

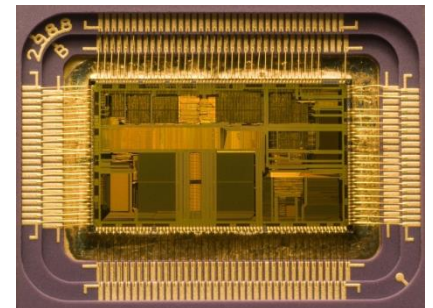
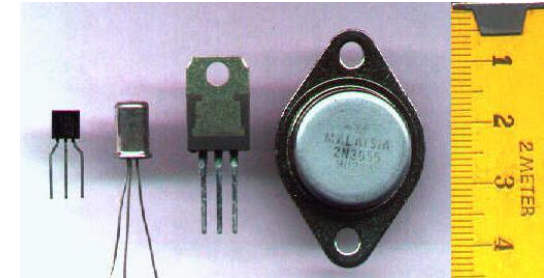
# **Elektrotechnik und Nachrichtentechnik für Informatiker**

## **Teil 2 - Grundlagen der Elektronik**

## Teil 2

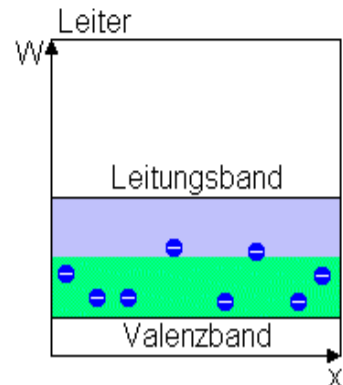
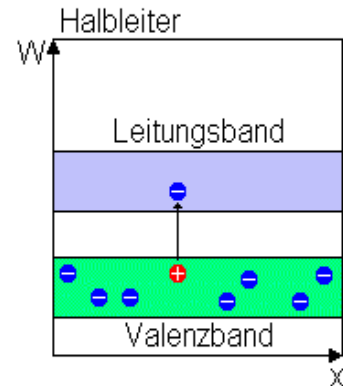
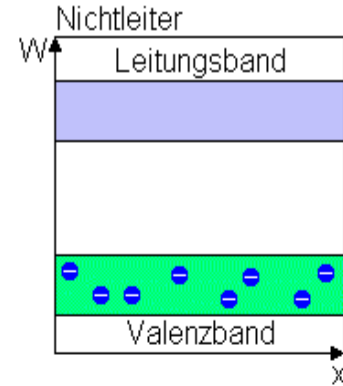
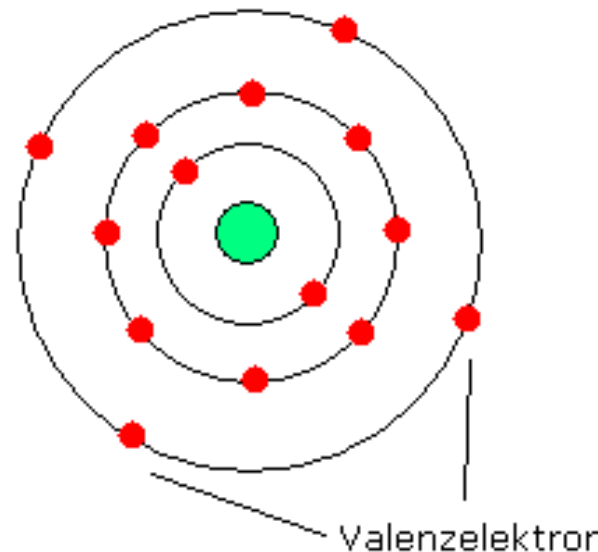
### Grundlagen der Elektronik und Digitaltechnik

- 1 Halbleiterbauelemente
- 1.1 Materialeigenschaften
- 1.2 Halbleiterdiode
- 1.3 Transistoren
- 2 Realisierung von digitalen Grundsaltungen
- 2.1 Gatter
- 2.2 Flip-Flop, Zähler, Schieberegister
- 2.3 Halbleiterspeicher
- 2.4 Laufzeiteffekte
- 3 Logikfamilien und Ausgangsstufen
- 3.1 Logikfamilien
- 3.2 Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen
- 3.3 Tristate-Ausgangsstufen



# Bändermodell, Leiter, Halbleiter, Isolatoren

- Das Bändermodell oder Energiebändermodell ist ein quantenmechanisches Modell zur Beschreibung von elektronischen Energiezuständen in einem idealen Einkristall. Dabei liegen die Atomrümpfe in einem Gitter vor. Es gibt mehrere Energiebereiche, in denen viele quantenphysikalisch mögliche Zustände existieren, die energetisch so dicht liegen, dass sie als Energieband angesehen werden können.
- Bei der Betrachtung der elektrischen Eigenschaften eines Kristalls ist es von Bedeutung, ob die Energieniveaus in den äußeren, energetisch höchsten Energiebändern (dem Valenz- und dem Leitungsband) des Kristalls nichtbesetzt, teilweise oder voll besetzt sind.



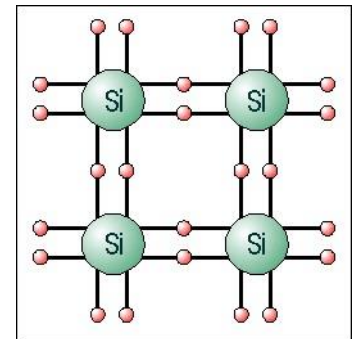
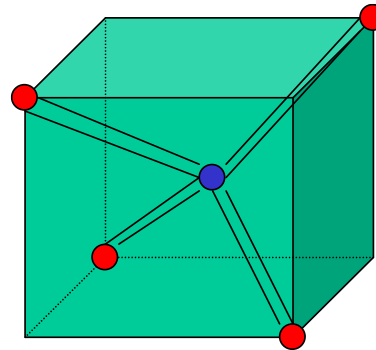
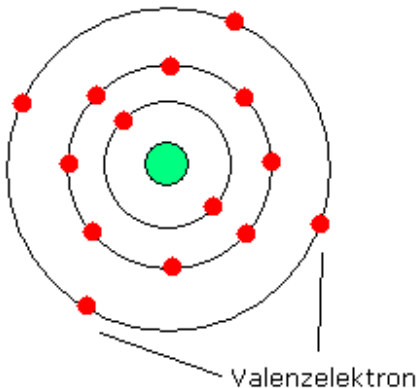
# Halbleiterbauelemente

- Halbleiterbauelemente sind in heutigen elektronischen Schaltungen die wichtigsten Bauelemente
- Halbleiterbauelemente haben nahezu vollständig die bis in die 60er Jahre verwendeten Elektronenröhren verdrängt
- die Bezeichnung Halbleiterbauelemente leitet sich von dem Material ab, aus dem die Bauelemente hergestellt werden
- unter Halbleitern versteht man bestimmte hochreine chemische Elemente oder Verbindungen, die erst durch gezielte Verunreinigungen bestimmte Leitereigenschaften bekommen

	I	II	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb	IB	IIB	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1 <b>H</b> 1,007															2 <b>He</b> 4,002		
2	3 <b>Li</b> 6,941	4 <b>Be</b> 9,012									5 <b>B</b> 10,81	6 <b>C</b> 12,01	7 <b>N</b> 14,00	8 <b>O</b> 15,99	9 <b>F</b> 18,99	10 <b>Ne</b> 20,17		
3	11 <b>Na</b> 22,98	12 <b>Mg</b> 24,30									13 <b>Al</b> 26,98	14 <b>Si</b> 28,08	15 <b>P</b> 30,97	16 <b>S</b> 32,06	17 <b>Cl</b> 35,45	18 <b>Ar</b> 39,94		
4	19 <b>K</b> 39,09	20 <b>Ca</b> 40,07	21 <b>Sc</b> 44,95	22 <b>Ti</b> 47,88	23 <b>V</b> 50,94	24 <b>Cr</b> 51,99	25 <b>Mn</b> 54,93	26 <b>Fe</b> 55,84	27 <b>Co</b> 58,93	28 <b>Ni</b> 58,69	29 <b>Cu</b> 63,54	30 <b>Zn</b> 65,39	31 <b>Ga</b> 69,72	32 <b>Ge</b> 72,61	33 <b>As</b> 74,92	34 <b>Se</b> 78,96	35 <b>Br</b> 79,90	36 <b>Kr</b> 83,8
5	37 <b>Rb</b> 85,46	38 <b>Sr</b> 87,62	39 <b>Y</b> 88,90	40 <b>Zr</b> 91,22	41 <b>Nb</b> 92,90	42 <b>Mo</b> 95,94	43 <b>Tc</b> 98,90	44 <b>Ru</b> 101,0	45 <b>Rh</b> 102,9	46 <b>Pd</b> 106,4	47 <b>Ag</b> 107,8	48 <b>Cd</b> 112,4	49 <b>In</b> 114,8	50 <b>Sn</b> 118,7	51 <b>Sb</b> 121,7	52 <b>Te</b> 127,6	53 <b>I</b> 126,9	54 <b>Xe</b> 131,2
6	55 <b>Cs</b> 132,9	56 <b>Ba</b> 137,3		72 <b>Hf</b> 178,4	73 <b>Ta</b> 180,9	74 <b>W</b> 183,8	75 <b>Re</b> 186,2	76 <b>Os</b> 190,2	77 <b>Ir</b> 192,2	78 <b>Pt</b> 195,0	79 <b>Au</b> 196,9	80 <b>Hg</b> 200,5	81 <b>Tl</b> 204,3	82 <b>Pb</b> 207,2	83 <b>Bi</b> 208,9	84 <b>Po</b> 208,9	85 <b>At</b> 209,9	86 <b>Rn</b> 222,0
7	87 <b>Fr</b> 223,0	88 <b>Ra</b> 226,0		104 <b>Rf</b> 261,1	105 <b>Db</b> 262,1	106 <b>Sg</b> 263,1	107 <b>Bh</b> 262,1	108 <b>Hs</b> 265	109 <b>Mt</b> 266	110 <b>Uun</b> 269	111 <b>Uuu</b> 272	112 <b>Uub</b> 277						
				57 <b>La</b> 138,9	58 <b>Ce</b> 140,1	59 <b>Pr</b> 140,9	60 <b>Nd</b> 144,2	61 <b>Pm</b> 146,9	62 <b>Sm</b> 150,3	63 <b>Eu</b> 151,9	64 <b>Gd</b> 157,2	65 <b>Tb</b> 158,9	66 <b>Dy</b> 162,5	67 <b>Ho</b> 164,9	68 <b>Er</b> 167,2	69 <b>Tm</b> 168,9	70 <b>Yb</b> 173,0	71 <b>Lu</b> 174,9
				89 <b>Ac</b> 227,0	90 <b>Th</b> 232,0	91 <b>Pa</b> 231,0	92 <b>U</b> 238,0	93 <b>Np</b> 237,0	94 <b>Pu</b> 244,0	95 <b>Am</b> 243,0	96 <b>Cm</b> 247,0	97 <b>Bk</b> 247,0	98 <b>Cf</b> 251,0	99 <b>Es</b> 252,0	100 <b>Fm</b> 257,0	101 <b>Md</b> 258,0	102 <b>No</b> 259,1	103 <b>Lr</b> 260,1

## Materialeigenschaften

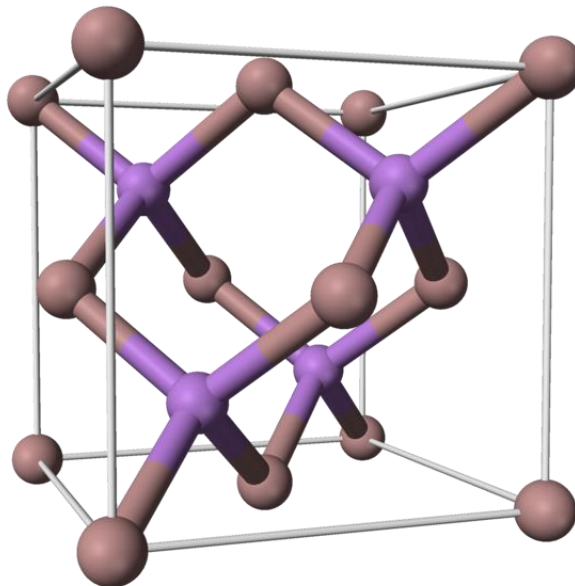
- bei Elementen der vierten Hauptgruppe ist die äußere Elektronenschale mit jeweils vier Elektronen besetzt
- in einem reinen Kristall aus Silizium bildet jeweils eins dieser Elektronen mit einem Elektron eines Nachbaratoms ein Elektronenpaar, wodurch eine Anziehungskraft zwischen den Atomen ausgeübt wird
- bei vier Elektronen auf der äußeren Schale ist dies gleichbedeutend mit vier Nachbaratomen, die sich räumlich um das betrachtete Si-Atom gruppieren



- das dreidimensionale Schema wird zugunsten einer besseren Darstellung der Vorgänge oft zweidimensional projiziert
- die Zahlen neben der Atombezeichnung kennzeichnen die Anzahl der Elektronen, die das Atom zur Bindung beiträgt

## Materialleigenschaften

- neben den Halbleitern aus einem einzigen Element (IV-Halbleiter) gibt es Halbleiter aus Verbindungen von zwei Elementen, die z.B. in der 3. und 5. Hauptgruppe des Periodensystems verzeichnet sind (III/V-Halbleiter)
- Beispiele für solche Halbleitermaterialien sind InP (Indiumphosphid) und GaAs (Galliumarsenid), letzteres ist das Ausgangsmaterial zur Herstellung von leuchtenden Halbleitern (Leuchtdiode, Halbleiterlaser)
- im Gitterverbund sind die beiden Atomsorten abwechselnd angeordnet



## **Materialeigenschaften**

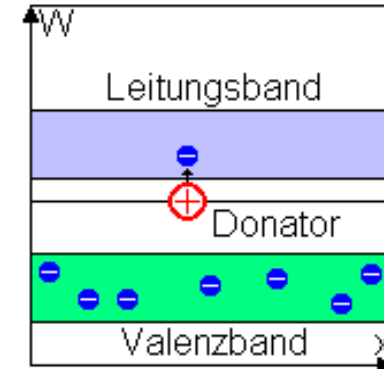
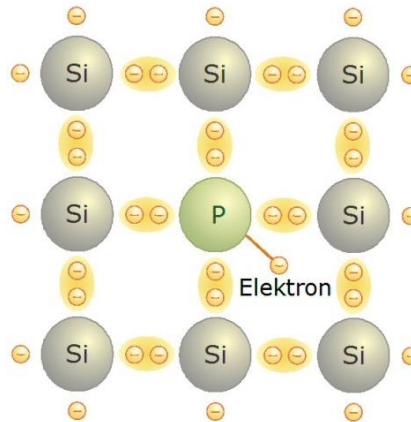
### **Dotierung**

- die Halbleitermaterialien sind in reiner Form nichtleitend
- alle Elektronen in den äußeren Schalen werden für die Elektronenpaarbindung benötigt, so dass keine frei beweglichen Elektronen für einen Stromfluss verfügbar sind
- die Leitfähigkeit ändert sich, wenn einige Atome des Halbleitergitters durch Fremdatome ersetzt werden, ein solcher Vorgang wird Dotierung genannt
- wird in einem Siliziumgitter beispielsweise ein Si-Atom durch ein Phosphoratom (5. Hauptgruppe) ersetzt, so steht an diesem Phosphoratom ein freies Elektron zur Verfügung, das nicht für die Elektronenpaarbindung benötigt wird
- das freie Elektron kann nun von Atom zu Atom springen und dabei zu einem elektrischen Strom beitragen
- die Leitfähigkeit des Halbleiters erhöht sich mit zunehmender Anzahl der Fremdatome

## Materialeigenschaften

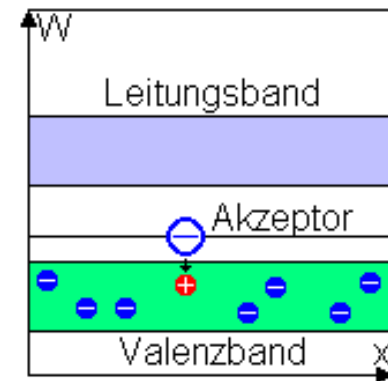
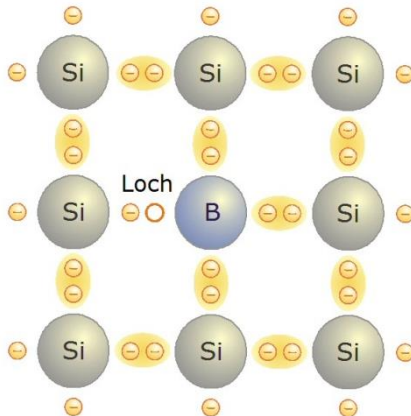
### Dotierung

#### n-Dotierung



- da in diesem dotierten Halbleiter Elektronen, also negative Ladungsträger, frei beweglich sind, wird diese Art der Dotierung n-Dotierung genannt

#### p-Dotierung



- wird anstelle eines Atoms aus der 5. Hauptgruppe ein Atom der 3. Hauptgruppe in Silizium eingebaut (z.B. B = Bor), so fehlt ein Elektron für die Bindung, es entsteht ein „Loch“



## **Materialeigenschaften**

### **p-Dotierung**

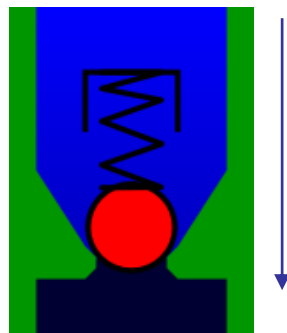
- ein Loch kann mit einem Elektron gefüllt werden, das von einer anderen Elektronenpaarbindung stammt
- dabei entsteht wiederum ein Loch, das durch ein anderes Elektron aufgefüllt werden kann
- bei sukzessiver Anwendung dieses Prinzips wandert das Loch von Atom zu Atom des Halbleiterkristalls
- bei der „Löcherwanderung“ driften Elektronen also in die entgegengesetzte Richtung
- die Löcherwanderung entspricht einem elektrischen Strom
- scheinbar werden positive Ladungsträger bewegt, daher wird von einer p-Dotierung gesprochen
- auch bei der p-Dotierung kann die Leitfähigkeit des Halbleiters mit zunehmender Anzahl von Fremdatomen erhöht werden
- durch die Kombination von verschiedenen dotierten Gebieten in einem Halbleiter können Halbleiterbauelemente mit den unterschiedlichsten Funktionen hergestellt werden (Dioden, Transistoren, Mikroprozessoren...) 9

## Anwendung des Halbleitermaterials - Halbleiterdiode

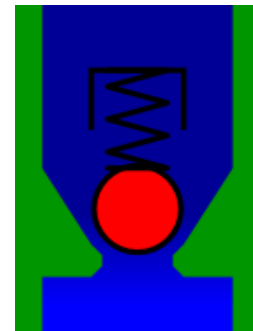
- die Diode ist ein elektronisches Bauelement aus Halbleitermaterial
- sie hat eine Art Ventilwirkung, in Sperrrichtung gepolt fließt nur ein sehr geringer Strom, in Durchlassrichtung gepolt kann ein sehr großer Strom fließen

*Analogiemodell aus der Hydraulik: Rückschlagventil*

*Analogie zwischen elektrischer Spannung und hydraulischem Druck!*



kein  
Strom



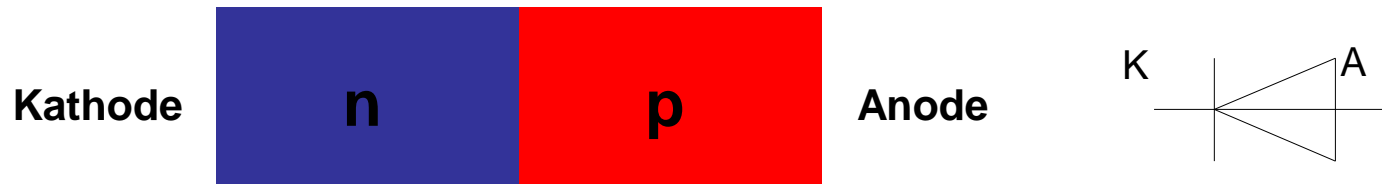
Strom

- Analogiemodell Rückschlagventil:  
wenn der Druck (analog zur Spannung) auf dieses Ventil (Diode) in Sperrrichtung erfolgt, so wird der Stromfluss blockiert, in die Gegenrichtung muss der Druck groß genug werden, um den Federdruck des Ventils (Sperrspannung) überwinden zu können, das Ventil öffnet (man sagt, die Diode bricht durch), der Strom kann fließen

# Halbleiterdiode

## Realisierung

- die Halbleiterdiode besteht aus einem Übergang zwischen einem n- und einem p-dotierten Halbleiter



- der Anschluss des p-dotierten Gebietes wird Anode (A) genannt, der Anschluss des n-dotierten Gebietes heißt Kathode (K)
- ohne von außen anliegende Spannung bildet sich durch Diffusion in der Übergangszone ein Bereich aus, in dem freie Elektronen aus dem n-Gebiet Löcher im p-Gebiet auffüllen
- dieser Vorgang wird Rekombination von Elektronen und Löchern genannt
- da das Material sowohl im n-dotierten Bereich als auch im p-dotierten Bereich vorher elektrisch neutral war, bedeutet die Verschiebung von Elektronen vom einen in den anderen Bereich den Aufbau einer elektrischen Ladung, es entsteht eine Raumladungszone

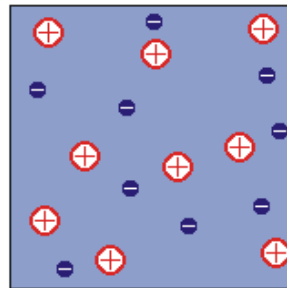
# Halbleiterdiode

Kathode

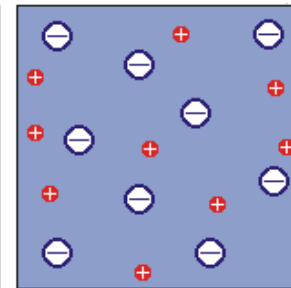


Anode

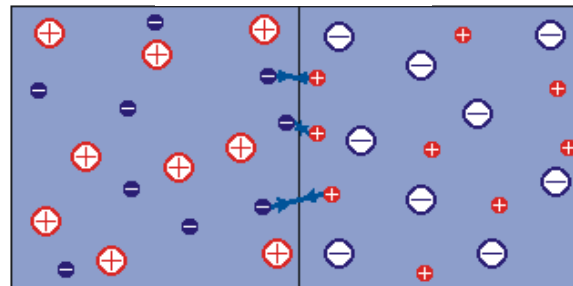
n-Kristall



p-Kristall

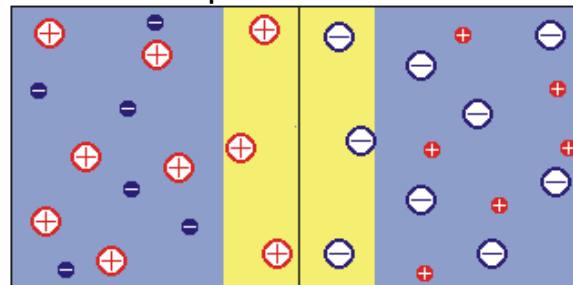


Rekombination



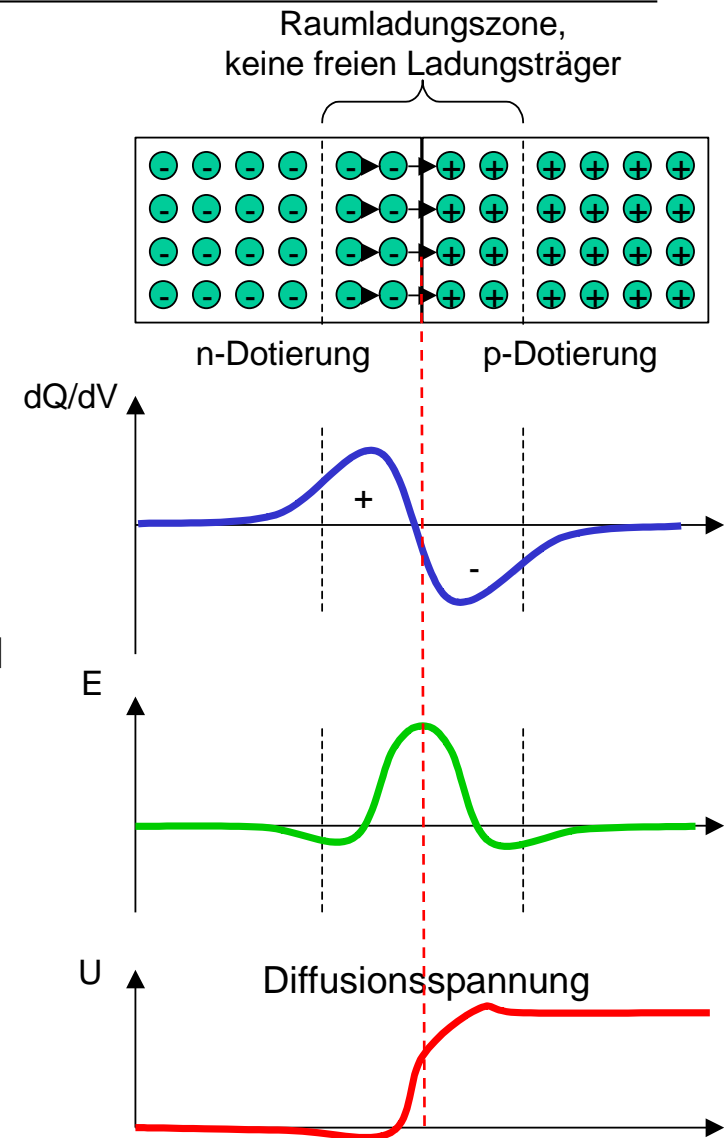
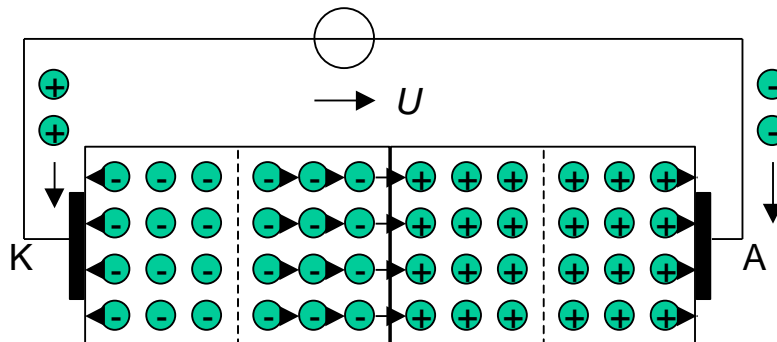
Rekombination durch  
Diffusion  
(Diffusion ist hier das  
bestimmende Phänomen)

Sperrschicht



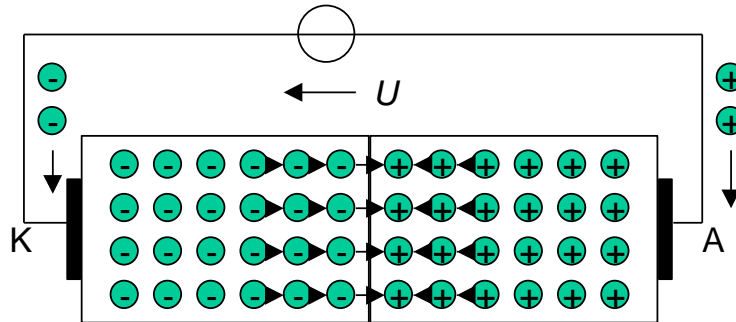
Raumladungszone durch  
ortsgebundene Ladungsträger  
**ABER:**  
keine freien Ladungsträger in  
der Sperrschicht!

