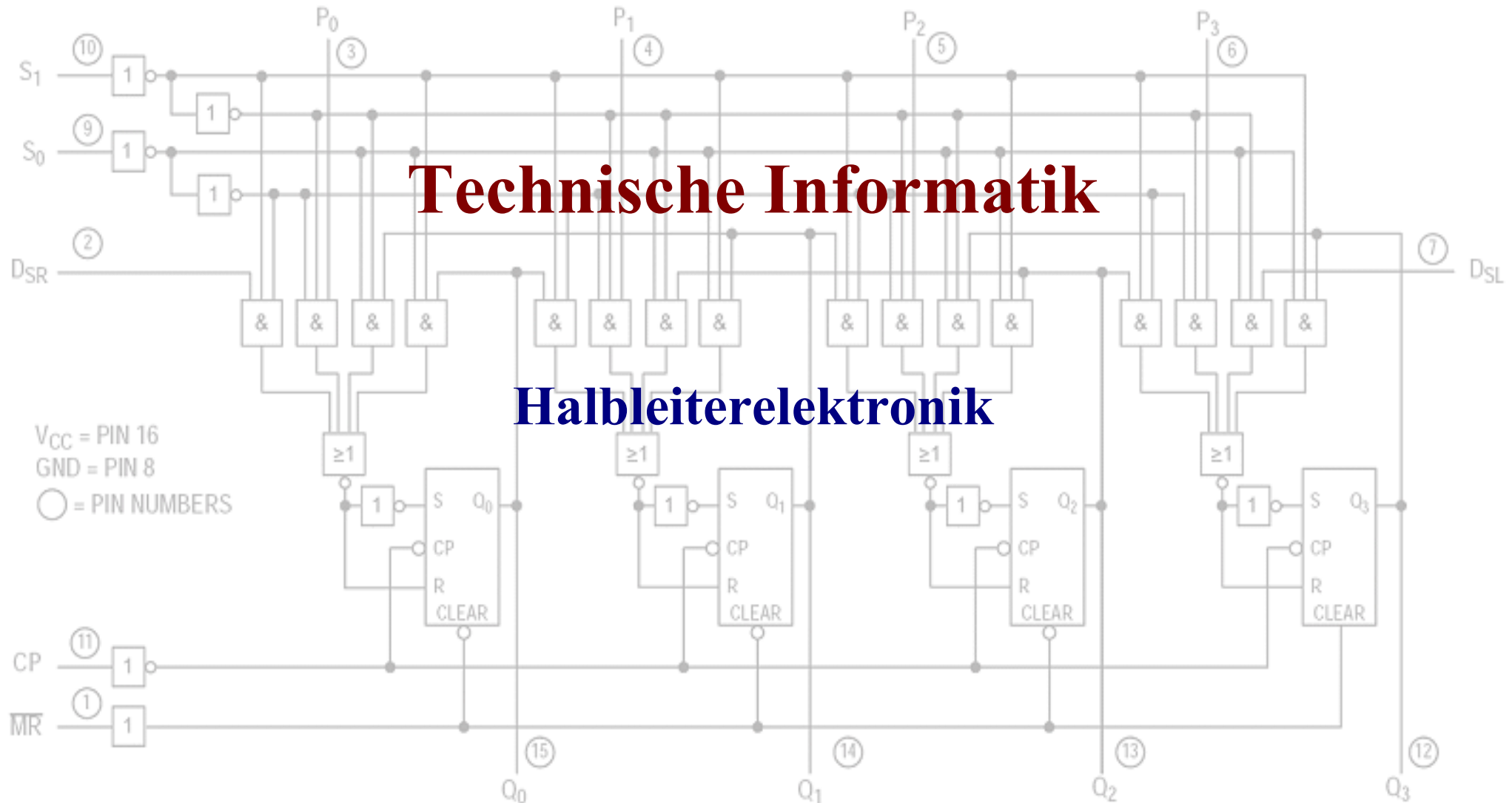


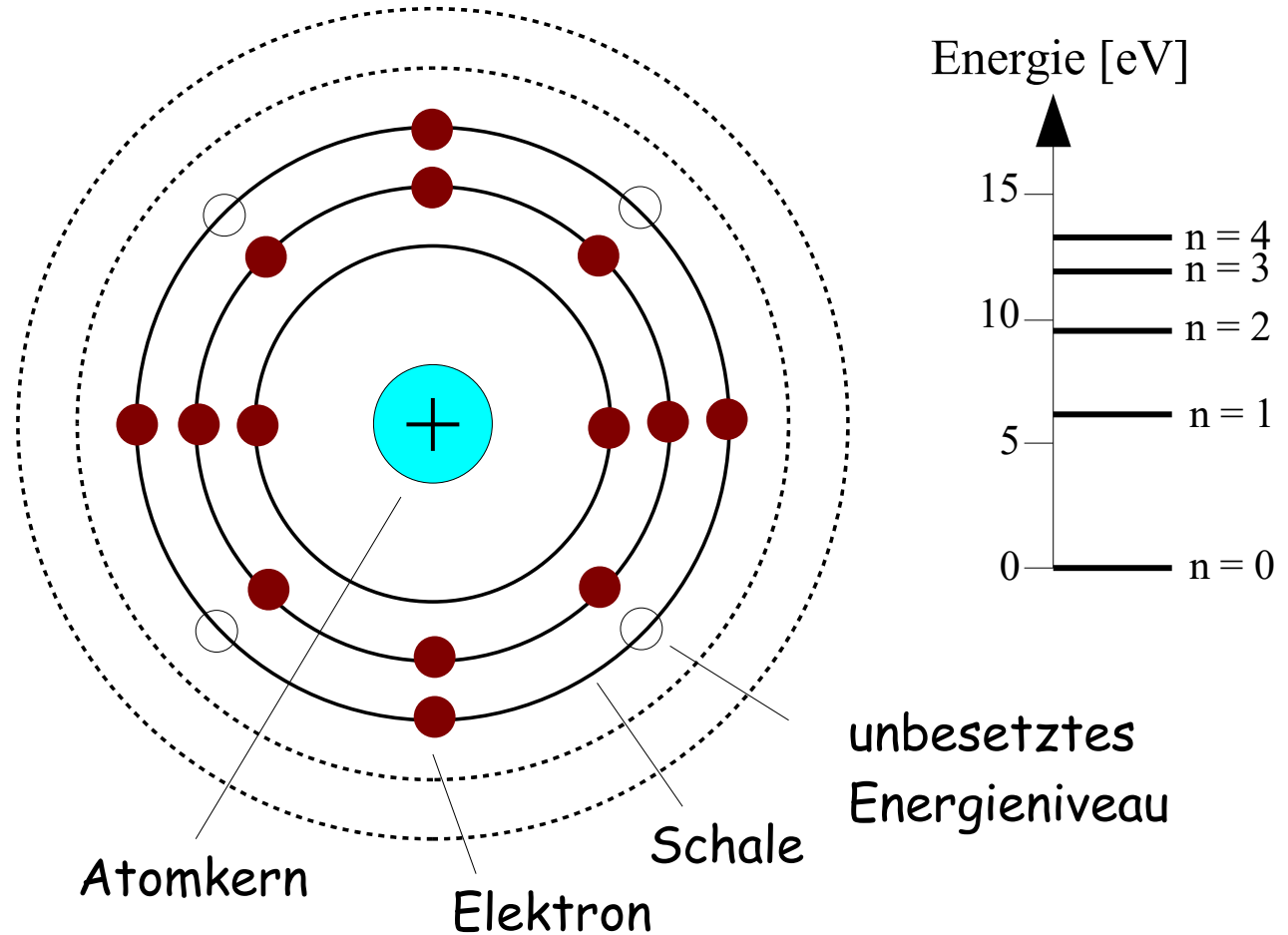
# Technische Informatik

## Halbleiterelektronik



# Atommodell

- Ausgangspunkt: Einfaches „klassisches“ Atommodell
  - Elektronen besetzen diskrete Energieniveaus in den Schalen des Atoms
  - Freie Plätze werden durch Elektronen benachbarter Atom besetzt

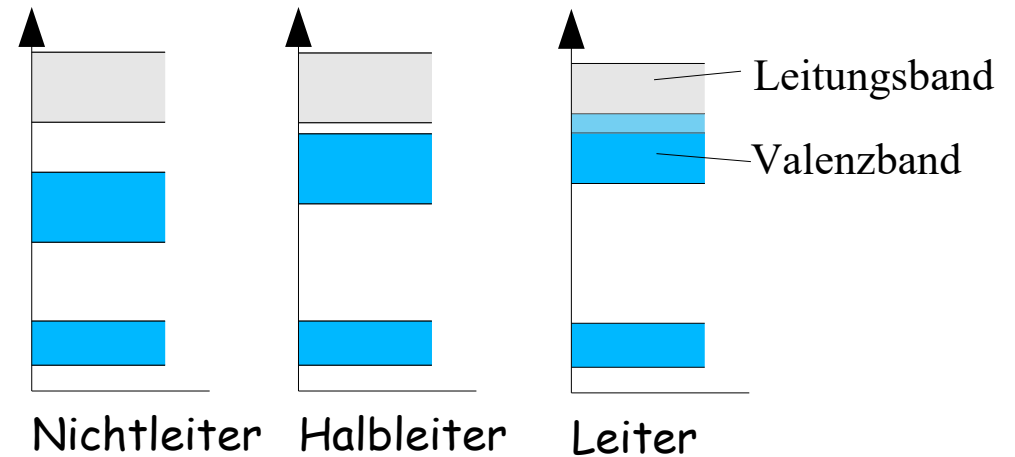
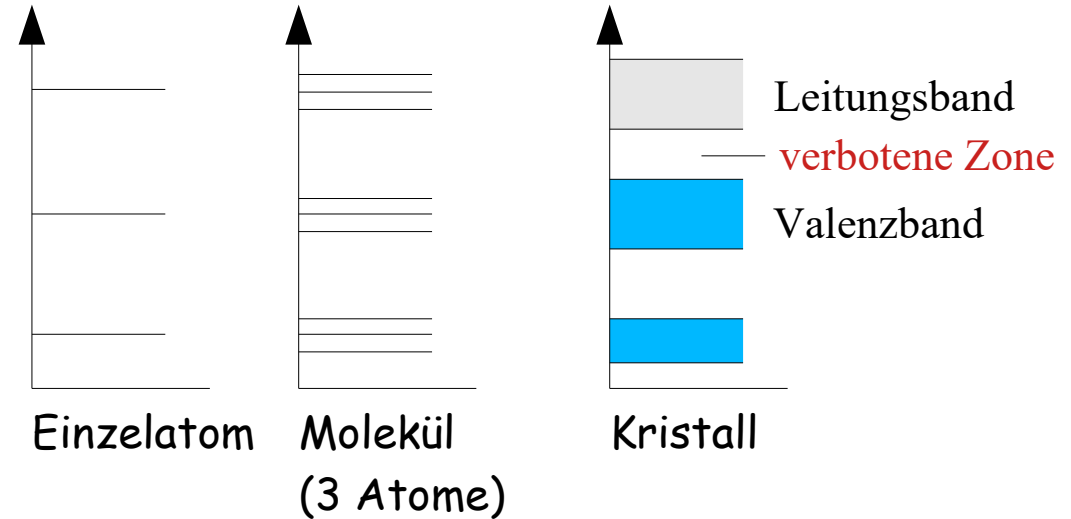


# Atommodell

- Elektrische Leitung

