
Technische Informatik I

Elektrotechnische Grundlagen

Prof. Dr. U. Keschull
Technische Informatik
keschull@informatik.uni-leipzig.de

Übersicht

- Geschichtliche Übersicht
- Physikalische Grundlagen
 - ⇒ Elektrische Ladung
 - ⇒ Gleichstrom, Ohmsches Gesetz, Kirchhoffsche Gesetze
 - ⇒ Elektromagnetisches Feld
 - ⇒ Wechselstromkreis
 - ⇒ Schaltvorgänge
- Halbleitertechnologie
 - ⇒ Dioden
 - ⇒ Bipolare und FET- Technologie
 - ⇒ NMOS- und CMOS-Schaltkreise
 - ⇒ Der Transistor als Schalter
 - ⇒ CMOS-Grundsaltungen
 - ⇒ PLA
 - ⇒ Herstellung elektronischer Schaltungen

Übersicht

- Schaltnetze
 - ⇒ Boolesche Algebren
 - ⇒ Normalformen
 - ⇒ Darstellung Boolescher Funktionen
- Minimierung von Schaltnetzen
 - ⇒ KV-Diagramme
 - ⇒ Minimierung nach Quine MC-Cluskey
 - ⇒ Bündelminimierung
- Speicherglieder
 - ⇒ RS-Flipflop
 - ⇒ D-Flipflop
 - ⇒ JK-Flipflop
 - ⇒ T-Flipflop

Übersicht

- Schaltwerke
 - ⇒ Darstellung endlicher Automaten
 - ⇒ Minimierung der Zustandszahl
 - ⇒ Zustandskodierung
- Spezielle Schaltnetze und Schaltwerke
 - ⇒ Multiplexer, Demultiplexer, Addierer
 - ⇒ Register, Schieberegister, Zähler

Literatur

Die Vorlesung basiert auf den beiden Lehrbüchern:

- R.J. Smith, R.C. Dorf: "Circuits, Devices and Systems" 5. Auflage, John Wiley & Sons (1992)
- W. Schiffmann, R. Schmitz: "Technische Informatik 1 Grundlagen der digitalen Elektronik." Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag (1992).

Weitere Empfehlungen:

- Hütte: "Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften." 29. Auflage, Springer (1992).
Die "Hütte" ist ein sehr empfehlenswertes Nachschlagewerk für die Gebiete Mathematik, Physik und Technische Informatik

Historischer Überblick

- Griechenland 6. Jh. v.Chr.
 - ⇒ Mit Seidentuch geriebener Bernstein zieht Staubteilchen, Wollfäden u.a. Körper an. Name: Elektron = Bernstein
 - Magneteisenstein zieht Eisen an
- Gilbert William 1540-1603
 - ⇒ führt den Begriff *Elektrizität* ein
- Coulomb Charles 1736-1806
 - ⇒ Coulombsches Gesetz.
- Galvani Luigi 1737-1798
 - ⇒ Galvanische Elemente: Stromquellen deren Energie durch chemische Vorgänge frei wird

Historischer Überblick

- Volta Alessandro 1745-1827
 - ⇒ führt die Arbeit Galvanis fort. Konstruiert die Voltaische Säule, die erste brauchbare Elektrizitätsquelle. Von ihm stammt der Begriff des stationären elektrischen Stromes
- Oerstedt Hans Christian 1777-1851
 - ⇒ entdeckt 1820 die Ablenkung der Magnetnadel durch elektrischen Strom (Elektromagnetismus)
- Ampere Andre Marie 1775-1836
 - ⇒ entdeckt die mechanische Wirkung stromdurchflossener Leiter aufeinander (Elektrodynamisches Gesetz). Nach ihm wurde die Einheit der Basisgröße Stromstärke benannt
- Faraday Michael 1791-1867 Elektromagnetische Induktion
- Ohm Georg Simon 1787-1854 Ohmsches Gesetz

Historischer Überblick

- Siemens Werner 1816-1892
 - ⇒ Elektrische Maschinen (dynamoelektrisches Prinzip)
- Kirchhoff Gustav Robert 1824-1887
 - ⇒ entdeckt die Gesetze der Stromverzweigung.
- Maxwell James Clerk 1831-1879
 - ⇒ Maxwellsche Gleichungen: Beschreiben alle Erscheinungen, bei denen Elektrizität und Magnetismus miteinander verknüpft sind
- Hertz Heinrich 1857-1894
 - ⇒ entdeckt experimentell die elektromagnetischen Wellen
- Edison Thomas Alva 1847-1931
 - ⇒ Erfinder verschiedener Elektrogeräte: Telegraph, Kohlemikrofon, Glühlampe, u.a. Baut 1882 das erste Elektrizitätswerk

Historischer Überblick

- 1886 Lochkarte
 - ⇒ Herman Hollerith (1860-1929) benutzt die Lochkartentechnik zur Datenverarbeitung. Es handelt sich dabei um ein elektromechanisches Verfahren.
- 1941 Z 3
 - ⇒ Konrad Zuse baut die erste funktionsfähige Datenverarbeitungsanlage mit Programmsteuerung in Relais-technik.

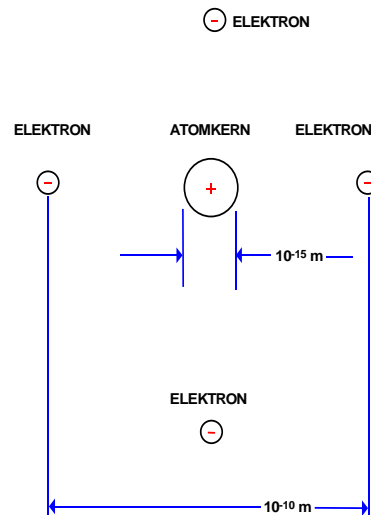
Historischer Überblick

- 1946 Eniac
 - ⇒ Die erste Computergeneration basiert auf der Röhrentechnik. Die Erfinder sind J. Presper Eckert und J. William Mauchly und die logische Konzeption stammt von J. von Neuman
- 1955 Die zweite Computergeneration
 - ⇒ Shockley, Bardeen und Brattain entdecken 1948 die Transistorwirkung und legen damit den Grundstein für die Mikroelektronik
- 1960 Integrierte Schaltkreise (IC)
 - ⇒ Die Funktionen von Transistoren, Widerständen und Dioden werden in Planartechnik auf ein Halbleiter-Plättchen aufgebracht

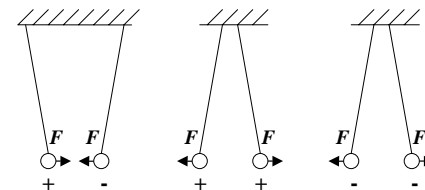
1 Physikalische Grundlagen

1.1 Elektrische Ladung

- Die Einheit der elektrischen Ladung ist $1C = 1As$
- Die Elektrische Ladung eines Elektrons beträgt $e_0 = 1,602 \times 10^{-19} C$



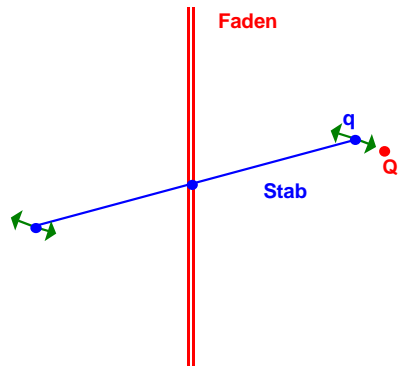
Elektrische Kraft



- Elektrische Ladungen üben Kräfte aufeinander aus

- ⇒ ungleiche Ladungen ziehen sich an
- ⇒ gleiche Ladungen stoßen sich ab

Messung der Kraft



- Für zwei Punktladungen Q und q im Vakuum und im Abstand d gilt:

⇒ Die Kraft ist proportional dem Produkt der beiden Ladungen $F \sim Q \cdot q$

⇒ Die Kraft ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands

$$F \sim \frac{1}{d^2}$$

⇒ Zusammengefaßt ergibt sich

$$F \sim \frac{Q \cdot q}{d^2}$$

Torsionswaage (Coulomb, 1785)

Coulombsches Gesetz

- Kraft ist eine vektorielle Größe

$$\vec{F} = f \cdot \frac{qQ}{d^2} \cdot \vec{r}_0$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qQ}{d^2} \cdot \vec{r}_0$$

- elektrische Feldkonstante

$$\epsilon_0 = 8,859 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

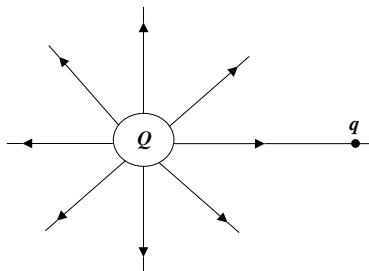
- Einheiten

⇒ Kraft F in Newton [N]

⇒ Abstand d in Meter [m]

⇒ Ladung Q in Coulomb [C]

Elektrisches Feld



- Jedem Punkt des Raumes um eine vorgegebene Ladung Q wird eine vektorielle Größe zugeordnet, die um die Probeladung q normiert wird

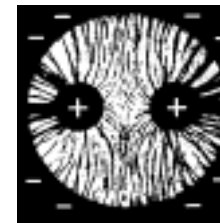
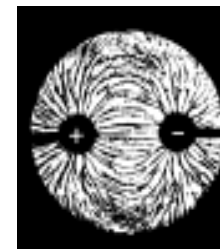
$$\vec{F} = q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{d^2} \cdot \vec{r}_0$$

$$= q \cdot \vec{E}$$

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{d^2} \cdot \vec{r}_0$$

Elektrische Feldlinien



- Elektrische Feldlinien sind ein Hilfsmittel zur Beschreibung von elektrischen Feldern

⇒ sie zeigen immer in Richtung der wirkenden Kraft

⇒ sie erfüllen den Raum kontinuierlich

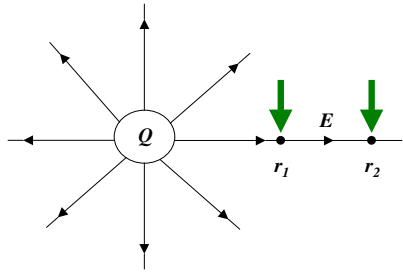
⇒ sie beginnen mit einer positiven Ladung und enden mit einer negativen Ladung

⇒ sie sind nicht geschlossen

- Sie sind keine physikalische Realität

⇒ können jedoch sichtbar gemacht werden

Die elektrische Spannung



- Wird eine Ladung in einem elektrischen Feld bewegt, so muß Arbeit verrichtet werden

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$$

- In einem elektrischen Feld wirkt die Kraft $\vec{F} = \vec{E} \cdot q$

- Damit beträgt die Arbeit um eine Ladung q von r_1 nach r_2 zu bewegen

$$W_{r_1 \rightarrow r_2} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Die elektrische Spannung

- Die Spannung zwischen r_1 und r_2 wird definiert als die Arbeit, die verrichtet werden muß, um die Elementarladung q von r_1 nach r_2 zu bewegen, normiert um die Ladung q

$$U_{r_1 \rightarrow r_2} = \frac{W_{r_1 \rightarrow r_2}}{q} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Ladung}}$$

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{C}}$$

Das elektrische Potential

- Normiert man die Energie auf einen Bezugspunkt, so erhält man das elektrische Potential φ

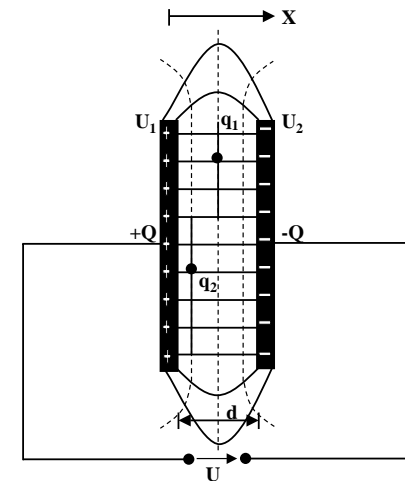
$$\varphi(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \cdot \frac{1}{r_0}$$

- Die Spannung ergibt sich als Potentialdifferenz

$$U_{12} = \varphi(\vec{r}_1) - \varphi(\vec{r}_2)$$

Elektrische Ladung auf Leitern

- Auf metallischen Leitern sind Ladungen frei beweglich
 ⇒ sie stoßen sich ab und verteilen sich gleichmäßig an der Oberfläche
- Alle Feldlinien stehen senkrecht zur Oberfläche
 ⇒ im Innern eines metallischen Hohlraums ist ein feldfreier Raum (Faradayscher Käfig)
- Stehen sich zwei Metallflächen gegenüber, so entsteht ein Plattenkondensator
 ⇒ Die Flächen bilden Potentialflächen φ_1, φ_2



Elektrische Flußdichte

- Flußdichte D ist die Ladungsmenge pro Flächeneinheit $D = \frac{Q}{A}$

- Für eine beliebige Fläche

$$\iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \quad \text{wenn } Q \text{ innerhalb der von } A \text{ umschlossenen Fläche liegt}$$

$$\iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{sonst}$$

- Für eine Kugelfläche bei der die Ladung im Mittelpunkt steht:

$$\iint_{\text{Kugelfläche}} \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \quad \text{mit } \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{d^2} \cdot \vec{r}_0 \text{ folgt}$$

$$D \cdot 4\pi r^2 = Q \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$$

$$D = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad [\epsilon_0] = \frac{[D]}{[E]} = \frac{C}{m^2} \cdot \frac{m}{V} = \frac{C}{V \cdot m}$$

Wirkung eines Dielektrikum

- ϵ_0 gilt für Vakuum
- Die Kraft auf eine Probeladung q verändert sich, wenn der Raum ausgefüllt ist

⇒ Dielektrizitätskonstante ϵ_r

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \vec{E}$$

- Beispiele für ϵ_r

Material	ϵ_r
Vakuum	1,0
Luft	1,006
Papier	5,4
Porzellan	5,5
Glas	3...15
Marmor	8,4...14
Ethylalkohol	25,1
Glycerin	41,1
Wasser	81,0
Bariumtitanat	1000...9000

Kapazität eines Plattenkondensators

- Näherung $d \ll A$
⇒ alle Feldlinien laufen parallel und befinden sich innerhalb der Platten

- damit gilt mit der Potentialdifferenz

$$U = E \cdot d$$

- mit der vereinfachten Gleichung für E

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A}$$

gilt

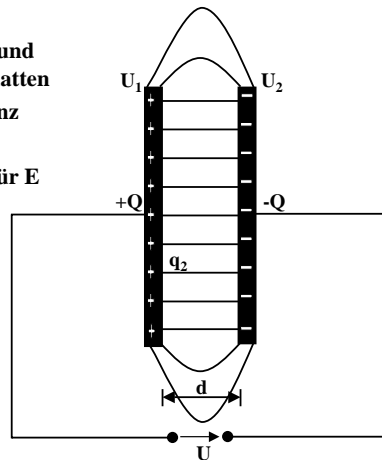
$$U = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} \cdot d$$

- Kapazität C ist

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

- Einheit der Kapazität: Farad

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{C}{V} = F$$



1.2 Elektrischer Strom

- Elektrischer Strom ist der Fluß von Elektronen

- Ladung eines Elektrons $e_0 = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$1 \text{ C} = \frac{1}{1,602} \cdot 10^{19} \text{ Elektronenladungen}$$

- Die Stromstärke I entspricht der bewegten Ladungsmenge pro Zeiteinheit

$$I = \frac{Q}{t}$$

- Fließen durch einen Leiter pro Sekunde n Coulomb, so messen wir einen Strom von n Ampere [A]

$$1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} = \frac{1}{1,602} \cdot 10^{19} \frac{\text{Elektronen}}{\text{s}}$$

Variabler elektrischer Strom

- Ist die Stromstärke von der Zeit abhängig, benutzt man die differentielle Schreibweise

$$i(t) = \frac{dQ}{dt}$$

- daraus folgt

$$dQ = i(t) \cdot dt$$

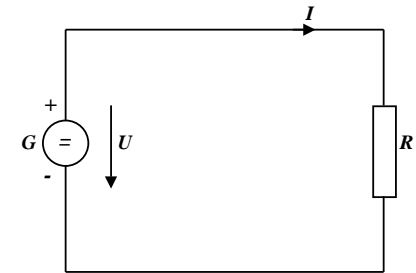
$$Q = \int_{t_0}^{t_1} i(t) \cdot dt$$

- in Einheiten

$$1\text{C} = 1\text{As}$$

Elektrischer Stromkreis

- Ein elektrischer Stromkreis ist eine Anordnung aus
 - ⇨ Stromerzeuger G (Generator)
 - ⇨ Verbraucher R
 - ⇨ Verbindungsleitungen
- In G wird Energie aufgewendet
 - ⇨ ($W < 0$)
- In R wird Energie verbraucht
 - ⇨ ($W > 0$)
- Der elektrische Strom fließt (per Definition) von Plus (+) nach Minus (-)
- Spannung im Stromerzeuger G bewirkt im Verbraucher R einen Stromfluß von von Plus nach Minus (Pfeilrichtung)



Leitwert und Widerstand

- Zahlenmäßiger Zusammenhang zwischen Spannung und Strom an einem Verbraucher

⇨ Der gemessene Strom I ist proportional zur Spannung U

$$I \sim U$$

$$I = G \cdot U$$

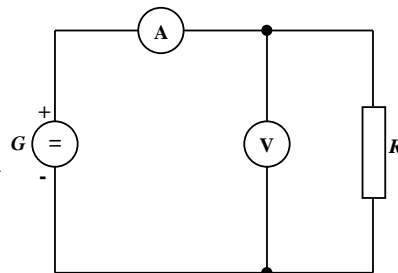
- Der Proportionalitätsfaktor G wird Leitwert genannt

- Die Einheit von G ist Siemens

$$1\text{S} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

- in der Praxis verwendet man den Kehrwert von G , den Widerstand R

$$R = \frac{1}{G}$$



Ohmsches Gesetz

- Es gibt einen festen Zusammenhang zwischen dem Strom I und der Spannung U

⇨ Ohmsches Gesetz

$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

$$U = R \cdot I$$

$$R = \frac{U}{I}$$

- Die Einheit für den Widerstand ist Ohm Ω

$$1\Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

Kennlinienfeld

- Der Zusammenhang zwischen dem Strom I und der Spannung U kann in einem Kennlinienfeld dargestellt werden

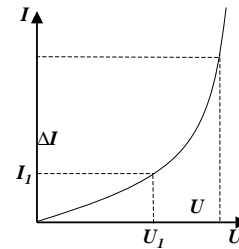
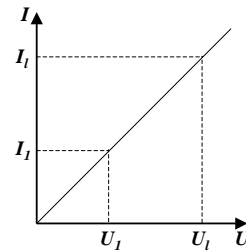
- ⇒ X-Achse: Spannung U
- ⇒ Y-Achse: Strom I

- Ist der Proportionalitätsfaktor G konstant, so spricht man von einem *linearen* Widerstand

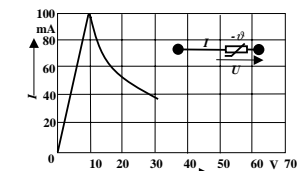
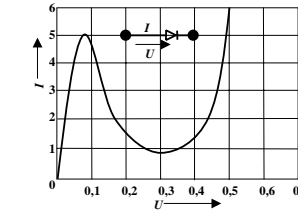
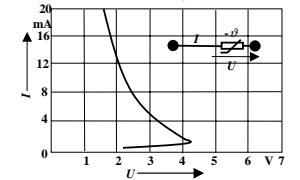
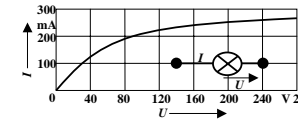
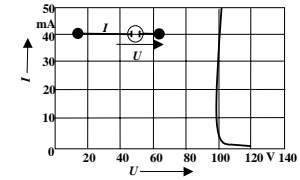
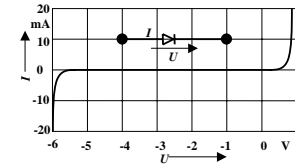
- Beispiel: metallische Leiter sind lineare Widerstände; er ist

- ⇒ proportional zur Länge l
- ⇒ umgekehrt proportional zur Fläche A
- ⇒ abhängig vom Material

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\rho] = \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$



Kennlinien verschiedener Bauelemente



Arbeit und Leistung des elektrischen Stroms

- Elektrische Arbeit W wird verrichtet, wenn eine Ladung Q von einem Potential ϕ_1 zu einem Potential ϕ_2 transportiert wird

$$W = q \cdot (\phi_1 - \phi_2) = Q \cdot U$$

$$= I \cdot t \cdot U$$

$$= I^2 \cdot R \cdot t$$

- Die Einheit der elektrischen Arbeit ist Joule (J)

$$1\text{J} = 1\text{Ws} = 1\text{AVs}$$

- Mit $[\text{V}] = \text{Nm/C}$ und $[\text{A}] = \text{C/s}$ gilt

$$1\text{J} = 1\text{AVs} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C}} \cdot \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot \text{s} = 1 \text{Nm}$$

- Die elektrische Leistung P entspricht der (elektrischen) Arbeit pro Zeiteinheit

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

- Die Einheit der elektrischen Leistung ist Watt (W)

$$1\text{W} = 1\text{VA}$$

Die Kirchhoffschen Sätze

- Nur selten wird an einem Stromerzeuger G nur ein einzelner Verbraucher R angeschlossen

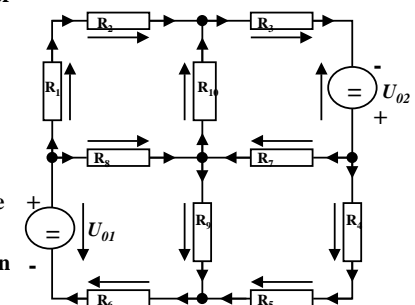
- Eine Anordnung aus Spannungsquellen und Verbrauchern heißt Netz

- Es besteht aus Knoten und Maschen

- ⇒ Knoten: Verzweigungspunkte
- ⇒ Masche: Pfad, bei dem kein Knoten mehrfach durchlaufen wird

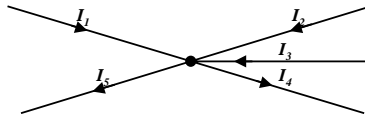
- Richtung der Pfeile (Vorzeichen)

- ⇒ Spannung ist von Plus nach Minus gerichtet
- ⇒ Strom fließt von Plus nach Minus



Knotenregel (1. Kirchhoffscher Satz)

- In einem Knoten ist die Summe aller Ströme Null
 - An keiner Stelle des Netzes werden Ladungen angehäuft
- Definition der Stromrichtung für die mathematische Formulierung
 - zufließende Ströme werden mit einem **positiven** Vorzeichen behaftet
 - abfließende Ströme werden mit einem **negativen** Vorzeichen behaftet



$$0 = I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5$$

oder

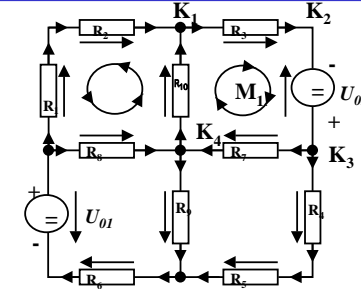
$$I_2 + I_4 + I_5 = I_1 + I_3$$

allgemein

$$\sum_{i=0}^n I_i = 0$$

Maschenregel (2. Kirchhoffscher Satz)

- Bei einem geschlossenen Umlauf einer Masche ist die Summe aller Spannungen Null
 - die Spannungsquellen erzeugen die Spannungen U_{01} und U_{02}
 - durch die Widerstände fließt ein Strom
 - nach dem Ohmschen Gesetz gilt für die Spannung $U = R \cdot I$
 - die Knotenpunkte K_1, K_2, K_3 und K_4 können deshalb unterschiedliches Potential besitzen



$$\varphi_2 - \varphi_1 = U_{K_{12}}$$

$$\varphi_3 - \varphi_2 = U_{K_{23}} = U_{02}$$

$$\varphi_4 - \varphi_3 = U_{K_{34}}$$

$$\varphi_1 - \varphi_4 = U_{K_{14}}$$

Maschenregel (2. Kirchhoffscher Satz)

- Werden die Potentialdifferenzen addiert, so folgt:

$$\varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_4 - \varphi_3 + \varphi_1 - \varphi_4 = 0$$

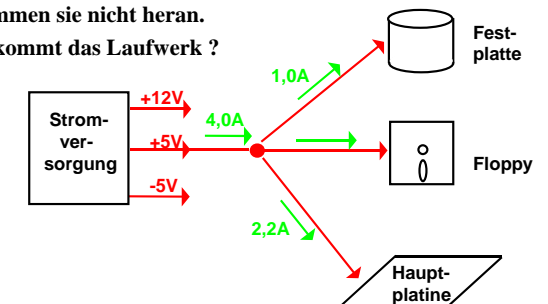
$$U_{K_{12}} + U_{K_{23}} + U_{K_{34}} + U_{K_{14}} = 0$$
- Vorzeichen der Spannung
 - die Spannungsrichtung der Quellen ist vorgegeben (von + nach -)
 - Umlaufrichtung der Masche wird festgelegt
 - Spannungspfeile gegen die Umlaufrichtung werden **negativ** gezählt
 - Spannungspfeile mit der Umlaufrichtung werden **positiv** gezählt

$$U_{K_{12}} - U_{02} + U_{K_{34}} + U_{K_{14}} = 0$$

$$U_{K_{12}} + U_{K_{34}} + U_{K_{14}} = U_{02}$$

Anwendung 1: Knotenregel

- Sie haben einen neuen Personal Computer gekauft. Sie benutzen ein Strommeßgerät (Ampere-Meter) und stellen damit fest, daß die 5 Volt Stromversorgung Ihres PC im eingeschalteten Zustand 4,0 A liefert. Versorgt wird damit die Hauptplatine, das Festplattenlaufwerk und das Floppy Laufwerk. Sie messen, daß der Strom in die Hauptplatine 2,2 A beträgt und der Strom in die Festplatte 1,0 A. An das Floppylaufwerk kommen sie nicht heran. Wieviel Strom zu 5 Volt bekommt das Laufwerk ?