- die Raumladung hat ein elektrisches Feld zufolge
- das E-Feld wiederum führt zu einer Spannung an der Raumladungszone; kein Strom kann durch die Diode fließen, sie sperrt
- die Raumladungszone wird daher auch Sperrschicht genannt
- wird von außen eine Spannung so angelegt, dass Elektronen zusätzlich aus dem n-dotierten Bereich entnommen werden und in den p-dotierten Bereich eingespeist werden, vergrößert sich die Raumladungszone



## Durchlassbetrieb

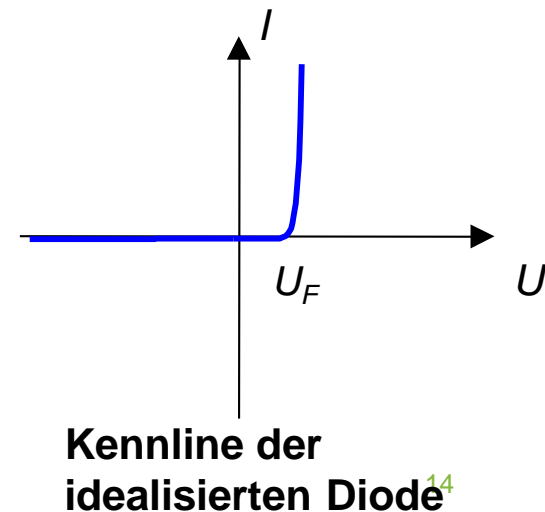
- bei Umpolung der außen angelegten Spannung verkleinert sich die Raumladungszone, bis sie ab einer bestimmten Spannung verschwindet, die Diode wird leitfähig
- die Elektronen überschwemmen den p-Bereich und Löcher sind im n-Bereich zu finden



- die Kennliniengleichung der Diode, die den jetzt nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom wiedergibt, lautet:

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

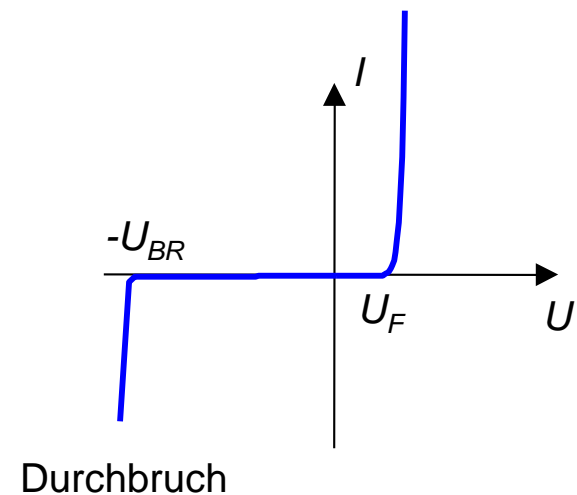
- $I_s$  ist der Sättigungsstrom (sehr klein:  $10^{-6} - 10^{-12} \text{ A}$ ) und  $U_T$  die Temperaturspannung (für Silizium bei Raumtemperatur  $U_T = 26 \text{ mV}$ ).



## Schaltungssymbol und Sperrbetrieb



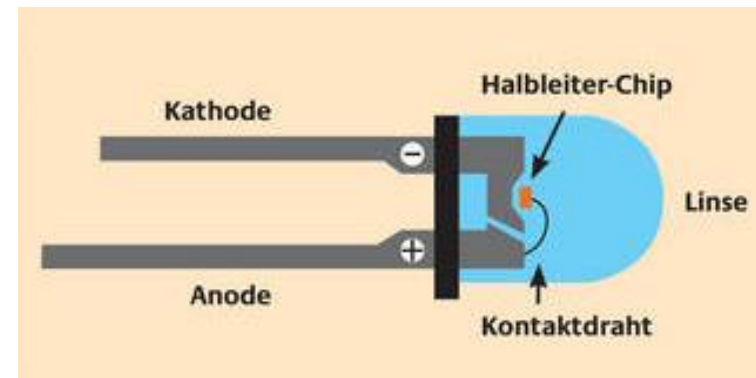
- der Pfeil deutet die Stromflussrichtung der Diode im leitfähigen Zustand an
- reale Dioden werden bei genügend hohen Spannungen in Sperrrichtung ebenfalls leitfähig (Durchbruch), dieser Effekt (Avalanche und Zenereffekt) wird in speziellen Dioden (Zenerdioden) verwendet, um definierte Spannungen zu erzeugen oder zu stabilisieren
- in vielen geregelten Netzteilen, die meist Spannungsquellen sind, sind solche Zenerdioden als Stabilisierungselement zu finden.



**Kennline der  
realen Diode**

## Leuchtdiode

- wichtige Bauart der Halbleiterdiode ist die Leuchtdiode, sie ist eine Halbleiterdiode, die z.B. aus GaAs als Halbleitermaterial gefertigt wird
- Licht entsteht in der Sperrschicht durch die Rekombination von Elektronen und Löchern, die Farbe des Lichts lässt sich durch die Wahl des Halbleitermaterials einstellen
- Leuchtdioden werden in vielen Geräten zur Signalisierung bestimmter Betriebszustände eingesetzt und ersetzen immer mehr kleine Glühlampen
- durch spezielle Strukturierung und Zulegierung von Aluminium im Halbleitermaterial lässt sich die Raumladungszone in einen räumlich sehr kleinen Bereich begrenzen, mit einer solchen Struktur lassen sich Halbleiterlaser herstellen
- die Kennlinien von Leuchtdiode und Laserdiode entsprechen der Kennlinie einer gewöhnlichen Diode
- bei der Rechnung mit Diodenkennlinien besteht oft die Schwierigkeit, dass die aufgestellten Gleichungen analytisch nicht lösbar sind





## Leuchtdiode

- so ergibt der Maschensatz einer einfachen Schaltung mit Leuchtdiode und Vorwiderstand

$$U_D = U_0 - R \cdot I \quad (1)$$

- die Diode hat die Kennlinie

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

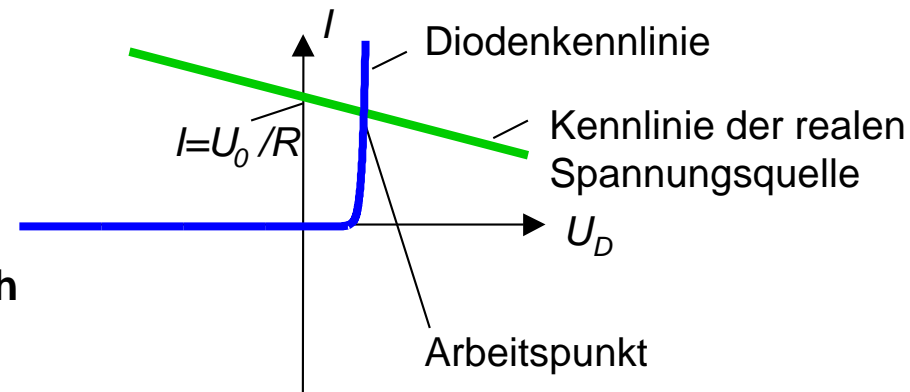
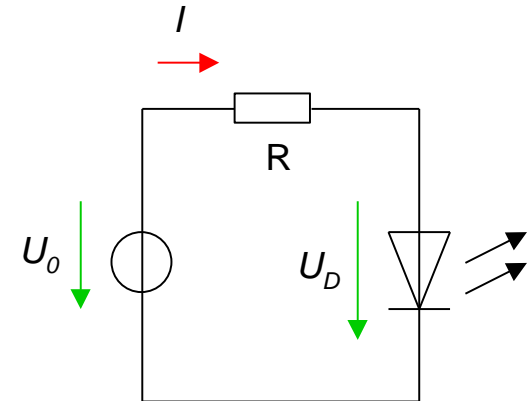
- durch Einsetzen ergibt sich:

$$U_D = U_0 - R \cdot I_s \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right)$$

- diese Gleichung lässt sich analytisch nicht nach  $U_D$  auflösen

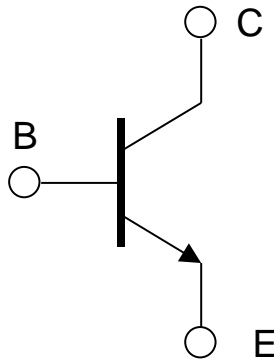
- neben der Lösung der Gleichung durch numerische Verfahren bieten sich auch grafische Verfahren an, denn oft gibt der Hersteller im Datenblatt nicht die Kennlinie als Formel an, sondern als Grafik

- die Gleichungen (1) und (2) geben beide je eine Funktion  $U_D = f(I)$  an, die gesuchte Lösung muss also der Schnittpunkt dieser beiden Funktionen sein, der Punkt wird auch der Arbeitspunkt der Schaltung genannt

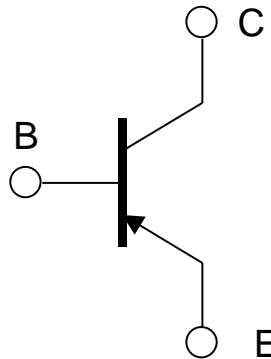


# Transistoren

- bei Transistoren handelt es sich um Bauelemente, die wie die Dioden ebenfalls aus Halbleitermaterial bestehen
- gegenüber Dioden besitzen Transistoren aber mindestens drei Anschlussklemmen
- mit der Erfindung des Transistors konnten die bis dahin zur Verstärkung von Signalen eingesetzten Elektronenröhren abgelöst werden
- es kann grob zwischen zwei grundsätzlichen Aufbauvarianten von Transistoren unterschieden werden:
  - Bipolartransistoren
  - Feldeffekttransistoren



NPN



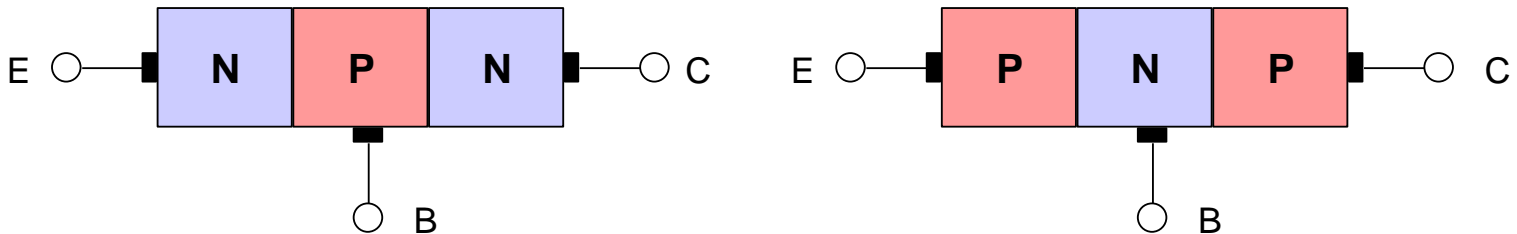
PNP

**Symbole für Bipolartransistoren**

**Der Pfeil am Emitteranschluss (E) symbolisiert die Richtung des Stromes in Durchflussrichtung**

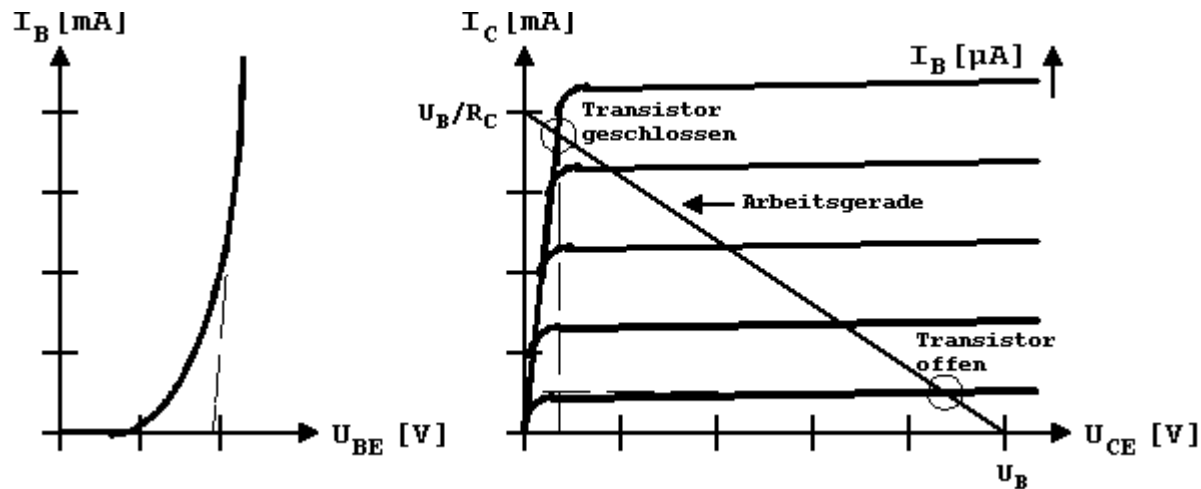
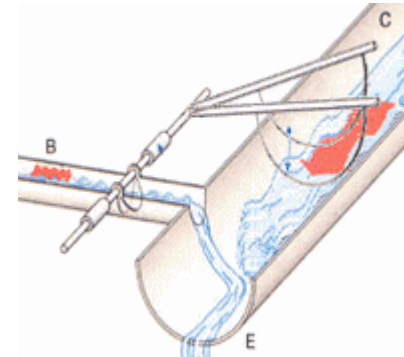
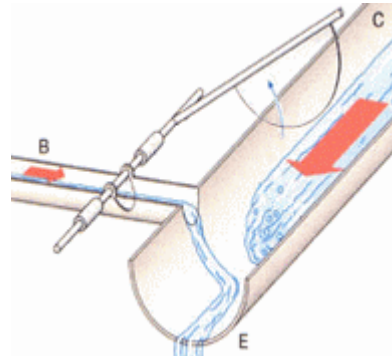
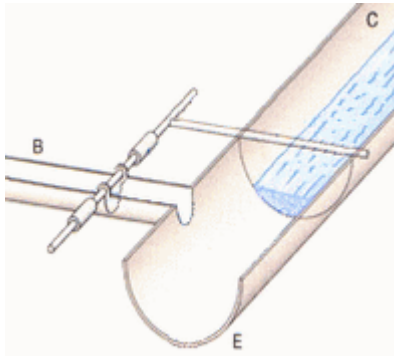
## Bipolartransistor

- der Bipolartransistor erweitert die Diode um eine weitere dotierte Schicht
- je nach Schichtenabfolge wird der Transistor NPN- oder PNP-Transistor genannt



- die mit den Schichten verbundenen Anschlüsse heißen Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C)
- wird der Emitter oder der Kollektor unbeschaltet gelassen, so verhält sich der Transistor bezüglich der beiden verbleibenden Klemmen wie eine Halbleiterdiode
- die Dotierung der drei Bereiche ist unterschiedlich, die Emitterzone ist am stärksten dotiert
- die Basis ist nur schwach dotiert und muss so dünn sein, dass sich die beiden Raumladungszonen der beiden pn-Übergänge teilweise überlappen können
- die Bezeichnung Bipolartransistor berücksichtigt, dass an der Stromleitung sowohl Löcher als auch Elektronen beteiligt sind

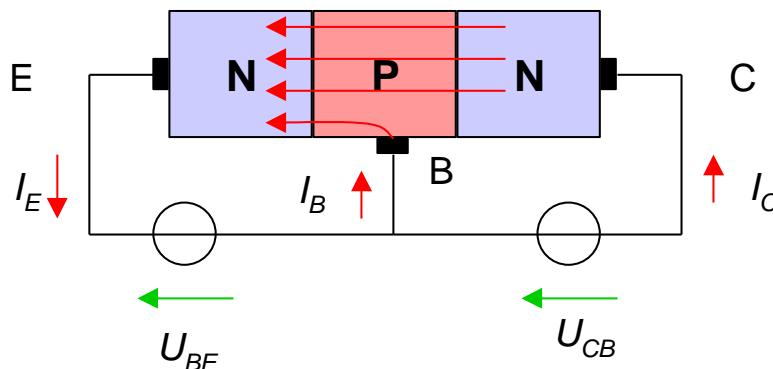
## Transistoren, Funktionsweise Arbeitskennlinie



## Bipolartransistor

- zum Betrieb des Transistors wird die Basis-Emitter-Strecke in Flussrichtung (Basis positiv gegenüber Emitter beim NPN-Transistor, Basis negativ gegenüber Emitter beim PNP-Transistor) betrieben
- die Kollektor-Basis-Strecke wird in Sperrrichtung betrieben
- bei leitfähiger Basis-Emitter-Strecke gelangen Ladungsträger (Elektronen beim NPN-Transistor, Löcher beim PNP-Transistor) vom Emitter in die Basiszone
- wegen der schwachen Dotierung und der geringen Ausdehnung gelangen diese Ladungsträger an den Rand der Kollektorzone, wo sie durch die am Kollektor anliegende Spannung zum Kollektoranschluss angezogen werden, im Basisanschluss fließt dabei nur ein geringer Strom
- für die Beträge der Ströme gilt:

$$I_B \ll I_C < I_E$$

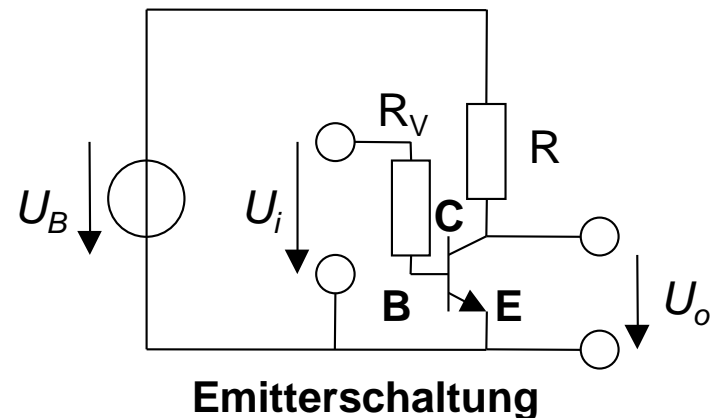
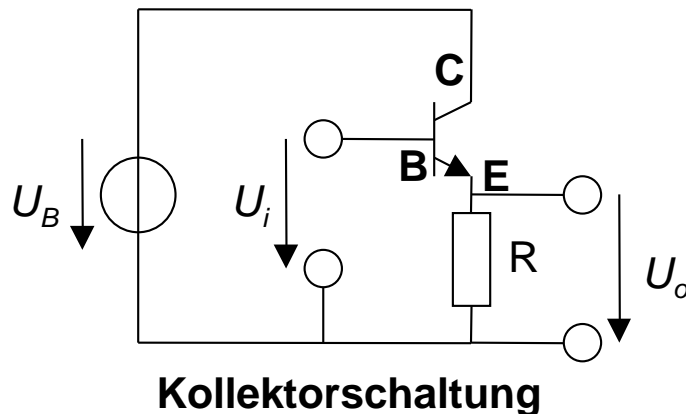


## Bipolartransistor

- wird der Basisstrom unterbrochen, indem die Spannung  $U_{BE}$  verringert wird, so dass die Basis-Emitter-Diode sperrt, können die Ladungsträger die dann vorhandene Basis-Emitter-Sperrschicht nicht überwinden, somit kann auch kein Kollektorstrom fließen
- beim Transistor kann also über einen kleinen Basisstrom ein großer Kollektorstrom gesteuert werden, durch kleine Änderungen des Basisstroms wird eine große Änderung des Stroms zwischen Kollektor und Emitter bewirkt
- der Transistor bewirkt also eine Stromverstärkung, er kann somit in Verstärkerstufen eingesetzt werden
- in der Digitaltechnik ist hingegen der Betrieb als „Schalter“ wichtiger; kommt es zu einem hinreichend großen Stromfluss zwischen Kollektor und Emitter, der durch einen Steuerstrom in die Basis hervorgerufen wird, kann die Emitter-Kollektor-Strecke näherungsweise wie ein geschlossener Schalter betrachtet werden
- bei unterbrochenem Steuerstrom ist der Schalter geöffnet, es handelt sich also um einen stromgesteuerten Schalter
- die Stromverstärkung des Schalters ist erforderlich, um die zwangsläufig in Schaltungen auftretenden Verluste zu kompensieren

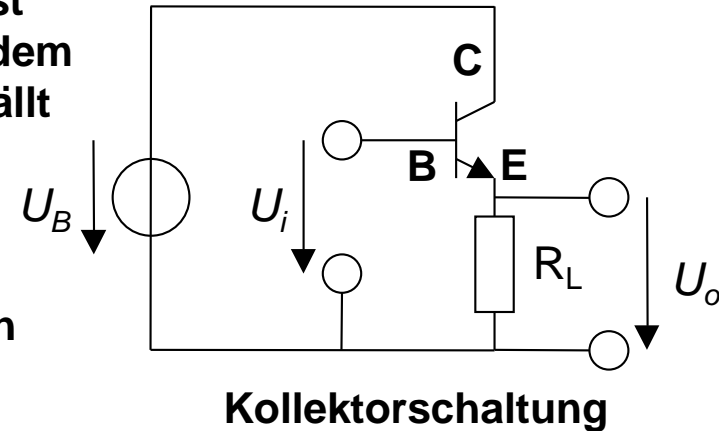
## Bipolartransistor

- in Digitalschaltungen wird der Transistor meist in zwei Grundschaltungen, der Emitterschaltung und der Kollektorschaltung, betrieben
- bei der Kollektorschaltung liegt der Kollektor auf konstanter Spannung, bei der Emitterschaltung wird der Emitter mit konstanter Spannung verbunden,
- die beiden Grundschaltungen sollen anhand des NPN-Transistors untersucht werden, beim PNP-Transistor haben die Spannungen und Ströme entgegengesetzte Richtungen



## Kollektorschaltung

- die Eingangsspannung  $U_i$  ( $i$  für Input) wird direkt dem Basisanschluss zugeführt, der Emittor ist mit einem Lastwiderstand  $R_L$  verbunden, an dem die Ausgangsspannung  $U_o$  ( $o$  für Output) abfällt
- zwischen Basis und Emittor ist die Diodenstrecke wirksam; ist die Diode offen, muss die Ausgangsspannung  $U_o$  nahezu der Eingangsspannung  $U_i$  entsprechen, abzüglich der Diffusionsspannung der Diode (vgl. Diodenkennlinie)
- da aber der Basisstrom deutlich niedriger ist als der Emittor- und der Kollektorstrom, ergibt sich eine Stromverstärkung
- am Ausgang kann also mehr Leistung im Lastwiderstand umgesetzt werden, als eingangsseitig zugeführt wird
- die Leistungsdifferenz wird aus der Versorgungsspannungsquelle bereitgestellt
- eine solche Kollektorschaltung (auch Emitterfolger genannt) findet sich meist in Endstufen sowohl von Digitalschaltungen als auch von Analogschaltungen (z.B. Audioendstufen)



