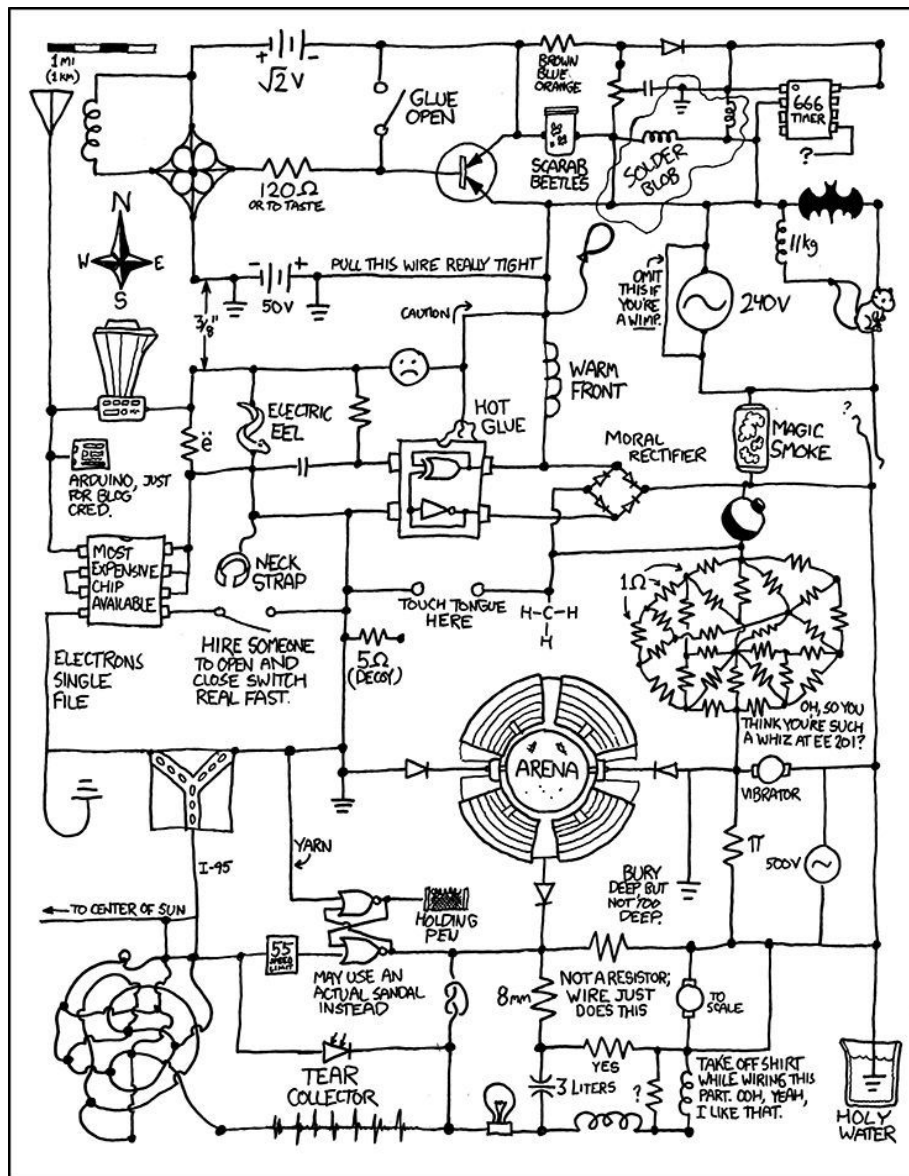


Grundlagen der Elektrotechnik  
Peter Lindmoser



Quelle: <https://xkcd.com/730/>

## 0.1 Einheiten in der Physik

SI-Basisgröße		SI-Basiseinheit	
Name	Formelzeichen	Name	Einheitenzeichen
Länge	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Stromstärke	I	Ampere	A
Temperatur	T	Kelvin	K
Stoffmenge	n	Mol	mol
Lichtstärke	I	Candela	cd

## 0.2 SI-Vorsilben

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Exa	E	$10^{18}$
Peta	P	$10^{15}$
Tera	T	$10^{12}$
Giga	G	$10^9$
Mega	M	$10^6$
Kilo	k	$10^3$
Hekto	h	$10^2$
Deka	da	$10^1$
Dezi	d	$10^{-1}$
Zenti	c	$10^{-2}$
Milli	m	$10^{-3}$
Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Nano	n	$10^{-9}$
Piko	p	$10^{-12}$
Femto	f	$10^{-15}$

