

# Grundlagen der Elektro- und Digitaltechnik

## Physikalische Grundlagen

### Wichtige Größen

- Spannung (U) [Volt, V] =  $\frac{J}{C}$
- Strom (I) [Ampere, A] =  $\frac{C}{s}$
- Widerstand (R) [Ohm,  $\Omega$ ] =  $\frac{V}{A}$
- Leistung (P) [Watt, W] =  $V \cdot A$
- Kapazität (C) [Farad, F] =  $\frac{A \cdot s}{V}$
- Induktivität (L) [Henry, H] =  $\frac{V \cdot s}{A}$
- Ladung (q) [Coulomb, C] =  $A \cdot s$
- Kraft (F) [Newton, N] =  $kg \cdot \frac{m}{s^2}$
- Energie = Arbeit (E = W) [Joule, J] =  $N \cdot m$
- Frequenz (f) [Hertz, Hz] =  $\frac{1}{s}$
- Magnetische Flussdichte (B) [Tesla, T] =  $\frac{N}{A \cdot m}$
- Kelvin (K): Absolute Temperatur in Celsius + 273.15

## Wichtige Konstanten

- Erdbeschleunigung (g) =  $9.81 \frac{m}{s^2}$
- Lichtgeschwindigkeit (c) =  $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$
- Elektrische Feldkonstante ( $\epsilon_0$ ) =  $8.854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$
- Magnetische Feldkonstante ( $\mu_0$ ) =  $1.26 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$
- Gravitationskonstante ( $\gamma$ ) =  $6.674\,30 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$
- Elementarladung (e) =  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} C$
- Plancksche Konstante (h) =  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} Js$
- Boltzmann-Konstante (k) =  $1.380\,649 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$
- Wien'sche Verschiebungskonstante (b) =  $2.897\,772\,9 \times 10^{-3} mK$
- Stefan-Boltzmann-Konstante ( $\sigma$ ) =  $5.670\,374\,419 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

## Beschleunigung

	t	s	v	a
t	-	$s = \frac{v^2}{2a}$	$v = \sqrt{2as}$	$a = \frac{v^2}{2s}$
s	$t = \frac{v}{a}$	-	$v = at$	$a = \frac{v}{t}$
v	$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$	$s = \frac{at^2}{2}$	-	$a = \frac{2s}{t^2}$
a	$t = \frac{2s}{v}$	$s = \frac{vt}{2}$	$v = \frac{2s}{t}$	-

## Wurf mit Vektoren

- $\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z - g \cdot t \end{pmatrix}$
- $\vec{s}(t) = \begin{pmatrix} s_x + v_x \cdot t \\ s_y + v_y \cdot t \\ s_z + v_z \cdot t - \frac{1}{2}g \cdot t^2 \end{pmatrix}$

## Kräfte

### Gewichtskraft

Vektor	Zahlwert
$\vec{F}_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -m \cdot g \end{pmatrix}$	$F_G = m \cdot g$

m: Masse [kg], h: Höhe [m]

### Federkraft

Vektor	Zahlwert
$\vec{F}_s = -k \cdot ( \vec{x}  - L) \cdot \frac{\vec{x}}{ \vec{x} }$	$F_s = -k \cdot (x - L)$

k: Federkonstante  $\left[\frac{N}{m}\right]$ , L: Ruhelänge [m],  
x: Auslenkung [m]

### Gravitationskraft zwischen Massen

Vektor	Zahlwert
$\vec{F}_{12} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{ \vec{r}_1 - \vec{r}_2 ^2} \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{ \vec{r}_1 - \vec{r}_2 }$	$F_{12} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$

$m_1, m_2$ : Massen [kg],

$r_1, r_2$ : Orte der Massen [m], r: Abstand der Massen [m]

$\vec{n}_{12} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$ : Einheitsvektor von Masse 2 zu Masse 1

### Kraft zwischen Ladungen (Coulomb-Kraft)

Vektor	Zahlwert
$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{ \vec{r}_1 - \vec{r}_2 ^2} \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{ \vec{r}_1 - \vec{r}_2 }$	$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$

$q_1, q_2$ : Ladungen [C],

$r_1, r_2$ : Orte der Ladungen [m]

## Energie

- Potentielle Energie:  $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$
- Kinetische Energie:  $E_{kin} = \frac{1}{2}m \cdot v^2$
- Federenergie:  $E_s = \frac{1}{2}k(x - L)^2$
- Potentielle Energie einer Ladung bei einer Spannung:  $E_{pot.el} = Uq$
- Potential:  $\varphi = \frac{\text{Potentielle Energie der Menge X}}{\text{Menge X}}$

