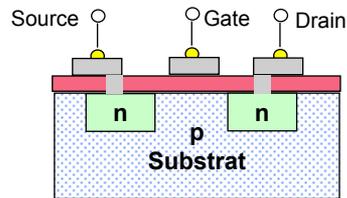


3. Schaltnetze und ihre technische Realisierung

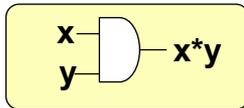


**Gatter
Schaltnetze
Halbleitertechnik
Dioden
Transistoren
Herstellungsprozeß
Transistorschaltungen**

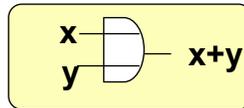
Elementare Gatter

Für die booleschen Operationen +, * und ' werden die folgenden Schaltzeichen (**Gatter**) verwendet.

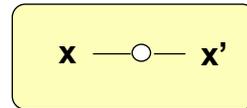
Die Gatter kann man zu komplexen Schaltungen (Schaltnetzen) zusammensetzen.



AND

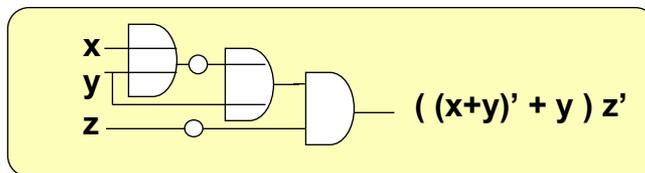


OR



NOT

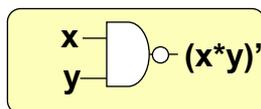
Beispiel einer zusammengesetzten Schaltung :



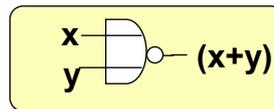
97

Weitere Gatter

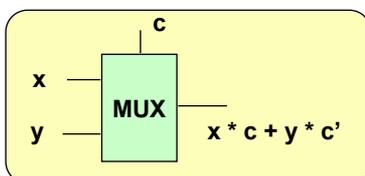
Prinzipiell kann man jede Schaltung allein aus AND und NOT Gliedern oder allein aus OR und NOT Gliedern aufbauen. Für praktische Zwecke ist es sinnvoll, weitere elementare Bausteine zu verwenden. Wichtige solche Bausteine sind :



NAND



NOR



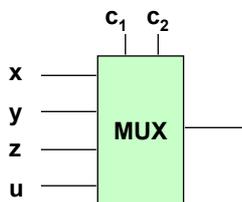
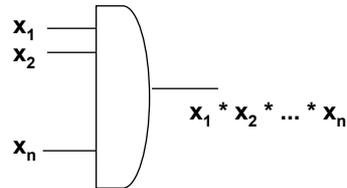
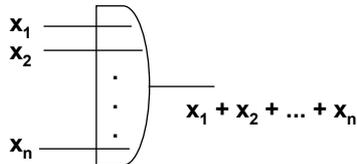
Multiplexer

Ein Multiplexer realisiert eine Art "IF-THEN-ELSE" Schaltung.
Wenn $c=1$, dann ist das Ergebnis = x .
Wenn $c=0$, dann ist das Ergebnis = y .

98

Variationen der elementaren Gatter

Die elementaren Gatter sind auch in leicht abgewandelter Version mit zusätzlichen Eingängen und eventuell auch mehreren Ausgängen verfügbar.

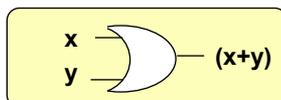


Vierkanal Multiplexer:
Durch die vier möglichen Kombinationen von c_1 und c_2 kann jeder der Eingangskanäle auf den Ausgang geschaltet werden.

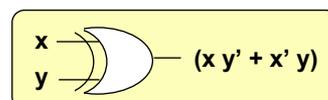
99

Andere Darstellung der Gatter

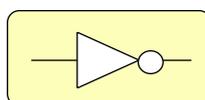
Es sind noch andere graphische Darstellungsweisen für logische Gatter in Verwendung. Vom **Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)** wurden die folgenden Symbole vorgeschlagen. Diese werden vor allem in der englischsprachigen Literatur häufig verwendet.



OR



XOR

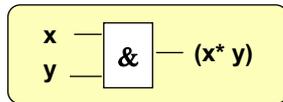


NOT

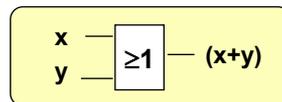
100

Noch eine Gatterdarstellung

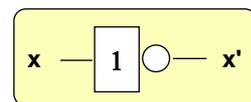
Eine neuere Normierung der Gatterdarstellung verwendet Rechtecke mit einer kennzeichnenden Aufschrift und Kreise für die Negation. Diese Norm hat sich aber (zumindest im englischsprachigen Raum) noch nicht durchgesetzt.



