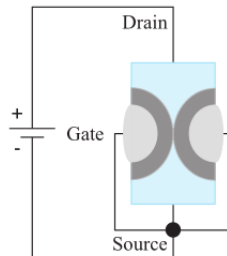
- ▶ Source und Drain sind durch dotierten Halbleiterkanal verbunden
- ▶ Mitte durch zwei komplementär dotierte Gebiete – dem Gate
- ▶ Kanal  $n$ -dotiert und das Gate  $p$ -dotiert
  - ▶  $n$ -Kanal-JFET
- ▶ Kanal  $p$ -dotierten und  $n$  dotierten Gate-Gebiet
  - ▶  $p$ -Kanal-JFET



# $n$ -Kanal-JFET

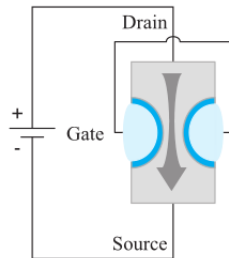


Ohne angelegte Gate-Spannung kann die Raumladungszone den n-Kanal nicht schließen. Zwischen Source und Drain fließt Strom.

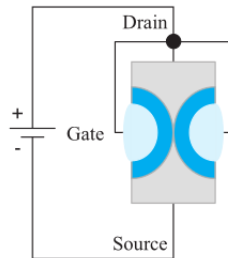


Eine negative Gate-Spannung führt zu einer Vergrößerung der Raumladungszone. Der Kanal wird geschlossen und der Stromfluss unterbunden.

# p-Kanal-JFET



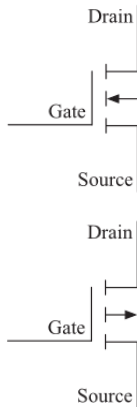
Ohne angelegte Gate-Spannung kann die Raumladungszone den p-Kanal nicht schließen. Zwischen Source und Drain fließt Strom.



Eine positive Gate-Spannung führt zu einer Vergrößerung der Raumladungszone. Der Kanal wird geschlossen und der Stromfluss unterbunden.

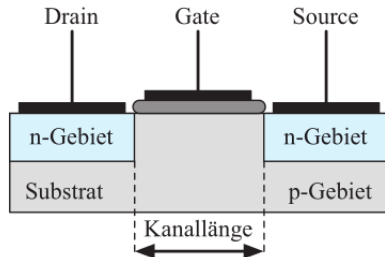
# MOS-Feldeffekttransistoren (MOSFETs)

- ▶ MOS-Technik (MOS = Metal Oxide Semiconductor)
- ▶ Funktional entspricht MOSFET weitgehend dem JFET
  - ▶ Stromfluss zwischen Source- & Drain-Anschluss, Gate angelegtes elektrisches Feld beeinflusst
  - ▶ Wieder zwei Varianten:  $p$  und  $n$



# MOS-Feldeffekttransistoren (MOSFETs)

- ▶ *p*-dotierten Substrat
- ▶ Drain- und Source-Anschlüsse auf *n*-dotierter Gebiete
- ▶ Dazwischen Gate, das als dünne Metall- oder Polysiliziumschicht auf Substratoberfläche
- ▶ Gate und Substrat isolierendes Dielektrikum voneinander getrennt
  - ▶ Wirkt, wie kleiner Kondensator (speichert also die elektrische Ladung)



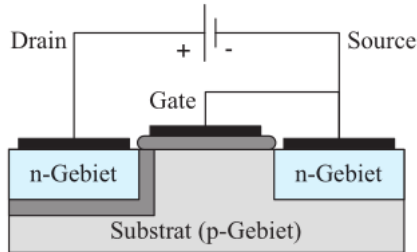


# $n$ -MOS-Feldeffekttransistoren

- ▶  $V_{DS}$  die Spannung Drain-Source-Strecke
- ▶  $V_{GS}$  die Spannung Gate-Source-Strecke
- ▶ Source-Anschluss und das Substrat das gleiche elektrische Potenzial
  - ▶  $V_{GS}$  gleichermaßen die Spannung zwischen Gate & Substrat.

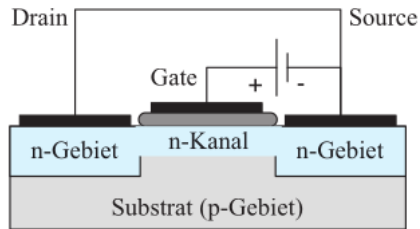
$$V_{GS} = 0$$

- ▶ Drain, Substrat und Source operieren als klassischer *npn*-Übergang
- ▶ Halbleiterkristall verhält sich wie entgegengesetzte Dioden
- ▶ D.h. Stromfluss in beide Richtungen unterbrochen
- ▶ Drain- an Pluspol & Source-Anschluss Minuspol, so sperrt der linke *pn*-Übergang
- ▶ Durch Umpolen der Spannung in Durchlassrichtung geschaltet
  - ▶ Rechter Übergang in den sperrenden Zustand, verhindert den Ladungstransport



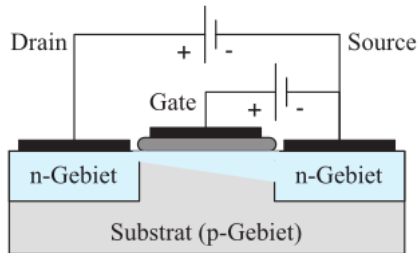
$$V_{GS} > 0, V_{DS} = 0$$

- ▶ Positive Spannung gegenüber dem Source-Anschluss
- ▶ Minoritätsträger –  $p$ -dotierten Substrats die Elektronen, nach oben gezogen
- ▶ Grenzschicht zwischen Dielektrium und Substrat rekombinieren mit Elektronenlöchern
- ▶ Führt zur Verarmung der Majoritätsträger
- ▶ Überschreitet die Spannung Schwellwert,
  - ▶ Mehr Elektronen in Grenzschicht gezogen,
  - ▶ als für eine vollständige Rekombination gebraucht werden
- ▶ Kleiner, leitender  $n$ -Kanal entsteht
- ▶ Höhere Spannung  $\rightarrow$  höherer Durchfluss



$$V_{GS} > 0, V_{DS} > 0$$

- ▶ Anlegen der Spannung Gate & Source → leitende Inversionszone
- ▶ Spannung zwischen den beiden Anschlüssen: fließt Strom im geöffneten Kanal
- ▶ Verengung der Inversionszone durch die entstehenden elektrischen Felder Richtung des Drain-Anschlusses
- ▶ Ab gewisser Spannung: freien Ladungsträgern können nicht mehr passieren
- ▶ Sukzessive Erhöhung Spannung Drain-Source-Strecke ab Wert keiner weiteren Erhöhung des Stromflusses führt



# Quellen I