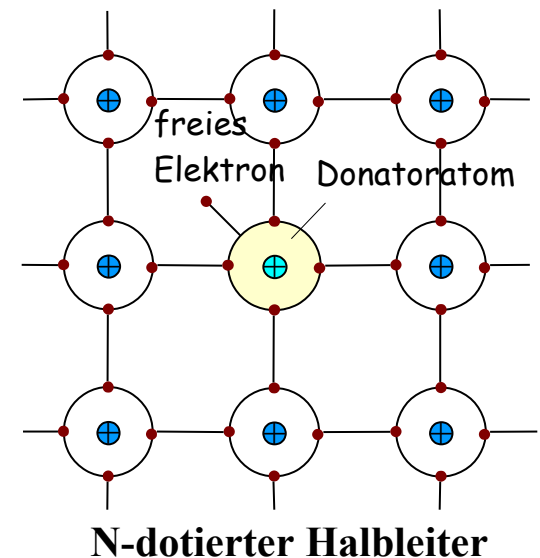
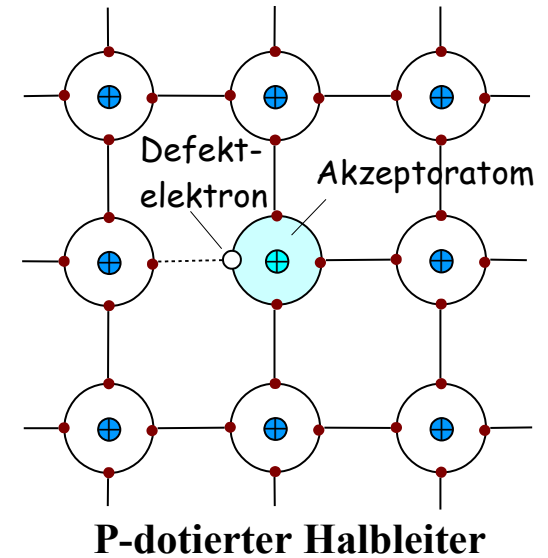
- Im Kristallgitter überlappen sich die diskreten Energieniveaus zu Energiebändern
- Zum Ladungstransport müssen freie Ladungsträger zur Verfügung stehen, Elektronen müssen Energieniveau des Leitungsbandes erreichen
- Nichtleiter:
  - Elektronen an Atom gebunden
- Leiter:
  - Elektronen nicht an Atom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