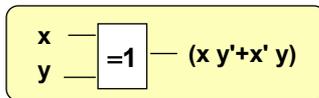
AND



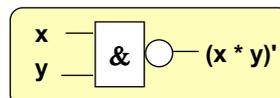
OR



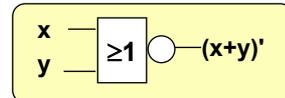
NOT



XOR



NAND



NOR

101

Schaltnetze / Schaltkreise

- Ein **Schaltnetz** oder ein **Schaltkreis** ist eine - in der Regel - schleifenfreie Komposition von Verknüpfungsgliedern (Gattern), so dass keine Speicherwirkung auftritt. Die Werte an den Ausgängen hängen nur von den Werten an den Eingängen ab.

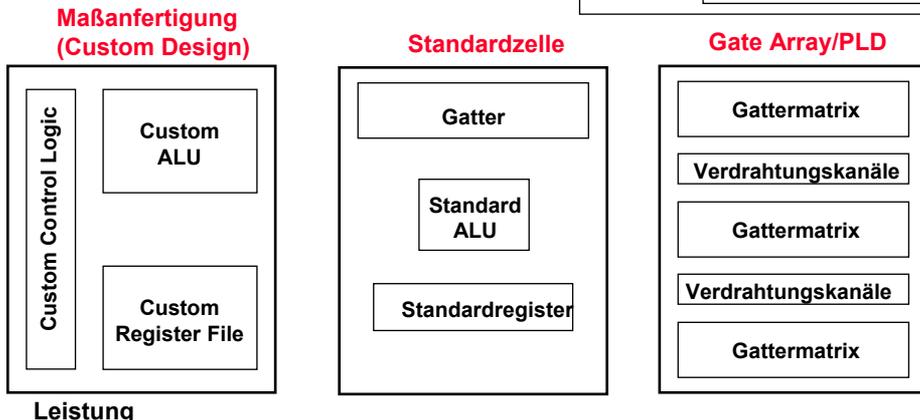


- Ein Schaltnetz realisiert eine **Schaltfunktion**
 $f : \underline{2}^n \rightarrow \underline{2}^m$
- Die technische Realisierung von Schaltnetzen erfolgt mit **Transistoren, Widerständen und Dioden**.

102

Technische Realisierung von Schaltkreisen

Entwurfalternativen:



Leistung

Entwurfskomplexität (Entwurfszeit)

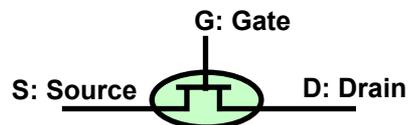
Integrationsdichte

PLD = Programmable Logic Device 103

Technologische Grundlagen

• Transistor

- elektrisch kontrollierter binärer Schalter



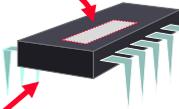
• integrierter Schaltkreis (IC - integrated circuit)

- Transistorschaltung auf einem dünnem Siliziumscheibchen, einem sogenannten **Chip**
- Integrationsgrade (Anzahl von Transistoren pro Chip):
 - » **SSI (Small Scale Integration)** ≤ 100 Transistoren
 - » **MSI (Medium SI)** $\sim 100 - 1000$ Transistoren
 - » **LSI (Large SI)** $\sim 1000 - 10^4/10^5$ Transistoren
 - » **VLSI (Very Large SI)** $\sim \geq 10^5/10^6$ Transistoren

Chips

Speicherchip

dual inline package (DIP)

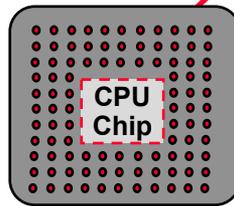


Gehäuse aus Kunststoff oder Keramik

PINS

Mikroprozessorchip

pin grid array (PGA)



von unten

Daten

Chipfläche: 1 cm²

Höhe: 0,1 mm

Anzahl der Pins

in DIP's ≤ 64

in PGA's ≥ 100

Abstand zwischen

Pins:

2,54 mm (0.1 in)

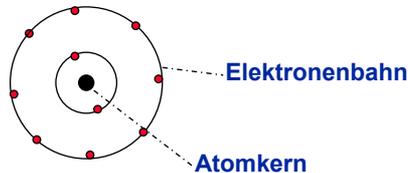
105

Mechanismen der Stromleitung in Festkörpern

Die elektrische Leitfähigkeit wird von der atomaren Struktur der Festkörper her begründet. Daher betrachten wir

das **Bohrsche Atommodell**

- Ein Atom besteht aus einem **Atomkern** und einer in Schalen gegliederten **Elektronenhülle**:



