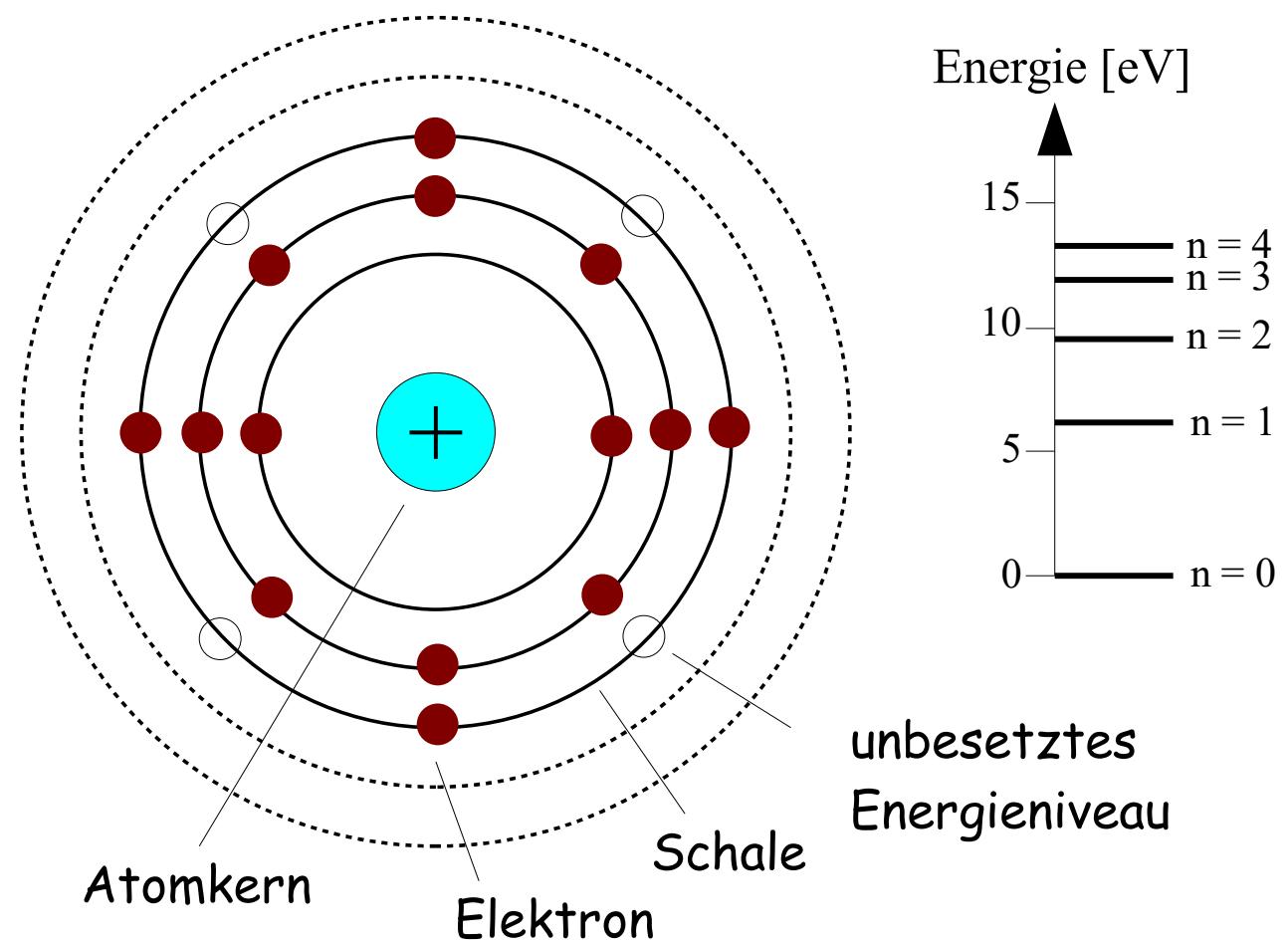


Atommodell

- Ausgangspunkt: Einfaches „klassisches“ Atommodell

- Elektronen besetzen diskrete Energieniveaus in den Schalen des Atoms
- Freie Plätze werden durch Elektronen benachbarter Atom besetzt

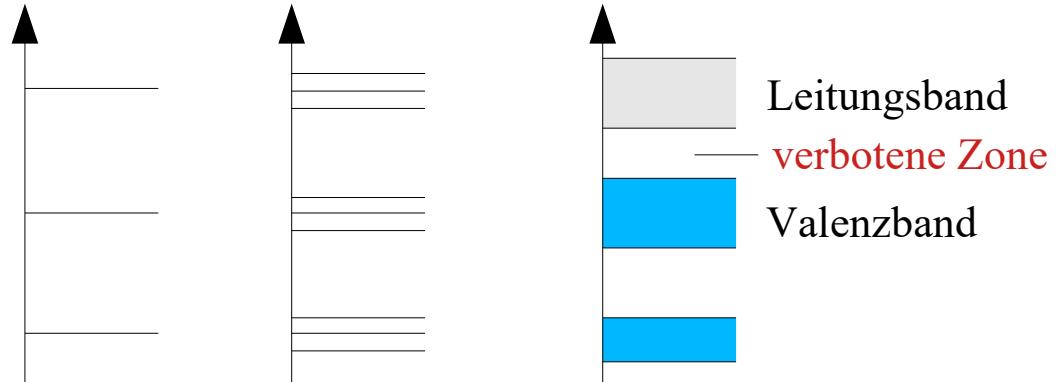


Atommodell

- Elektrische Leitung

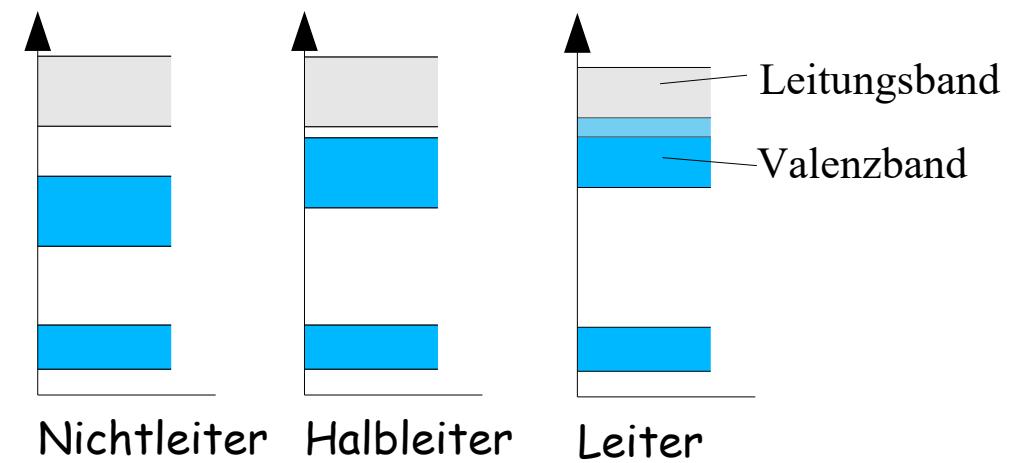
- Im Kristallgitter überlappen sich die diskreten Energieniveaus zu Energiebändern
- Zum Ladungstransport müssen freie Ladungsträger zur Verfügung stehen, Elektronen müssen Energieniveau des Leitungsbandes erreichen
- Nichtleiter:
 - Elektronen an Atom gebunden
- Leiter:
 - Elektronen nicht an Atom gebunden (Ladungswolke)
- Halbleiter:
 - Elektronen nur nach thermischer Anregung zeitweise verfügbar

verbotene Zone = nicht mögliche Energiezustände



Einzelatom Molekül
(3 Atome)

