

## 1 Grundlagen

### 1.1 Zentrale Aufgabe der Physik

- Angabe von Datenstrukturen, welche Eigenschaften der Welt beschreiben.
- Angabe von Gesetzmässigkeiten, welche die Grössen von Eigenschaften miteinander in Beziehung setzen
- Angabe von Gesetzmässigkeiten, welche beschreiben, wie sich diese Eigenschaften als Funktion der Zeit verändern.

### 1.2 Fundamentalkräfte

- Gravitation
  - Zwischen zwei Massen wirkt eine Anziehungskraft
  - Kraft wirkt umgekehrt proportional zum Abstand der Masse
  - Kraft wirkt proportional zum Produkt der Masse
  - Ist nicht abschirmbar
- Elektromagnetismus
  - Grundursache ist die elektrische Ladung
  - Dualismus, Zwei Arten: positive und negative Ladung
  - Gleiche Ladung stösst sich ab, unterschiedliche Ladung zieht sich an
  - In allen physikalischen Prozessen bleibt die Ladung erhalten
  - Einheit der Ladung: Coulomb[c] Elektron Ladung  $e = 1.602 * 10^{-19} C$
- Starke Kernkraft
- Schwache Kernkraft

### 1.3 Kräfte

- Eine Kraft verändert die Geschwindigkeit eines Objektes, d.h. das Objekt wird beschleunigt (oder gebremst).

#### 1.3.1 Beschleunigung

- $F = ma$

#### 1.3.2 Schwerkraft

- $F = \gamma \frac{M_1 M_2}{r^2}, \gamma = 6.67 * 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$
- Erde:  $F = mg, g = \gamma \frac{M_{Erde}}{r_{Erde}^2} = 9.81 \frac{m}{s^2}$

#### 1.3.3 Coulombkraft

- $\vec{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \epsilon_0 = 8.859 * 10^{-12} \frac{C^2}{Jm}$

#### 1.3.4 Federkraft

- $F = -k(x - x_{Ruhe})$

### 1.4 Energie

- $E_{pot} = mgh$
- $E_{kin} = m \frac{v^2}{2}$
- $E_{spring} = k \frac{(x - L)^2}{2}, (x - L)$ : Auslenkung
- $E_{pot.Ladung} = qU$
- Arbeit:  $\Delta E_{mech} = Fs$

#### 1.4.1 Einheiten

- $1cal = 4.1868J$
- $[J] = [Nm]$
- $[N] = [\frac{Km}{s^2}]$

#### 1.4.2 Energieerhaltung

- In einem System und der Umgebung bleibt die **Gesamtmenge** der Energie erhalten
- Veränderungen geschehen durch physikalische Kräfte
- Diese physikalischen Kräfte können nicht beliebig aussehen. Ihre Form ist z.B. durch die Forderung, dass die physikalischen Gesetze sich im Laufe der Zeit nicht ändern, etwas eingeschränkt
- Diese Einschränkung führt dazu, dass einem physikalischen System eine Zahl zugeordnet werden kann, deren Grösse durch die Einwirkung der Kräfte nicht geändert werden kann
- Die Erhaltung der Energie ist nicht eine Folge einer Energiesubstanz
- Die Gesetze der Physik sind so gestaltet, dass sie die Gesamtmenge der Energie nicht verändern können

### 1.5 Strecke, Geschwindigkeit, Beschleunigung

- $v = \int a \delta t$
- $s = \int v \delta t$

## 2 Veränderungsrate Leistung Strom

### 2.1 Veränderungsrate

- Das zukünftige Verhalten eines Systems und seiner Umwelt ist vollständig definiert durch seinen momentanen Zustand und dem momentanen Zustand der Umwelt. Zusätzliche Information, z.B. wie diese Zustände erreicht wurden, sind nicht nötig.