## 0.3 Das griechische Alphabet

Symbol	Name	Symbol	Name
$\Gamma$	Gamma	$\alpha$	alpha
$\Delta$	Delta	$\beta$	beta
$\Theta$	Theta	$\gamma$	gamma
$\Lambda$	Lambda	$\delta$	delta
$\Sigma$	Sigma	$\epsilon$	epsilon
$\Phi$	Phi	$\eta$	eta
$\Psi$	Psi	$\vartheta$	theta
$\Omega$	Omega	$\kappa$	kappa
		$\lambda$	lambda
		$\mu$	mü
		$\nu$	nü
		$\xi$	xi
		$\pi$	pi
		$\rho$	rho
		$\sigma$	sigma
		$\tau$	tau
		$\varphi$	phi
		$\psi$	psi

## 0.4 Elektrische Ladung $Q$ und Stromstärke $I$

im Allgemeinen gilt::

$$Q = n \cdot q$$

$q$ ... Elementarladung  $q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

$n$ ... Anzahl der Elementarladungen, dimensionslos

für  $I = \text{konstant}$  gilt:

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

$I$ ... Strom in  $A$  (Ampere)

$Q$ ... Ladungsmenge in  $As$  (Amperesekunden)

$t$ ... Zeitspanne in  $s$  (Sekunden)

für  $i=f(t)$  gilt:

$$Q_{12} = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \longrightarrow i = \frac{dq}{dt}$$

## 0.5 Stromdichte $J$

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

$J$ ... Stromdichte in  $A/mm^2$

$I$ ... Stromstärke in  $A$

$A$ ... Querschnittsfläche des Leiters in  $mm^2$

## 0.6 Elektrisches Potential $\varphi$ und Spannung $U$

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

Die el. Spannung lässt sich immer als Potentialdifferenz angeben. Wobei Potentiale Spannungen gegen einen Bezugspunkt darstellen. Das Bezugspotential beträgt typischerweise 0 Volt und nennt sich Erdpotential, Ground oder Masse.

## 0.7 Widerstand $R$ und Leitwert $G$

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

$R$  ... elektrischer Widerstand in  $\Omega$  (Ohm)

$G$  ... elektrischer Leitwert in  $S$  (Siemens)

## 0.8 Ohmsches Gesetz

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

$U$  ... elektrische Spannung in  $V$  (Volt)

$I$  ... Stromstärke in  $A$  (Ampere)

$R$  ... elektrischer Widerstand in  $\Omega$  (Ohm)

## 0.9 Widerstandsberechnung

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

$\varrho$  ... spezifischer Widerstand in  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

$l$  ... Länge des Leiters in  $m$  (Meter)

$A$  ... Leiter-Querschnittsfläche in  $mm^2$

$$R = \frac{1}{\gamma \cdot A}$$

$\gamma$  ... spezifischer Leitwert in  $\frac{S \cdot m}{mm^2}$

$l$  ... Länge des Leiters in  $m$  (Meter)

$A$  ... Leiter-Querschnittsfläche in  $mm^2$

Wird der spezifische Widerstand  $\rho$  in der Einheit  $\Omega \cdot m$ , beziehungsweise der spezifische Leitwert in  $\frac{S}{m}$  angegeben, so muss die Querschnittsfläche in  $m^2$  (Quadratmetern) eingesetzt werden.

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \longrightarrow \gamma = \frac{1}{\rho}$$

$\rho$  ... spezifischer Widerstand in  $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$   
 $\gamma$  ... spezifischer Leitwert in  $\frac{S \cdot m}{mm^2}$

## 0.10 Widerstand und Temperatur

Im Temperaturbereich von  $-40 \dots +1000^\circ C$  gilt näherungsweise eine lineare Beziehung zwischen ohmschen Widerstand und der Temperatur.

$$R_{\vartheta} = R_{20} + \Delta R$$

$R_{\vartheta}$ ... Wert des Widerstandes bei der Temperatur  $\vartheta$   
 $R_{20}$ ... Widerstand bei  $20^\circ C$  in  $\Omega$