Kristall

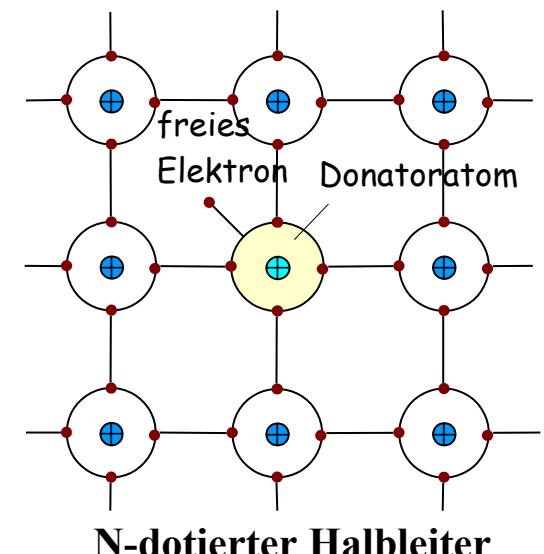
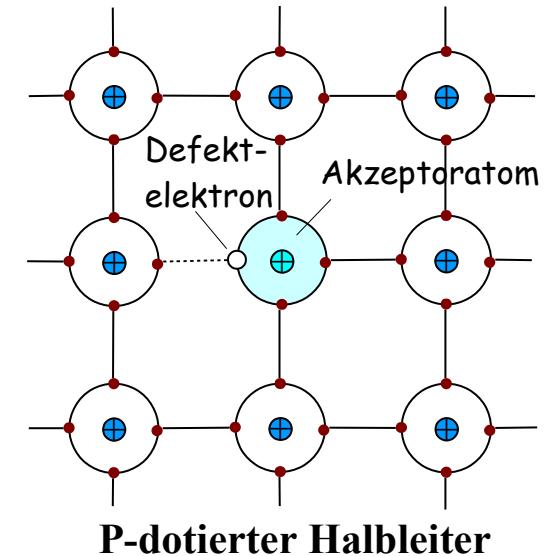


Nichtleiter Halbleiter

Leiter

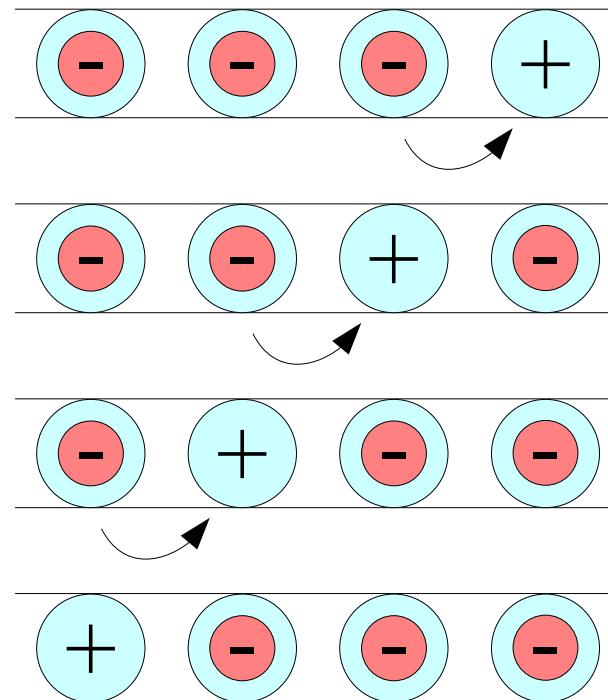
Dotierung

- Störstellen-Dotierung
 - Anreicherung des Halbleiters durch gezielte "Verunreinigung"
 - Störstellen (Fremdatome) erzeugen freie Ladungsträger
- P-dotierter Halbleiter
 - Akzeptoren liefern freie Löcher
- N-dotierter Halbleiter
 - Donatoren liefern freie Elektronen



Löcherleitung

- Schematische Darstellung der Löcherleitung:
 - Die Elektronen bewegen sich von links nach rechts
 - Gleichzeitig wandert das Loch (Defektelektronen) von rechts nach links

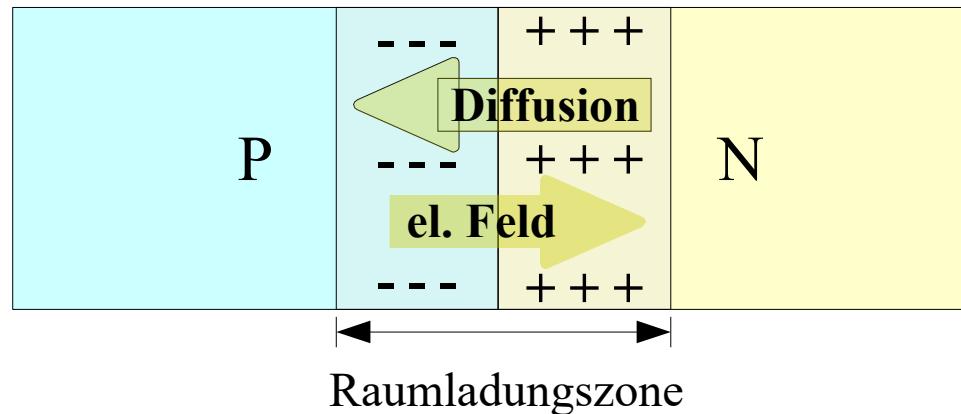


- Konsequenz:
 - Für weitere Betrachtung ist (negative) Elektronenleitung äquivalent zur (positiven) Löcherleitung

Diode - Funktionsprinzip

- PN-Übergang

- Freie Elektronen aus dem N-Bereich diffundieren in den P-Bereich
- Gleichzeitig diffundieren die Löcher in den N-Bereich
- Am PN-Übergang entsteht eine Raumladungszone:
 - P-Bereich negativ geladen
 - N-Bereich positiv geladen
- Die Raumladungszone verhindert weitere Diffusion (Diffusionsspannung)