Berechnung von Determinanten

○ Determinante 4. Ordnung

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}$$

$$= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{31} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{21} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{41} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{vmatrix}$$

Für das Beispiel

○ Gleichungssystem

$$\begin{aligned} I_3 - I_4 + I_5 &= 0 \\ I_3 + 6 \cdot I_4 &= 38 \\ 6 \cdot I_4 + 2 \cdot I_5 &= 24 \end{aligned}$$

○ Determinante D

$$D = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & 6 & 0 \\ 0 & 6 & 2 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \cdot 6 \cdot 2 + (-1) \cdot 0 \cdot 0 + 1 \cdot 6 \cdot 1 - 1 \cdot 6 \cdot 0 - (-1) \cdot 1 \cdot 2 - 0 \cdot 6 \cdot 1$$

$$= 12 + 6 + 2 = 20$$

○ Für I_5

$$D_5 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 6 & 38 \\ 0 & 6 & 24 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \cdot 6 \cdot 24 + (-1) \cdot 38 \cdot 0 + 1 \cdot 6 \cdot 0 - 0 \cdot 6 \cdot 0 - (-1) \cdot 1 \cdot 24 - 38 \cdot 6 \cdot 1$$

$$= 6 \cdot 24 + 24 - 38 \cdot 6 = 144 + 24 - 228 = -60$$

$$I_5 = \frac{D_5}{D} = \frac{-60}{20} = -3$$

Sonderfall 1: Parallelschaltung von Widerständen

○ Für die Teilströme I_1, I_2, \dots, I_n gilt:

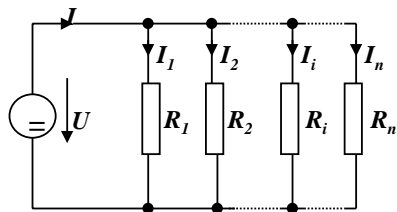
$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, \dots, I_n = \frac{U}{R_n}$$

○ Nach der Knotenregel ist der Gesamtstrom:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$$

$$= U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$



○ Der Ersatzwiderstand der gesamten Schaltung berechnet sich durch:

$$R_{\text{gesamt}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

Sonderfall 2: Serienschaltung von Widerständen

○ Für die Spannungen U_1, U_2, \dots, U_n an den Widerständen gilt:

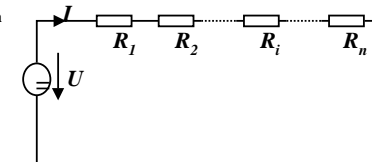
$$U_1 = I \cdot R_1, U_2 = I \cdot R_2, \dots, U_n = I \cdot R_n$$

○ Nach Maschenregel ist die Gesamtspannung:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$= I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n$$

$$= I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$



○ Der Ersatzwiderstand der gesamten Schaltung berechnet sich durch:

$$R_{\text{gesamt}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

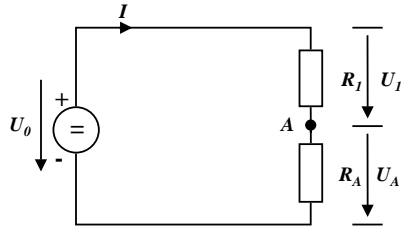
Sonderfall 3: Spannungsteiler

- Reihenschaltung von zwei Widerständen
- Für das Verhältnis der Spannungen U_1 und U_2 gilt:

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_A}{R_2} \Rightarrow \frac{U_1}{U_A} = \frac{R_1}{R_2}$$

- Ist U_0 , R_1 und R_2 gegeben, so folgt für U_A :

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_A} &= \frac{R_1}{R_2}, U_1 = U_0 - U_A \Rightarrow \frac{U_0 - U_A}{U_A} = \frac{R_1}{R_2} \\ &\Rightarrow \frac{U_0}{U_A} - \frac{U_A}{U_A} = \frac{R_1}{R_2} \\ &\Rightarrow \frac{U_0}{U_A} = \frac{R_1}{R_2} + 1 \\ &\Rightarrow U_A = \frac{U_0}{\frac{R_1}{R_2} + 1} \end{aligned}$$



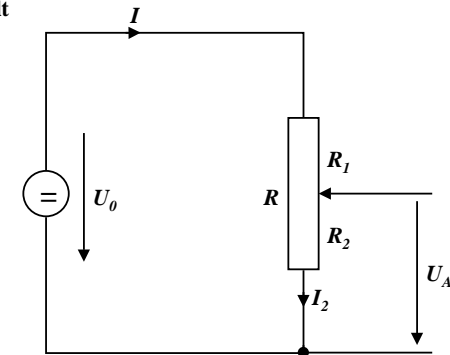
Sonderfall 4: Potentiometerschaltung

- Bei einem Potentiometer gilt zusätzlich:

$$R_1 = R - R_2$$

- Damit folgt:

$$\begin{aligned} U_A &= \frac{U_0}{\frac{R_1}{R_2} + 1} \\ &= \frac{U_0}{\frac{R - R_2}{R_2} + 1} \\ &= \frac{U_0}{\frac{R - R_2 + R_2}{R_2}} = \frac{U_0}{\frac{R}{R_2}} = U_0 \cdot \frac{R_2}{R} \end{aligned}$$



Sonderfall 5: Belastete Potentiometerschaltung

- Wird die Potentiometerschaltung durch einen Lastwiderstand belastet, so entsteht eine Parallelschaltung von R_2 und R_L

- Es gelten: $I = I_2 + I_L$

$$U_0 = I \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2$$

$$I_L \cdot R_L = I_2 \cdot R_2$$

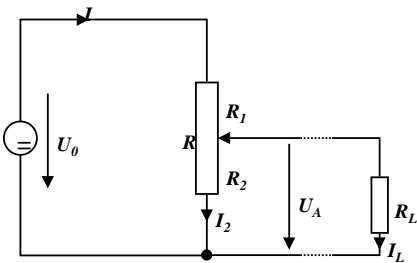
$$R_{gesamt} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

- Damit folgt:

$$I = \frac{U_0}{R_{gesamt}} = \frac{U_0}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}}$$

$$I_L = \frac{U_0 - I \cdot R_1}{R_L}$$

$$U_L = I_L \cdot R_L$$



Graphische Bestimmung des Arbeitspunkts

- Praktische Anwendung bei nichtlinearen Kennlinien

⇒ Dioden, Transistoren

- Vorgehen:

- Kennlinie für R_2 einzeichnen

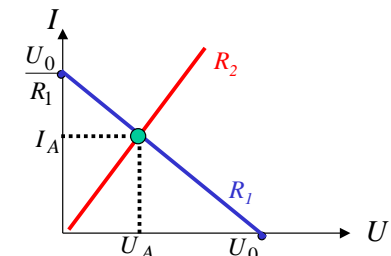
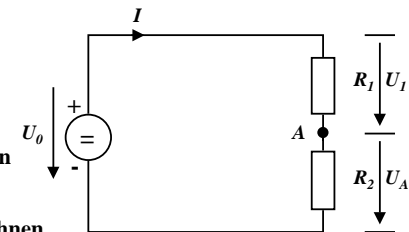
- Kennlinie für R_1 in das selbe Diagramm einzeichnen

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_0 - U_A}{R_1}$$

$$2 \text{ Punkte: } U_A = 0 \Rightarrow I = \frac{U_0}{R_1}$$

$$U_A = U_0 \Rightarrow I = 0$$

- Schnittpunkt A ergibt den Arbeitspunkt mit Spannung U_A und Strom I_A



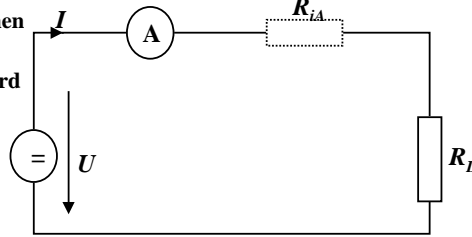
Messen von Strom und Spannung

- Ein Amperemeter besitzt einen (kleinen) Innenwiderstand

⇒ der gemessene Strom wird verringert

$$I = \frac{U}{R_{iA} + R_L}$$

⇒ R_{iA} sollte gegenüber R_L möglichst klein sein

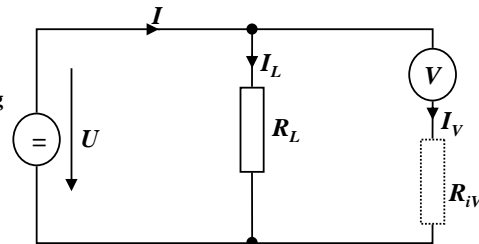


- Ein Voltmeter besitzt einen (großen) Innenwiderstand

⇒ die gemessene Spannung wird verringert

$$\frac{I_V}{I} = \frac{R_L}{R_{iV} + R_L}$$

⇒ R_{iV} sollte gegenüber R_L möglichst groß sein



U. Keschull

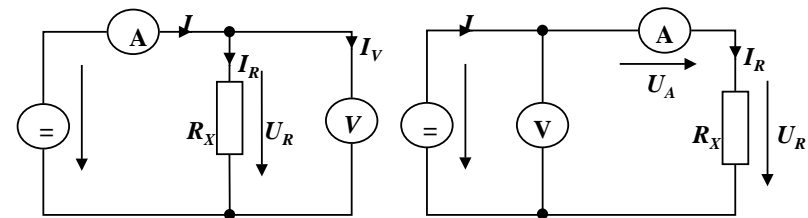
Messung eines Widerstands

- Soll ein unbekannter Widerstand R_x bestimmt werden, so kann dies durch gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung erreicht werden

⇒ Eines der Meßgeräte ist mit einem Fehler behaftet

Stromfehlerschaltung

Spannungsfehlerschaltung



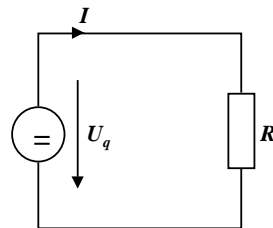
U. Keschull

Quellen- und Klemmenspannung

- Ideale Spannungsquelle:

⇒ nach dem Ohmschen Gesetz

$$\lim_{R \rightarrow 0} I = \infty$$

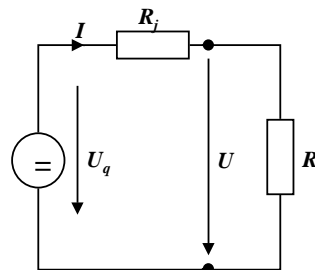


- Eine reale Spannungsquelle kann durch Hinzufügen eines Innenwiderstands modelliert werden

⇒ die abgreifbare Spannung heißt Klemmenspannung

$$U = U_q - I \cdot R_i$$

$$I = \frac{U_q}{R + R_i}$$

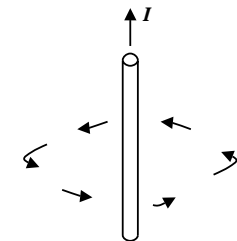


U. Keschull

1.3 Elektromagnetisches Feld

- Versuch von Oerstedt (WS 1819/20)

⇒ in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters werden Magnetnadeln abgelenkt
 ⇒ alle Magnetnadeln richten sich kreisförmig aus
 ⇒ alle Magnetnadeln haben den gleichen Drehsinn



U. Keschull

Magnetische Feldlinien

- Das magnetische Feld wird wie das elektrische Feld anschaulich durch Feldlinien beschrieben
 - die magnetischen Feldlinien umschließen den Leiter ringförmig
 - Feldlinien sind konzentrisch um den Leiter angeordnet
- Für die Richtung der Feldlinien gilt die Rechte-Hand-Regel:
 - zeigt der Daumen der rechten Hand in Richtung des Stromes im Leiter, so zeigen die Finger, die den Leiter umfassen in Richtung der Feldlinien

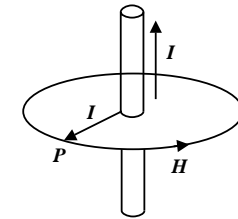
Magnetische Feldstärke

- Grad der Auslenkung der Magnetnadeln als Maß für die Kraft
 - Kraft F proportional zur magnetischen Feldstärke H

$$F \sim H$$
 - die magnetische Feldstärke H ist proportional zum Strom I

$$H \sim I$$
 - die magnetische Feldstärke H ist umgekehrt proportional zum Abstand r

$$H \sim \frac{1}{r}$$

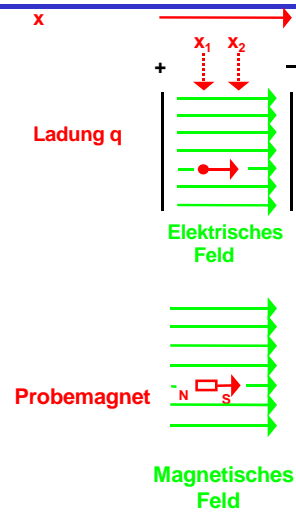


- Die Konstante wird $\frac{1}{2\pi}$ gesetzt

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Magnetisches Potential

- Verschiebt man in einem elektrischen Feld eine Ladung q entlang der elektrischen Feldlinien von einem Punkt x_1 nach einen Punkt x_2 , so wird hierbei Energie umgesetzt. Diese Energie ist proportional dem Potentialunterschied der elektrischen Feldstärke zwischen den Punkten x_1 und x_2
- Verschiebt man in einem magnetischen Feld einen (kleinen) Magneten von einem Punkt x_1 nach einem Punkt x_2 entlang der magnetischen Feldlinien, so wird hierbei ebenfalls Energie umgesetzt. Diese Energie ist proportional dem Potentialunterschied der magnetischen Feldstärke (zwischen den Punkten x_1 und x_2)



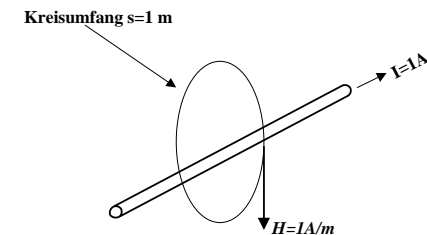
Magnetische Spannung

- Magnetische Spannung V entspricht dem magnetischen Potentialunterschied
 - Produkt aus magnetischer Feldstärke H und Wegstrecke s

$$V_{12} = \int_1^2 \vec{H} \cdot ds = I$$
- Einheit

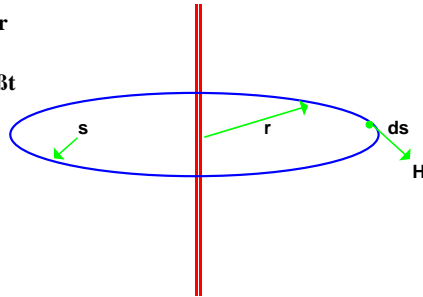
$$[V] = A$$

$$[H] = \frac{A}{m}$$



Das Durchflutungsgesetz

- Zusammenhang zwischen dem magnetischen Feld und dem verursachenden elektrischen Strom
 - ⇒ A = Kreisfläche mit dem Radius r
 - ⇒ j = Strom, der durch das Teilelement dA der Fläche A fließt (Stromdichte)
 - ⇒ s = geschlossener Weg (hier Kreisbahn, Radius r)
 - ⇒ ds = kleines Teilstück von s



$$\oint \vec{H} ds = \int_A j d\vec{A} = \sum_k I_k = I$$

- Linienintegral der magnetischen Feldstärke H längs des geschlossenen Weges s = "magnetische Umlaufspannung"

Kraftwirkung magnetischer Felder auf stromdurchflossene Leiter

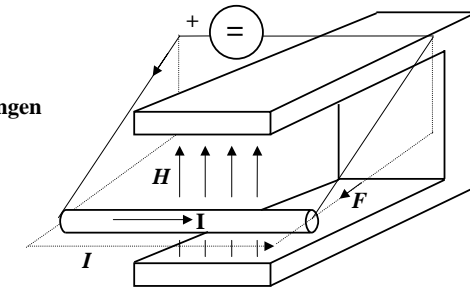
- Wechselwirkung zweier Magnetfelder
 - ⇒ Leiter
 - ⇒ Hufeisenmagnet
- Quantitative Untersuchungen ergeben:

$$F \sim I$$

$$F \sim l$$

$$F \sim H$$

$$F = \mu \cdot I \cdot l \cdot H$$



l Länge des Drahtstücks
 H magnetisches Feld
 F Kraft
 I Strom

Magnetische Induktion

- Man definiert die magnetische Induktion B über die Kraft F
- Wenn der Draht senkrecht zur Feldrichtung steht:
 - ⇒ Die magnetische Induktion B beträgt genau 1 Tesla (T), wenn ein 1m langer Draht die Kraft von 1N erfährt
$$\vec{F} = I \cdot l \cdot \vec{B}$$
- In Einheiten

$$[B] = \frac{[A]}{[I] \cdot [l]} = \frac{N}{A \cdot m}$$
- Die magnetische Feldstärke H beschreibt die Ursache des magnetischen Felds
 - ⇒ unabhängig von Materialeigenschaften
 - ⇒ wird verursacht durch einen Strom
- Die magnetische Induktion B beschreibt die Wirkung des magnetischen Felds
 - ⇒ Kraft auf Eisenteile
 - ⇒ Kraft auf stromdurchflossenen Leiter
- Es gilt

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

Permeabilität

- Proportionalitätsfaktor $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
- Permeabilitätszahl μ_r , beschreibt die magnetische Eigenschaft von Stoffen

Stoff	Eigenschaft	Permeabilitätszahl μ_r	Verhalten	Anwendung
Cu, Si, Bi, H ₂ O	diamagnetisch	< 1	Abstoßung vom Magnetfeld	technisch nicht verwendbar
Al, Pt, Luft	paramagnetisch	> 1	Anziehung vom Magnetfeld	technisch nicht verwendbar
Cr, FeO ₂	antiferromagnetisch	= 1	unmagnetisch	technisch nicht verwendbar
Fe, Stähle, Legierungen	ferromagnetisch	10 ¹ ...10 ⁶	stark magnetisch	Transformatoren, elektrische Maschinen, magnetische Kreise
Ferrite	ferri-magnetisch	bis 3*10 ³	stark magnetisch	Permanentmagnete, HF-Spulkern

Kraft zwischen stromdurchflossenen Leitern

- Parallele Ströme ziehen sich an
- Antiparallele Ströme stoßen sich ab

- Kraft auf Leiter 2 im Magnetfeld des Leiters 1

$$F = I_2 \cdot l \cdot B$$

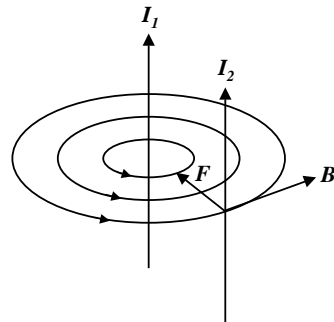
$$= I_2 \cdot l \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

- Das elektromagnetisch Feld H beträgt

$$H = \frac{I_1}{2\pi \cdot d}$$

- Daraus folgt

$$F = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi d} I_1 I_2$$



U. Keschull

Lorenzkraft

- Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter entsteht durch die Bewegung der Elektronen

- ⇒ positive Ladung $p = -e_0$
- ⇒ Stromdichte auf dem Leiter

$$j = \frac{I}{A}$$

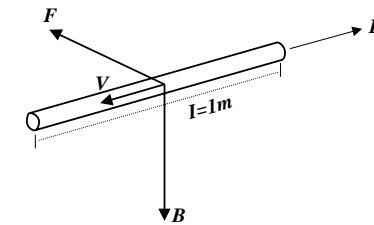
$$j = -e_0 \cdot \frac{N}{l \cdot A} \cdot v$$

- Dann gilt

$$\vec{F}_{\text{Leiter}} = -e_0 \cdot \frac{N}{l \cdot A} \cdot v \cdot A \cdot \vec{l} \times \vec{H}$$

$$= -e_0 \cdot \frac{N}{l \cdot A} \cdot l \cdot A \cdot \vec{v} \times \vec{H}$$

$$= -e_0 \cdot N \cdot \vec{v} \times \vec{H}$$



- Auf eine positive Ladung p wirkt die Kraft

$$\vec{F} = \frac{\vec{F}_{\text{Leiter}}}{N} = p \cdot \vec{v} \times \vec{H}$$

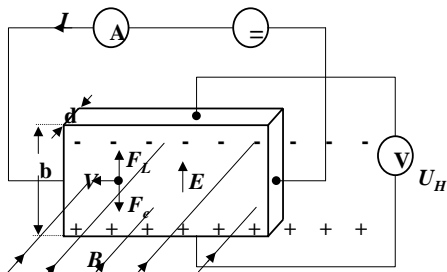
U. Keschull

Halleffekt

- Gleichspannung U_H kann gemessen werden, wenn ein stromdurchflossenes Plättchen der Dicke d in ein magnetisches Feld gebracht wird