verbotene Zone = nicht mögliche Energiezustände



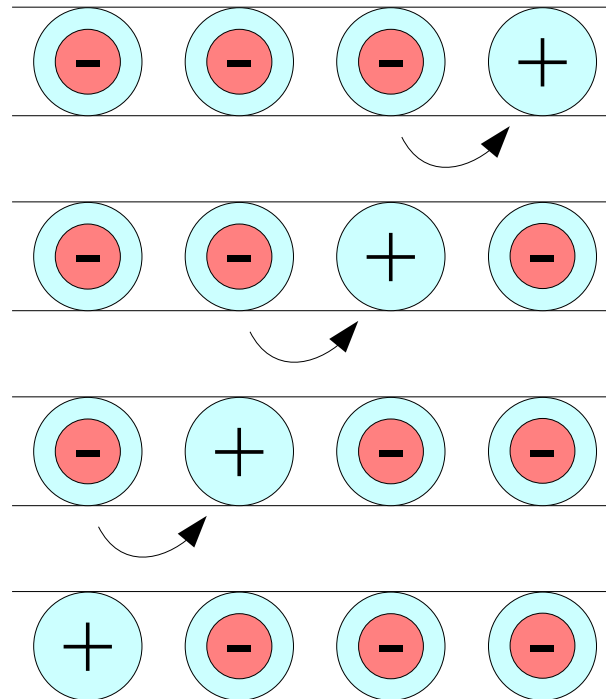
# Dotierung

- 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

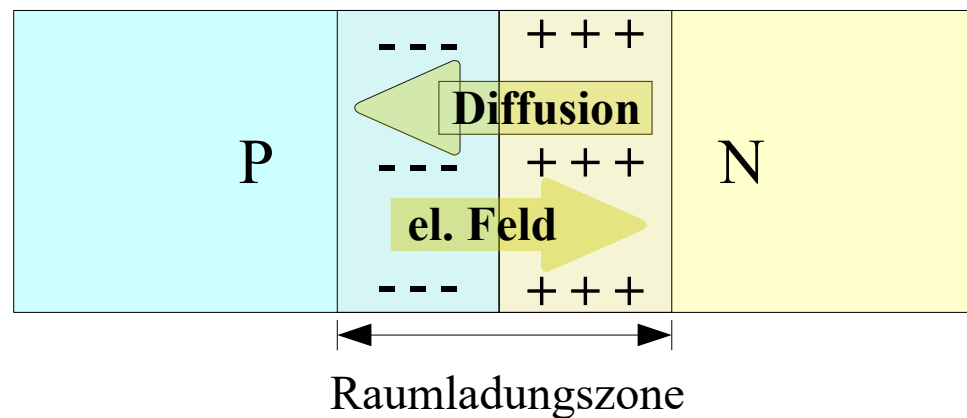
- Schematische Darstellung der Löcherleitung:
  - Die Elektronen bewegen sich von links nach rechts
  - Gleichzeitig wandert das Loch (Defektelektronen) von rechts nach links



- 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)