## 2.2 Potential

- $\varphi(A) = \frac{x}{y}$
- $x$ =pot.E Substanz S der Menge M an Ort A
- $y$ =Menge X Energieträger

### 2.3 Strom I

- $I[A][\frac{C}{s}]$
- Richtung in die sich die positive Ladung bewegt  $I > 0$
- Anzahl positiver Ladung die den Querschnitt pro Sekunde durchquert

### 2.4 Spannung U

- $U[V][\frac{W}{A}]$
- $U = U(\vec{r}_A, \vec{r}_B) = \varphi(\vec{r}_A) - \varphi(\vec{r}_B)$
- Spannungsquellen erzeugt  $\vec{E}$ -Feld in Drähten
- Ladung verliert  $\Delta E_{pot}$  und gewinnt  $\Delta E_{kin}$
- Kinetische Energie kann verbraucht werden
- Spannung ist die Energie die frei wird, wenn die Ladung von A nach B bewegt wird.
- $\varphi(\vec{r}_A) > \varphi(\vec{r}_B)$  Energie steht zur Verfügung
- $\varphi(\vec{r}_A) < \varphi(\vec{r}_B)$  Energie wird benötigt

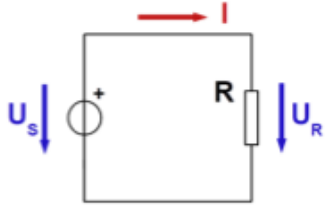
### 2.5 Leistung P

- $P[W], P_{el} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{I \Delta t U}{\Delta t} = UI$
- Richtung in die sich die positive Ladung bewegt  $I > 0$
- Anzahl positiver Ladung die den Querschnitt pro Sekunde durchquert

### 2.6 Schaltung

- Physikalische Perspektive
  - Schaltungen bestehen aus miteinander verbundenen physikalischen Elementen, welche, angeregt durch Spannungen und Ströme, ein bestimmtes dynamisches Verhalten zeigen.
  - Die physikalische Perspektive offeriert noch keine Semantik, zeigt aber, wie ein System gebaut werden kann.
- Funktionale Perspektive
  - Schaltungen sind Signalwandler
  - Logische Schaltungen: Input ist eine Bitsequenz, welche in eine Outputsequenz verwandelt wird.
  - Analoge Schaltung: Ein dynamisches Signal wird in ein Outputsignal transformiert.

### 2.6.1 Analoge Schaltung



- $R[\Omega]$
- $U_R = RI$
- $P = IU_R = \frac{U_R^2}{R} = RI^2$

- Eine **Masche** oder Schleife ist ein Weg durch Drähte und Bauelemente, welcher zu seinem Ausgangspunkt zurückführt
- Die Spannung wird in Richtung Spannungsgefälle positiv gezählt
- Bei einem **Knoten** kommen mindestens drei Drähte zusammen.
- Durch die Ladungserhaltung muss die Summe der einfließenden minus der Summe der wegfließenden Ströme null ergeben.
- Kabelwiderstand  $R = \rho \frac{L}{A}$

Ideale Spannungsquelle			Einschaltvorgang
Ideale Stromquelle			
Widerstand			frühere Symbole
Kapazität			
Induktivität			
Diode			Photodiode/ Solarzelle
Glühlampe			Leuchtdiode
Schalter (auch: «Schliesser»)			Darstellung im Simulationstool «Tina»

### 2.6.2 Serieschaltung

- Serieschaltung  $R = R_1 + R_2$
- Serieschaltung  $I = \frac{U_0}{R_1 + R_2}$

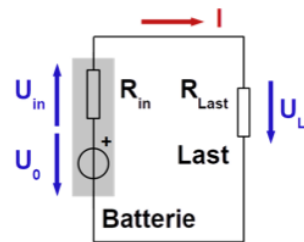
### 2.6.3 Parallelschaltung

- Parallelschaltung  $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$
- Parallelschaltung  $I_0 = U_0 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$

### 2.6.4 Mehrer Quellen

- Superpositionsprinzip: Jede Quelle wird einzeln analysiert und anschliessend wird addiert
- Analyse: Spannungsquellen werden durch einen Kurzschluss ersetzt, Stromquellen durch eine offene Verbindung
- Wenn Dioden vorkommen, ist die Schaltung nicht mehr linear, das Superkompositionsprinzip gilt nicht mehr