- Die chemischen Elemente unterscheiden sich durch die Anzahl der **Elektronen Z**.
 - » Z ist die Ordnungszahl eines Elementes im Periodensystem.
 - » Z=1 Wasserstoff, Z=2 Helium ...
- Bei neutralen Atomen enthält der Atomkern soviele **Protonen** wie Elektronen in der Elektronenhülle vorhanden sind.
- Elektronen sind Träger negativer **Elementarladungen** $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$. Protonen tragen jeweils die Ladung $+e$.
- Neben den Protonen enthält der Atomkern noch **Neutronen**, die keine Ladung haben, aber in die Massenzahl eines Atoms eingehen.

106

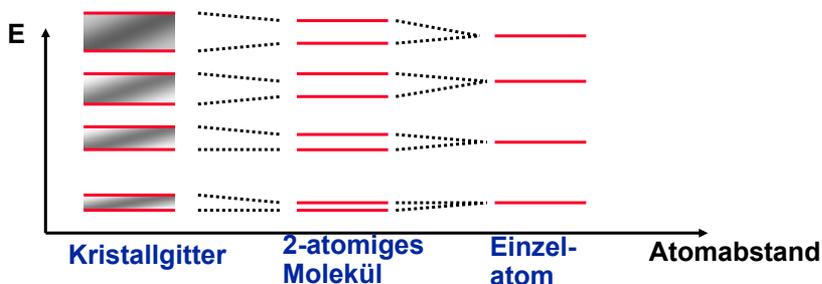
Energieniveaus

- Die Elektronen bewegen sich auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um den Atomkern. Zu jeder Bahn und damit auch zu jedem Elektron auf einer Bahn gehört eine bestimmte Energie E .
 - Es gilt: $E = E_p + E_k$
 - Die **potentielle Energie** E_p wird bestimmt durch die Entfernung der Bahn vom Atomkern.
 - Die **kinetische Energie** E_k bestimmt die Umlaufgeschwindigkeit.
- Die Energie nimmt mit der Entfernung zum Atomkern zu. Nach der Quantenbedingung sind für den Abstand einer Schale zum Kern nur **diskrete Werte/Energieniveaus** möglich.
- Für die Besetzung der innersten vier Schalen mit Elektronen gilt:
$$k_n = 2n^2$$
Dabei bezeichnet n den Index der Schale (innerste Schale hat Index 1) und k_n die maximale Anzahl von Elektronen in Schale n .**Elektronen versuchen immer das niedrigste Energieniveau einzunehmen**, d.h. auf einer inneren Schale Platz zu finden.
- Für $n = \infty$ ist ein Elektron unendlich weit vom Kern entfernt und hat **Energieniveau $E=0$** . Es ist somit nicht mehr gebunden und frei beweglich. Ein Atom, dem ein Elektron fehlt, heißt **Ion**. Die Energie, die notwendig ist, um Elektronen vom Atomkern zu lösen, heißt **Ionisierungsenergie**.

107

Energiebänder

- In einem Kristallgitter kommt es zu einer Überlagerung der elektrischen Felder der einzelnen Atome und damit zu einer Aufspaltung der diskreten Energieniveaus in **Energiebänder**



- **Valenzband:**
oberstes nicht-leeres Energieband -> Valenzelektronen
 - **Leitungsband:**
unterstes nicht-vollbesetztes Band -> Leitungselektronen
- Wenn das Valenzband nicht voll besetzt ist, ist es gleichzeitig Leitungsband. Dies ist bei Metallen der Fall.

108

Leitfähigkeit von Stoffen

- Einzig Valenz- und Leitungsband und die Energiedifferenz

$$\Delta E = E_L - E_V$$

bestimmen die Leitfähigkeit von Stoffen.

(E_L : niedrigste Energie im Leitungsband, E_V : höchste Energie im Valenzband)

- Innere vollbesetzte Bänder sind ohne Bedeutung für die Stromleitung.

- Man unterscheidet:

- **Isolatoren**

- » Valenzband vollbesetzt
- » ΔE groß

- **Leiter**

- » Valenzband nicht vollbesetzt, Leitungs- und Valenzband überlappen
- » $\Delta E < 0$

- **Halbleiter**

- » Valenzband voll, Leitungsband leer
- » ΔE gering
- » Durch Energiezufuhr steigt die Leitfähigkeit -> Warmleiter

Die bekanntesten Halbleiter sind vierwertig, d.h. sie haben 4 Valenzelektronen.

Im Kristallgitterverband besitzen sie jeweils 8 Valenzelektronen in Paarbindungen, d.h. das Valenzband ist voll besetzt.