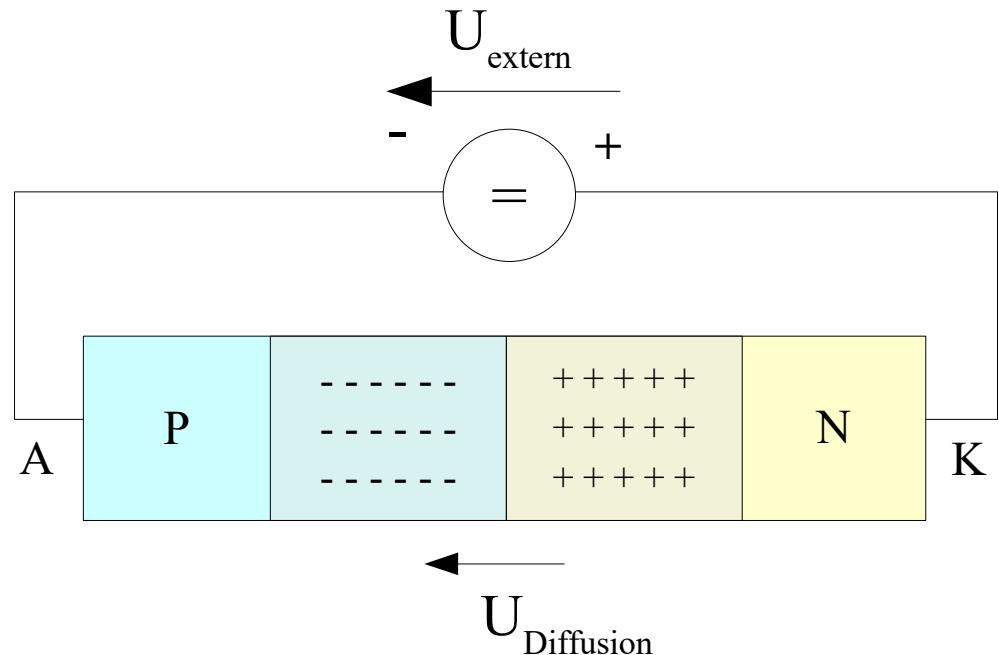


Diode - Funktionsprinzip

- Polung in Sperrrichtung
 - P-Bereich: Elektronen besetzen freie Löcher
 - N-Bereich: Freie Elektronen werden abgezogen
- Auswirkung
 - Es stehen keine freien Ladungsträger (Elektronen/Löcher) zur Verfügung
 - Raumladungszone wird verbreitert
 - Kein Stromfluss !!!

Diode in Sperrrichtung:

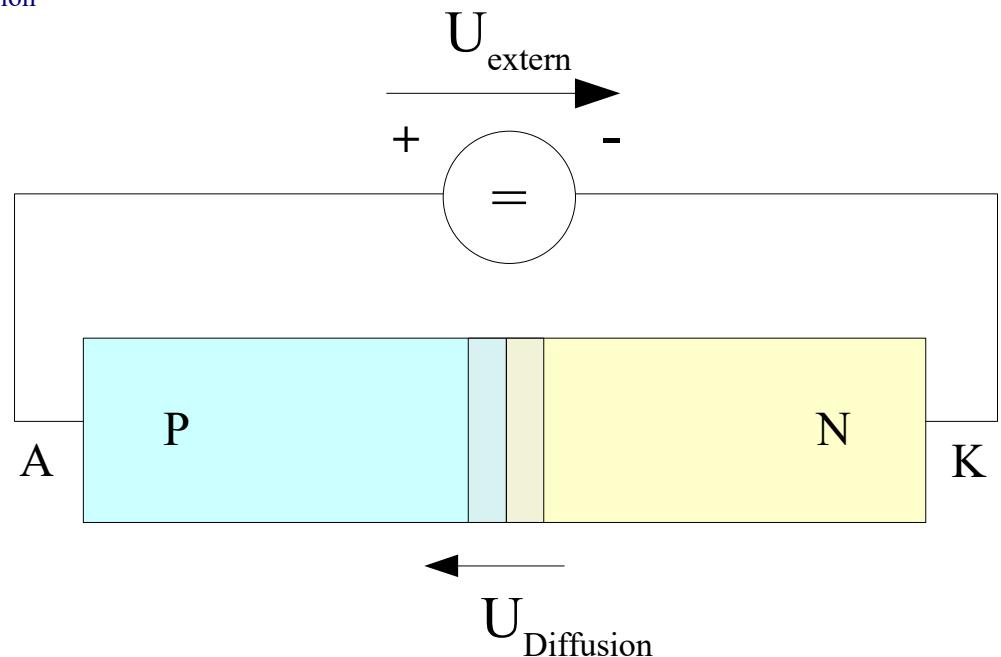
Die äußere Spannung vergrößert die Diffusionsspannung, der Sperrbereich wird dadurch vergrößert



Diode - Funktionsprinzip

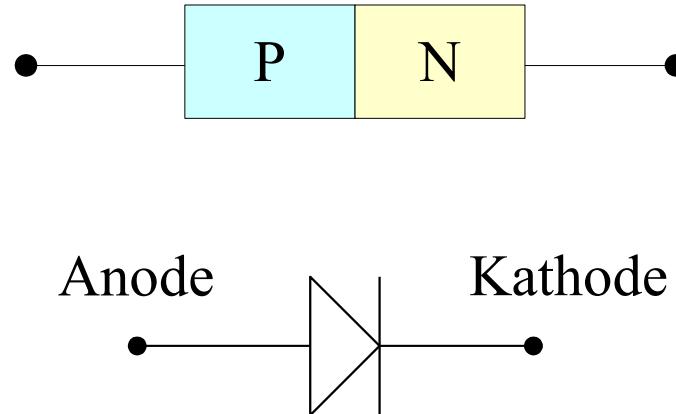
- Polung in Durchlassrichtung
 - P-Bereich: Elektronen werden abgezogen
 - N-Bereich: Freie Elektronen werden nachgeliefert
- Auswirkung
 - Es stehen ausreichend freie Ladungsträger (Elektronen/Löcher) zur Verfügung
 - Raumladungszone wird abgebaut
 - Stromfluss möglich, wenn $U_{\text{extern}} > U_{\text{Diffusion}}$!!!