## Veränderungsraten

- $v(t) = \frac{ds(t)}{dt} = \int a(t)dt$
- $a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2s(t)}{dt^2}$
- $s(t) = \int v(t)dt$
- $I(t) = \frac{dq(t)}{dt}$

## Elektrische Grundlagen

### Ohmsches Gesetz

- $U = U_R = R \cdot I$
- $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ 
  - $\rho$ : spezifischer Widerstand [ $\Omega \cdot m$ ]
  - $l$ : Länge des Leiters [m]
  - $A$ : Querschnittsfläche des Leiters [ $m^2$ ]
- $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$

### Knotenregel (1. Kirchhoff'sche Regel)

Ein Knoten ist ein Verbindungspunkt mehrerer Leiter.

$$\sum I_{ein} = \sum I_{aus}$$

### Maschenregel (2. Kirchhoff'sche Regel)

Eine Masche ist ein geschlossener Weg in einem Netzwerk.

$$\sum U_{Quelle} = \sum U_{Verbraucher}$$

## Reihenschaltung

- $R_{gesamt} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$
- $I_{gesamt} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$
- $U_{gesamt} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$

## Parallelschaltung

- $\frac{1}{R_{gesamt}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$
- $I_{gesamt} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
- $U_{gesamt} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$

## Lastwiederstand

$$P_{last} = U_0^2 \cdot \frac{R_{last}}{(R_i + R_{last})^2}$$

## Kondensator

- $C = \frac{q}{U}$  (Kapazität) [F]
- $E_{el} = \frac{1}{2}CU^2$
- $I(t) = \frac{U_0 - U_C(t)}{R} = \frac{U_0}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$
- $U_C(t) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
- $X_C = \frac{1}{\omega C}$  (Kapazitiver Blindwiderstand) [ $\Omega$ ]
  - Kann nicht direkt mit R addiert werden
- $\tau = R \cdot C$  (Zeitkonstante) [s]
- $\omega = 2\pi f$  (Kreisfrequenz) [Hz]
- $f_g = \frac{1}{2\pi\tau}$  (Grenzfrequenz) [Hz]

## Induktivität

- $U_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$
- $E_{mag} = \frac{1}{2}LI^2$
- $I(t) = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
- $X_L = \omega L$  (Induktiver Blindwiderstand) [ $\Omega$ ]
  - Kann nicht direkt mit R addiert werden
- $\tau = \frac{L}{R}$  (Zeitkonstante) [s]
- $\omega = 2\pi f$  (Kreisfrequenz) [Hz]
- $f_g = \frac{1}{2\pi\tau}$  (Grenzfrequenz) [Hz]

## Schwingkreis

- $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$  (Frequenz) [Hz]
- $T = \frac{1}{f}$  (Periodendauer) [s]
- $\tau = \frac{2L}{R}$  (Abklingzeit / Zeitkonstante) [s]
- Wenn  $R^2 < \frac{4L}{C}$ : Unterkritisch
  - Schnellstes Abklingen ohne Überschwingen
- Wenn  $R^2 = \frac{4L}{C}$ : Kritisch
  - Exponentielles Abklingen ohne Schwingung

## Signale

### Grundlegende Begriffe

- Amplitude (A): Maximaler Ausschlag eines Signals
- Periodendauer (T): Zeit für eine vollständige Schwingung [s]
- Frequenz (f): Anzahl der Schwingungen pro Sekunde [Hz]
- Kreisfrequenz ( $\omega$ ): Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
 
$$f_n = n \cdot \frac{1}{T}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n$$
- Phasenverschiebung ( $\varphi$ ): Zeitliche Verschiebung eines Signals [rad]
 
$$\varphi = \omega \cdot t_{Verschiebung}$$

- Serieschaltung: Signale werden addiert
- Parallelschaltung: Signale werden gemittelt

### Wichtige Signale

- Sinus:  $y(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$
- Rechteck:  $y(t) = \begin{cases} A & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ -A & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$
- Dreieck:  $y(t) = \begin{cases} \frac{4A}{T}t - A & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ -\frac{4A}{T}t + 3A & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$
- Sägezahn:  $y(t) = \frac{2A}{T}t - A$

## Fourierzerlegung

- Fourierreihe:

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t))$$

- Fourierkoeffizienten:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \sin(\omega_n t) dt$$

## Amplituden- und Phasendarstellung

- Amplituden- und Phasendarstellung:

$$g(t) = A_n \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

- Zusammenhang der Darstellungen:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\varphi_n = \arctan \left( \frac{a_n}{b_n} \right) = \arcsin \left( \frac{b_n}{A_n} \right) = \arccos \left( \frac{a_n}{A_n} \right)$$