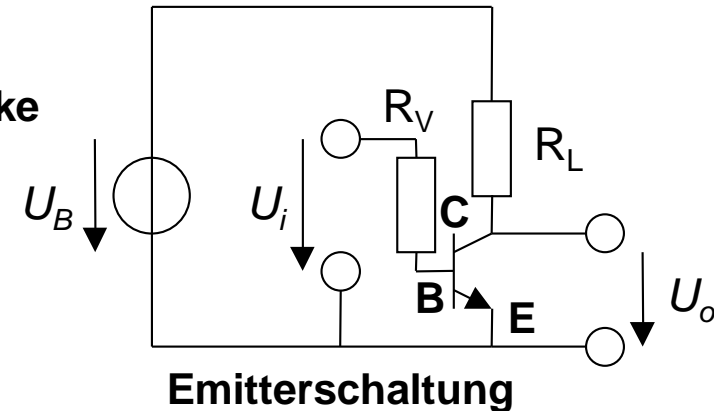
wenn B-E-Diode offen:

$$U_o \approx U_i$$



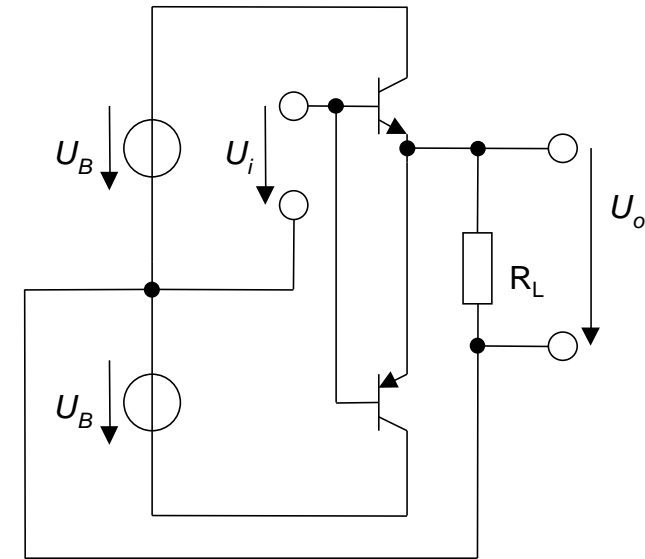
## Emitterschaltung

- die Eingangsspannung wird zwischen Basis und Emitter angelegt, hier ist die Diodenstrecke offen, ein Vorwiderstand  $R_V$  zur Strombegrenzung ist notwendig
- der Lastwiderstand  $R_L$  ist zwischen der Versorgungsspannung und dem Kollektor angeschlossen
- ist die Eingangsspannung  $U_i$  Null, fließt auch kein Basisstrom, der Transistor sperrt, womit der Lastwiderstand  $R_L$  stromlos ist; dies bedeutet, dass der Spannungsabfall an diesem Widerstand ebenfalls Null ist; somit entspricht die Ausgangsspannung  $U_o$  der Versorgungsspannung  $U_B$
- wenn eine hinreichend hohe positive  $U_i$  Eingangsspannung angelegt wird, fließt ein Basisstrom, der Transistor wird leitfähig dies führt zu einem Strom durch den Lastwiderstand, ist die Leitfähigkeit des Transistors hoch genug, wird die Spannung am Ausgang nahezu Null
- dieses Verhalten wird invertierend genannt, die Emitterschaltung kann also als Inverter verwendet werden
- auch hier führt ein kleiner Eingangsstrom zu einem größeren Ausgangsstrom, so dass hier ausgangsseitig eine höhere Ausgangsleistung vorliegt (Verstärker)



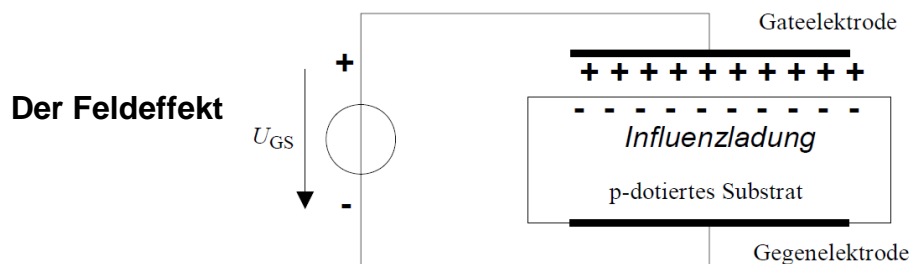
## Kombination von Transistorschaltungen

- durch Kombination der Grundsaltungen sowie von Varianten mit NPN und PNP-Transistoren lassen sich Vorteile der einzelnen Schaltungen miteinander kombinieren
- die Kollektorschaltung kann zwar die Spannung am Ausgang durch entsprechendes Ansteuern des Transistors erhöhen, zum Senken der Ausgangsspannung wird die Ansteuerung reduziert, woraufhin der Transistor sperrt
- liegt parallel zum Ausgang eine Kapazität, die z.B. durch benachbarte Leiterbahnen gebildet wird, muss diese Kapazität über den Lastwiderstand entladen werden, dieser Vorgang kann für bestimmte Anwendungen zu lange dauern
- durch Ergänzung der Kollektorschaltung durch eine komplementäre Kollektorschaltung (gleichartige Schaltung jedoch mit dem jeweils anderen Transistortyp) lässt sich auch der Vorgang der Spannungsreduzierung durchführen
- bei einer positiven Eingangsspannung  $U_i$  ist der obere Transistor (NPN) leitfähig, bei einer negativen Eingangsspannung  $U_i$  leitet der untere Transistor (PNP), eine möglicherweise am Ausgang parallel geschaltete Kapazität kann daher schnell aufgeladen und wieder entladen werden

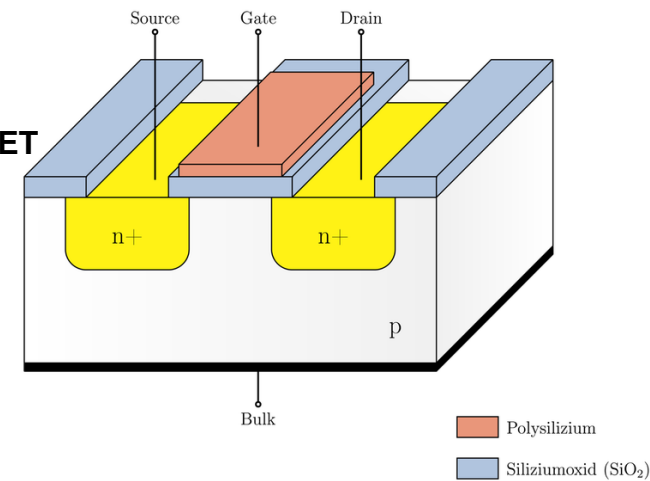


## Feldeffekttransistor

- Bipolartransistoren werden durch einen Strom gesteuert
- der Feldeffekttransistor ist leistungsarm über eine Spannung ansteuerbar, diese Technologie wird deshalb heute häufig eingesetzt
- beim Feldeffekttransistor wird die Leitfähigkeit eines halbleitenden Kanals durch ein elektrisches, auf den Kanal einwirkendes Feld gesteuert
- wie der Bipolartransistor hat der Feldeffekttransistor (FET) drei Anschlüsse, die Source S (Quelle), Drain D (Senke) und Gate G (Tor) genannt werden
- im normalen Betriebsfall besteht zwischen dem Gate und dem Kanal zwischen Source und Drain keine direkte leitfähige Verbindung,
- beim Metall-Oxid-Feldeffekttransistor MOSFET wird eine sehr dünne Isolationsschicht aus Siliziumoxid\* gebildet



N-Kanal MOSFET

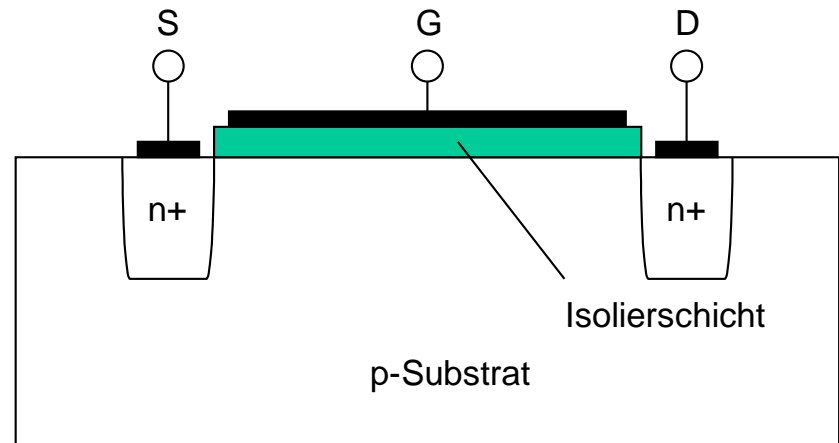


\*) Siliziumoxid bildet die notwendigen Isolationsschichten

## Feldeffekttransistor

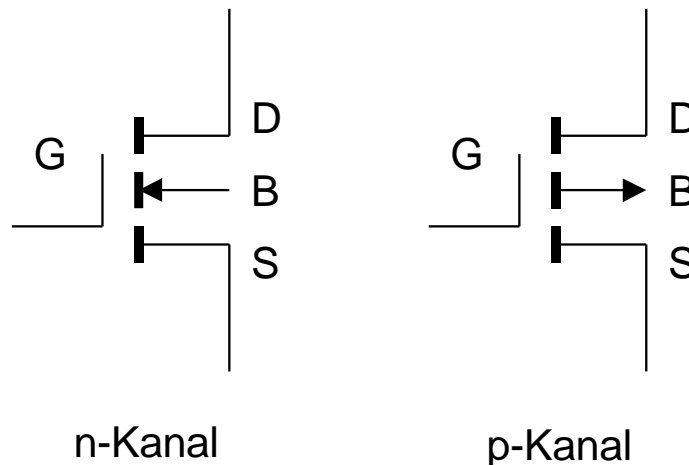
### MOSFET

- beim n-Kanal-MOSFET werden in ein schwach dotiertes p-Substrat hochdotierte (n+) Diffusionsinseln eingebracht, die mit Source und Drain-Elektroden verbunden werden
- oberhalb des Bereiches zwischen den Inseln ist über einer Isolierschicht aus Siliziumoxid die Gateelektrode aus einem aufgedampften Metall (meist Aluminium) aufgebracht
- aus der Schichtenabfolge resultiert die Bezeichnung Metall-Oxide-Semiconductor des Transistors
- unabhängig von der Polarität der Spannung wird zwischen S und D eine Grenzschicht zwischen n+ und p-Bereich ausgebildet, so dass keine leitende Verbindung zwischen S und D besteht.



## MOSFET

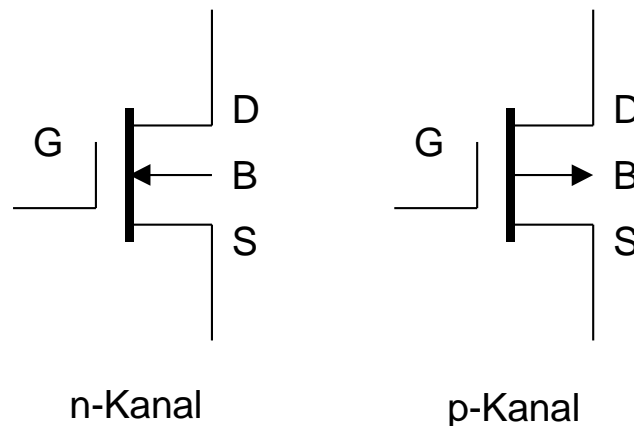
- beim Anlegen einer Steuerspannung wird die Source-Drain-Strecke dieses Transistors leitfähig
- da sich die zum Aufbau des Kanals erforderlichen Ladungsträger erst unterhalb der Isolierung anlagern müssen, wird dieser Transistortyp „Anlagerungstyp“ (engl. Enhancement) genannt
- dieser Transistor ist ohne Anlegen einer Steuerspannung sperrend; er ist selbstsperrend
- die Schaltsymbole für diesen Transistortyp sind:



- der Substratanschluss wird mit B für Bulk gekennzeichnet (er ist nicht für alle Anwendungen von Bedeutung)

## MOSFET

- durch den Einbau lokalisierter Ladungsträger in die Isolierschicht lässt sich auch ohne Anlegen einer Spannung eine Inversionsschicht und damit eine leitende Verbindung zwischen Source und Drain erzeugen
- ein solcher Transistor wird „Verarmungstyp“ (engl. Depletion) genannt, wegen des Kanals ist er selbstleitend
- damit der Transistor sperrt, muss eine entgegengesetzte Steuerspannung (beim p-Kanal-Typ also eine positive Spannung) angelegt werden
- die Schaltsymbole sind ähnlich zu denen der Anlagerungstypen



- die durchgezogene Linie symbolisiert den Kanal, der ohne Steuerspannung bereits vorhanden ist

# Funktionsweise N(-)MOS(FET)-Transistor

## Der MOS-Kondensator

- Gate und P-dotierte Schicht formen einen MOS-Kondensator

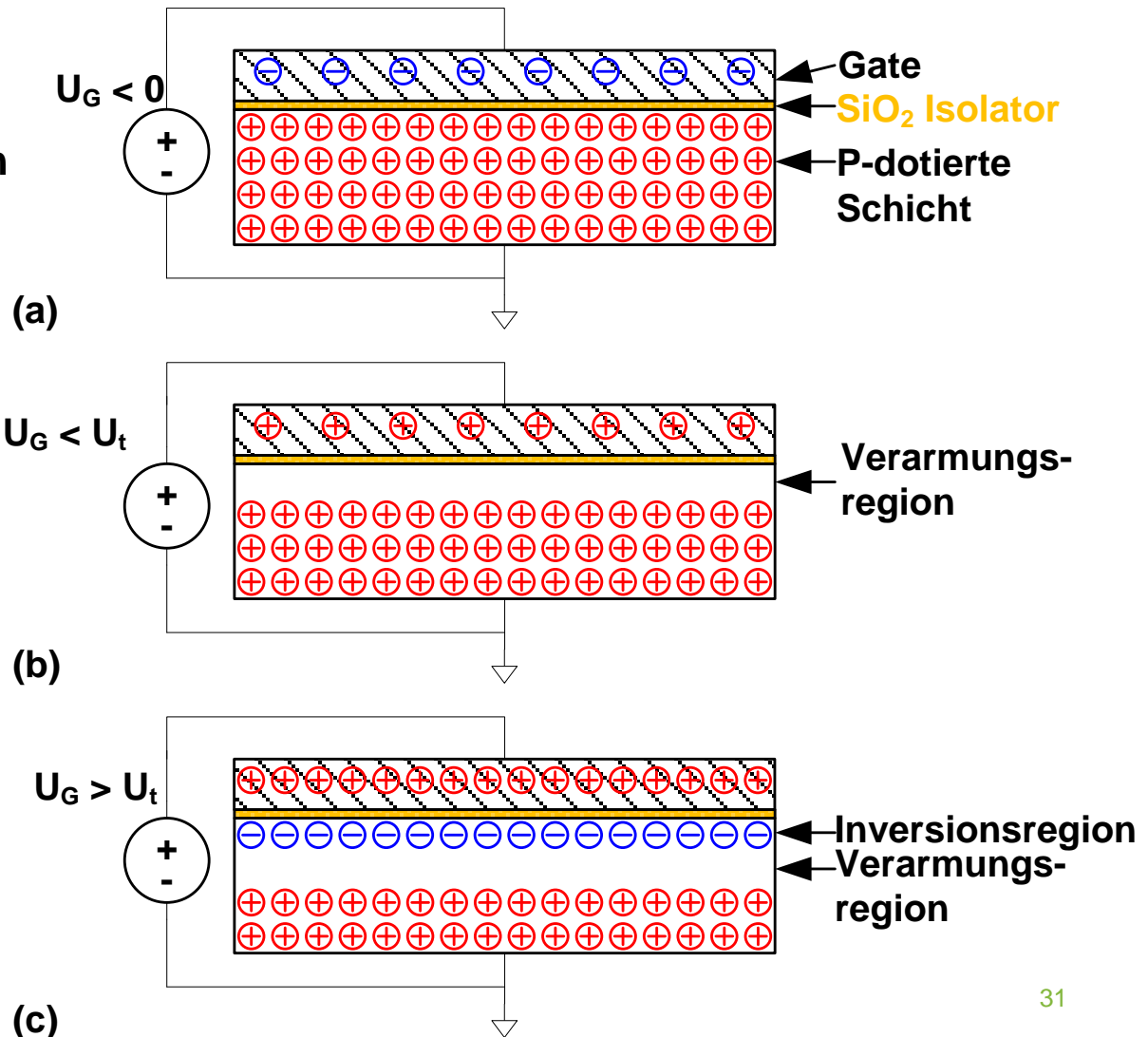
- Betriebszustände

a) Akkumulation

b) Verarmung

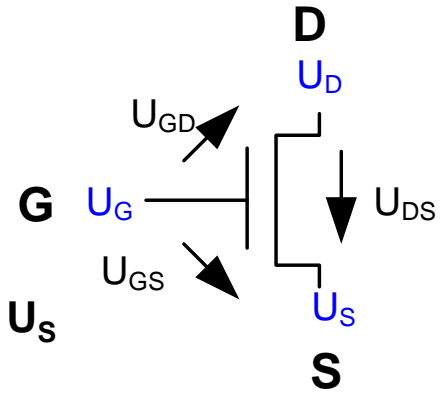
c) Inversion

$U_t$ : Einsetzspannung  
für Inversion



## Feldeffekttransistor

### Funktionsweise NMOS-Transistor Spannungen und die drei Betriebszustände



- Betriebszustand hängt ab von den Spannungen  $U_G$ ,  $U_D$ ,  $U_S$ 
  - $U_{GS} = U_G - U_S$
  - $U_{GD} = U_G - U_D$
  - $U_{DS} = U_D - U_S = U_{GS} - u_{GD}$
- Source und Drain sind symmetrische Anschlüsse
  - nach Konvention ist Source normalerweise der Anschluss am niedrigeren Potential
  - deshalb gilt  $U_{DS} \geq 0$
- NMOS Substrat ist an Masse angeschlossen, es gilt zunächst auch  $U_S=0$

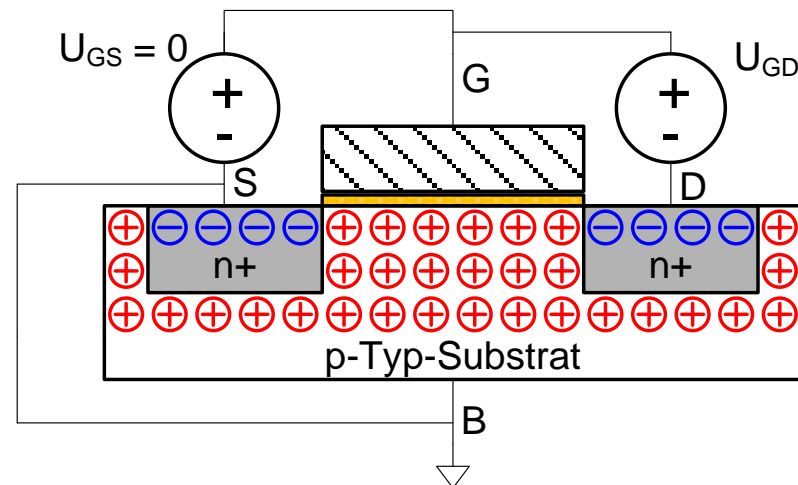


# Feldeffekttransistor

## Funktionsweise NMOS-Transistor

### 1. Betriebszustand – der Sperrbetrieb

- drei Betriebszustände
  1. Sperrbetrieb
  2. Linearer Betrieb
  3. Sättigungsbetrieb
- Spannungsquelle  $U_{GS}$  steuert den MOS-Kondensator
- kein leitfähiger Kanal zwischen Drain und Source wird ausgebildet
- $I_{DS} = 0$

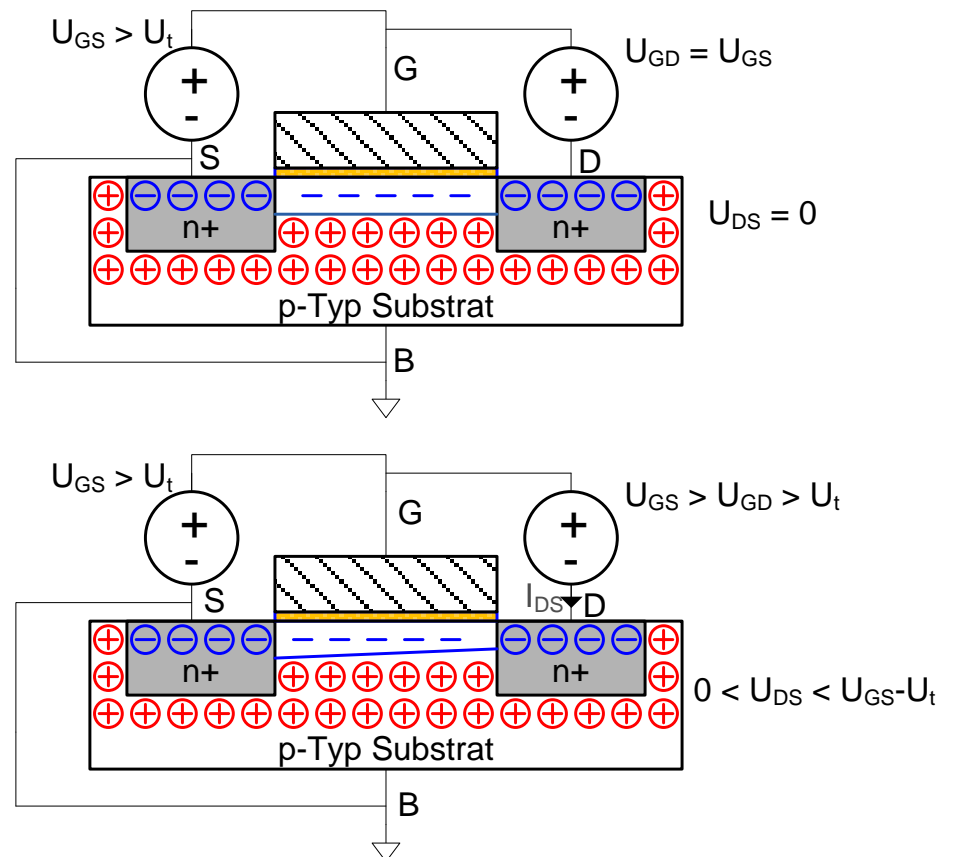


## Funktionsweise NMOS-Transistor

### 2. Betriebszustand – der lineare Betrieb

- ein leitfähiger Kanal (Inversionsregion) wird ausgebildet
- Inversionsregion verbindet Drain mit Source
- Strom fließt von Drain nach Source
- Elektronen fließen von Source nach Drain
- $I_{DS}$  wächst linear mit  $U_{DS}$  an
- Verhalten ähnlich zu einem linearen Widerstand

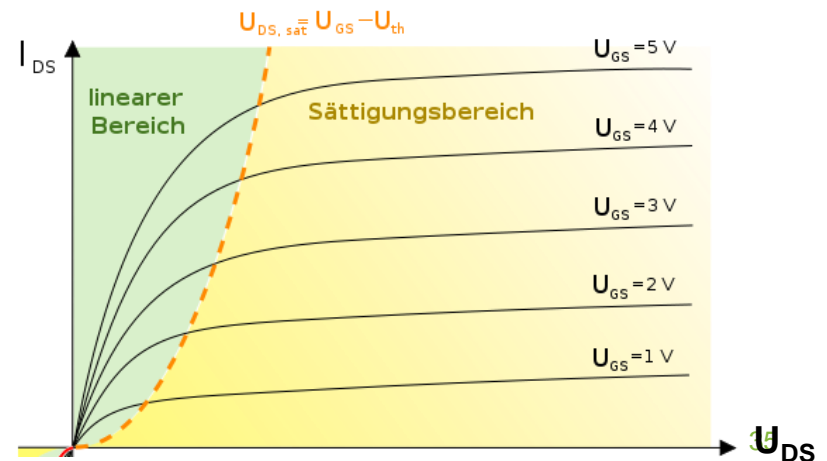
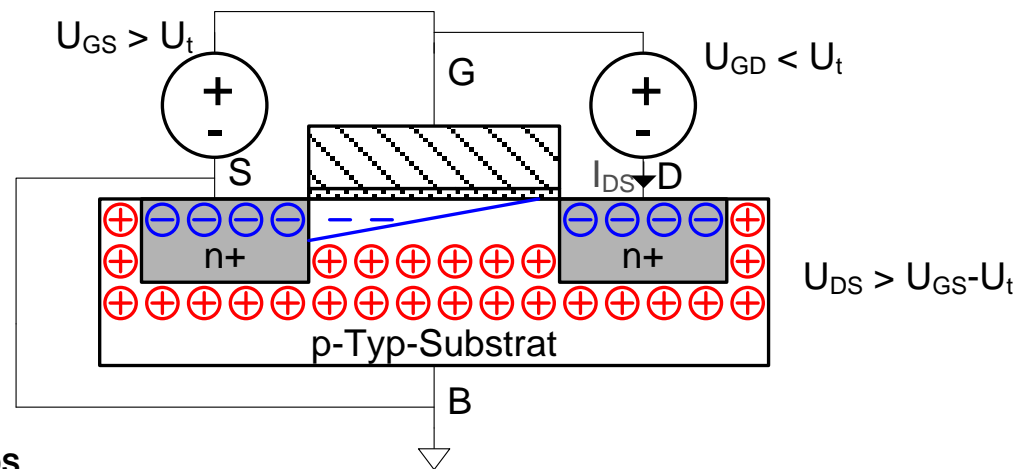
$U_t$ : Einsetzspannung für  
Inversion  
(Threshold Voltage)



## Funktionsweise NMOS-Transistor

### 3. Betriebszustand – der Sättigungsbetrieb

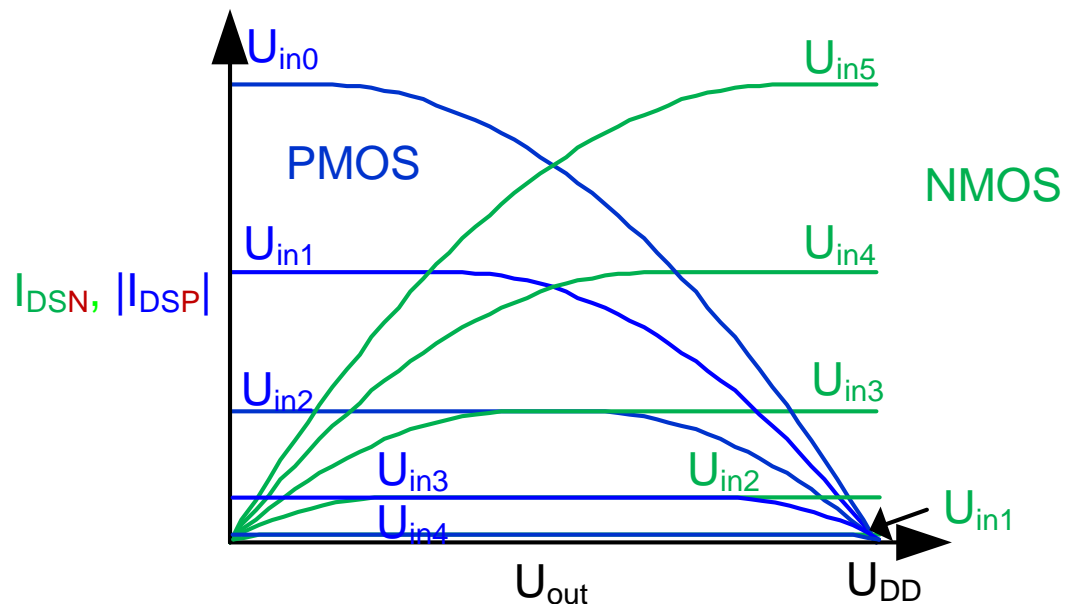
- Kanal wird bei angelegter Spannung  $U_{DS}$  eingeschnürt
- das Feld am Drain „saugt“ Elektronen aus dem Kanal
- wenn  $U_{DS} > U_{GS} - U_t$  wird der Kanal kürzer
- $I_{DS}$  ist dann unabhängig von  $U_{DS}$
- der Strom ist “gesättigt”
- das Verhalten ist ähnlich zu einer Stromquelle



