

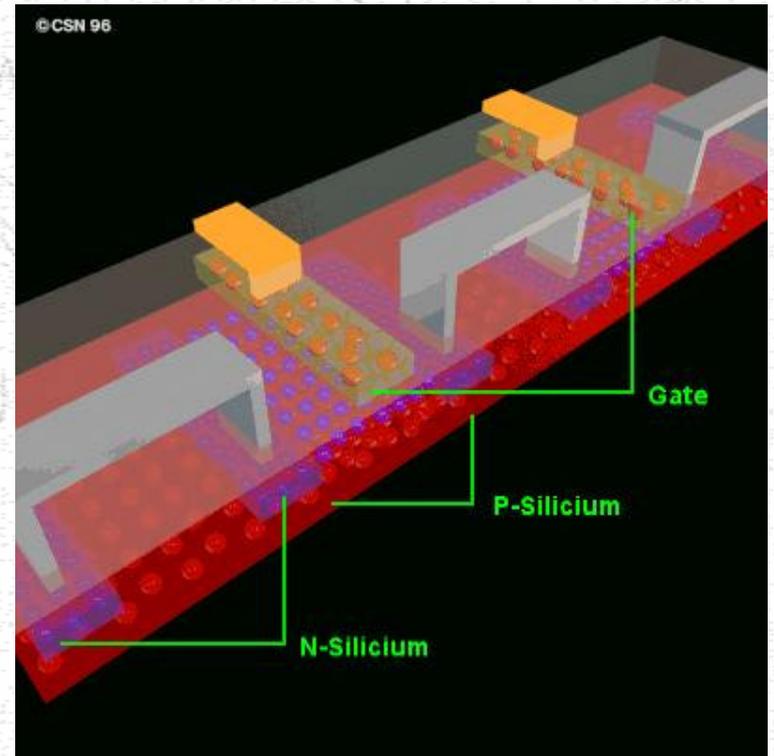
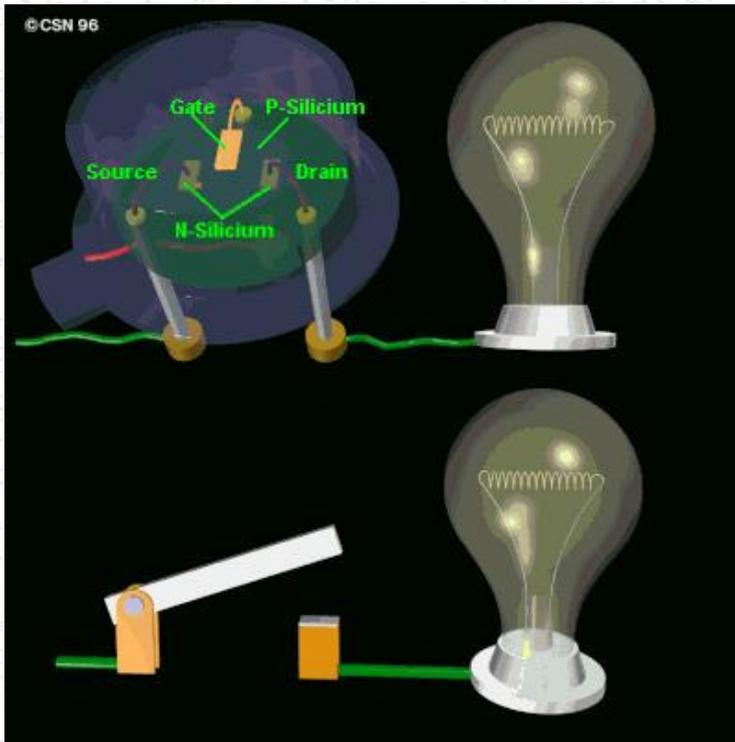
Mikroprozessor - und Chiptechnologie

I



Hardware

1 Halbleiterfunktionen



8 Halbleiterbauelemente

8 Halbleiterbauelemente

8.1 Grundlagen

8.2 Dioden

8.3 Transistoren

8.4 Einfache Grundschaltungen

- Als „**halbleitend**“ werden diejenigen Werkstoffe bezeichnet, deren spezifischer Leitwert zwischen dem von metallischen Leitern und dem von echten Isolatoren liegt.

8.1 Grundlagen (i)

- Die wichtigsten beiden Halbleiterwerkstoffe sind **Silicium** und **Germanium**.

	11 Na Natrium	12 Mg Ma- gnesium	13 Al Aluminium	14 Si Silizium	15 P Phosphor	16 S Schwefel	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
K	2 22,990	2 24,312	2 26,982	2 28,086	2 30,974	2 32,064	2 35,453	2 39,948
L	8	8	8	8	8	8	8	8
M	1	2	3	4	5	6	7	8
	19 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titan	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	
K	2 39,102	2 40,08	2 44,956	2 47,90	2 50,942	2 51,996	2 54,938	
L	8	8	8	8	8	8	8	
M	8	8	9	10	11	13	13	
N	1	2	2	2	2	1	2	
	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Ger- manium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
K	2 63,54	2 65,37	2 69,72	2 72,59	2 74,922	2 78,96	2 79,909	2 83,80
L	8	8	8	8	8	8	8	8
M	18	18	18	18	18	18	18	18
N	1	2	3	4	5	6	7	8

8.1 Grundlagen (ii)

- Die 4-fach besetzten Außenschalen der Atome führen zu einer **Atombindung** .

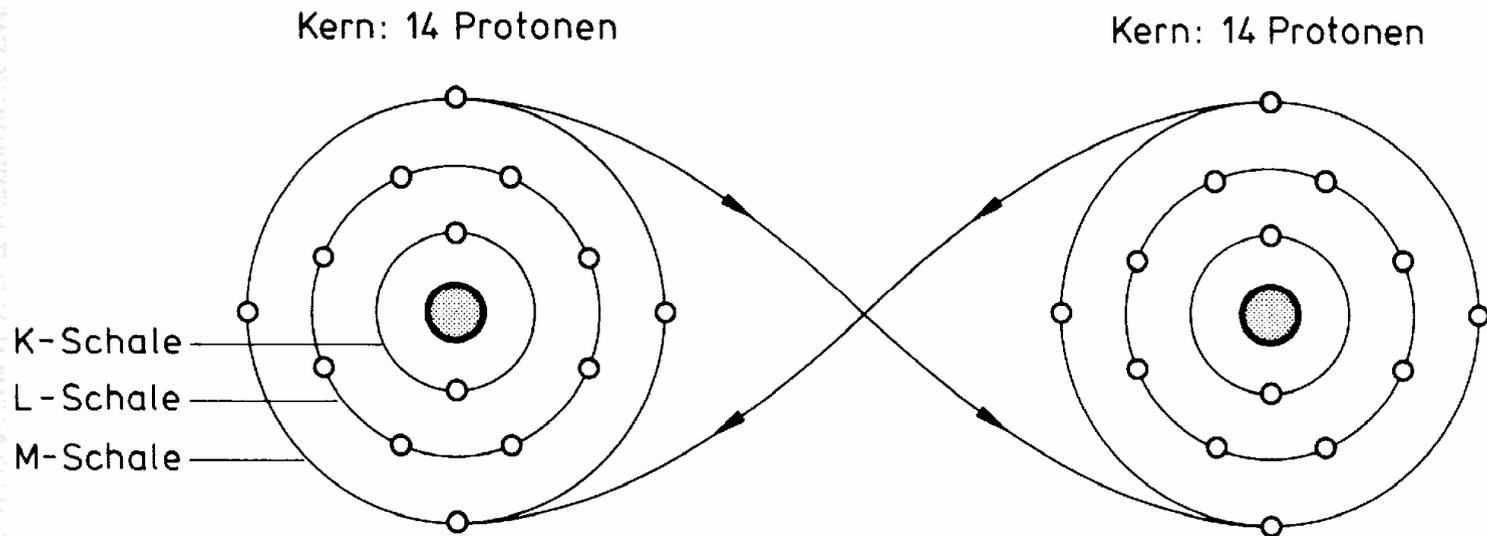


Bild 3.5 Atombindung zwischen zwei Si-Atomen

8.1 Grundlagen (iii)

- Jeweils 5 Atome schließen sich zu einer räumlichen Struktur zusammen. (**Kristallgitter**).

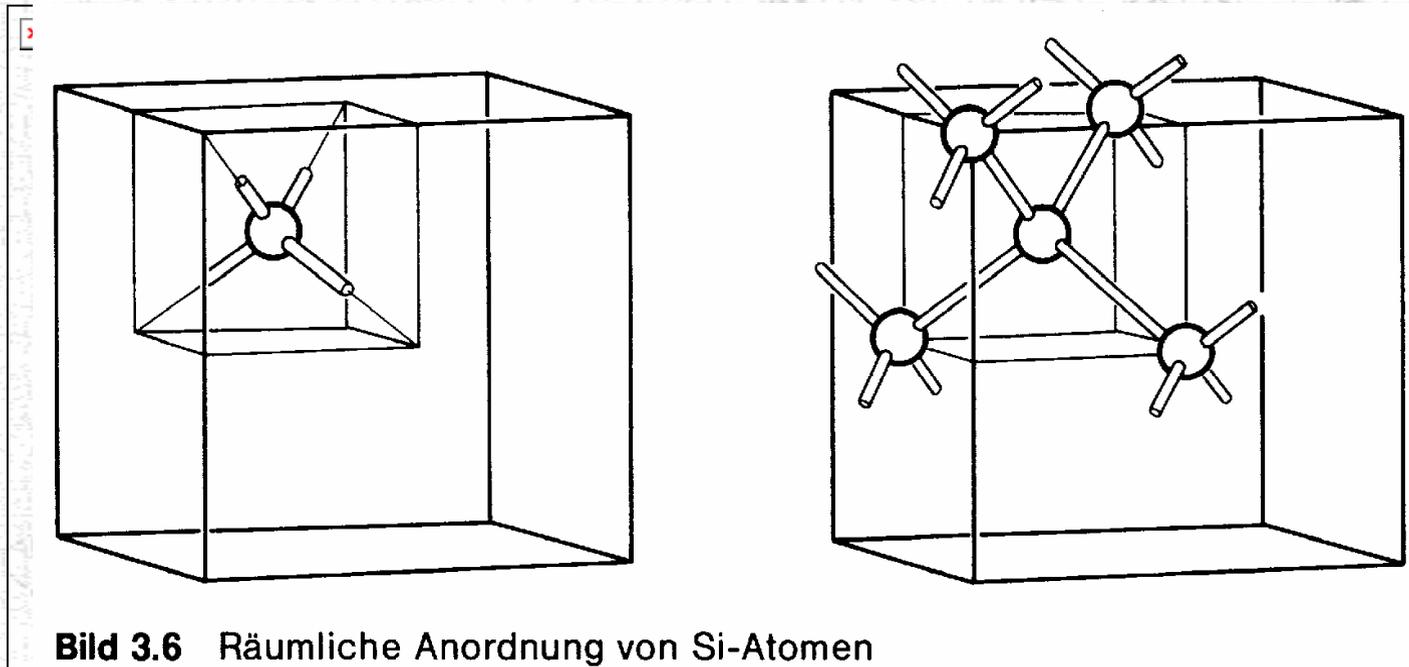


Bild 3.6 Räumliche Anordnung von Si-Atomen zu einem Kristallgitter

8.1 Grundlagen (I V)

■ Kristallgitter in zweidimensionaler Darstellung.

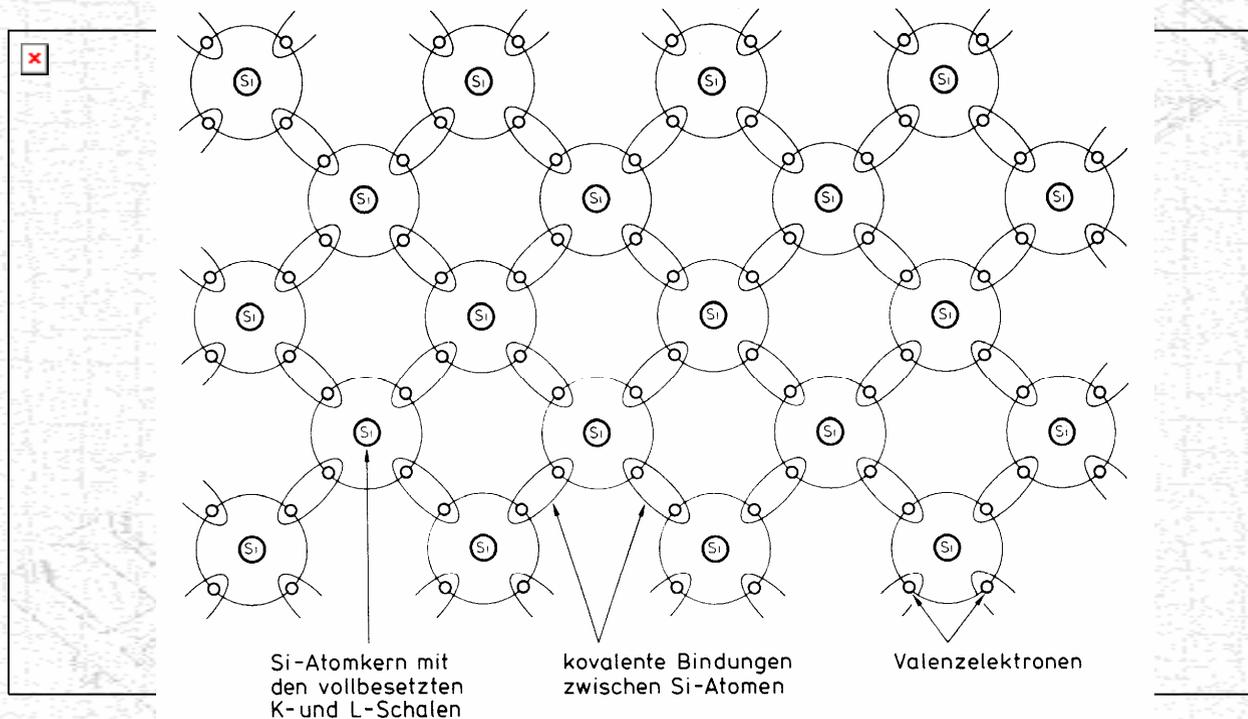


Bild 3.8 Zweidimensionale Darstellung eines Halbleiterkristalls aus Si-Atomen

8.1 Grundlagen (V)

■ Thermische Eigenleitung durch Rekombination und Paarbildung.

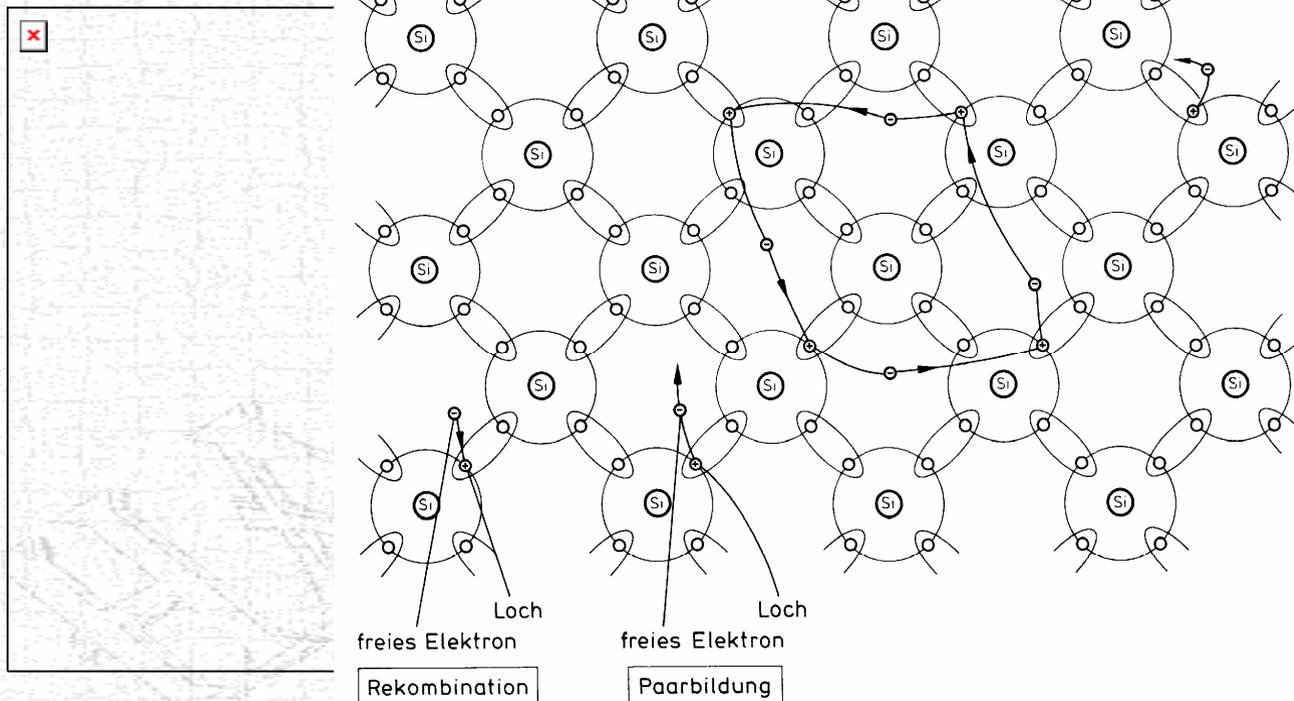


Bild 3.9 Paarbildung und Rekombination in einem Si-Kristall

8.1 Grundlagen (VI)

- **Richtungsgesteuerte Eigenleitung durch Anlegen eines elektrischen Feldes.**

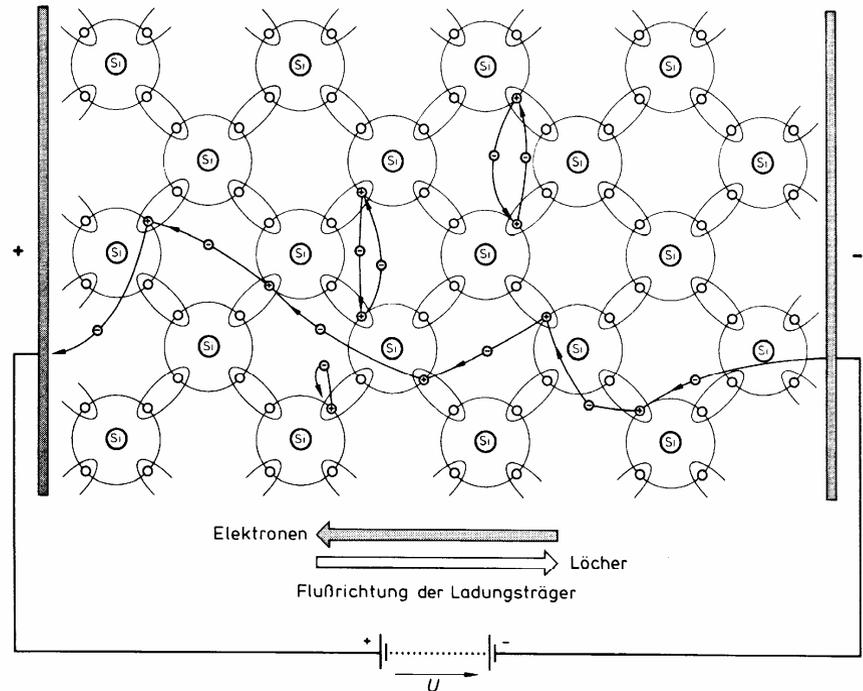
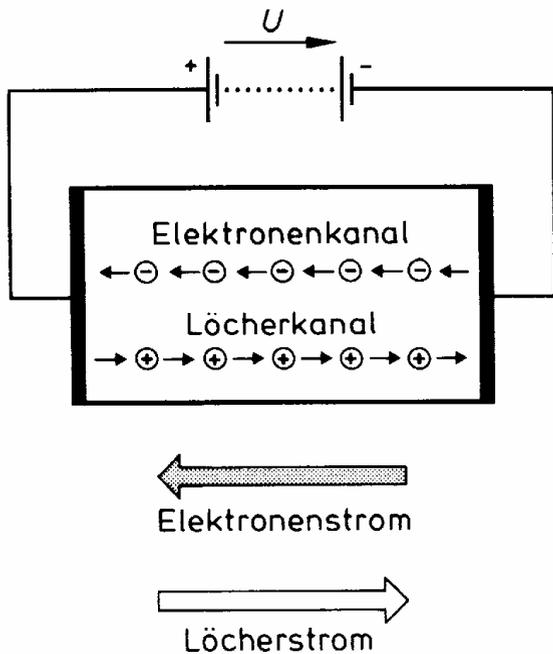