- Es gilt:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d}$$



- R_H ist die materialabhängige Hall-Konstante

Element	R_H in $10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$
Kupfer	-5,4
Silber	-9,0
Antimon	-19,8
Bismut	-54000
Zink	3,3
Aluminium	10,2
Indium	16,0
Arsen	450
Halbleiter	R_H in $10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$
InAs	50...100 · 10 ³
InAsP	200 · 10 ³
InSb	200...300 · 10 ³

U. Keschull

Ferromagnetische Stoffe im Magnetfeld

- Die Permeabilität ist in Ferromagnetischen Stoffen nicht konstant

- ⇒ Hysterese

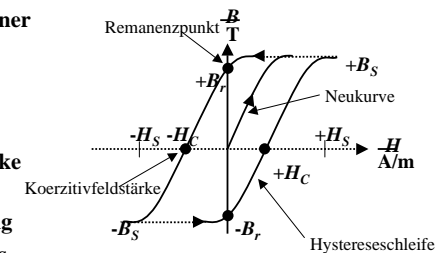
- Erklärung: Drehprozesse kleiner Elementarmagneten im ferromagnetischen Material

- ⇒ Zunächst nimmt die magnetische Induktion B proportional zur Feldstärke H zu (Neukurve)

- ⇒ B_s entspricht der Sättigung

- ⇒ Auch nach Wegnahme des magnetischen Felds H bleibt der ein magnetische Induktion B_r bestehen

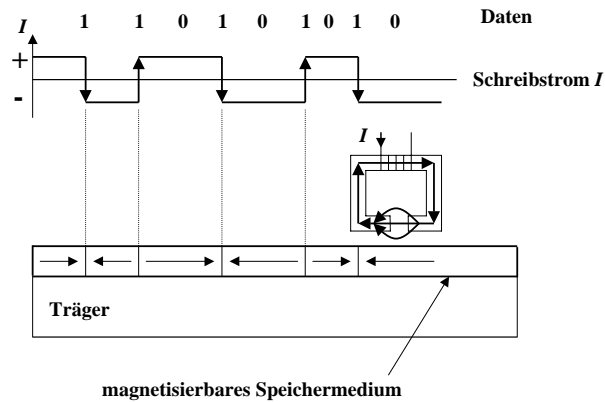
- ⇒ Erst bei $-H_c$ wird B wieder 0



U. Keschull

Anwendung

- Speicherung binärer Daten auf einem magnetischen Träger
- FM-Verfahren
 - ⇒ bei jeder „1“ wird die Schreibstromrichtung geändert



Elektromagnetische Induktion

- Wird ein Stabmagnet in eine Spule eingebracht, so sieht man während der Bewegung einen Ausschlag am Voltmeter
- Wird der Stabmagnet wieder herausgezogen, schlägt das Voltmeter in die Gegenrichtung aus

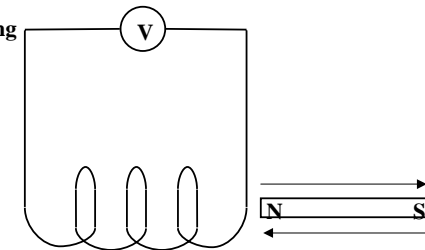
⇒ Eine Spannung U_i wird induziert

$$U_i \sim \frac{1}{\Delta t}$$

$$U_i \sim B$$

$$U_i \sim A$$

$$U_i \sim \frac{B \cdot A}{\Delta t}$$



Magnetischer Fluß

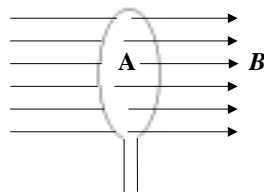
- Der magnetische Fluß Φ entspricht anschaulich der Anzahl der Feldlinien, die durch eine Fläche gehen
- Die magnetische Induktion B ist die Dichte der Feldlinien

$$\Phi = B \cdot A$$

- Daraus folgt

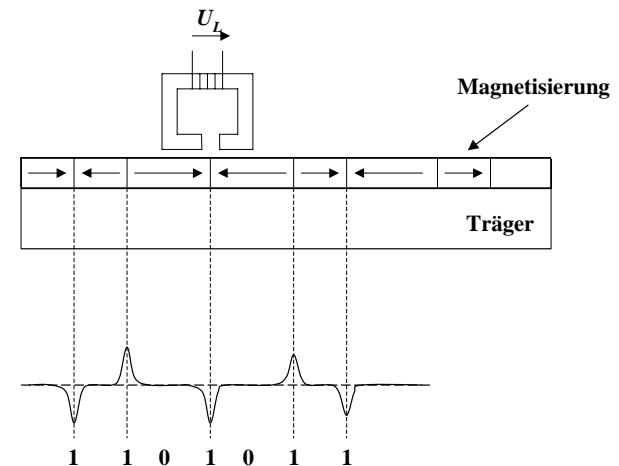
$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- Das Minuszeichen entspricht der Lenzschen Regel: Die induzierte Spannung ist so gepolt, daß sie durch einen von ihr erzeugten Strom der Ursache des Induktionsvorgangs entgegen wirken kann



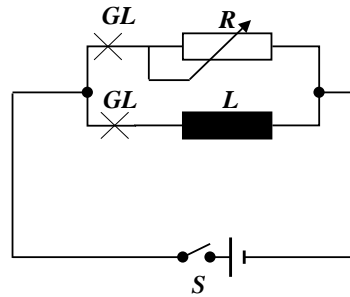
Anwendung

- Lesen von Daten auf magnetischen Datenträgern



Selbstinduktion

- In einer Spule ändert sich beim Einschalten der Fluß
 - ⇒ Die Flußänderung induziert in der selben Spule eine Gegenspannung
 - ⇒ Selbstinduktion
 - ⇒ Die Glühlampe im Stromkreis der Spule L erreicht ihre Helligkeit merklich später



- Es gilt:

$$U_i \sim \frac{dI}{dt}$$

$$U_i = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

- L ist die Induktivität der Spule

- L hängt ab von der Windungszahl N, der Spulenlänge l, der Fläche A und der Permeabilität μ

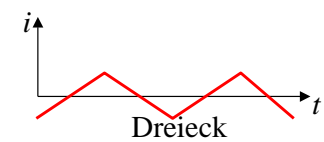
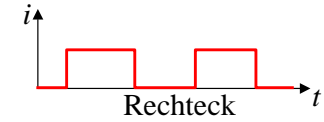
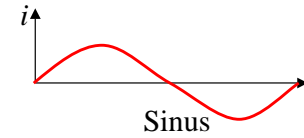
$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$$

$$[L] = \frac{V \cdot s}{I} = H$$

U. Keschull

1.4 Wechselstromkreis

- Unterschied zum bisher betrachteten Gleichstrom
 - ⇒ Die Richtung und Stärke des Stroms ändert sich periodisch
 - ⇒ Hier: Wechselstrom mit Mittelwert null (kein Gleichstromanteil)

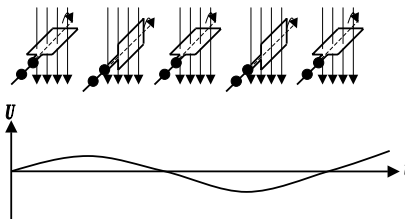
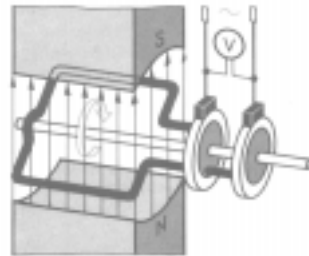


U. Keschull

Wechselspannung und Wechselstrom

- Anwendung des Induktionsgesetzes
 - ⇒ In einem homogenen Magnetfeld dreht sich eine Schleife mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω
 - ⇒ Der magnetische Fluß durch die Schleife beträgt

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha)$$
 - ⇒ α entspricht dem Winkel der Feldlinien mit der Flächennormalen der Leiterschleife

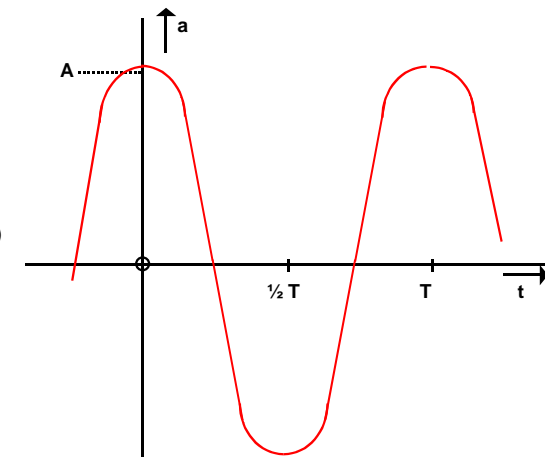


$$\alpha = \omega \cdot t$$

U. Keschull

Kennwerte einer Wechselgröße

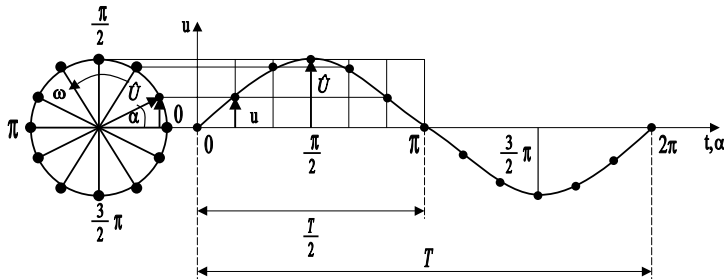
- $a = A \cos \omega t$
- $\omega = 2\pi f$
- $f = 1/T$
- $a =$ Funktionswert
- $A =$ Scheitelwert
- $\omega =$ Kreisfrequenz
- $t =$ Zeit (Sekunden)
- $f =$ Frequenz (Hertz)
- $T =$ Periodendauer



U. Keschull

Zeiger- und Liniendiagramm

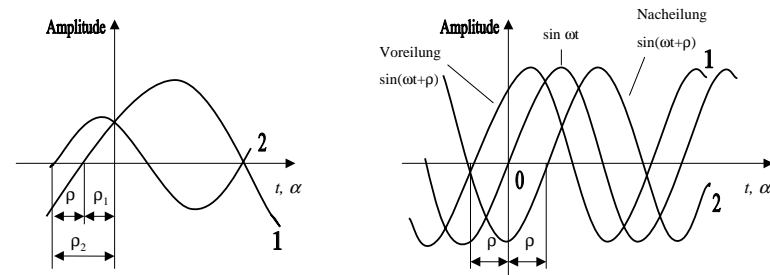
- Ein mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im Gegenuhrzeigersinn umlaufender Zeiger bildet den Augenblickswert sinusförmiger Wechselgrößen ab
- Entstehung des Liniendiagramms aus dem Zeigerdiagramm



Phasenverschiebung

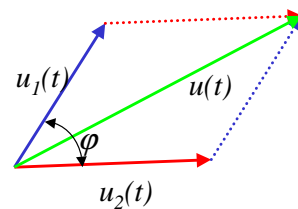
- Differenz der Nullphasenwinkel zwischen mehreren Wechselgrößen

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$
- Positiver Phasenwinkel oder Voreilung bedeutet die Verschiebung der Sinuswelle in negativer Richtung der Zeitachse



Addition phasenverschobener Wechselspannungen

- Überlagerung zweier Wechselspannungen oder Wechselströme
 - Der resultierende Zeiger ist gleich der Diagonalen des aus den beiden Komponenten gebildeten Parallelogramms



$$\vec{u}(t) = \vec{u}_2(t) + \vec{u}_1(t)$$

- Das Ergebnis ist wieder eine Sinuskurve
 - sind die Komponenten gleich groß, so beträgt der Phasenwinkel der Resultierenden $\frac{\varphi}{2}$

Wechselspannung und Wechselstrom

- Durch die Flußänderung wird eine Spannung induziert

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(B \cdot A \cdot \cos \omega t)$$

$$u_i = B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

- Mit der maximalen Spannung

$$\hat{u} = B \cdot A \cdot \omega$$

Folgt für die Spannung $u(t)$

$$u(t) = u = \hat{u} \cdot \sin \omega t$$

- Wird ein Widerstand R an die Wechselspannung angeschlossen, so entsteht ein Wechselstromkreis.

- In ihm fließt der Strom i

$$i = \frac{u(t)}{R} = \frac{\hat{u}}{R} \cdot \sin \omega t = \hat{i} \cdot \sin \omega t$$

Kennwerte von Wechselgrößen

- Beschreibung der mittleren Wirkung, unabhängig von der Kurvenform
- Linearer Mittelwert (Gleichstromanteil)

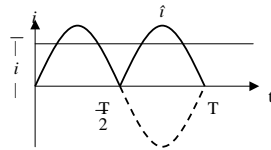
$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

- Gleichrichtwert
 - ⇒ Mittelwert des Betrags der der Wechselspannung
 - ⇒ Integral über die Absolutwerte des Stroms

$$|\bar{i}| = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$$

- Für einen sinusförmigen Wechselstrom gilt

$$|\bar{i}| = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{i} \cdot \sin(\omega t)| dt = \frac{\hat{i} \cdot 2}{\pi} = 0,64 \cdot \hat{i}$$



Kennwerte von Wechselgrößen

- Leistung des Gleichstroms $P_{\bar{}} = U \cdot I = I^2 \cdot R$
- Effektivwert I_{eff} des Wechselstroms $i(t)$: Wert eines Gleichstroms I der an einem Widerstand R die gleiche Leistung freisetzt, wie $i(t)$

⇒ Es gilt

$$P_{\bar{}} = I^2 \cdot R = R \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt$$

⇒ Daraus folgt $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt$ $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$

- Für einen sinusförmigen Wechselstrom gilt

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{i}^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$$

- Entsprechend gilt für eine sinusförmige Wechselspannung

$$U_{eff} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

Formfaktor

- Formfaktor ist der Verhältnis des Effektivwerts zum Gleichrichtwert
 - ⇒ Maß für die Kurvenform

$$k_f = \frac{U_{eff}}{|\bar{u}|}$$

⇒ Für eine Sinusfunktion gilt:

$$k_f = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{u}}{\hat{u} \cdot 2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,111$$

Wirkwiderstand

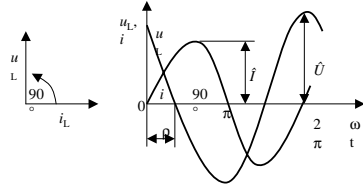
- Der Wirkwiderstand setzt die einem Leiter zugeführte Energie vollständig in nichtelektrische Energie um.
 - ⇒ Er verursacht einen Leitungsverlust
 - ⇒ Der Leiter verhält sich bei diesem Vorgang als Wirkwiderstand (Ohmscher Widerstand)
- Es gilt das Ohmsche Gesetz
 - ⇒ Im Wirkwiderstand sind Spannung und Strom in jedem Zeitpunkt in gleicher Phase

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Induktiver Widerstand

- Der induktive Widerstand ist der Induktivität und der Kreisfrequenz proportional und führt zu keinem Leistungsverlust

⇒ Betrachtung ohne Wirkwiderstand der Spule



Die an einer Induktivität liegende Spannung eilt dem Strom um 90° voraus

- Nach der Selbstinduktion gilt:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{d(\hat{I} \cdot \sin \omega t)}{dt}$$

- Mit dem Differentialquotienten

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot \hat{I} \cdot \cos \omega t = \omega \cdot \hat{I} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

ergibt sich die Spannung

$$u_L = L \cdot \omega \cdot \hat{I} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

- Für die Effektivwerte gilt

$$U_{L\text{eff}} = \omega \cdot L \cdot I_{\text{eff}}$$

- Der Blindwiderstand X_L ist

$$X_L = \omega \cdot L$$

Momentanwert der Leistung

- Allgemein gilt für die Leistung $p(t)$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

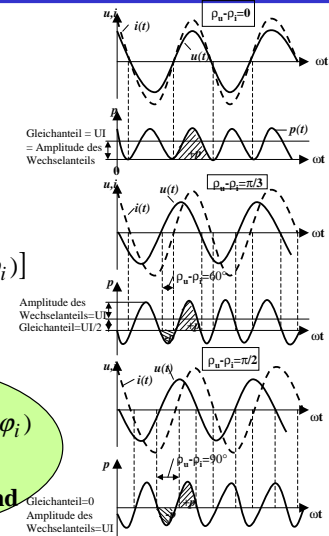
- Das Produkt kann umgeformt werden in

$$p(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u) \cdot \hat{I} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} [\cos(\varphi_u - \varphi_i) - \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)]$$

- mit $\frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$, $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$

$$p(t) = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi - U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$$

zeitlich konstant mit doppelter Frequenz schwankend



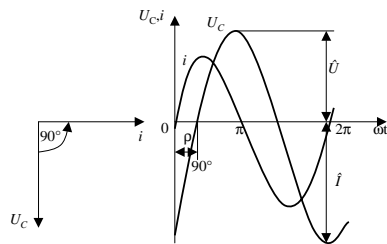
Kapazitiver Widerstand

- Der kapazitive Widerstand ist der Kapazität und der Kreisfrequenz umgekehrt proportional und führt zu keinem Leistungsverlust
- Mit der Gleichung für die Kapazität gilt:

$$i(t) = C \cdot \frac{du}{dt} = C \cdot \frac{d(\hat{U} \sin \omega t)}{dt}$$

$$= C \cdot \hat{U} \cdot \cos \omega t$$

$$= C \cdot \hat{U} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$



Die an einer Induktivität liegende Spannung eilt dem Strom um 90° voraus

- Für die Effektivwerte gilt

$$I_{\text{eff}} = \omega \cdot C \cdot U_{C\text{eff}}$$

- Der Blindwiderstand X_C ist

$$X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C}$$

1.5 Schaltvorgänge

- Ein- und Ausschalten einer Spannungsquelle

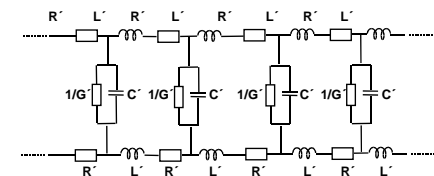
⇒ Rechteckform oder Rechteckimpuls

- Anwendung

⇒ Übertragung von Signalen auf Leitungen

- Problem:

⇒ Leitungswiderstände, Leitungsinduktivitäten und Leitungskapazitäten sind in der Regel nicht zu vernachlässigen
⇒ insbesondere bei hohen Frequenzen!



Ersatzschaltbild für ein Leiterstück

R' = Längswiderstand pro Meter Leitungslänge

L' = Induktivität pro Meter Leitungslänge

C' = Kapazität pro Meter Leitungslänge

$1/G'$ = Querwiderstand pro Meter Leitungslänge

R', L', C' = Widerstands-, Induktivitäts-, Kapazitätsbelag

Schaltverhalten an einem Widerstand

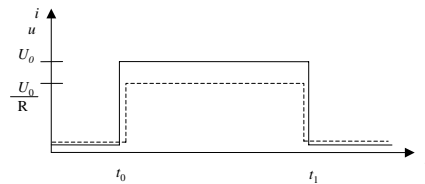
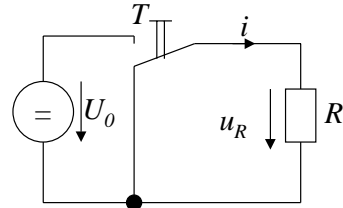
- Stromkreis mit einem reinen Widerstand
- Zum Zeitpunkt t_0 wird der Taster losgelassen
- Nach der Maschenregel gilt

$$U_0 = i \cdot R$$

$$i = \frac{U_0}{R}$$

- Daraus folgt:

- ⇒ Der Strom ändert sich sprunghaft, wenn die Spannung den Wert U_0 annimmt
- ⇒ Der Strom ist sofort null, wenn die Spannung U_0 abgeschaltet wird



U. Keschull

Schaltverhalten an einer Kapazität

- Reihenschaltung einer Kapazität C mit einem Widerstand R
- Zum Zeitpunkt t_0 wird der Taster T losgelassen

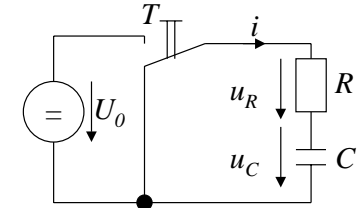
- ⇒ die Spannung steigt sprunghaft auf den Wert U_0
- ⇒ Nach der Maschenregel gilt

$$U_0 = u_R + u_C = i \cdot R + u_C$$

- Der Ladestrom zum Zeitpunkt t_0 ist dann

$$U_0 = i_{t_0} \cdot R + 0$$

$$\Rightarrow i_{t_0} = \frac{U_0}{R}$$



- Damit wird der Kondensator geladen, u_C wird ungleich Null und es folgt:

$$i_{t_i} = \frac{U_0 - u_{C,t_{i-1}}}{R}$$

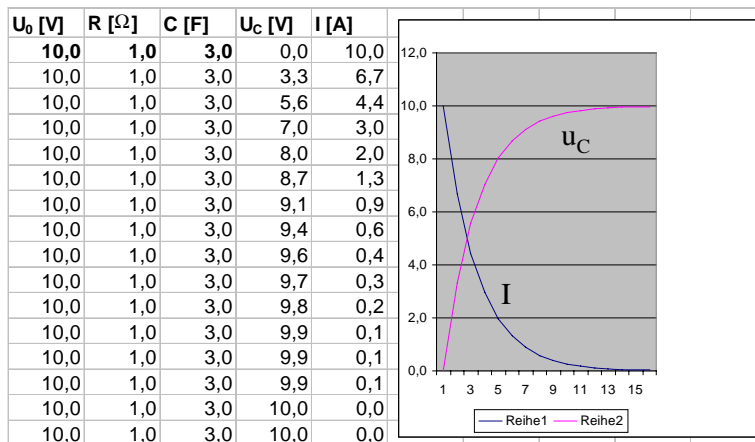
- Für die Spannung u_C am Kondensator gilt:

$$u_{C,t_i} = u_{C,t_{i-1}} + \frac{1}{C} \cdot i_{t_{i-1}} \cdot \Delta t$$

Sofern Δt hinreichend klein ist

U. Keschull

Simulation der Spannung und des Stroms am Kondensator



Simulation

U. Keschull

Schaltverhalten an einer Kapazität: Strom

- Der Ladestrom ist immer von der Differenz ($U_0 - u_C$) abhängig:

$$U_0 = i \cdot R + \frac{1}{C} \cdot i \cdot \Delta t$$

$$\Rightarrow i = \frac{U_0}{R} - \frac{1}{R \cdot C} \cdot i \cdot \Delta t$$

- Die erste Ableitung ergibt

$$\frac{di}{dt} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot i$$

oder

$$\frac{di}{i} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot dt$$

- Die Lösung dieser Differentialgleichung ist:

$$\ln i = -\frac{t}{RC} + \text{const.}$$

- Die Konstante ergibt sich durch die Anfangsbedingung

$$i_{t_0} = i_0 = \frac{U_0}{R}$$

- Damit gilt

$$\ln i = -\frac{t}{RC} + \ln \frac{U_0}{R}$$

oder

$$i = i_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

U. Keschull

Schaltverhalten an einer Kapazität: Spannung

- Für die Spannung gilt nach der Maschenregel

$$\begin{aligned}
 u_C &= U_0 - i \cdot R \\
 &= U_0 - i_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \cdot R \\
 &= U_0 - \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \cdot R \\
 &= U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right)
 \end{aligned}$$