## Funktionsweise **P**-MOS(FET)-Transistor

### Strom-Spannungs-Charakteristik

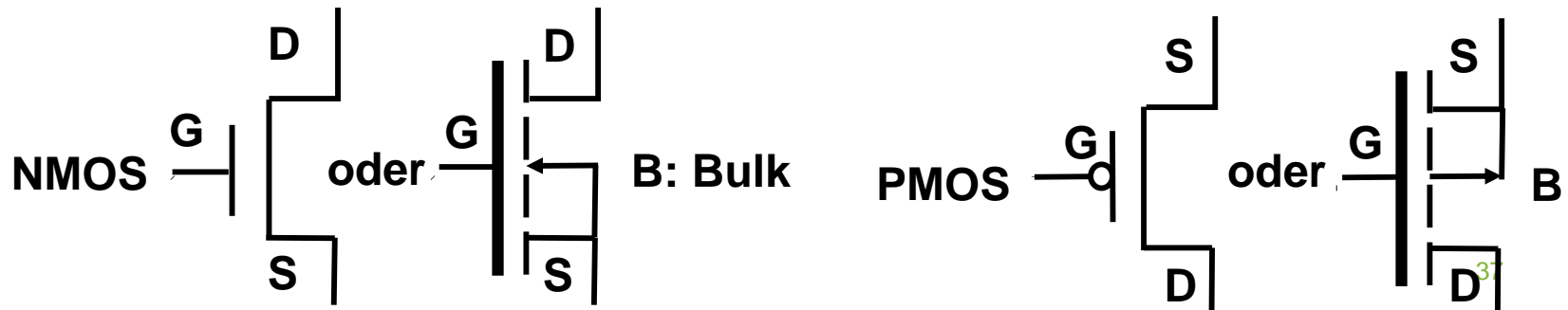
- alle Dotierungen und Spannungen sind invertiert für PMOS
- Leitfähigkeit des Inversionskanals wird bestimmt durch die Beweglichkeit der Löcher
- die Beweglichkeit der Löcher ist etwa 2-3 mal niedriger als die der Elektronen
- der PMOS muss also 2 bis 3 mal breiter werden, um den selben Strom zu transportieren, wie ein NMOS



## Gegenüberstellung Bipolar-Transistoren - MOS-FET-Transistoren

- **Bipolar Transistoren**
  - **NPN oder PNP Silizium Strukturen**
  - ein kleiner Strom in die sehr dünne Basis-Schicht steuert einen hohen Strom zwischen Emitter und Kollektor
  - die Basis-Ströme limitieren die Integrationsdichte
- **Metal Oxide Semiconductor Feld Effekt Transistoren**
  - **NMOS and PMOS-FETs**
  - eine Spannung, die an einem isolierten Anschluss (Gate) angelegt wird, steuert Strom zwischen Source und Drain
  - geringe Leistungsverluste erlauben eine hohe Integrationsdichte

### Weitere Darstellungsarten für NMOS und PMOS:

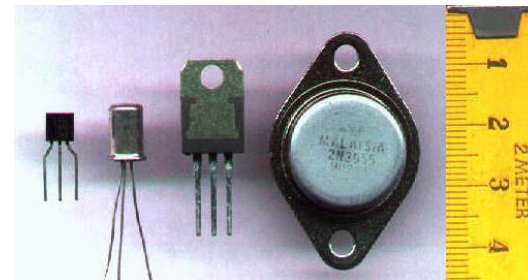


# Realisierung von digitalen Grundsaltungen

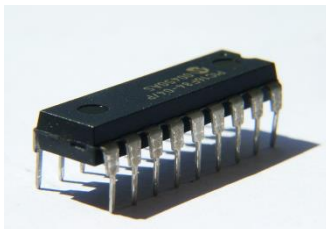
- in der Digitaltechnik werden mit Transistoren einzelne Grundsaltungstypen aufgebaut
- dabei finden sich heute die einzelnen Transistoren nicht mehr als diskrete Bauelemente wieder, sondern je nach Komplexität der Schaltung sind mehrere hundert bis mehrere Millionen Transistoren auf einem gemeinsamen Siliziumsubstrat untergebracht



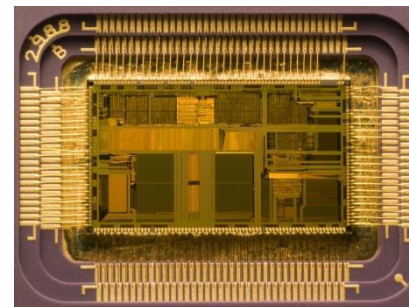
erster Transistor  
von Shockley,  
Bardeen und  
Brattain



diskrete  
Transistoren



IC



IC/ Prozessor

- allgemein werden solche integrierten Bauteileansammlungen „Integrierte Schaltungen“ (englisch: Integrated Circuit oder IC) genannt

# Gatter

- bei den einzelnen Funktionsgruppen kann man zwischen vergleichsweise einfachen Gatter- und Treiberschaltungen, Flip-Flops, Zählern und Speichern unterscheiden
- ein Gatter bezeichnet in der Digitaltechnik eine Schaltung, die eine bestimmte elementare Operation der Booleschen Algebra ausführt und damit der physikalischen Implementierung einer mathematischen Operation entspricht
- nicht alle unterschiedlichen Formen von Gattern können erläutert werden, nur die grundlegenden Prinzipien werden aufgezeigt
- als Gatter werden beispielsweise digitale Grundsaltungen für UND, ODER und NICHT bezeichnet
- durch Verkettung der Grundelemente sind beliebige komplexe logische Verknüpfungen realisierbar
- ganz allgemein besteht ein reales Gatter aus drei Teilen: der Pegeldetektion, der logischen Verknüpfung und einer Treiberstufe
- die einzelnen Stufen sollen im folgenden erläutert werden

## **Pegeldetektion**

- **Digitalschaltungen bilden logische Verknüpfungen nach, bei denen die internen Zustandsgrößen und Ein-/Ausgangsgrößen die binären (logischen) Werte „1“ und „0“ annehmen können**
- **diese beiden logischen Zustände müssen durch eine elektrotechnische Größe nachgebildet werden**
- **prinzipiell kommen Spannungen und Ströme in Frage, in den meisten Fällen werden Spannungen verwendet, wobei logisch „0“ meist einer niedrigen Spannung entspricht (daher auch low, „L“ genannt) und logisch „1“ einer hohen Spannung entspricht (high oder „H“)**
- **die Zuordnung von Spannungswerten zu den Pegeln sind in einzelnen Logikfamilien definiert**
- **sollen innerhalb einer logischen Schaltung Gatter unterschiedlicher Logikfamilien eingesetzt werden, so erfordert dies meist zwischen ihnen eine Pegelwandlung**



## Logische Verknüpfung

- in der logischen Verknüpfung wird die eigentliche logische Funktion abgebildet
- Prinzip der Verknüpfung ist die Kombination von Serien- und Parallelschaltungen von Halbleiterschaltern

## Treiberstufe

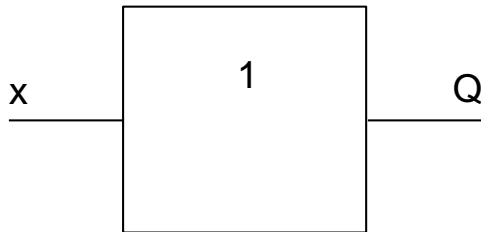
- Aufgabe der Treiberstufe ist die Bereitstellung einer hinreichenden Ausgangsleistung, um an einen Gatterausgang mehrere Gattereingänge anschließen zu können, ohne dass es durch die Belastung der Gattereingangsstufen zu Verfälschungen des logischen Pegels kommt
- je nach Einsatzgebiet gibt es unterschiedliche Formen dieser Treiberstufe, auf die später näher eingegangen wird

## Identität

- das einfachste Gatter ist die Identität
- die Identität besitzt einen Ein- und einen Ausgang
- der mit Q bezeichnete Ausgang entspricht dem Wert des Eingangs x:

$$Q = x$$

- das Schaltsymbol des Gatters ist:



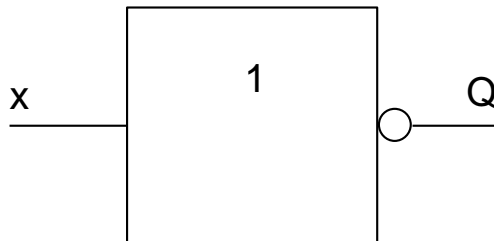
- eine einfache schaltungstechnische Realisierung kann beispielsweise eine Kollektorschaltung sein
- das Identitätsgatter hat keine logische Anwendung, wird in der Praxis aber als sogenannter Treiber oder Buffer verwendet, um beispielsweise an einen Ausgang viele Eingänge nachgeschalteter Gatter anzuschließen

## Inverter (NOT)

- die Umkehrung der Identität ist der Inverter (NICHT-Element)
- die logische Funktion ist:

$$Q = \bar{x}$$

- der Strich über dem  $x$  steht allgemein für die Negierung
- das Schaltsymbol entspricht weitgehend dem der Identität, die Negierung wird durch den zusätzlichen Kreis am Ausgang angedeutet



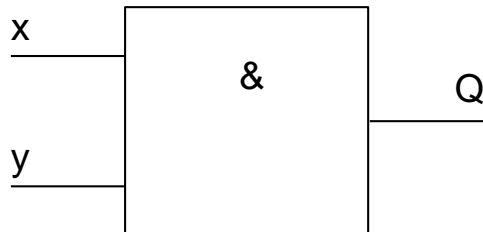
- eine schaltungstechnische Realisierung erfolgt über Transistorschaltungen

## UND (AND) Verknüpfung

- die logische UND-Verknüpfung (Konjunktion) wird mit dem UND-Gatter (AND) realisiert

$$Q = x \wedge y$$

- das Schaltsymbol ist:



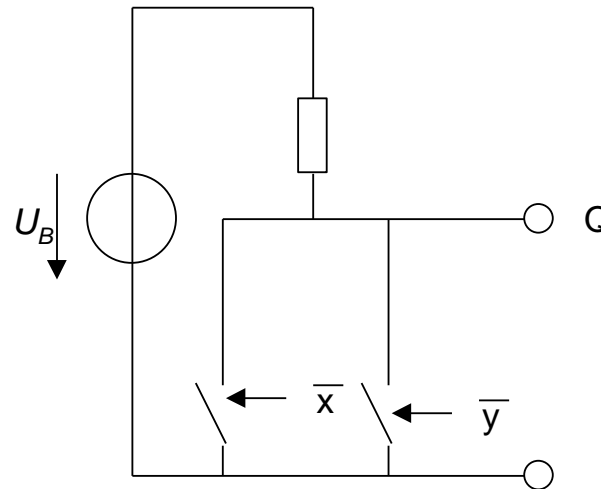
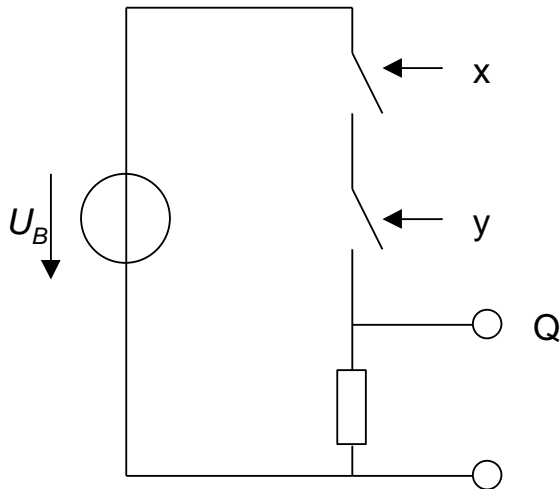
$x$	$y$	$Q$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**Funktionstabelle**

- entsprechend der Funktionstabelle des UND-Gatters ist der Ausgang nur dann „1“, wenn beide Eingänge „1“ sind
- der Ausgang ist „0“, wenn ein Eingang oder beide Eingänge „0“ sind

## UND (AND) Verknüpfung

- es gibt prinzipiell zwei schaltungstechnische Realisierungen, die zunächst schematisch mit Schaltern dargestellt werden sollen



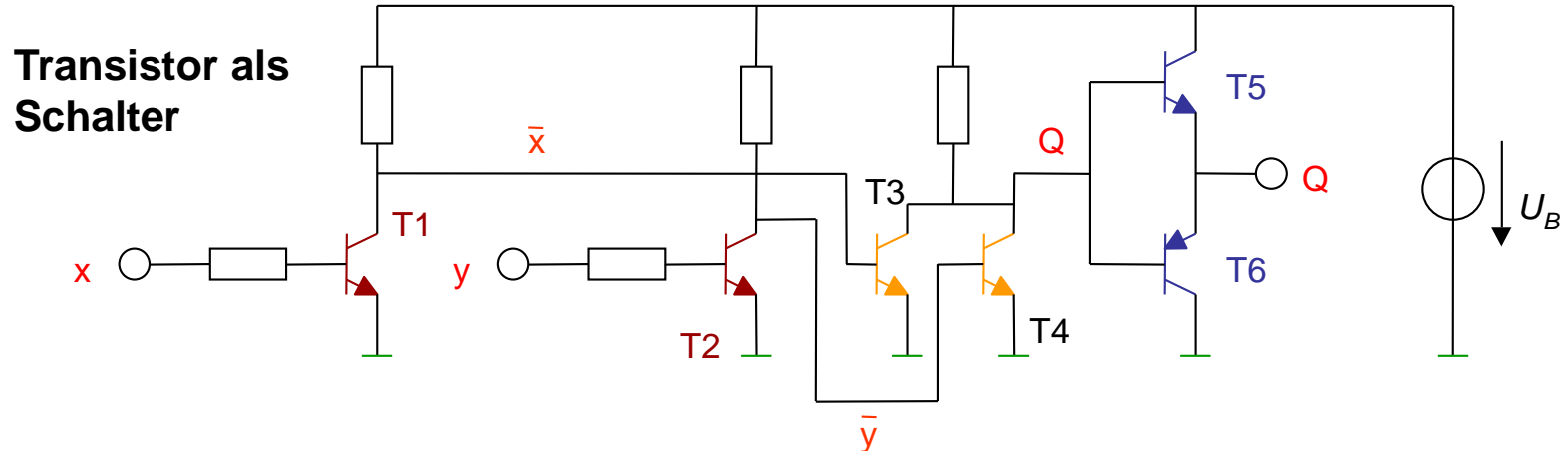
$x$	$y$	$Q$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**Funktionstabelle**

- die Schalter in der linken Schaltung sind geschlossen, wenn  $x$  bzw.  $y$  „1“ sind
- in der rechten Schaltung sind die Schalter geschlossen, wenn  $x$  bzw.  $y$  „0“ sind
- werden in der rechten Schaltung die Schalter durch Transistoren ersetzt, so muss zunächst mit Invertern aus den Eingangssignalen die negierten Signale gewonnen werden

## UND (AND) Verknüpfung

- Realisierung der Inverter ist z. B. über die Emitterschaltungen möglich (**T1**, **T2**), die gleichzeitig die Funktion der Pegeldetektion übernehmen
- anschließend finden sich die beiden parallelen Schalter in den Transistoren **T3** und **T4**
- die Komplementärstufe mit den Transistoren **T5** und **T6** bildet die **Ausgangstreiberstufe**.



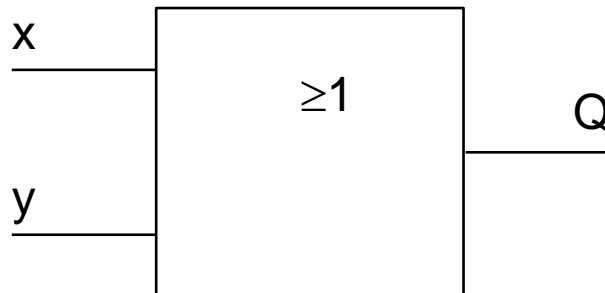
- die kleinen waagerechten Linien am Emitter der Transistoren T1-T4 bedeuten „**Masse**“, all diese Masseanschlüsse sind miteinander verbunden, die Masse stellt den Bezugspunkt für die Spannungen innerhalb einer Schaltung dar

## ODER (OR) Verknüpfung

- als letztes Grundelement wird die ODER-Verknüpfung (OR/ Disjunktion) betrachtet:

$$Q = x \vee y$$

- Das Gatter hat das Schaltsymbol:



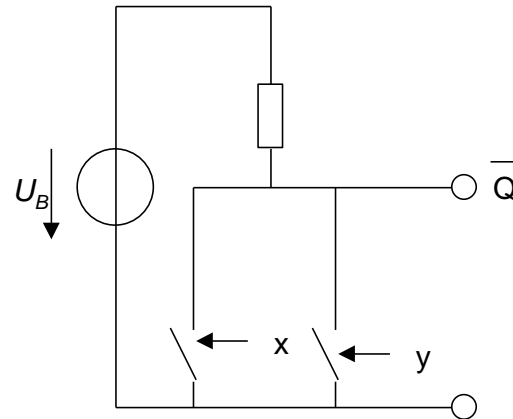
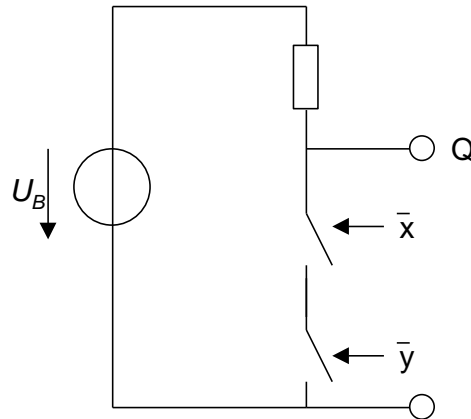
$x$	$y$	$Q$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Funktionstabelle

- der Ausgang ist logisch „1“, wenn der eine ODER der andere Eingang logisch „1“ ist
- der Ausgang ist logisch „0“ wenn sowohl x als auch y logisch „0“ sind
- diese Form der Verknüpfung wird auch nicht-ausschließendes oder genannt

## ODER (OR) Verknüpfung

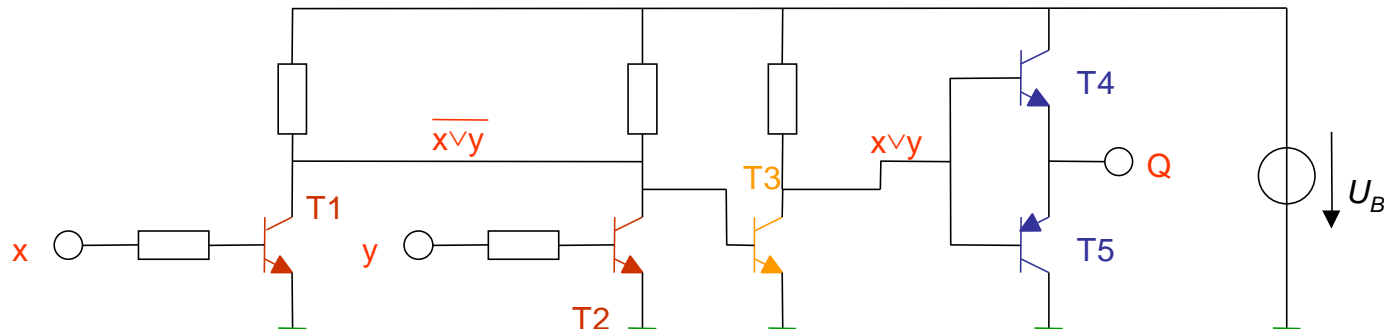
- es gibt prinzipiell zwei schaltungstechnische Realisierungen, die zunächst schematisch mit Schaltern dargestellt werden sollen



$x$	$y$	$Q$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**Funktionstabelle**

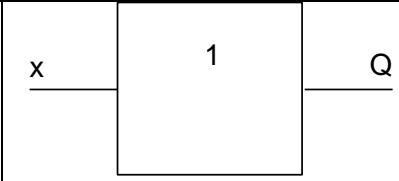
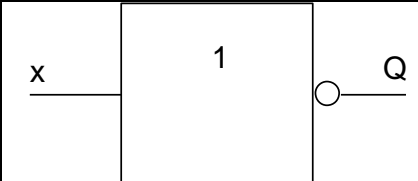
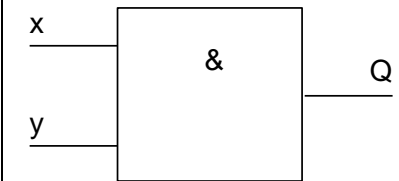
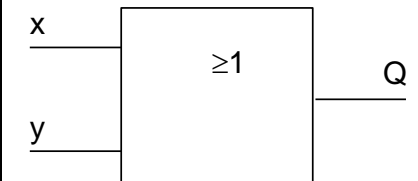
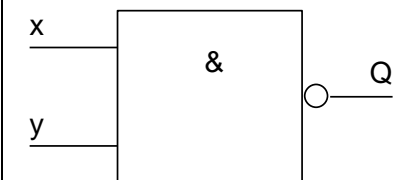
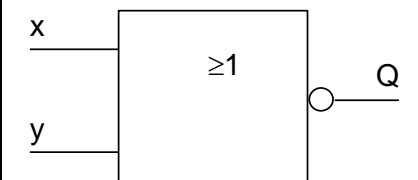
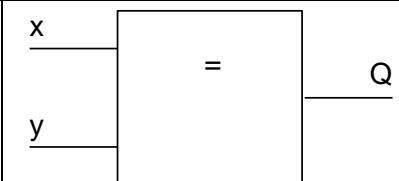
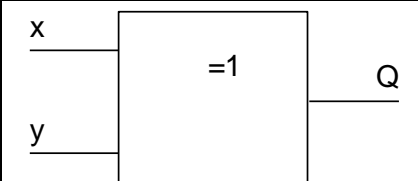
- bei der rechten Schaltung ist zu beachten, dass diese nicht  $Q$ , sondern das Negierte  $\bar{Q}$  liefert
- diese Schaltung lässt sich durch geringfügige Modifikation der Transistorschaltung des UND-Gatters umsetzen





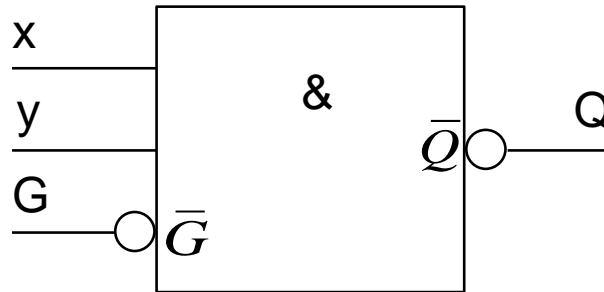
## Übersicht

- durch Verknüpfung dieser Grundsaltungen lassen sich beliebige logische Funktionen erzeugen, einige von ihnen nutzen eigene Schaltsymbole

Identity	$Q = x$		NOT	$Q = \bar{x}$	
AND	$Q = x \wedge y$		OR	$Q = x \vee y$	
NAND (NOT-AND)	$Q = \overline{x \wedge y}$		NOR	$Q = \overline{x \vee y}$	
Compa- rator	$Q = (x \equiv y)$ $= (x \wedge y) \vee (\bar{x} \wedge \bar{y})$		EXOR	$Q = (x \neq y)$ $= (x \wedge \bar{y}) \vee (\bar{x} \wedge y)$	

## Übersicht

- das Kreis-Symbol für die Negation ist nicht nur am Ausgang üblich, sondern kann auch bei Eingängen eingesetzt werden, ebenso sind Gatter mit mehr als zwei Eingängen möglich



- das obige Gatter realisiert also die logische Verknüpfung:  

$$Q = \overline{(x \wedge y \wedge \overline{G})}$$

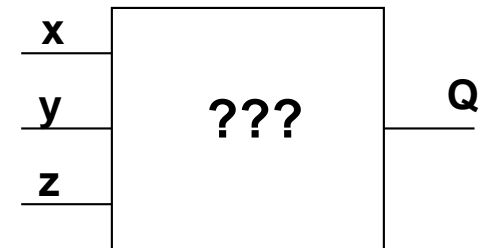
$x$	$y$	$\overline{G}$	$G$	$\overline{Q}$	$Q$
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0

**Funktionstabelle**

## Disjunktive Normalform (DNF)

- jede beliebige binäre Funktion kann allein durch eine Kombination von AND-, OR- und NOT-Gattern dargestellt werden
- eine Möglichkeit der Darstellung ist die disjunktive Normalform (DNF), hier werden die Zeilen einer Wahrheitstabelle durch ODER-Operationen miteinander verbunden
- Beispiel:

x	y	z	Q	Konjunktion
0	0	0	0	
0	0	1	0	
0	1	0	1	$\bar{x} \wedge y \wedge \bar{z}$
0	1	1	1	$\bar{x} \wedge y \wedge z$
1	0	0	0	
1	0	1	1	$x \wedge \bar{y} \wedge z$
1	1	0	0	
1	1	1	1	$x \wedge y \wedge z$



**Disjunktive Normalform:**

$$Q = (\bar{x} \wedge y \wedge \bar{z}) \vee (\bar{x} \wedge y \wedge z) \vee (x \wedge \bar{y} \wedge z) \vee (x \wedge y \wedge z)$$