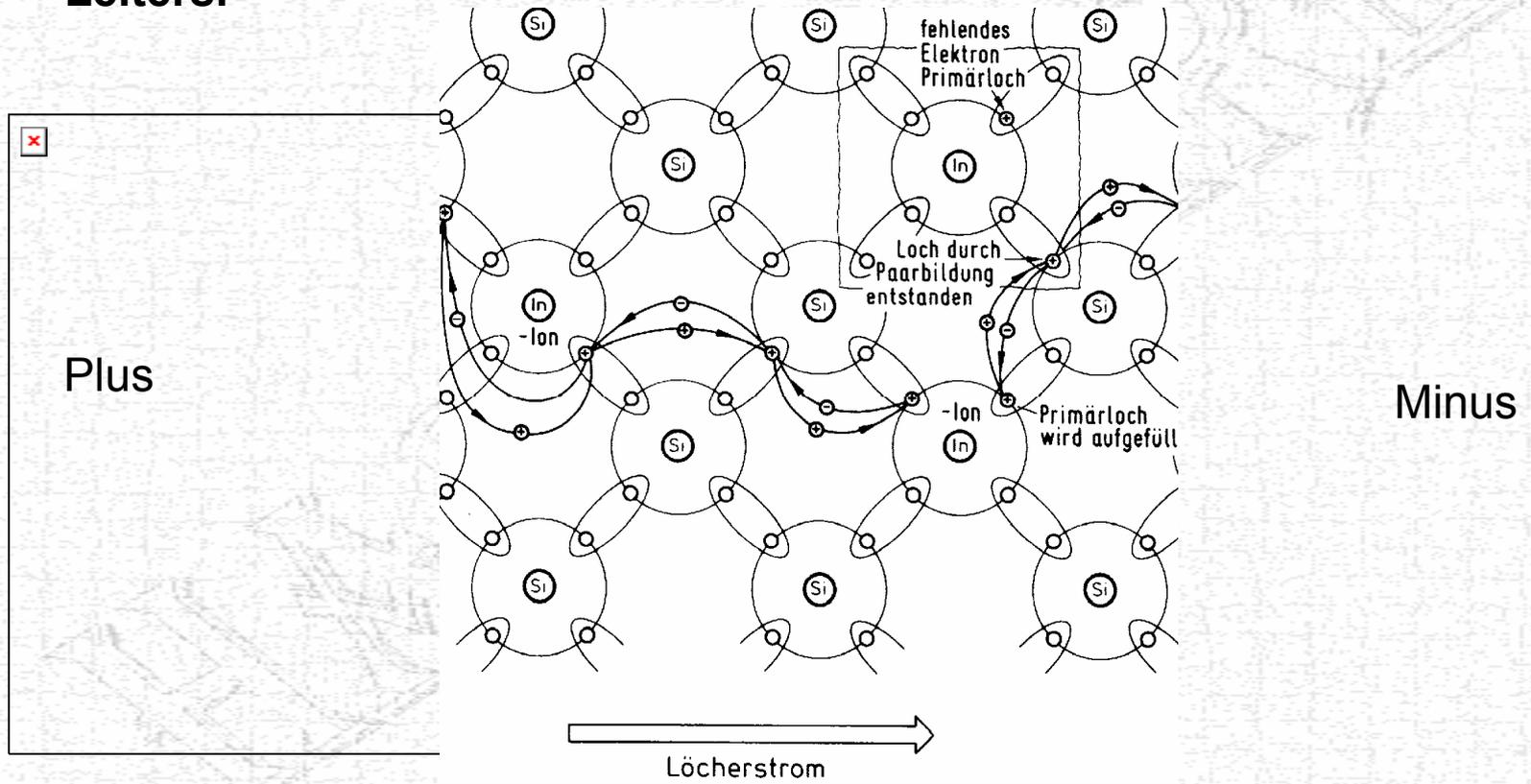
Bild 3.11 Elektronen- und Löcherwanderung im Si-Kristall unter Einfluß eines elektrischen Feldes

8.1 Grundlagen (VI I I)

- Die Eigenleitfähigkeit von Halbleitern kann durch den Einbau von sog. Fremd- bzw. Störatomen stark beeinflusst werden.
- Dieser Vorgang wird als „**Dotieren**“ oder auch „**Dopen**“ bezeichnet.
- Der Grad der Verunreinigung bestimmt die sog. „**Störstellenleitfähigkeit**“.
- Zum dotieren eignen sich Stoffe mit 3 oder 5 Valenzelektronen.
- 5-wertige Stoffe führen zu einer **n - Dotierung** und werden deshalb auch als „Donatoren“(Elektronenspender) bezeichnet. (z.B. Phosphor und Arsen)
- 3-wertige Stoffe führen zu einer **p - Dotierung** und werden deshalb auch als „Akzeptoren“(Elektronenempfänger) bezeichnet. (z.B. Gallium und Indium)

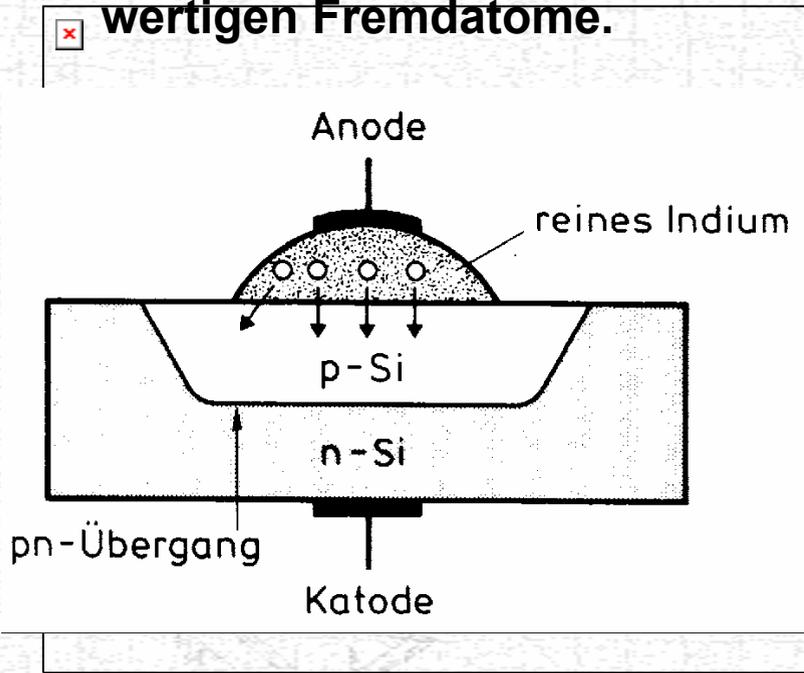
8.1 Grundlagen (X)

Lochleitfähigkeit eines p-Leiters.

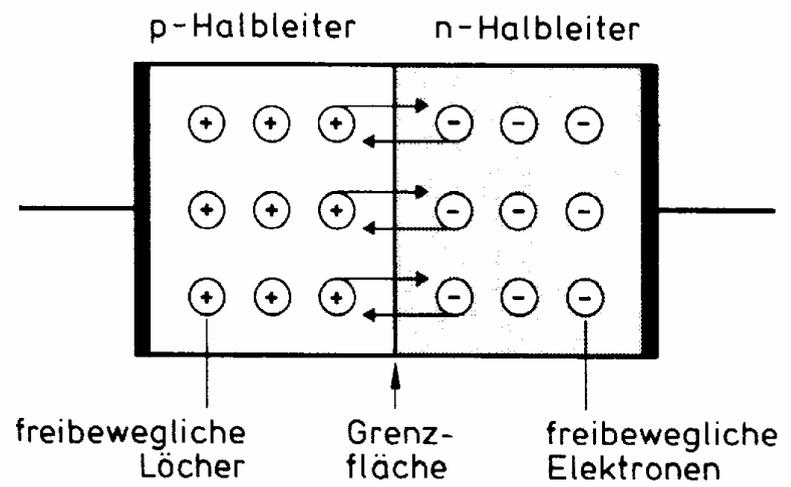


8.1 Grundlagen (XI)

- **Herstellungsprinzip eines stoßstellenfreien pn-Überganges durch Eindiffundieren der 3-wertigen Fremdatome.**



- **pn-Übergang ohne angelegte Spannung**



8.1 Grundlagen (XI I)

- Entstehung einer **Raumladungszone** innerhalb der Sperrschicht durch Diffusion von Ladungsträgern.

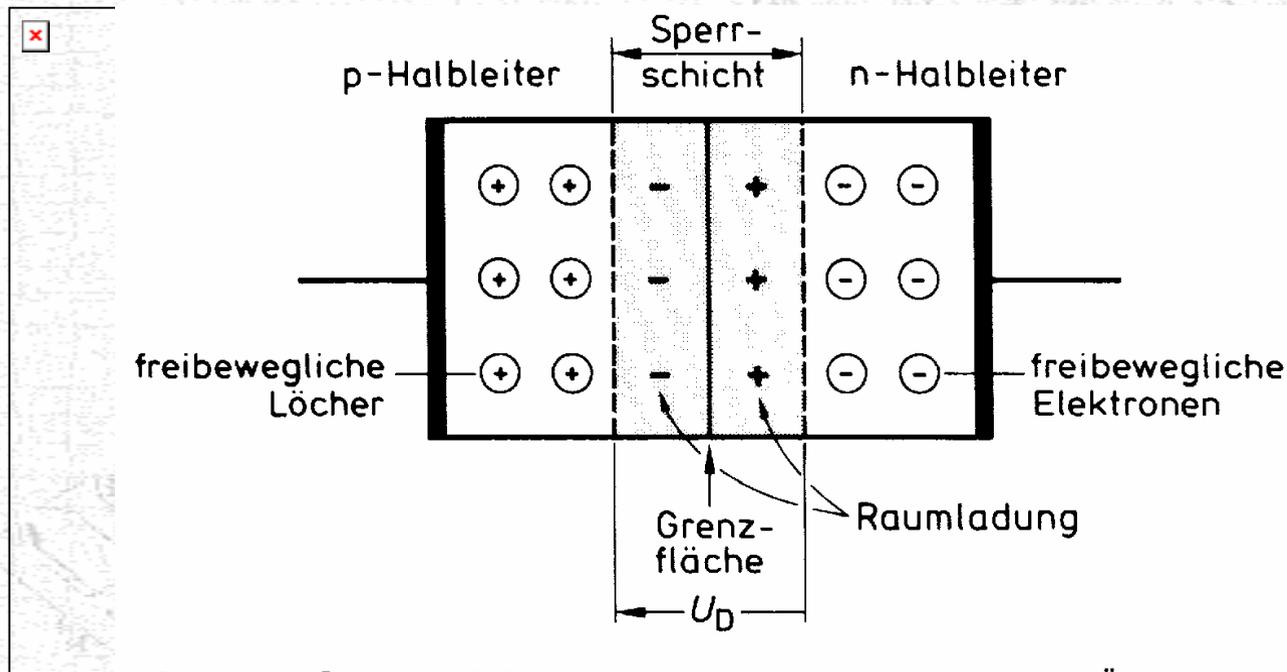


Bild 3.18 Sperrschicht und Raumladung bei einem pn-Übergang

8.1 Grundlagen (XI II)

- Bei gleichpoligem Anschluß einer Spannungsquelle (Plus an p -, Minus an n - Material, wird die Sperrschicht abgebaut.
- Bei dieser Polung wird der pn-Übergang also in **Durchlaßrichtung** betrieben.

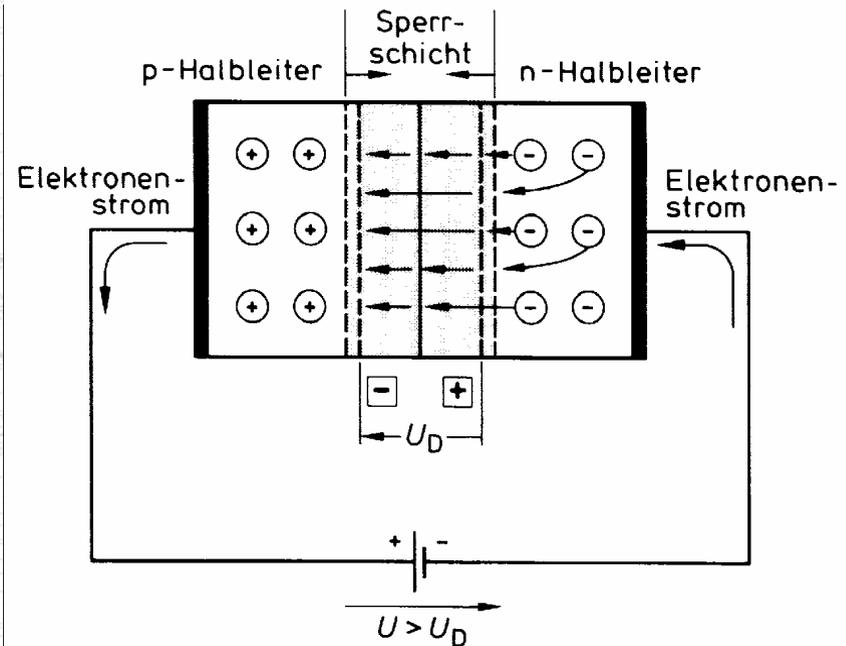
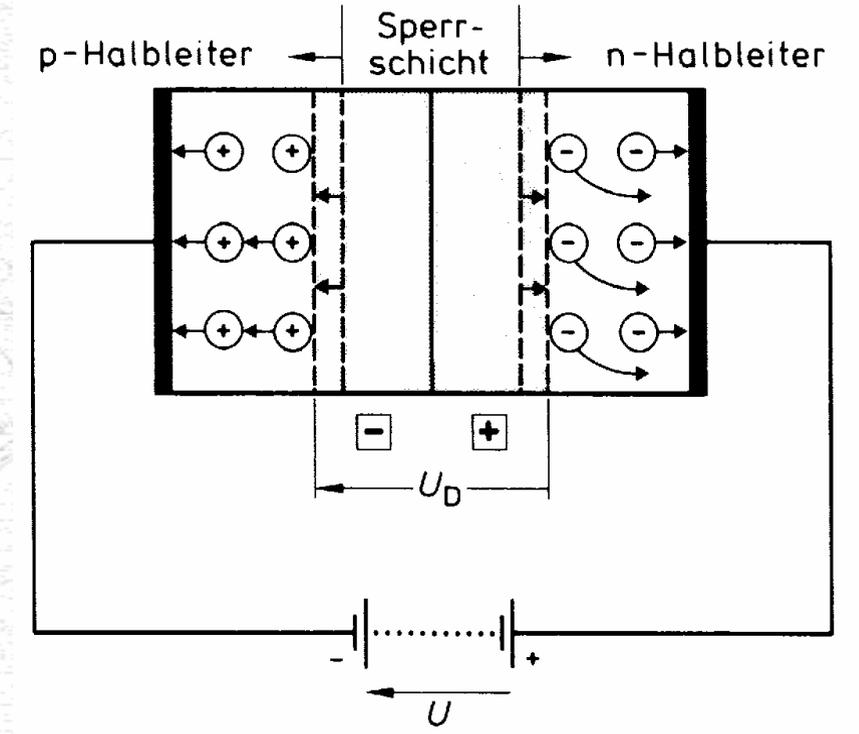


Bild 3.19 pn-Übergang in Durchlaßrichtung

8.1 Grundlagen (XI V)

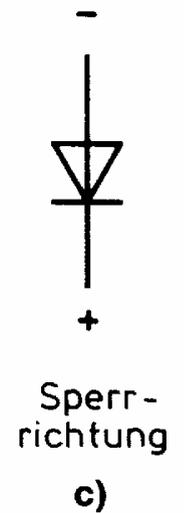
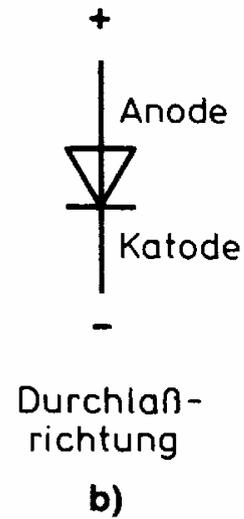
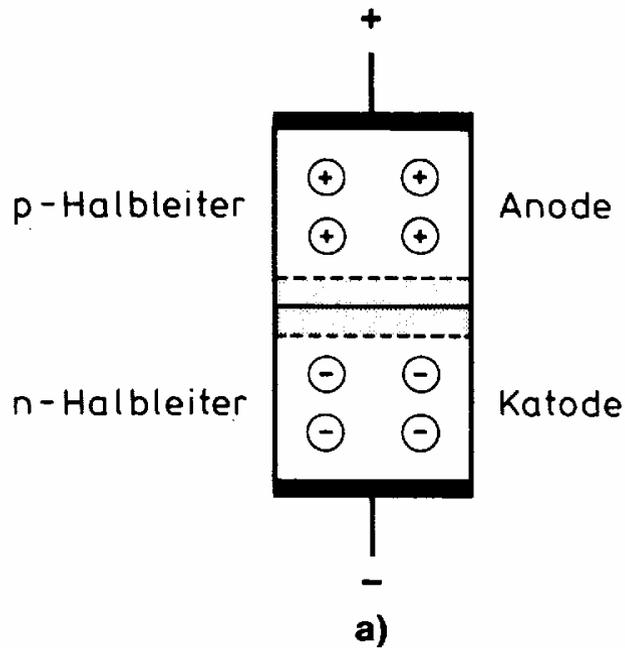
- Bei gegenpoligem Anschluß einer Spannungsquelle (Plus an n -, Minus an p - Material, wird die Sperrschicht größer.
- Bei dieser Polung wird der pn-Übergang also in **Sperrichtung** betrieben.



8.2 Dioden (i)

- Dioden bestehen aus einem Halbleiterkristall mit einem **P/N-Übergang**.
- Da durch diesen P/N-Übergang der Strom nur in eine Richtung fließen kann, werden **Gleichrichter-** und **Schaltdioden** als stromrichtungsabhängige Bauelemente bezeichnet.
- Von der Durchlaßrichtung sind die Bezeichnungen der Anschlüsse abgeleitet.
- Die Elektrode am p-dotierten Kristall wird als **Anode** (griech. Eingang), die Elektrode am n-dotierten Kristall als **Katode** (griech. Hinabweg) bezeichnet.