Diode in Durchlassrichtung:
Die äußere Spannung wirkt der Diffusionsspannung entgegen, der Sperrbereich wird dadurch aufgehoben



Diode - Elektrische Anschlüsse

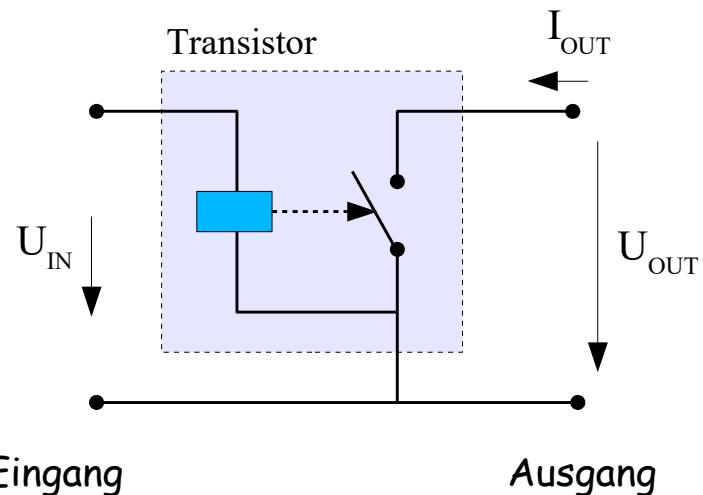
- Diode = PN-Übergang
- Anschlüsse
 - Anode (P-Schicht)
 - Kathode (N-Schicht)
- Schaltzeichen
- Funktion
 - Stromfluss nur in einer Richtung (von Anode zur Kathode) möglich
- Anwendung
 - Gleichrichter, Verpolungsschutz, Überspannungsschutz, Spannungsreferenz



Transistor

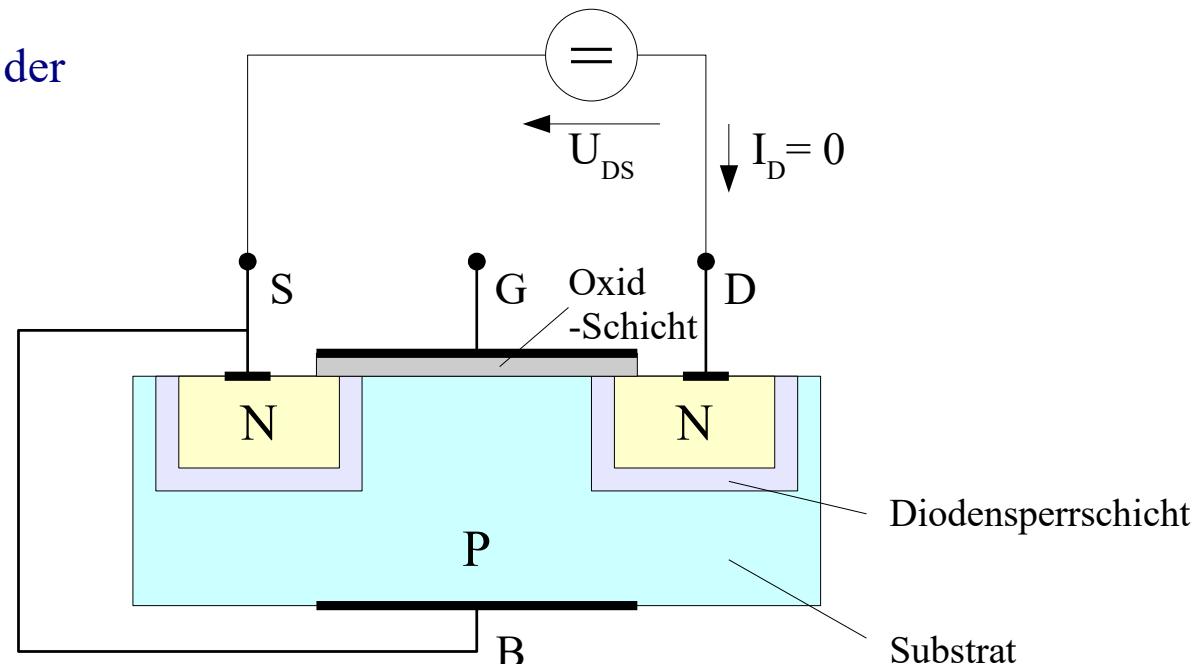
- Zur Realisierung digitaltechnischer Schaltungen wird ein elektronisch gesteuerter Schalter benötigt
- Zum Beispiel:
 - U_{IN} klein \rightarrow Schalter offen $\rightarrow I_{OUT} = 0$
 - U_{IN} groß \rightarrow Schalter geschlossen $\rightarrow U_{OUT} = 0$

- Entscheidene Eigenschaften:
 - Kleinste Strukturgröße (\sim Nanometer)
 - Schnelligkeit
 - Verschleißfreiheit



Feldeffekttransistor (MOSFET)

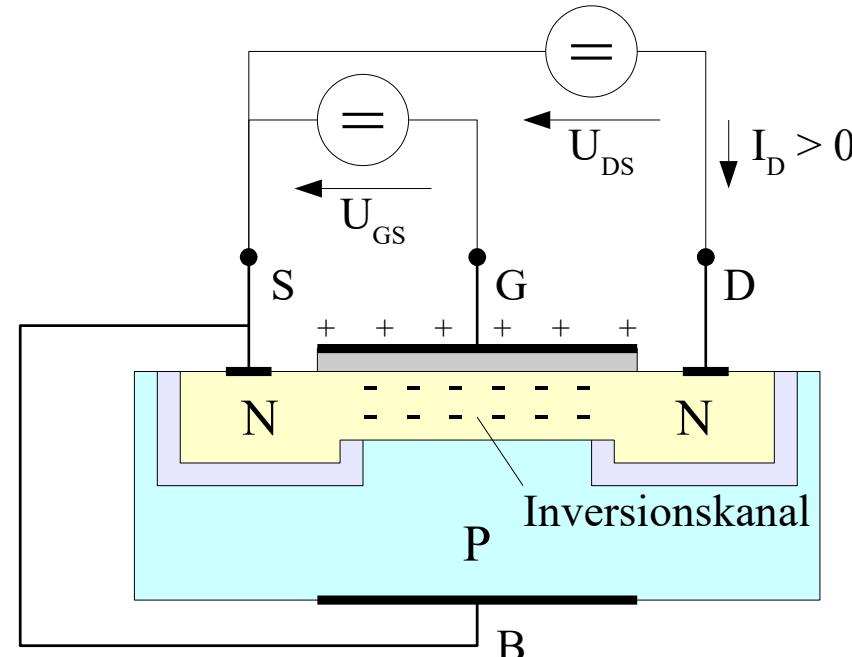
- MOSFET (Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor)
- Aufbau
 - In einem P-dotierten Substrat werden zwei N-dotierte Zonen eingelassen, Anschlüsse **Source (S)** und **Drain (D)**
 - Zwischen Drain und Source befindet sich eine leitfähige Ebene, die durch eine isolierende Oxidschicht von Substrat getrennt ist, Anschluss **Gate (G)**
- Funktionsweise
 - Aufgrund des PN-Überganges ist der Drain-Source-Übergang zunächst gesperrt (Diodenwirkung)



Feldeffekttransistor (MOSFET)