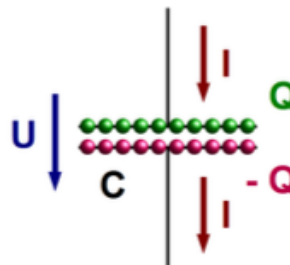
### 2.7 Batterie



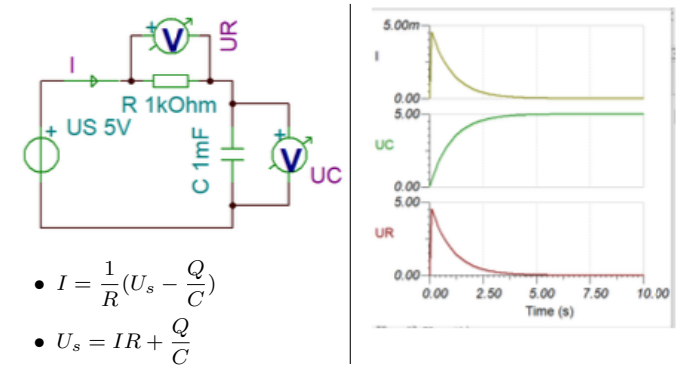
- Ideale Bat:  $U_0 = \text{const.}$
- $U_0 - U_{in} - U_{last} = 0$
- $U_0 - IR_{in} - IR_{last} = 0$
- $I = \frac{U_0}{R_{in} + R_{last}}$
- $P = R_{la.} \left( \frac{U_0}{R_{in} + R_{la.}} \right)^2$

- Wenn ein Verbraucher mit einer Batterie betrieben wird, muss angepasst werden, dass die Leistung nicht am Innenwiderstand der Batterie verbraucht wird.
- Bei einer Gleichspannungsquelle mit variabler Spannung, z.B. einer Solarzelle, muss der Lastwiderstand dynamisch angepasst werden (Bei Solarpaneln ist der Lastwiderstand der gleich wie beim Speicher).

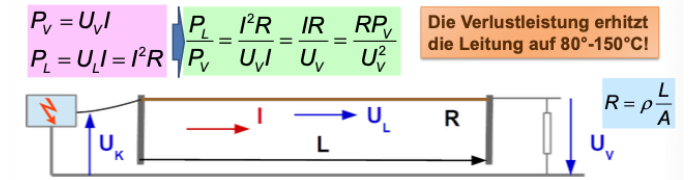
### 2.8 Kondensator



- Kondensatoren können praktisch beliebig oft aufgeladen und entladen werden.
- Kondensatoren können als Energiespeicher verwendet werden (Bremsenergie).
- Kapazität C [Farad/F]
- $\frac{\delta Q}{\delta t} = I$
- $CU_c = Q$



### 2.9 Hochspannung



- Je grösser  $U_V$ , desto kleiner der relative Leistungsverlust in der Leitung.
- Der Verlust beträgt wenige Prozent pro hundert Kilometer (Wechselspannung)



- 1 Höchstspannung: 380 kV beziehungsweise 220 kV
- 3 Hochspannungsebene: 36 kV bis 150 kV
- 5 Mittelspannungsebene: 1 kV bis 36 kV
- 7 Niederspannungsebene: < 1 kV
- 2,4,6 Transformatorebenen

### 2.10 Gleich- und Wechselstrom

- Historisch bedingt konnte früher nur Wechselstrom transformiert werden.
- Wechselstrom relativ hohe Verlustleistung (Skinneffekts, ...)
- Gleichstrom hat eine geringere Verlustleistung.

## 3 Digitaltechnik

### 3.1 Funktionseinheiten & Signale

- Eine **Funktionseinheit** empfängt n Inputsignale und liefert m Outputsignale
- Eine **Rückkopplung** ist beispielsweise wenn Outputsignal von FE1 Inputsignal von FE2 ist und ein Outputsignal von FE2 ein Inputsignal von FE1 ist.
- **Schaltnetze** enthalten mehrere Funktionseinheiten ohne Rückkopplungen.
- **Schaltwerk** enthalten Rückkopplungen und besitzen dadurch einen speichernden Charakter.

### 3.2 Logik-Gatter

	IEC-Norm (Europa)	ANSI-Standard (USA)
<b>NOT</b>		
<b>AND</b>		
<b>OR</b>		
<b>XOR</b>		

- Schalter die durch elektronische Signale betrieben werden sind **Transistoren**
- NOT: Einzelner Schalter
- AND: Zwei Schalter in serie
- OR: Zwei Schalter parallel
- XOR: Zwei Schalter in serie versetzt

### 3.3 Flip-Flops

Ein Flip-Flop ist das fundamentale Speicherelement.