8.2 Dioden (ii)



8.2 Dioden (iii)

- **Es wird zwischen Germanium- und Silizium-Dioden unterschieden.**
- **Die Durchlaß- oder auch Schleusenspannung U_s für GE-Dioden beträgt ca. 0,3 Volt, die für Si-Dioden etwa 0,7 Volt.**
- **Auch die Sperrspannung U_{rmax} ist bei beiden Typen unterschiedlich. Bei Ge-Dioden beträgt sie 40 – ca. 100 Volt, bei Si-Dioden 80 – ca. 1500 Volt. (siehe Kennlinie, nächste Folie)**

8.2 Dioden (I V)

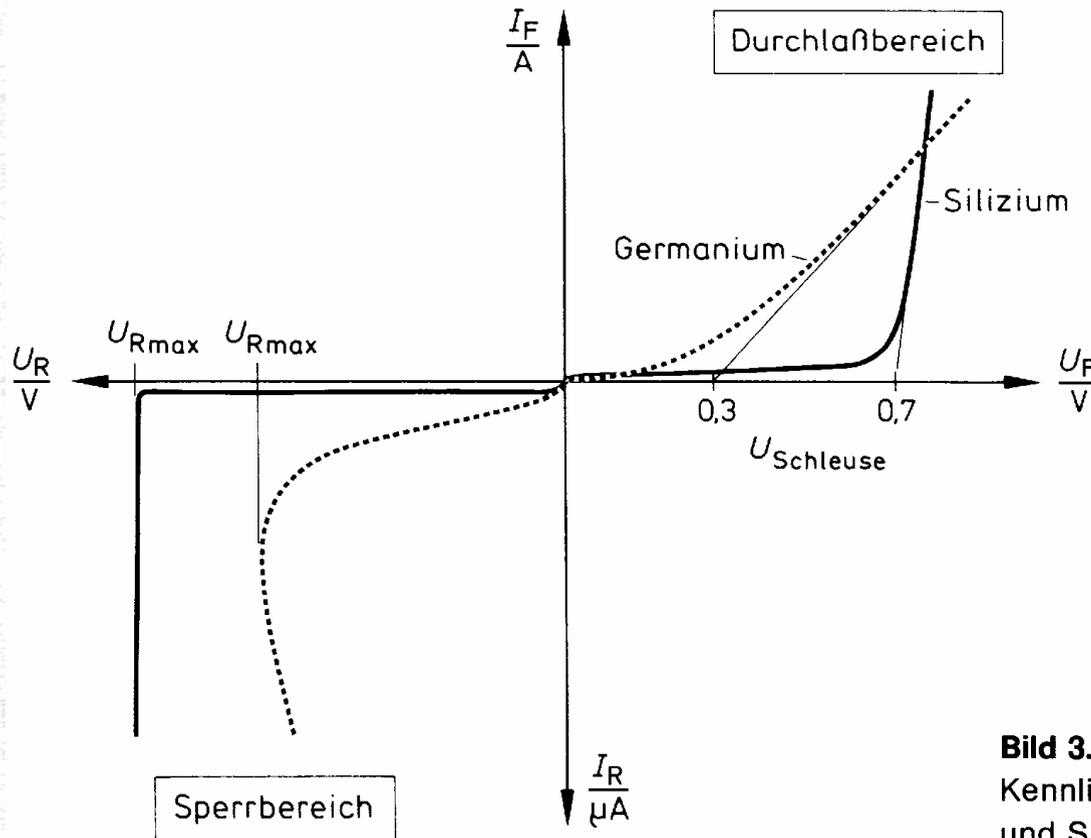
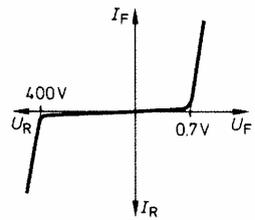
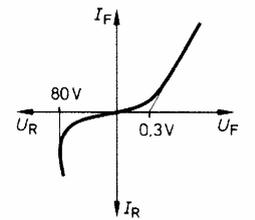
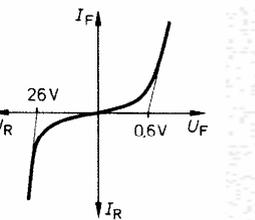


Bild 3.22 Charakteristische Kennlinien für Ge- und Si-Gleichrichterdiolen

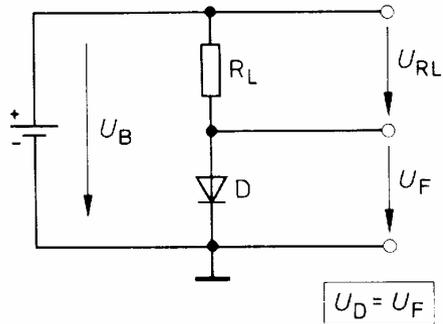
8.2 Dioden (V)

■ Charakteristische Eigenschaften von Si-Ge- und (Se)-Dioden

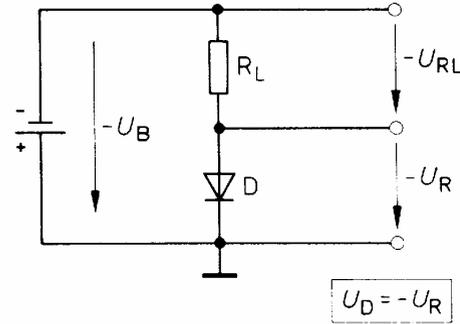
Eigenschaft	Siliziumdiode	Germaniumdiode	Selendiode
Schleusenspannung U_s	0,5 V–0,8 V	0,2 V–0,4 V	0,6 V
max. Sperrspannung $U_{R\ max}$	80 V–1500 V	40 V–100 V	20 V–30 V pro Platte
Höchstzulässige Stromdichte in der Halbleiterschicht	100 A/cm ²	50 A/cm ²	0,1 A/cm ²
Sperrstrom I_{Rest}	5 nA–500 nA	10 μA–500 μA	100 μA–500 μA
max. Sperrschichttemperatur $\vartheta_{J\ max}$	150 °C–200 °C	70 °C–90 °C	60 °C–80 °C
Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	Verdopplung bei 8 K Temperaturerhöhung	Verdopplung bei 10 K Temperaturerhöhung	Verdopplung bei 5 K Temperaturerhöhung
Zulässige Verlustleistung $P_{V\ max}$	groß (wegen der höheren Sperrschichttemperatur)	mittel	mittel
Kennlinienverlauf			
Anwendung	Gleichrichtung aller Art Schalterbetrieb	HF-Gleichrichtung	Netzgleichrichtung

8.2 Dioden (VI)

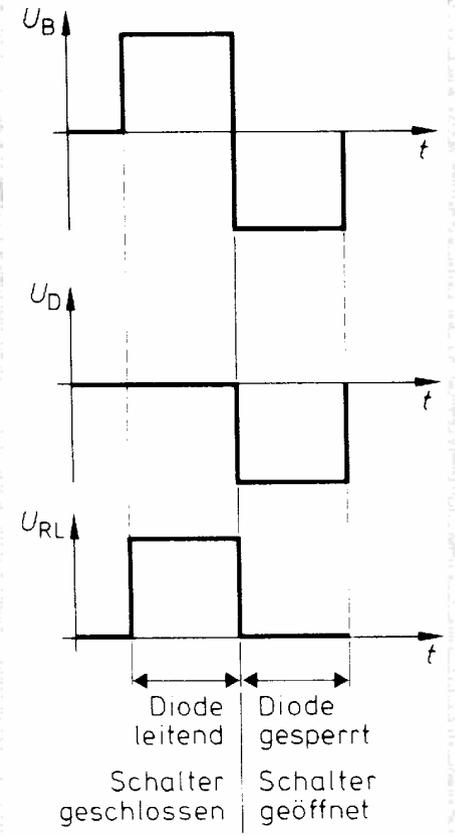
■ Anwendungsbeispiel: Diode als Schalter



Diode leitend
(Schalter geschlossen)



Diode gesperrt
(Schalter geöffnet)



8.2 Dioden (VI I)

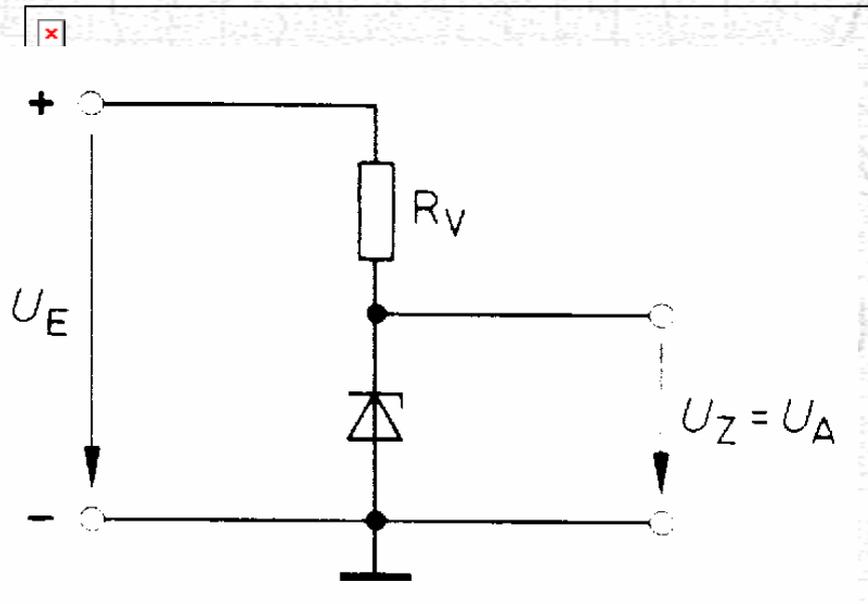
■ **Sonderfall: Z-Diode**

- **Z-Dioden oder auch Zener-Dioden (nach dem Wissensch. C. Zener) sind Sonderformen der Si-Dioden, bei denen die Sperrschicht durch besondere Dotierung sehr dünn gehalten wird.**
- **Dadurch ist die Durchbruchsspg. U_{max} wesentlich niedriger (ca. 1-10 Volt).**
- **Diesen charakteristischen Effekt (Zener-Effekt macht man sich zu Nutze, indem man die Z-Diode immer in Sperrichtung betreibt.**
- **Durch den sich ergebenden typischen Kennlinienverlauf lassen sich Z-Dioden gut zur Spannungsstabilisierung kleiner Gleichspannungen einsetzen.**

8.2 Dioden (VI II)

■ Spgs. Stabilisierung mit Z-Diode

■ Kennlinien



3.5 Z-Dioden

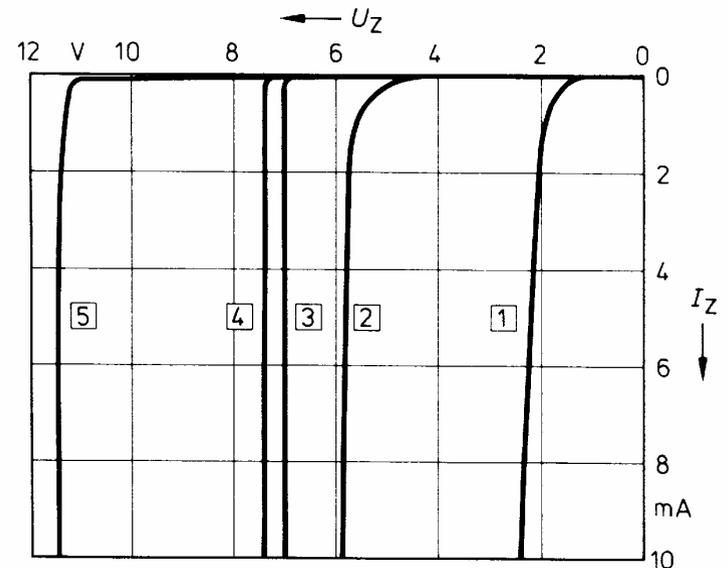
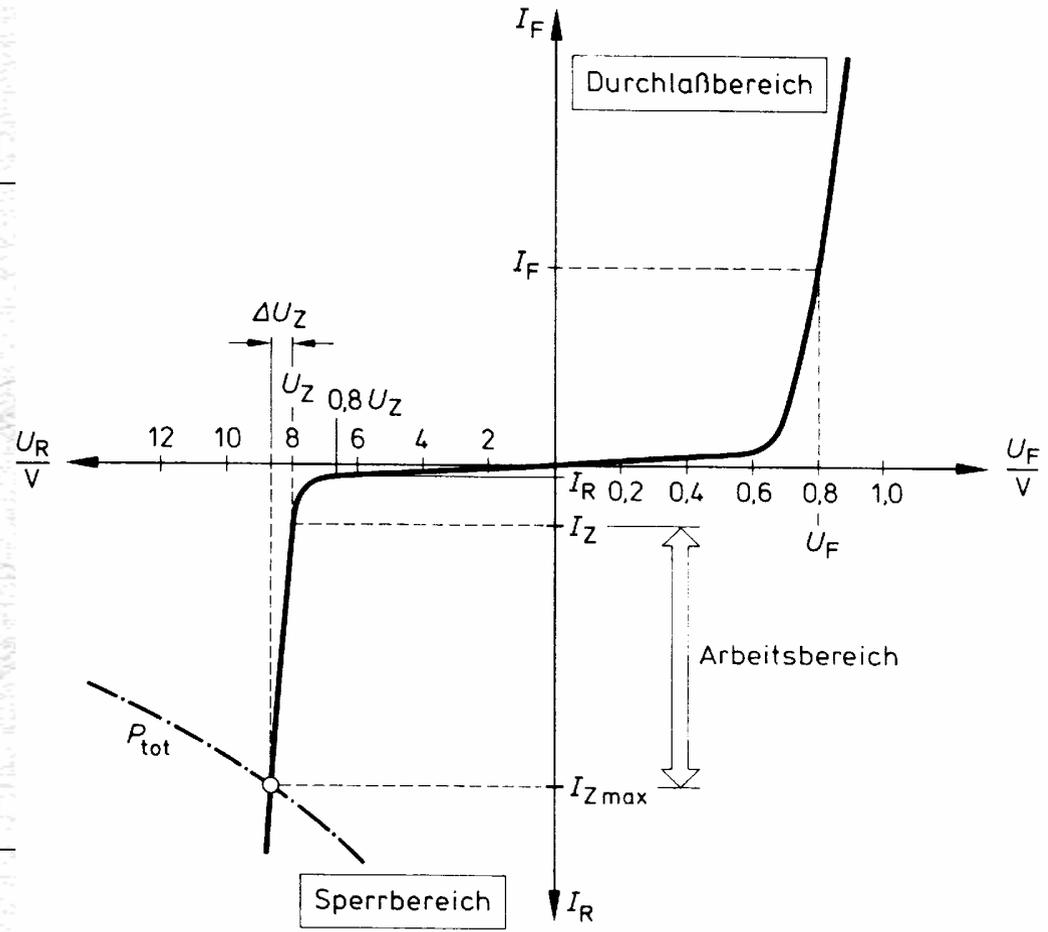
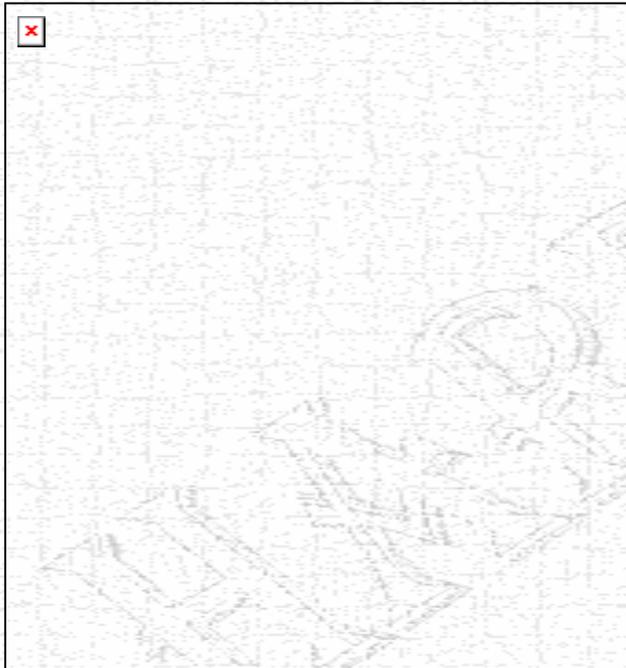


Bild 3.78 Durchbruchkennlinien verschiedener Z-Dioden

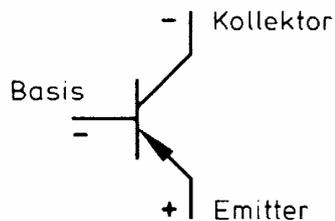
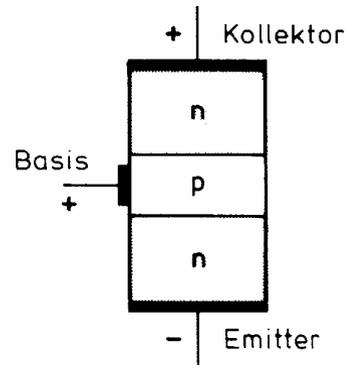
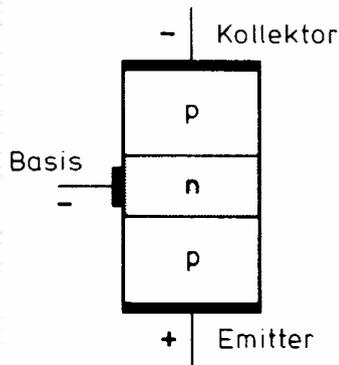
8.2 Dioden (I X)

■ Strom- und Spannungs-Kennlinie einer Z-Diode

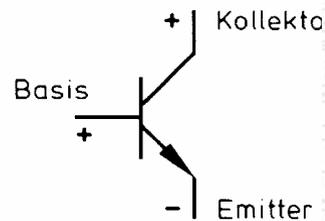


8.3 Transistor (i)

- Bipolare Transistoren werden in **PNP**- und **NPN**-Typen unterschieden.



PNP-Transistor



NPN-Transistor

8.3 Transistor (ii)

- Bipolare Transistoren gibt es in den verschiedensten Bauformen und für unterschiedliche Einsatzbereiche.

