1. Kapitel: Gleichstrom

- Es gibt eine elektrische Kraft. Diese wirkt anziehend oder abstoßend.
- Es existiert eine kleinste unteilbare elektrische Ladungsmenge, die Elementarladung e₀
- Einheit der Ladung: Coulomb (Amperesekunde): 1 C = 1 As
- Folgerung für die Elementarladung $|e_0| = 1,602 * 10^{-19}$ C
- Jede ladungsmenge Q entspricht ganzzahligem Vielfachen der Elementarladung: Q = N * e₀
- Die Kraftwirkung nimmt quadratisch mit dem Abstand ab.

Potential und Arbeit

- O Physikalische Arbeit: $W = \vec{F} * \Delta \vec{r}$
- O Kraftwirkung auf Ladung: $\vec{F} = \vec{E} * q$



Spannung als Potentialdifferenz

- Feld E hat eindeutiges Potential φ(r), wenn Energie der Ladungsverschiebung von r₁ nach r₂ identisch für alle Wege
- Definition Potentialdifferenz oder Spannung

$$U_{12} = \varphi(r_1) - \varphi(r_2)$$

Potential einer Punktladung durch Normierung auf $r_2 = \infty$

$$\varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} * \frac{1}{\vec{r_0}}$$

- Elektrische Spannung
 - Spannung ist Arbeit pro Ladung
- $U=\frac{W}{q}$
- Einheit der Spannung: Volt

$$[U] = V = \frac{Nm}{C}$$

- Auf elektrischen Leitern verteilen sich elektrische Ladungen gleichmäßig auf der gesamten Oberfläche und sind frei beweglich. Das Innere eines metallischen Hohlraums ist feldfrei
- Elektrischer Kondensator
 - Einbringen eines metallischen Leiters in das el. Feld erzeugt Ladungsbewegung, diese hält an, bis im Innern des Leiters gilt: $E^{\Rightarrow} = 0$ (Wirkprinzip der MOS-FETs)
 - Verhältnis zwischen Ladungsmenge und Fläche: D = Q / A
- Aus der elektrischen Feldstärke folgt D = ε * E

Formel für die elektrische Feldstärke

- Proportionalitätsfaktor für Vakuum: ε_0 (allgemein: $\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r$)

$$ec{\mathcal{E}} = rac{1}{4\piarepsilon_0}*rac{Q}{r^2}*ec{r_0}$$

- Kondenstaor kann elektrische Ladungen speichern. Diese Eigenschaft heißt Kapazität. Kapazität ist abhängig von Fläche und Abstand der Platten: $C = \epsilon * A / d$
- Ebenso: C = Q / U
- Kondensator: $U_c(t) = U_0 * (1 e^{-t/Rc})$
- Elektrischer Strom ist eine Ladungsbewegung, diese tritt bei Verbindung zweier Potentiale,
 z.B. Platten eines Kondensators verbunden durch Leiter auf.
- Kondensator hat begrenzte Ladungsmenge, daher sukzessive Abnahme des Stroms mit fortschreitendem Potentialausgleich.
- Stromstärke ist bewegte Ladung pro Zeit: I = Q / t
- Die technische Stromrichtung führt von Plus nach Minus!
- Spannungsmessung erfolgt parallel zum Verbraucher.
- Strommessung erfolgt in Serie zum Verbraucher (Reihe).
- Der Proportionalitätsfaktor G heißt Leitwert. I = G * U mit Ohmschem Gesetz folgt R = 1 / G
- Ohmsches Gesetz: U = R * I
- Leistung: P = U * I
- $W = P * t \Leftrightarrow W = I^2 * R * t$



Spezifischer Widerstand

 Bezogen auf die Leitungslänge /, den Querschnitt A und den spezifischen Widerstand ρ ergibt sich

$$R = \rho * \frac{I}{A}$$

• Der spezifische Widerstand hat die Einheit $\Omega * \frac{mm^2}{m}$

- Netze und Maschen
 - o Netz: Anordnung von Spannungsquellen und Widerständen
 - Masche: Jeder geschlossene Strompfad im Netz, bei dem kein Zweig oder Knoten mehrmals durchlaufen wird.