Schaltverhalten an einer Kapazität: Abschalten

- Für die Spannung gilt nach der Maschenregel

$$0 = i \cdot R + u_C$$

- Es gilt

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{du_C}{dt}$$

- Für den Strom gilt

- Damit gilt

$$0 = C \cdot \frac{du_C}{dt} \cdot R + u_C$$

$$0 = i \cdot R + U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$\Rightarrow i = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

- oder

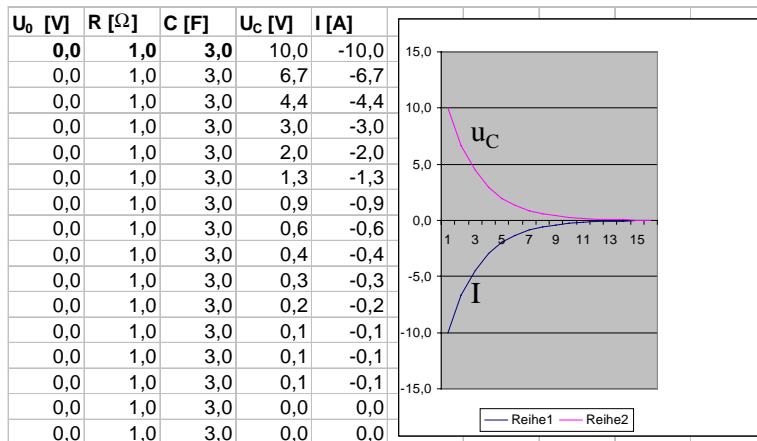
$$\frac{du_C}{u_C} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot dt$$

$$= -i_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

- Die Lösung der Gleichung lautet

$$u_C = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

Simulation der Spannung und des Stroms am Kondensator



Simulation

Schaltverhalten an einer Induktivität

- Eine Spule und ein Widerstand werden in Reihe geschaltet

- Zum Zeitpunkt t_0 wird der Taster T losgelassen

- Die Spannung steigt sprunghaft auf den Wert U_0
- Der Innenwiderstand der Spule wird vernachlässigt

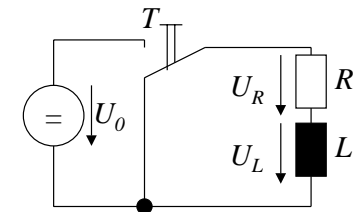
- Nach der Maschenregel gilt:

$$U_0 = u_R + u_L = i \cdot R + u_L$$

- Die Stromquelle verursacht einen veränderlichen Stromfluß

$$\frac{di}{dt}$$

der die Spannung $u_i = -L \frac{di}{dt}$ induziert



- Damit folgt:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\Rightarrow i = \frac{1}{L} \int u_L \cdot dt$$

- Mit der Maschenregel gilt:

$$u_L = U_0 - \frac{R}{L} \int u_L \cdot dt$$

Schaltverhalten an einer Induktivität

- Spannung an der Spule nach der Zeit ist

$$\frac{du_L}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot u_L$$

oder

$$\frac{du_L}{u_L} = -\frac{R}{L} \cdot dt$$

- Analog zum Kondensator ist die Lösung dieser Gleichung

$$u_L = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

- Für den Strom i gilt:

$$i = \frac{U_0}{R} - \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$= \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

$$= I \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Schaltverhalten an einer Induktivität: ausschalten

- Nach Öffnen des Schalters gilt:

$$0 = u_R + u_L = i \cdot R + u_L$$

- Damit gilt:

$$u_L = i \cdot R$$

und nach dem Induktionsgesetz

$$u_L = -i \cdot R = L \cdot \frac{di}{dt}$$

- Daraus folgt:

$$-i \cdot R = L \cdot \frac{di}{dt}$$

oder

$$\frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \cdot dt$$

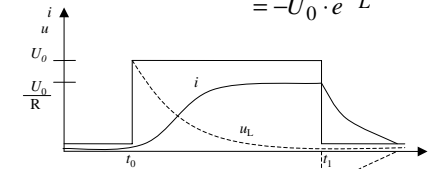
- Die Lösung der Gleichung lautet

$$i = I \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

- Für den Spannungsverlauf gilt:

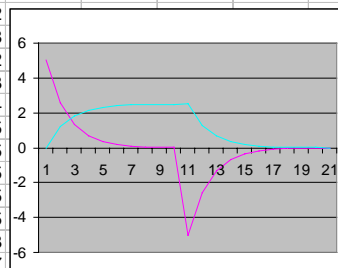
$$u_L = -I \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \cdot R$$

$$= -U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$



Simulation der Spannung und des Stroms an einer Spule

t [s]	U ₀ [V]	R [Ω]	L [H]	u _L [V]	i [A]
0	5,0	2,0	3,0	5,0	0,0
1	5,0	2,0	3,0	2,6	1,2
2	5,0	2,0	3,0	1,3	1,8
3	5,0	2,0	3,0	0,7	2,2
4	5,0	2,0	3,0	0,3	2,3
5	5,0	2,0	3,0	0,2	2,4
6	5,0	2,0	3,0	0,1	2,5
7	5,0	2,0	3,0	0,0	2,5
8	5,0	2,0	3,0	0,0	2,5
9	5,0	2,0	3,0	0,0	2,5
10	0,0	2,0	3,0	-5,0	2,5
11	0,0	2,0	3,0	-2,6	1,3
12	0,0	2,0	3,0	-1,3	0,7
13	0,0	2,0	3,0	-0,7	0,3
14	0,0	2,0	3,0	-0,3	0,2
15	0,0	2,0	3,0	-0,2	0,1
16	0,0	2,0	3,0	-0,1	0,0
17	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0
18	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0
19	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0
20	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0



Simulation

1.6 Datenübertragung

- Darstellung von Daten im Binärformat

- ⇒ Ziffern Dual, BCD
- ⇒ Zeichen ASCII, EBCDIC

- Zuordnung der „0“ und „1“ zu physikalischen Größen

- ⇒ elektrische Spannung
- ⇒ elektrischer Strom
- ⇒ magnetische Induktion
- ⇒ Lichtstärke
- ⇒ Frequenzen

- Physikalische Größen werden durch die Übertragung/Speicherung verändert werden

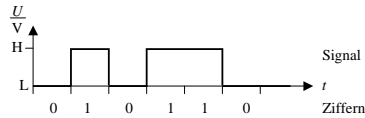
- ⇒ elektrische Bauteile
- ⇒ Leitungen

- Daten können durch die Übertragung/Speicherung verfälscht werden

Physikalische Darstellung

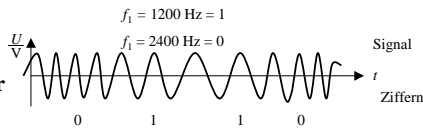
Im Computer

- ⇒ Amplitudenmodellerte Wechselspannung
- ⇒ Rechteckspannung
- ⇒ Willkürliche Zuordnung des Signalpegels zu Binärziffern
 - H-Pegel, 5 V $\hat{=}$ „1“
 - L-Pegel, 0 V $\hat{=}$ „0“



Bei Datenübertragung durch Telefon

- ⇒ Frequenzmodulation
- ⇒ Modem
- ⇒ Willkürliche Zuordnung der Frequenz zu Binärziffern
 - $f_1 = 1200 \text{ Hz} \hat{=}$ „1“
 - $f_1 = 2400 \text{ Hz} \hat{=}$ „0“



Zweidrahtleitungen

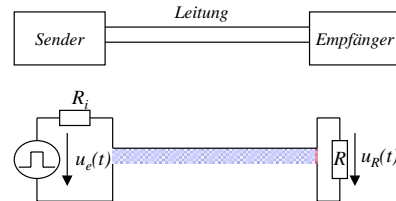
- Innerhalb des Computers werden die Daten von einen Schaltkreis zum nächsten übertragen
 - ⇒ Leiterbahnen auf Isolierflächen
 - ⇒ Flachbandkabel
 - ⇒ Länge beträgt einige cm
 - ⇒ Induktivität und Kapazität der Leiterbahn oder des Kabels können vernachlässigt werden
- Einfluß des Kabels ist nur der Ohmsche Widerstand
 - ⇒ Reduktion der Amplitude
 - ⇒ Dämpfung
 - ⇒ Wird durch die Toleranz der Schaltkreise aufgefangen

Übertragung auf langen Leitungen

Definition: Lange Leitung

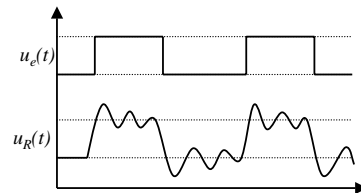
- ⇒ Die doppelte Länge ist größer als die Zeit für den 0-1- oder (1-0) Übergang mal Signalausbreitung

$$2 \cdot l > \Delta t \cdot v$$



Beispiel:

Am Ausgang eines logischen Schaltkreises wird ein Experimentierkabel von ca. 2 m Länge angebracht. Der Ausgang des Schaltkreises wechselt mit etwa 1 MHz



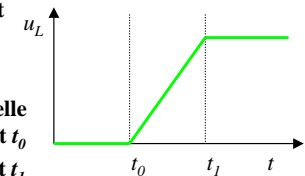
Entstehung überlagerter Schwingungen

Ursachen

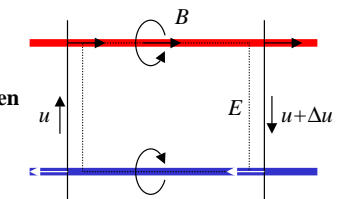
- ⇒ Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit
- ⇒ Kein idealer Rechteckimpuls

Modell

- ⇒ Einschalten einer Gleichspannungsquelle auf einer Doppelleitung zum Zeitpunkt t_0
- ⇒ Die Spannung steigt bis zum Zeitpunkt t_1
- ⇒ Zunehmende Spannung verursacht einen zunehmenden Strom und damit ein Magnetfeld
- ⇒ Aufbau des Magnetfelds induziert ein elektrisches Feld zwischen zwei Punkten auf der Leitung
- ⇒ Die Ladungen verschieben sich



- ☞ Der Vorgang wandert über die gesamte Leitung
- ☞ Es entsteht eine elektromagnetische Welle



Reflexion

- Was passiert bei inhomogenen Stellen (z.B. offenes Leitungsende)

⇒ Die Ladungsträger können sich nicht mehr weiterbewegen, aber

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

kann nicht schlagartig 0 werden

⇒ Die Welle (Energie) wird reflektiert und läuft in entgegengesetzter Richtung zurück

- Ähnliches, - wenn auch in abgeschwächter Form - tritt auf, wenn am Leitungsende die abschließende Impedanz für die Strom/Spannungsverhältnisse auf der Leitung eine Inhomogenität darstellt

⇒ In diesem Fall wird ein Teil der elektromagnetischen Welle (Energie) reflektiert

Reflexion

- Die Zeit für den Hin- und Rücklauf der Welle ist

$$T = \frac{2 \cdot l}{v}$$

⇒ v ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit

⇒ Ist die Zeit T für den Hin- und Rücklauf größer als die Impulsflankensteilheit Δt , dann können sich stehende Wellen ausbilden

$$l > l_{krit} = \frac{1}{2} \Delta t \cdot v$$

- Beispiel

⇒ Bei Standard-TTL Schaltgliedern beträgt die Impulsflankensteilheit etwa 10 ns

⇒ Die Wellengeschwindigkeit einer Doppelleitung im Vakuum beträgt etwa $3 \cdot 10^8$ m/s

⇒ daraus folgt

$$l_{krit} \approx \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,5 \text{ m}$$

Entstehung von elektromagnetischen Wellen

- Berechnung über Kirchhoffsche Sätze

⇒ Homogene Leitung:

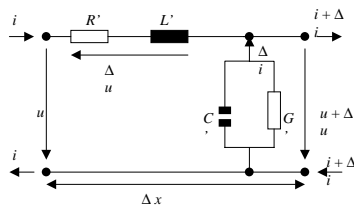
R'	[Ω/m]	Widerstandsbelag
L'	[H/m]	Induktionsbelag
C'	[F/m]	Kapazitätsbelag
G'	[S/m]	Leitwertbelag

⇒ Am Anfang des Längenelements liegt zwischen den Doppelleitungen die Spannung u und es fließt der Strom i

⇒ Am Ende herrscht die Spannung $u + \Delta u$ und es fließt der Strom $i + \Delta i$

⇒ Δu durch den ohmschen und den induktiven Widerstand

⇒ Stromänderung Δi durch den kapazitiven Widerstand und die Leitfähigkeit der Isolation



Entstehung von elektromagnetischen Wellen

- Es gilt

$$(u + \Delta u) - u - \Delta u = 0$$

$$(i + \Delta i) - i - \Delta i = 0$$

- Daraus folgt:

$$-\Delta u = R' \cdot i \cdot \Delta x + L' \cdot \frac{di}{dt} \cdot \Delta x = (R' \cdot i + L' \cdot \frac{di}{dt}) \cdot \Delta x$$

$$-\Delta i = G' \cdot u \cdot \Delta x + C' \cdot \frac{du}{dt} \cdot \Delta x = (G' \cdot u + C' \cdot \frac{du}{dt}) \cdot \Delta x$$

- Geht man zum Differentialoperator über folgt :

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R' \cdot i + L' \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G' \cdot u + C' \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

- Annahme: $R' = G' = 0$

Entstehung von elektromagnetischen Wellen

- Es folgt aus der Ableitung nach x bzw. t :

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x}$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = C' \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

- Setzt man die Gleichungen ineinander ein, so folgt:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

- Diese beiden Gleichungen beschreiben den Spannungs- und Stromverlauf auf der Doppelleitung in Abhängigkeit von x und t
- Sie werden auch Telegraphengleichungen oder Wellengleichungen genannt

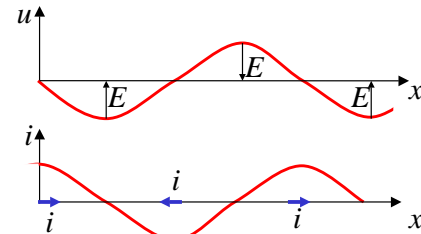
Harmonische Wellen

- Eine Lösung dieser Gleichungen ist die harmonische Welle

$$u = U_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad \text{mit } v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$$

$$i = I_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

- Entlang der Doppelleitung wandert eine Spannungs- und eine Stromwelle wie folgt:



- Die Doppelleitung dient der Führung der Welle
 ↳ Die gesamte Energie der Welle steckt im umgebenden Feldraum

Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitern

- Es gilt:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$$

- Mit Berücksichtigung der Geometrie zweier Leiter und der Definition von L' und C' gilt:

$$L' \cdot C' = \frac{L}{m} \cdot \frac{C}{m} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r$$

- Daraus folgt:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitern

- Im Vakuum gilt:

$$\epsilon_r = \mu_r = 1$$

- Daraus folgt:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}} = 3,00 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = c$$

- In Leiterplatten oder Koaxialkabeln gilt:

$$\epsilon_r \approx 2,5 \text{ und } \mu_r \approx 1$$

- Daraus folgt:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Vs}{Am} \cdot 2,5 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{As}{Vm} \cdot 1}} = 1,90 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Wellenwiderstand

- Benutzt man

$$u = U_0 \sin \omega(t - \frac{x}{v})$$

$$i = I_0 \cos \omega(t - \frac{x}{v})$$

und

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$$

als Lösungsansatz für die Ausgangsgleichung

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R' \cdot i + L' \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

- Mit der Annahme des Grenzfalles $R' = 0$, erhält man

$$U_0 = I_0 \sqrt{L' \cdot C'}$$

oder für die Impedanz

$$\frac{U_0}{I_0} = \sqrt{L' \cdot C'} = Z$$

wobei Z der Wellenwiderstand der Leitung ist

- Für jeden Punkt der Leitung gilt $u = i \sqrt{L' \cdot C'}$
- Die Spannung u setzt sich aus einem hinlaufenden Teil u_h und einem rücklaufenden Teil u_r zusammen
- Das gleiche gilt für den Strom $i = i_h + i_r$
- Durch die Überlagerung gilt

$$u = u_h + u_r$$

$$i = i_h + i_r$$

$$u = Z \cdot (i_h + i_r)$$

Wellenwiderstand

- Befindet sich am Ende der Leitung ein Empfänger mit dem Widerstand R , so gilt nach dem ohmschen Gesetz:

$$u = R \cdot (i_h - i_r)$$

- Setzt man beide Teile am Widerstand gleich, so erhält man:

$$Z \cdot (i_h + i_r) = R \cdot (i_h - i_r)$$

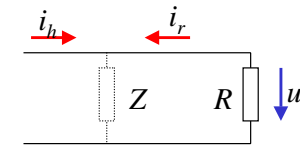
$$Z \cdot i_h + Z \cdot i_r = R \cdot i_h - R \cdot i_r$$

$$R \cdot i_r + Z \cdot i_r = R \cdot i_h - Z \cdot i_h$$

$$i_r \cdot (R + Z) = i_h \cdot (R - Z)$$

$$\frac{i_r}{i_h} = \frac{(R - Z)}{(R + Z)} = r$$

- r bezeichnet man als Reflexionsfaktor



- Der ohmsche Widerstand kann Werte zwischen 0 und unendlich annehmen
- Ist der Abschlusswiderstand R gleich dem Wellenwiderstand Z , ist $r=0$
 - Es findet keine Reflexion statt
 - Abschlusswiderstand

Abschlußwiderstände

- ISDN 100Ω
- Ethernet 50Ω
- Fernsehkabel
 - früher 60Ω
 - heute 75Ω
- Token Ring $100-150 \Omega$
- Flachbandkabel 240Ω

Übersprechen

- Neben einer stromdurchflossenen Leitung läuft ein zweiter Leiter parallel
 - elektrische Kopplung
 - magnetische Koppelung
- Bei Impulsen können diese in abgeschwächter Form als Störimpuls an der zweiten Leitung gemessen werden
 - Übersprechen



2 Halbleiterbauelemente

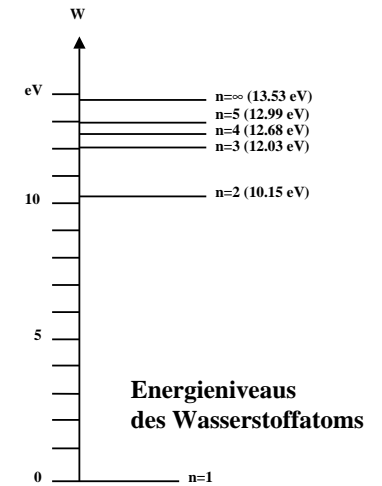
- Halbleiter besitzen einen kristallinen Aufbau ohne Metallbindung
- Die Leitfähigkeit von Halbleitern schwankt mit der Temperatur
 - ⇒ bei 0 K ist sie null
 - ⇒ bei höheren Temperaturen ist sie zwischen Metallen und Nichtleitern

Material	Widerstand (Ω/m)	Einordnung
Hartgummi	10^{16}	Nichtleiter
Glas	10^{10}	Nichtleiter
Galliumarsenid (rein)	10^3	Halbleiter
Silizium (rein)	100	Halbleiter
Silizium (dotiert)	1 bis 100	Halbleiter
Germanium (rein)	1	Halbleiter
Germanium (dotiert)	1 bis 10^{-5}	Halbleiter
Eisen	10^{-7}	Leiter
Silber	10^{-8}	Leiter

U. Kepschull

2.1 Halbleiterphysik

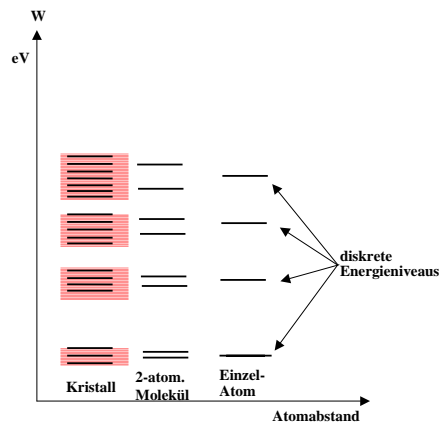
- Bohrsches Atommodell:
 - ⇒ Atom besteht aus einem *Atomkern* und einer in Schalen aufgeteilten *Atomhülle*
 - ⇒ Elektronen bewegen sich auf *Bahnen (Schalen)*
 - ⇒ Jeder Schale mit der Nummer n entspricht ein *Energieniveau*
 - ⇒ Übersteigt die Energie einen bestimmten Wert, so ist es nicht mehr an das Atom gebunden ($n=\infty$)



U. Kepschull

Energiebändermodell

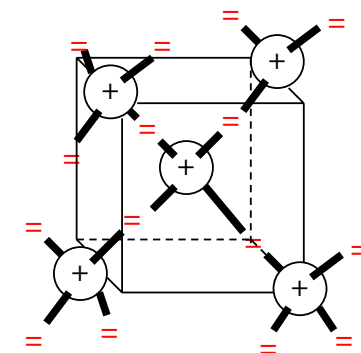
- In dicht gepackten Kristallstrukturen findet eine Wechselwirkung zwischen den Atomen statt
 - ⇒ erlaubte und verbotene Bereiche
 - ⇒ die diskreten Energieniveaus verschmelzen zu Energiebändern



U. Kepschull

Kristallstruktur in Germanium und Silizium

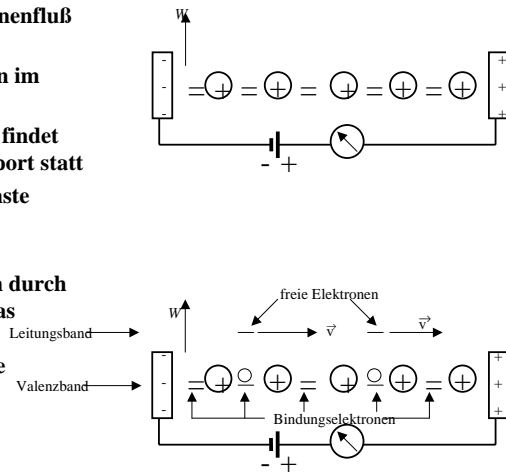
- Kristallstruktur
 - ⇒ regelmäßig angeordnetes Atomgefüge
- Amorphe Struktur
 - ⇒ kein regelmäßiges Atomgefüge
- Mischkristalle
 - ⇒ Fremdatome sind in die Kristallstruktur eingebaut
- Polykristalle
 - ⇒ Mehrere Kristalle bilden ein Gefüge
- Einkristall
 - ⇒ der Körper besteht aus einem einzigen Kristall
- In Siliziumkristallen sind die Atome in einer Tetraederstruktur aufgebaut