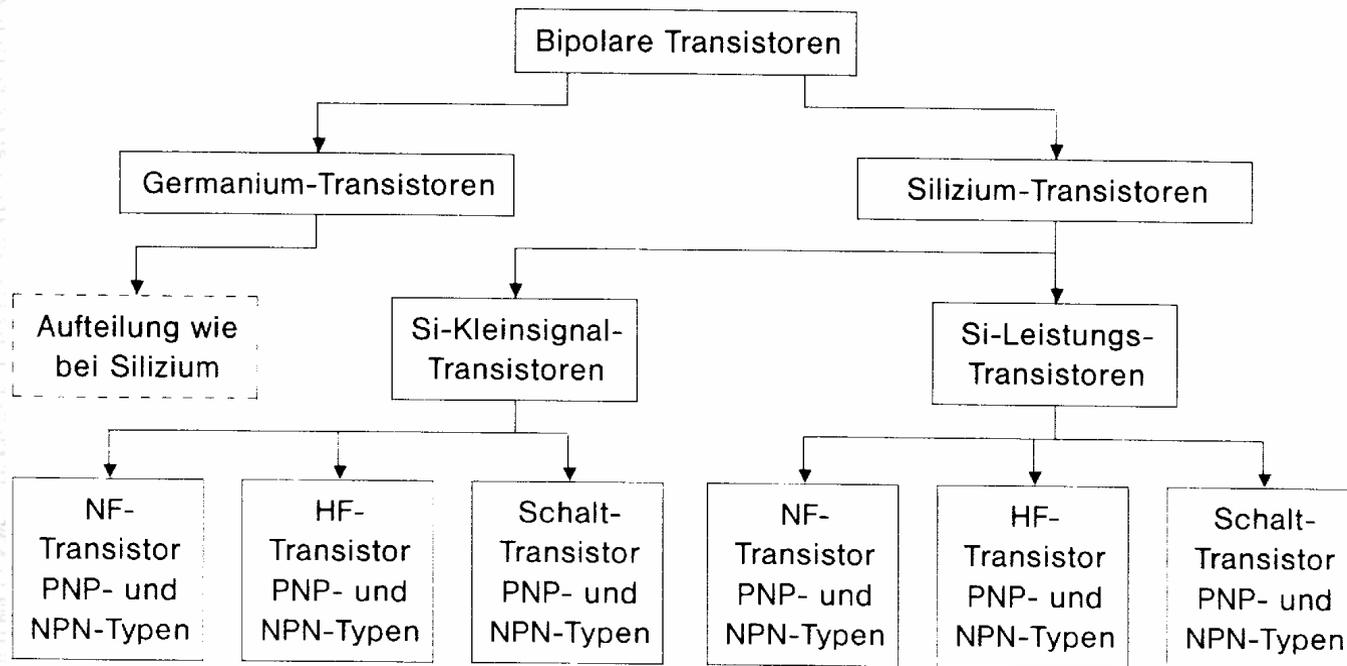


Bild 4.2 Bauarten von Transistoren

8.3 Transistor (iii)

- Die ersten Bipolaren Transistoren wurden nach dem Legierungsverfahren hergestellt. (siehe Diode)

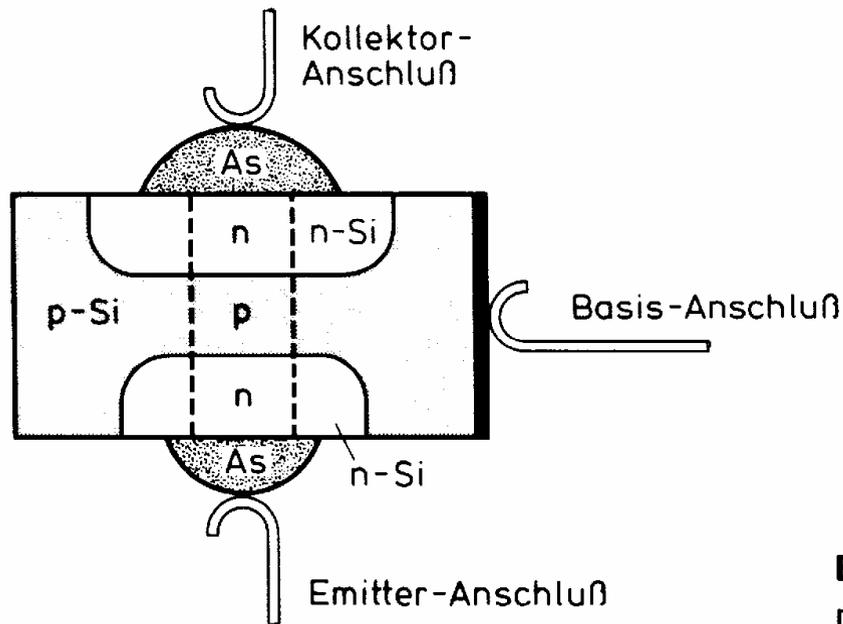
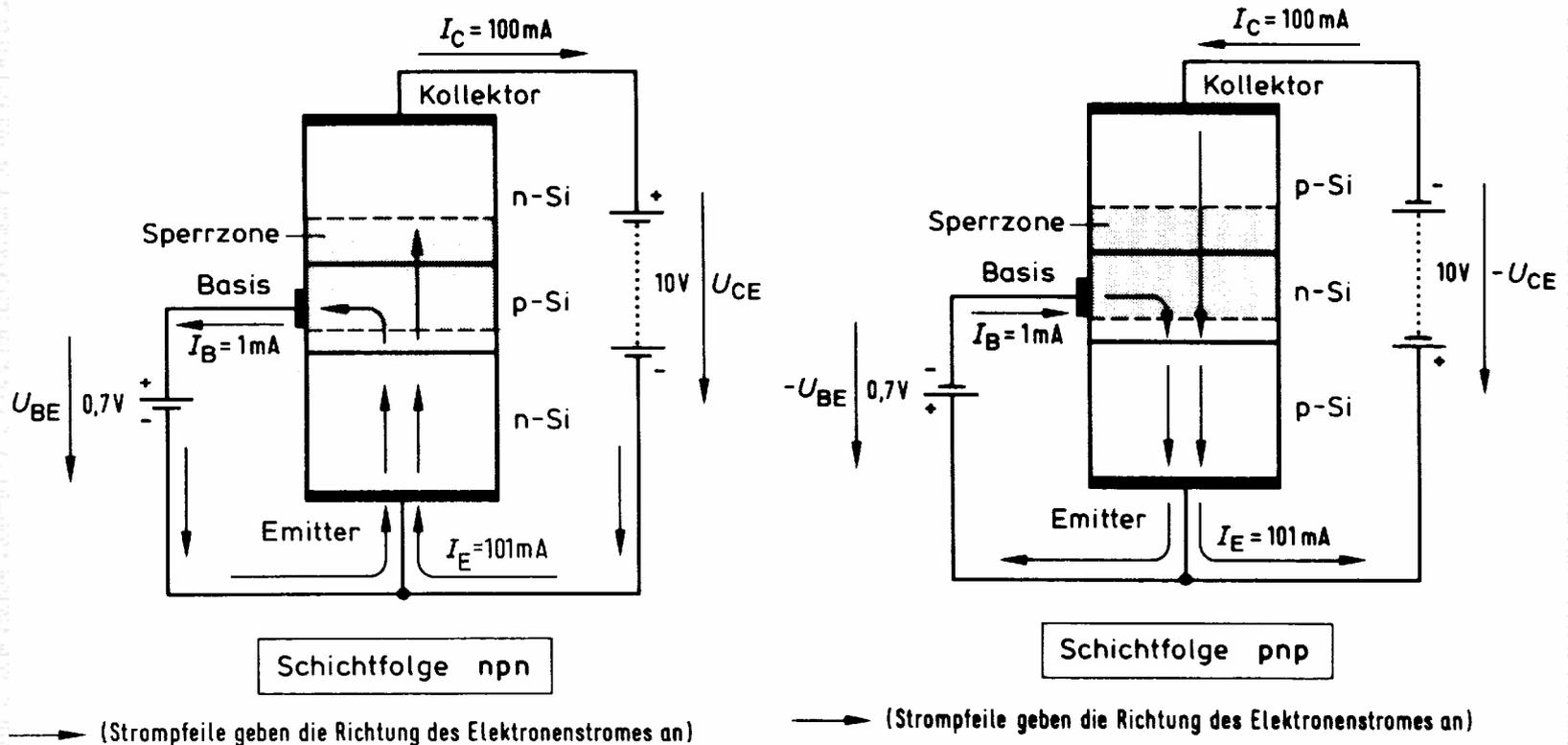


Bild 4.3 Herstellung eines NPN-Transistors nach dem Legierungsverfahren

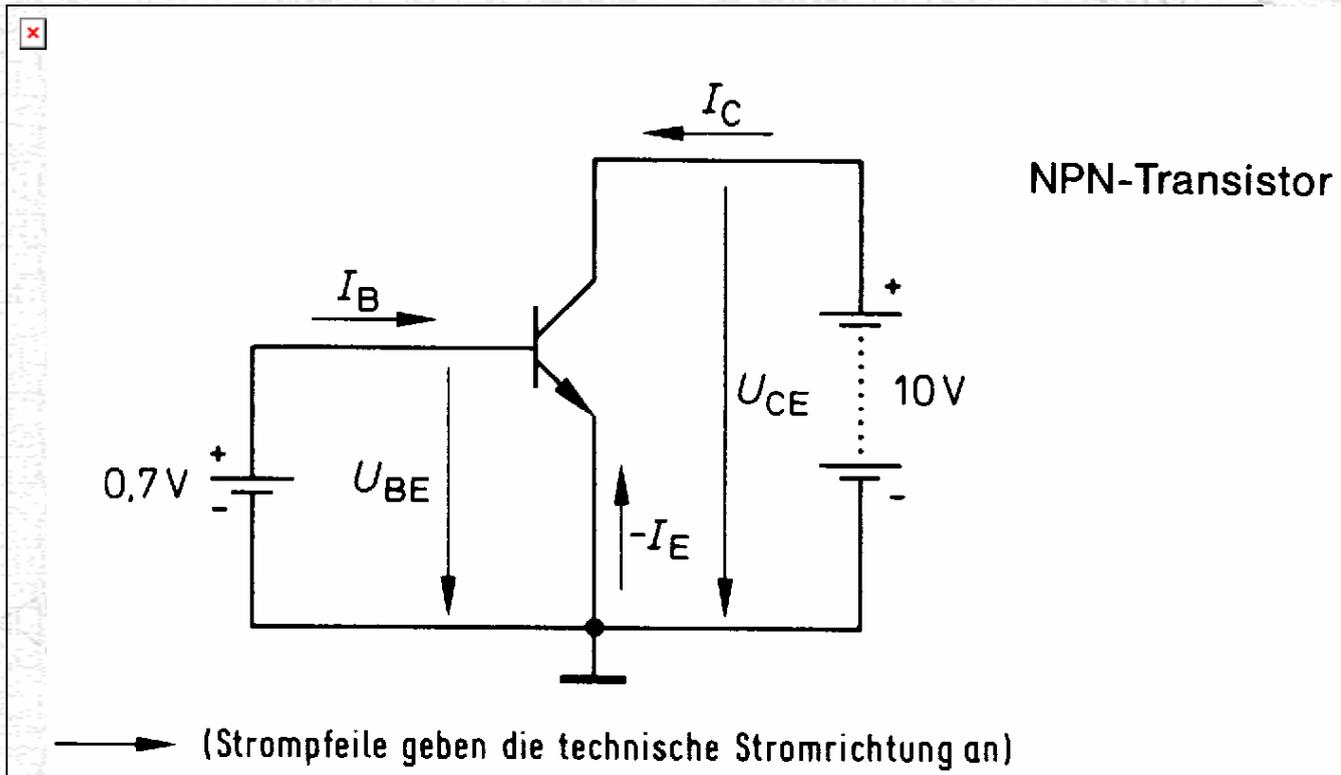
8.3 Transistor (IV)

■ Schematische Darstellung der Funktionsweise von Transistoren NPN, PNP



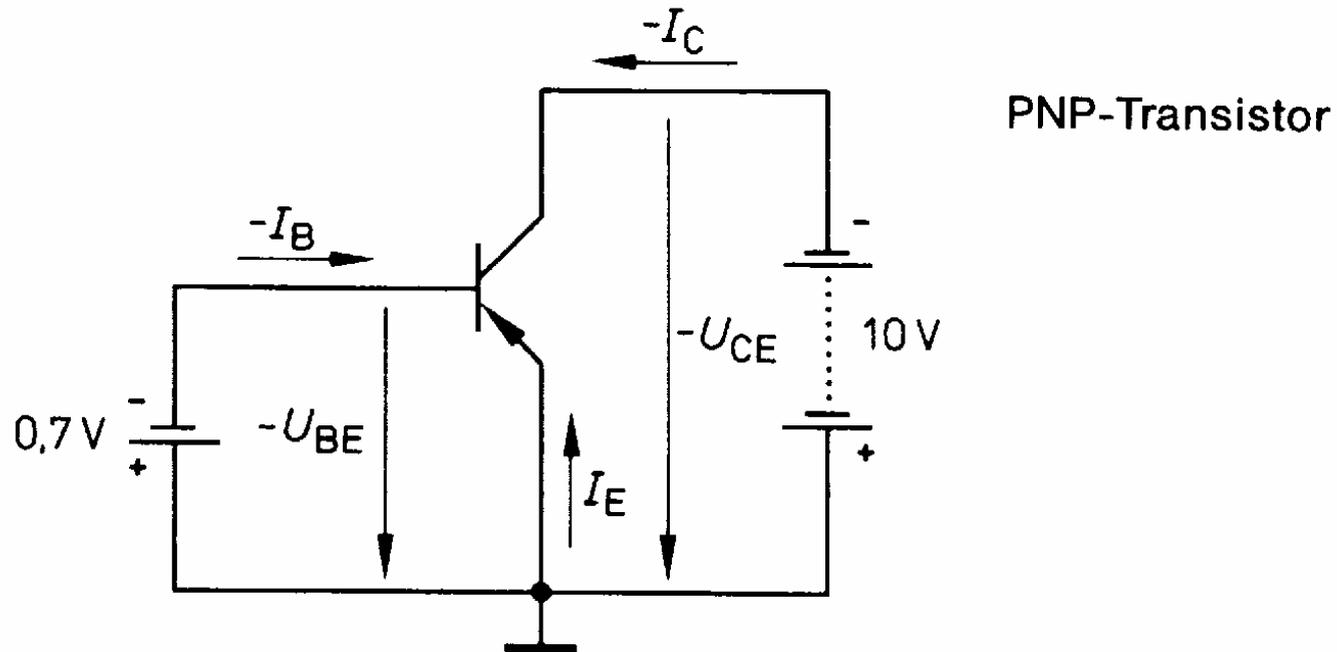
8.3 Transistor (V)

■ Betriebsspannungen und -ströme beim NPN-Transistor



8.3 Transistor (VI)

■ Betriebsspannungen und -ströme beim PNP-Transistor



→ (Strompfeile geben die technische Stromrichtung an)

8.3 Transistor (VII)

- Grundsätzlich gilt: Bei Transistoren läßt sich durch einen kleinen Basisstrom ein viel größerer Kollektorstrom steuern.
- Diese Eigenschaft bezeichnet man als Stromverstärkung.
- Typische Werte für die Stromverstärkung liegen im Bereich zwischen 100 und 300.

dynamischen Stromverstärkung $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

Gleichstromverstärkung $B = \frac{I_C}{I_B}$

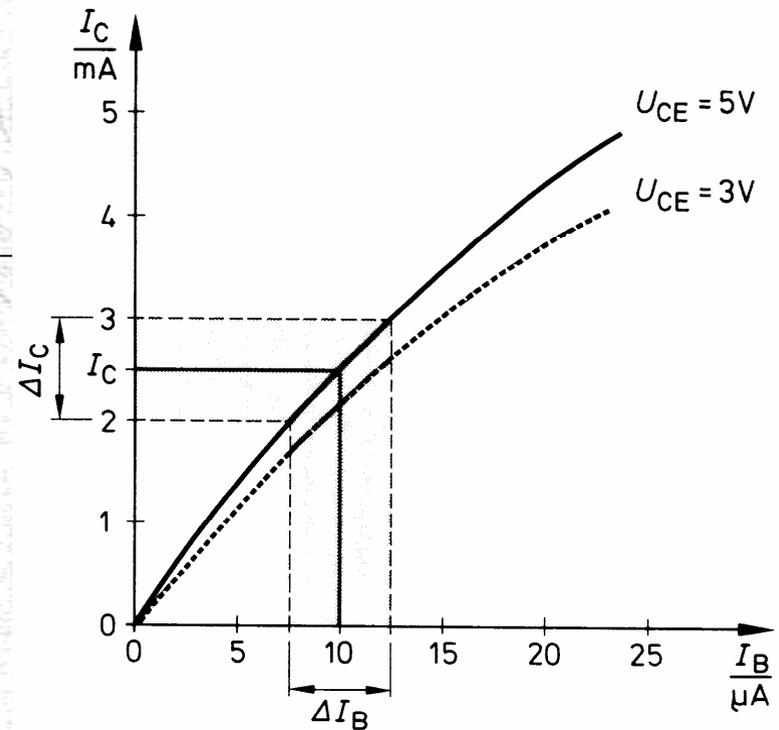
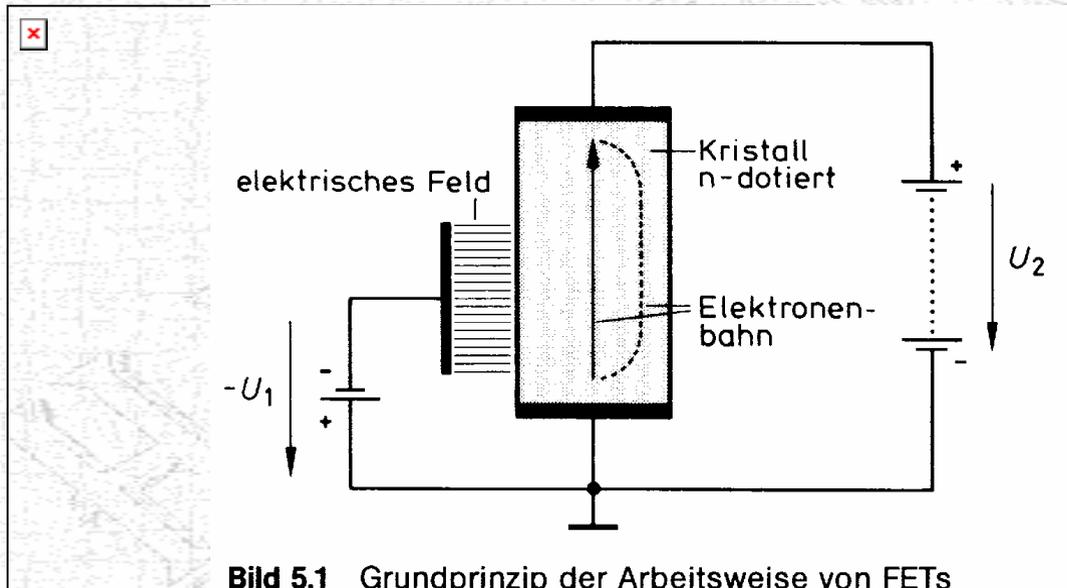


Bild 4.13 Stromverstärkungskennlinie

8.3 Transistor (VIII)

- Bei Feldeffekttransistoren (**FET's**) erfolgt die Steuerung des Stromflusses durch ein elektrisches Feld.
- Es wird zwischen den **Sperrschicht-FET's** und den **MOS-FET's** unterschieden (Metall-Oxide-Semiconductor)



8.3 Transistor (I X)

- **FET's (unipolare Transistoren) in unterschiedlichen Bauformen.**

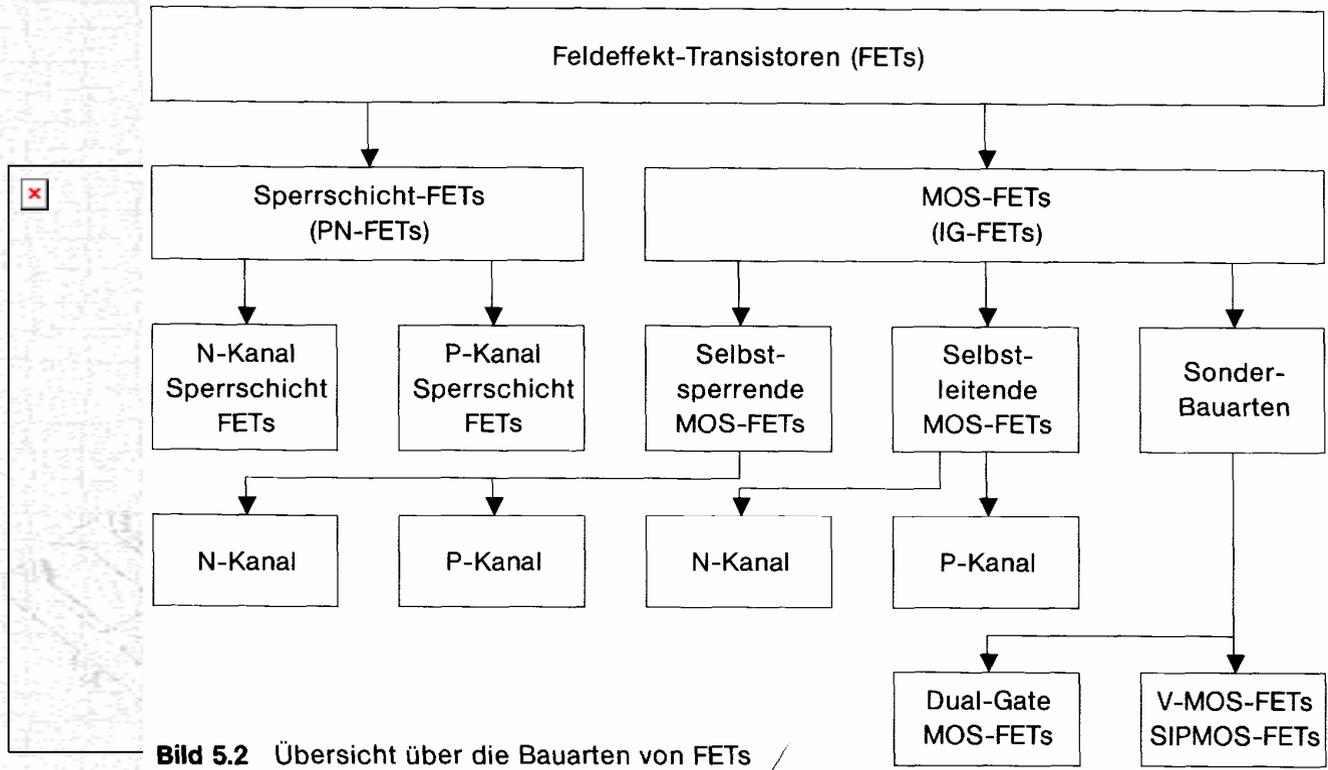


Bild 5.2 Übersicht über die Bauarten von FETs

8.3 Transistor (X)

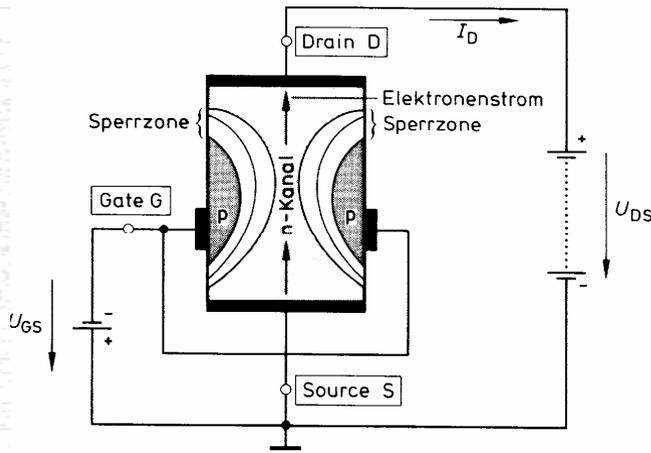
- **FET's (unipolare Transistoren) in unterschiedlichen Bauformen.**

Bezeichnung	N-Kanal-Typ	P-Kanal-Typ
Sperrschicht FETs		
Selbstleitende MOS-FETs		
Selbstsperrrende MOS-FETs		

Bild 5.3 Schaltzeichen für Feldeffekt-Transistoren

8.3 Transistor (XI)

- Sperrschicht - FET's arbeiten nach dem Prinzip der Kanalabschnürung.