Reihenschaltung von Widerständen

Der Strom / durchfließt alle Widerstände Ri.

• Die Spannung U fällt über die Gesamtheit aller Widerstände

 $U = \sum_{i=1}^{n} U_{i} = \sum_{i=1}^{n} I * R_{i} = I * \sum_{i=1}^{n} R_{i}$

also gilt: $U = I * R_a$

• Für jeden Widerstand gilt daher $U_i = I * R_i$.

Ri ab, d.h. gemäß Maschenregel gilt

- 1. Kirchhoffscher Satz (Knotenregel): In einem Knoten ist die Summe aller Ströme gleich Null.
- 2. Kirchhoffscher Satz (Maschenregel): Bei einem geschlossenen Umlauf in einer Masche beträgt die Summe aller Spannungen, die Umlaufspannung, Null.

Parallelschaltung von Widerständen

- An jedem Widerstand R_i liegt die Spannung U an, resultierend in Teilströmen $I_i = \frac{U}{R_i}$
- Gemäß Maschenregel gilt $I = \sum I_i$ und damit

$$I = \sum_{i=1}^{n} \frac{U}{R_i} = U * \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

also:
$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_g} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

- Messung der Stromstärke:
 Je kleiner der Innenwiderstand ist, umso genauer ist die Strommessung.
- Messung der Spannung: Je größer der Innenwiderstand, umso genauer die U-Messung.
- Ideale und reale Spannungsquellen: In der Regel geht man davon aus, dass die Spannungsquelle ideal ist, was aber meist ein Widerspruch zur Realität darstellt.
- Für eine reale Spannungsquelle gilt $I = U_q / (R + R_i)$
 - Akkumulatoren: R_i ≈ 0.5 Ω
 - Einfache Netzgeräte: $R_i \approx 1 \Omega$
- Geregelte Netzgeräte verhalten sich bis zu einem Maximalstrom wie ideale Spannungsquellen. (U_q und i konstant, $I = U_q/R$)

2. Kapitel: Wechselstrom

Rechte-Hand-Rege

Zeigt der Daumen in Richtung des Stromes im Leiter, so zeigen die den Leiter umfassenden Finger in Richtung der Feldlinien.

- Die magnetische Feldstärke H eines stromdurchflossenen Leiters ist proportional zur
 Stromstärke I, d.h. H ~ I und umgekehrt proportional zum Abstand vom Leiter, d.h. H ~ 1 / r
- Es gilt: H = const * I / r, wobei typischerweise const = 1.
- **Magnetische Spannung**: Die beim Verschieben eines Probemagneten in einem Magnetfeld freigesetzte Energie heißt magnetische Spannung.
- Durchflutungsgesetz: 1. Maxwellsche Gleichung

 $\oint \vec{H} \, ds = \int \vec{j} \, d\vec{A}$

- Das Linienintegral der magnetischen Feldstärke über eine in sich
 geschlossene Kurve ist proportional das Flächenintegral der Stromdichte über die
 von der Kurve umschlossene Fläche.
- Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben. Bringen wir diesen in ein zweites Magnetfeld, beispielsweise das eines Hufeisenmagneten, so kommt es zu einer Wechselwirkung.

 Dreifingerregel der rechten Hand
- Die **magnetische Induktion** B beträgt 1 T, wenn ein 1 m langer Draht durch den ein

Die Richtung der ablenkenden Kraft ist durch das Vektorprodukt des gerichteten Stroms $l*\vec{l}$ (Daumen) mit dem Vektor \vec{H} (Zeigefinger) gegeben, wobei der zu Daumen und Zeigefinger senkrecht stehende Mittelfinger dann die Richtung der Kraft \vec{F} angibt.

Strom von 1 A fließt und senkrecht zur Feldrichtung steht, eine Kraft von 1 N erfährt. Daraus folgt die Gleichung F = I * I * B (Kraft = Stromstärke * Länge * magn. Induktion)

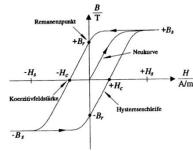
Abgrenzung der Begriffe

- \bullet Die magnetische Feldstärke \bar{H} beschreibt die Ursache des magnetischen Felds unabhängig von Materialeigenschaften des umgebenden Raums.