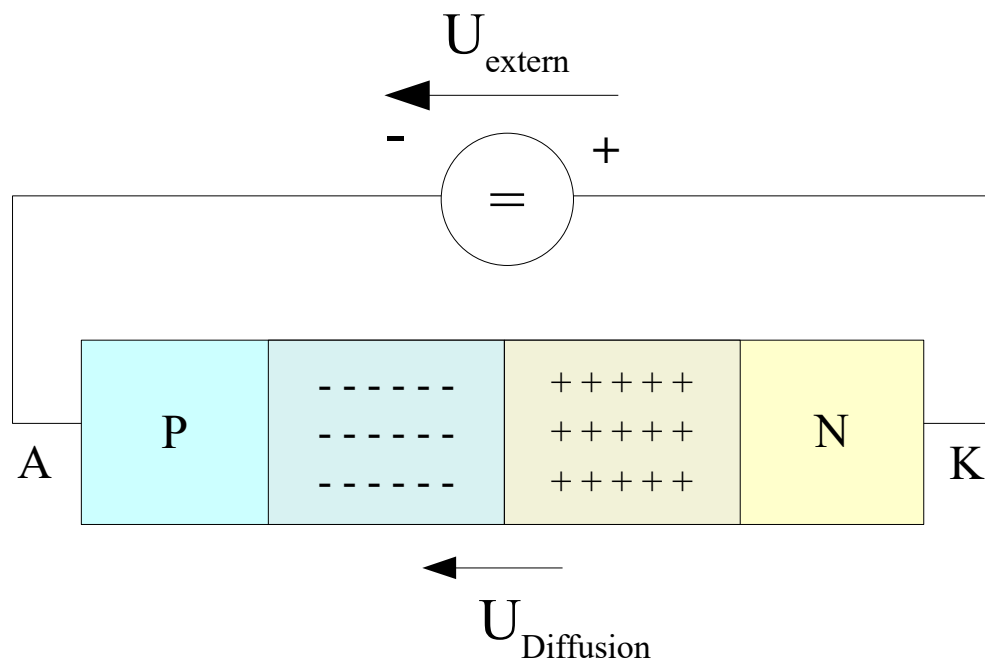


# Diode - Funktionsprinzip

- 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

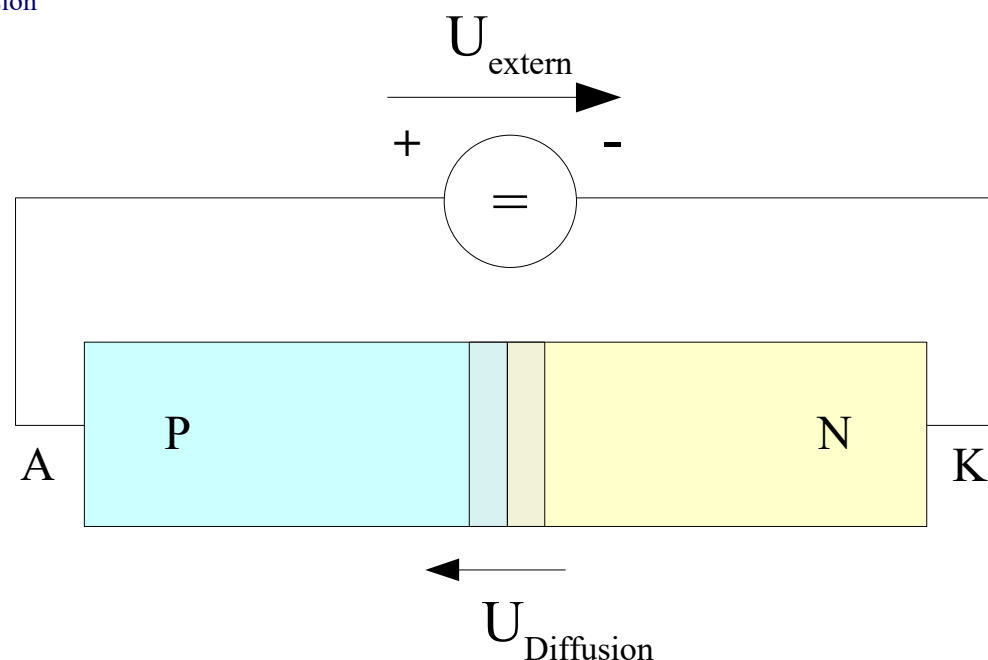


# Diode - Funktionsprinzip

- 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



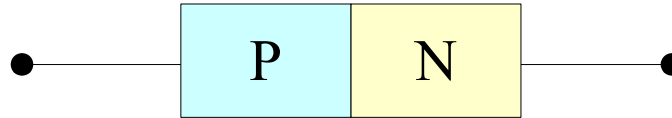


# Diode - Elektrische Anschlüsse

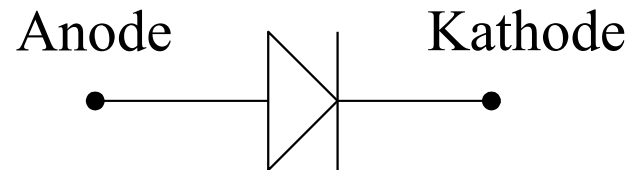
- Diode = PN-Übergang

- Anschlüsse

- Anode (P-Schicht)
- Kathode (N-Schicht)



- Schaltzeichen



- Funktion

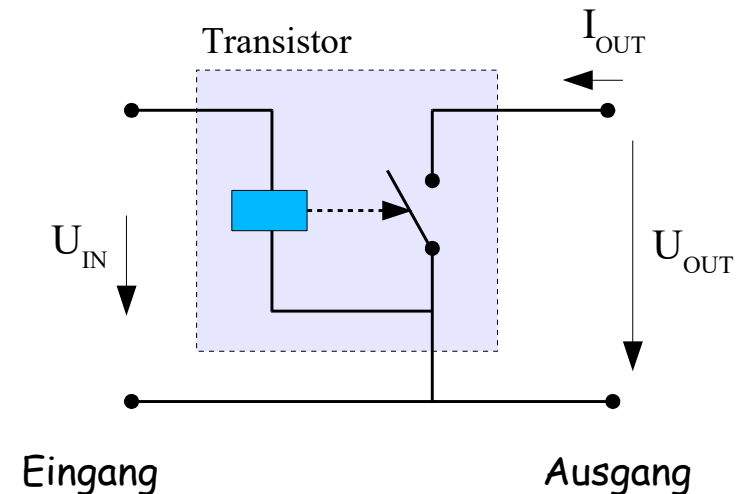
- Stromfluss nur in einer Richtung (von Anode zur Kathode) möglich

- Anwendung

- Gleichrichter, Verpolungsschutz, Überspannungsschutz, Spannungsreferenz

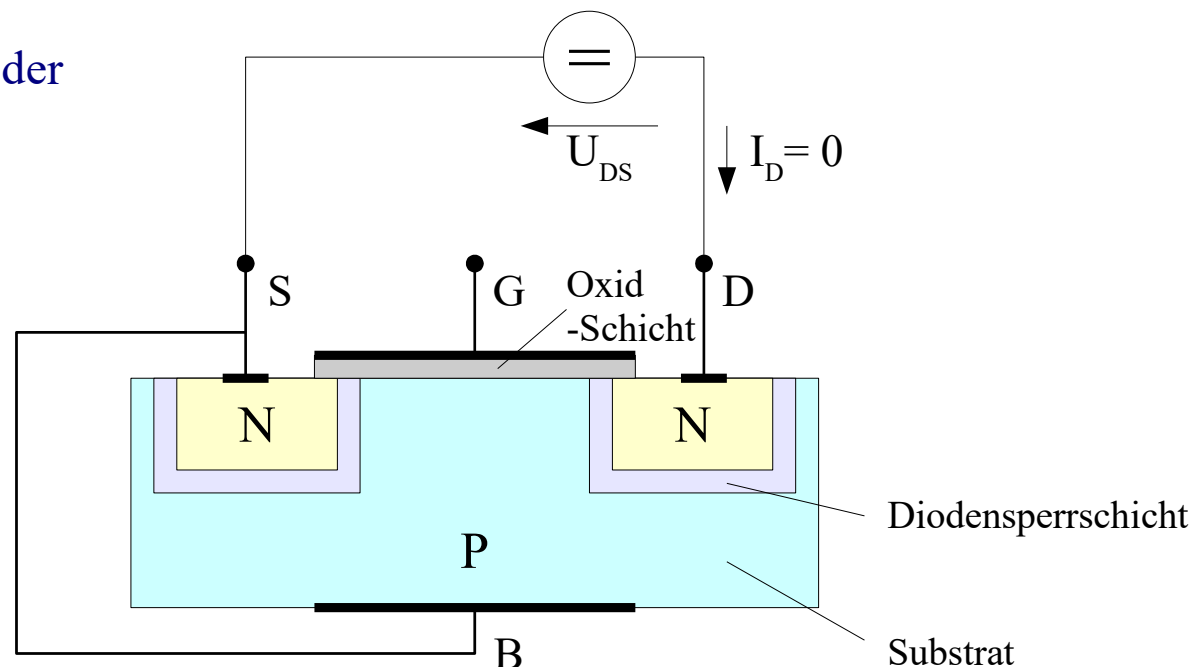
# Transistor

- 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)