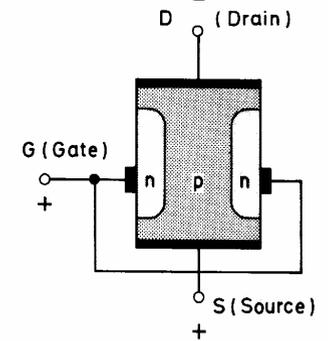
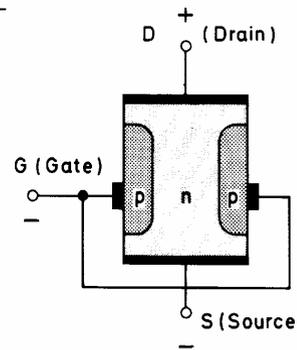


Sperrschicht-FET

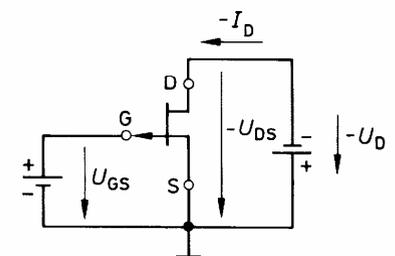
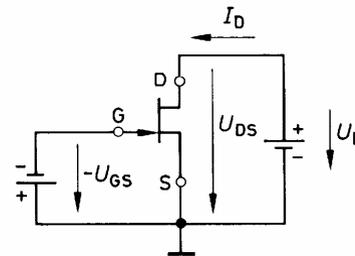
mit N-Kanal

mit P-Kanal

Schicht-
aufbau

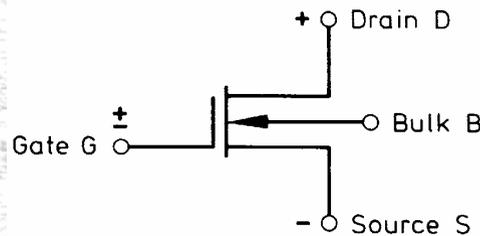
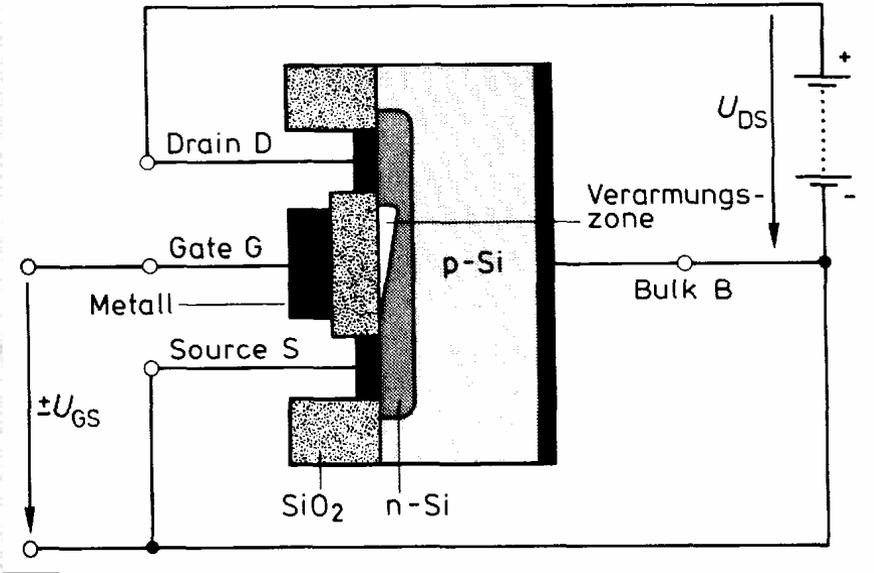


Schalt-
zeichen

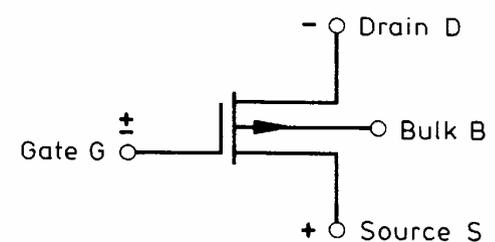


8.3 Transistor (XI I)

- Selbstleitende MOS-FET's** werden auch als **Verarmungstypen** bezeichnet und arbeiten ebenfalls nach dem **Prinzip der Kanaleinschnürung**.



N-Kanal-MOS-FET
(Verarmungstyp)



P-Kanal-MOS-FET
(Verarmungstyp)

Bild 5.24 Schaltzeichen für selbstleitende MOS-FETs

8.3 Transistor (XIII)

- **Selbstsperrende MOS-FET's** werden auch als **Anreicherungsstypen** bezeichnet.

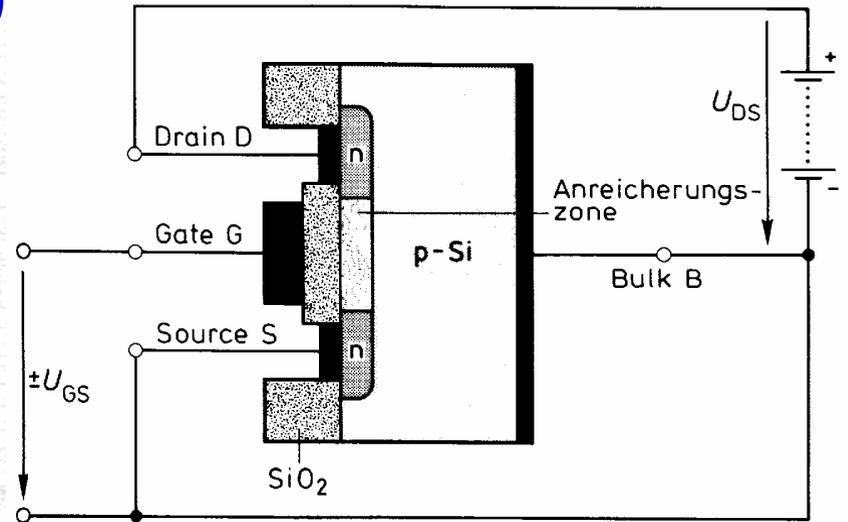


Bild 5.30 Aufbau eines selbstsperrenden N-Kanal-MOS-FETs

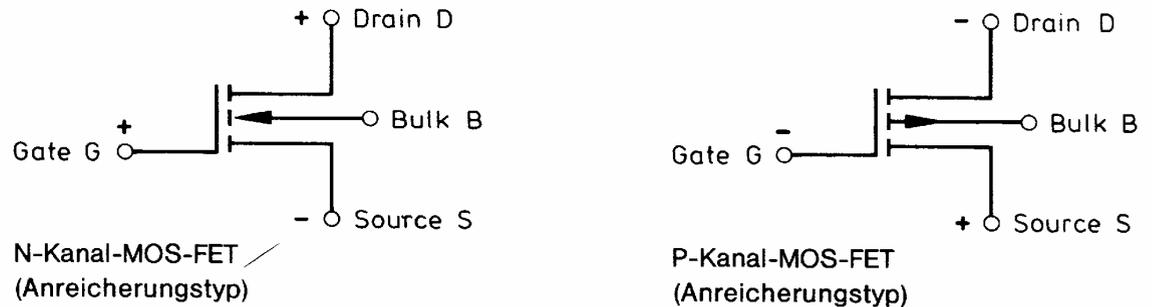
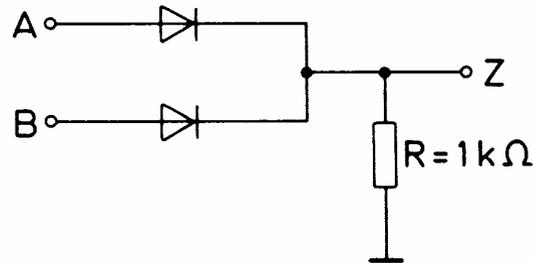


Bild 5.31 Schaltzeichen für selbstsperrende MOS-FETs

8.4 Einfache Grundschaltungen (i)

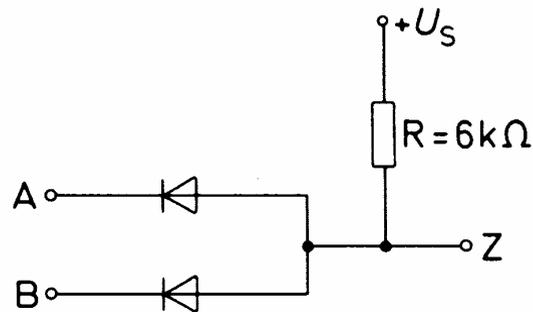
- Logische Bauelemente können mit diskreten Halbleitern aufgebaut werden.

Bild 6.28 DTL-Schaltung (ODER-Glied bei positiver Logik)



Fall	B	A	Z
1	L	L	L
2	L	H	H
3	H	L	H
4	H	H	H

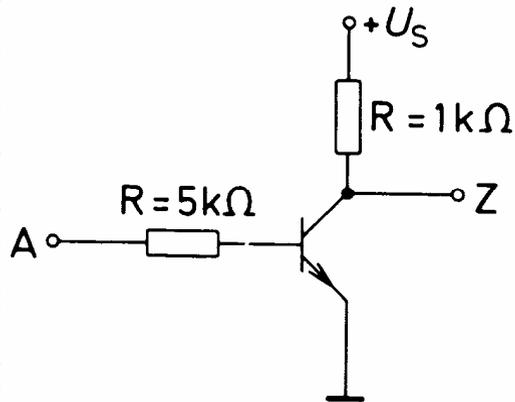
Bild 6.29 DTL-Schaltung (UND-Glied bei positiver Logik)



Fall	B	A	Z
1	L	L	L
2	L	H	L
3	H	L	L
4	H	H	H

8.4 Einfache Grundschaltungen (ii)

- **Logische Bauelemente können mit diskreten Halbleitern aufgebaut werden.**



Fall	A	Z
1	L	H
2	H	L

*Bild 6.30 DTL-Schaltung
(NICHT-Glied)*

9 Schaltkreisfamilien (i)

9.1 Schaltungseigenschaften

9.2 TTL-Schaltungen

9.3 CMOS-Schaltungen

- **Verknüpfungsglieder werden fast ausschliesslich aus Halbleitern aufgebaut.**
- **Verknüpfungsglieder mit gleichen Schaltungseigenschaften bilden eine Schaltkreisfamilie.**

9.1 Schaltungseigenschaften (i)

- **Die Schaltungseigenschaften von logischen Bauelementen werden in verschiedene Bereiche unterteilt:**
 - **Pegelbereiche und Übertragungskennlinie**
 - **Schaltzeiten**
 - **Lastfaktoren**
 - **Störsicherheit**

9.1 Schaltungseigenschaften (ii)

- Aus der Übertragungskennlinie kann der H- und L-Bereich abgelesen werden. (Signalpegel)

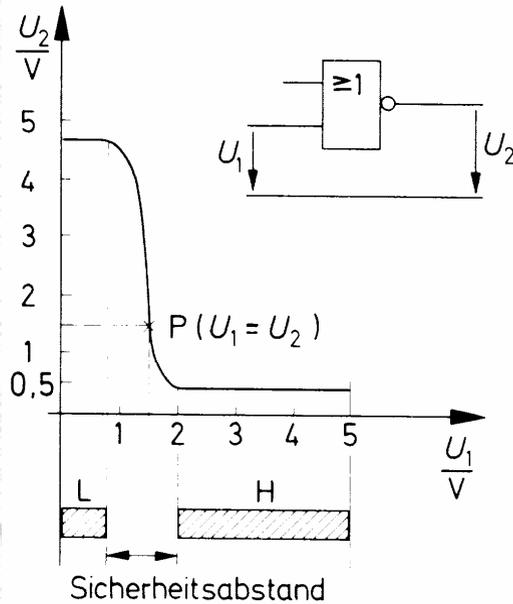


Bild 6.17 Übertragungskennlinie

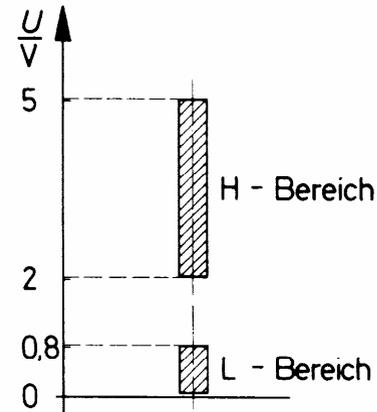


Bild 6.18 Pegelbereiche zur Übertragungskennlinie Bild 6.17

9.1 Schaltungseigenschaften (iii)

- Die Signallaufzeit ist die Impulsverzögerung zwischen Ein- und Ausgang beim Umschalten von L auf H.

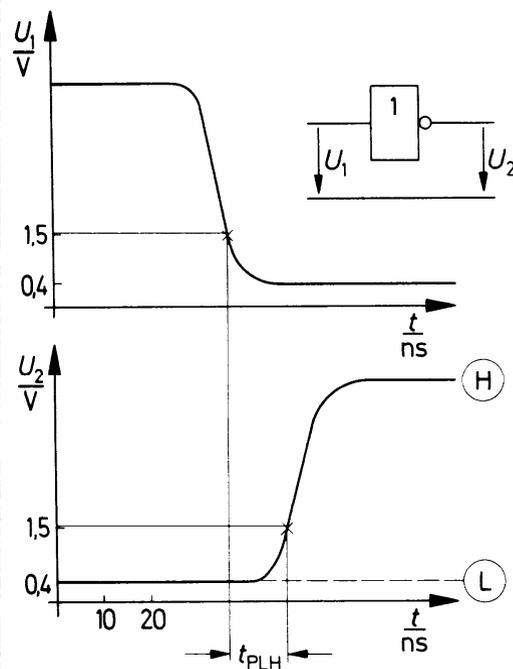


Bild 6.19 Signallaufzeit t_{PLH}

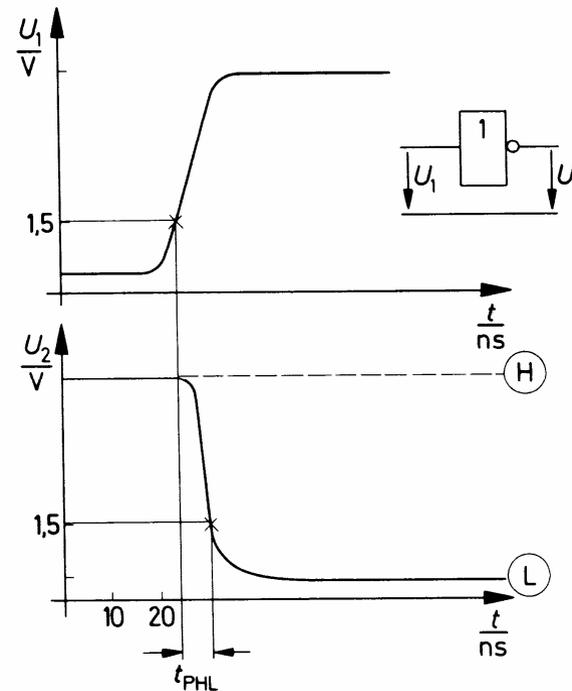


Bild 6.20 Signallaufzeit t_{PHL}

9.1 Schaltungseigenschaften (I V)

- Während der Signalübergangszeit ändert sich die Ausgangsspannung von 10% auf 90% des H- bzw. L-Pegels am Eingang.

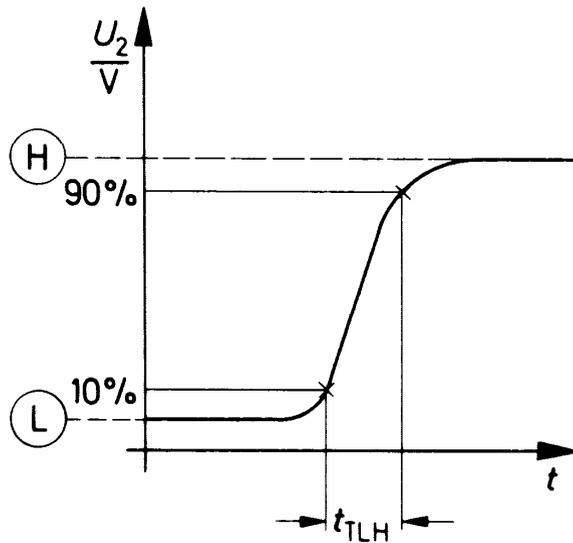


Bild 6.21 Signal-Übergangszeit t_{TLH}

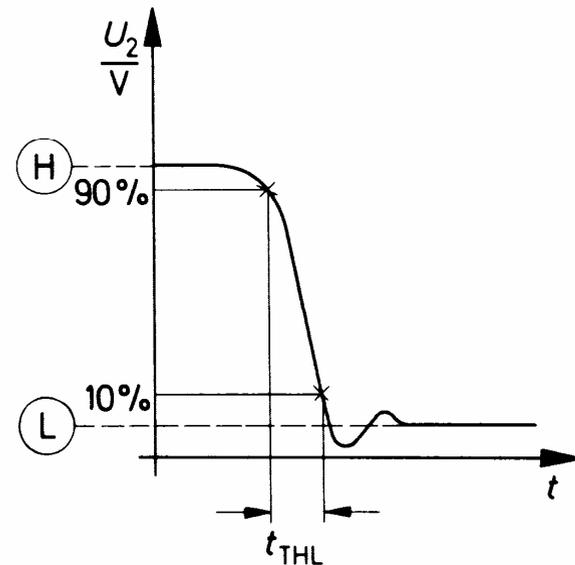


Bild 6.22 Signal-Übergangszeit t_{THL}

9.1 Schaltungseigenschaften (V)

- Beispiel: Typisches Schaltverhalten eines Transistors.