109

Isolatoren

Halbleiter

Metalle

Leitfähigkeit

Typische Halbleiter: Silizium, Germanium und Galliumarsenid

Für die technische Verwendung muß der Halbleiter physikalisch rein und einkristallin hergestellt sein.

Durch kontrollierte Verunreinigungen, sogenannte **Dotierungen** von Bereichen des kristallinen Gitters kann die Leitfähigkeit erheblich erhöht werden.

- **n-Dotierung**: Einfügen höherwertiger Atome (Donatoren)

- » z.B. fünfwertiges Phosphor in vierwertiges Silizium

- **p-Dotierung**: Einfügen niederwertiger Atome (Akzeptoren)

- » z.B. dreiwertiges Indium in vierwertiges Silizium

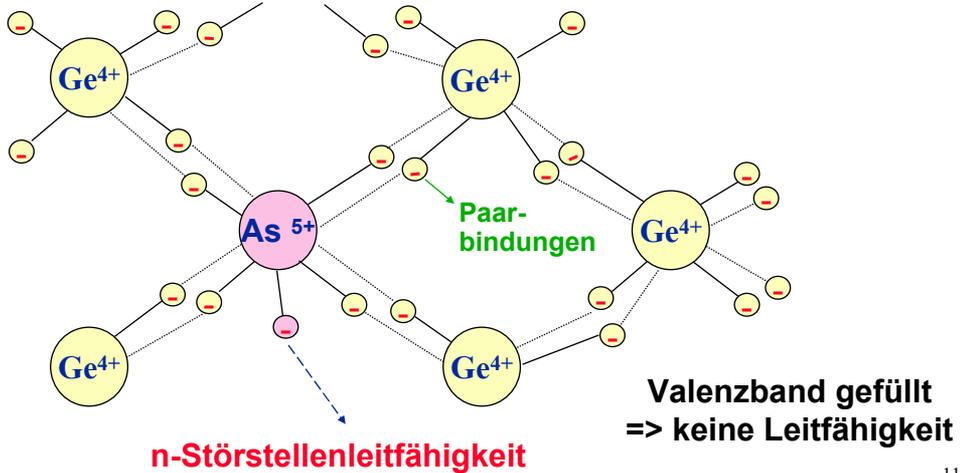
110

Halbleitertechnik

Wichtigste Grundelemente:

Silizium, Germanium, beide vierwertig, d. h. 4 Valenzelektronen in äußerster Elektronenschale.

Diese gehen in einem Kristallgitter Verbindungen mit anderen Atomen ein.



111

Halbleiter sind Warmleiter

(Metalle sind Kaltleiter)

Bei Temperaturanstieg und daraus resultierendem Energiezuwachs kommt es zur Lösung von Paarbindungen und einer Erhöhung der Leitfähigkeit.

=> **Eigenleitung**

Für technische Zwecke ist diese Leitfähigkeit allerdings zu gering.

Im Gegensatz zu Metallen, bei denen Verunreinigungen die Leitfähigkeit herabsetzen, kann bei Halbleitern durch Anreicherung mit geeigneten Elementen die Leitfähigkeit um bis zu 4 Zehnerpotenzen erhöht werden.

p-Dotierung mit 3-wertigen Elementen:

Indium, Bor, Aluminium

=> **p-Störstellenleitung**

n-Dotierung mit 5 wertigen Elementen:

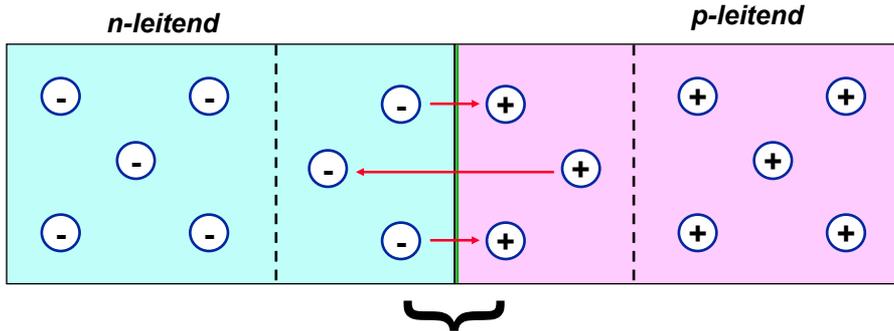
Arsen, Antimon, Phosphor

=> **n-Störstellenleitung**

112

Halbleiterbauelemente: Dioden

Eine **Diode** entsteht aus zwei Teilen von halbleitendem Material. Eine Seite ist n-dotiert (hat einen Überschuss an Elektronen) und die andere ist p-dotiert (hat einen Mangel an Elektronen).