#### 3.3.1 SR-Flip-Flop

- Input S und R
- Funktioniert nur wenn S und R unterschiedlich oder beide Null sind (Beide Null speichert)
- $Q = S$

#### 3.3.2 D-Flip-Flop

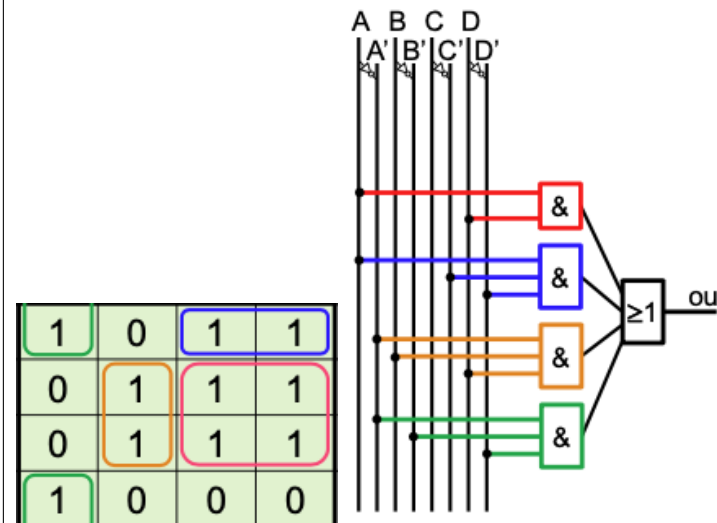
- S und R werden zu D zusammengefasst
- Wenn der Clockeingang von unten nach oben wechselt wird der Speicher gesetzt (flankengesteuert)

#### 3.3.3 JK-Flip-Flop

- S wird mit J(Jump) und R mit K(Kill) ersetzt
- Es gibt einen Clockeingang (flankengesteuert)
- Wenn beide Eins sind, wechselt der Ausgang bei jeder aktiven Clockflanke

### 3.4 KV-Diagramm

		A'		A		
		00	01	11	10	
C'	00					D'
	01					
C	11					D
	10					
		B'		B		



#### 3.4.1 Glitches

- Wenn beim Schaltungsentwurf jeder Signalpfad die selbe Anzahl Logikgatter durchläuft, können Glitches vermieden werden
- KV-Diagramme allein sind daher keine gutes Entwurfsmuster für glitchfreie Schaltungen
- Wird bei einem RLC-Schwingkreis die Induktivität erhöht, verkürzt sich die Periodendauer nicht

## 4 Elektrische und Magnetische Felder

### 4.1 Ladungen und Ströme

- Wenn man mehrere Ladungen hat, darf man die Kräfte zusammenzählen. Dies nennt man das **Superpositionsprinzip**.
- $\vec{F}_{12}$ : Kraft auf Ladung  $Q_1$ , verursacht durch Ladung  $Q_2$
- Einheitsvektor von  $Q_2$  zu  $Q_1$ :  $\vec{n}_{12} = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$
- Permittivität des Vakuums  $\epsilon_0 = 8.859 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Jm}$

### 4.2 Coulombgesetz

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \vec{n}_{12}$$

### 4.3 Elektrische Felder

- $\vec{E}(\vec{r}, t), [\frac{N}{C}]$
- Werden erzeugt durch Ladung oder zeitlich veränderliche magnetische Felder (Mehrere Quellen: Vektorsumme (Superpositionsprinzip))
- Das elektrische Feld zeigt von positiven Ladungen zu negativen Ladungen hin
- Das elektrische Feld übt eine Kraft aus, die proportional zur Stärke des Feldes ist
- Im Inneren eines geladenen Metallstück ist das elektrische Feld null

Ladung  $Q$  an Ort  $\vec{r}_Q$  erzeugt  $\vec{E}$ -Feld:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{|\vec{r} - \vec{r}_Q|^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}_Q}{|\vec{r} - \vec{r}_Q|}$$

Kraft auf Ladung  $q$  am Ort  $\vec{r}$ :

$$\vec{F} = q \vec{E}(\vec{r}, t)$$

#### 4.3.1 Elektronvolt

- $1eV = W = F \cdot d = q \cdot E \cdot d = q \cdot U = 1.6 \cdot 10^{-19} J$
- Arbeit  $W = \frac{m \cdot v^2}{2}$

## 4.4 Magnetische Felder

- $\vec{B}(\vec{r}, t), [\frac{kg}{s \cdot C}]$
- Werden erzeugt durch Ströme oder zeitlich veränderliche elektrische Felder (Mehrere Quellen: Vektorsumme (Superpositionsprinzip))
- Das Magnetfeld zeigt vom Nord- zum Südpol