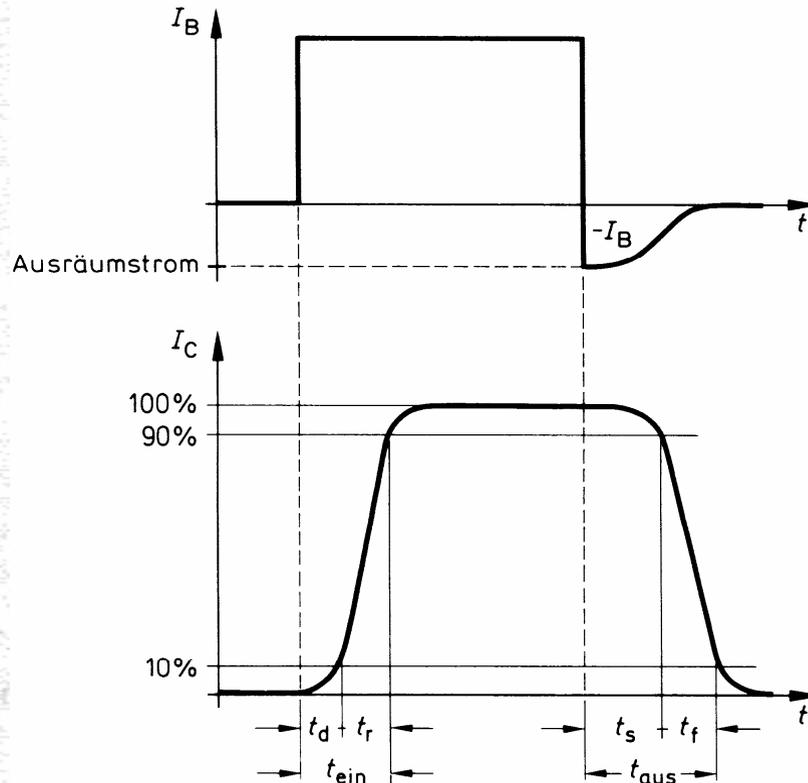


Bild 4.46 Schaltzeiten eines Transistors

9.2 TTL-Schaltungen (i)

- **TTL bedeutet Transistor-Transistor-Logik. TTL-Glieder werden ausschliesslich mit bipolaren Transistoren und als monolithisch integrierte Schaltungen gefertigt.**
- **Bei TTL-Schaltungen wirkt ein offener Eingang so, als läge er auf High-Pegel (5V).**

9.2 TTL-Schaltungen (ii)

- **Durch die Multi-Emitter-Technik entstehen an der gemeinsamen Basis räumlich voneinander getrennte PN-Übergänge.**

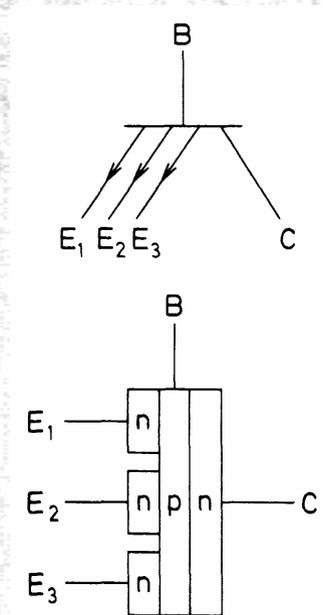


Bild 6.39 Multi-Emitter-Transistor

9.2 TTL-Schaltungen (iii)

■ NAND-Glied mit TTL-Technik

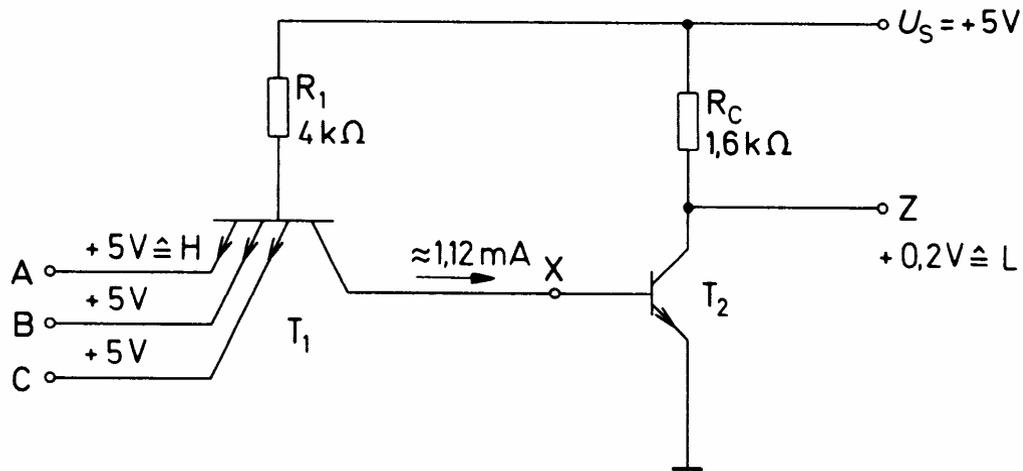


Bild 6.42 Einfaches TTL-Glied (NAND bei positiver Logik)

Fall	C	B	A	Z
1	L	L	L	H
2	L	L	H	H
3	L	H	L	H
4	L	H	H	H
5	H	L	L	H
6	H	L	H	H
7	H	H	L	H
8	H	H	H	L

Bild 6.43 Arbeitstabelle zur Schaltung Bild 6.42

9.2 TTL-Schaltungen (I V)

■ Unterfamilien der TTL-Glieder:

TTL-Unterfamilien	Standard-TTL	Low-Power-TTL	High-Speed TTL	Schottky-TTL	Low-Power-Schottky-TTL	Advanced Schottky-TTL	Advanced Low-Power-Schottky-TTL
Serienbezeichnung	74 00	74 L00	74 H00	74 S00	74 LS00	74 AS00	74 ALS00
Betriebsspannung	5 V	5 V	5 V	5 V	5 V	5 V	5 V
Leistungsaufnahme (je Glied)	10 mW	1 mW	23 mW	20 mW	2 mW	8 mW	1,2 mW
Signallaufzeit	10 ns	33 ns	5 ns	3 ns	9,5 ns	1,7 ns	4 ns
größte Schaltfrequenz	40 MHz	13 MHz	80 MHz	130 MHz	50 MHz	230 MHz	100 MHz
typischer Störabstand	1 V	1 V	1 V	0,5 V	0,6 V	0,4 V	0,5 V

9.3 CMOS-Schaltungen (i)

- **CMOS-Schaltglieder** benötigen eine extrem **geringe Leistung**.
- Integrierte Schaltungen lassen sich mit sehr **großer Integrationsdichte** herstellen und werden hauptsächlich als NAND - und NOR - Glieder produziert.
- Für gängige Bauteile werden ausschließlich **selbstsperrende MOS-FET's** verwendet.
- Bei der Verarbeitung von MOS-Bauteilen sind besondere Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, da diese sehr anfällig gegen **statische Aufladung** sind.

9.3 CMOS-Schaltungen (ii)

- **Selbstsperrende MOS-FET's als Inverter geschaltet.**

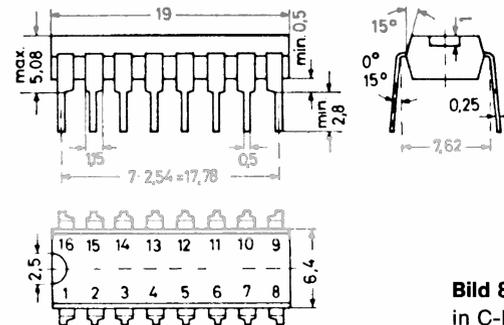
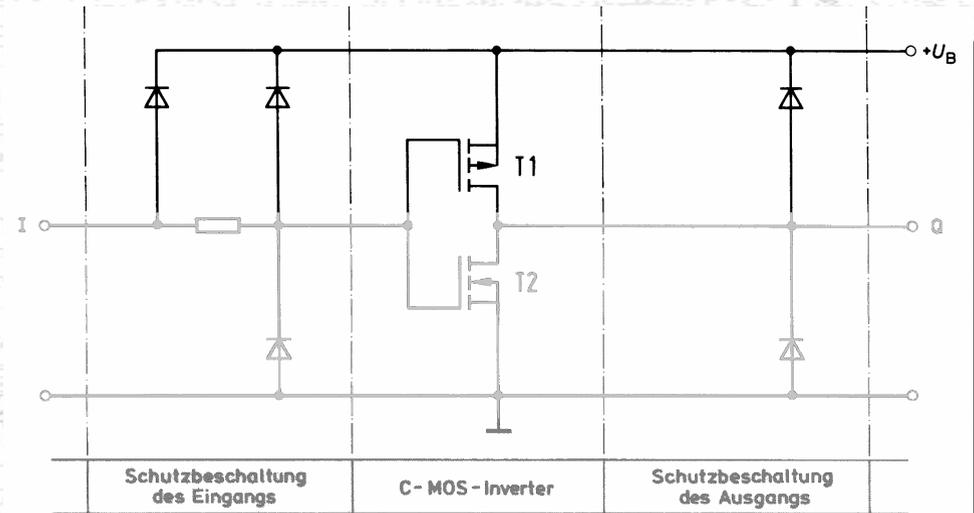


Bild 8.12 Schaltbild und Bauform eines Inverters in C-MOS-Technik vom Typ 4049

9.3 CMOS-Schaltungen (iii)

- Beim **CMOS-NICHT-Glied** ist stets ein Transistor gesperrt und der andere durchgesteuert.

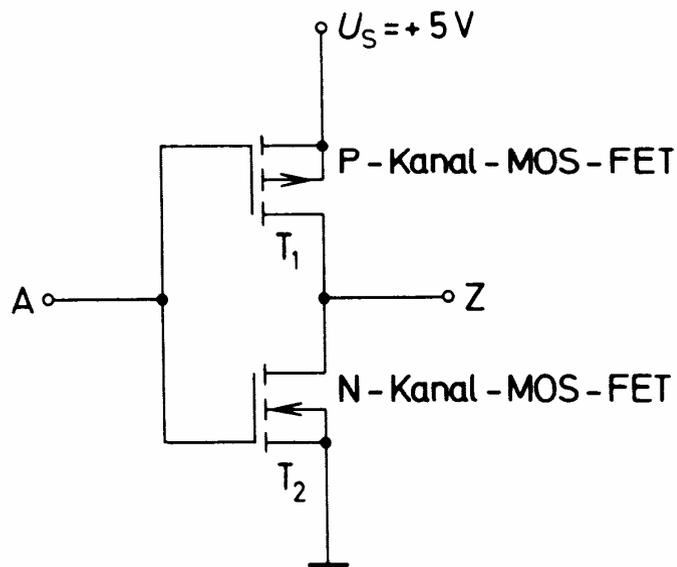


Bild 6.91 Schaltung eines CMOS-NICHT-Gliedes

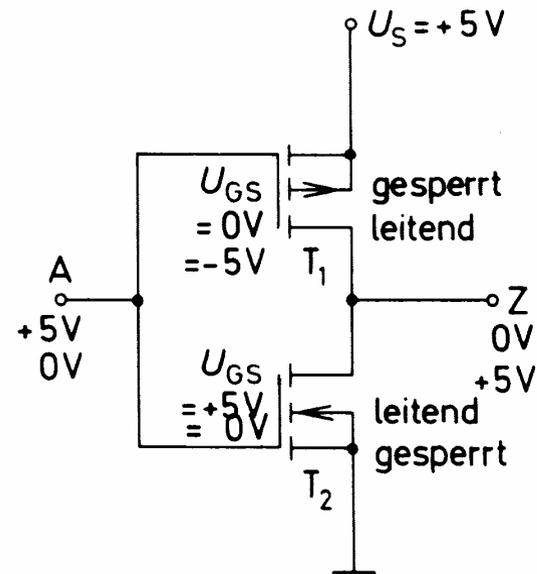
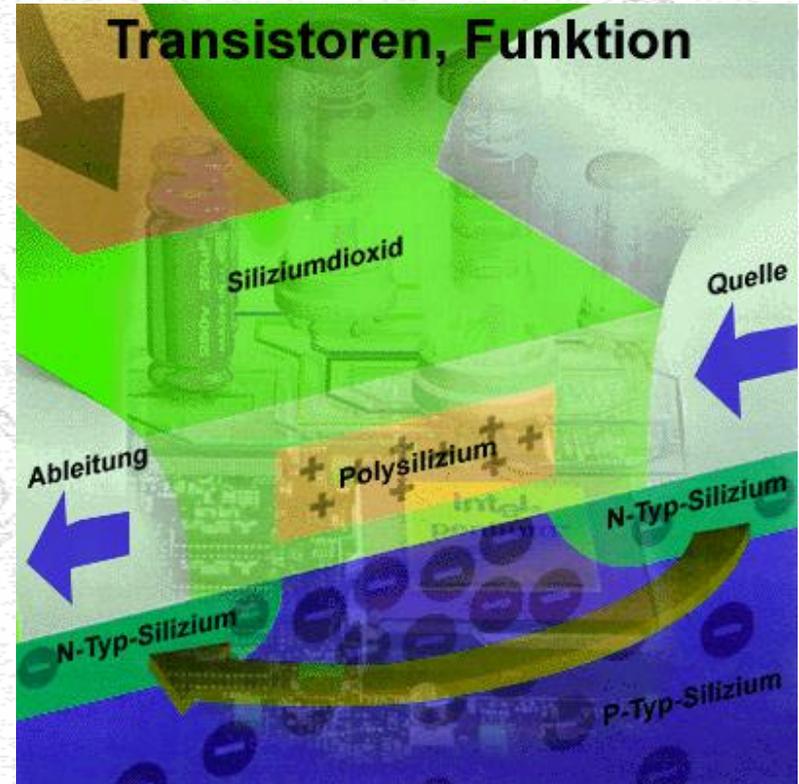
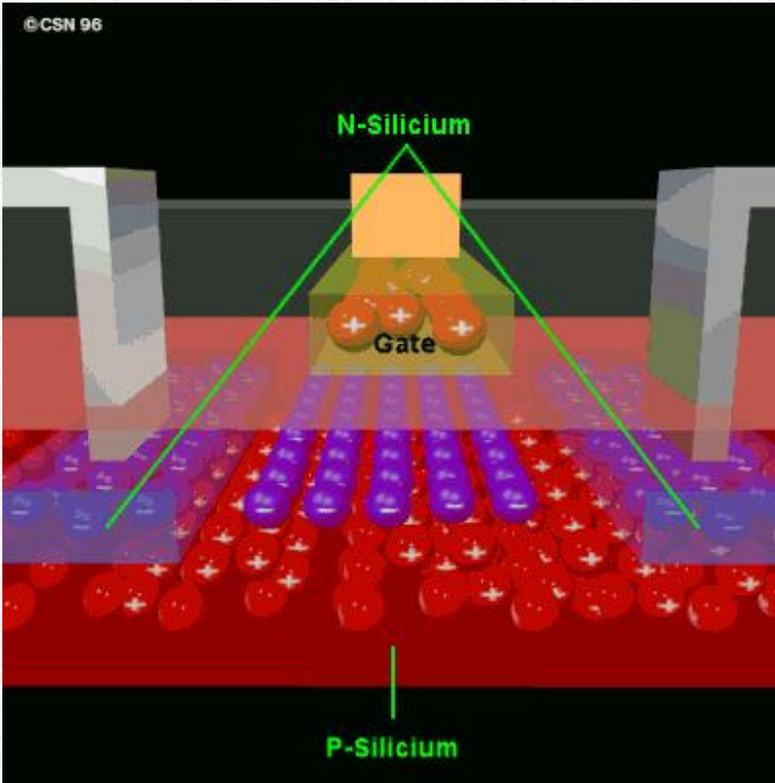
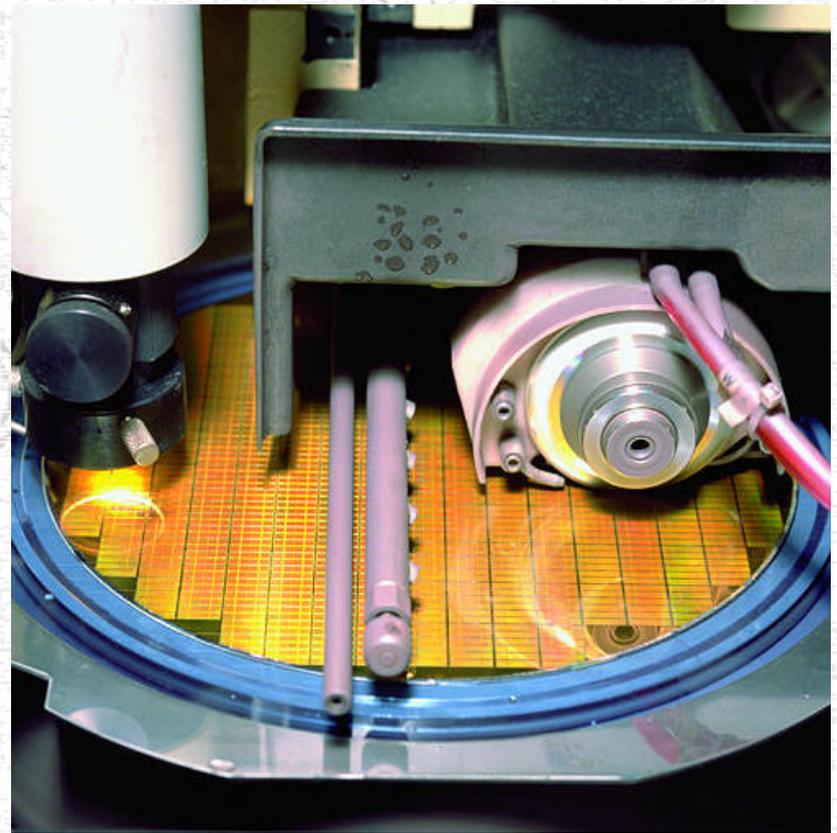
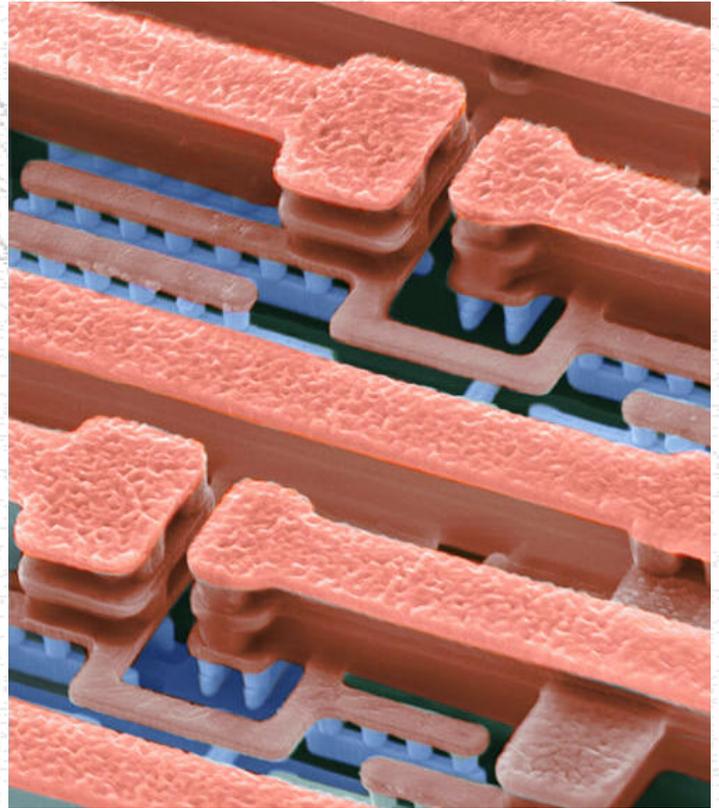
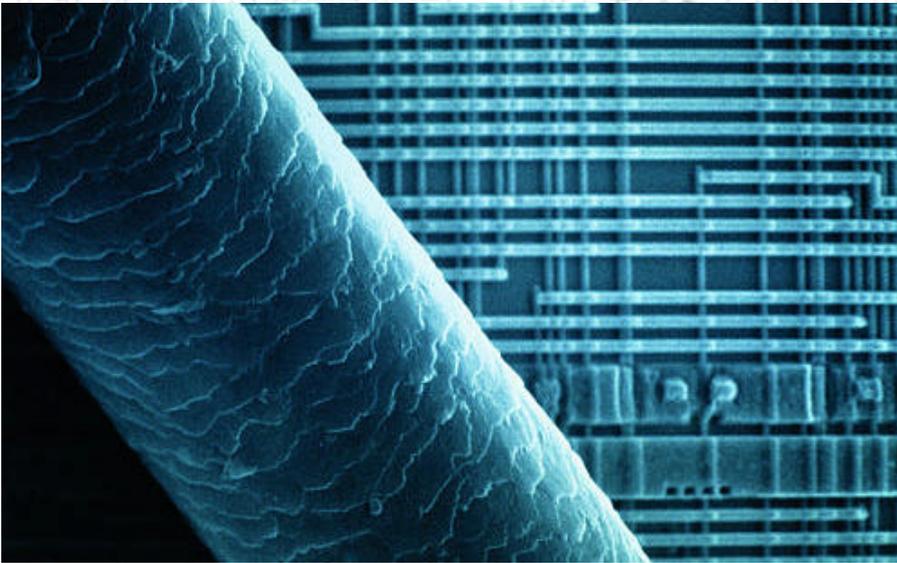
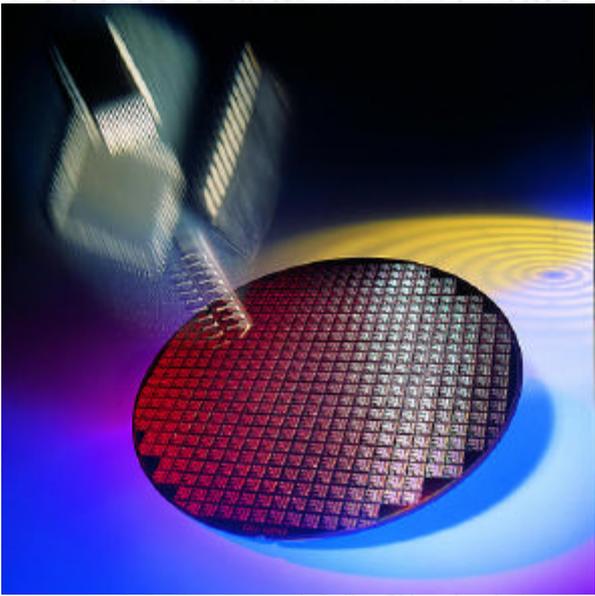