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta - 20^\circ C)]$$

$\alpha_{20}$ ... Temperaturkoeffizient in  $K^{-1}$  bei  $20^\circ C$   
 $\vartheta$  ... Temperatur des Widerstandes in  $^\circ C$

Beträgt die Ausgangstemperatur nicht  $20^\circ C$ , so ist folgende Formel zu verwenden.

$$\frac{R_W}{R_K} = \frac{\tau + \vartheta_W}{\tau + \vartheta_K}$$

$R_W$ ... Warmwiderstand in  $\Omega$   
 $R_K$ ... Kaltwiderstand in  $\Omega$   
 $\vartheta_W$  ... Warmtemperatur in  $^\circ C$   
 $\vartheta_K$  ... Kalttemperatur in  $^\circ C$

wobei

$$\tau = \frac{1}{\alpha_{20}} - 20^\circ C$$

$\tau$ ... Temperaturbeiwert in  $^\circ C$   
 $\alpha_{20}$ ... Temperaturkoeffizient in  $K^{-1}$  bei  $20^\circ C$

## 0.11 Reihenschaltung von $n$ Widerständen

Alle in Reihe geschalteten Widerstände werden von demselben Strom  $I$  durchflossen. Dies ist die gemeinsame Größe aller seriellen Widerstände.

$$R_{ges} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

$R_{ges}$ ... Gesamt- oder Ersatzwiderstand der Reihenschaltung  
 $n$ ... höchster Index (letzter Widerstand der Reihenschaltung)

$$R_{ges} = \sum_{i=1}^n R_i$$

## 0.12 Parallelschaltung von $n$ Widerständen

Alle parallel geschalteten Widerstände mit derselben Spannung  $U$  versorgt. Dies ist die gemeinsame Größe aller parallelen Widerstände.

$$G_{ges} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

$G_{ges}$ ... Gesamt- oder Ersatzleitwert der Parallelschaltung in  $S$  (Siemens)  
 $n$ ... höchster Index (letzter Leitwert der Parallelschaltung)

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$R_{\text{ges}}$ ... Gesamt- oder Ersatzwiderstand der Parallelschaltung  
 $n$ ... höchster Index (letzter Widerstand der Parallelschaltung)

Für zwei parallele Widerstände gilt:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## 0.13 Spannungsteilerregel

In **reinen Reihenschaltungen** gilt die Spannungsteilerregel. Diese besagt, dass die Spannungsabfälle an den Widerständen direkt proportional zu den Widerstandswerten, an denen sie abfallen, sind. Dass heißt:

$$U_1 : U_2 : U_3 : U_{\text{ges}} = R_1 : R_2 : R_3 : R_{\text{ges}}$$

z.B.:

$$\frac{U_1}{U_{\text{ges}}} = \frac{R_1}{R_{\text{ges}}}$$

## 0.14 Stromteilerregel

In **reinen Parallelschaltungen** gilt die Stromteilerregel. Diese besagt, dass die Ströme in den Widerständen indirekt proportional zu den Widerstandswerten, welche sie durchströmen, sind. Dass heißt:

$$I_1 : I_2 : I_3 : I_{\text{ges}} = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \frac{1}{R_{\text{ges}}}$$

z.B.:

$$\frac{I_1}{I_{\text{ges}}} = \frac{R_{\text{ges}}}{R_1}$$

## 0.15 Kirchhoffsche Gesetze

Knotenregel:

$$\sum I_{\text{zu}} = \sum I_{\text{ab}}$$

Die Summe der zufließenden Ströme zu einem Knoten muss der Summe der abfließenden Ströme dieses Knoten sein.

Maschenregel:

$$\sum U = 0$$

Die Summe aller Quellspannungen und Spannungsabfälle in einem beliebigen geschlossenen Umlauf (=Masche) muss Null sein.