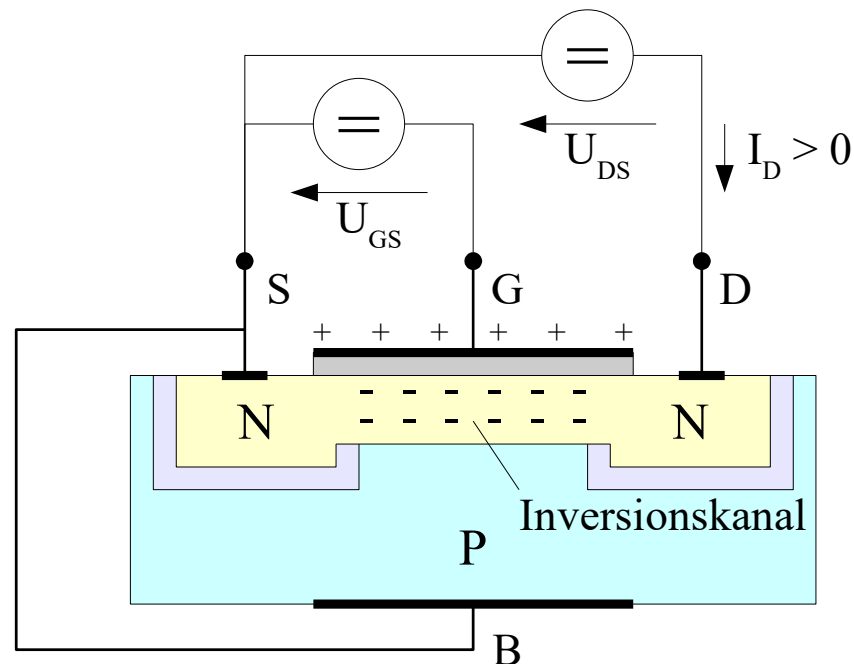
- MOSFET (Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor)
- Aufbau
  - In einem P-dotierten Substrat werden zwei N-dotierte Zonen eingelassen, Anschlüsse **Source** (S) und **Drain** (D)
  - Zwischen Drain und Source befindet sich eine leitfähige Ebene, die durch eine isolierende Oxidschicht von Substrat 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 Sperrschicht 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

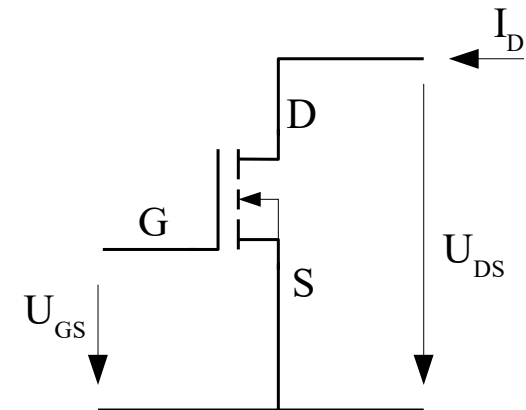
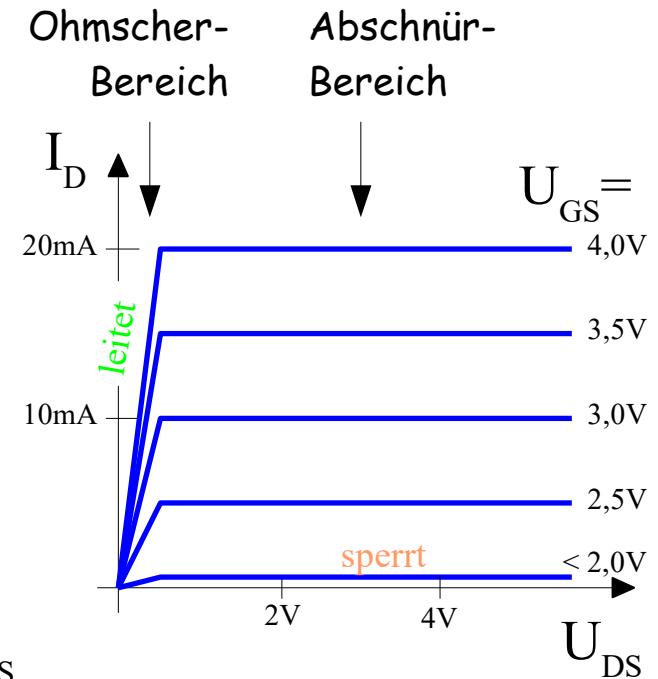
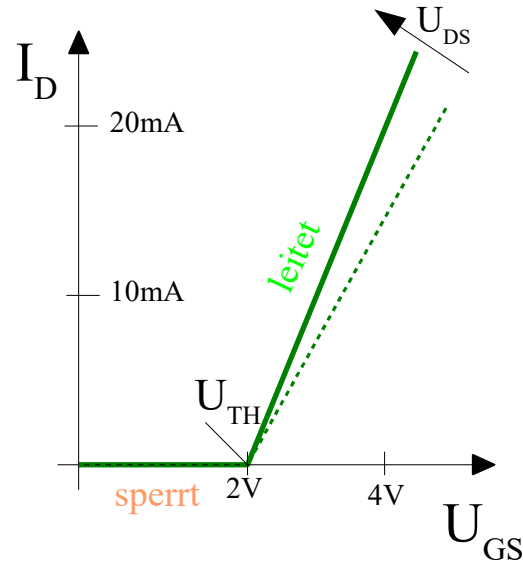
- Ausgangskennlinie:

- **Ohmscher Bereich:**

Steigung ist von  $U_{GS}$  abhängig  
→ spannungsgesteuerter Widerstand

- **Abschnürbereich:**

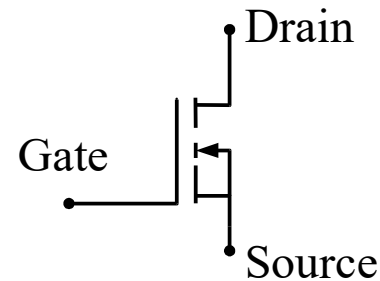
$I_D$  von  $U_{DS}$  unabhängig und wird alleine durch  $U_{GS}$  bestimmt  
→ spannungsgesteuerte Stromquelle  $I_D = S \cdot U_{GS}$  ( $S$  = Steilheit)



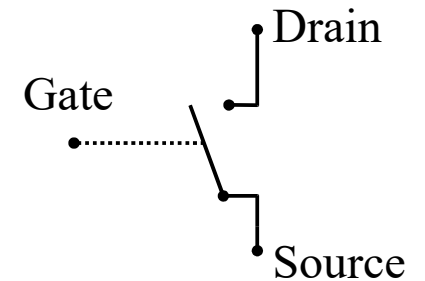
# Feldeffekttransistor (MOSFET)