Bild 6.92 Arbeitsweise eines CMOS-NICHT-Gliedes



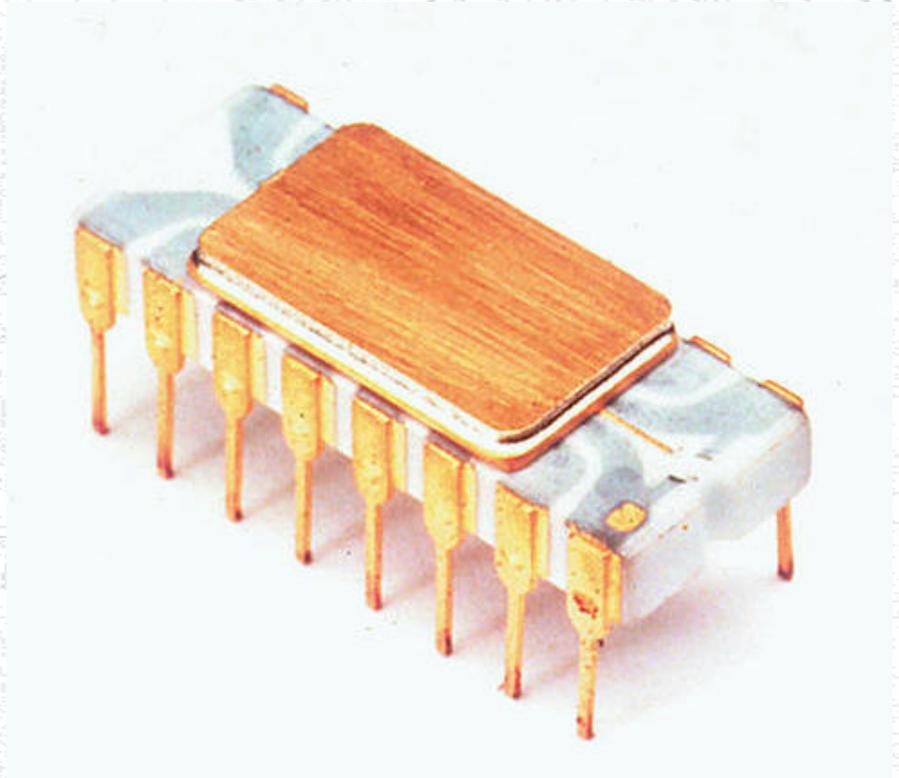
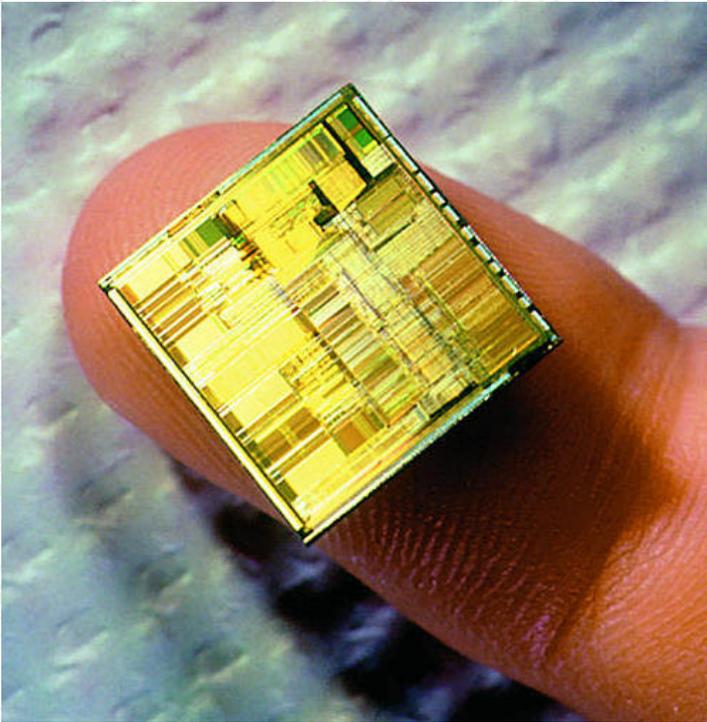
2 Chipherstellung