### 4.4.1 Lorentzkraft

**Lorentzkraft** auf Ladung  $q$  mit Geschwindigkeit  $\vec{v}$ :

- $\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$

#### Rechte Hand Regel

- Mittelfinger: Richtung der Lorentzkraft
- Zeigefinger: Richtung des Magnetfeldes (Nord-Süd)
- Daumen: Richtung der positiven Ladung

## 4.5 Generatoren/Elektromotoren

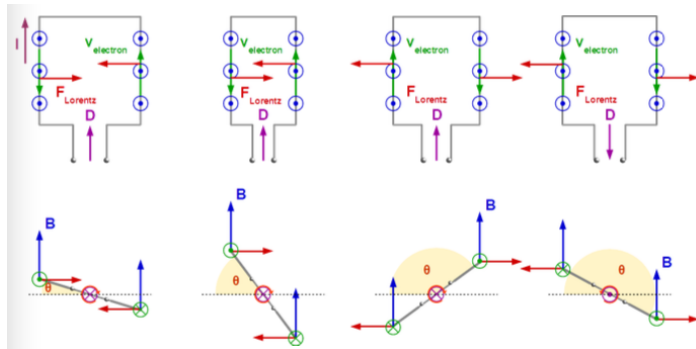
- Steht ein stromdurchflossener Draht senkrecht zu einem Magnetfeld wirkt eine Kraft auf den Draht

### 4.5.1 Generatoren

- Beim Generator werden die Leiterbahn im Magnetfeld bewegt
- Die Ladungsträger erhalten eine Geschwindigkeit senkrecht zur Leiterbahn
- Das Magnetfeld führt zu einer Kraft auf die Ladungsträger in Richtung der Leiterbahn
- Strom mit wechselnder Richtung (Wechselstrom) fließt

### 4.5.2 Elektromotoren

- Beim Elektromotor werden die Leiterbahn im Magnetfeld durch die Lorentzkraft bewegt
- Die stromdurchflossene Schleife führt zu einem Drehmoment
- Die Schleife dreht sich im Uhrzeigersinn
- Bei  $\theta = 180$  wird die Stromrichtung geändert



## 5 Maxwellgleichungen

- Beschreibt unter anderem wie sich Licht als elektromagnetische Welle ausbreitet

### 5.1 Gauss'sche Gesetz (Elektrischer Fluss)

- $\Phi_{\vec{E}}(\Sigma) = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV = \frac{Q}{\epsilon_0}$
- Der Fluss des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  durch eine geschlossene Fläche  $\Sigma$  ist gleich dem Volumenintegral über die Ladungsdichte  $\rho/\epsilon_0$  innerhalb von  $\Sigma$ , also gleich der von  $\Sigma$  eingeschlossenen Ladung  $Q$  geteilt durch  $\epsilon_0$
- $|\vec{E}| = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
- Das elektrische Feld zeigt von positiven Ladungen zu negativen Ladungen hin

### 5.2 Magnetischer Fluss

- Es gibt keine magnetische Ladungen
- $\Phi_{\vec{B}}(\Sigma) = 0$
- Der Fluss des magnetischen Feldes  $\vec{B}$  durch eine geschlossene Fläche  $\Sigma$  ist gleich 0

### 5.3 Faraday'sches Gesetz (Linienintegral des elektrischen Feldes)

- $\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{\gamma} = -\frac{d}{dt} \Phi_{\vec{B}}(\Omega)$
- Das Linienintegral des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  über einer Kurve  $\gamma$  ist gleich der zeitlichen Änderung des negativen Flusses des magnetischen Feldes durch eine von  $\gamma$  berandete Fläche  $\Omega$
- Die Änderung des Flusses eines Magnetfeldes durch eine Schleife induziert in dieser eine Spannung  $U$
- $U = -\frac{d}{dt} \Phi_{\vec{B}}(\text{Schleife})$
- $\Phi_{\vec{B}}(\text{Schleife}) = \vec{A} \cdot \vec{B}$ ,  $\vec{A}$  senkrecht Schleife Länge Fläche Schleife
- Spannung **Schleife**:  $U_{ind}(t) = U_0 \sin(2\pi vt)$
- Amplitude:  $U_0 = \omega |\vec{A}| |\vec{B}|$
- Frequenz:  $v = \frac{\omega}{2\pi}$