## 0.16 Elektrische Leistung $P$

Die elektrische Leistung  $P$  ist wie folgt definiert:

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

$P$  ... Power = Leistung  
in der Einheit  $W$  (Watt)

## 0.17 Elektrische Arbeit $W$

Bei konstanter Leistung gilt:

$$W = P \cdot t$$

$W$  ... Work = Arbeit  
in der Einheit  $Ws = J$  (Joule)

Bei veränderbarer Leistung  $p(t)$  gilt:

$$W = \int p(t) \cdot dt$$

## 0.18 Wirkungsgrad $\eta$

Bei konstanter Leistung gilt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{W_{ab}}{W_{zu}}$$

$P_{ab}$  ... abgegebene Leistung (=Nutzleistung) in  $W$   
 $P_{zu}$  ... zugeführte Leistung in  $W$   
 $W_{ab}$  ... abgegebene Arbeit (=Nutzarbeit in  $Ws$ )  
 $W_{zu}$  ... zugeführte Arbeit in  $Ws$

wobei

$$P_{zu} = P_{ab} + P_v$$

$P_{zu}$  ... zugeführte Leistung in  $W$   
 $P_{ab}$  ... abgegebene Leistung (=Nutzleistung) in  $W$   
 $P_v$  ... Verlustleistung in  $W$

## 0.19 Grundgrößen des elektrischen Feldes

### Elektrische Feldstärke $E$

Für das homogene Feld gilt:

$$E = \frac{U}{d}$$

$E$  ...el. Feldstärke in  $\frac{V}{m}$   
 $U$  ...el. Spannung in  $V$   
 $d$  ... Länge der Feldlinie (=Abstand der Platten) in  $m$

Für den Zylinderkondensator gilt:

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{r_a}{r_i}}$$

$E$  ...el. Feldstärke in  $\frac{V}{m}$   
 $U$  ...el. Spannung in  $V$   
 $r$  ... Abstand des Feldpunktes vom Mittelpunkt in  $m$   
 $r_a$  ... Radius des Außenleiters in  $m$   
 $r_i$  ... Radius des Innenleiters in  $m$

Für die Umgebung einer geladenen Kugel gilt:

$$E = \frac{U \cdot r_0}{r^2}$$

$E$  ...el. Feldstärke in  $\frac{V}{m}$   
 $U$  ...el. Spannung in  $V$   
 $r$  ... Abstand des Feldpunktes vom Mittelpunkt in  $m$   
 $r_0$  ... Radius der Kugel in  $m$

### Elektrische Flussdichte $D$

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E$$

$D$  ... el. Flussdichte in  $\frac{As}{m^2}$ ,  $\frac{C}{m^2}$   
 $\epsilon_0$  ... el. Feldkonstante,  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ , oder  $\frac{F}{m}$   
 $\epsilon_r$  ... relative Permittivität, dimensionslos  
 $E$  ... el. Feldstärke in  $\frac{V}{m}$

### Verschobene Ladungsmenge $Q$

$$Q = D \cdot A$$

$Q$  ... verschobene Ladungsmenge in  $As$  oder  $C$   
 $D$  ... el. Flussdichte in  $\frac{As}{m^2}$ ,  $\frac{C}{m^2}$   
 $A$  ... Plattenfläche in  $m^2$

### Elektrische Kapazität $C$

$$Q = C \cdot U \longrightarrow C = \frac{Q}{U}$$

$Q$  ... verschobene Ladungsmenge in  $As$  oder  $C$   
 $C$  ... el. Kapazität in  $\frac{As}{V}$ ,  $F$  (Farad)  
 $U$  ... el. Spannung in  $V$

Für einen Zweiplattenkondensator gilt:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

$C$  ... el. Kapazität in  $\frac{As}{V}$ ,  $F$  (Farad)  
 $\epsilon_0$  ... el. Feldkonstante,  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ , oder  $\frac{F}{m}$   
 $\epsilon_r$  ... relative Permittivität, dimensionslos  
 $A$  ... Plattenfläche in  $m^2$   
 $d$  ... Dicke des Dielektrikums in  $m$

### Reihenschaltung von $n$ Kondensatoren

Alle in Reihe geschalteten Kondensatoren werden von demselben Strom geladen, dass heißt Ladungen werden verschoben. Die Ladungsmenge  $Q$  ist die gemeinsame Größe aller seriellen Kondensatoren.

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

$C_{ges}$ ... Gesamt- oder Ersatzkapazität der Reihenschaltung  
 $n$ ... höchster Index (letzter Kondensator der Reihenschaltung)

Für zwei in Reihe geschaltene Kondensatoren gilt:

$$C_{ges} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

### Parallelschaltung von $n$ Kondensatoren

Alle parallel geschalteten Kondensatoren liegen an derselben Spannung  $U$ . Dies ist die gemeinsame Größe aller parallelen Kondensatoren.