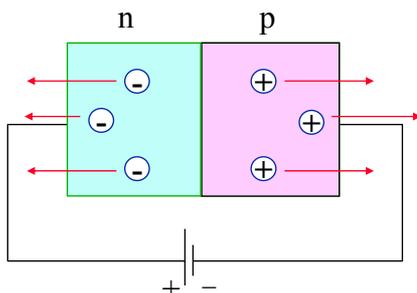
Rekombination in Grenzschicht (Diffusionsstrom)
-> ladungsträgerarme Zone

113

Anlegen eines elektrischen Feldes I

Es können zwei Situationen unterschieden werden:

- 1.) Verbinde *n-dotierten* Bereich mit positiver und *p-dotierten* Bereich mit negativer Spannungsquelle

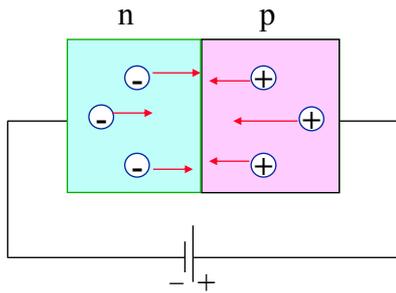


- ⇒ Vergrößerung der ladungsträgerarmen Zone
- ⇒ Sperrschicht entsteht. Es fließt kein Strom.
- ⇒ **Sperrichtung**

114

Anlegen eines elektrischen Feldes II

- 2.) Verbinde *n-dotierten* Bereich mit negativer und *p-dotierten* Bereich mit positiver Spannungsquelle

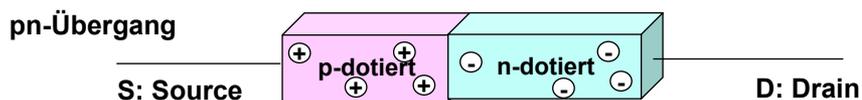


- ⇒ ladungsträgerarme Zone wird abgebaut
- ⇒ Elektronenstrom zur pos., Löcherstrom zur neg. Spannungsquelle
- ⇒ **Durchlaßrichtung**

115

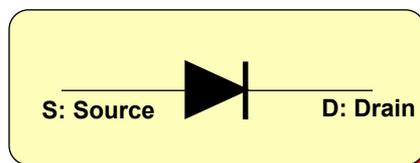
Dioden als Gleichrichter

Je nach Orientierung des elektrischen Feldes wird der Stromfluß gesperrt oder durchgelassen



Eine Diode läßt Strom nur in einer Richtung durch.

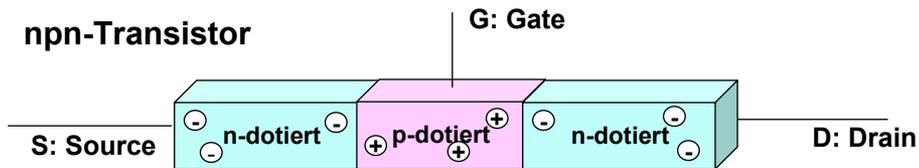
Schaltbild :



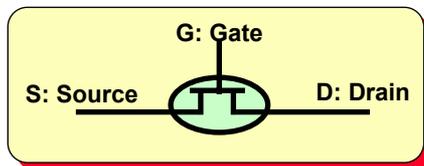
116

Transistoren

Die einfachste Variante eines **Transistors** entsteht aus drei abwechselnd dotierten Schichten halbleitenden Materials. Normalerweise kann kein Strom von Source nach Drain fließen. Legt man an die mittlere Schicht (Gate) aber eine **Steuerspannung**, so öffnet der Transistor.



Schaltbild :

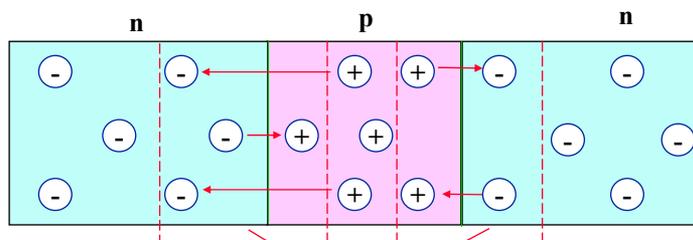


Die Spannung am Gate bestimmt, ob Strom von Source nach Drain fließt, oder nicht.