- 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



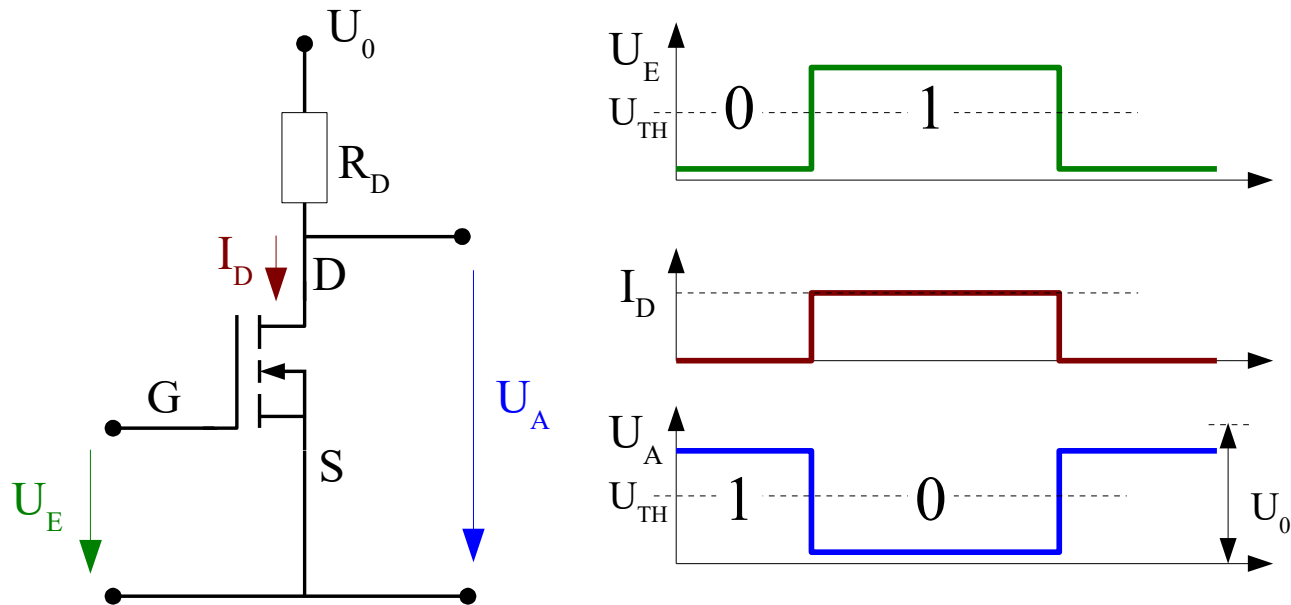
Ersatzschaltung



# Inverter

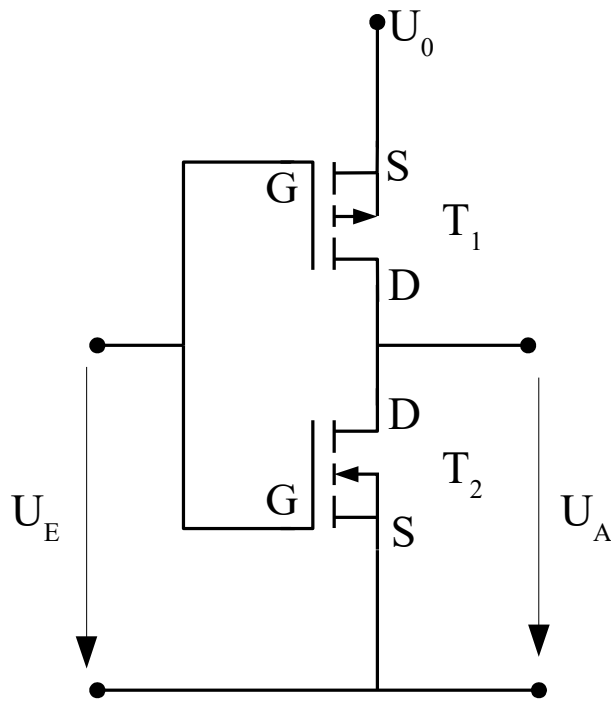
- Feldefekttransistor als Inverter

- 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)

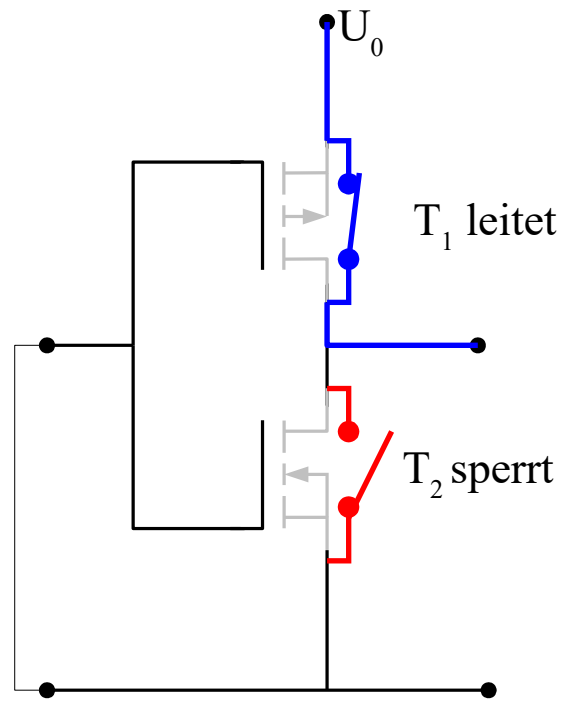


# Inverter (CMOS)

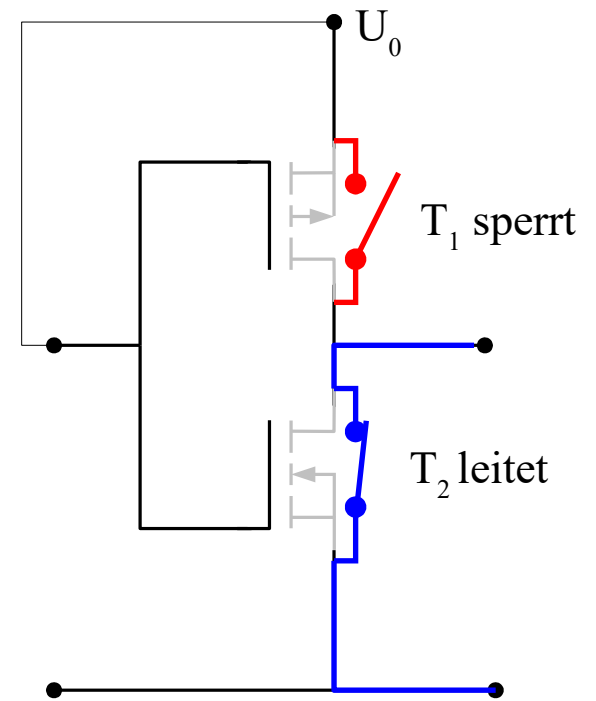
- Komplementäre Technik (CMOS):
  - Verlustbehafteter Pull-Up-Widerstand wird durch komplementären Transistor ersetzt