### 5.4 Linienintegral des magnetischen Feldes

- $\int_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\gamma} = \mu_0 \Phi_{\vec{J}}(\Omega) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_{\vec{E}}(\Omega)$
- Das Linienintegral des magnetischen Feldes  $\vec{B}$  über einer Kurve  $\gamma$  ist gleich der zeitlichen Änderung des Flusses des elektrischen Feldes (mal  $\mu_0 \epsilon_0$ ) durch eine von  $\gamma$  berandete Fläche  $\Omega$  plus dem Fluss der Stromdichte durch  $\Omega$  mal  $\mu_0$

- Das Linienintegral des magnetischen Feldes  $\vec{B}$  über einer Kurve  $\gamma$  ist gleich der zeitlichen Änderung des Flusses des elektrischen Feldes (mal  $\mu_0 \epsilon_0$ ) durch eine von  $\gamma$  berandete Fläche  $\Omega$  plus dem Fluss der Stromdichte durch  $\Omega$  mal  $\mu_0$
- $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} [T \cdot m \cdot A^{-1}]$
- Magnetfeld um **langen geraden Leiter**:  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
- Magnetfeld in **Spule**:  $B = \mu_r \mu_0 \frac{N}{L} I$

#### Rechte Hand Regel

- Daumen: Richtung der positiven Ladung
- Rest: Umlaufsinn des  $\vec{B}$ -Feldes um  $I$

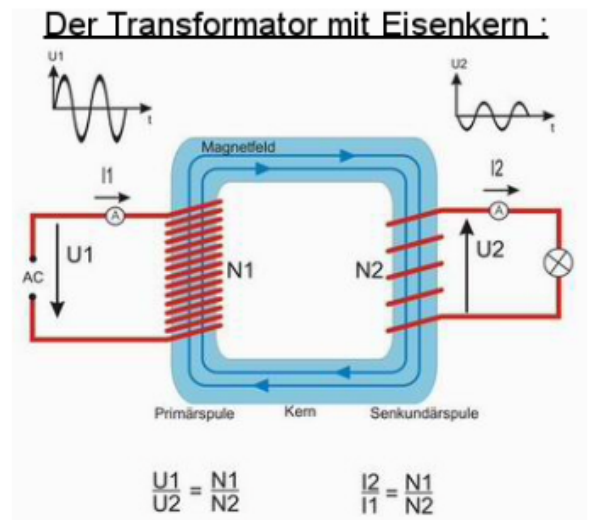
## 6 Frequenz und Kreisfrequenz

- Frequenz:  $f(t) = \sin(2\pi vt)$
- Periode:  $T = \frac{1}{v}$
- Frequenz:  $\omega = 2\pi v$

### 6.1 Wechselstrom

- Nennspannung:  $U_N = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$
- Spannung:  $U(t) = U_0 \sin(2\pi vt + \phi_0)$
- $U_0$ : Amplitude
- $\phi_0$ : Phasenkonstante

### 6.2 Transformatoren



## 7 Wellen

### 7.1 Wellengleichung

- $c = \lambda f$
- $\lambda = \frac{2\pi}{k}$
- $T = \frac{1}{f}$
- Geschwindigkeit:  $c$
- Vakuum: Geschwindigkeit:  $c_v = 3 \cdot 10^8$  m/s
- Wellenlänge:  $\lambda$
- Wellenzahl  $k$
- Frequenz:  $f$
- Periode:  $T$

### 7.2 Elektromagnetische Strahlung

#### 7.2.1 Ebene Welle

- Bei einer ebenen Welle ist das  $\vec{E}$ -Feld in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung überall gleich gross
- $\vec{E}(y, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_0 \sin(2\pi ft - ky) \end{pmatrix}$
- Allgemein sehen elektromagnetische Wellen in kleinen Raumgebieten und weit weg vom Sender aus wie ebene Wellen ("weit weg- mehrere Wellenlängen), auch wenn sie global gesehen natürlich keine ebenen Wellen sind
- $\vec{k} = k \vec{n}_w = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}_w$
- $\vec{B} = \frac{1}{2\pi f} \vec{k} \times \vec{E}$
- $|\vec{E}| = c |\vec{B}|$
- $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \sin(2\pi ft - \vec{k} \cdot \vec{r})$
- $\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \sin(2\pi ft - \vec{k} \cdot \vec{r})$
- Oszillierende Ströme in Leitern erzeugen elektromagnetische Wellen