## Vereinfachung der disjunktiven Normalform mit dem KV-Diagramm

- mittels eines KV-Diagramms (Karnaugh-Veitch-Diagramm) lässt sich jede beliebige boolesche Funktion in eine (meist) minimale disjunktive Normalform (DNF) umwandeln
- das Umwandeln beginnt mit dem Erstellen einer Funktionstabelle, die dann direkt in ein KV-Diagramm umgewandelt wird
- durch geschickte Wahl bestimmter Blöcke innerhalb des Diagramms entstehen die Terme der Normalform
- ein KV-Diagramm für  $n$  Eingangsvariablen hat  $2^n$  Felder (alle möglichen Kombinationen der Eingangsvariablen)
- das KV-Diagramm wird mit den Variablen (meist nur nicht-negiert) an den Rändern beschriftet
- die Zuordnung der Variablen zu den einzelnen Feldern kann dabei beliebig erfolgen, jedoch ist zu beachten, dass sich horizontal und vertikal benachbarte Felder nur in genau einer Variablen unterscheiden dürfen
- mit Hilfe der Wahrheitstabelle der zu optimierenden Funktion wird in die einzelnen Felder eine 1 oder 0 eingetragen

## Vereinfachung der disjunktiven Normalform mit dem KV-Diagramm

- man versucht, möglichst viele horizontal und vertikal benachbarte Felder, die eine 1 enthalten (sog. Minterme) zu zusammenhängenden 2er-, 4er, 8er oder 16er-Blöcken (sogenannten Päckchen) zusammenzufassen
- ein Block kann unter Umständen über den rechten bzw. unteren Rand des Diagramms fortgesetzt werden
- die gebildeten Päckchen wandelt man nun in Konjunktionsterme um, dabei werden Variablen innerhalb eines Blockes, die in negierter und nicht negierter Form auftreten, weggelassen ( $x = (x \wedge y) \vee (x \wedge \bar{y})$ )
- diese UND-Verknüpfungen werden anschließend durch ODER-Verknüpfungen zusammengefasst und ergeben die disjunktive Normalform

z=1

	0	0	1	0
	(x=0,y=0,z=0)	(x=0,y=0,z=1)	(x=1,y=0,z=1)	(x=1,y=0,z=0)
y=1 {	1	1	1	0
	(x=0,y=1,z=0)	(x=0,y=1,z=1)	(x=1,y=1,z=1)	(x=1,y=1,z=0)
				x=1

KV-Diagramm für 3 Variable

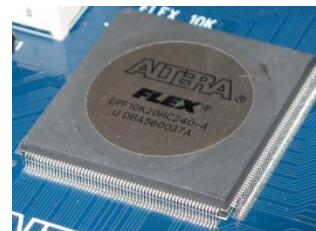
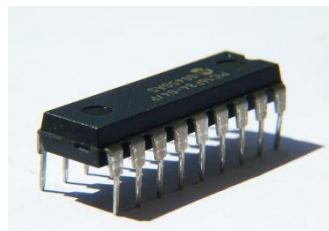
Vereinfachte disjunktive Normalform:

$$Q = \underline{(\bar{x} \wedge y)} \vee \underline{(x \wedge z)} \vee \underline{(y \wedge z)}$$

$$Q = \underline{(\bar{x} \wedge y)} \vee \underline{(x \wedge z)}$$

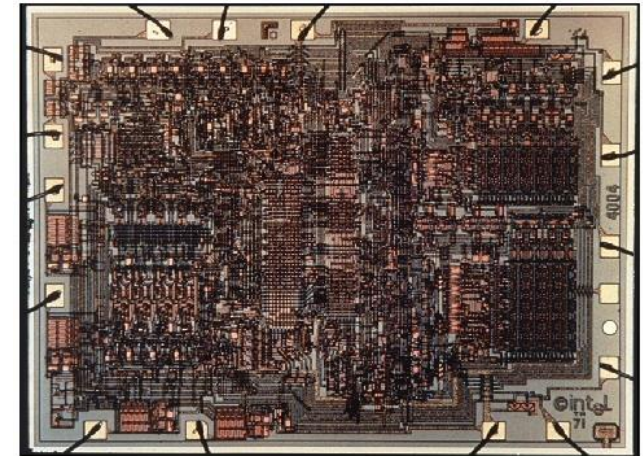
## Praktische Umsetzung von Gattern

- **Gatter, wie auch die später vorgestellten Flipflops und Speicher, sind in Form integrierter Schaltkreise erhältlich, die meist mehrere gleichartige Gatter enthalten**
- **die ersten Computer waren aus solchen Bausteinen aufgebaut, wobei ein sehr großer Platzbedarf resultierte**
- **moderne Schaltungen nutzen entweder Arrays (strukturierte Anordnung) von logischen Gattern, die entweder**
  - **universell einsetzbar sind und deren logische Funktion programmiert werden kann (Programmable Array Logic PAL)****oder**
  - **hochintegrierte Bausteine, bei denen die logischen Verknüpfungen bei der Herstellung fest „verdrahtet“ werden**

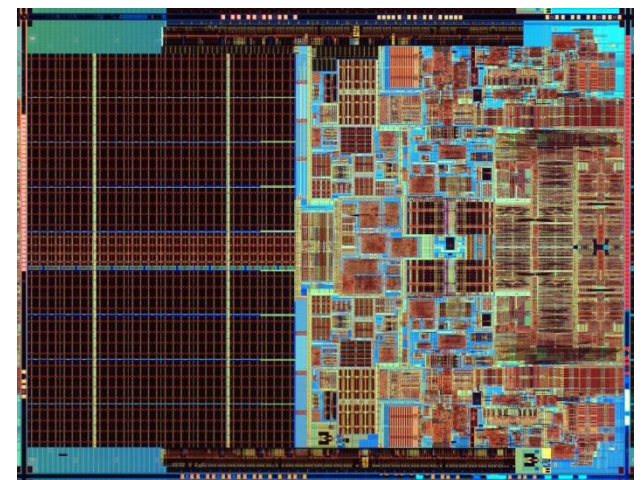


# CMOS-Inverter (Complementary Metal Oxid Semiconductor)

- CMOS-Technologie ist dominante Halbleitertechnologie für
  - Mikroprozessoren
  - Speicher (SRAM und DRAM) sowie
  - anwenderspezifische integrierte Schaltungen (ASICs)
- Beliebige Logik-Schaltungen können mit CMOS-Technik aufgebaut werden
- Sehr geringer Energieverbrauch
- Viele CMOS-Gatter können auf einem IC integriert werden
- CMOS-Inverter ist wichtige Grundstruktur für viele Logikschaltungen
- Besteht aus PMOS und NMOS (Complementary)



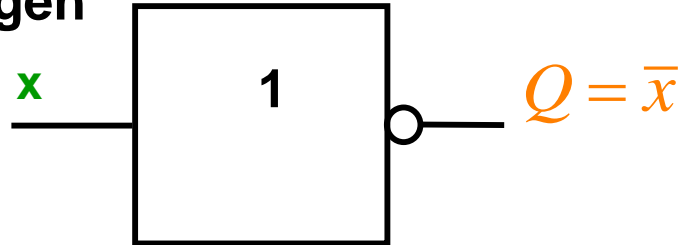
4-bit-Prozessor aus den 80ern



Pentium-Prozessor

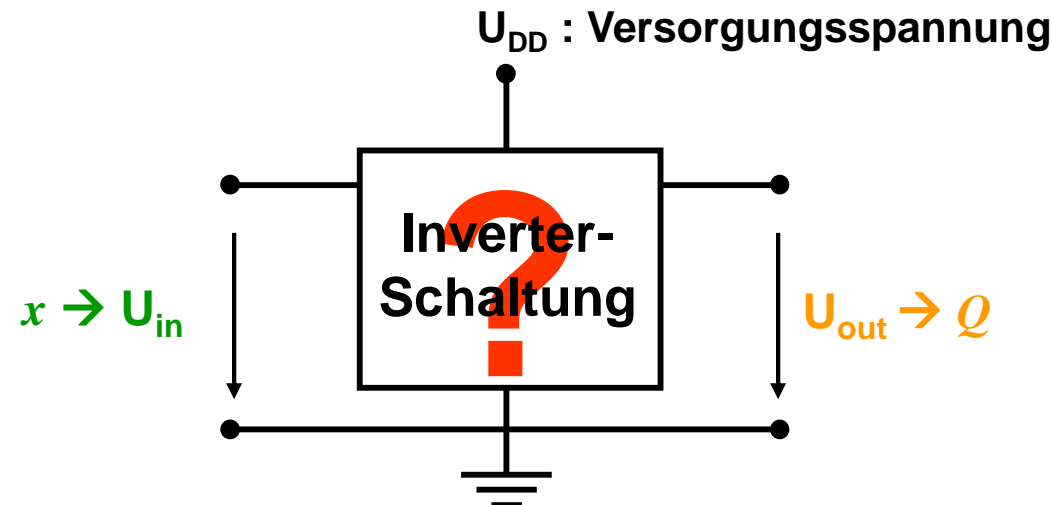
## CMOS-Inverter - Grundlagen

### Logisches Symbol

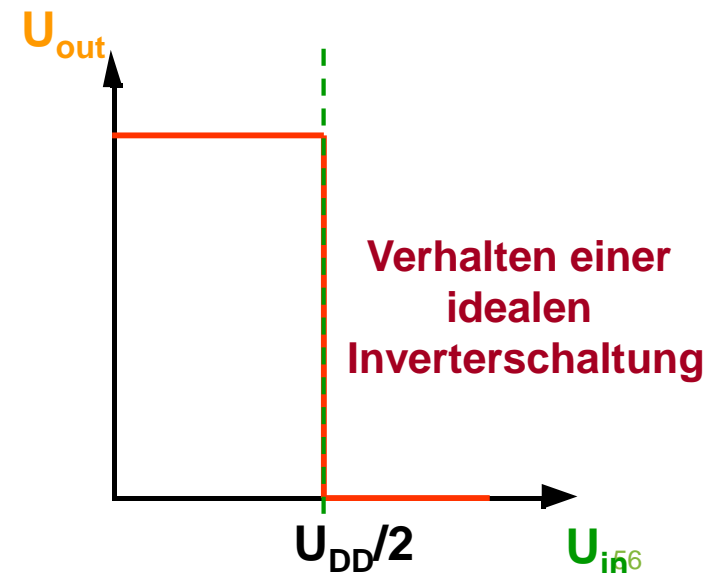


- Logischer Wert  $x=„0“$  am Eingang ergibt  $Q=„1“$  am Ausgang
- Logischer Wert  $x=„1“$  am Eingang ergibt  $Q=„0“$  am Ausgang

### Elektrischer Funktionsblock



Wie kann die Inverterschaltung  
mit CMOS technisch realisiert werden?

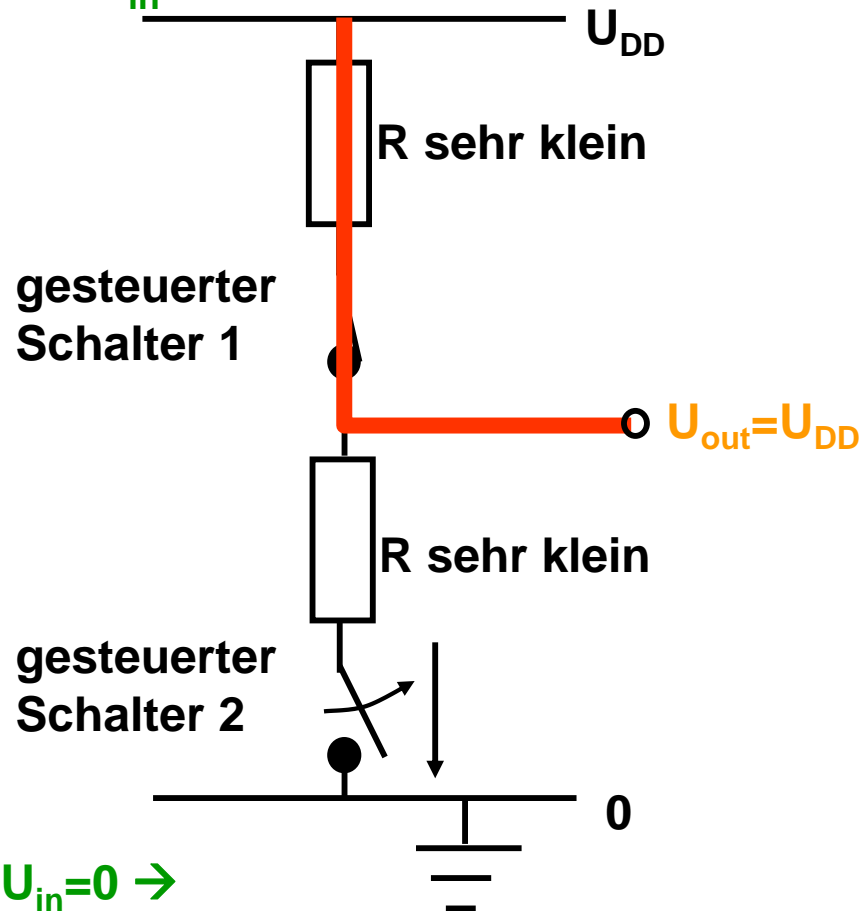




## Lösungsansatz - gesteuerte Schalter

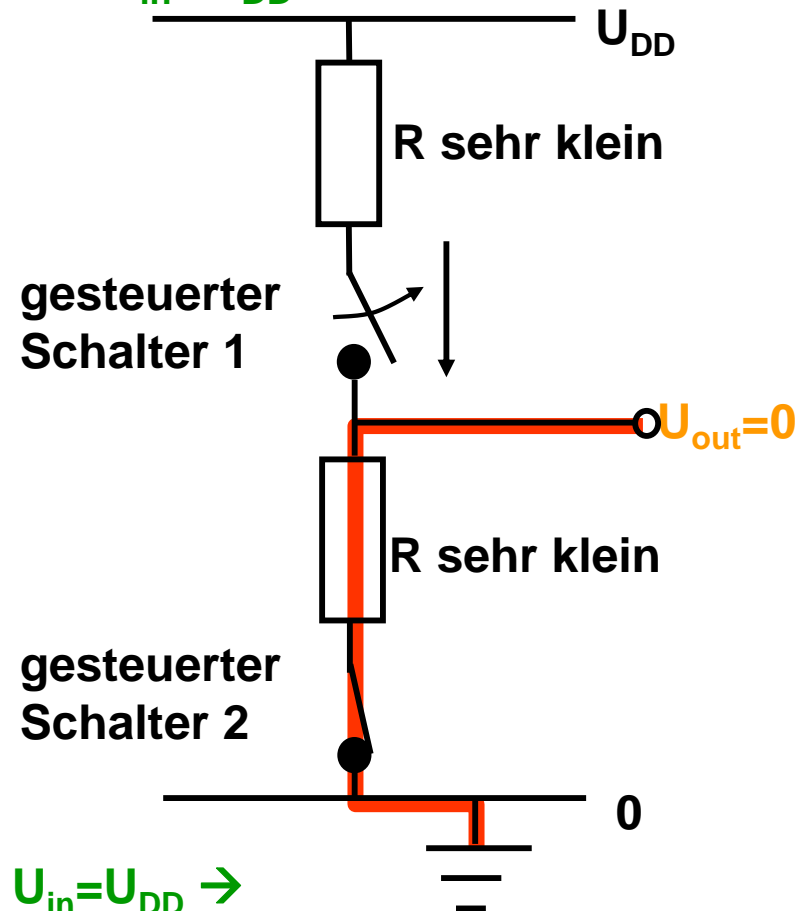
Spannungsgesteuerte Schalter erlauben eine erste komplementäre Realisierung

1.  $U_{in}=0$



- Schalter 1 ist geschlossen
- Schalter 2 ist offen

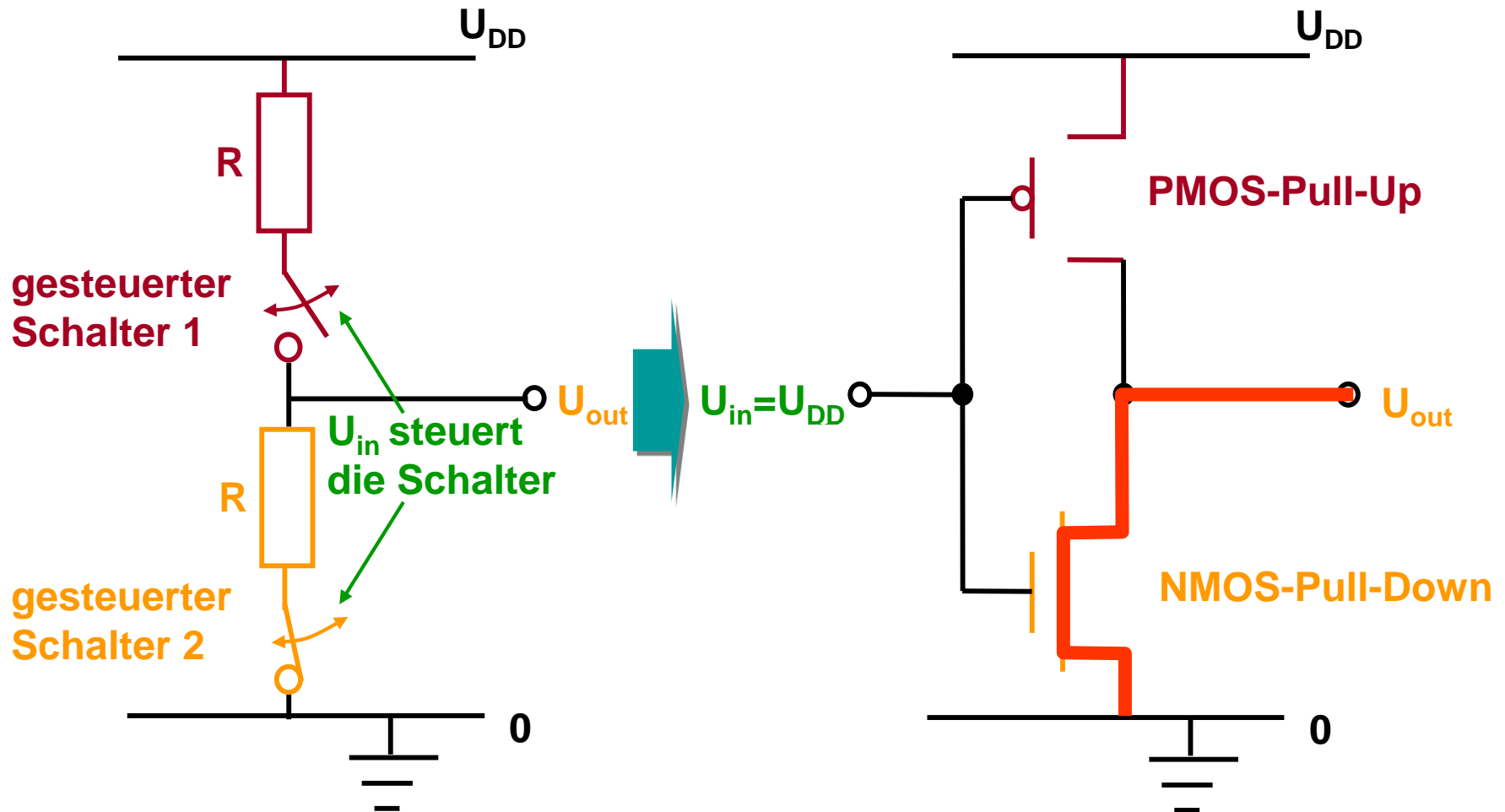
2.  $U_{in}=U_{DD}$



- Schalter 1 ist offen
- Schalter 2 ist geschlossen

## Realisierung durch MOS-Transistoren

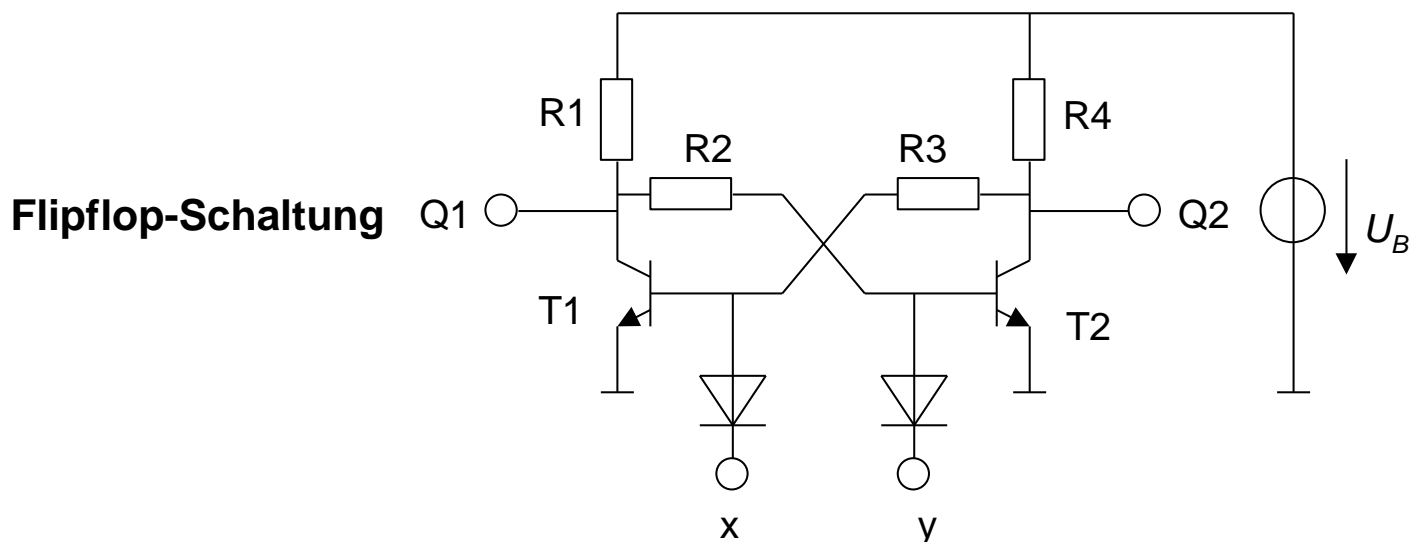
Komplementäre MOS-Transistoren erlauben praxisgerechte Realisierung



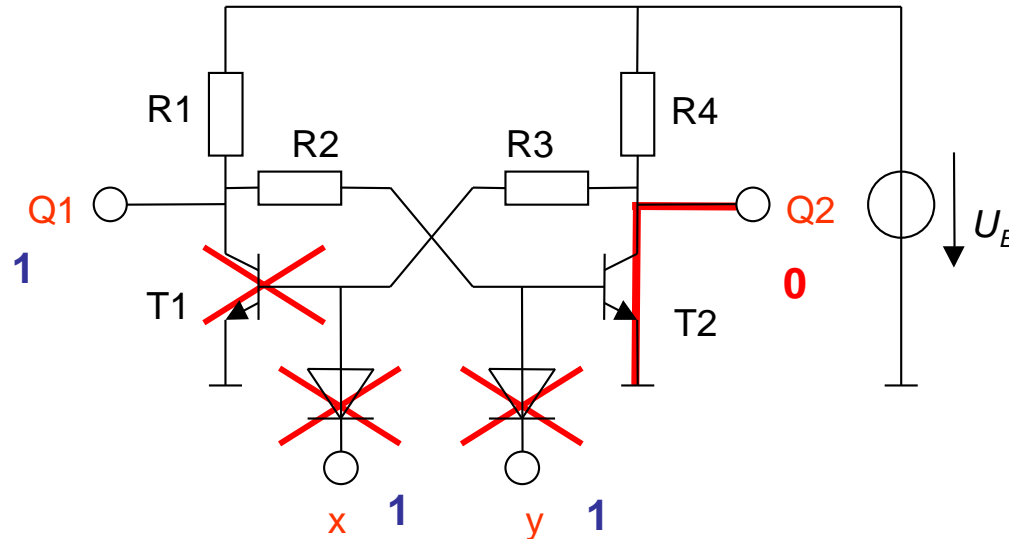
# Schaltwerke - Flipflop, Zähler, Schieberegister

- mit Gattern allein lassen sich logische Funktionen realisieren
- meist ist es aber notwendig **bestimmte Zustände zwischenspeichern**, nur so lassen sich sequentielle Schaltungen aufbauen
- die Struktur unserer heutigen Computer und Mikrocontroller, bei denen die Funktionalität sich gemeinsam aus Hardware und Software zusammensetzt, wäre ohne Flipflops und Zähler nicht denkbar

**Flipflop: Grundsaltung, die zwei verschiedene stabile logische Zustände einnehmen und diese speichern kann**

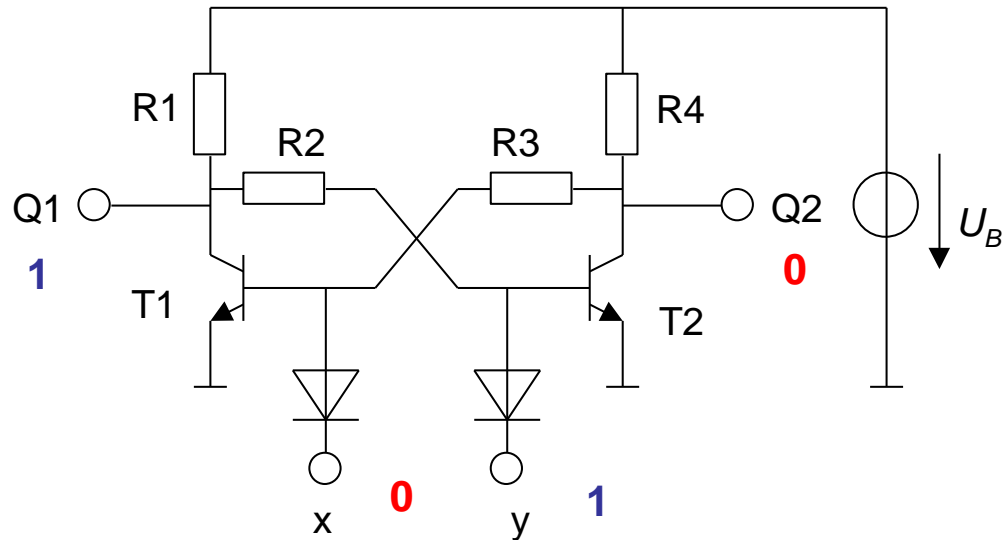


## Flipflop



- zunächst soll davon ausgegangen werden, dass die Eingänge x und y jeweils „1“ führen, beide Dioden sind dann gesperrt, so dass die Eingänge in diesem Zustand keinen Einfluss auf die Schaltung haben
- wenn angenommen wird, dass Transistor T1 sperrt, wird die Spannung am Ausgang Q1 über R1 auf Versorgungsspannung  $U_B$  gezogen, über R2 bekommt T2 an der Basis dieses positive Potenzial, woraufhin er durchschaltet
- damit ist der Ausgang Q2 logisch „0“, Infolgedessen kann kein Basisstrom über R3 in die Basis von T1 fließen, T1 bleibt also im gesperrten Zustand
- der beschriebene Zustand ist also stabil