117

Bipolare Transistoren

Kristall aus 3 aufeinanderfolgenden Zonen abwechselnder Dotierung
je nach Zonenfolge: *npn oder pnp Transistor*



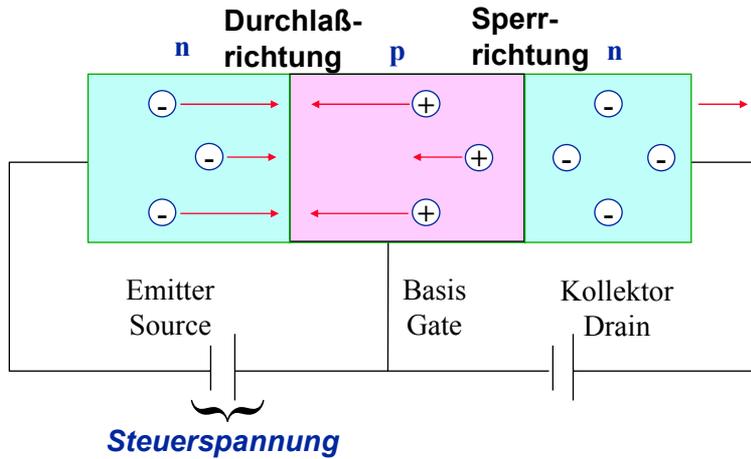
*ladungsträgerarme Zonen durch Rekombination
Diffusionsstrom*

Steuerwirkung nur dann, wenn ein pn-Übergang in Sperr- und der andere in Durchlaßrichtung gepolt ist.

⇒ **bipolarer Transistor**

118

Bipolare Transistorschaltung

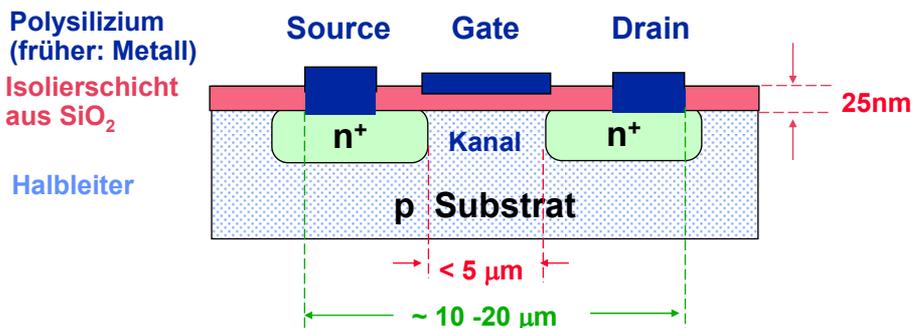


Bei genügend geringer Breite der Basiszone überlagert die ladungsträger-angereicherte Zone des in Durchlaßrichtung geschalteten pn-Übergangs die Sperrschicht und es kommt zu einem Strom vom Emitter zum Kollektor.

119

MOS Transistoren (unipolare Transistoren)

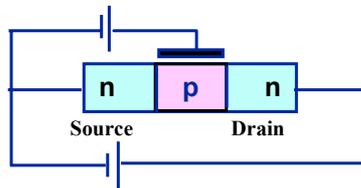
MOS bedeutet **Metal Oxide Semiconductor** (Metall-Oxid-Halbleiter). MOS Transistoren sind sogenannte **Feldeffekttransistoren**, da ihre Steuerung durch die Wirkung eines elektrischen Feldes erfolgt. Sie heißen auch **unipolar**, da ihre pn-Übergänge gleichepolt werden.



120

Funktionalität des Transistors

Ohne Spannung besteht zwischen Source und Drain keine Leitfähigkeit, da der pn-Übergang am Drain in Sperrichtung geschaltet ist.



Die Polysiliziumschicht wirkt zusammen mit dem Kanal wie ein **Kondensator**, dessen "Platten" durch die Siliziumoxidschicht getrennt sind. Durch Anlegen einer positiven Steuerspannung wird der Kondensator geladen und dadurch werden im Kanal negative Ladungen influenziert, die oberhalb einer bestimmten **Schwellesspannung** die vorhandenen positiven Ladungen kompensieren und eine **n-leitende Inversionsschicht** bilden. Im Bereich dieser Schicht werden die pn-Übergänge aufgehoben und es entsteht eine durchgehend leitende Verbindung, deren Widerstand mit zunehmender Steuerspannung weiter abnimmt.

121

NMOS, PMOS, CMOS

- **NMOS:** Nach der im Kanal entstehenden n-Leitung wird ein solcher Transistor als **n-Kanal MOS FET** (Feldeffekttransistor), kurz **NMOS**, bezeichnet.

Der Feldeffekt wurde 1930 von Lilienfeld entdeckt und 1935 patentiert.