U. Kepschull

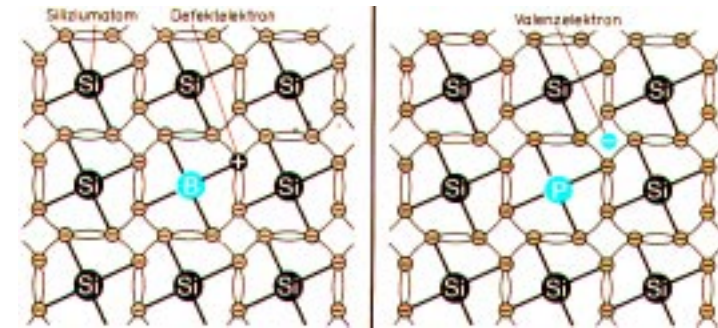
Valenz- und Leitungsband

- In voll besetzten oder in leeren Bändern ist ein Elektronenfluß nicht möglich
- Valenzband: Elektronen im obersten Energieband
 - ist dies voll besetzt, findet kein Ladungstransport statt
- Leitungsband: das nächste Energieband über dem Valenzband
 - Werden Elektronen durch Energiezufuhr in das Leitungsband gehoben, können sie sich in diesem frei bewegen



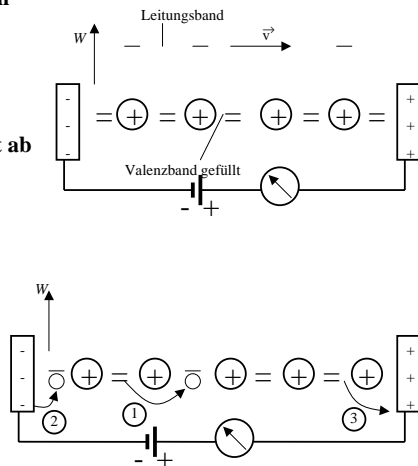
Dotierte Halbleiter

- Gezielter Einbau von Fremdatomen in Silizium- oder Germaniumkristalle durch *Dotierung*
 - zusätzliche Valenzelektronen durch Arsen (As), Antimon (Sb) oder Phosphor (P)
 - fehlende Valenzelektronen durch Aluminium (Al), Bor (B) oder Indium (In)



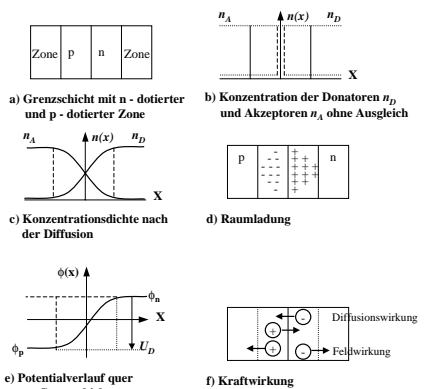
Leitfähigkeit durch Störstellen

- Geringe Energie reicht aus, um das Elektron in das Leitungsband zu heben
- Donatoratom
 - Das Atom gibt das zusätzliche Elektron leicht ab
 - n-Dotierung
- Akzeptoratom
 - Das Atom nimmt ein Elektron leicht auf
 - p-Dotierung



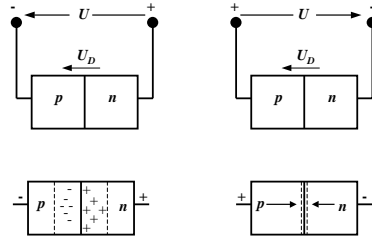
pn-Übergang

- Grenzschicht zwischen p- und n-dotierten Schicht
- Ein Ausgleich der Ladungsträger durch Diffusion über die Grenzschicht
 - Es entsteht ein elektrisches Feld
- wenn Diffusionswirkung und Feldwirkung gleich sind
 - Gleichgewicht
 - Ladungsträgerfreie Zone
 - Diffusionsspannung U_D
- Bei Zimmertemperatur
 - Germanium $U_D = 0,37 \text{ V}$
 - Silizium $U_D = 0,75 \text{ V}$



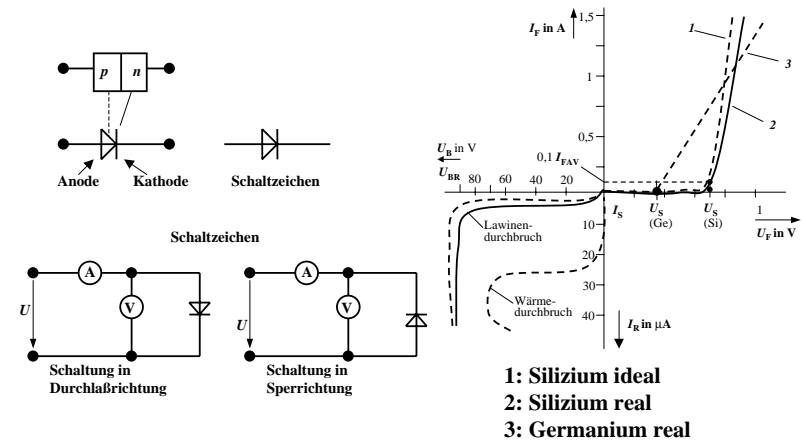
2.2 Halbleiterdioden

- Bauelemente, welche die Leitfähigkeitseigenschaften eines pn-Übergangs benutzen
- pn-Übergang mit äußerer Spannung
- Sperrichtung
 - ⇒ Ladungsträgerfreie Zone wird größer
 - ⇒ Es fließt kein Strom
 - ⇒ Durchbruch, wenn die Feldstärke (Spannung) zu groß wird (*Zener-Effekt*)
- Durchlaßrichtung
 - ⇒ Ladungsträgerfreie Zone wird kleiner
 - ⇒ Wenn $U > U_D$ wird, fließt ein Strom



U. Keschull

Kennlinie des pn-Übergangs

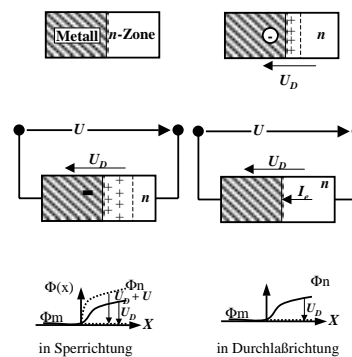


- 1: Silizium ideal
- 2: Silizium real
- 3: Germanium real

U. Keschull

Halbleiterdioden mit besonderen Eigenschaften

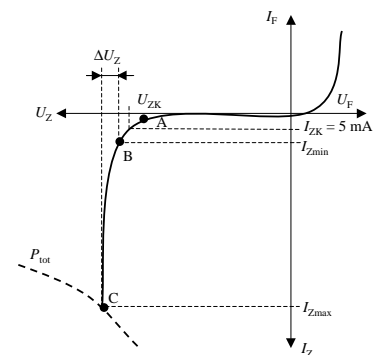
- Schottky-Dioden
 - ⇒ Beruht auf dem von Schottky entwickelten Metall-Halbleiter Übergang
 - ⇒ Diffusion wie bei pn-Übergang
- Wirkung wie bei normaler Diode, aber wesentlich schneller
 - ⇒ Keine Speicherung von Energie in der Sperrschicht
- Anwendung
 - ⇒ extrem schnelle Schaltioden
 - ⇒ schnelle Bipolare Schaltkreise
 - ⇒ Gleichrichterioden
 - ⇒ Mikrowellendioden (bis 15 GHz)



U. Keschull

Halbleiterdioden mit besonderen Eigenschaften

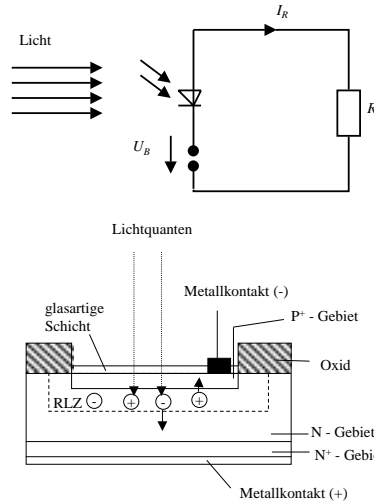
- Z-Dioden
 - ⇒ Ausnutzung des Zener-Effekts
 - ⇒ Steil abfallende Kennlinie
 - ⇒ Strom darf einen Höchstwert I_{Zmax} nicht überschreiten
- Anwendung
 - ⇒ Spannungsbegrenzung bei Wechselspannungen
 - ⇒ Referenzspannung in Gleichspannungsnetzteilen



U. Keschull

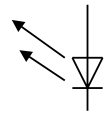
Fotodioden

- Fotodioden sind so konstruiert, daß Licht an den pn-Übergang gelangen kann
 - ⇒ Ein einfallendes Lichtquant erzeugt ein Elektron-Loch-Paar (Photoeffekt)
- Fotodioden werden in Sperrichtung betrieben
 - ⇒ Ist kein Licht vorhanden, fließt kein Strom
 - ⇒ Bei Lichteinfall fließt durch den Photoeffekt ein Strom
- Anwendung
 - ⇒ Lichtschranken
 - ⇒ Datenübertragung mit Lichtwellenleitern



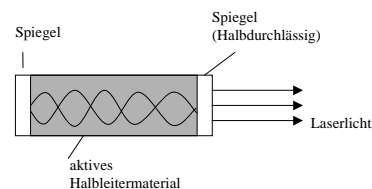
Halbleiterdioden mit besonderen Eigenschaften

- Limenissenzdioden (Light Emitting Diode, LED)
 - ⇒ pn-Übergang mit hoher Dotierung
 - ⇒ Betrieb in Durchlaßrichtung
 - ⇒ Durchlaßstrom injiziert Ladungsträger in den p- und n-Bereich
 - ⇒ Durch die hohe Zahl der Überschusselektronen (n-Bereich) bzw. Löcher (p-Bereich) werden Ladungsträger aus dem Leitungsband in das Valenzband gezogen (Rekombination)
 - ⇒ Durch den Energieerhaltungssatz muß Energie abgegeben werden
 - ⇒ Es entsteht ein Lichtquant
- Anwendung
 - ⇒ Anzeigen
 - ⇒ Datenübertragung durch Lichtwellenleiter
 - ⇒ Optokoppler



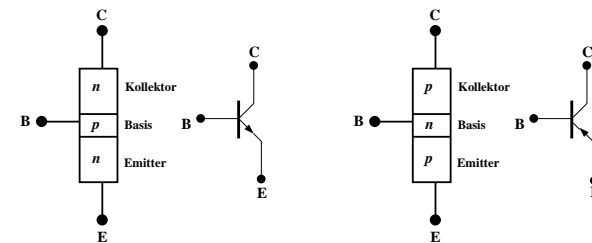
Halbleiterdioden mit besonderen Eigenschaften

- Laserdioden
 - ⇒ Elektronen können durch ein elektromagnetisches Strahlungsfeld in vom Leitungsband in das Valenzband übergehen
 - ⇒ Dabei muß die Frequenz des Strahlungsfelds mit der Energiedifferenz ΔE übereinstimmen
 - ⇒ Verstärkung des Effekts durch eine stehende Lichtwelle zwischen zwei Spiegeln (Laseroszillator)
- Anwendung
 - ⇒ Sender für Lichtwellenleiter
 - ⇒ Abtasten von Speichermedien (CD)



2.3 Bipolartransistoren

- Ausnutzen der Eigenschaft zweier pn-Übergänge
 - ⇒ NPN-Transistor
 - ⇒ PNP-Transistor
- Von jeder Zone wird ein Anschluß herausgeführt
 - ⇒ Emitter (E)
 - ⇒ Basis (B)
 - ⇒ Collector (C)

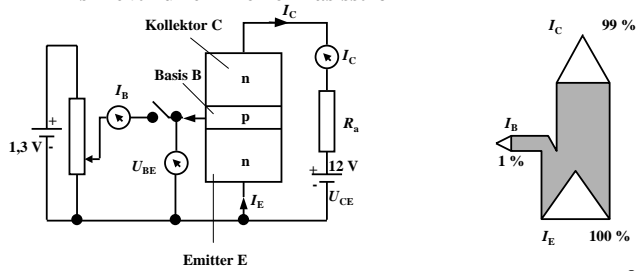
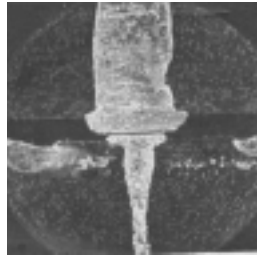


NPN-Transistor

PNP-Transistor

Der Transistoreffekt

- Basis des Transistors ist sehr dünn
 - ⇒ Die Emitter-Basis-Diode wird in Durchlaßrichtung gepolt
 - ⇒ Die meisten der Elektronen fließen jedoch nicht über die Basis ab, sondern werden vom Kollektor aufgenommen (starkes elektrisches Feld)
 - ⇒ Es fließt nur ein kleiner Basisstrom

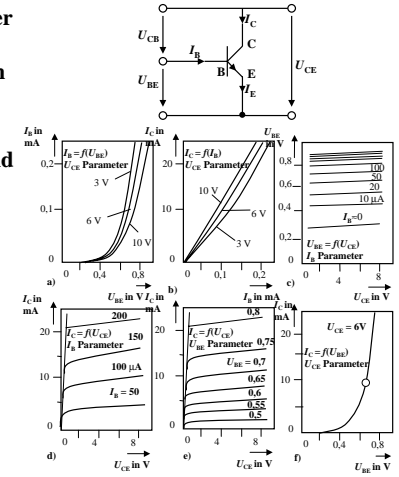


Der Transistoreffekt

- Erhöht man die Spannung an der Basis, so bleibt der Basisstrom relativ klein, der Kollektorstrom wächst hingegen relativ stark
 - ⇒ Der Transistor ist ein stromgesteuerter Widerstand
- Stromverstärkung

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$
- Der Basisstrom steuert den Kollektorstrom

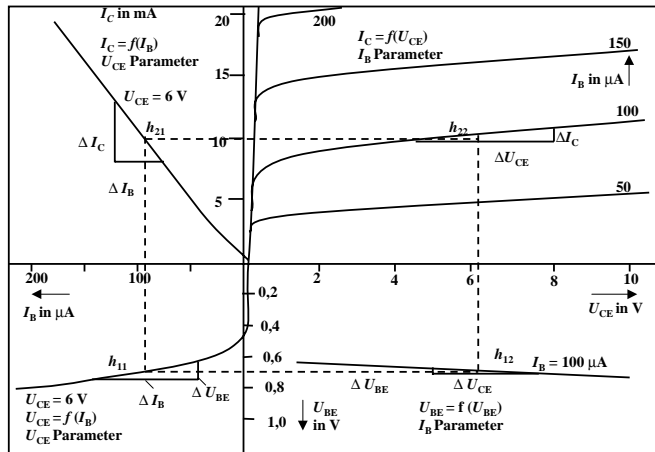
$$I_B \cdot B = I_C$$



a) Eingangskennlinien, b) Übertragungskennlinien, c) Rückwirkungskennlinien, d) Ausgangskennlinien (Stromsteuerung), e) Ausgangskennlinien (Spannungssteuerung), f) Strom-Spannungs-Steuerkennlinie

Kennlinienfeld

Basis- und Kollektorstrom



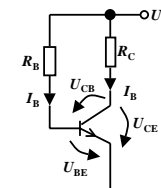
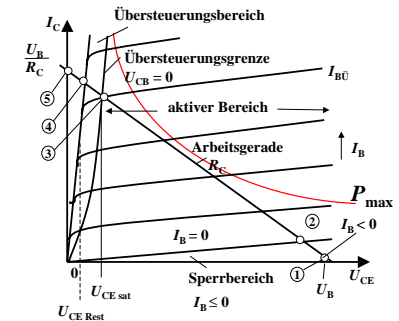
Ausgangskennlinienfeld

Eingangskennlinienfeld

Rückwirkung

Arbeitspunkt

- Die Arbeitspunkte können sich nur entlang der Arbeitsgeraden verschieben
- Sperrbereich
 - ⇒ AP 1 bis AP 2
 - ⇒ $I_B < 0, U_{CE} \approx U_B, I_C \approx 0$
 - ⇒ Schalter aus
- Aktiver Bereich
 - ⇒ AP 2 bis AP 3
 - ⇒ Transistor als Verstärker
- Sättigungsbereich
 - ⇒ Übersteuerung
 - ⇒ AP 3 bis AP 4
 - ⇒ $I_C \approx U_B/R_C$
 - ⇒ Schalter ein

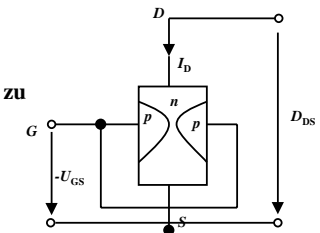
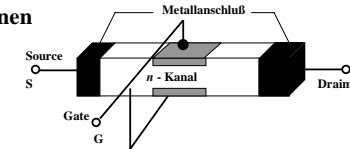


2.4 Unipolare Transistoren

- Im Gegensatz zum Bipolartransistor wird bei unipolaren Transistoren der Strom durch eine Spannung gesteuert
 - ⇒ Elektrisches Feld
 - ⇒ Feldeffekt-Transistor (FET)
 - ⇒ Spannungsgesteuerter Widerstand
- Sperrschicht-FET
 - ⇒ Isolation des Gates durch gesperrten pn-Übergang
 - ⇒ Ausdehnung einer pn-Sperrschicht
- Isolierschicht-FET
 - ⇒ Isolation des Gates durch Isolator (Siliziumoxid, SiO₂)
 - ⇒ Beeinflussung der Leitfähigkeit durch Influenz
- Anschlüsse
 - ⇒ Source S (Quelle)
 - ⇒ Drain D (Senke)
 - ⇒ Gate G (Tor)
 - ⇒ Bulk B (Masse, Substrat)

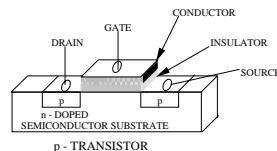
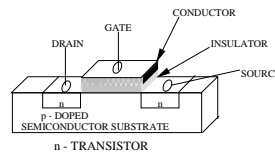
Sperrschicht-Feldeffekttransistor (FET)

- Am Gate liegt eine negative Spannung U_{GS} an
 - ⇒ Sperrschichten um die p-Zonen dehnen sich aus
- Wird die Gatespannung negativer
 - ⇒ Querschnitt kleiner
 - ⇒ Widerstand höher
- Kanaleinschnürung
 - ⇒ Überlagerung der Gate- und Drainspannung
 - ⇒ Erhöhen der Drainspannung U_{DS} führt zu Berührung der Raumladungszonen
- Gatedurchbruch
 - ⇒ Elektrischer Durchschlag der Isolation
- Draindurchbruch
 - ⇒ Das elektrische Feld wird so stark, daß die Abschnürung überwunden wird
 - ⇒ Begrenzung der Drainspannung



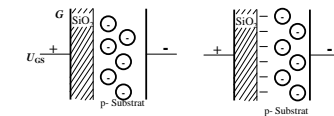
Isolierschicht-FET (MOS-FET)

- Gateelektrode ist durch eine dünne Oxidschicht getrennt
 - ⇒ MOS: Metal Oxide Semiconductor
- n-MOS
 - ⇒ Das gesteuerte Halbleiter-Substrat ist p-dotiert
 - ⇒ Die Anschlüsse sind stark n-dotiert
 - ⇒ n-Kanal-MOS-FET
- p-MOS
 - ⇒ Der gesteuerte Halbleiter-Substrat ist n-dotiert
 - ⇒ Die Anschlüsse sind stark p-dotiert
 - ⇒ p-Kanal-MOS-FET
- Da die n-Zonen (p-Zonen) weit auseinanderliegen, kommt es nicht zum Transistoreffekt

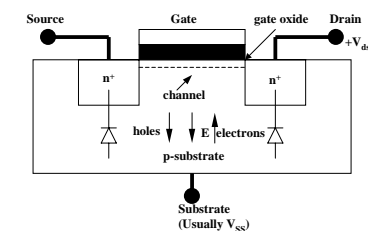


Der n-MOS-Transistor

- Anreicherungstyp
 - ⇒ enhancement
 - ⇒ selbstsperrend
- Funktionsweise
 - ⇒ Unter der Oxidschicht werden durch Influenz Ladungsträger angesammelt
 - ⇒ Die Raumladungen (Löcher) werden zurückgedrängt
 - ⇒ Es bildet sich ein n-Kanal
 - ⇒ Die Dicke des Kanals hängt von U_{GS} ab

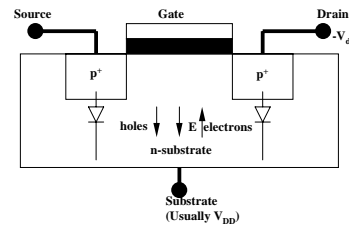


○ ortsfeste Raumladungen
 - - Ladungsträger
 $0 < U_{GS} < U_{th}$ $U_{GS} > U_{th}$



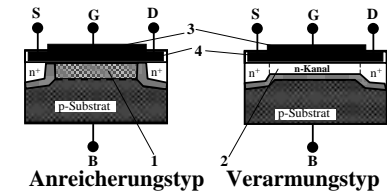
Der p-MOS-Transistor

- Alle Dotierungen sind umgekehrt
- Funktionsweise
 - ⇒ Wie bei n-MOS Tansistor
 - ⇒ Statt Ladungsträger werden Löcher unter der Oxidschicht durch Influenz angesammelt
 - ⇒ Es bildet sich ein leitender p-Kanal



Selbstleitende MOS-Transistoren

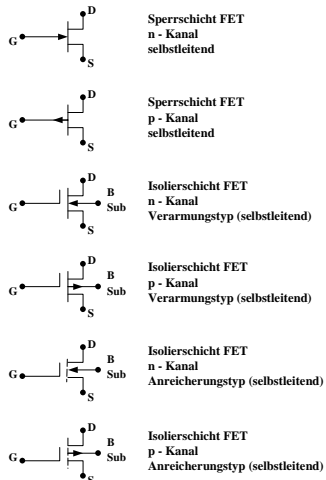
- Verarmungstyp
 - ⇒ depletion
- Funktionsweise
 - ⇒ Bei der Herstellung des Transistors wird bereits ein Kanal zwischen Source und Drain diffundiert
 - ⇒ Der Transistor ist auch ohne Gatespannung leitend, da dotiertes Halbleitermaterial leitet
 - ⇒ Elektrische Spannung am Gate schnürt den Kanal ein
- n-MOS und p-MOS-Verarmungstypen haben in elektronischen Schaltkreisen nur als Widerstände Bedeutung



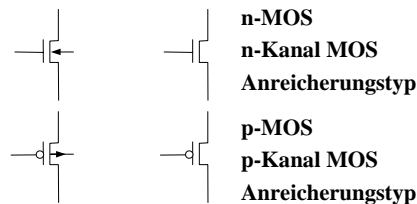
- 1: Anreicherungszone
- 2: Verarmungszone
- 3: Metall oder polykristallines Silizium
- 4: SiO₂ Isolationsschicht