Schaltbild



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

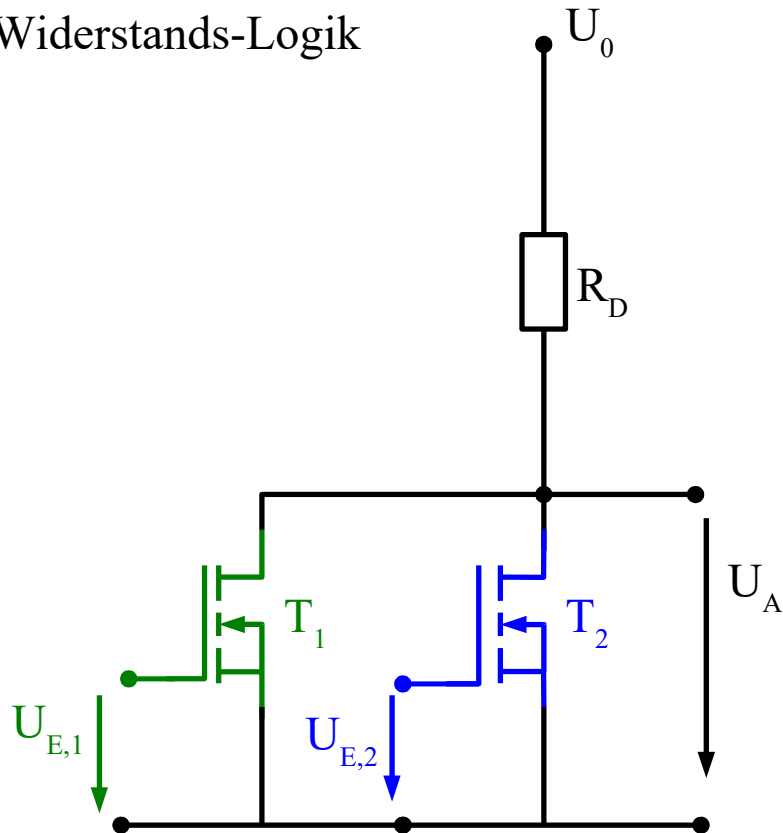


$$U_E \sim U_0 \rightarrow U_A \sim 0$$



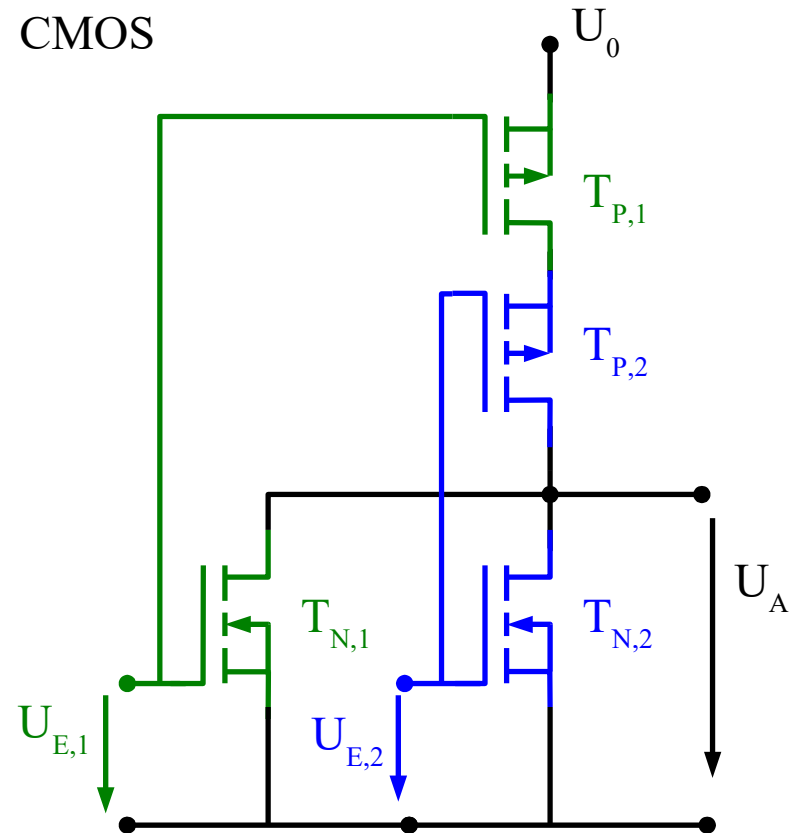
# NOR-Gatter (CMOS)