Hohe Spannung am Gate → Transistor leitet
Niedrige Spannung am Gate → Transistor sperrt



- **PMOS:** entsteht analog, dual zu NMOS

Hohe Spannung am Gate → Transistor sperrt
Niedrige Spannung am Gate → Transistor leitet

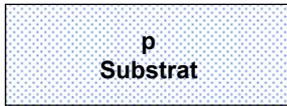


- Unter der **CMOS-Technologie** (Complementary MOS) versteht man die kombinierte Verwendung von NMOS und PMOS Transistoren in einem Schaltkreis (-> stromsparend).
- Gegenüber der Bipolartechnik ECL (Emitter Coupled Logic) bietet die CMOS-Technik den Vorteil einer geringeren Verlustleistung und damit einen höheren Integrationsgrad.

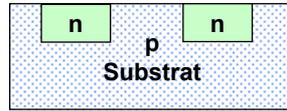
122

Herstellung eines Transistors

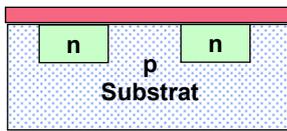
Durch die Ätzmethode entstehen Strukturen, die die elektrischen Eigenschaften von Leiterbahnen, Kondensatoren und Transistoren haben. Ein npn-Transistor entsteht durch geeignete Anordnung von n- und p-dotiertem Silizium.



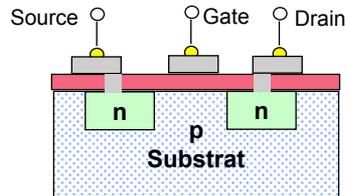
1. Platte aus p-dotiertem Halbleiter



2. Einbringen von stark n-dotiertem Material.



3. Auftragen einer Oxid-Schicht (Isolator)



4. Anbringen der Kontakte

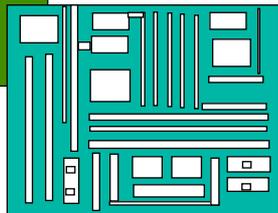
123

VLSI

Durch Photolithographie erreicht man heute integrierte Schaltungen (VLSI = Very Large Scale Integration) mit über 100000 Transistoren auf einem Chip.

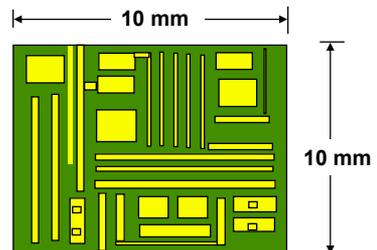


1. Ein mit einer elektrisch aktiven Schicht überzogene Platte wird mit Photolack bedeckt.



2. Durch eine Maske wird die Platte belichtet.

3. Die (un)belichteten Teile werden weggeätzt.

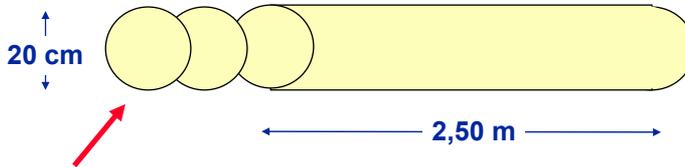


Dieser Vorgang wird mehrfach wiederholt.

124

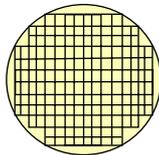
WSI - Wafer Scale Integration

- Ausgangspunkt: Siliziumkristallbarren



Wafer: 2.5mm dicke Scheiben

- Aufbringen von Transistoren, Leiterbahnen und Isolatoren:

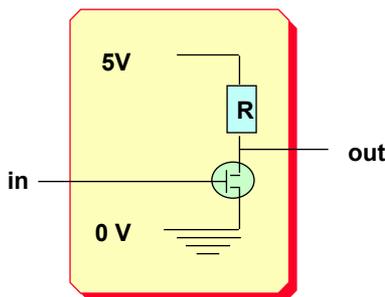


=> ~ 50 - 250 Chips/Wafer
je nach Größen und
Fehlerrate bei Herstellung

125

Transistorschaltungen für Gatter

Boolesche Schaltungen können mechanisch, elektrisch und neuerdings optisch realisiert werden. Gegenwärtig ist nur die elektrische Realisierung von Bedeutung. In den ersten elektronischen Rechenanlagen wurden die Schalter als Relais ausgeführt, dann durch Elektronenröhren und schließlich durch Transistoren.



Ein Inverter

Eine Spannung zwischen Erde und in läßt Strom durch den Transistor fließen.

Ohne Spannung zwischen Erde und in ist der Widerstand des Transistors unendlich.

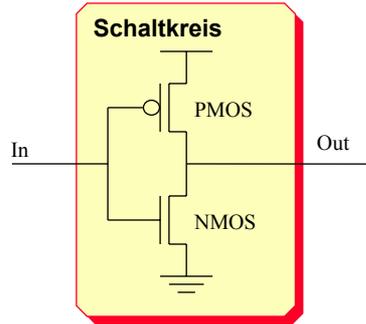
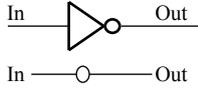
➔ Liegt in auf 5V (High) , so liegt out auf 0V (Low).