MOS-Transistorschaltbilder

- In deutschsprachigen Büchern



- In englischsprachigen Büchern



Achtung: Der n-MOS Verarmungstyp in deutschsprachigen Büchern sieht aus wie der n-MOS Anreicherungstyp in englischen Büchern

Der Body-Effekt

- Bei integrierten Schaltungen sind zahlreiche Transistoren auf einem gemeinsamen Substrat aufgebaut
 - ⇒ Oft sind Transistoren so geschaltet, daß Source und Substrat nicht auf dem gleichen Potential liegen
 - ⇒ Source eines Transistors ist mit dem Drain eines anderen Transistors verbunden
 - ⇒ Dadurch vergrößert sich die Verarmungszone unter der Isolationsschicht
- Die Folgen
 - ⇒ Der Strom unter dem Transistor wird behindert
 - ⇒ Die Schwellspannung wird höher

3.1 Der Transistor als Schalter

- Elektronische Verknüpfungsglieder werden aus Halbleiterbauelementen aufgebaut
 - ⇒ Binäre Schaltvariablen werden nach den Gesetzen der Schaltalgebra miteinander verknüpft
 - ⇒ Werte entsprechen der Zweiwertigkeit von Schalterzuständen
- Im folgenden gilt:
 - ⇒ „Ein“ entspricht „1“, 5 V, POWER oder VDD
 - ⇒ „Aus“ entspricht „0“, 0 V, GROUND oder VSS
- Verknüpfungsglieder werden zu komplexen Schaltnetzen und Schaltwerken zusammengefaßt
 - ⇒ Die Schaltglieder müssen die gleichen Signalpegel besitzen

Idealer Schalter

- Annahme: der Verknüpfungsvorgang
 - ⇒ erfordert keine Leistung
 - ⇒ benötigt keine Zeit
 - ⇒ Im Schalter fällt keine Spannung ab
- Im Schalterzustand „Ein“

$$R_i = \emptyset$$

$$I = \frac{U_B}{R}$$

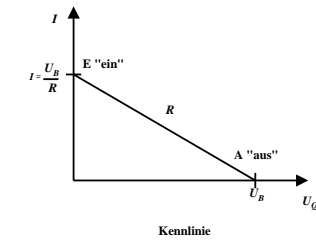
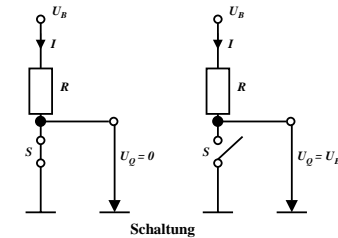
$$U_Q = 0$$

- Im Schalterzustand „Aus“

$$R_S = \infty$$

$$I = 0$$

$$U_Q = U_B$$



Realer Schalter

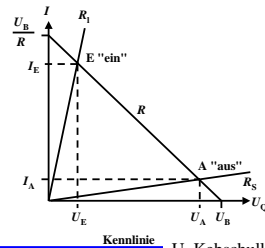
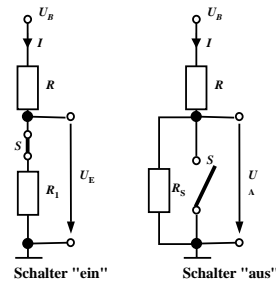
- R_i kann nicht 0 sein
- R_S kann nicht unendlich werden
 - ⇒ in der Praxis versucht man, R_i möglichst klein und R_S möglichst groß zu machen

- Im Schalterzustand „Ein“

$$I_E = \frac{U_B}{R + R_i}; U_E = \frac{U_B \cdot R_i}{R + R_i}$$

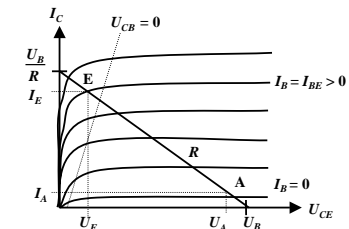
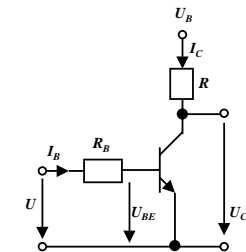
- Im Schalterzustand „Aus“

$$I_A = \frac{U_B}{R + R_S}; U_A = \frac{U_B \cdot R_S}{R + R_S}$$



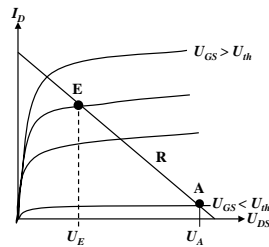
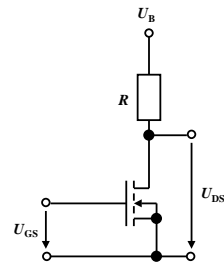
Bipolartransistor als Schalter

- Schaltvorgang wird durch den Basisstrom I_B gesteuert
 - ⇒ Schalter Ein: Transistor leitet
 - ⇒ Schalter Aus: Transistor sperrt
- Die Arbeitspunkte werden so berechnet, daß sich der Transistor im Übersteuerungsbereich befindet



MOS-Transistor als Schalter

- **Hauptsächlich selbstsperrende Transistoren**
 - ⇒ n-MOS und p-MOS
 - ⇒ Verwendung wie bei Bipolartransistoren
- **Vorteil gegenüber Bipolaren Transistoren**
 - ⇒ Die Ansteuerung benötigt keine Leistung



U. Keschull

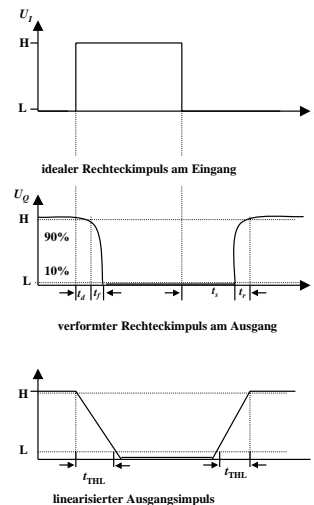
Kenngrößen: Signalpegel

- **Die Signale nehmen nie genau GND oder die Versorgungsspannung an**
 - ⇒ Ein Transistor ist kein idealer Schalter
 - ⇒ Übersprechen zwischen benachbarten Leitungen
 - ⇒ Der Eingang des nachfolgenden Transistors hat Auswirkungen auf den vorgehenden
- **Störspannungen**
- **Zur Eliminierung der Störspannungen definiert man Pegel**
 - ⇒ High: die Spannung ist hoch
 - ⇒ Low: die Spannung ist nieder
- **Die Pegel werden willkürlich logischen Werten zugeordnet**
 - ⇒ High ist logisch „1“
 - ⇒ Low ist logisch „0“
 - ⇒ bei negativer Logik sind diese Pegel umgekehrt

U. Keschull

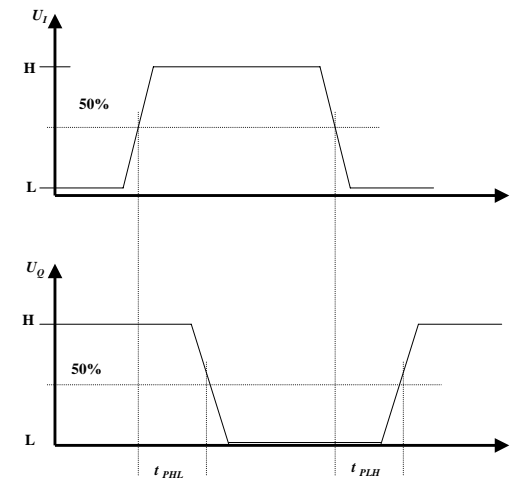
Kenngrößen: Signalübergangszeit und -laufzeit

- **Signalübergangszeit**
 - ⇒ Flankensteilheit
 - ⇒ Übergang von „H“ nach „L“ oder „L“ nach „H“
- **Signallaufzeit**
 - ⇒ Zeit die ein Signalimpuls vom Eingang der Schaltung bis Ausgang benötigt
- **Signalverformung**
 - ⇒ Da der Transistor im Sättigungsbereich betrieben wird, dauert der „H“ nach „L“ Übergang länger als der „L“ nach „H“ Übergang



U. Keschull

Schaltvorgang eines Inverters



U. Keschull

3.2 Verknüpfungsglieder mit Bipolaren Transistoren

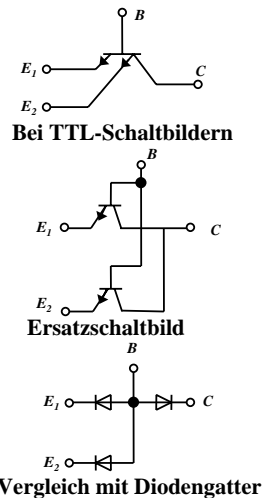
- Schaltkreisfamilien
 - ⇒ TTL Transistor-Transistor-Logic
 - Betrieb im Übersteuerungsbereich
 - ⇒ I²L Integrated Injection Logic
 - Betrieb im Übersteuerungsbereich
 - ⇒ ECL Emitter Coupled Logic
 - Betrieb im aktiven Verstärkerbereich
 - ⇒ STTL Schottky TTL
 - Betrieb im aktiven Verstärkerbereich

TTL-Schaltkreise

- 74xxx haben auch heute noch große Bedeutung
 - ⇒ geringe Schaltzeiten
 - ⇒ geringe Leistungsaufnahme
 - ⇒ große Zahl verschiedener Verknüpfungsglieder
 - ⇒ einheitliche Betriebsspannung (genormt auf +5V)
 - ⇒ genormte Signalpegel
- Verwendung auch als Bibliothek in Schaltkreis-Entwurfssystemen

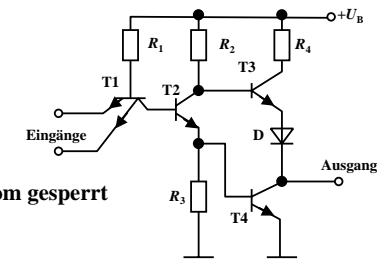
Multiemitter-Transistoren

- Transistor mit mehr als einem Emmitter
 - ⇒ nur in integrierten Bausteinen realisiert
 - ⇒ Emmitter sind Eingänge
- Normalbetrieb
 - ⇒ mind. 1 Eingang auf „L“:
 - ⇒ Kollektor-Emmitter-Strecke ist niederohmig
 - ⇒ BE-Diode leitend
- Inversbetrieb
 - ⇒ alle Eingänge auf „H“
 - ⇒ BE-Diode gesperrt
 - ⇒ BC-Diode in Durchlaßrichtung
- Wirkung als UND-Verknüpfung



Grundsaltung der Standard-TTL

- Drei Ebenen
 - ⇒ UND-Einfächerung T1
 - ⇒ Phasenumkehrstufe T2
 - ⇒ Gegentaktendstufe T3, T4
- Mindestens ein Emmitter auf „L“:
 - ⇒ BE-Diode von T1 ist leitend
 - ⇒ T2 wegen zu geringen Basistrom gesperrt
 - ⇒ Emmitterpotential von T2 = 0
 - ⇒ T3 leitend, T4 gesperrt
 - ⇒ Ausgang = „H“
- Alle Emmitter auf „H“:
 - ⇒ BE-Diode von T1 gesperrt
 - ⇒ BC-Diode von T1 in Durchlaßrichtung
 - ⇒ T2 leitend
 - ⇒ T4 leitend, T3 wegen Spannungsabfall an D gesperrt
 - ⇒ Ausgang = „L“



Lastfaktoren

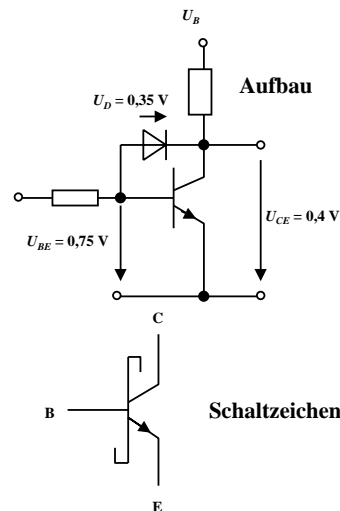
- Verknüpfungsglieder werden in Schaltnetzen miteinander verbunden
 - ⇒ von einem Schaltglied werden andere Schaltglieder gesteuert
- Typische TTL-Werte
 - ⇒ bei „L“-Pegel ($0V \leq U_{IL} \leq 0,8V$)
 - es fließt ein Eingangsstrom von $-I_{IL} \leq 1,6 \text{ mA}$
 - der Ausgangsstrom darf 16mA betragen
 - ⇒ bei „H“-Pegel ($+2V \leq U_{IH} \leq 5V$)
 - es fließt ein Eingangsstrom $I_{IH} \leq 0,04 \text{ mA}$
 - der Ausgangsstrom darf 0,4 mA nicht übersteigen
- Fan-out
 - ⇒ Belastbarkeit: Anzahl der ansteuerbaren Verknüpfungsglieder
 - ⇒ Bei TTL: Faktor 10
- Fan-in
 - ⇒ Faktor zur typischen Eingangslast einer Bausteinfamilie

Varianten von TTL-Schaltkreisen

- Unterschiedliche Dimensionierung der Widerstände beeinflusst die Eigenschaften der Schaltungen
- Low-Power-TTL
 - ⇒ Widerstände sind hochohmig
 - ⇒ kleinerer Stromfluß
 - ⇒ geringere Leistungsaufnahme
 - ⇒ langsamer
- High-Speed-TTL
 - ⇒ Widerstände sind niederohmig
 - ⇒ größerer Stromfluß
 - ⇒ höhere Leistungsaufnahme
 - ⇒ schneller

Schottky TTL

- Transistoren werden nicht im Übersteuerungsbereich betrieben
 - ⇒ Schottky-Diode zwischen Basis und Kollektor
 - ⇒ Schwellenspannung der Schottky-Diode bei 0,35 V
 - ⇒ nach der Maschenregel beträgt die Spannung $U_{CE} = 0,4 \text{ V}$
 - ⇒ die steile Kennlinie der Diode verhindert ein weiteres Durchsteuern



Vergleich der TTL-Baureihen

TTL - Baureihe	Verzögerungszeit je Gatter t_p in ns	Verlustleistung je Gatter P_V in mW	Leistungs-Zeit-Produkt $P_V t_p$ in pJ
74ALS	4,5	1,2	5,4
74F	2,3	4	9,2
74LS	9,5	2	19
74AS	1,5	22	33
74L	33	1	33
74S	3,5	19	66,5
74	10	10	100

74ALS Advanced-Low-Power-Schottky-TTL (weiterentwickelte LS-TTL)
 74F Fast-TTL (schnelle S-TTL)
 74LS Low-Power-Schottky-TTL (S-TTL mit niedriger Verlustleistung)
 74AS Advanced-Schottky-TTL (weiterentwickelte S-TTL)
 74 L Low-Power-TTL (TTL mit niedriger Verlustleistung)
 74 S Schottky-TTL (schnelle TTL)
 74 TTL (Standard-TTL)

Vergleich der TTL-Baureihen

Vergleich zwischen TTL-Baureihen und Lastfaktoren

1 TTL-Gatter der Baureihe treibt max.	Anzahl der TTL-Eingänge in der Baureihe						
	74ALS	74F	74AS	74LS	74L	74S	74
74ALS	20	20	10	20	40	10	10
74F	25	25	10	25	48	10	12
74AS	50	50	10	50	100	10	10
74LS	20	50	8	20	40	10	5
74L	10	10	1	10	20	1	2
74S	50	50	10	50	100	10	12
74	20	20	8	40	40	8	10

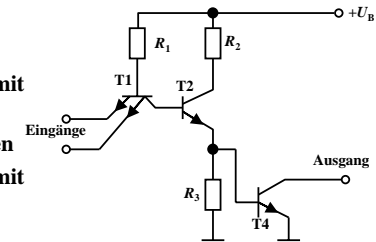
Stromgrenzwerte von TTL-Gattern verschiedener Baureihen

TTL-Baureihe	-IOH in μA	IOL in μA	IHH in μA	-IIL in μA
74LS	400	8000	20	400
74L	200	3600	10	180
74S	1000	20000	50	2000
74	400	16000	40	1600

U. Kecschi

Open-Collector

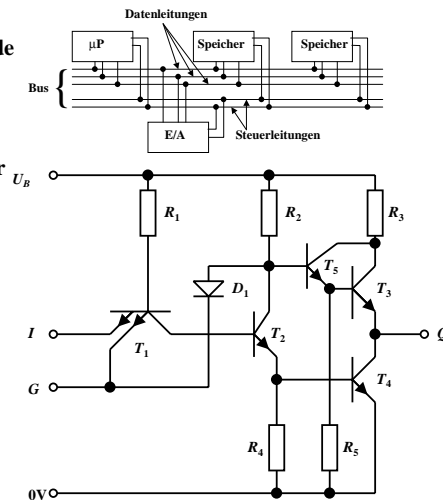
- Der Kollektor des Transistors T_4 wird direkt nach Außen geführt
 - Anschluß des Verbrauchers an die Betriebsspannung über einen Arbeitswiderstand
- Anwendung
 - Schalten von Verbrauchern mit höheren Lasten
 - Relais, Leuchtdioden, Lampen
 - Schalten von Verbrauchern mit höheren Betriebsspannungen



U. Kecschi

Tri-State Ausgang

- Spezielle Ansteuerung der Gegentaktstufe so daß beide Transistoren sperren
 - der Ausgang wird hochohmig
- Zusammenschaltung mehrerer Ausgangsleitungen an einer gemeinsamen Leitung
 - Busse

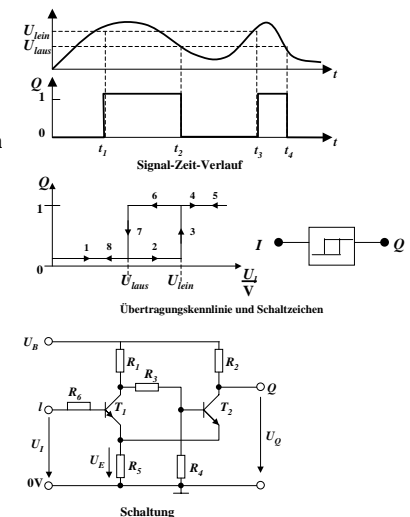


G	I	Q
H	L	H
H	H	L
L	L	hochohmig
L	H	hochohmig

U. Kecschi

Schmitt-Trigger

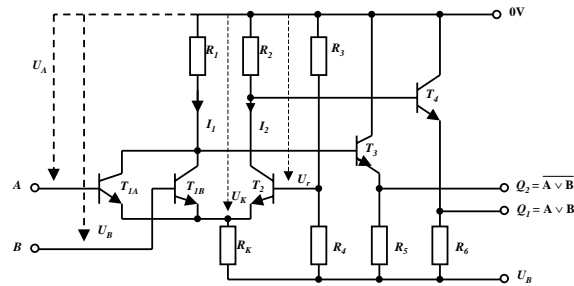
- Schaltungen mit einem Analogeingang und einem Digitalausgang
- Prinzip
 - die Arbeitspunkte der beiden Transistoren beeinflussen sich gegenseitig
- Anwendungen
 - Impulsformung und Signalregenerierung
 - Erhöhung der Flankensteilheit
 - Unterdrückung von Störsignalen



U. Kecschi

ECL-Schaltkreise

- **Emitter-gekoppelte Logik**
 - ⇒ Emitterfolger
 - ⇒ Differenzverstärker
 - ⇒ Transistoren arbeiten nicht im Übersteuerungsbereich
 - ⇒ kleine Schaltzeiten
 - ⇒ hoher Leistungsverbrauch
- **Geringer Störabstand**
 - ⇒ „H“ 0,8V bis 0,7V
 - ⇒ „L“ 1,7V bis 1,5V
- **Anwendung**
 - ⇒ Großrechner-technik



I²L-Schaltkreise

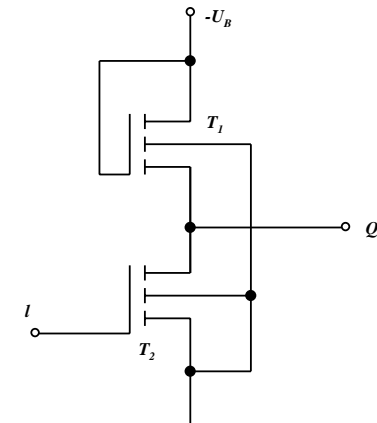
- **Integrierte Injektionslogik**
 - ⇒ Widerstände werden durch Transistoren ersetzt
 - ⇒ Konstantstromquellen
 - ⇒ extrem kleiner Flächenbedarf, da Transistoren weniger Fläche benötigen als Widerstände
 - ⇒ kleine Leistungsaufnahme
 - ⇒ geringe Versorgungsspannung (< 1V)
 - ⇒ Spannungshub und Störsicherheit sind sehr klein (< 0,6V)
- **Anwendung**
 - ⇒ hochintegrierte Schaltung
 - ⇒ heute kaum Bedeutung, da CMOS inzwischen noch besser integrierbar ist

3.3 Verknüpfungsglieder mit unipolaren Transistoren

- **Bausteine mit hochintegrierten digitalen Schaltungen werden heute meist in MOS-Technologie realisiert**
 - ⇒ hohe Integration
 - ⇒ einfache Herstellung
 - ⇒ geringere Leistungsaufnahme (speziell CMOS)
- **Verknüpfungsglieder**
 - ⇒ PMOS Schaltkreise mit p-Kanal FET
 - ⇒ NMOS Schaltkreise mit n-Kanal FET
 - ⇒ CMOS Schaltkreise mit p-Kanal und n-Kanal FET

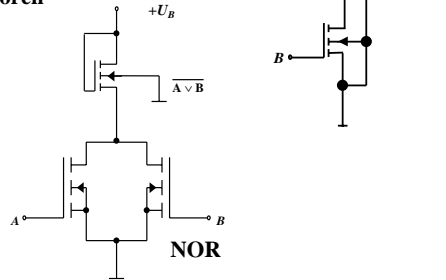
PMOS Schaltkreise

- **Selbstsperrender PMOS-Transistor (T₁)**
 - ⇒ der Transistor T₁ wirkt wie ein Widerstand
- **Vorteile**
 - ⇒ einfache Herstellbarkeit
- **Nachteile**
 - ⇒ hohe Schwellspannung (5V)
 - ⇒ hohe Versorgungsspannung (-9 bis -20V)
 - ⇒ relativ große Schaltzeit
- **Realisierung der Logik durch Parallel- und Serienschaltung der Transistoren**



NMOS Schaltkreise

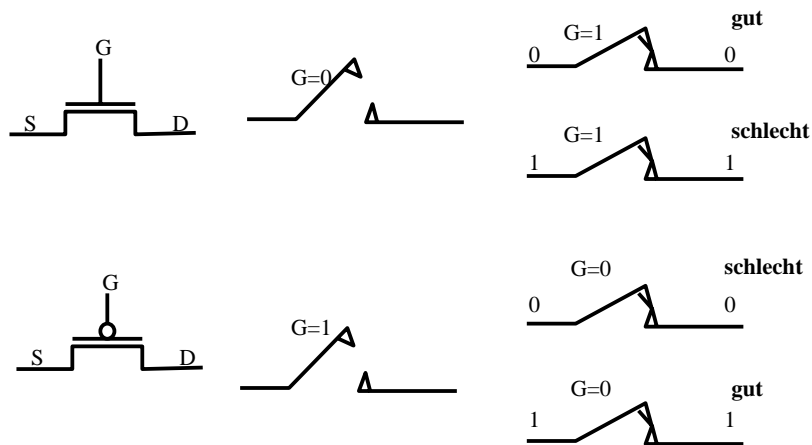
- Selbstsperrender NMOS-FET
- Vorteile
 - ⇒ geringere Schaltzeiten
 - ⇒ höhere Packungsdichte
 - ⇒ geringere Betriebsspannung
 - ⇒ geringerer Leistungsverbrauch
- Realisierung der Logik durch Parallel- und Serienschaltung der Transistoren



CMOS Schaltkreise

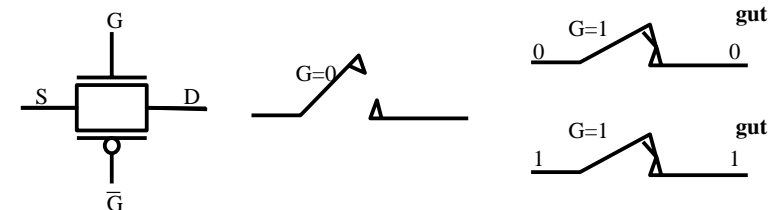
- Complementary Metal Oxide Transistor
 - ⇒ Selbstsperrende NMOS und PMOS FET
- NMOS und PMOS-FETs können nicht beliebig an die Versorgungsspannung bzw. an GND geschaltet werden
 - ⇒ die Stärke der „0“ und der „1“ kann variieren
 - ⇒ die Stärke entspricht der „Fähigkeit“ als Quelle oder Senke von Elektronen zu dienen
 - ⇒ POWER und GND sind die stärksten Quellen bzw. Senken
- NMOS- und PMOS-Transistoren schalten unterschiedlich
- der Schalter ist unterschiedlich gut, je nachdem ob zwischen Source und Drain eine „1“ oder eine „0“ geschaltet wird. Der Grund dafür ist der Spannungsabfall beim Übergang
- ACHTUNG: In den folgenden Folien wird die amerikanische Notation der Transistoren verwendet!