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

$C_{ges}$ ... Gesamt- oder Ersatzkapazität der Parallelschaltung  
 $n$ ... höchster Index (letzter Kondensator der Parallelschaltung)

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^n C_i$$

### Kräfte im elektrischen Feld

Kraft zwischen zwei Punktladungen

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$F$  ... Kraft in  $N$  (Newton)  
 $Q_1, Q_2$  ... Ladungsmengen in  $As$  oder  $C$   
 $\epsilon_0$  ... el. Feldkonstante,  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ , oder  $\frac{F}{m}$   
 $r$  ... Punktabstand in  $m$

Kraft zwischen zwei geladenen Platten

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U^2 A}{2d^2}$$

$F$  ... Kraft in  $N$  (Newton)

$\epsilon_0$  ... el. Feldkonstante,  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ , oder  $\frac{F}{m}$

$\epsilon_r$  ... relative Permittivität, dimensionslos

$A$  ... Plattenfläche in  $m^2$

Kraft auf eine Punktladung im homogenen Feld

$$F = Q \cdot E$$

$F$  ... Kraft in  $N$  (Newton)

$Q$  ... Ladungsmenge in  $As$  oder  $C$

$E$  ... elektrische Feldstärke in  $\frac{V}{m}$

**Energie im elektrischen Feld**

Kraft zwischen zwei Punktladungen

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

$W$  ... Arbeit in  $Ws$  oder  $J$  (Joule)

$C$  ... Kapazität in  $F$  (Farad)

$U$  ... el. Spannung in  $V$

**Ein- und Ausschaltvorgänge an Kondensatoren**

Einschaltvorgang

$$i = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$i$  ... Stromstärke  $i(t)$  in  $A$

$U$  ... Gleichspannung in  $V$

$R$  ... ohmscher Widerstand der Spule in  $\Omega$

$t$  ... Zeitpunkt in  $s$

wobei

$$\tau = R \cdot C$$

$\tau$  ... Zeitkonstante in  $s$

$C$  ... Kapazität des Kondensators in  $F$

$R$  ... ohmscher Widerstand der Spule in  $\Omega$

$$u_c = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$u_c$  ... Spannung am Kondensator in  $V$

Ausschaltvorgang

$$i = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$u_c = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

## 0.20 Grundgrößen des magnetischen Feldes

Durchflutung  $\Theta$  (Theta)

$$\Theta = I \cdot N$$

$\Theta$  ...Durchflutung in  $A$

$I$  ...Stromstärke in  $A$

$N$  ... Windungszahl, dimensionslos

Magnetische Feldstärke  $H$

$$H = \frac{\Theta}{l_m}$$

$H$  ... magn. Feldstärke in  $\frac{A}{m}$

$\Theta$  ...Durchflutung in  $A$

$l_m$  ... mittlere Länge der Feldlinie in  $m$



### Magnetische Flussdichte $B$

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

$B$  ... magn. Flussdichte in  $T$ (Tesla),  $\frac{Vs}{m^2}$   
 $\mu_0$  ... magn. Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  in  $\frac{Vs}{Am}$   
 $\mu_r$  ... relative Permeabilität, reine Zahl, dimensionslos

Für unmagnetisches Material gilt:  $\mu_r = 1$ ,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

Für ferromagnetische Materialien wird typischerweise eine Magnetisierungskennlinie angegeben, aus welcher der Zusammenhang  $B = f(H)$  zwischen den Größen  $B$  und  $H$  ersichtlich wird.

### Magnetischer Fluss $\Phi$

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$$

$\Phi$  ... magn. Fluss in  $Wb$  (Weber),  $Vs$   
 $B$  ... magn. Flussdichte in  $T$ (Tesla),  $\frac{Vs}{m^2}$   
 $A$  ... Querschnittsfläche des magn. Kreises in  $m^2$

### Magnetischer Widerstand $R_m$

$$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A}$$

$R_m$  ... magn. Widerstand in  $\frac{A}{Vs}$ ,  $\frac{1}{H}$   
 $H$ ...Henry

### Magnetischer Leitwert $\Lambda$

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu_0 \mu_r A}{l_m}$$

$\Lambda$  ... magn. Leitwert in  $\frac{Vs}{A}$ ,  $H$  (Henry)