#### 7.2.2 Intensität

- Mit der Intensität  $I_{em}$  einer ebenen Welle gibt man die Energie an, die pro Zeiteinheit auf eine **senkrecht** zur Wellenausbreitung ausgerichteten **Fläche** auftrifft (Leistung pro Fläche)
- $I_{em} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \frac{E_0^2}{2c\mu_0} = \frac{cB_0^2}{2\mu_0}$

#### 7.2.3 Strahlungsdruck

- Wird eine Ladung in die Richtung des  $\vec{E}$ -Feldes beschleunigt, führt das zu einer Geschwindigkeit in diese Richtung
- Das  $\vec{B}$ -Feld führt dadurch zu einer Kraft nach vorne
- Eine ebene Welle führt zu einem Druck  $p_s$  auf leichtbewegliche Ladungen
- $p_s = \frac{I_{em}}{c} = \frac{E_0 B_0}{2c\mu_0} = \frac{E_0^2}{2c^2\mu_0} = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$

#### 7.2.4 Stabantenne

- $\vec{E}$ -Feld wirkt auch auf Ladung in der Antenne
- Ein Teil der Energie fließt daher wieder in die Antenne zurück
- $h \leq \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \approx \frac{8h^3}{\lambda^3}$
- h: Höhe der Antenne
- Maximale Effizienz:  $\lambda = 2h$
- Signal wird in Trägersignal umgewandelt, dass sich schneller ändert
- Phasenmodulation:  $\text{phasesig}(t) = \sin(2\pi ft + U(t))$
- Amplitudenmodulation:  $\text{amplsig}(t) = U(t) \cdot \sin(2\pi ft)$

#### 7.2.5 Superposition von Wellen

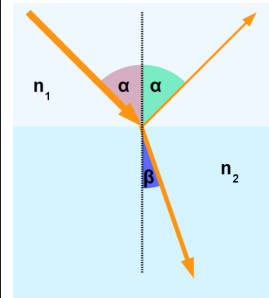
##### Addition von Wellen

- Wellen dürfen beliebig addiert werden

##### Stehende Wellen

- Die Summe einer von rechts nach links und einer von links nach rechts laufenden Welle gibt eine sogenannte stehende Welle
- $E_0 \sin(2\pi ft - ky) + E_0 \sin(2\pi ft + ky) = 2E_0 \sin(2\pi ft) \cos(ky)$

### 7.3 Lichtbrechung



- Wenn ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen zwei Materialien trifft, wird ein Teil des Lichts reflektiert, ein anderer Teil dringt in das Material ein

- $\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$
- $\sin(\beta) \leq \frac{n_1}{n_2}$
- Der Brechungsindex im Vakuum ist  $n_v = 1$

#### 7.3.1 Glasfaserkabel

- $\frac{c_G}{c_v} = \frac{n_v}{n_G}$
- Lichtgeschwindigkeit Vakuum:  $c_v = 3 \cdot 10^8$  m/s
- Signalgeschwindigkeit:  $c_G$
- Brechungsindex Vakuum:  $n_v = 1$
- Brechungsindex Glas:  $n_G$

## 8 Thermische Strahlung

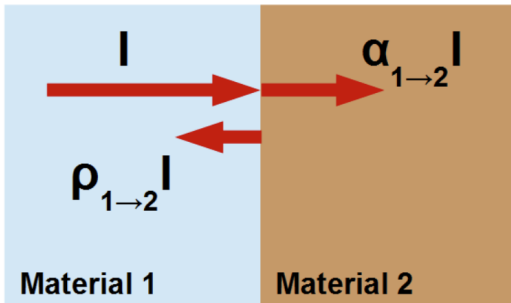
- Jedes Objekt mit einer Temperatur grösser 0 K / -273.25 C strahlt elektromagnetische Strahlung ab
- Intensität =  $\frac{\text{Energie}}{\text{Fläche} \times \text{Zeit}}$
- Ein Objekt ist in einem thermischen Gleichgewicht, wenn seine Temperatur sich nicht ändert und es ausser Wärmeenergie netto keine Energie aufnimmt oder abgibt