- Magnetische Feldstärke und Induktion sind miteinander gekoppelt und es gilt:

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

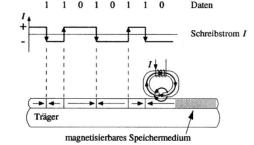
- $\mu_0 = 1,2566 * 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ ist die magnetische Feldkonstante oder Induktionskonstante.
- μ_r ist die einheitslose Materialkonstante. Sie gibt den Unterschied des magnetsichen Verhaltens des Materials gegenüber dem Vakuum an. Für Eisen gilt $400 \le \mu_r \le 8000$.
- Anhand der Permeabilitätszahl μ_r werden Stoffe eingeteilt in solche mit $\mu_r < 1$, $\mu_r > 1$ und $\mu_r >> 1$
- Für ferromagnetische Stoffe gilt $10^2 \le \mu_r \le 10^3$. Ihr Verhalten in einem äußeren Magnetfeld und das beibehalten zweier Magnetisierungszustände ohne äußeres Magnetfeld machen diese Stoffe geeignet als Speichermedium für binäre Signale mit Anwendungen bei Festplattenspeichern, Floppy Disks und Magnetbändern.
- Der Kurvenverlauf eines magnetischen Stoffes die sogenannte Hysterese Kurve ist abhängig von der Feldstärke, von der Eisensorte und von der Vorgeschichte.
- Die Hystereseschleife ist eine Kurve, die das Verhalten der magnetischen Flussdichte bei zeitlich veränderlicher Feldstärke anzeigt.



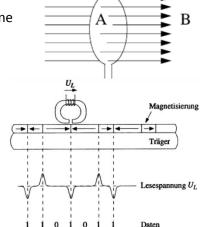
Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials

- Der Remanenzpunkt B_r ist der Wert nach Rückkehr von einer Magnetisierung bei Feldstärke H = 0 noch verbleibenden Flussdichte.
- Die **Koerzitivfeldstärke** H_c ist die zur vollständigen Entmagnetisierung eines magnetisierten Materials notwendige Feldstärke.
- Für ferromagnetisches Material existieren zwei verschiedene Magnetisierungszustände oder Remanenzwerte B_r und –B_r. Damit können Signale permanent gespeichert werden.
- Man unterscheidet zwischen:
 - o **Magnetisch weiche Stoffe**: kleiner H_c-Wert und schmale Hystereseschleife
 - Magnetisch harte Stoffe: großer H_c-Wert und breite Hysterseschleife (übl. Speicher)
- Wechselschrift-Aufzeichnungsverfahren: Bei jeder zu schreibenden "1" wird die Schreibstromrichtung gewechselt und damit ein Flusswechsel verursacht.
 Zur Erkennung einer "0" ist ein externer Takt erforderlich. (es gibt auch Taktlose

 Aufzeichnungsverfahren z.B. GCR. MEM. RLL))
 - Aufzeichnungsverfahren z.B. GCR, MFM, RLL))



- Thermomagnetisches Schreiben: Das Schreiben eines Sektors ist zeitaufwendig
 - o Löschen des Sektors durch Erhitzen aller Zelle, d.h. Magnetisierung auf "0".
 - Umkehrung der Feldrichtung des äußeren Magnetfelds und selektives Schreiben der
 1-Signale bzw. Abschaltung des Lasers bei 0-Signal
- Magnetischer Fluss Φ entspricht der Anzahl Feldlinien, die eine Leiterschleife (Spule) durchsetzen. Für ein homogenes Magnetfeld B beträgt der magnetische Fluss Φ durch eine senkrecht zu den Feldlinien stehende Fläche A: Φ = B * A
- **2. Maxwellsche Gleichung:** Ein sich ändernder magnetischer Fluß induziert ein elektrisches Wirbelfeld $U_i = \oint \vec{E}_i \, d\vec{s} = -\frac{d\Phi}{dt}$