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  $U_0$

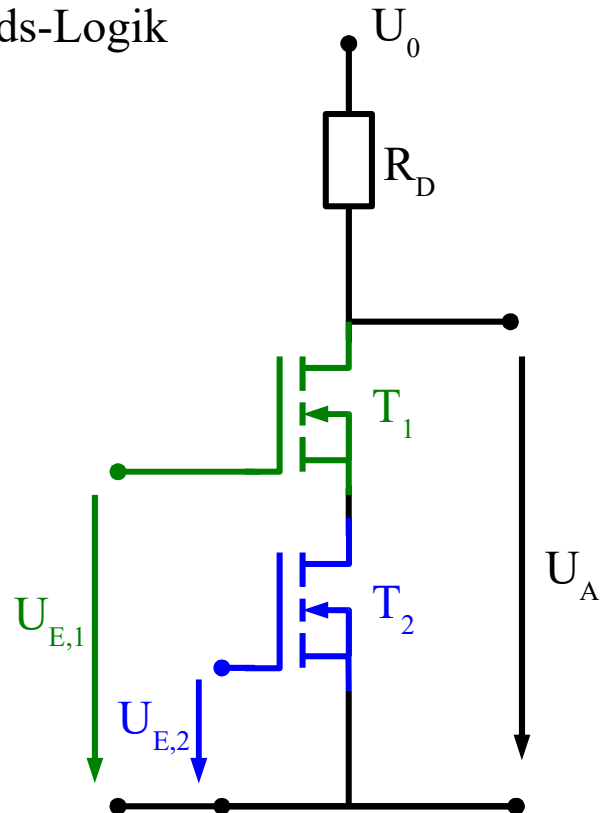
CMOS



- 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**

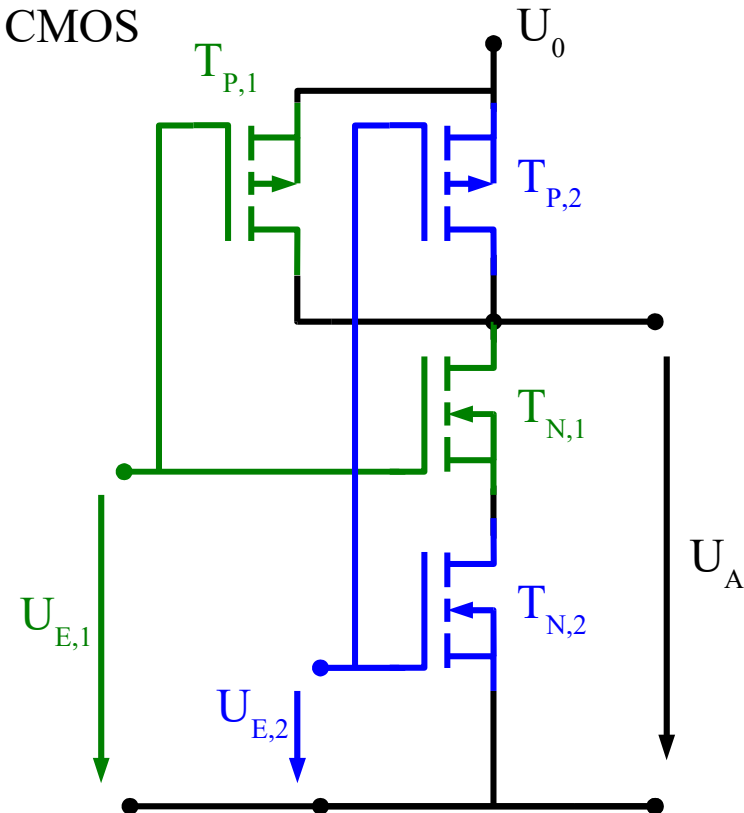
# NAND-Gatter (CMOS)

Widerstands-Logik



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

CMOS



- 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**

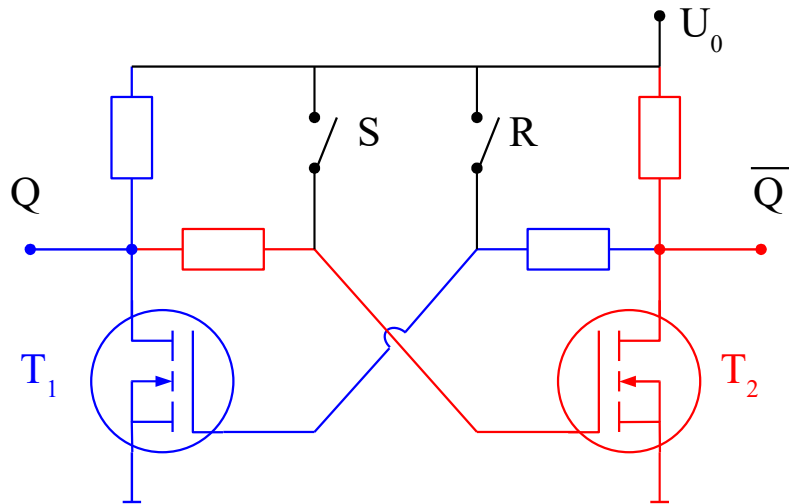
# Logikfamilien der Digitaltechnik

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

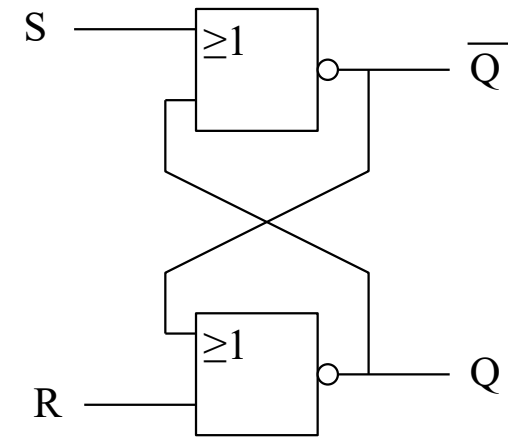
<i>Bezeichnung</i>	<i>Technologie</i>	<i>Varianten</i>	<i>Anwendungsbereich /Eigenschaften</i>
TTL (Transistor-Transistor-Logik)	Bipolar	LS, ALS, F, AS	schnell niedriger Ausgangswiderstand weit verbreitet
CMOS (Complementary- Metal- Oxide-Semiconductor)	MOS	HC, HCT, AC, ACT	niedrige (statische) Verlustleistung 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

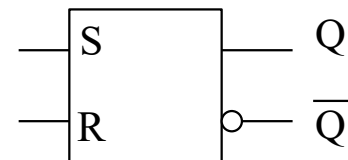
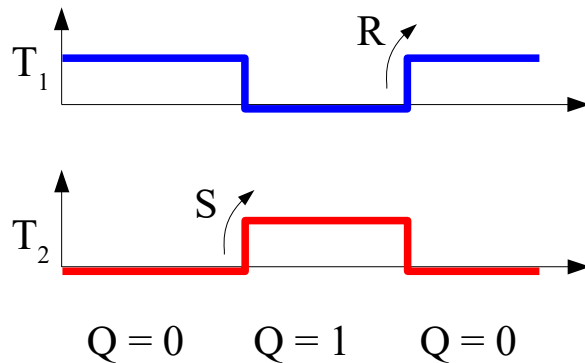
- Grundprinzip eines Flip-Flops
  - Hier: Widerstandslogik



Transistorschaltung



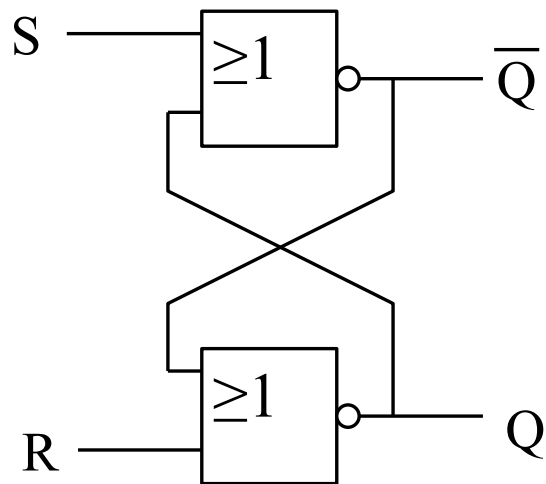
Flip-Flop aus NOR-Gattern



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	rücksetzen
1	x	1	x	-	-	nicht erlaubt

x: nicht relevant

## Schaltzeichen (RS-Flip-Flop)