- Funktionsweise

- Durch Anlegen einer Gate-Source-Spannung U_{GS} wird das Gate aufgeladen
- Freie Ladungsträger (Elektronen) werden aus dem Substrat in die Nähe des Gate angezogen
- Unterhalb des Gate stehen jetzt ausreichend Ladungsträger zur Verfügung, die die Sperrsicht aufheben
- Diese ermöglichen einen Stromfluss I_D zwischen Source und Drain

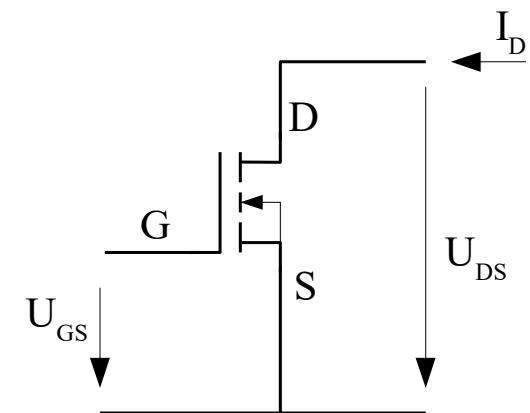
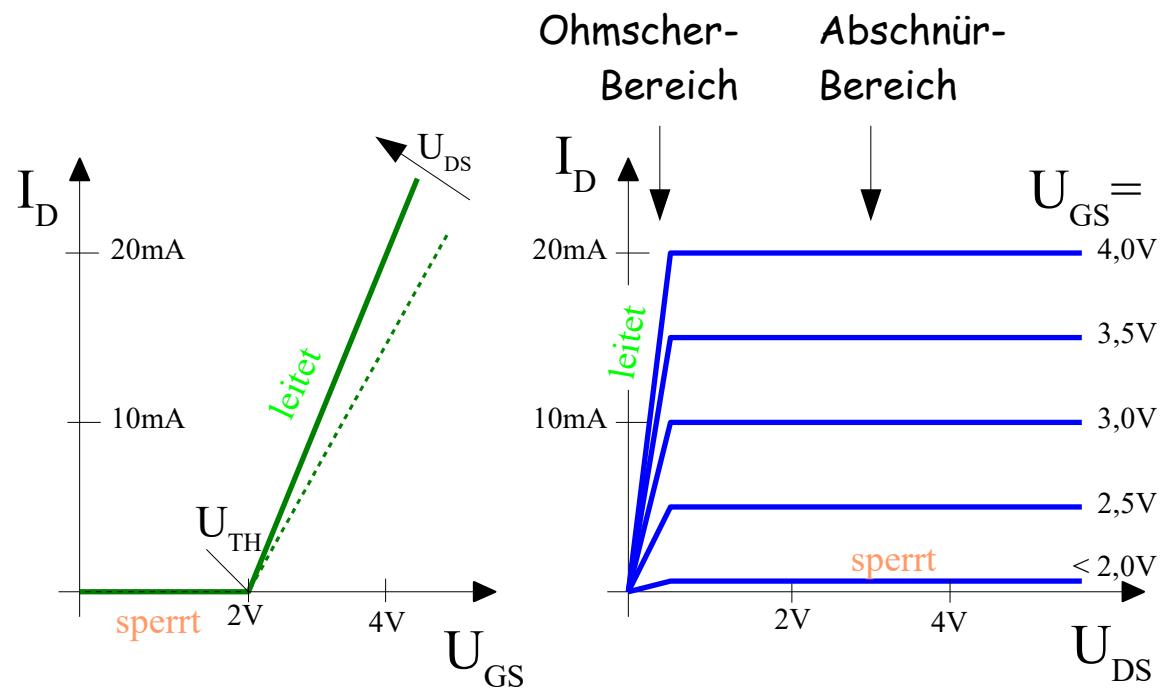


Kennlinie (MOSFET)

- Kennlinie eines N-Kanal-MOSFET

- Übertragungskennlinie:
 - Drainstrom I_D setzt mit $U_{GS} > U_{TH}$ ein

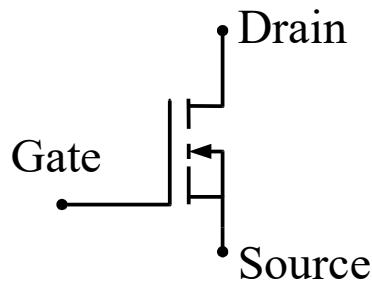
- Ausgangskennlinie:
 - **Ohmscher Bereich:**
Steigung ist von U_{GS} abhängig
→ spannungsgesteuerter Widerstand
 - **Abschnürbereich:**
 I_D von U_{DS} unabhängig und wird alleine durch U_{GS} bestimmt
→ spannungsgesteuerte Stromquelle $I_D = S \cdot U_{GS}$ (S = Steilheit)



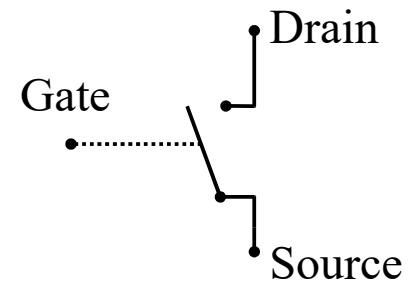
Feldeffekttransistor (MOSFET)

- N-Kanal-MOSFET
- Anschlüsse
 - Gate (Eingang)
 - Drain und Source (Ausgang)
- Funktion
 - Spannungsgesteuerter Schalter
 - Spannung am Gate bestimmt, ob Transistor leitet oder sperrt
- Varianten
 - P-Kanal-MOSFET mit komplementärem Verhalten
 - Kombination komplementäre Transistoren wird in der Digitaltechnik als „CMOS“ bezeichnet