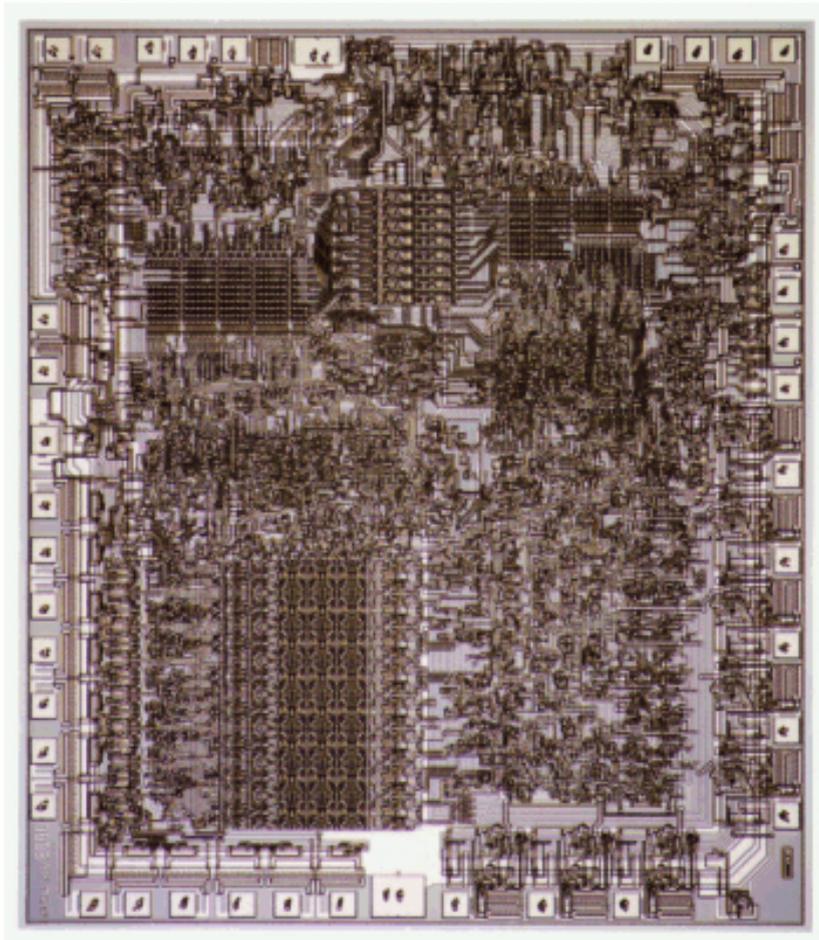




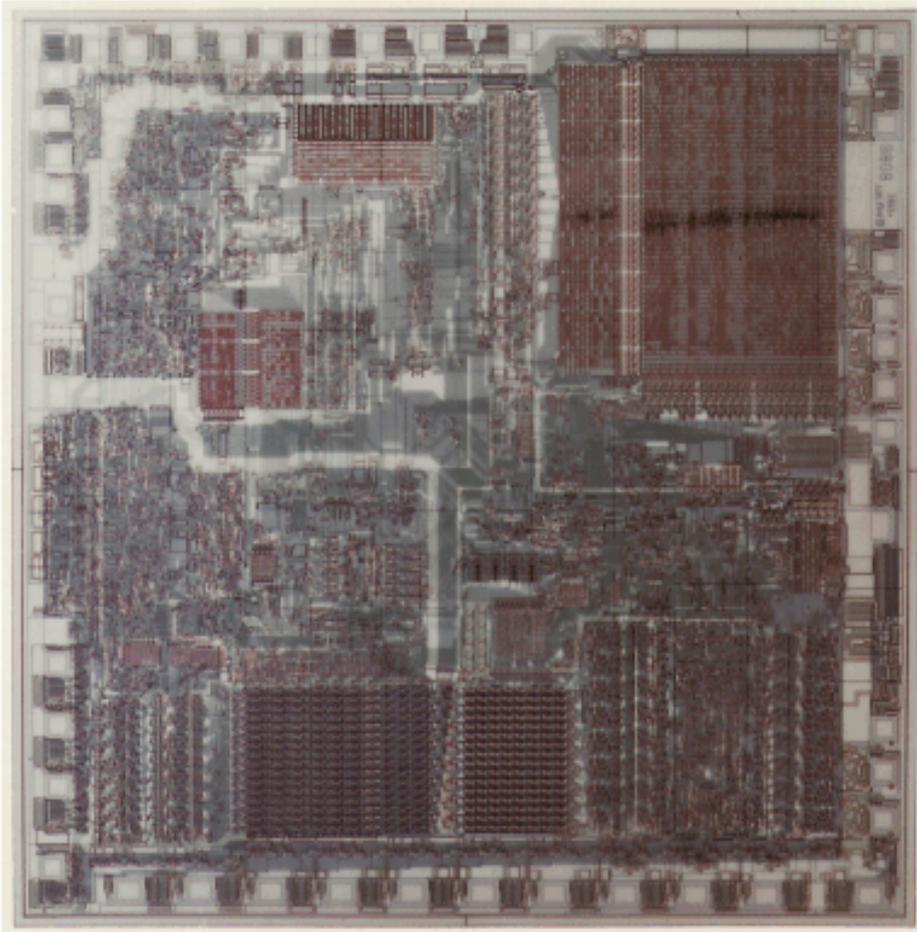
Hardware

3 Beispiele



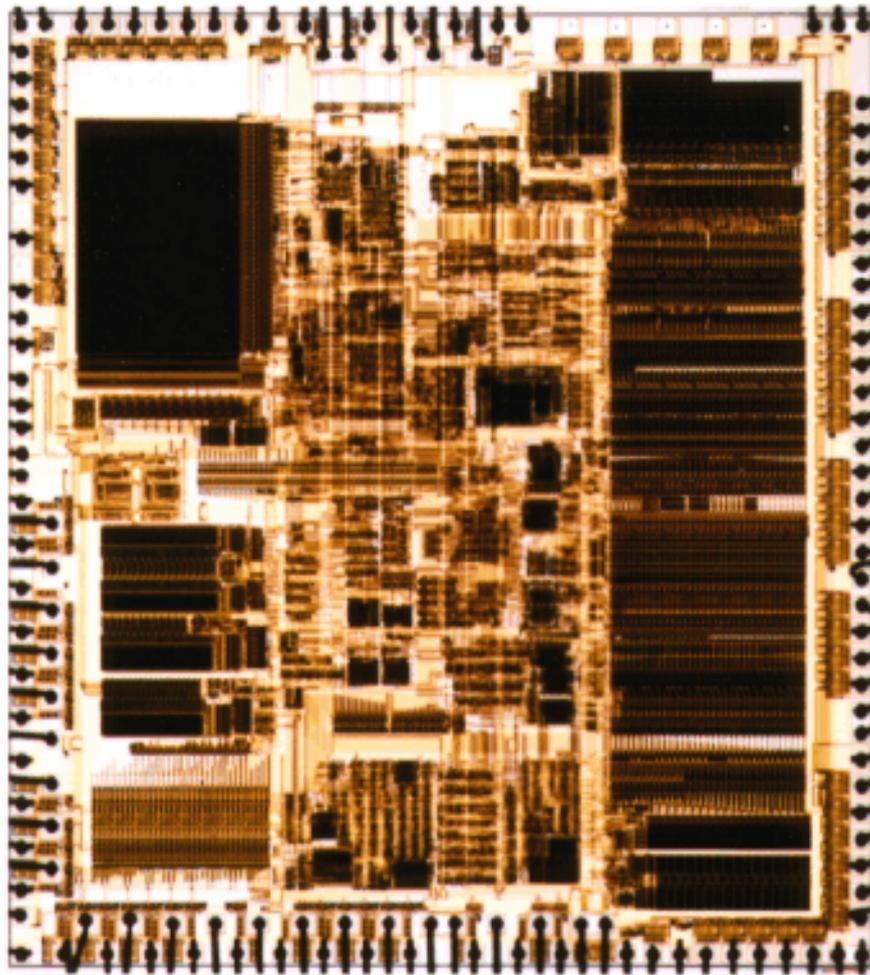


● Intel 8080

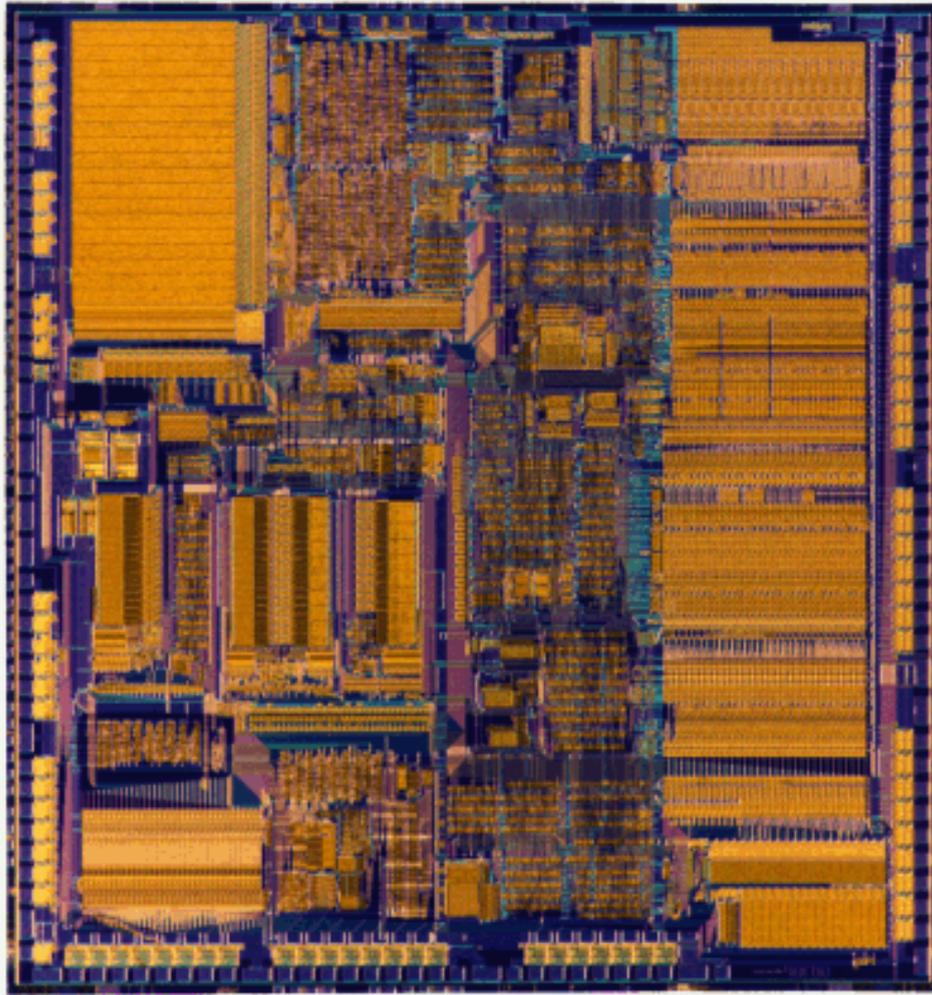


● Intel 8088

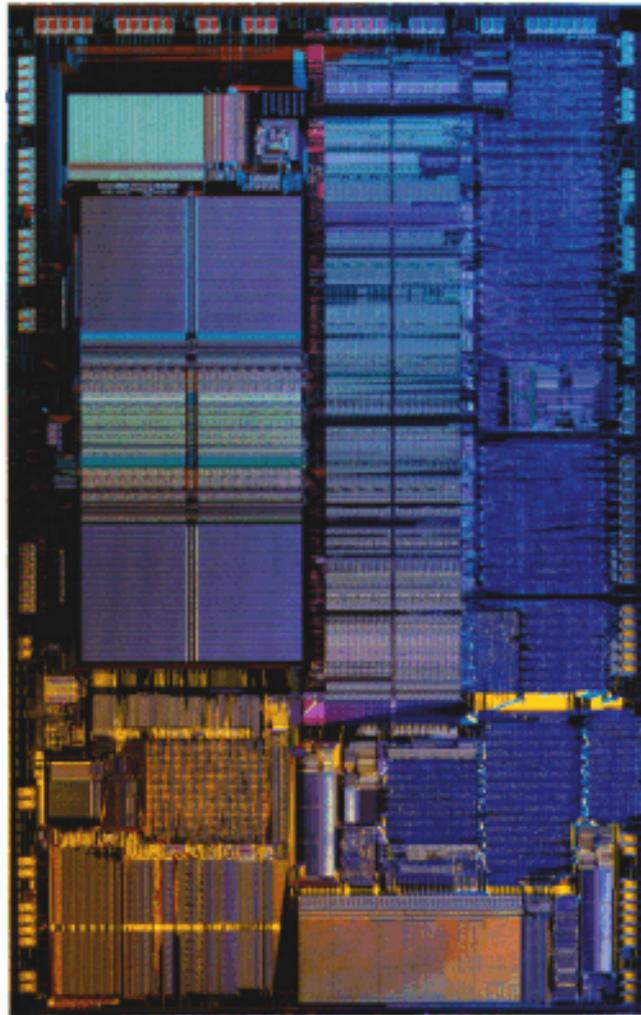
Hardware



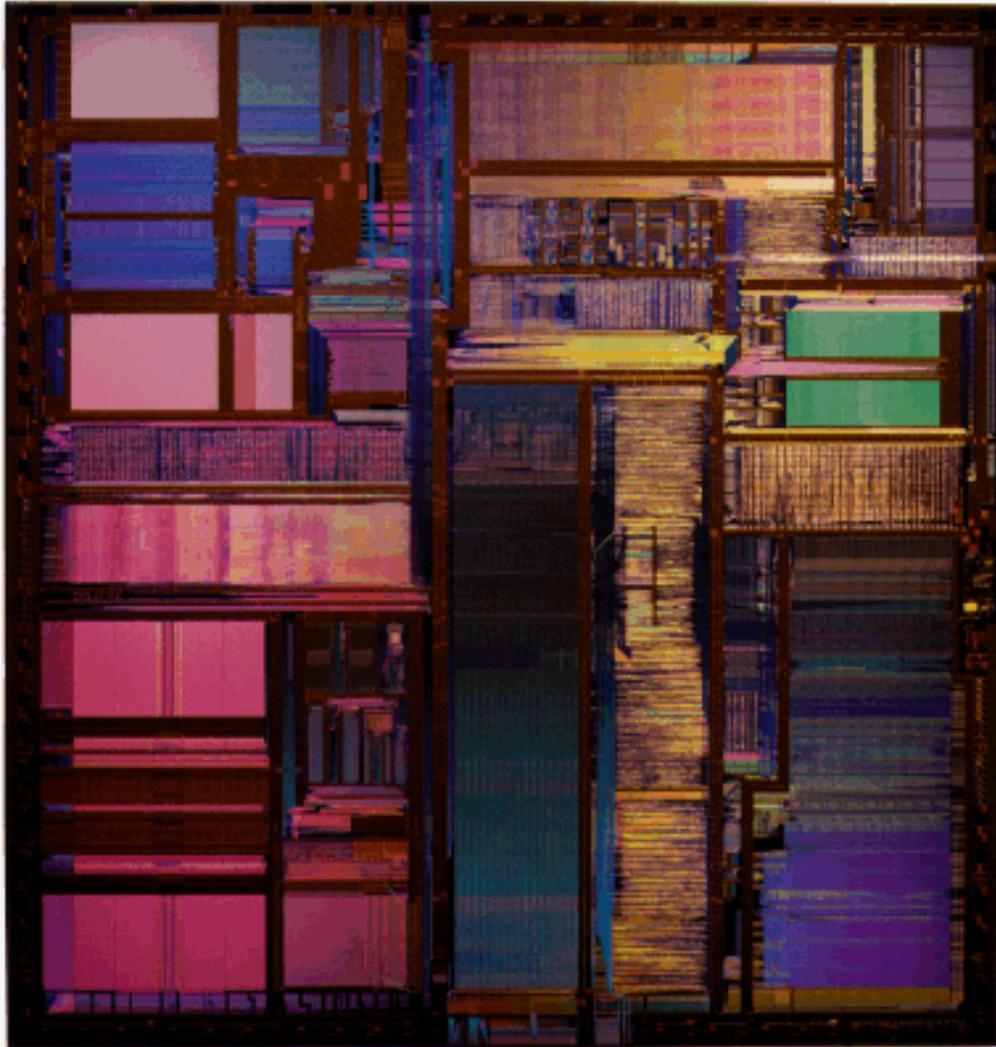
● Intel 80286



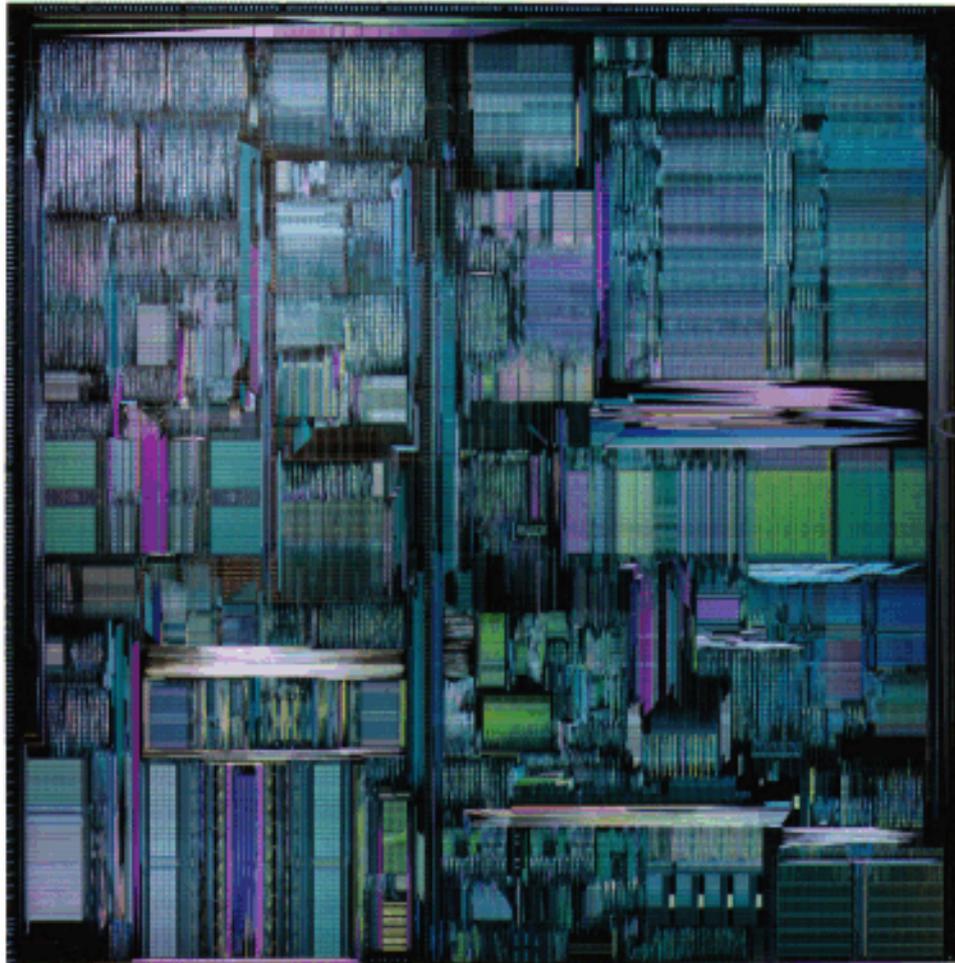
● Intel 80386



● Intel 80486



● Intel 80586



● Intel 80686

Hardware

Mikroprozessor

Mikroprozessor

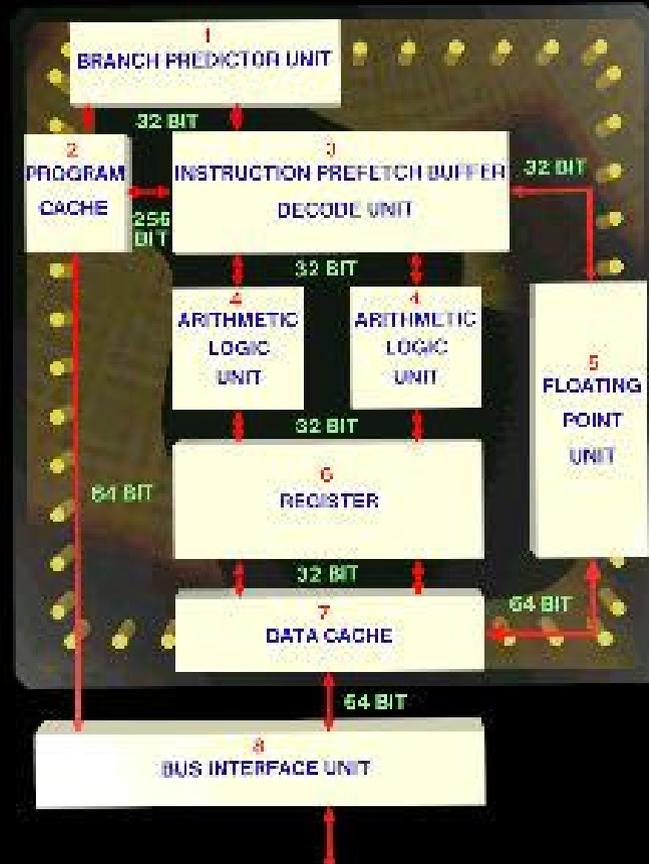
Register

Arithmetisch-
logische
Einheit

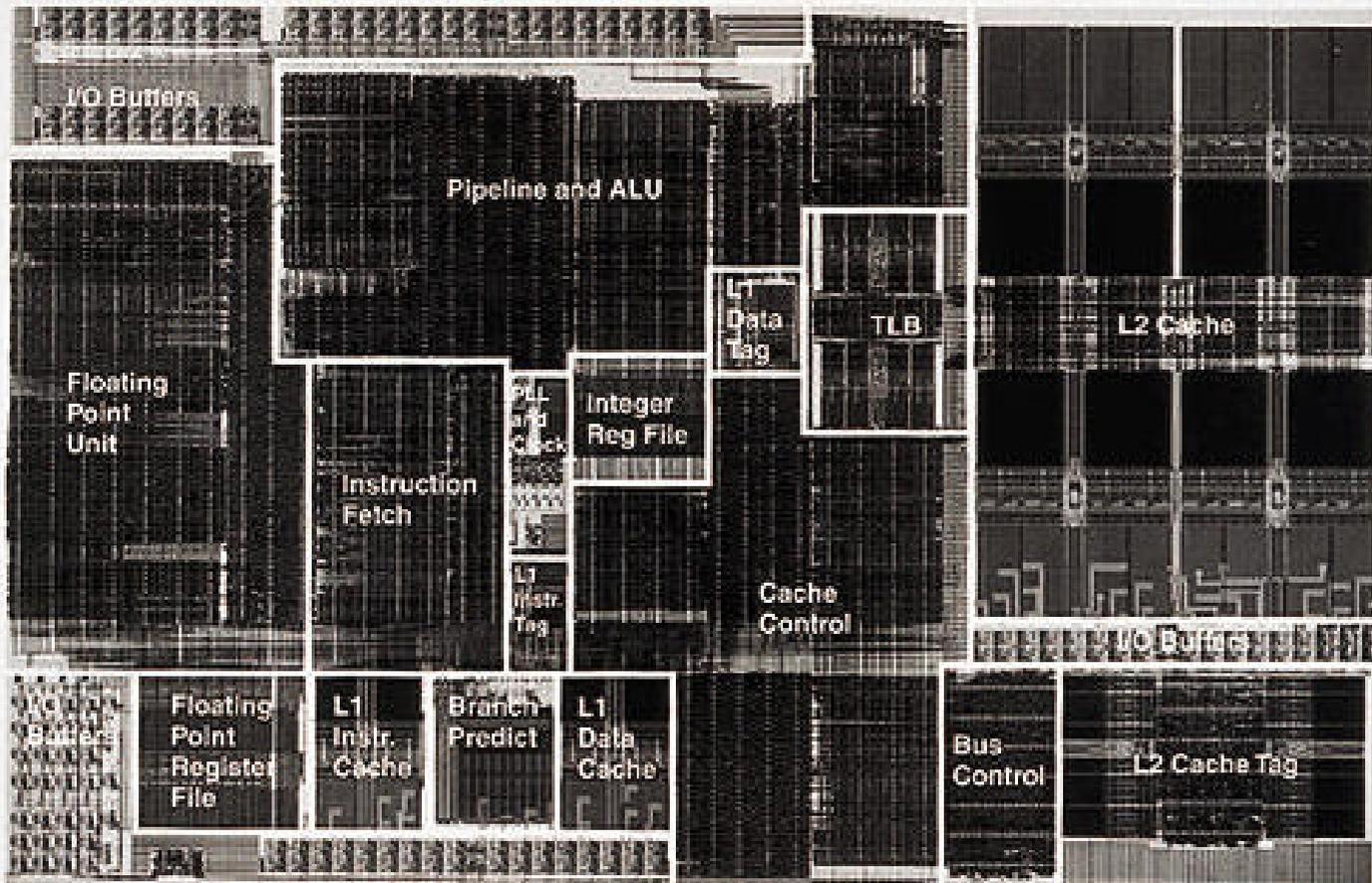
Steuereinheit

CSN 86

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 BRANCH PREDICTOR UNIT (BPU) | - VERZWEIGUNGSVORHERSAGEEINHEIT |
| 2 PROGRAM CACHE | - PROGRAMMSPEICHER |
| 3 INSTRUCTION PREFETCH BUFFER (IPB) | - PUFFER FÜR DIE VORZEITIG GEHÖLTEN BEFEHLE UND DEKODIERUNGSEINHEIT |
| 4 ARITHMETIC LOGIC UNIT (ALU) | - RECHNER UND STEUEREINHEIT |
| 5 FLOATING POINT UNIT | - GLEITKOMMAEINHEIT |
| 6 REGISTER | - PROZESSOR INTERNE ZWISCHENSPEICHER |
| 7 DATA CACHE | - DATENSPEICHER |
| 8 BUS INTERFACE UNIT (BIU) | - SCHNITTSTELLE ZUM BUSSYSTEM |

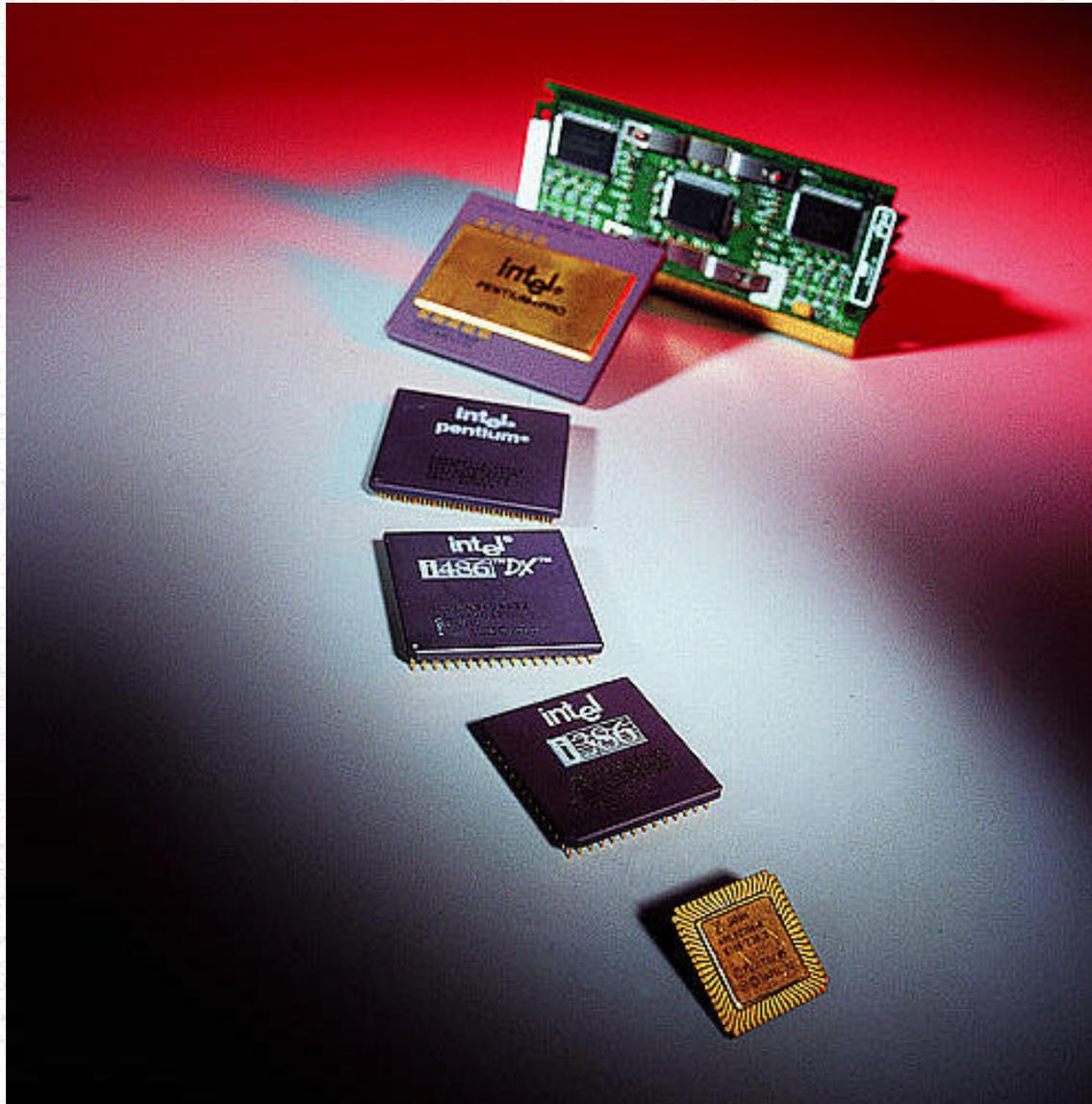


Hardware



● Pentium Pro

Hardware



Hardware

Die INTEL-Mikroprozessorfamilie

Typ	Jahr	Adreß-bus	externer Datenbus	Sonstiges
8008	1969		8 Bit	Erster kommerziell hergestellter 8-Bit-Mikroprozessor. Wurde 1971 als programmierbarer Logikbaustein angeboten
8080	1973	16 Bit	8 Bit	Verbesserter Nachfolger des 8008. Erster echter Mikroprozessor.
8085	1976	16 Bit	8 Bit	Verbesserter 8080 mit internem Taktgenerator, interner Steuereinheit und zusätzlichen Funktionen.
8086	1978	20 Bit	16 Bit	
80186		20 Bit	16 Bit	Weiterentwicklung des 8086
8088	1979	20 Bit	8 Bit	8086 mit halber Datenbusbreite. Ab 1981 von IBM in Personalcomputern (PC/XT) eingesetzt.
80188		20 Bit	8 Bit	Weiterentwicklung des 8088
80286	1982	24 Bit	16 Bit	Im "Real Mode" vollkommen kompatibel zum 8086. Im "Protectet Mode" 16 MB Arbeitsspeicher adressierbar. Einsatz in AT-Personalcomputern.
80386	1985	32 Bit	32 Bit	
80386 SX	1987	24 Bit	16 Bit	Abgemagerte Version des 80386. Busanordnung entspricht der des 80286
80386 SL				80386 SX-Variante für Einsatz in Notebooks
80486 DX	1989	32 Bit	32 Bit	Vom Prinzip 80386 DX mit integriertem Coprozessor, Cache-Controller und Cache.
80486 DX2		32 Bit	32 Bit	80486 DX mit doppelter interner Taktfrequenz
80486 SL				80486 DX-Variante für Einsatz in Notebooks
80486 SX	1990	32 Bit	32 Bit	80486 ohne integrierten Coprozessor
80486 SLC2	1992			80486 SX-Variante für Einsatz in Notebooks
80486 DX4	1994	32 Bit	32 Bit	80486 DX mit doppelter oder dreifacher int. Taktfrequenz und einigen weiteren Verbesserungen.
PENTIUM		32 Bit	64 Bit *	

Prozessor	Register- breite	Adreßbus breite	Datenbus breite	Adreßraum	Takt- frequenz
8088	16 Bits	20 Bits	8 Bits	1 MByte	6..10 MHz
8086	16 Bits	20 Bits	16 Bits	1 MByte	6..10 MHz
80188	16 Bits	20 Bits	8 Bits	1 MByte	6..16 MHz
80186	16 Bits	20 Bits	16 Bits	1 MByte	6..16 MHz
80286	16 Bits	24 Bits	16 Bits	16 MByte	12..20 MHz
i386SX	32 Bits	24 Bits	16 Bits	16 MByte	16..25 MHz
i386DX	32 Bits	32 Bits	32 Bits	4 GByte	16..40 MHz
i486	32 Bits	32 Bits	32 Bits	4 GByte	25..50 MHz
i486DX2	32 Bits	32 Bits	32 Bits	4 GByte	50..66 MHz
i486SX/i487SX	32 Bits	32 Bits	32 Bits	4 GByte	25 MHz
Pentium	32 Bits	32 Bits	64 Bits	4 GByte	60..66 MHz

to be continued...



Hardware