## Inverse Fouriertransform

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

# Digitaltechnik

## Halbleiter

- n-Halbleiter: Überschuss an Elektronen (Donatoren)
- p-Halbleiter: Überschuss an Löchern (Akzeptoren)
- pn-Übergang: Verbindung von p- und n-Halbleiter

## Dotierung / Doping

- n-Dotierung: Zugabe von Elementen der 5. Hauptgruppe (z.B. Phosphor, Arsen)
- p-Dotierung: Zugabe von Elementen der 3. Hauptgruppe (z.B. Bor, Gallium)

## Halbleiterbauelemente

### Diode

- Leitet Strom in Durchlassrichtung (Anode zu Kathode)
- Sperrt Strom in Sperrrichtung (Kathode zu Anode)
- Kennlinie: Exponentielles Verhalten

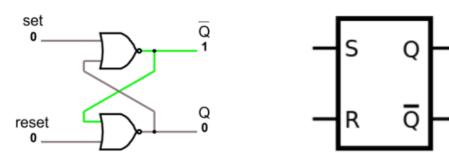
### Transistor (MOSFET)

- Steuerung des Stromflusses zwischen Drain und Source durch Spannung am Gate
- Leitet Strom, wenn Spannung am Gate über Schwellenspannung liegt

### Logische Gatter

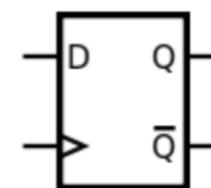
Gatter	IEC-Norm (Europa)	ANSI-Standard (USA)	Wahrheitstabelle															
NOT			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	A	0	1		1	0									
A	0	1																
	1	0																
AND			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	Y																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
OR			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
A	B	Y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
NAND			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	Y																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
NOR			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	Y																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
XOR			<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	Y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																

## RS-Flip-Flop



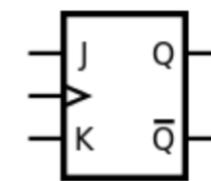
- Setzt Ausgang Q auf 1, wenn S=1 und R=0
- Setzt Ausgang Q auf 0, wenn S=0 und R=1
- Beibehaltung des Zustands, wenn S=0 und R=0
- Ungültiger Zustand, wenn S=1 und R=1

## D-Flip-Flop



- Überträgt Eingang D auf Ausgang Q bei Taktflanke
- Verhindert ungewollte Änderungen des Ausgangs

## JK-Flip-Flop



- Setzt Ausgang Q auf 1, wenn J=1 und K=0
- Setzt Ausgang Q auf 0, wenn J=0 und K=1
- Toggle-Zustand, wenn J=1 und K=1
- Beibehaltung des Zustands, wenn J=0 und K=0

## Parasiteneffekte

- Kapazitive Kopplung: Unerwünschte elektrische Verbindung zwischen Leitungen
- Induktive Kopplung: Unerwünschte magnetische Verbindung zwischen Leitungen
- Übersprechen: Signalübertragung von einer Leitung auf eine andere
- Signalreflexion: Rückkehr eines Signals aufgrund von Impedanzänderungen

## Sensoren

### aktive Sensoren

- Wandeln physikalische Größen direkt in elektrische Signale um
- Häufige Kalibrierung erforderlich
- Beispiele: Thermoelemente, Photovoltaikzellen

### passive Sensoren

- Ändern ihre elektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von physikalischen Größen
- Benötigen eine externe Spannungsquelle zur Messung
- Höhere Genauigkeit und Stabilität
- Beispiele: Widerstandsthermometer, Fotowiderstände

## AD-Wandler

- Wandeln analoge Signale in digitale Signale um
- Wichtige Parameter:
  - Auflösung (Bits)
  - Abtastrate (Samples pro Sekunde)
  - Eingangsspannungsbereich

## Elektrische und Magnetische Felder

### Coulomb-Gesetz

Siehe Kraft zwischen Ladungen Seite 1.

$$\vec{F}_{12} = \vec{E} \cdot q_p$$

### Elektrisches Feld

- Elektrische Feldstärke:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}_q|^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}_q}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} \quad \left[ \frac{N}{C} \right] = \left[ \frac{V}{m} \right]$$

- Elektrisches Potential:

$$\varphi = \frac{E_{pot}}{q} \quad [V]$$

- Spannung zwischen zwei Punkten:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

### Magnetisches Feld

- Magnetische Flussdichte:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q \cdot \vec{v}} \quad [T]$$