Schaltzeichen



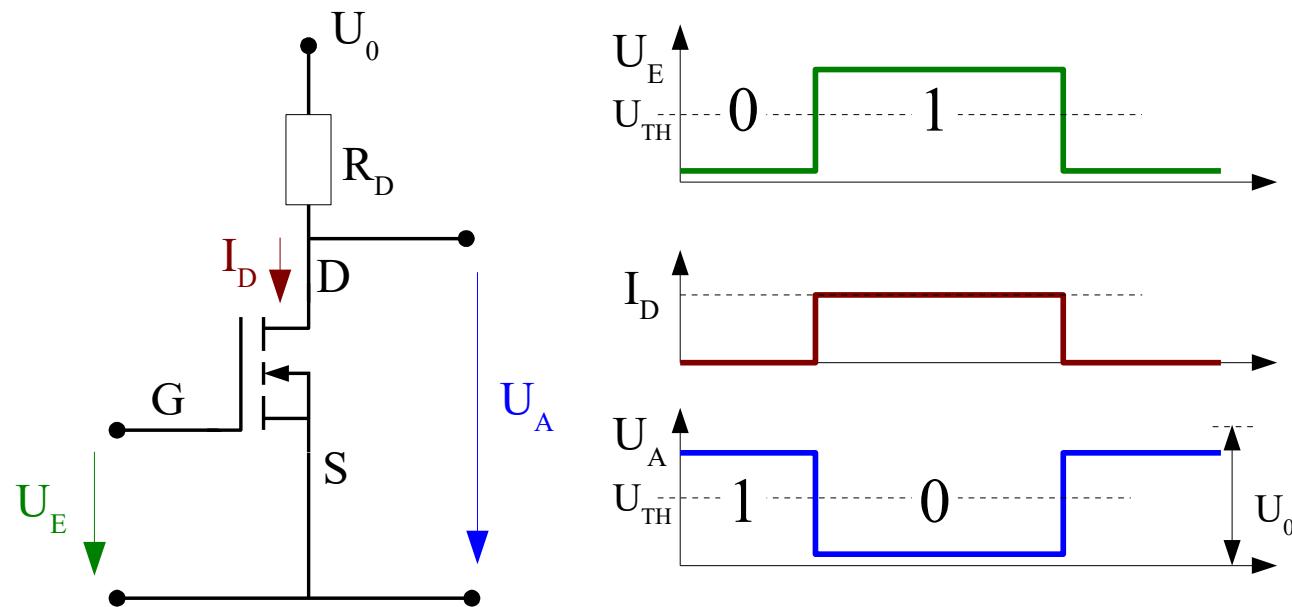
Ersatzschaltung



Inverter

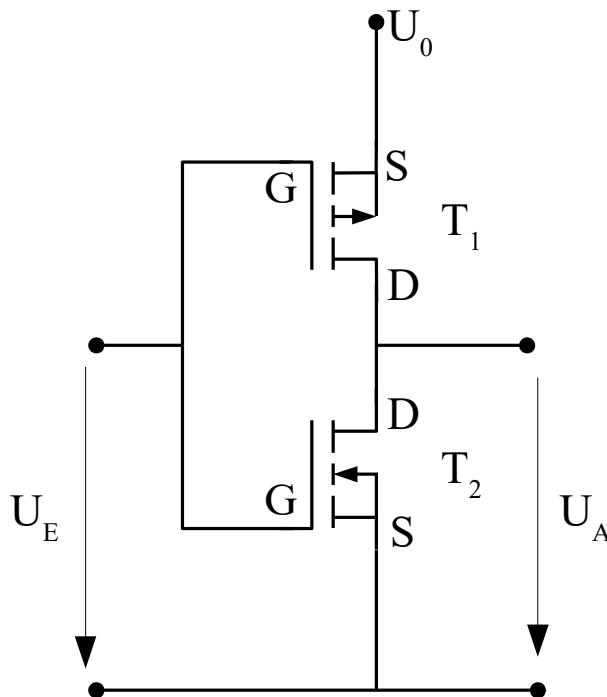
- Feldefekttransistor als Inverter

- Eingang $U_E < U_{TH}$ (logisch 0): Transistor sperrt $\rightarrow U_A \approx U_0$ (logisch 1)
- Eingang $U_E > U_{TH}$ (logisch 1): Transistor leitet $\rightarrow U_A \approx 0$ (logisch 0)

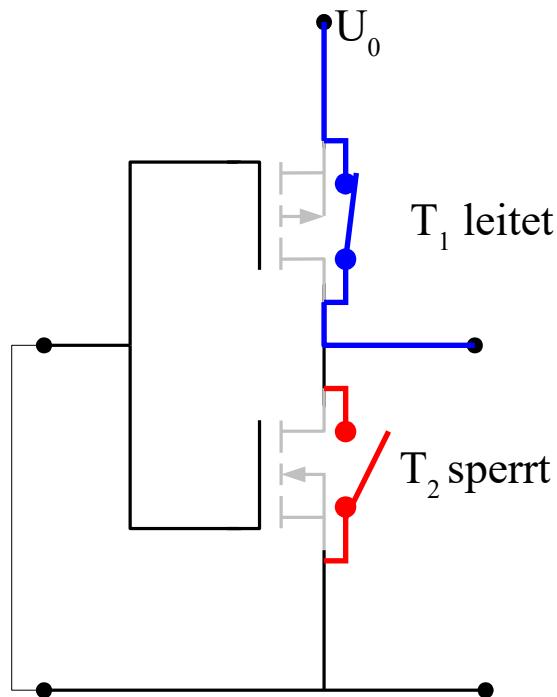


Inverter (CMOS)

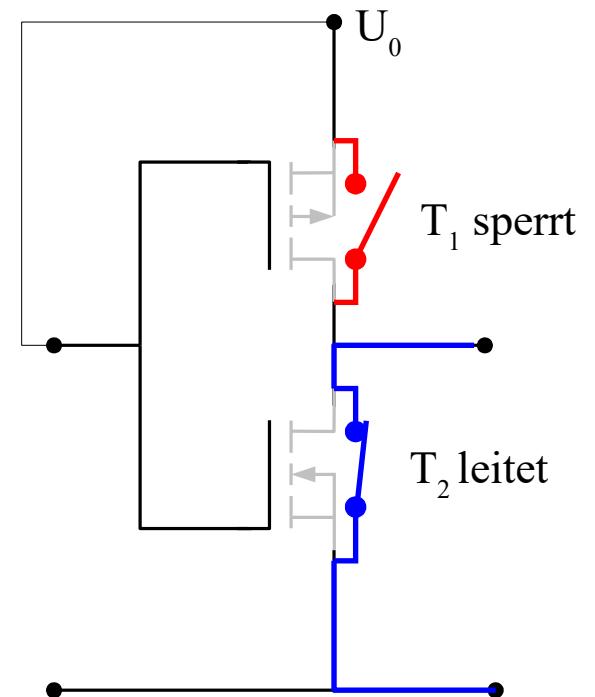
- Komplementäre Technik (CMOS):
 - Verlustbehafteter Pull-Up-Widerstand wird durch komplementären Transistor ersetzt