- Die magnetische Induktion ist das Prinzip beim Lesen von magnetischen Datenträgern.
- Selbstinduktion: In einer Spule wird eine Spannung induziert, wenn der magnetische Fluss durch diese Spule sich ändert. Es muss sich dabei nicht um zwei verschiedene Spulen handeln, sondern es kann sich auch um dieselbe Spule handeln:
 - Ändert sich der Stromfluss, so ändert sich auch der magnetische Fluss
 - Diese Flussänderung induziert in derselben Spule eine Spannung. Diese wirkt dem Stromfluss entgegen.
- Es gilt folgende Wirkungskette: $I \rightarrow H \rightarrow B \rightarrow \Phi \rightarrow U_i$
 - o Der Stromfluss baut ein Magnetfeld H in der Spule auf.
 - o Damit gekoppelt ist ein magnetischer Fluss B, der eine Spannung Ui induziert.
 - Die induzierte Spannung U_i verursacht einen induzierten Strom, der dem Strom aus der Stromquelle entgegen gerichtet ist.
 - Dieser induzierte Strom verschwindet erst dann, wenn der Strom/konstant ist, d.h.
 wenn sich der magnetische Fluss nicht mehr ändert.
- Stromarten: Man unterscheidet zwischen
 - o Gleichstrom: Strom mit gleicher (konstanter) Stromrichtung
 - Wechselstrom: Strom mit wechselnder Stromrichtung
- Formfaktor: Das Verhältnis von Effektivwert zu Gleichrichtwert ergibt den Formfaktor einer Wechselgröße. Es gilt k = Effektivwert / Gleichrichtwert
- Der Formfaktor wird angewandt bei der Skalierung von Ampere- und Voltmetern. Mit einer Gleichrichtschaltung wird der Gleichrichtwert von Wechselstrom und Wechselspannung gemessen. Entsprechend dem Formfaktor ist die Skala so geeicht, dass der Effektivwert angezeigt wird.
- Ideale Signale der physikalischen Ebene eines Computers sind Rechteckimpulse
- Bauelemente aber auch Leitungen haben induktive und kapazitive Eigenschaften.
- Diese Eigenschaften haben Einfluss auf das Schaltverhalten.

3. Kapitel: Halbleiter & Dioden

 Halbleiter sind kristallin aufgebaute Festkörper, die aber nicht durch metallische Bindung zusammengehalten werden. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist temperaturabhängig und liegt zwischen Leitern und Nichtleitern.

Leitwert (Ωm) ⁻¹	Material	Тур
10 ⁻¹⁶ 10 ⁻¹⁰	Hartgummi Glas	Nichtleiter
$ \begin{array}{c} 10^{-3} \\ 10^{-2} \\ 10^{-2} - 10^{1} \\ 10^{0} \\ 10^{0} - 10^{5} \end{array} $	Galliumarsenid (rein) Silizium (rein) Silizium (dotiert) Germanium (rein) Germanium (dotiert)	Halbleiter
10 ⁷ 10 ⁸	Eisen Silber	Leiter

- Die Halbleiterphysik behandelt die unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit auf der Basis der atomaren Struktur der Materialien.
- **Energiebändermodell**: Dichtgepackte Atome in einem Kristall wechselwirken miteinander. Mit zunehmender Schalennummer n (Hauptquantenzahl) nimmt die Wechselwirkung mit den Nachbaratomen zu. Dies führt zu einer Aufspaltung in so viele Energieniveaus, wie Atome miteinander wechselwirken.
- Die Einteilung der Festkörper in **Nichtleiter** (Isolatoren), **Halbleiter** und **Leiter** kann mit dem Energiebändermodell erklärt werden:
 - Im Grundzustand (Temperaturnullpunkt) bewirken die Elektronen des obersten Energiebandes (Valenzband) die Bindung im Kristall. Das n\u00e4chsth\u00f6here Band, das eine Elektronenleitung erm\u00f6glicht, hei\u00dft Leitungsband.