- Lorentzkraft:

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

- Wenn  $\vec{v} \perp \vec{B}$  gilt:

$$m = \frac{q \cdot |\vec{B}| \cdot r}{v} \quad (\text{Masse des Teilchens}) [kg]$$

- Strom ist immer senkrecht zum Magnetfeld

### Elektromagnetische Kraft und Feldenergie

- Kraft auf eine Ladung im elektromagnetischen Feld:

$$\vec{F}_{elmag} = q(\vec{E}(\vec{r}) + \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r})) \quad [N]$$

- Energiedichte des elektromagnetischen Feldes:

$$w = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2 + \frac{\mu_0 c^2}{2} |\vec{B}|^2 \quad \left[ \frac{J}{m^3} \right]$$

- Energie in einem Volumen V:

$$\epsilon = \int_V w \, dV \quad [J]$$

## Elektrodynamik

### Der Fluss

- Elektrischer Fluss:

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \left[ \frac{Nm^2}{C} \right]$$

- Wenn  $\vec{E}$  homogen und senkrecht zur Kugeloberfläche ist

$$\Phi_E = 4\pi r^2 \cdot |\vec{E}| = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$|\vec{E}| = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

### Integration entlang von Linien

- Arbeit eines Kraftfeldes entlang einer Linie:

$$W = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} \quad [J]$$

- Spannung zwischen zwei Punkten:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} \quad [V]$$

### Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

- Magnetfeld um einen gestreckten Leiter:

$$|\vec{B}(\vec{r})| = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [T]$$

- Magnetfeld von Spulen:

$$|\vec{B}| = \mu_0 \mu_r \frac{N}{L} I \quad [T]$$

N: Windungszahl, L: Länge der Spule [m],  
 $\mu_r$ : relative Permeabilität des Spulenkerns

## Induktion

### Induktionsgesetz

- Induzierte Spannung in einer Leiterschleife:

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [V]$$

- Magnetischer Fluss im Dynamo:

$$\Phi = A_1 \cdot E = A_2 \cdot E \cdot \cos(\theta)$$

$A_1$ : Fläche der Spule [ $m^2$ ],

$A_2$ : Fläche des Rotors [ $m^2$ ],

$\theta$ : Winkel zwischen Magnetfeld und Flächennormalen  $\theta = \omega t$

- Induzierte Spannung im Dynamo:

$$U_{ind} = A \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad [V]$$

### Effektivwert

- Effektivwert einer Sinusspannung:

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad [V]$$

### Senden und Empfangen von Signalen

- Antennenlänge für eine Frequenz:

$$l_{Ant} = \frac{c}{f} \quad [m]$$

- Empfangene Leistung:

$$P_{empfangen} = P_{senden} \cdot \left( \frac{l_{Ant}}{4\pi r} \right)^2 \quad [W]$$

r: Abstand zwischen Sender und Empfänger [m]

### Transformator

- Spannungsverhältnis (N=Windungszahl):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Stromverhältnis:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

- Leistung:

$$P_1 = P_2$$

# Elektromagnetische Wellen

## Wellengleichung

- Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \quad \left[ \frac{m}{s} \right]$$

- Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m], \quad f = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{T} \quad [Hz]$$

- Wellengleichung:

$$E_z(y, t) = E_0 \cdot \sin(2\pi ft - ky) \quad \left[ \frac{V}{m} \right]$$

$$B_x(y, t) = B_0 \cdot \sin(2\pi ft - ky) \quad [T]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}: \text{Wellenzahl } \left[ \frac{1}{m} \right]$$

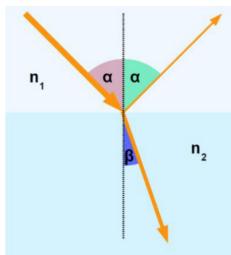
$E_0$ : elektrische Feldstärke Amplitude  $\left[ \frac{V}{m} \right]$

$B_0$ : magnetische Flussdichte Amplitude  $[T]$

$y$ : Ausbreitungsrichtung  $[m]$

## Lichtbrechung

- Snelliuss'sches Brechungsgesetz:



$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Brechungsindex:

$$n_M = \frac{c_0}{c_{Medium}}$$

- Totalreflexion tritt auf, wenn der Einfallswinkel größer ist als der kritische Winkel:

$$\sin(\theta_{krit}) = \frac{n_2}{n_1}$$

## Wellenphänomene

### Interferenz

- Konstruktive Interferenz addiert die Amplituden
- Destruktive Interferenz subtrahiert die Amplituden