## Flipflop



- wenn die gleiche Herleitung mit T2 begonnen wird, ist Q2 logisch „1“ und Q1 logisch „0“, Die Schaltung hat folglich zwei stabile Zustände
- welcher der Zustände vorliegt, hängt von der Vorgeschichte ab
- wird vom Zustand 2 (Q1 logisch „0“, Q2 logisch „1“) ausgegangen, so kann über eine logische „0“ am Eingang x der Zustand **gekippt** werden, denn damit wird verhindert, dass T1 schaltet
- die Konsequenz ist eine „1“ an Q1, über R2 fließt ein Basisstrom in T2, wodurch dieser leitet und Q2 auf „0“ zieht, auch wenn x wieder auf „1“ geht, bleibt dieser Zustand erhalten

- die Funktion eines Flipflop kann anhand der Arbeitsmatrix schematisiert werden:

x	y	Q1_alt	Q2_alt	Q1_neu	Q2_neu	Bemerkung
1	1	0	1	0	1	alter Zustand bleibt gespeichert
1	1	1	0	1	0	
1	0	0	1	0	1	Setzen von Q2 (Rücksetzen von Q1)
1	0	1	0	0	1	
0	1	0	1	1	0	Setzen von Q1 (Rücksetzen von Q2)
0	1	1	0	1	0	
0	0	0	1	1*	1*	instabiler Zustand
0	0	1	0	1*	1*	

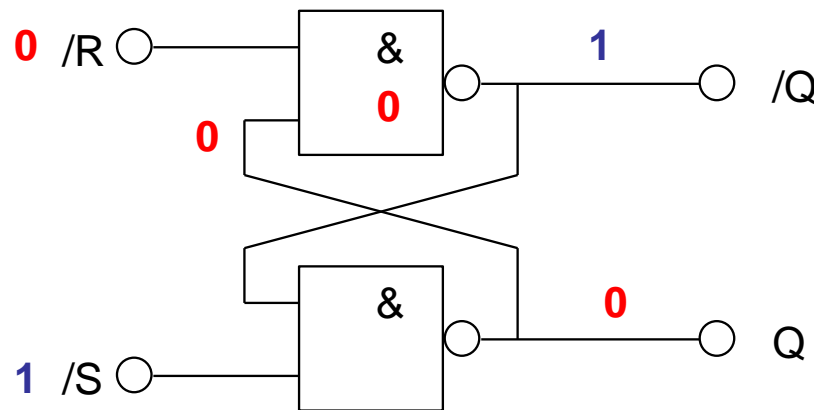
- beim instabilen Zustand sind beide Ausgänge logisch „1“ solange die Eingänge „0“ sind, sobald einer der Eingänge „1“ wird, kippt die Schaltung in einen der stabilen Zustände
- ein gleichzeitiger Wechsel der Eingänge von „0“ auf „1“ führt in jedem Fall zu einem der beiden stabilen Ausgangszustände, denn einer der Eingänge wird geringfügig früher seinen Zustand ändern

## Flipflop

- bei der präsentierten Schaltung handelt es sich um ein Flipflop mit einem Setz- und einem Rücksetzeingang (RS-Flipflop).
- etwas abstrakter lässt sich ein solches RS-Flipflop aus Gatter-Funktionsblöcken zusammensetzen,
- beim Design von integrierten Schaltkreisen hat die Funktionsblockbeschreibung den Vorteil, dass das Layout der Transistorschaltungen zu sogenannten Makros zusammengefasst werden kann, und aus diesen Makros sehr komplexe Schaltungen generiert werden können
- in Fortführung dieses Prinzips kann der Entwickler einer komplexen Schaltung mehr und mehr in höhere Abstraktionsebenen eindringen und so umfangreiche Schaltungen wie Mikroprozessoren entwickeln

## Flipflop

- eine Realisierung des RS-Flipflops kann z.B. mit NAND-Gattern erfolgen:

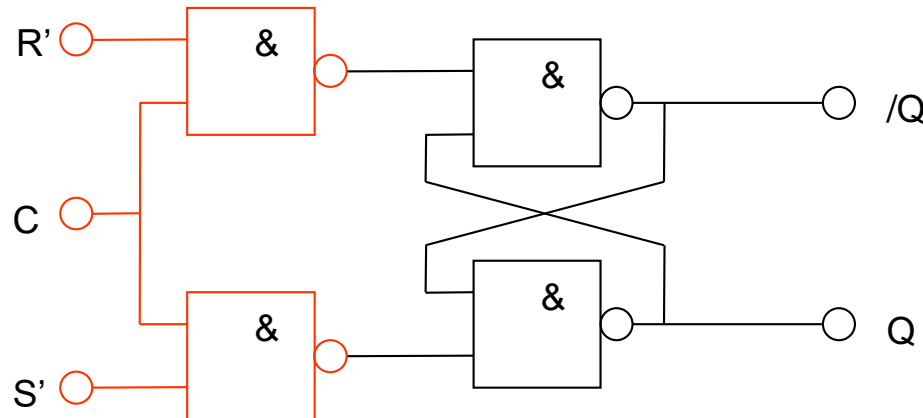


- die Funktion entspricht weitestgehend der Funktion der bereits beschriebenen Transistorschaltung
- solange die Eingänge  $\overline{R}$  und  $\overline{S}$  logisch 1 sind, bleibt der Zustand des Flipflops gespeichert
- wenn der Setzeingang auf logisch 0 geht, wird das Flipflop gesetzt ( $Q=1$ ,  $\overline{Q}=0$ )
- bei einer logischen 0 am Rücksetzeingang wird es gelöscht ( $Q=0$ ,  $\overline{Q}=1$ )



## Statisch getaktetes RS-Flipflop

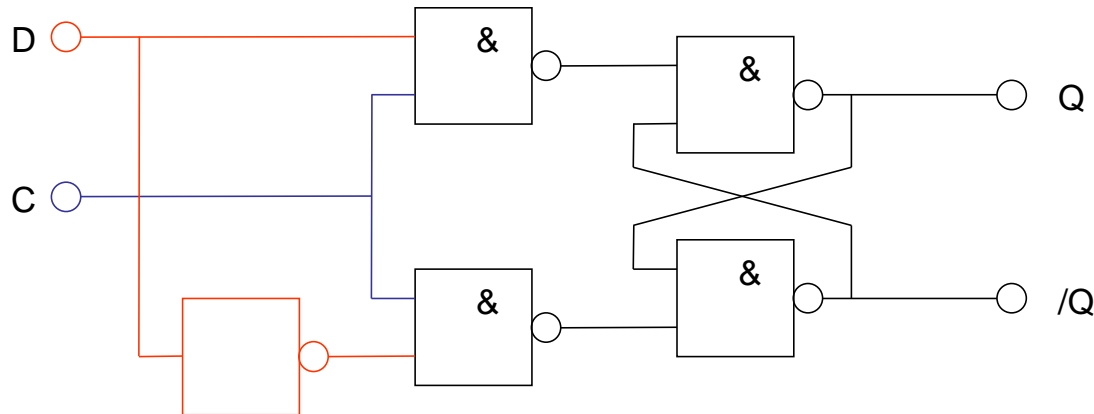
- oft wird ein Flipflop benötigt, das seinen Zustand nur zu einer bestimmten Zeit abhängig von einem weiteren Eingangszustand ändern kann, dies kann ausgehend vom einfachen RS-Flipflop durch Zufügen von zwei weiteren NAND-Gattern geschehen
- ein solches Flipflop heißt „Statisch getaktetes RS-Flipflop“



- solange der Clock-Eingang C logisch 0 ist, sind die Ausgänge der „Eingangsgatter“ immer 1
- das nachgeschaltete RS-Flipflop speichert also die Information unabhängig von den an R' und S' anliegenden Pegel, erst bei einer 1 an C gelangt der Zustand der Eingänge R' und S' in negierter Form an das RS-Flipflop, wodurch dieses seinen Zustand ändern kann

## D-Flipflop

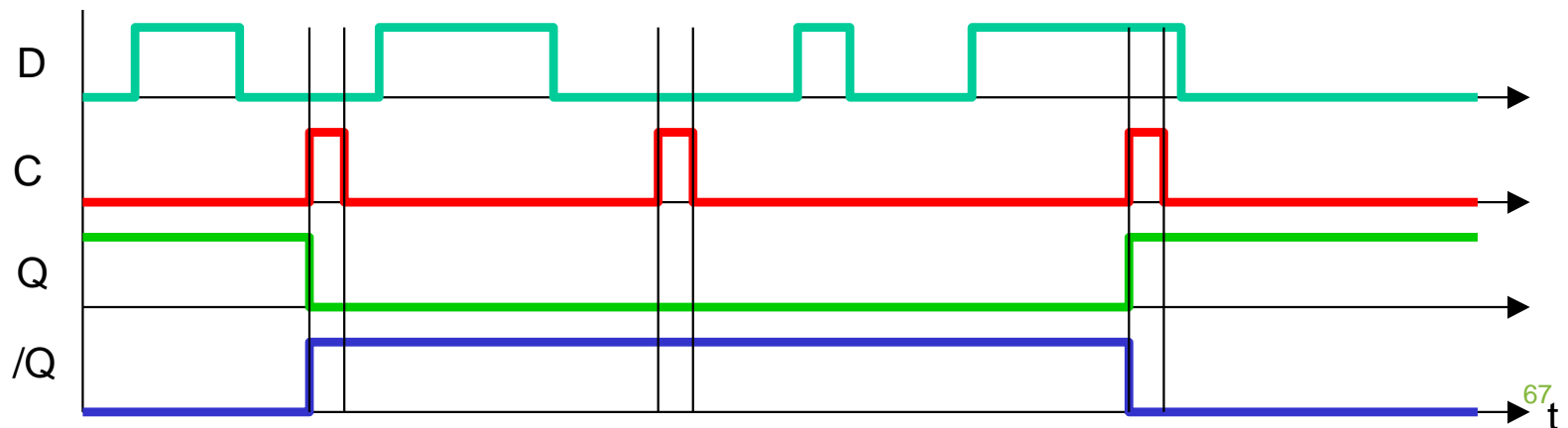
- werden auch noch die beiden Eingänge über einen Inverter zusammengefasst, kommt man zu einem D-Flipflop, das bei der Ausgabe von Mikroprozessoren häufig eingesetzt wird



- solange der Clock-Eingang C 0 ist, wird die im Flipflop befindliche Information gespeichert
- erst bei einer 1 an C wird das Signal am D-Eingang auf den Q-Ausgang durchgeschaltet
- bei einer Pegeländerung von 1 auf 0 an C bleibt der unmittelbar vor dem Schaltvorgang an D anliegende Pegel im Flipflop gespeichert

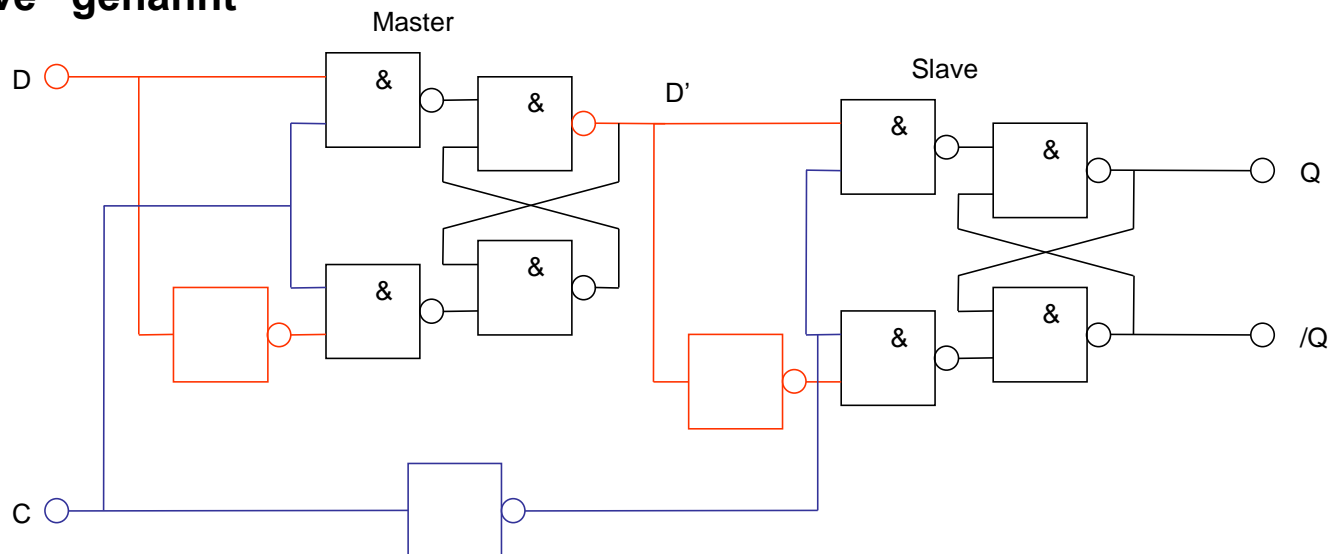
## D-Flipflop

- D-Flipflops sind in statischen Speichern, die z.B. als Cache-Speicher eingesetzt werden, oder in Ein-/Ausgabebausteine (z. B. parallele Schnittstellen) enthalten
- die **D-Leitung** wird mit dem Datenbus des Mikroprozessors verbunden, der abwechselnd Daten auf den Bus legt, die für unterschiedliche Speicherzellen oder Ein-/Ausgabebausteine bestimmt sind
- erst wenn ein bestimmter Baustein adressiert wird, aktiviert eine Logik die **Clock-Leitung**, so dass gültige Daten in das Flipflop übernommen werden. Aufgrund der Datenbusbreite üblicher Prozessoren (8bit, 16bit, 32bit, 64bit) werden solche Schaltungen oft parallel betrieben, ein typisches Timing ist in folgendem Diagramm dargestellt:

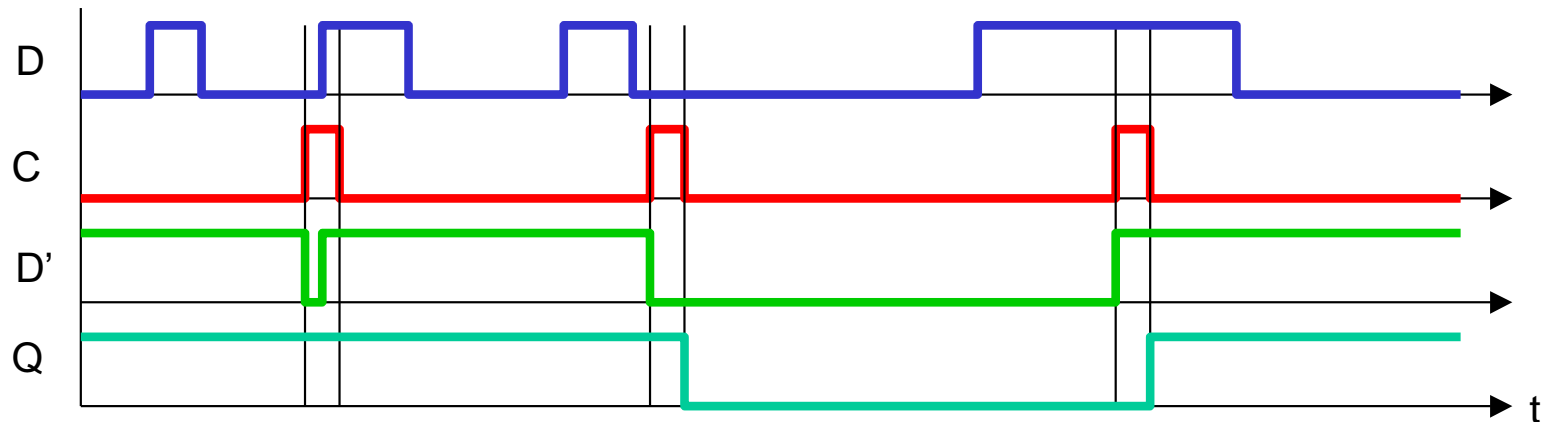


## Master-Slave-Flipflop

- für viele Anwendungen, wie Zähler und Schieberegister, sind die bisher vorgestellten zustandgesteuerten Flipflops ungeeignet, beim Aktivieren der Clock-Leitung wird der Inhalt des D-Eingangs **transparent** auf den Ausgang Q übertragen
- die genannten Anwendungen erfordern Flipflops, die den Eingangszustand zwischenspeichern und ihn erst an den Ausgang übertragen, wenn die Eingänge bereits wieder verriegelt sind, sie sind aus zwei hintereinander angeordneten Flipflops aufgebaut
- das Flipflop am Eingang wird „Master“, das Flipflop am Ausgang wird „Slave“ genannt



## Master-Slave-Flipflop



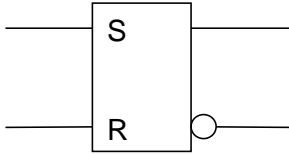
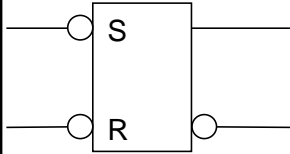
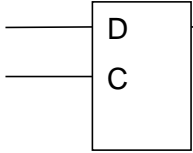
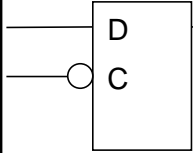
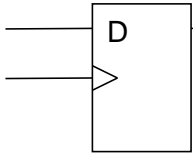
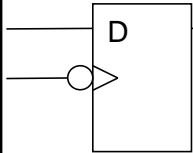
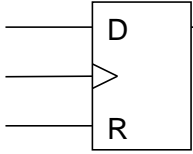
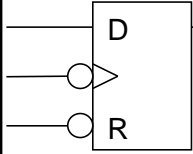
- aus dem Timingdiagramm wird deutlich, dass der am D-Eingang anliegende Pegel erst bei der fallenden Flanke am Ausgang Q erscheint
- daher wird ein solches Flipflop auch flankengetriggertes D-Master-Slave-Flipflop genannt

## Flipflops

- wie auch bei den Gattern werden bei Flipflops besondere Schaltsymbole verwendet, um Schaltungen auf einem höheren Abstraktionsniveau zu realisieren
- die Ausgänge werden meist auf der rechten Seite gezeichnet, die Eingänge auf der linken Seite
- die Eingänge werden zusätzlich mit den Buchstaben „R“ für einen Rücksetzeingang, „S“ für einen Setzeingang, „D“ für einen Dateneingang und „C“ für einen Clock-Eingang gekennzeichnet
- bei Flipflops, die einen flankengesteuerten Clock-Eingang haben, wird dieser durch ein kleines Dreieck anstelle des Buchstabens „C“ gekennzeichnet
- eine Invertierung eines Eingangs wird wie bei den Gattern durch einen kleinen Kreis bezeichnet

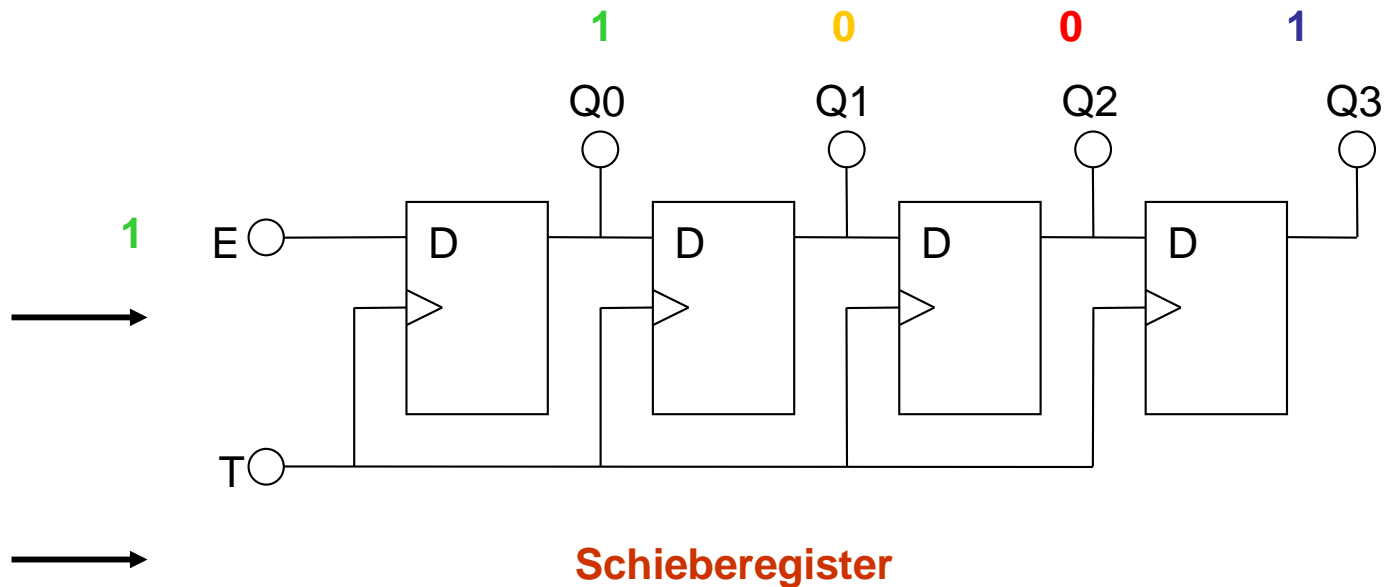
## Übersicht Flipflop

### ■ Symbole und Bedeutung verschiedener Flip-Flop-Typen

	Einfaches RS -Flipflop mit Q und /Q Ausgängen		Einfaches RS -Flipflop mit negierten Setz- und Rücksetzeingängen mit Q und/Q Ausgängen
	Einfaches pegelgesteuertes D Flipflop		Pegelgesteuertes D Flipflop mit inversem Clock-Eingang
	Flankengesteuertes D-Flipflop (Übernahme bei positiver Flanke)		Flankengesteuertes D-Flipflop (Übernahme bei negativer Flanke)
	Flankengesteuertes D-Flipflop (Übernahme bei positiver Flanke) mit zusätzlichem Rückstelleingang		Flankengesteuertes D-Flipflop (Übernahme bei negativer Flanke) mit zusätzlichem invertierten Rückstelleingang

## Schieberegister

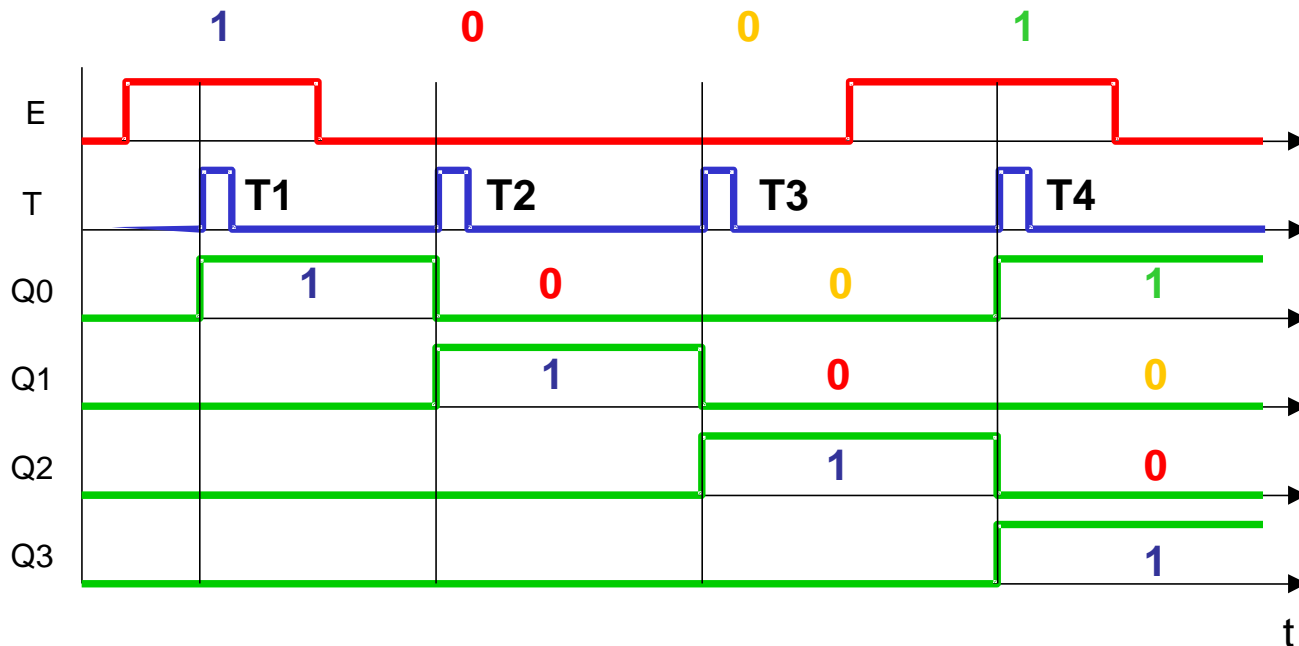
- aus Master-Slave-Flipflops lassen sich u.a. Schieberegister aufbauen, mit denen sich beispielsweise eine Wandlung eines 8bit-breiten Datenbytes in einen seriellen Datenstrom oder umgekehrt durchführen lässt, eine solche Struktur ist in den Controller-Schaltkreisen von beispielsweise seriellen Schnittstellen, USB-Schnittstellen, Netzwerkschnittstellen oder aber auch von Festplattenlaufwerken enthalten