- Für die elektrische Leitfähigkeit eines Festkörpers sind nur die Elektronen von Valenzund Leitungsband von Bedeutung.
- Nichtleiter (Isolatoren): Bei Nichtleitern ist das Leitungsband leer. Es stehen keine Elektronen des Grundzustandes zur Verfügung. Das

 Valenzband ist voll. Die Energiedifferenz vom Valenzband zum Leitungsband beträgt je nach Material ca. 5-10eV, was

 | Halbleiterstoff | Selen Kupferoxid Cu2 Germanium Ge Silizium Si

einer Temperaturdifferenz von mehr als 1000K entspricht.

- **Leiter**: Bei Leitern befinden sich schon im Grundzustand Elektronen im Leitungsband, d.h. Valenzband und Leitungsband überlappen sich.

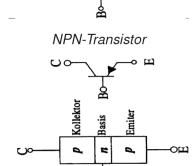
Halbleiterstoff		$\triangle W$ in eV
Selen	Se	2,20
Kupferoxid	Cu_2O	2,06
Germanium	Ge	0,72
Silizium	Si	1,12
Tellur	Te	0,32
Indiumantimonid	InSb	0,26
Indiumarsenid	InAs	0,34
Galliumarsenid	GaAs	1,38

- Halbleiter: Im Grundzustand ist auch hier wie bei Nichtleitern das Valenzband vollbesetzt, das Leitungsband des angeregten Zustands ist leer. Hier ist der Halbleiter ein Nichtleiter. Die Energiedifferenz zwischen Valenzband und Leitungsband ist allerdings nur 1eV groß, so dass bereits bei Zimmertemperatur Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden können und für den Ladungstransport zur Verfügung stehen.
- Für Halbleiter wird eine Einkristallstruktur (der Festkörper besteht aus einem einzigen, ungestörten Kristall) mit hohem Reinheitsgrad benötigt
- Durch Aufnahme thermischer Energie gelangen daher schon bei Zimmertemperatur Elektronen vom Valenzband in das leere Leitungsband. Dort stehen sie als Ladungsträger zur Verfügung. Es entsteht ein Ladungsträgerpaar:
 - Ein Elektron im Leitungsband, ein Loch oder Defektelektron im Valenzband
- Die Eigenleitfähigkeit von Halbleitern ist zur technischen Nutzung zu gering, aber durch gezielte Verunreinigungen kann man die Leitfähigkeit deutlich erhöhen. → p/n-dotieren
- Interessante Fremdatome dazu sind:
 - Aluminium, Bor & Indium (3 Valenzelektronen) → Elektronenakzeptoren
 - o Arsen, Antimon, Phosphor (5 Valenzelektronen) → Elektronendonatoren
- Die Funktion der meisten Halbleiterbauelemente beruht auf den Eigenschaften einer pdotierten und einer n-dotierten Halbleiter-Grenzschicht, dem pn-Übergang
- Schon bei Zimmertemperatur ergibt sich aber ein Ladungsausgleich durch Diffusion: Freie Elektronen der n-Zone diffundieren in die p-Zone, Löcher aus der p-Zone in die n-Zone. Hierdurch verringert sich die Zahl der freien Ladungsträger. Die ladungsträgerfreie Grenzschicht wird zu einer hochohmigen Sperrschicht.
- Durchlassrichtung: Minuspol der Spannungsquelle an der n-Zone und Pluspol an der p-Zone
- Sperrrichtung: Minuspol der Spannungsquelle an der p-Zone und Pluspol an der n-Zone
- Wird die Halbleiterdiode in Sperrrichtung gepolt, dann sperrt der pn-Übergang.
- Wird sie in Durchlassrichtung gepolt, dann leitet der pn-Übergang.
- Dioden können durch eine zu hohe Spannung zerstört werden, wenn sie eigentlich sperren.
- **Schottky-Dioden**, besitzen einen Metall/Halbleiter-Übergang statt eines pn-Übergangs, dadurch kann der Zustandswechsel schneller erfolgen, da beim Zustandswechsel keine Ladungsträgerspeicherung (Kapazitätswirkung) auftritt.
- Zener-Dioden: In Z-Dioden wird der Zener-Effekt in Sperrrichtung bewusst ausgenutzt. Bei der Anwendung wird dafür gesorgt, dass der Strom, der durch die max. Verlustleitung festgelegt ist, einen Höchstwert nicht überschreitet, damit die Wärmewirkung nicht die Kristallstruktur der Sperrschicht zerstört. Anwendung zur Spannungsstabilisierung
- **Fotodiode**: Eine Fotodiode wird immer in Sperrichtung betrieben
 - Ohne Lichteinwirkung fließt ein geringer Sperrstrom