Der MOS-Transistor als Schalter



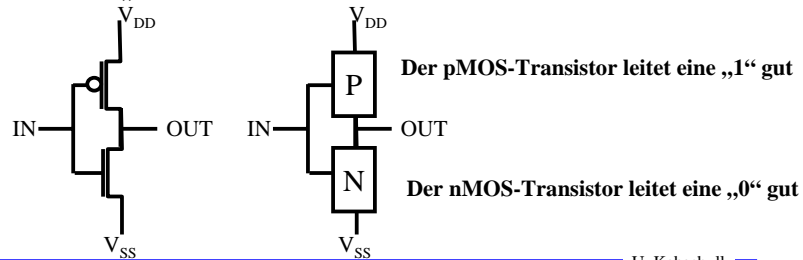
Komplementärschalter (Transmission Gate)

- Die Übertragungscharakteristika bei Transmission Gates sind jetzt in beiden Fällen gut
- Trotzdem sollte man nicht mehrere Komplementärschalter hintereinanderschalten
- Zur Steuerung benötigt man beide Signale G und \bar{G} .



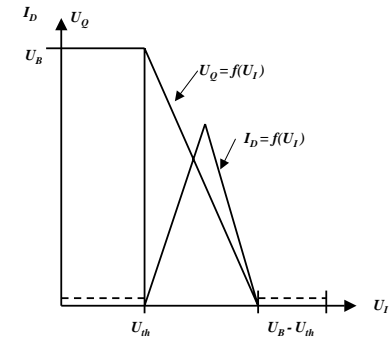
CMOS-Logik

- CMOS steht für Complementary MOS und bedeutet, daß immer ein Transistor von POWER nach GROUND gesperrt ist
 - ⇒ Es fließt ein minimaler Strom.
- CMOS-Inverter
- Ein nMOS und ein pMOS Transistor werden in Reihe geschaltet.
 - ⇒ Der pMOS-Transistor leitet, wenn eine „0“ anliegt und sperrt bei einer „1“
 - ⇒ Der nMOS-Transistor sperrt, wenn eine „0“ anliegt und leitet bei einer „1“



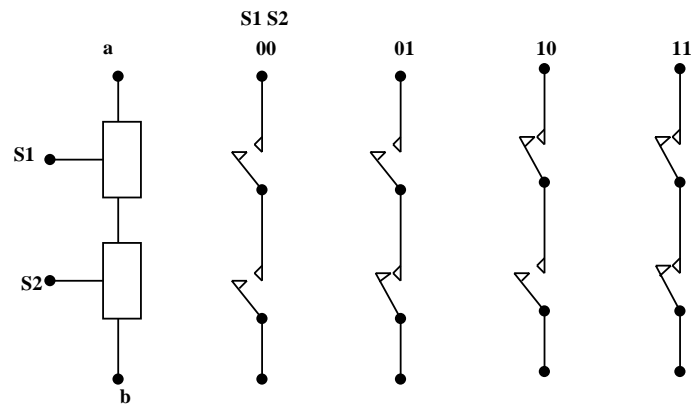
Schaltverhalten eines CMOS-Gatters

- bei CMOS Schaltkreisen ist die statische Verlustleistung sehr gering
 - ⇒ bei $U_B = 5V$ und $I_D < 10 nA$ gilt $P < 50 nW$
- beim Umschalten ist ein Transistor noch nicht voll gesperrt, während ein Transistor bereits leitend wird

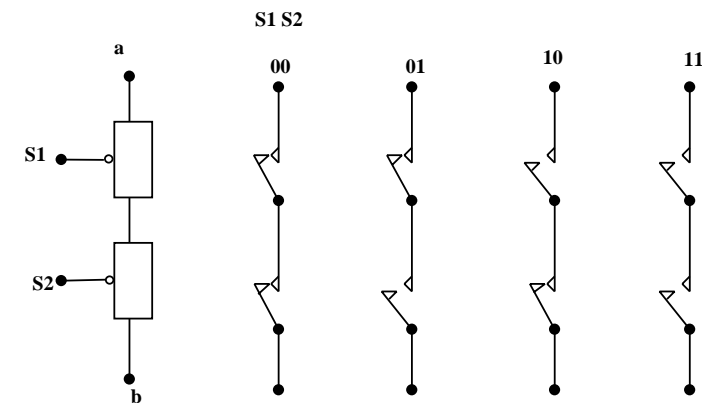


nMOS und pMOS-Grundsaltungen

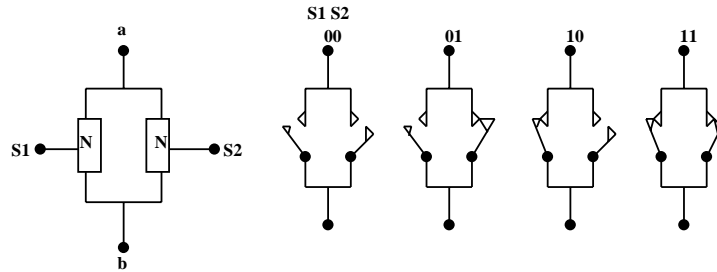
- Reihenschaltung von nMOS-Transistoren



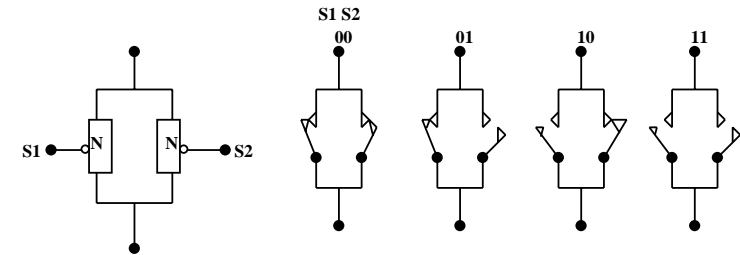
Reihenschaltung von pMOS-Transistoren



Parallelschaltung von nMOS-Transistoren

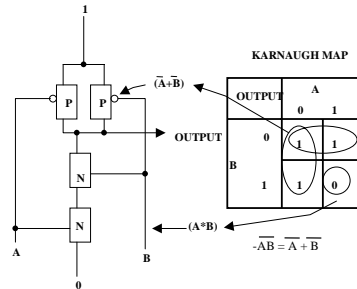


Parallelschaltung von pMOS-Transistoren

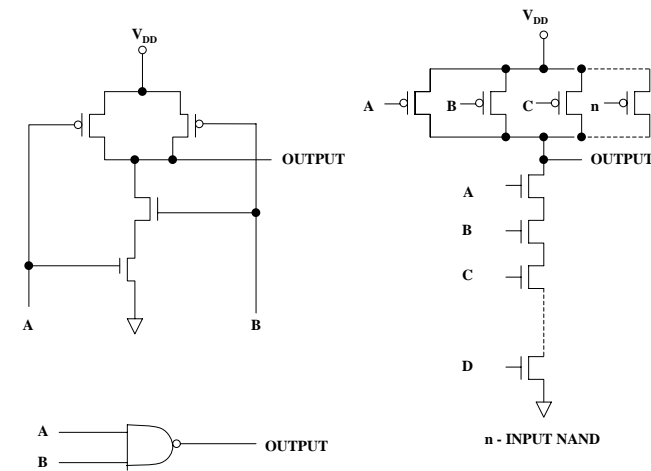


Das NAND-Gatter

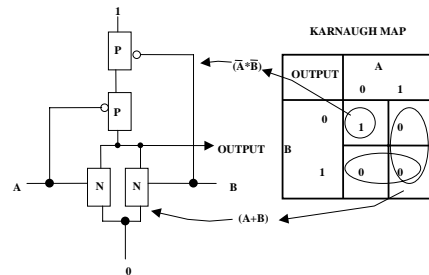
- Das NAND-Gatter wird aus den nMOS- und pMOS-Grundsaltungen gebildet.
- Dabei wird das KV-Diagramm durch die KV-Diagramme der Grundsaltungen überdeckt.
- Die Transistoren werden stets so benutzt, daß sie gut leiten.
 - ⇒ „1“: Überdeckung durch pMOS
 - ⇒ „0“: Überdeckung durch nMOS



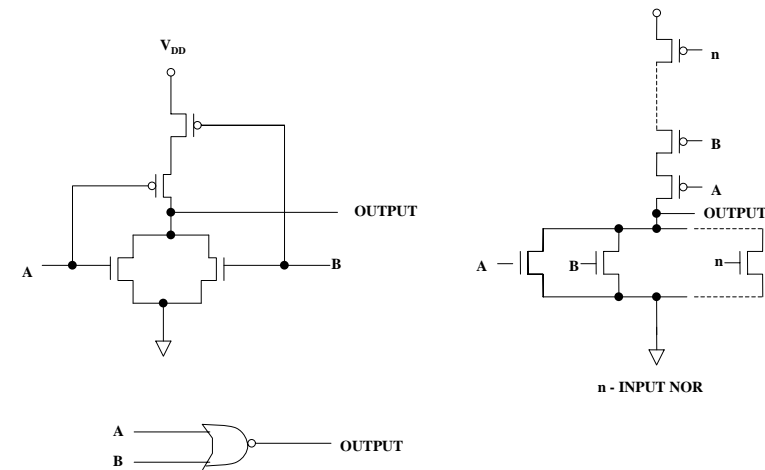
NAND-Schaltung



Das NOR-Gatter

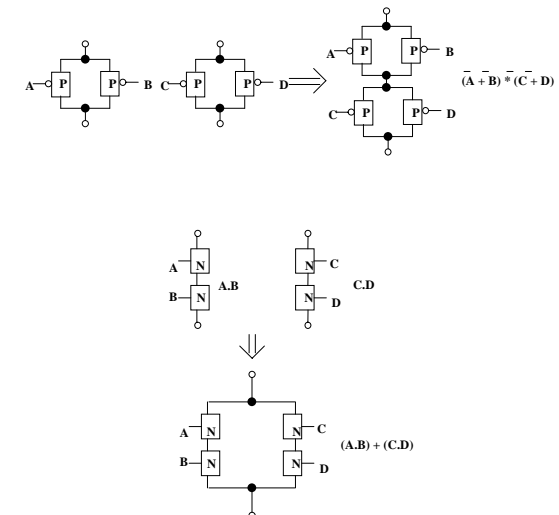


NOR-Schaltung

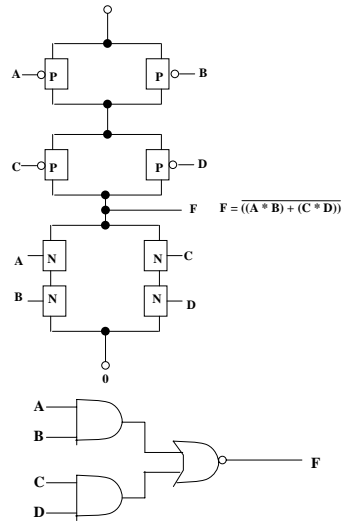


Komplexgatter

- **Komplexgatter sind Gatter, die komplexere Funktionen implementieren** Beispiel: die Funktion: $f(A,B,C,D)=(A*B)+(C*D)$ wird gebildet aus einer Reihe von Serien- und Parallelschaltungen
- **n-Seite der Schaltung:**
 - ⇒ nicht-invertierter Teil der Schaltung
 - ⇒ $A*B$ und $C*D$ werden durch Serienschaltungen implementiert
 - ⇒ die ODER-Verknüpfung wird durch Parallelschaltung der beiden Terme implementiert
- **p-Seite der Schaltung:**
 - ⇒ Negation der Gleichung ergibt: $f(A,B,C,D)=(\overline{A+B}) * (\overline{C+D})$
 - ⇒ invertierter Teil der Schaltung
 - ⇒ $\overline{A+B}$ und $\overline{C+D}$ werden durch Parallelschaltungen implementiert
 - ⇒ die UND-Verknüpfung wird durch Parallelschaltung der beiden Terme implementiert

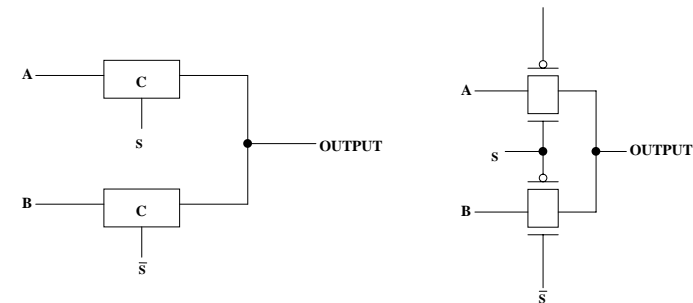


Die vollständige Schaltung



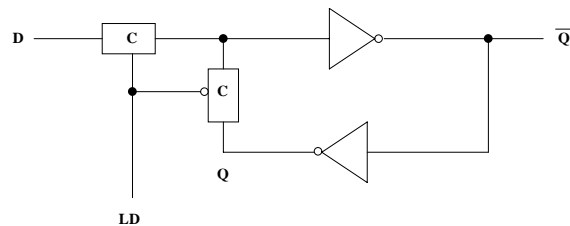
Multiplexer

- Multiplexer können aus Komplementärschaltern aufgebaut werden.
- „0“ und „1“ werden gleich gut übertragen
- Das Steuersignal wird positiv und negiert benötigt
- Schaltbild des Multiplexers

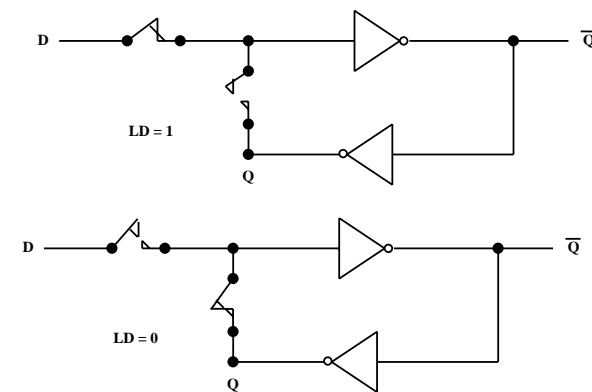


Speicher

- Auch ein Flipflop kann aus den bisher behandelten CMOS-Strukturen aufgebaut werden.
- Man benötigt zwei Inverter und einen Multiplexer.
- Das Flipflop besitzt Latch-Verhalten:
- Die Ausgabe folgt der Eingabe, wenn LD=1
- Die Ausgabe speichert den letzten Wert, wenn LD=0
- Schaltbild:



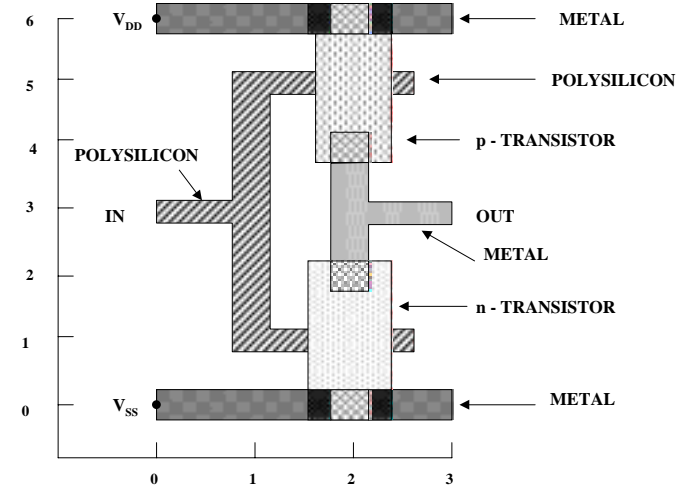
Schaltverhalten



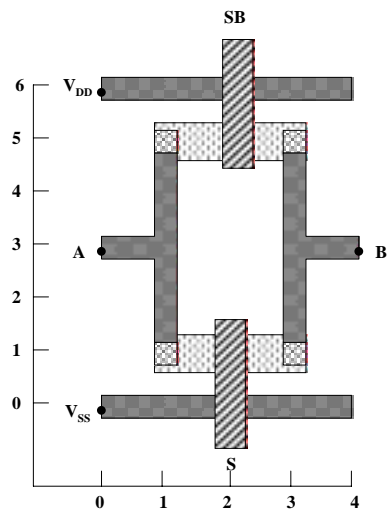
Physikalische Darstellung von MOS-Schaltkreisen

- Die physikalische Darstellung von MOS-Schaltkreisen wird benutzt um zu beschreiben, wie der physikalische Aufbau einer integrierten Schaltung ist. Im Prinzip können daraus automatisch die Belichtungsmasken erstellt werden.
- Die einzelnen Transistoren entstehen durch Übereinanderlegen von Schichten
 - ⇒ p-Diffusion (positiv dotiert)
 - ⇒ n-Diffusion (negativ dotiert)
 - ⇒ Polysilizium (Gate)
 - ⇒ Metall1 und Metall2
 - ⇒ Kontakte

Beispiel Inverter



Beispiel Komplementärschalter

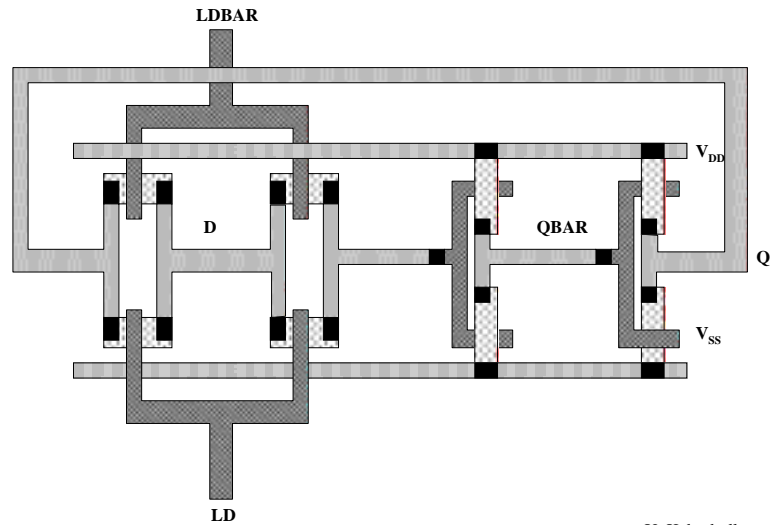


sprachliche Beschreibung des Layouts eines Komplementärschalters

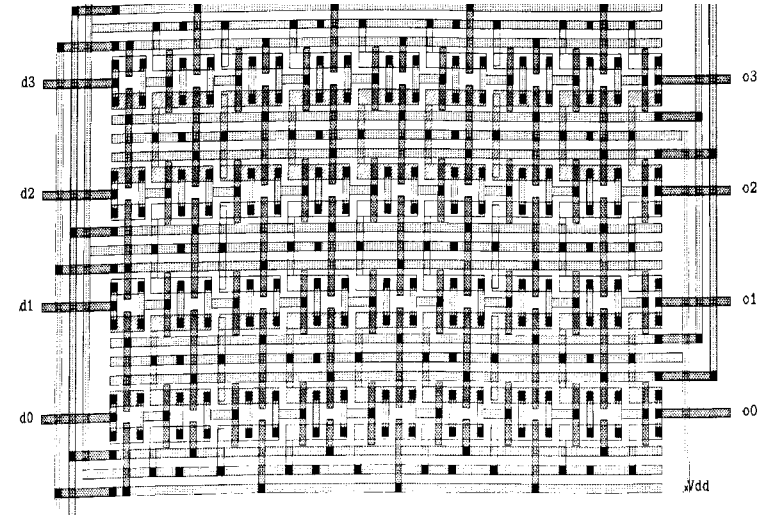
```

begin tg
t1: device n (2,1) or=east
t2: device p (2,5) or=east
    wire alum (0,0)(4,0)
    wire alum (0,6)(4,6)
    wire poly (2,-1)(2,1)
    wire poly (2,7)(2,5)
    wire alum (1,1)(1,5)
    wire alum (3,1)(3,5)
    wire alum (0,3)(1,3)
    wire alum (3,3) (4,3)
    contact md (1,1)
    contact md (3,1)
    contact md (1,5)
    contact md (3,5)
end
    
```