Schaltbild



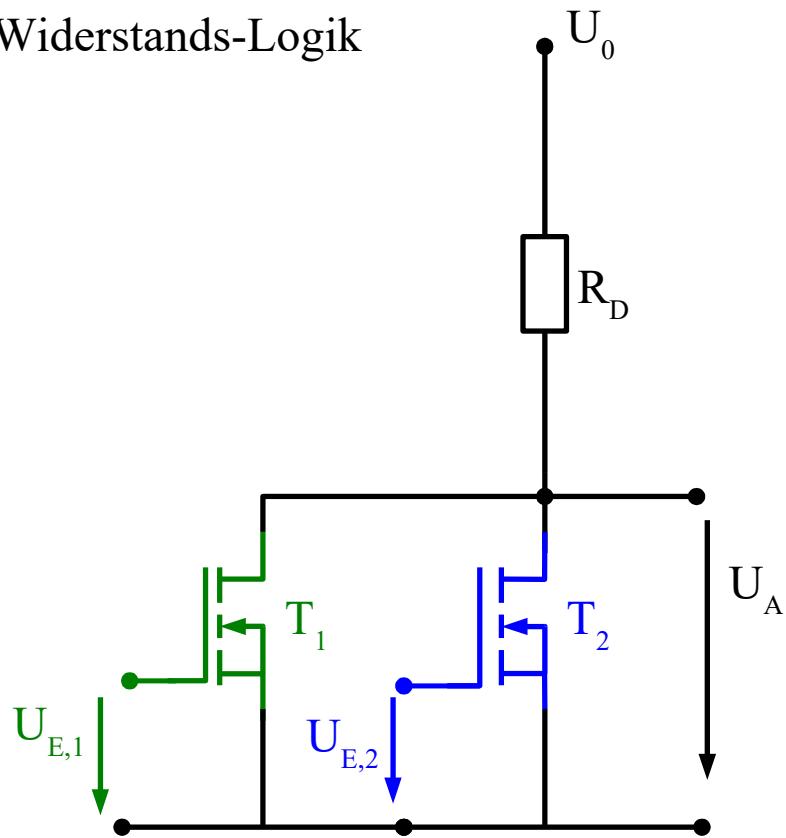
$$U_E \sim 0 \rightarrow U_A \sim U_0$$



$$U_E \sim U_0 \rightarrow U_A \sim 0$$

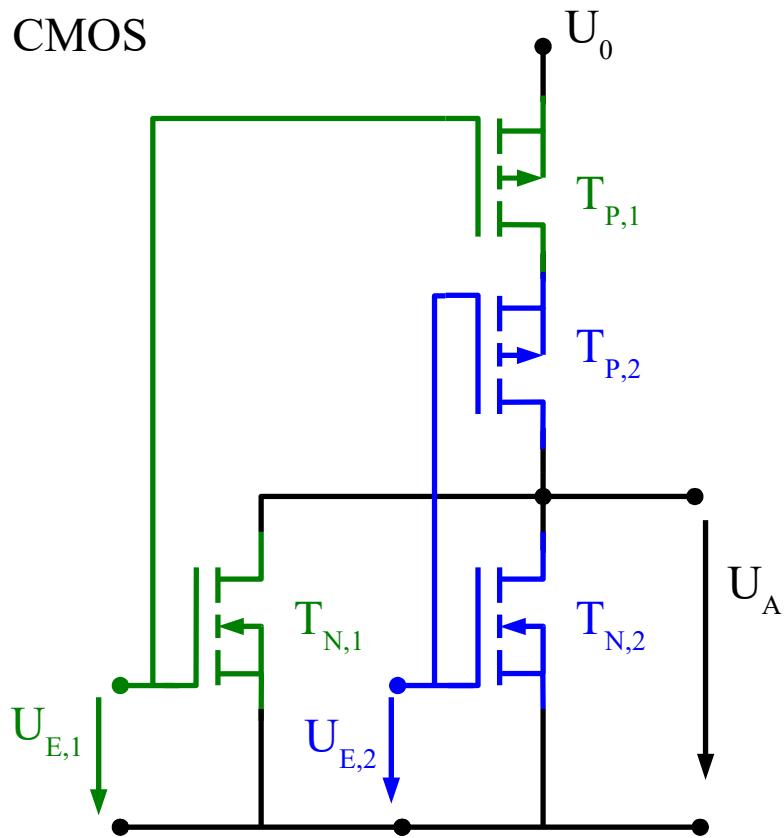
NOR-Gatter (CMOS)

Widerstands-Logik



- Wenn einer der beiden Transistoren T_1 oder T_2 leitet, wird U_A zu Null
- Sperren beide Transistoren, wird U_A zu U_0

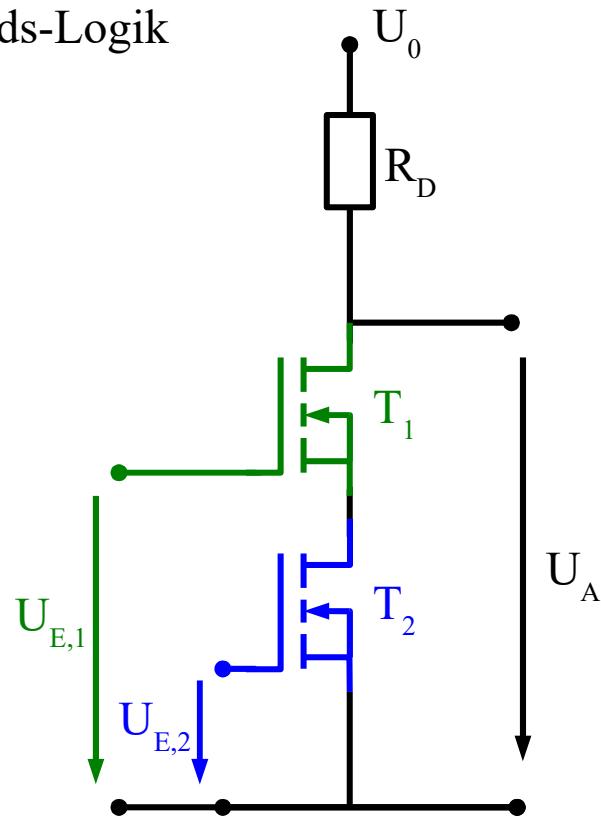
CMOS



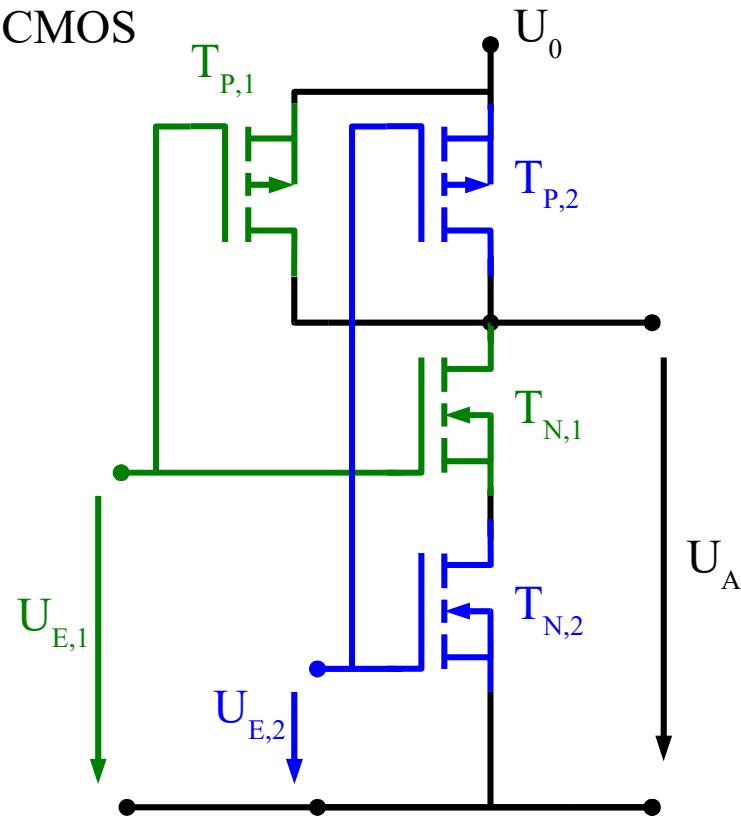
- Wenn einer der beiden Transistoren T_{N1} oder T_{N2} leitet, wird U_A zu Null
- Sperren beide Transistoren, wird U_A zu U_0 .
Genau dann und nur dann müssen beide Komplementärtransistoren leiten