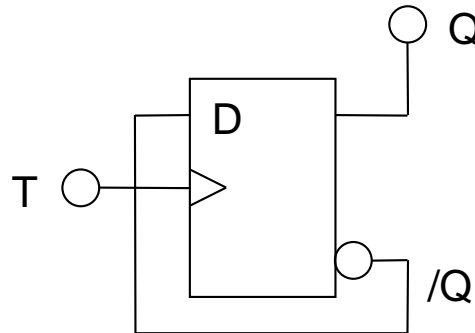
## Schieberegister

- bei dem abgebildeten einfachen Schieberegister wird der am Eingang E anliegende Datenstrom bei jedem Takt am Takteingang T (genauer: steigende Flanke) um eine Position weiter nach rechts geschoben, nach vier Takten ist das Schieberegister gefüllt und die Daten können in paralleler Form an den Ausgängen Q0 bis Q3 ausgelesen werden
- das Timing-Diagramm verdeutlicht diese Funktion:

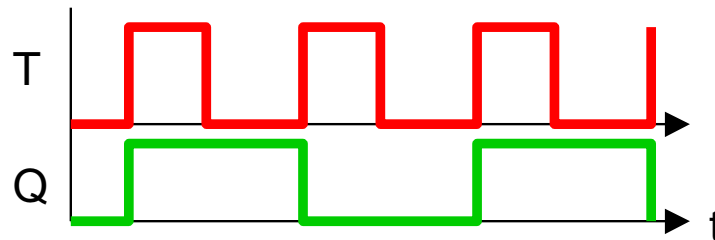


## Zähler

- eine andere häufige Anwendung von flankengetriggerten Master-Slave-Flipflops sind Zähler, die z.B. innerhalb von Mikroprozessoren als Programmzähler verwendet werden
- beim asynchronen Zähler sind mehrere flankengetriggerte D-Flipflops in folgender Grundschaltung hintereinandergeschaltet



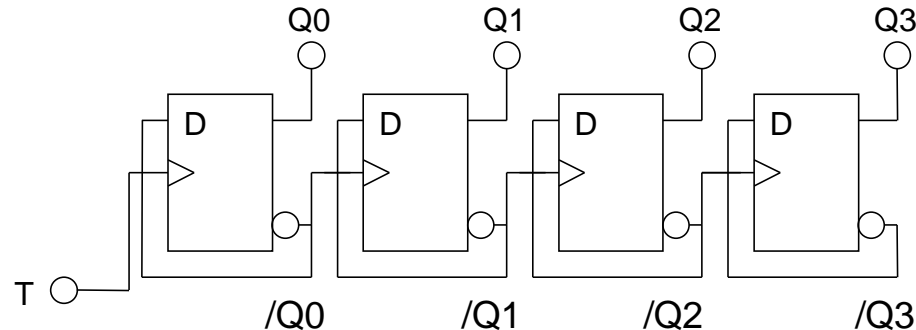
- bei dieser Schaltung wird bei jedem Takt der Inhalt des Flipflops invertiert



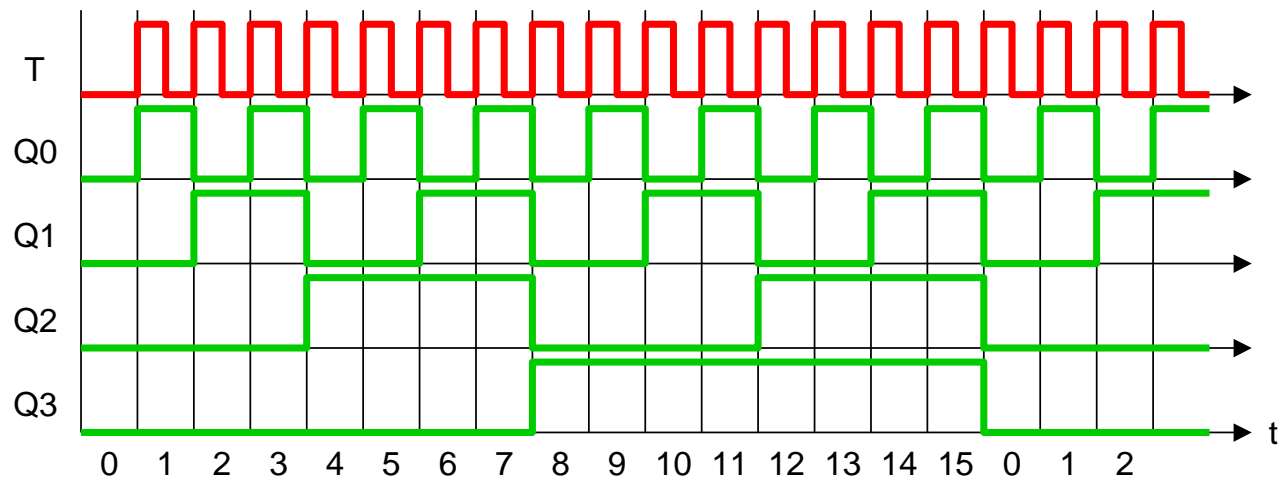
- die Frequenz des Eingangstaktes wird also halbiert, eine solche Schaltung wird daher auch **Frequenzteiler** genannt

## Zähler

- für einen 4-bit-Zähler werden vier Grundsaltungen benötigt:



- im Timing-Diagramm sind die sich aus den Ausgängen Q0..Q3 ergebenden Zählerstände mit eingezeichnet



# Halbleiterspeicher

## Wichtige Kategorien

- **ROM (Read Only Memory)**

**Festprogrammierter Speicher/ nur lesbar**

**bei diesen Festwertspeichern bleibt der Speicherinhalt auch ohne Versorgungsspannung erhalten**

- **RAM (Random Access Memory)**

**lesbarer und beschreibbarer Speicher**

**aufgrund der hohen Schreib- und Lesegeschwindigkeit sowie der hohen Packungsdichte werden RAMs als Arbeitsspeicher und Cache-Speicher eingesetzt, nach ihrem inneren Aufbau können zwei Arten von RAMs unterschieden werden:**

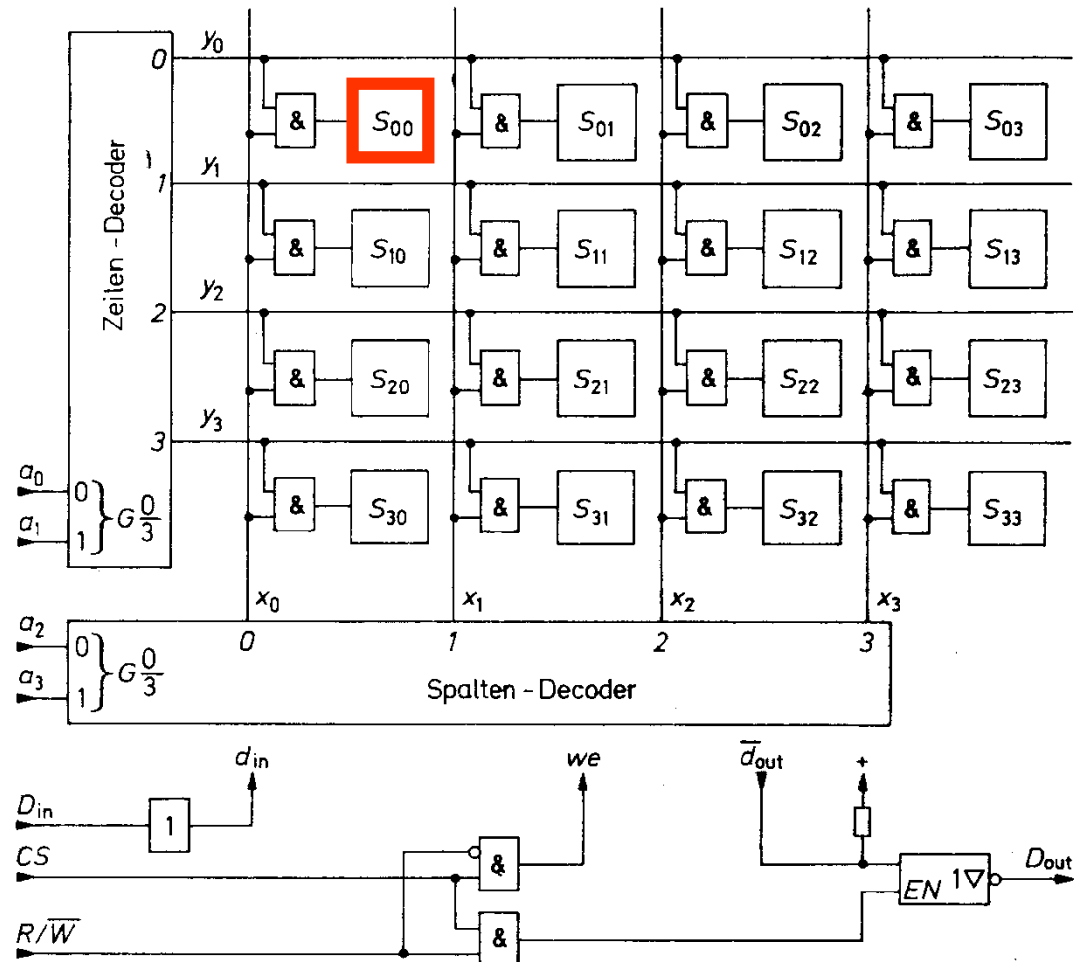
- **statisches RAM**
- **dynamisches RAM**

## ROM (Read Only Memory)

- der Speicherinhalt bleibt bei diesem Typ auch ohne Versorgungsspannung erhalten
- die Information wird entweder bei der Herstellung des integrierten Schaltkreises direkt im Layout geschrieben (maskenprogrammierter ROM) oder nach Herstellung des Schaltkreises mit speziellen Programmiergeräten oder Programmierschritten geschrieben
- zu den programmierten ROM gehören der:
  - **Sicherungs-PROM (programmable ROM)**, bei dem bei der Programmierung die Information durch irreversible Zerstörung von sogenannten Sicherungen in der Speichermatrix eingetragen wird, der
  - **EPROM (Erasable PROM)**, bei dem Ladungen beim Schreiben in Isolierschichten eingebracht werden und die durch Bestrahlen mit ultraviolettem Licht wieder gelöscht werden können und der
  - **EEPROM**, bei dem ähnlich wie beim EPROM Ladungen eingebracht werden und auch auf elektrischem Weg wieder gelöscht werden können
- beim EEPROM wird zum Beschreiben vergleichsweise viel Zeit benötigt, so dass sie üblicherweise nur zum Speichern weniger Bytes verwendet werden; sie kommen beispielsweise zum Speichern der wichtigsten Einstellungen im BIOS eines PC zum Einsatz

## RAM – statisches RAM

- bei statischen RAMs wird die Information in Flipflops gespeichert
- pro Bit zu speichernde Information muss ein Flipflop vorhanden sein, die Vielzahl von Flipflops sind i.d.R. in einer matrixähnlichen Anordnung auf dem Chip untergebracht
- die einzelnen Flipflops werden durch das gleichzeitige Aktivieren einer Spalten- und einer Zeilenleitung aktiviert



Innerer Aufbau eines RAMs. Beispiel für 16 bit Speicherkapazität.

$D_{in}$  = Data input

$CS$  = Chip Select

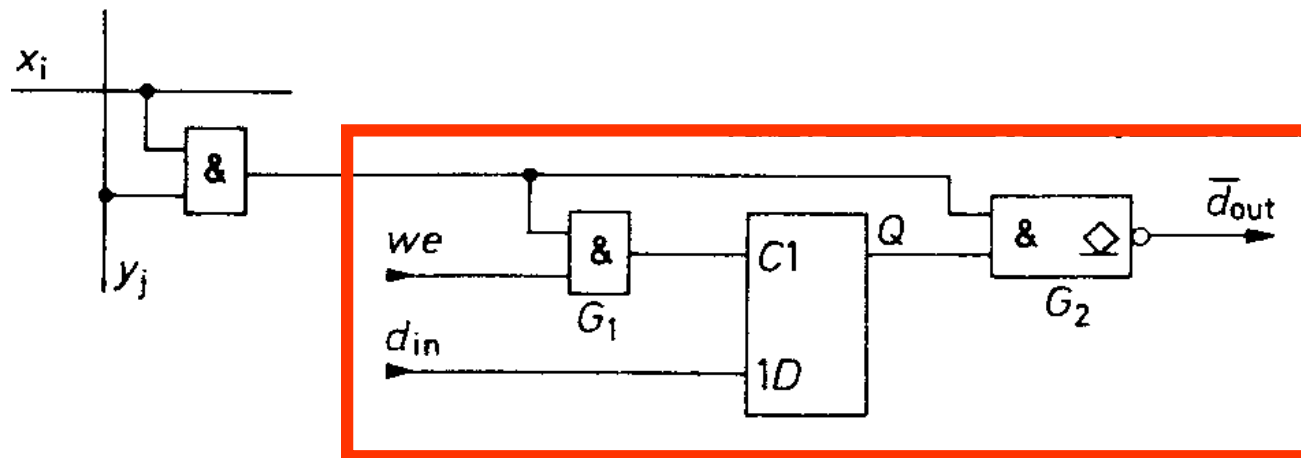
$we$  = write enable

$D_{out}$  = Data output

$R/\bar{W}$  = Read/Write

## RAM – statisches RAM

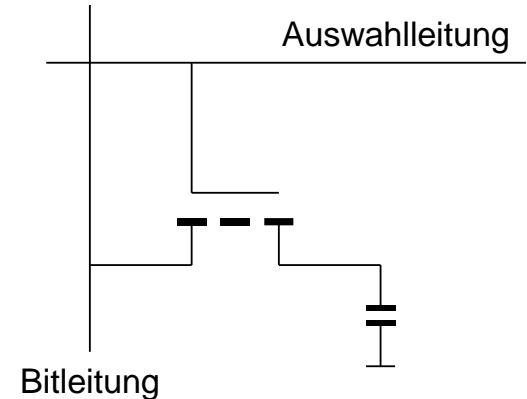
- jede einzelne Speicherzelle wird durch die folgende Schaltung realisiert



- auch wenn die Schaltung der einzelnen Flipflops sehr komplex zu sein scheint, kann sie in CMOS-Technologie mit nur 6 Transistoren realisiert werden
- statische Speicher können mit sehr kleinen Zugriffszeiten hergestellt werden, weshalb sie sich gut als Cache-Speicher eignen

## RAM – dynamisches RAM

- bei dynamischen RAMs wird die Information nicht in Flipflops, sondern als Ladung in einem Kondensator gespeichert
- zum Schreiben und Auslesen ist ein einziger Transistor erforderlich, wie die nebenstehende Prinzipskizze zeigt
- die gegenüber statischen RAMs niedrigere Anzahl an Bauelementen pro Speicherzelle ermöglicht eine sehr viel höhere Packungsdichte von dynamischen RAMs
- dynamische Speicher werden daher in modernen Computern als Arbeitsspeicher eingesetzt
- die Informationsspeicherung als Ladung eines Kondensators bedingt allerdings einen zusätzlichen Aufwand bei der Ansteuerung der Speicher
- aufgrund unvermeidlicher Isolationsverluste entlädt sich der Kondensator im Laufe der Zeit, der Speicher würde also trotz anliegender Versorgungsspannung innerhalb einiger ms bis s die gespeicherte Information verlieren
- aus diesem Grund muss jede einzelne Speicherzelle eines dynamischen Speichers regelmäßig ausgelesen und unmittelbar darauf wieder beschrieben werden (**Refresh**); damit wird die anfängliche Ladung wieder hergestellt





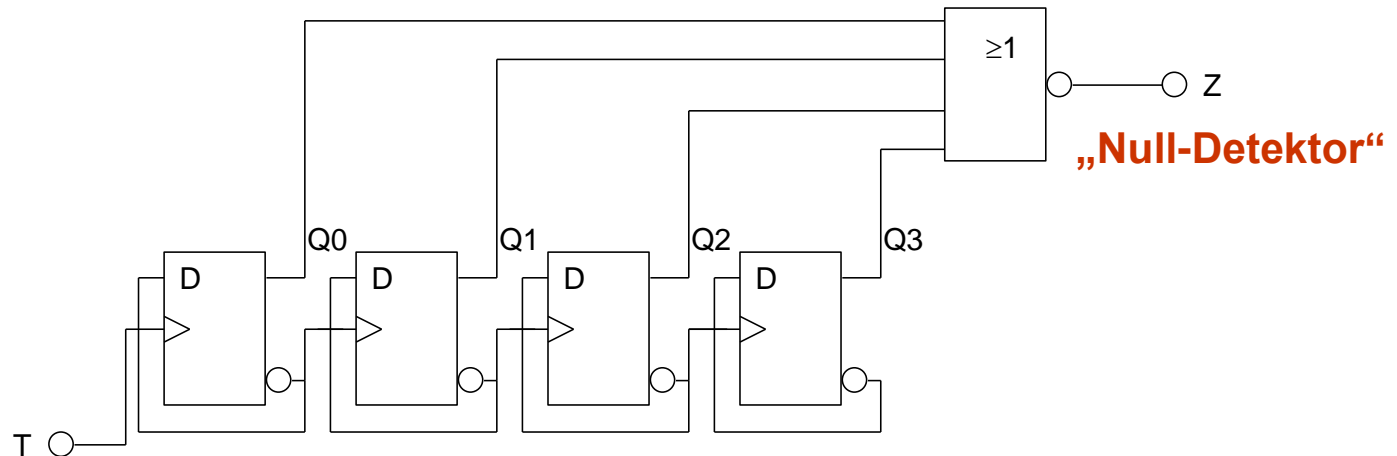
# Laufzeiteffekte

## Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit

- die bisherigen Überlegungen gingen von einer unendlich schnellen Verarbeitungsgeschwindigkeit in den Schaltungen aus
- tatsächlich bedeutet das Ein- oder Abschalten eines Transistors aber eine Bewegung von Ladungsträgern, die nur in endlicher Zeit erfolgen kann
- jedes Gatter und jedes Flipflop benötigt daher eine Zeit (Laufzeit), die von einer Änderung eines Eingangszustands zur Änderung eines Ausgangszustands verstreicht
- bei der Dimensionierung digitaler Schaltungen muss der Laufzeiteffekt berücksichtigt werden, um ungewollte Zwischenzustände zu vermeiden

## Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit - Beispiel

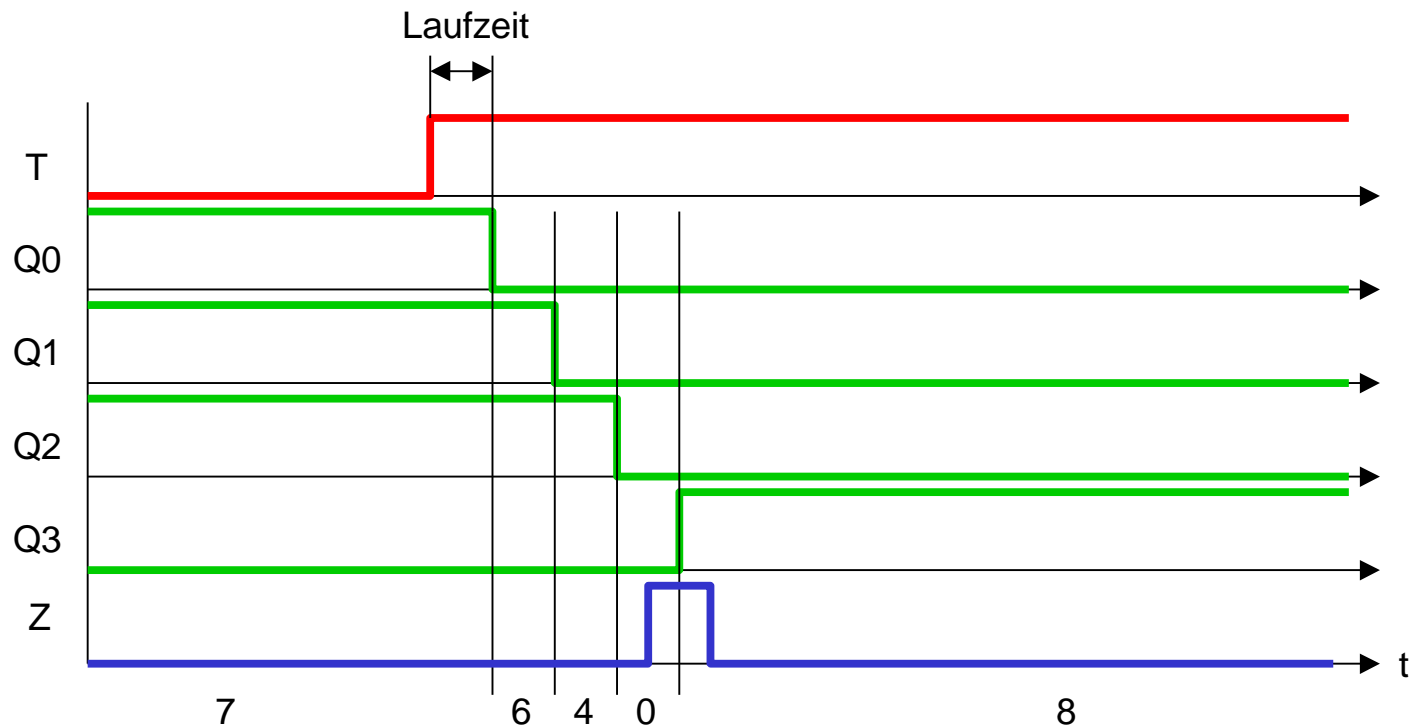
- Zähler mit angeschlossener Vergleichsstufe
- die 4 Ausgänge des dargestellten asynchronen Zählers sollen dazu einem logischen Gatter zugeführt werden, das nur bei dem Zählerstand 0 eine logische 1 am Ausgang liefern soll, diese Funktion wird durch ein NOR-Gatter erfüllt



- da die Zähler hintereinander angeordnet sind, kann eine Zählerstufe nur um die Laufzeit verzögert auf eine Zustandsänderung der vorgeschalteten Zählerstufe reagieren, es entstehen kurzzeitig andauernde Zwischenzustände

## Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit - Beispiel

- beim Übergang des Zählers vom Zählerstand „7“ zum Zählerstand „8“ werden nacheinander die Zählerstände „7“, „6“, „4“, „0“ und schließlich „8“ durchlaufen, das NOR-Gatter erkennt die „0“ und aktiviert kurzzeitig seinen Ausgang
- ein solcher Vorgang wird **Glitch**, **Hazard** oder **Wischer** genannt

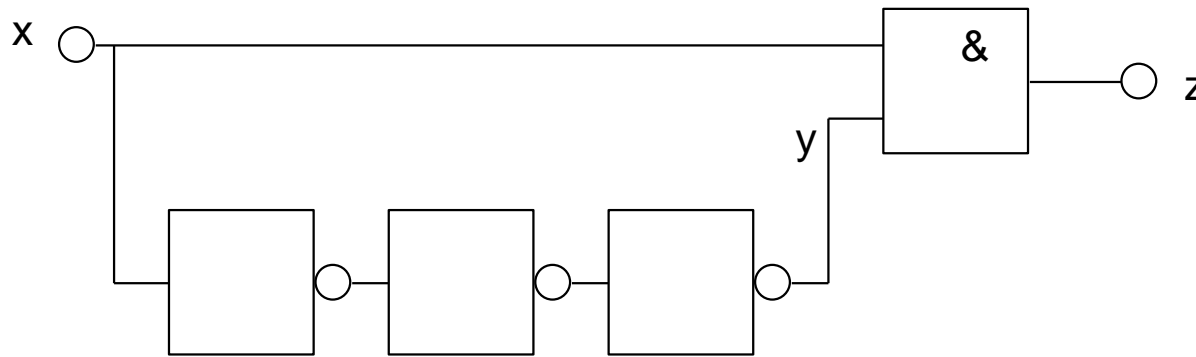


## **Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit**

- **die Zwischenzustände, die zu schwer zu erkennenden Fehlern führen können, müssen beim Design einer Schaltung von vornherein vermieden werden**
- **dies gelingt durch Ausgleich von Laufzeiten durch zwischengeschaltete Gatter (z.B. Identität)**
- **im Fall von Zählern kann anstelle eines asynchronen Zählers ein synchroner Zähler verwendet werden, bei dem sämtliche Flipflops vom gleichen Taktsignal gesteuert werden**
- **der D-Eingang muss bei diesem Zählertyp durch logische Verknüpfung (Gatter) aus den vorgeschalteten Zählerstufenausgängen abgeleitet werden**
- **Glitches können durchaus auch nutzbringend eingesetzt werden: Schaltung, deren Aufgabe darin besteht, eine positive Flanke zu erkennen**

## Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit

### ■ Schaltung zum Erkennen einer positiven Flanke:



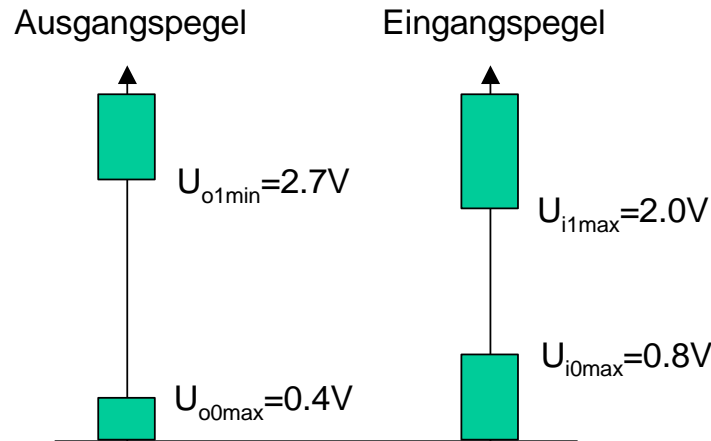
# Logikfamilien und Ausgangsstufen

## Logikfamilien

- zur Realisierung von Logikbausteinen (Gatter, Flipflops, Speicher ...) können verschiedene **Transistortechnologien** verwendet werden
- eine logische Schaltung kann aus Bipolartransistoren oder aus MOSFET-Transistoren hergestellt werden
- die Art der Verschaltung der einzelnen Transistoren legt letztlich fest, welche **Spannungspegel** einer **logischen 0** und einer **1** entsprechen, wie hoch die **Versorgungsspannung** und wie hoch die **Leistungsaufnahme** der Schaltung ist
- auf dem Markt haben sich zwar einige Logikfamilien etabliert, deren Bausteine beliebig miteinander verschaltet werden können, dennoch erfordert eine Mischung von Bausteinen unterschiedlicher Logikfamilien in den meisten Fällen eine dazwischen geschaltete **Pegelanpassung**
- ob eine Mischung möglich ist, kann nur anhand der Angaben im Datenblatt der entsprechenden Bausteine bewertet werden, dabei ist die Definition der **Logikpegel** wichtig

## Logikfamilien

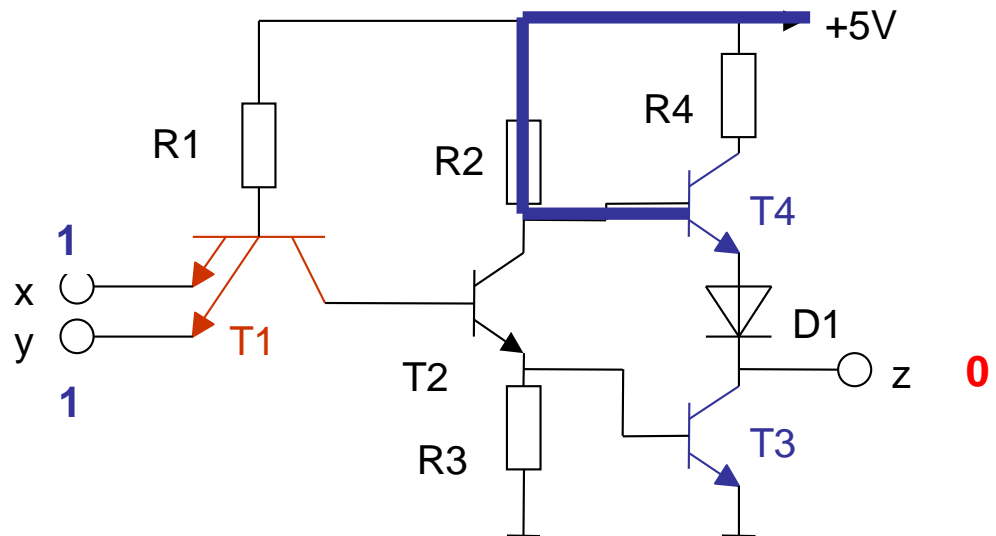
- für die Logikfamilie der Bipolartransistoren, die TTL (Transistor-Transistor-Logik) sind z.B. folgende Pegel definiert:



- damit ein Ausgang mit einem Eingang verbunden werden kann, müssen die am Ausgang bereitgestellten Pegel zweifelsfrei von der Eingangsstufe identifiziert werden
- daher darf beispielsweise bei einer logischen 0 der Ausgang eine Spannung von maximal 0,4V liefern
- hingegen muss der Eingang einer Logikstufe aus der gleichen Familie eine Spannung bis zu 0,8V als logische 0 erkennen, diesen Abstand von 0,4V für den 0-Pegel nennt man den statischen Störabstand; für den 1-Pegel beträgt er in diesem Fall 0,7V

## Logikfamilien

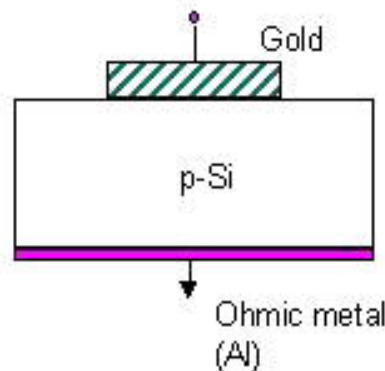
- eine typische TTL-Schaltung ist das NAND-Gatter, bei dem die Eingangsstufe aus einem **Transistor mit zwei Emittern** besteht; die Funktion entspricht der von zwei Transistoren, bei denen Basis und Kollektor zusammengeschaltet sind
- sobald einer der beiden Eingänge einen 0-Pegel führt, geht auch der Kollektor auf eine niedrige Spannung, dadurch sperrt der Transistor T2
- über den Widerstand R2 führt Transistor T4 Basisstrom und wird leitfähig, der Ausgang liefert also 1-Pegel
- nur wenn beide Eingänge 1-Pegel führen, ist der Kollektor von T1 auf hoher Spannung, sodass T2 leitfähig wird, damit schaltet auch T3 durch und T4 sperrt; der Ausgang liefert also 0-Pegel





## Logikfamilien

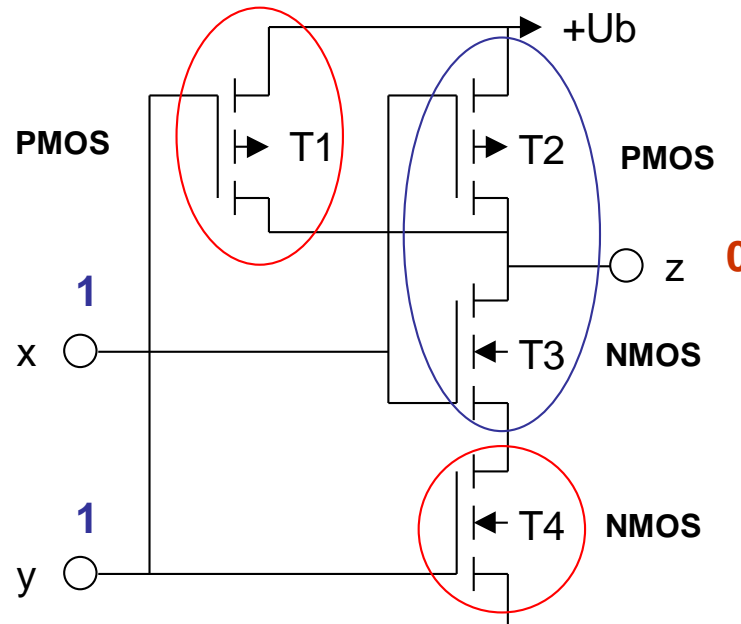
- je nach Zustand der Eingänge fließt durch R2 bzw. R3 auch im stationären Zustand ein Strom, daher haben Bausteine der TTL-Familie eine vergleichsweise **hohe Stromaufnahme**
- durch spezielle Bauart der Transistoren (Schottky-Transistoren) gelingt es, bei nahezu gleichbleibender Verarbeitungsgeschwindigkeit die Stromaufnahme zu senken (**Low-Power-Schottky-TTL-Familie: LS-TTL**), in batterieversorgten Geräten werden aber auch diese nur ungern eingesetzt
- eine deutlich kleinere Stromaufnahme haben Bausteine der **CMOS-Familie**



Schottky-Diode hat keinen pn-Übergang  
Sondern einen Halbleiter-Metall-Übergang

## Logikfamilien

### ■ Beispiel für CMOS-NAND-Gatter



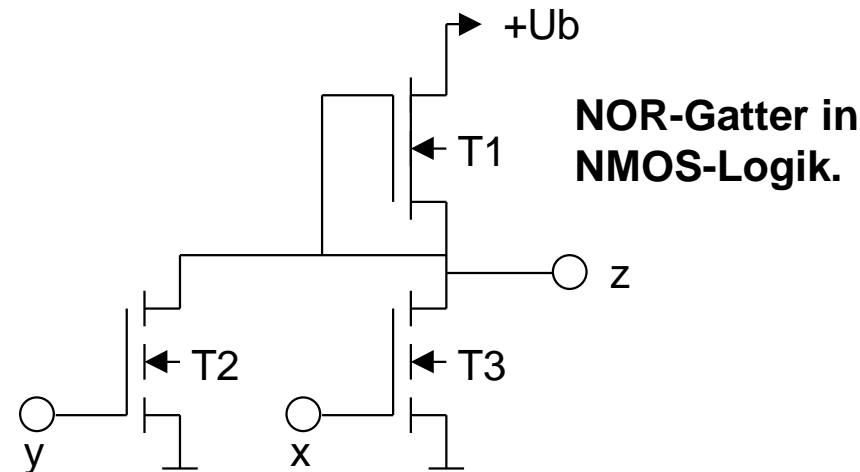
- Basiselemente sind die Komplementärinverterstufen T1/T4 und T2/T3
- wenn der Eingang x 0-Pegel führt, wird T2 leitend und T3 sperrt, damit liefert der Ausgang z 1-Pegel
- ähnliches ergibt sich für Eingang y
- nur wenn beide Eingänge 1-Pegel führen, sind T3 und T4 beide leitend, T1 und T2 sperren, sodass der Ausgang 0-Pegel liefert

## Logikfamilien

- gegenüber der TTL-Schaltung wird deutlich, dass im Ruhezustand kein Strom durch die Schaltung fließt
- in der Praxis tritt nur ein sehr kleiner Leckstrom auf, nur während des Ein- oder Ausschaltens der Transistoren fließt ein Strom
- CMOS-Schaltungen sind gegenüber TTL-Schaltungen langsamer, aber eignen sich aufgrund der niedrigen Stromaufnahme hervorragend für **batteriebetriebene Geräte**
- auch der Betriebsspannungsbereich von CMOS-Schaltungen ist sehr hoch
- während bei TTL-Schaltungen eine Spannung von 5V in engen Grenzen eingehalten werden muss, kann die Versorgungsspannung bei CMOS-Schaltungen zwischen etwas mehr als 1V und 15V variieren

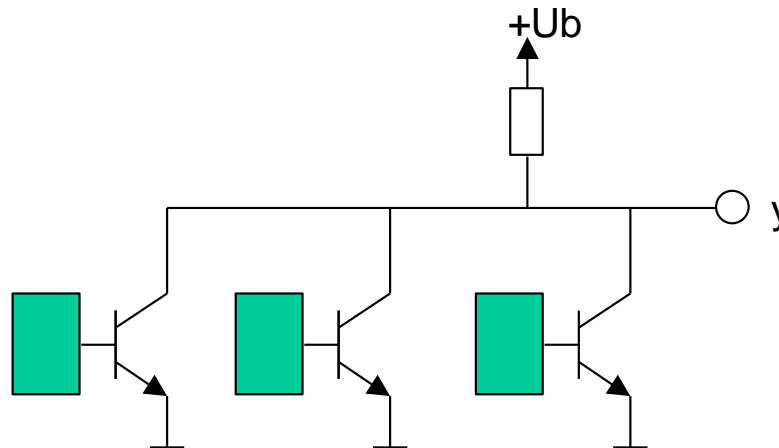
## Logikfamilien

- bei hochintegrierten Schaltkreisen wird aufgrund deren Einfachheit oft die **NMOS-Logik** gewählt, bei diesen erfolgt der Aufbau sämtlicher Bauelemente durch **N-Kanal-MOS-Transistoren**
- selbst Lastwiderstände werden bei dieser Technologie durch Transistoren ersetzt
- es ist zu beachten, dass T2 und T3 Anreicherungstypen sind, während T1 ein Verarmungstyp ist, wenn beide Eingänge 0-Pegel führen, sperren die Transistoren T2 und T3, der selbstleitende Transistor T1 zieht dann den Ausgang auf 1-Pegel
- wenn einer der Eingänge auf 1-Pegel liegt, leitet der zugehörige Transistor T2 oder T3, dadurch wird die Spannung am Ausgang reduziert
- die Spannung am Gate von T1 wird ebenfalls so niedrig, so dass T1 sperrt
- auch hier ist die Ruhestromaufnahme niedriger als bei TTL-Schaltungen



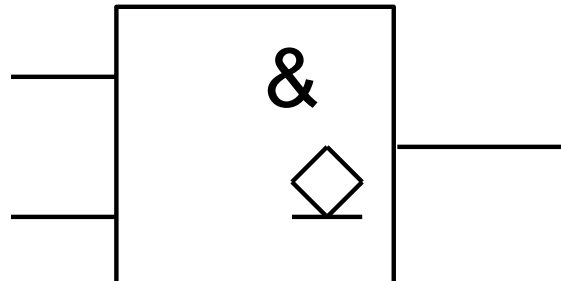
## Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen

- in der Schaltungstechnik besteht oft das Problem, sehr viele Ausgänge miteinander verknüpfen zu müssen
- wenn z. B. 40 Ausgänge miteinander verknüpft werden sollen, würde ein Gatter mit 40 Eingängen oder eine spezielle Kaskadeschaltung benötigt werden
- der Aufwand lässt sich reduzieren, indem Bausteine verwendet werden, die anstelle einer vollständigen **Ausgangsstufe** nur einen **einzigsten Transistor** haben
- eine solche Endstufe nennt man Open-Kollektor bei Bipolartransistoren und Open-Drain bei Feldeffekttransistoren
- diese Ausgangsstufen lassen sich beliebig parallel schalten



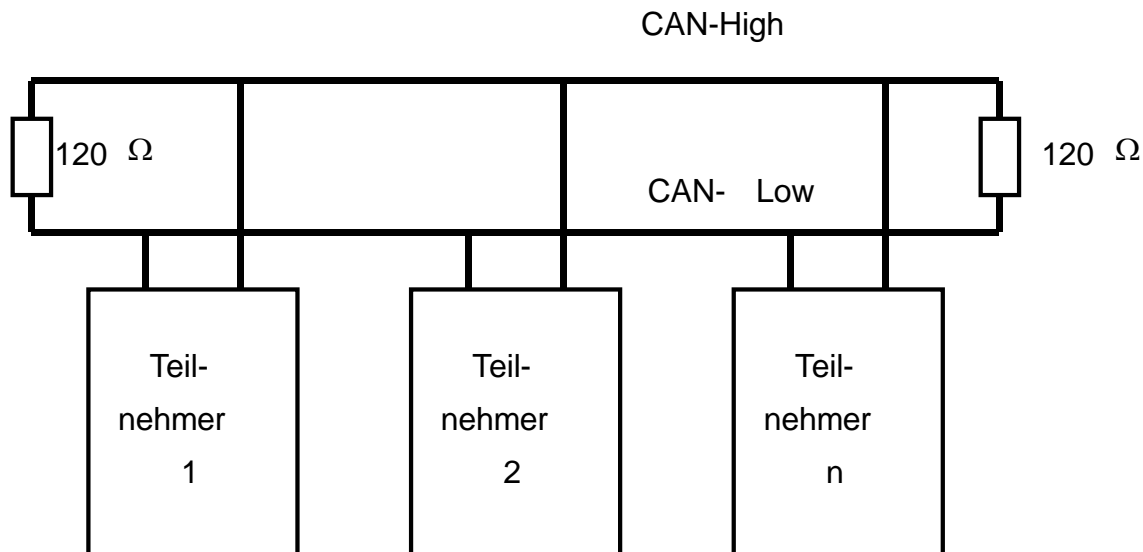
## Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen

- damit ein ausreichender 1-Pegel erzeugt werden kann, muss eine Verbindung zur positiven Versorgungsspannung eingebaut sein, diese erfolgt über einen sogenannten **pullup-Widerstand**
- sobald einer der Ausgangstransistoren durchgeschaltet wird, d.h. der entsprechende Ausgang 0-Pegel liefert, führt auch der gesamte Verknüpfungspunkt 0-Pegel
- je nach vorgeschalteter Logik bilden die Ausgänge AND oder OR-Verknüpfungen
- um Gatter kenntlich zu machen, die eine Open-Kollektor oder Open-Drain Ausgangsstufe besitzen, wird ein Symbol im Schaltzeichen ergänzt:



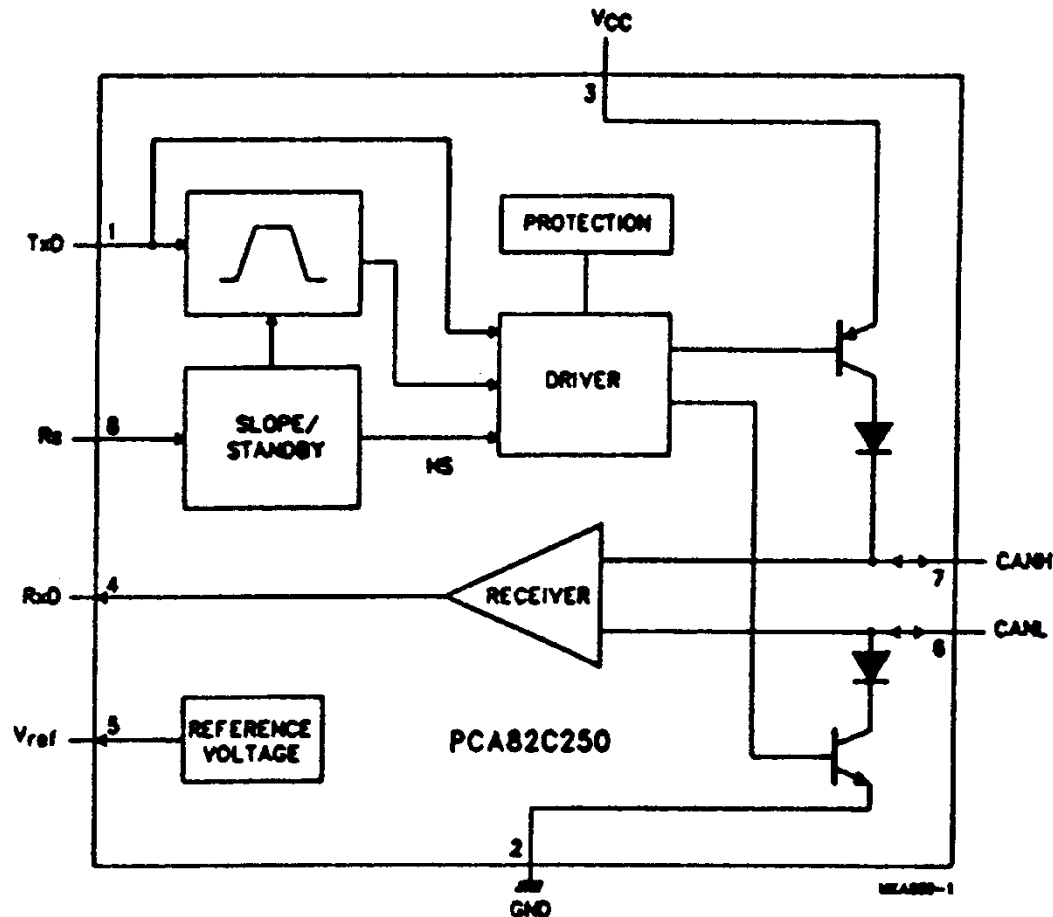
## Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen

- eine solche Verdrahtung findet sich auch, wenn verschiedene Bausteine auf eine gemeinsame Leitung zugreifen, dies ist bei Mikroprozessoren beispielsweise bei Interrupt-Leitungen der Fall
- im Automobilbereich wird zur Vernetzung der einzelnen im Fahrzeug befindlichen Steuerelektroniken oft der **CAN-Bus (Controller Area Network)** eingesetzt
- dieser Bus verwendet **zwei Leitungen (CAN-High, CAN-Low)**, an die sämtliche Busteilnehmer parallel angeschlossen sind



## Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen

- innerhalb der einzelnen Teilnehmer wird eine integrierte Schaltung (Bus-Transceiver) mit **Open-Kollektor-Ausgängen** verwendet, dessen Blockschaltbild in der folgenden Zeichnung angegeben ist





## **Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen**

- wenn dieser Transceiver Daten überträgt, schaltet er beide Ausgangstransistoren durch
- die Spannung an der CAN-High-Leitung wird daraufhin erhöht, die Spannung an der CAN-Low-Leitung erniedrigt
- diese „dominant“ genannten Spannungsänderungen können von jedem am Bus angeschlossenen Teilnehmer erkannt und gelesen werden
- im inaktiven Zustand sperren die Transistoren, so dass entweder beide Leitungen bedingt durch die 120 Ohm-Widerstände gleiche Spannung haben (Bus ist „rezessiv“) oder ein anderer Busteilnehmer aktiviert den Bus
- der CAN-Bus läuft im Automobil mit Übertragungsraten von bis zu 1 Mbit/s
- in Zukunft werden vermehrt auch deutlich schnellere Technologien wie FlexRay oder E-MOST im Kfz eingesetzt

## Tristate-Ausgangsstufen

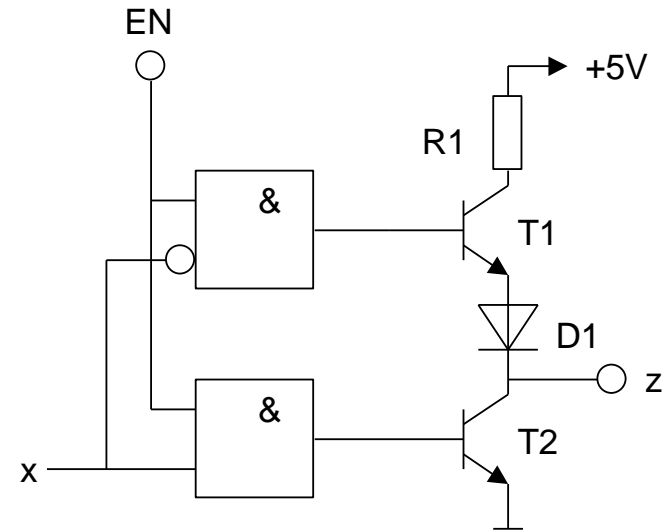
- in Rechnerschaltungen werden oft parallele Busleitungen verwendet, an denen eine Vielzahl von Bausteinen, wie CPU oder Speicher angeschlossen sind
- diese Bausteine können keine Standard-Ausgangsstufen haben, denn diese würden bei der Parallelschaltung im Falle einer logischen 1 am Ausgang des einen Bausteins und einer logischen 0 am Ausgang eines anderen Bausteins zu **Kurzschlüssen** und damit möglicherweise zu Zerstörungen führen
- prinzipiell wäre auch hier der Einsatz von Open-Kollektor- oder Open-Drain-Ausgangsstufen möglich, beim Deaktivieren des Ausgangstransistors kann aber nur der pullup-Widerstand den Pegel wieder auf logisch 1 bringen
- wegen der unvermeidlichen Kapazitäten von Busleitungen und der angeschlossenen Bausteine wird dieser Vorgang umso langsamer, je höher der Wert des Widerstands ist, andersherum bedeutet aber ein kleiner Widerstand eine **hohe Stromaufnahme** bei aktivierter Busleitung

## Tristate-Ausgangsstufen

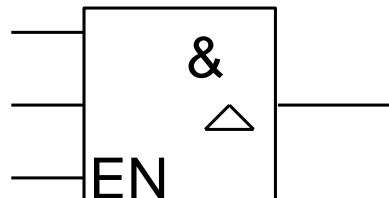
- es ist daher wünschenswert, Ausgangsstufen zu haben, die sich wie eine **Standard-Ausgangsschaltung** verhalten, wenn der Baustein aktiviert ist und im **inaktiven Zustand den Baustein vom Bus trennen**
- solche Ausgangsstufen werden **Tristate-Ausgangsstufen** genannt
- neben den logischen Pegeln
  1. 1 und
  2. 0 können sie einen dritten Zustand, nämlich
  3. **hochohmig (Trennung vom Bus)**
- annehmen
- somit können beliebig viele solcher Stufen ähnlich wie bei Open-Kollektor-Stufen parallel geschalten werden
- durch eine Steuerlogik und einen zusätzlichen Steuereingang muss aber sichergestellt werden, dass gleichzeitig nur ein einziger an einer Busleitung angeschlossener Baustein aktiviert wird, alle anderen angeschlossenen Bausteine müssen in den hochohmigen Zustand gehen

## Tristate-Ausgangsstufen

### ■ Aufbau einer Tristate-Ausgangsstufe in TTL-Technologie

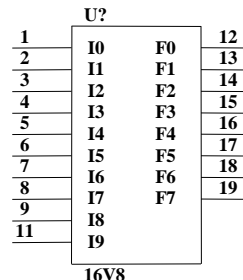


- wenn die Enable-Leitung (EN) 0 ist, sind die Ausgänge beider UND-Gatter 0, und **beide Ausgangstransistoren sperren**; der Ausgang z ist also hochohmig
- erst wenn EN 1 ist, leitet abhängig vom Zustand des Eingangs x entweder T1 oder T2 und liefert am Ausgang eine logische 1 oder 0
- solche Tristate-Ausgangsstufen sind im Schaltbild durch ein kleines Dreieck und das Vorhandensein eines Steuereingangs (EN) gekennzeichnet



## Tristate-Ausgangsstufen

- ein etwas umfangreicherer Ausschnitt aus einem Schaltplan eines Mikroprozessorsystems (nächste Seite) zeigt die Parallelschaltung von zwei Speicherbausteinen und dem Mikroprozessor, die alle über einen Tristate-Ausgang verfügen
- die Datenbusleitung sind beim Prozessor Z80 mit D0..D7 nummeriert, bei den Speichern 62256 heißen sie O0..O7
- der Enable-Eingang der Speicher /CE (Chip-Enable) ist mit einer **programmierbaren Steuerlogik** (16V8 - PAL) verbunden



- diese sorgt dafür, dass nur ein Speicher zur selben Zeit aktiviert wird und dieses nur dann, wenn nicht gerade der Prozessor auf den Datenbus zugreift
- dieses Prozessorsystem benötigt nur noch Bausteine für die Aus- und Eingabe sowie Spannungsversorgung und Taktgeber, um funktionsfähig zu sein

## Einfaches Prozessor-System