- Bei Lichteinfall werden in der Raumladungszone Loch-Paare erzeugt. Das elektrische Feld trennt die Ladungsträgerpaare und es fließt ein Fotostrom.
- Laserdiode: Im Gegensatz zur herkömmlichen LED, wo ein spontaner Übergang von Elektronen stattfindet, wird bei Laserdioden die Lichtquantenemission erzwungen.

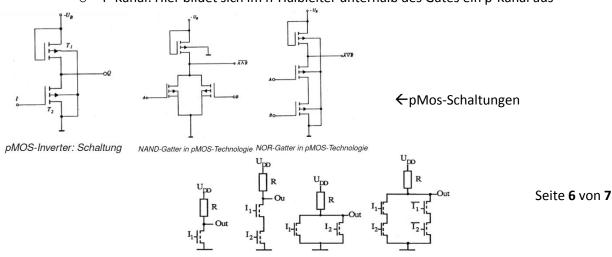
4. Kapitel: Halbleiter & Transistoren

- Bipolartransistoren sind Halbleiterbauelemente, die die Leitfähigkeitseigenschaften von zwei pn-Übergängen ausnutzen
- Es gibt zwei Typen von Bipolartransistoren: NPN- und PNP-Transistoren
- Von jeder Zone führt ein schaltbarer Elektrodenanschluss nach außen. Die Zonen haben die Bezeichnung Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C).
- Während bei Bipolartransistoren der Kollektorstrom durch den Basisstrom gesteuert wird, wird beim Unipolartransistor ein Storm durch eine Spannung oder ein elektrisches Feld gesteuert. Daher der Name Feldeffekttransistor (FET).
- Bei FETs sind nur Majoritätsladungsträger vorhanden, bei bipolaren Transistoren auch Minoritätsladungsträger.



PNP-Transistor

- Man unterscheidet bei FET-Transistoren zwischen
 - Sperrschicht-FETs: Bei diesen wird der Strom durch die Ausdehnung einer pn-Sperrschicht gesteuert
 - o *Isolierschicht-FETs*: Bei diesen wird die Leitfähigkeit eines Halbleiters durch Influenz beeinflusst und damit ein Strom gesteuert.
- **Sperrschicht-FET**s finden wegen ihres hohen Eingangswiderstands (ca. 10⁸) besonders Anwendung als Verstärker. Sie werden allerdings kaum als elektronische Schalter genutzt.
- Isolieschicht-FETS (MOSFET): Die Gate-Elektrode ist durch eine dünne Oxidschicht vom halbleiter isoliert. Wegen der Schichtenfolge (Metal-oxide-Semiconductor, MOS) heißt dieser Typ MOSFET. Die Steuerelektrode (Gate G) besteht entweder aus Metall oder aus polykristallinem Silizium. Als Isolator wird meist Siliziumdioxid verwendet. Das Substrat ist meist n- oder p-dotiertes Silizium. Bei MOSFETs wird die Leitfähigkeit nicht durch einen pn-Übergang, sondern durch Influenz gesteuert.
- Anhand des Kanaltyps zwischen Source und Drain unterscheidet man
 - O N-Kanal: Hier bildet sich im p-Halbleiter unterhalb des Gates ein n-Kanal aus
 - o P-Kanal: Hier bildet sich im n-Halbleiter unterhalb des Gates ein p-Kanal aus



Einführung in die Technische Informatik WS 2010/2011 – Zusammenfassung von Konstantin Grupp nMos-Schaltungen →