NAND-Gatter (CMOS)

Widerstands-Logik



CMOS



- Wenn die beiden Transistoren T_1 und T_2 leiten, wird U_A zu Null
- Sperrt einer der beide Transistoren, wird U_A zu U_0

- Wenn die beiden Transistoren T_{N1} und T_{N2} leiten, wird U_A zu Null
- Sperrt einer der beiden Transistoren, wird U_A zu U_0 .
Genau dann und nur dann muss mindestens einer der beide Komplementärtransistoren leiten

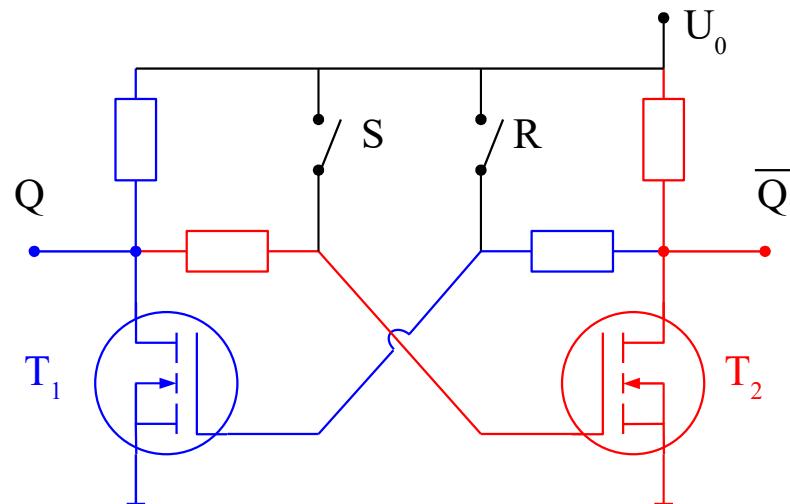
Logikfamilien der Digitaltechnik

- Neben CMOS existieren weitere Halbleitertechnologien, die in der Digitaltechnik eingesetzt werden:

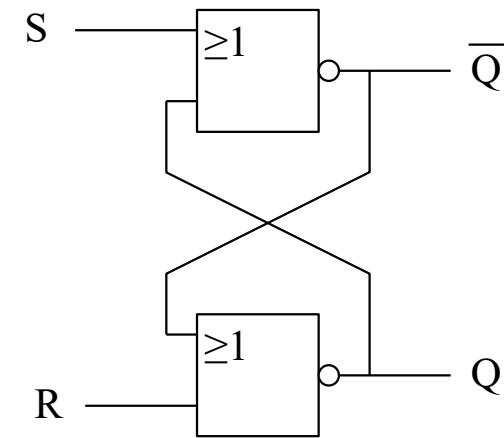
Bezeichnung	Technologie	Varianten	Anwendungsbereich /Eigenschaften
TTL (Transistor-Transistor-Logik)	Bipolar	LS, ALS, F, AS	schnell niedriger Ausgangswiderstand weit verbreitet
CMOS (Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor)	MOS	HC, HCT, AC, ACT	niedrige (statische) Verlustleistung TTL-Kompatibilität (HCT, ACT) erfordert Schutzmaßnahmen gegen statische Aufladung (EGB)
BiCMOS (Bus Interface CMOS)	MOS+ Bipolar	ABT, BCT	schnell niedrige Verlustleistung Schnittstelle zw. Rechner u. Peripherie
ECL (Emitter Coupled Logic)	Bipolar	ECL, ECTL	sehr schnell hohe Verlustleistung Herstellung aufwendig Großrechnertechnik

Flip-Flop

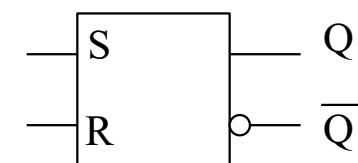
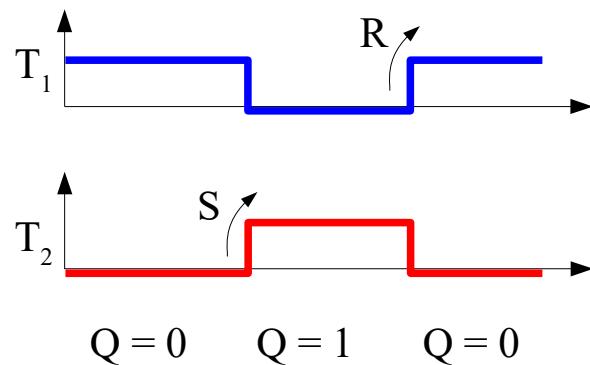
- Grundprinzip eines Flip-Flops
 - Hier: Widerstandslogik



Transistorschaltung



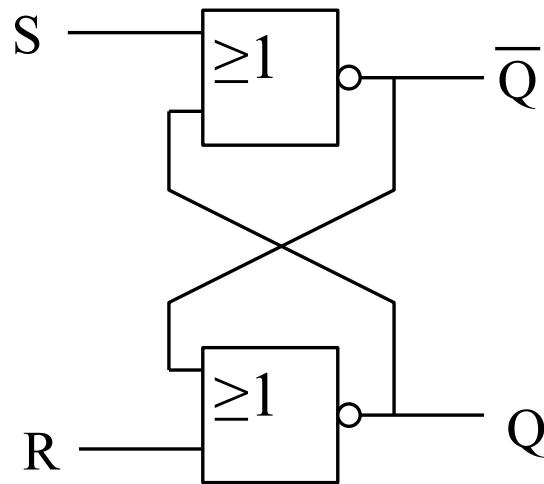
Flip-Flop aus NOR-Gattern



Schaltzeichen (RS-Flip-Flop)

Flip-Flop (Zustandsfolgetabelle)

Flip-Flop aus NOR-Gattern



S	Q_n	R	$\neg Q_n$	$\neg Q_{n+1}$	Q_{n+1}	
0	0	0	1	1	0	speichern
0	1	0	0	0	1	
1	x	0	x	0	1	setzen
0	x	1	x	1	0	
1	x	1	x	-	-	nicht erlaubt

x: nicht relevant

Schaltzeichen (RS-Flip-Flop)