### 8.1 Photon

- Energie eines Photons:  $E = h\nu$
- $\nu$ : Frequenz
- Planck'sche Konstante  $h : 6.626 \cdot 10^{-34} [Js]$

### 8.2 Absorption Reflexion Emission

- Für einen undurchsichtigen Körper gilt: Alles auftreffende Licht wird geschluckt oder reflektiert
- $\alpha$  (Absorptionskoeffizient) wird absorbiert/geschluckt
- $\rho = 1 - \alpha$  (Reflexionskoeffizient) wird reflektiert
- Reflexions- und Absorptionskoeffizient können frequenzabhängig sein  $\alpha = \alpha(\nu)$
- $\alpha_{1 \rightarrow 2} + \rho_{1 \rightarrow 2} = 1$
- Wenn elektromagnetische Strahlung von innen auf die Grenzschicht trifft, kommt es auch zu Reflexion
- Für einen schwarzen Strahler macht es keinen Unterschied, ob ein Strahl von aussen oder innen auf die Trennschicht trifft
- Schwarzen Strahler:  $\alpha_{1 \rightarrow 2} = \alpha_{2 \rightarrow 1}$
- Schwarzen Strahler:  $\rho_{1 \rightarrow 2} = \rho_{2 \rightarrow 1}$
- Emission:  $\varepsilon_{2 \rightarrow 1} = \alpha_{2 \rightarrow 1}$



### 8.3 Schwarzer Körper

- **Schwarzer Strahler:** für alle Frequenzen  $\alpha = 1$
- Auch ein schwarzer Strahler kann bei hohen Temperaturen leuchten (Sonne)

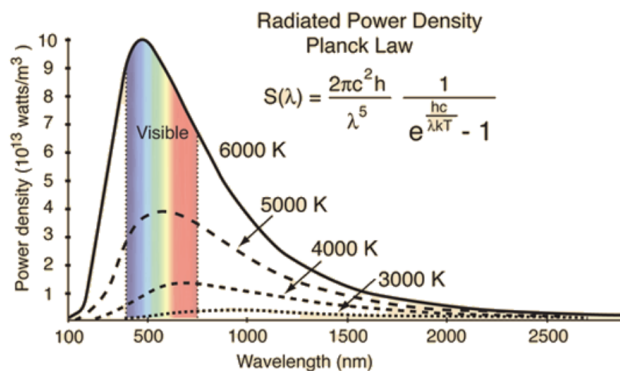
#### 8.3.1 Das Planck'sche Strahlungsgesetz

- Jeder Körper mit einer Temperatur  $T$  strahlt einen Mix elektromagnetischer Wellen ab
- Für alle schwarzen Strahler ist dieser Mix gleich. Der Mix hängt von der Temperatur aber nicht von der Struktur oder Material ab

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

- Planck'sche Konstante  $h : 6.626 \cdot 10^{-34} [Js]$
- Intensitäten als für verschiedene Temperaturen:



- Je heißer ein Objekt ist, desto größer ist die Intensität der thermischen Strahlung
- Je heißer ein Objekt ist, desto kürzer ist die Wellenlänge des Hauptteils der Strahlung, bzw. desto höher ist dessen Frequenz

#### 8.3.2 Wien'sches Verschiebungsgesetz

- $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$
- $b = 2.8978 \cdot 10^{-3} [mK]$
- Bei hinreichend hoher Temperatur liegt die Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  im sichtbaren Bereich
- Liegt das Strahlungsmaximum im grünen Bereich, gibt es immer rote und blaue Anteile. Unsere Farbwahrnehmung mixt dies zu weißlich
- Mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes kann die Temperatur eines Sterns bestimmt werden.

#### 8.3.3 Stefan - Boltzmann Gesetz

- Gesamtleistung  $P_{\text{rad}}$  der Strahlung eines Körpers mit Oberfläche  $A$  und Temperatur  $T$
- $P_{\text{rad}} = \sigma AT^4$
- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [\frac{W}{m^2 K^4}]$
- Eine Verdoppelung der Temperatur führt also zu einer Versechzehnfachung der abgestrahlten Leistung

#### 8.3.4 Grauer Körper

- Der Emissions-/Absorptionskoeffizient kann von der Temperatur und der Wellenlänge abhängen
- Meist spielt die Temperaturabhängigkeit aber keine große Rolle
- Die Wellenlängenabhängigkeit ist für die meisten Materialien über große Wellenlängenbereiche konstant