➔ Liegt in auf 0V (Low) , so liegt out auf 5V (High).

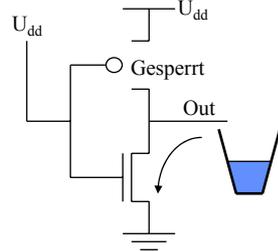
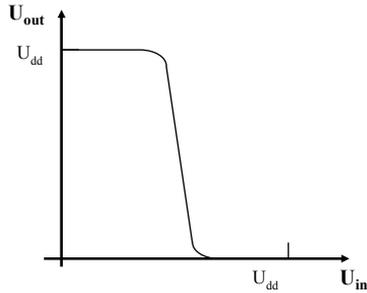
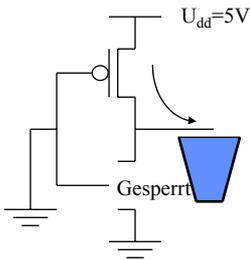
126

CMOS Inverter

Symbole

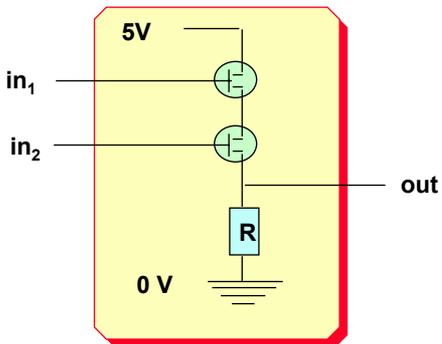


Inverter Verhalten:

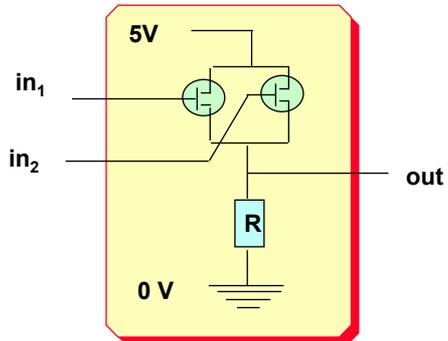


Grundschaltungen für UND/ODER Gatter

Ein AND-Gatter

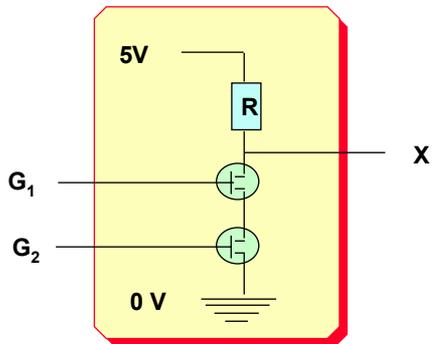


Ein OR-Gatter

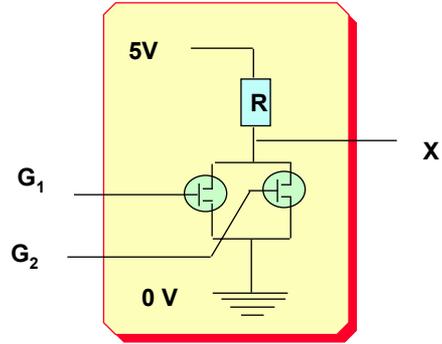


Realisierung von NAND und NOR-Gattern

Ein NAND-Gatter



Ein NOR-Gatter



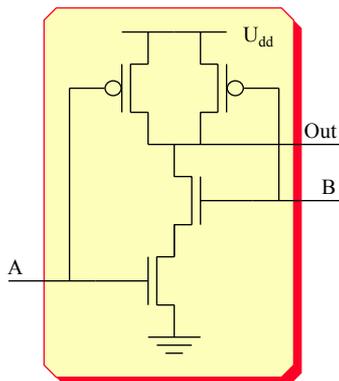
129

CMOS NAND und NOR Gatter

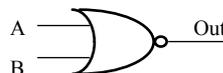
NAND Gatter



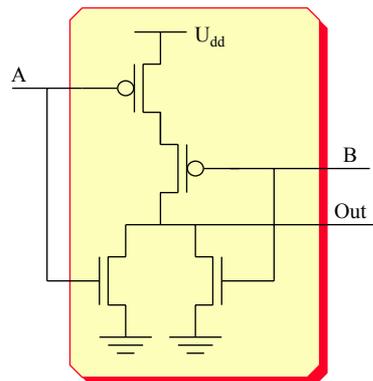
A	B	Out
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



NOR Gatter



A	B	Out
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



130