### Induktivität $L$

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l_m} = \Lambda N^2$$

$L$  ... Induktivität in  $H$ (Henry)  
 $\mu_0$  ... magn. Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  in  $\frac{Vs}{Am}$   
 $\mu_r$  ... relative Permeabilität, reine Zahl, dimensionslos  
 $N$  ... Windungszahl, dimensionslos  
 $l_m$  ... mittlere Feldlinienlänge in  $m$

### Spulenfluss $\Psi$ Psi

$$\Psi = N \cdot \Phi = L \cdot I$$

$\Psi$  ... Spulenfluss in  $Wb$  (Weber),  $Vs$   
 $N$  ... Windungszahl, dimensionslos  
 $\Phi$  ... magn. Fluss in  $Wb$  (Weber),  $Vs$   
 $L$  ... Induktivität in  $H$ (Henry)  
 $I$  ...Stromstärke in  $A$

### Induktionsvorgänge

#### Ruheinduktion

Eine ruhende Spule wird von einem zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss durchsetzt

$$u_q = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

$u_q$  ...induzierte Spannung in  $V$   
 $\frac{d\Phi}{dt}$  ... Änderungsgeschwindigkeit des magn. Flusses  
 $N$  ... Windungszahl der Spule, dimensionslos

#### Bewegungsinduktion

Leiterstäbe einer rotierenden Spule schneiden ein statisches Magnetfeld ( $v \perp B$ )

$$u_q = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{v}$$

$u_q$  ...induzierte Spannung in  $V$   
 $B$  ... magn. Flussdichte in  $T$ (Tesla),  $\frac{Vs}{m^2}$   
 $l$  ... Länge des Leiters im Magnetfeld in  $m$   
 $v$  ... Geschwindigkeit des Leiters in  $\frac{m}{s}$

### Kraftwirkung des magnetischen Feldes

Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot l$$

$F$  ...Kraft auf den Leiter in  $N$  Newton  
 $B$  ... magn. Flussdichte in  $T$ (Tesla),  $\frac{Vs}{m^2}$   
 $I$  ... Stromstärke in  $A$   
 $l$  ... Länge des Leiters im Magnetfeld in  $m$

Kraftwirkung zwischen zwei parallelen Stromleitern

$$\mathbf{F} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}_1 \mathbf{I}_2 l}{2\pi a}$$

$F$  ...Kraft auf den Leiter in  $N$  Newton  
 $\mu_0$  ... magn. Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  in  $\frac{Vs}{Am}$   
 $I_1, I_2$  ... Leiterströme in  $A$   
 $l$  ... Länge des Leiters im Magnetfeld in  $m$   
 $a$  ... Abstand der Leiter von einander in  $m$

Zugkraft von Magneten

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{B}^2 \mathbf{A}}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A}$$

$F$  ...Zugkraft in  $N$  Newton  
 $\mu_0$  ... magn. Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  in  $\frac{Vs}{Am}$   
 $B$  ... magn. Flussdichte in  $T$ (Tesla),  $\frac{Vs}{m^2}$   
 $\Phi$  ... magn. Fluss in  $Wb$  (Weber),  $Vs$   
 $A$  ... Polfläche in  $m^2$

### Energie des magnetischen Feldes

Die im Magnetischen Feld gespeicherte Energie beträgt:

$$W = L \frac{I^2}{2}$$

$W$  ... Arbeit in  $Ws$   
 $L$  ...Induktivität der Spule in  $H$  Henry  
 $I$  ... Stromstärke in  $A$

### Ein- und Ausschaltvorgänge an Spulen

Einschaltvorgang

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$i$  ... Stromstärke  $i(t)$  in  $A$   
 $U$  ... Gleichspannung in  $V$   
 $R$  ... ohmscher Widerstand der Spule in  $\Omega$   
 $t$  ... Zeitpunkt in  $s$

wobei

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$\tau$  ... Zeitkonstante in  $s$   
 $L$  ... Induktivität der Spule in  $H$   
 $R$  ... ohmscher Widerstand der Spule in  $\Omega$

Ausschaltvorgang

$$i = \frac{U}{R} (e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$i$  ... Stromstärke  $i(t)$  in  $A$   
 $U$  ... Gleichspannung in  $V$   
 $R$  ... ohmscher Widerstand der Spule in  $\Omega$   
 $t$  ... Zeitpunkt in  $s$