### Diffraction

- Beugung tritt auf, wenn die Wellenlänge in der Größenordnung der Hindernisgröße liegt
- Aus dem Interferenzmuster können Rückschlüsse auf die Wellenlänge gezogen werden

### Dispersion

- Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz
- Ursache für die Aufspaltung von Licht in seine Spektralfarben

### Intensität von Wellen

- Intensität:

$$I = \frac{P}{A} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

- Intensität in Abhängigkeit von der Entfernung (Kugelwelle):

$$I(r) = \frac{P_{senden}}{4\pi r^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

### Absorption

- Lambert-Beer'sches Gesetz:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$\alpha$ : Absorptionskoeffizient  $\left[ \frac{1}{m} \right]$ ,  
 $x$ : Eindringtiefe  $[m]$

### Dezibel

- Pegel in Dezibel:

$$Q = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad [dB]$$

$$I_0: \text{Referenzintensität } \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

## Thermische Strahlung

### Absorption, Emission, Reflexion

- Absorptionsgrad ( $\alpha$ ): Absorbierte Strahlung
- Emissionsgrad ( $\varepsilon$ ): Emittierte Strahlung
- Reflexionsgrad ( $\rho$ ): Reflektierte Strahlung
- $\alpha + \varepsilon + \rho = 1$
- Für Schwarze Körper gilt:  $\alpha = \varepsilon = 1$  und  $\rho = 0$
- Für graue Körper gilt:  $\alpha = \varepsilon < 1$  und  $\rho > 0$

$$S(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \cdot S_{schwarz}(\lambda, T) \quad \left[ \frac{W}{m^2 msr} \right]$$

### Plancksches Strahlungsgesetz

Beschreibt die spektrale Strahldichte eines Schwarzen Körpers bei gegebener Temperatur.

$$S(f, T) = \frac{2h\pi f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \quad \left[ \frac{W}{m^2 Hz sr} \right]$$

$$S(\lambda, T) = \frac{2h\pi c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad \left[ \frac{W}{m^2 msr} \right]$$

$h$ : Plancksches Wirkungsquantum  $[J s]$ ,

$k_B$ : Boltzmann-Konstante  $\left[ \frac{J}{K} \right]$ ,

$c$ : Lichtgeschwindigkeit  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ ,

$f$ : Frequenz  $[Hz]$ ,

$\lambda$ : Wellenlänge  $[m]$ ,

$T$ : absolute Temperatur  $[K]$

### Wien'sches Verschiebungsgesetz

Wird verwendet, um die Wellenlänge des Maximums der Strahlung eines Schwarzen Körpers bei gegebener Temperatur zu bestimmen.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad [m]$$

$b$ : Wien'sche Verschiebungskonstante  $[mK]$ ,

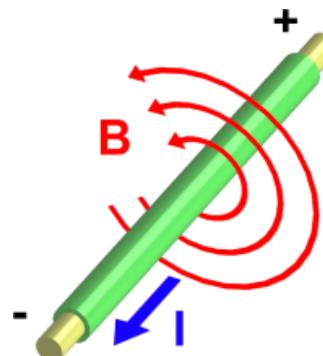
$T$ : absolute Temperatur  $[K]$

## Stefan-Boltzmann-Gesetz

Beschreibt die Gesamtstrahlungsleistung eines Schwarzen Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur.

$$P = \sigma A T^4 \quad [W]$$

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante  $\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ ,  
 $A$ : Oberfläche des Körpers  $[m^2]$ ,  
 $T$ : absolute Temperatur  $[K]$



## Thermische Strahlungsbilanz

$$I_{E,rad} = \sigma \varepsilon A (T^4 - T_{Umgebung}^4) \quad [W]$$

$I_{E,rad}$ : Nettostrahlungsleistung  $[W]$ ,

$\varepsilon$ : Emissionsgrad des Körpers,

$A$ : Oberfläche des Körpers  $[m^2]$ ,

$T$ : absolute Temperatur des Körpers  $[K]$ ,

$T_{Umgebung}$ : absolute Temperatur der Umgebung  $[K]$

## Wärmeleitung

$$I_{E,cond} = Ah(T_{inner} - T_{outer}) \quad [W]$$

$I_{E,cond}$ : Wärmeleitungsleistung  $[W]$ ,

$A$ : Querschnittsfläche  $[m^2]$ ,

$h$ : Wärmeleitkoeffizient  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ ,

$T_{inner}$ : Innentemperatur  $[K]$ ,

$T_{outer}$ : Außentemperatur  $[K]$

## Misc