Beispiel Flipflop



Beispiel Schieberegister

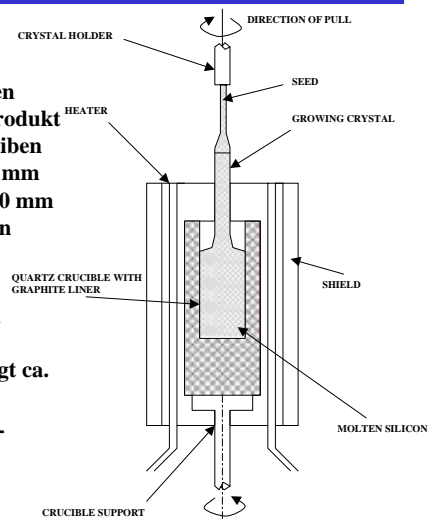


4 Der CMOS-Fertigungsprozess

4.1 Herstellung von Wafern

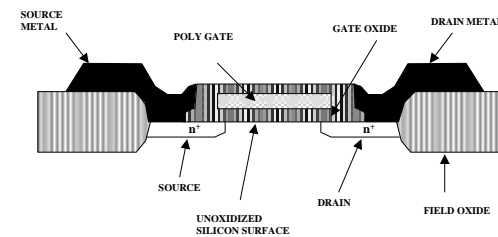
In diesem Abschnitt folgt eine Übersicht, wie CMOS-Schaltungen gefertigt werden. Das Ausgangsprodukt sind monokristalline Siliziumscheiben deren Dicke zwischen 0,25 und 1 mm und deren Durchmesser 75 bis 150 mm beträgt. Diese Scheiben nennt man Wafer

- Monokristallin bedeutet, daß das Silizium in einer möglichst reinen Kristallstruktur erstarrt. Der Schmelzpunkt von Silizium beträgt ca. 1425 °C
- Heute wird meist die Czochralski-Methode angewandt bei der die Wachstumsrate ca. 30 bis 180 mm/Stunde beträgt



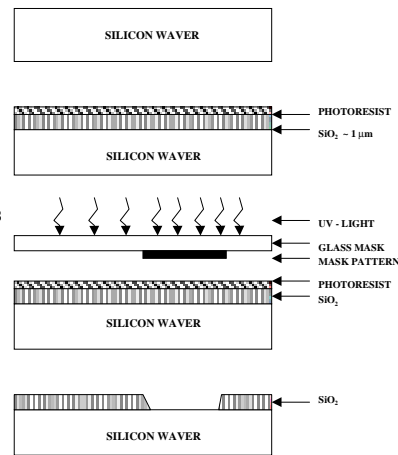
Oxydation

- Siliziumoxyd (SiO_2) ist ein guter Isolator. Es wird erzeugt, indem der Wafer einer oxydierenden Umgebung ausgesetzt wird
- Wasserdampf bei 900°C bis 1000°C (schnelle Oxydierung)
- Sauerstoff bei 1200°C (langsame Oxydierung)
- SiO_2 besitzt etwa das doppelte Volumen von Silizium und es wächst sowohl vertikal als auch horizontal



Selektive Diffusion

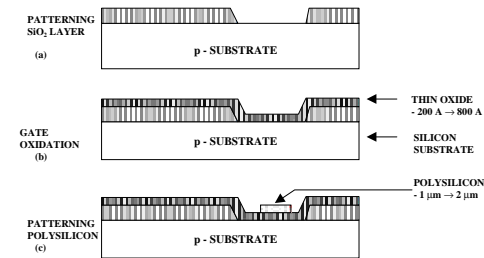
- Selektive Diffusion ist das Erzeugen verschieden dotierter Siliziumschichten.
- Flächen müssen dabei
 - ↳ beliebige Formen annehmen können
 - ↳ genau plaziert sein
 - ↳ genau skaliert sein
- Das SiO₂ verhindert den Dotierungsvorgang. Es kann später durch eine Säure entfernt werden, die das Silizium nicht angreift.
- Prinzip der selektiven Dotierung:
 - ↳ Oxydieren der Siliziumoberfläche
 - ↳ Beschichten mit einem lichtempfindlichen Lack
 - ↳ Belichten mit UV-Licht über eine Maske
 - ↳ Entfernen des nicht belichteten Photolacks und des darunterliegenden Siliziumoxyds



U. Keschull

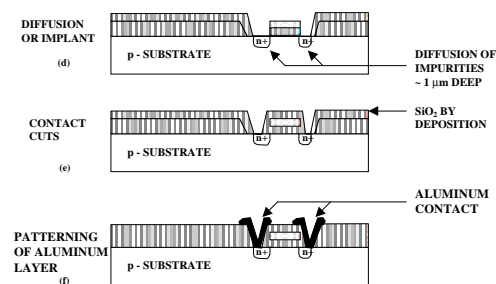
4.2 Entstehung eines nMOS Transistors

- Zunächst wird der Wafer mit einer dicken SiO₂-Schicht überdeckt
- An den Stellen, an denen Transistoren entstehen sollen, werden diese freigelegt (a)
- Die gesamte Fläche wird mit einer dünnen, sehr einheitlichen SiO₂-Schicht überdeckt (b)
- Der Wafer wird mit einem Photolack überzogen und an den Stellen, an denen Gates entstehen sollen, freigelegt. Polykristallines Silizium wird aufgedampft (c)



U. Keschull

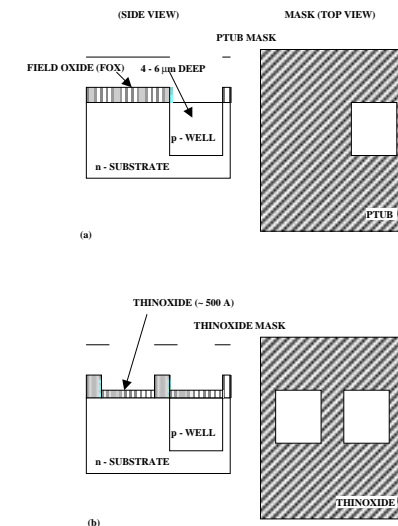
- Mit den gleichen Arbeitsschritten werden die Flächen für die negative Dotierung freigelegt. Die freigelegten Flächen werden negativ dotiert (d). Der Wafer wird erneut mit einer SiO₂-Schicht überdeckt
- Die Kontaktstellen werden durch Ätzung freigelegt.
- Die Metallbahnen zur Verbindung werden aufgedampft.



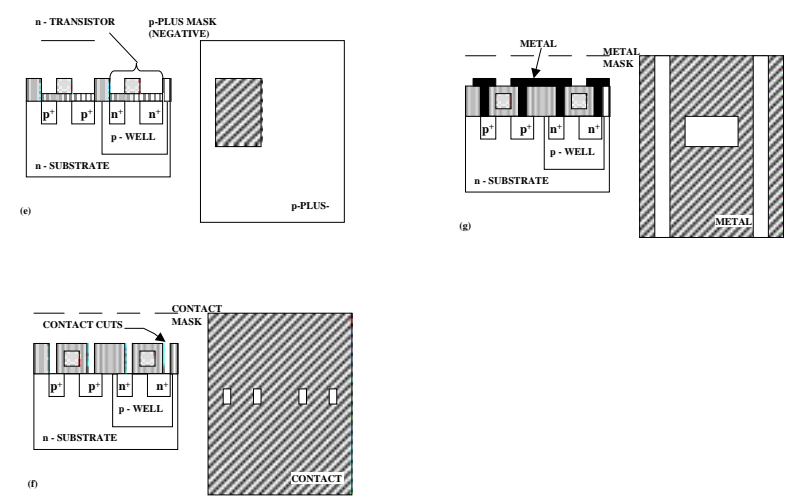
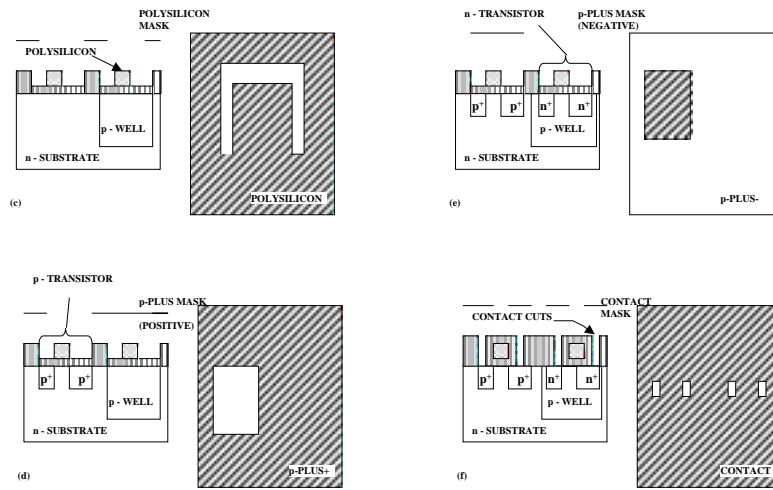
U. Keschull

4.3 Entstehung eines CMOS-Inverters

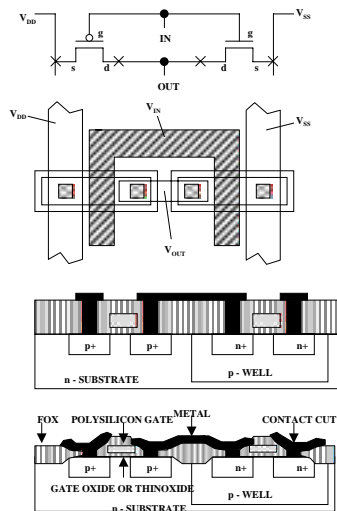
- Beim CMOS-Prozess müssen negativ dotierte Flächen für pMOS-Transistoren geschaffen werden (p-Well, p-Wannen).



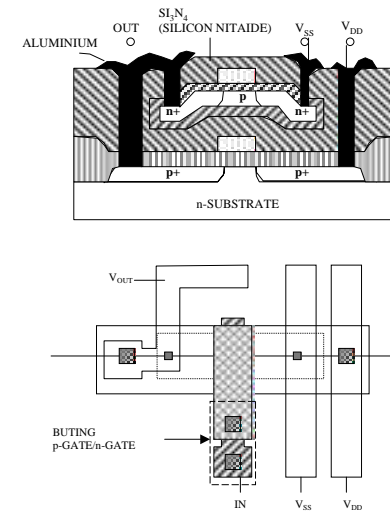
U. Keschull



Zusammenhang zwischen Schaltplan und Realisierung

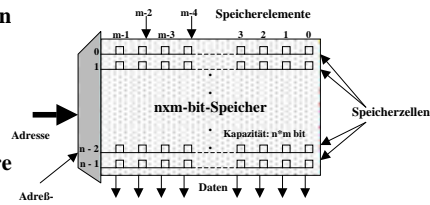


Moderne CMOS-Techniken: ein 3D-CMOS-Inverter



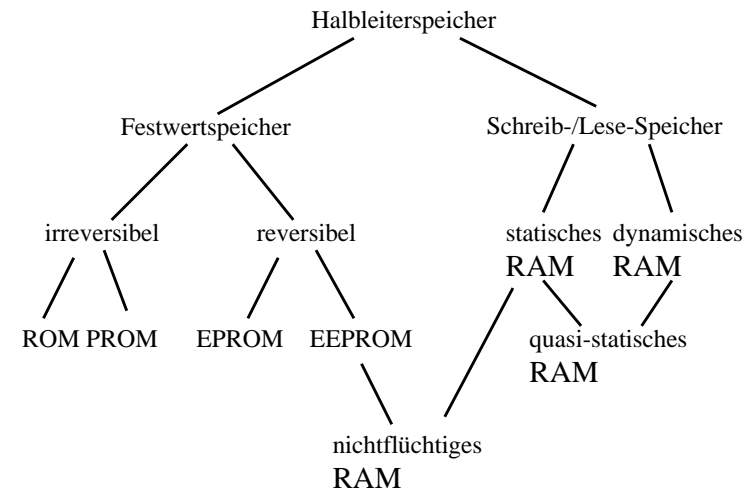
5 Aufbau von Speicherzellen

- Speicherung von Daten oder von logischen Funktionen
- Arten der Speicherung
 - ⇒ irreversibel programmierbare Speicherzellen
 - ⇒ reversibel programmierbare Speicherzellen
 - ⇒ spezielle Transistorschaltungen als statisches Speicherelement
 - ⇒ Speicherung in der Daten in einem Kondensator
- Speicherung der kleinsten Informationseinheit (Bit) in einem Speicherelement

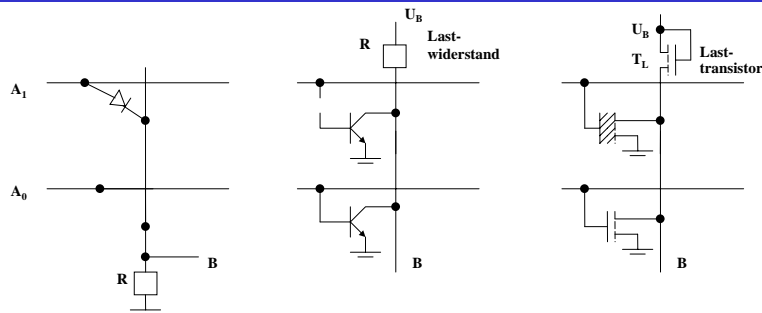


- Speicherzelle
 - ⇒ Speicherelemente, die unter einer gemeinsamen Adresse ansprechbar sind
- Speicherwort
 - ⇒ Datenbusbreite
- Organisation
 - ⇒ Anzahl der Speicherzellen
 - ⇒ Anzahl der Speicherelemente
 - ⇒ $n*m$ Bit
- Kapazität
 - ⇒ Zahl der Speicherelemente

Klassifizierung von Halbleiterspeichern

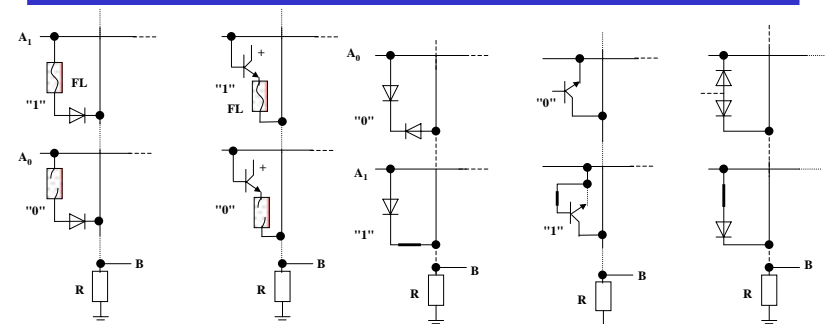


Speicherzellen für maskenprogrammierbare Speicherelemente



- Maskenprogrammierbare Speicherelemente erhalten ihre Information bei der Herstellung des Chips
 - ⇒ Information steht auf einer der Masken
 - ⇒ Inhalt ist nicht veränderbar
- Bauelemente wie Dioden, Bipolar- oder MOS-Transistoren werden bei der Herstellung deaktiviert
 - ⇒ Bei MOS-Transistoren ist die Dicke der Gate-Isolation ausschlaggebend

Speicherzellen für programmierbare Speicherelemente

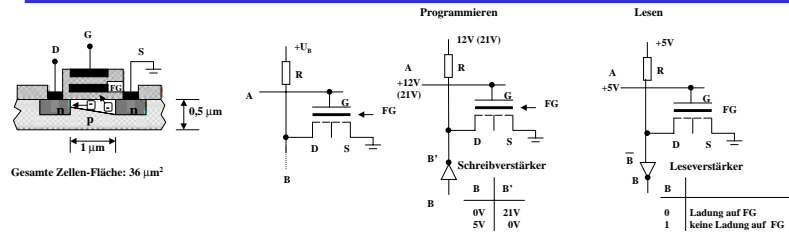


Speicherzellen mit Schmelzsicherungen

AIM-Speicherzellen

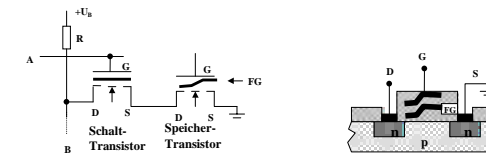
- Programmierung in Programmiergerät durch Überspannungen
 - ⇒ Schmelzsicherung
 - ⇒ Zerstören von Dioden (dauernd leitend)
- Information ist nur einmal schreibbar und kann nicht verändert werden

Löschbare Speicherelemente



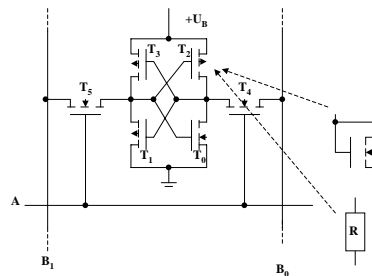
- Löschen durch UV-Licht
- FAMOS: floating gate avalanche MOS-transistor
 - ⇒ Besitzt zweites Gate, das vollständig isoliert ist
 - ⇒ Speicherung der Ladung über 30 Jahre
- Programmierung durch hohe Spannung (12-21 V)
 - ⇒ Elektronen werden angezogen
- Lesen durch Anlegen einer niederen Spannung (5 V)
 - ⇒ ist das Floating-Gate geladen, schaltet der Transistor nicht

Elektrisch löschbare Speicherelemente



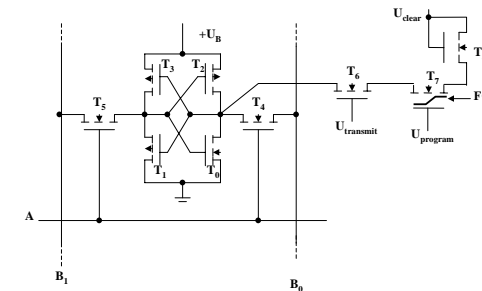
- Dünne Isolierschicht des Floating Gates
 - ⇒ Lesen: Wenn das Floating Gate des Transistors geladen ist, sperrt dieser
 - ⇒ Löschen: Hohe Spannung (21 V) am Gate-Anschluß des Transistors lädt das Floating Gate ($U_B = 0V$)
 - ⇒ Programmieren: 0 V am Gate und eine hohe Spannung am Drain-Anschluß des Transistors entlädt einzelne Floating Gates (logisch 0)

Statische MOS-Speicherelemente



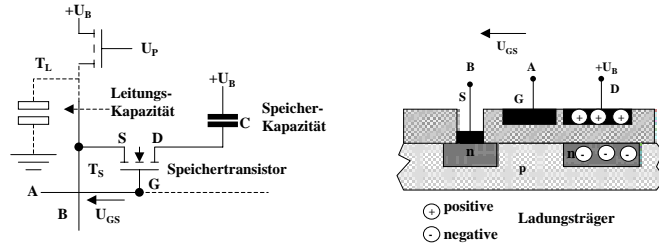
- 6-Transistorzelle
 - ⇒ Statt T₂ und T₃ können auch n-MOS-Transistoren oder Widerstände eingesetzt werden
 - ⇒ T₄ und T₅ dienen zur Ankopplung an die Bitleitungen

NVRAM-Speicherelemente



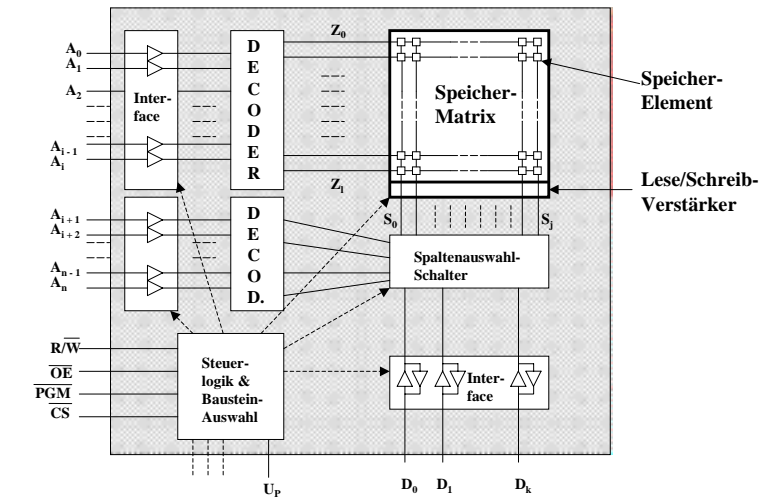
- Kombination eines statischen mit einem EEPROM Speicherelement
 - ⇒ wenn die Spannung abfällt oder das Gerät eingeschaltet wird, findet eine Übertragung von bzw. in die EEPROM-Zelle statt

Dynamische Speicherelemente

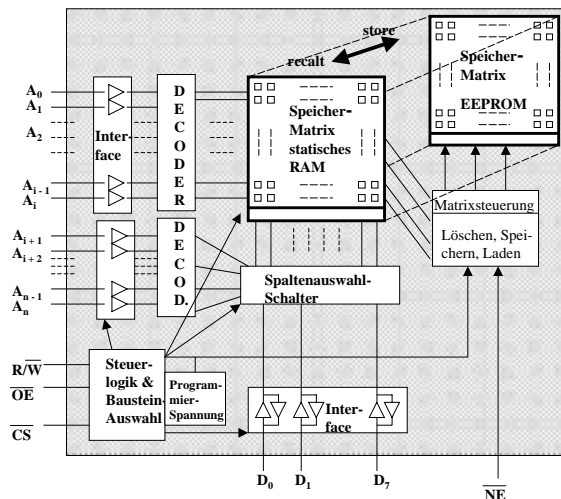


- Die Information wird in einem Kondensator gespeichert
 - ⇒ vergrößerte Drain-Zone
 - ⇒ isoliert zur Spannungsversorgung
- Kapazität 0,1 bis 0,5 pF, 100.000 bis 150.000 Elektronen
 - ⇒ Selbstentladung nach ca. 2 ms
- Speichern entspricht dem Laden des Kondensators
- Lesen entlädt den Kondensator
 - ⇒ Daten müssen wieder zurückgeschrieben werden

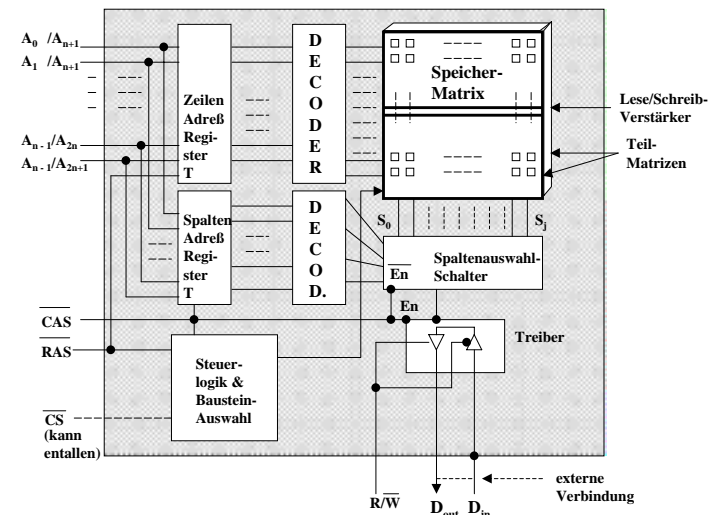
Organisation eines Speicherbausteins



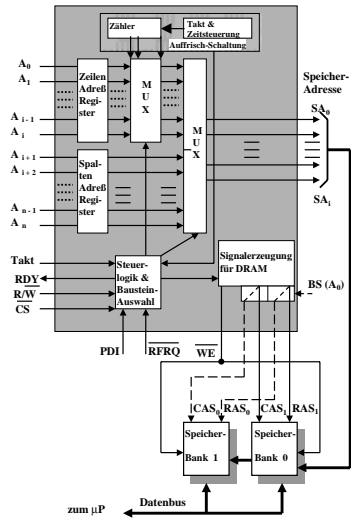
NVRAM-Bausteine



Dynamische RAM-Bausteine



Aufbau eines DRAM-Controllers



Pseudo-statische RAMs

