

Thema	Bereiche	Seite
Magnetismus	Unterscheidung und Verlauf	3-2
Magnetfeld in Leitern	Zeichnung	3-2
Magnetfeld in Spule	Zeichnung	3-2
Merkblatt Magnetismus	Wesen	3-3
	Vorkommen	3-3
	Ursache	3-3
	Wirkung	3-3
	Wertung	3-3
Der Magnet	Arten	3-3
	Aufbau	3-3
	Magnetfeld	3-3
Magnetischer Fluß	Leitfähigkeit für magnetische Kraftlinien	3-3
	Sättigung	3-3
	Magnetische Flußdichte	3-3
Arten des Magneten	Weicheisenmagnet	3-3
	Harteisenmagnet	3-3
	Stahlmagnet	3-3
Entmagnetisieren	Erklärung	3-3
Magnetischer Fluß	Einheit und Erklärung	3-4
Magnetische Flußdichte	Berechnung	3-4
Magnetische Durchflutung	Berechnung	3-4
Magnetische Feldstärke	Berechnung	3-4
	Zusammenhang Flußdichte – Feldstärke	3-5
	Magnetisierungskennlinie	3-5
	Hysteresekurve	3-5
Kräfte auf stromdurchflossenen Le.	Zeichnung und Berechnung	3-6
Tragkraft eines Magneten	Zeichnung und Berechnung	3-6
Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld (Motorprinzip)	Linke-Hand-Regel	3-7
	UVW-Regel	3-7
	Berechnung	3-7
Induktion	Rechte-Hand-Regel	3-8
	UVW-Regel	3-8
	Berechnung	3-8
	Lenzsche Regel	3-8
Induktion der Ruhe (Trafoprinzip)	Zeichnung und Berechnung	3-9
	Spannungsübersetzungsverhältnis	3-9
	Stromübersetzungsverhältnis	3-9
	Widerstandsübersetzungsverhältnis	3-10
Selbstinduktion	Zeichnung und Berechnung	3-10
Spule (Induktivität)	Berechnung	3-11
	Energie / Arbeit im magnetischen Feld	3-12
	Reihenschaltung	3-12
	Parallelschaltung	3-12
	Ein- und Ausschalten einer Spule	3-13
	Berechnung der Zeitkonstante	3-14
	Berechnungen beim Einschaltvorgang	3-15
Berechnungen beim Ausschaltvorgang	3-16	

Grundlagen Magnetismus:

Unterscheidung der Magnete in:

- Dauermagnete (Permanentmagnete)
- Elektromagnete
- Erdmagnetfeld

Die magnetischen Feldlinien treten am N-Pol senkrecht aus und am S-Pol wieder senkrecht ein.

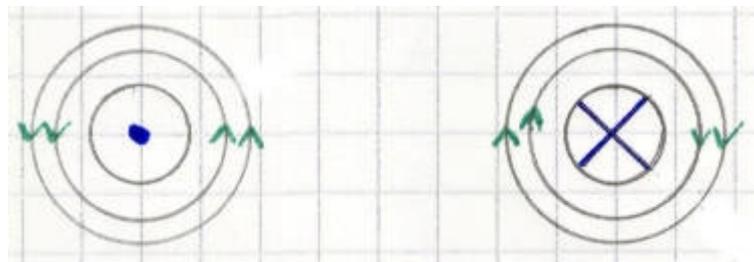
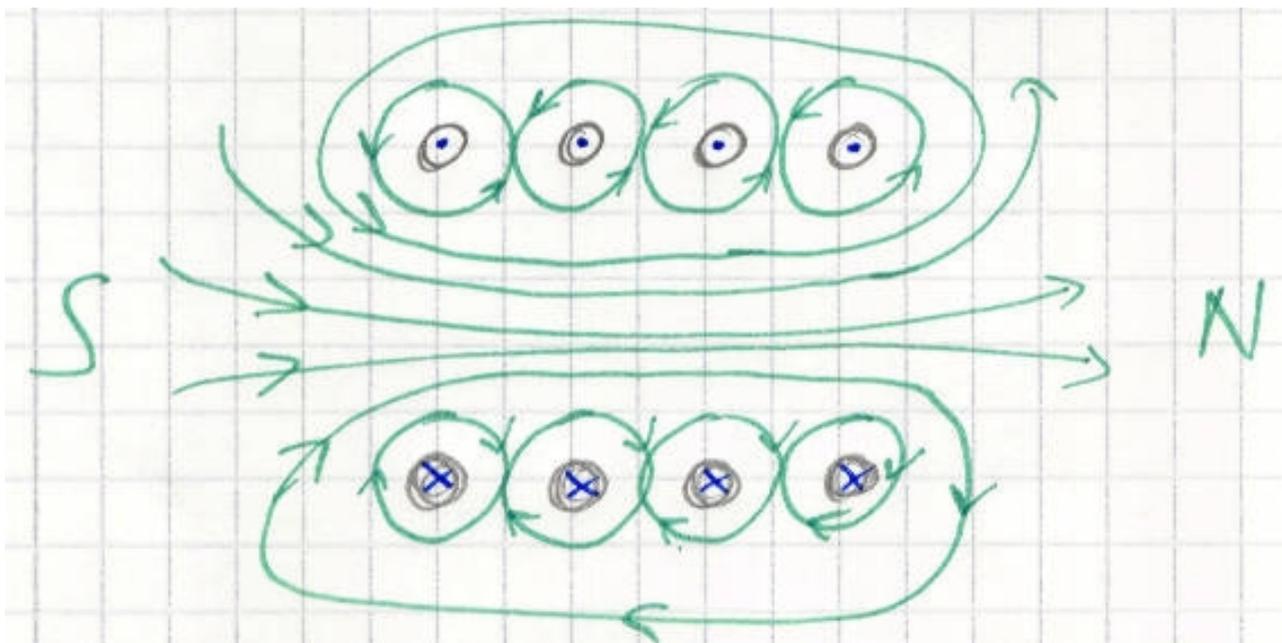
Im Inneren des Magneten verlaufen die magnetischen Feldlinien vom S-Pol zum N-Pol.

Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

Wird ein Leiter von einem Strom durchflossen, so baut sich um ihn kreisförmig ein Magnetfeld auf.

• bedeutet:
Strom fließt aus dem Leiter

X bedeutet:
Strom fließt in den Leiter

**Feldlinien in einer Spule:**

M E R K B L A T T : D e r M a g n e t i s m u s

1. Wesen
Der Magnetismus ist eine Erscheinung, die auf bestimmte Körper K r i s t a l l e ausübt.

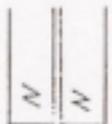
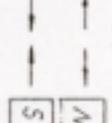
2. Vorkommen
Man unterscheidet:
a) natürlicher Magnetismus (Magneteisenerz - Erde)
b) künstlicher Magnetismus (Stab-, Hufeisen-, Elektromagnet)

3. Ursache
Die Erscheinung beruht auf dem Ausrichten der Moleküle.
Magnetismus = Ordnung der Molekularmagnete

	unmagnetisch		etwas magnetisch		stark magnetisch
---	--------------	---	------------------	---	------------------

4. Wirkung
Die magnetische Kraft bewirkt:

a) Anziehung bzw. Abstößung

	
---	---

b) Ausrichtung



5. Messung
Der Magnetismus spielt in der Elektrotechnik eine große Rolle. Ohne ihn wären viele technische Errungenschaften undenkbar.
Der Magnetismus findet Anwendung:
a) bei der Umwandlung von mech. Energie in el. Energie (Generator)
b) bei der Umwandlung von el. Energie in mech. Energie (Motor, Telefon, Rundfunk, Fernsehen)



D e r M a g n e t

1. Arten
Hufeisen-, Stab-, Topf- und Elektromagnet

2. Aufbau
Die Kraft des Magneten geht von seinen Enden aus. Man nennt sie P o l e. (Nordpol - Südpol)
Ungleichnamige Pole ziehen sich an!
Gleichnamige Pole stoßen sich ab!

3. Magnetfeld
Der Wirkungsbereich eines Magneten heißt M a g n e t f e l d. Dieses Feld besteht aus magnetischen Kraftlinien. Die Kraftlinien treten im Norden aus und münden im Süden ein.

4. Magnetischer Fluss Φ
a) Leitfähigkeit für magnetische Kraftlinien (Permeabilität)
Nicht alle Stoffe leiten die Kraftlinien gleich gut. Eisen leitet die Kraftlinien im Vergleich zu Luft sehr gut. Man bewirkt also mit Eisen eine Kraftlinienverstärkung oder eine Kraftlinienablenkung.
b) Sättigung
Eisen ist ein ausgerechneter Leiter für magnetische Kraftlinien. Es kann jedoch nur eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien aufnehmen. Ist das Eisen nicht mehr imstande, noch mehr Kraftlinien aufzunehmen, so spricht man von S ä t t i g u n g. (alle Molekularmagnete ausgerichtet)
c) Magnetischer Fluss Φ - magnetische Flundichte B
Gesamtzahl der magn. Feldlinien = magnetischer Fluss
 Φ : phi in Weber (Wb) $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$
 $\Phi = B \cdot A$
Kraftliniendichte pro m^2 = magn. Flundichte od. magn. Induktion
 B in Tesla (T) $1 \text{ T} = \frac{1 \text{ Vs}}{\text{m}^2}$

$B = \frac{\Phi}{A}$	$[\Phi] = \text{Vs}$	$[\frac{\Phi}{A}] = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$
	$[B] = \text{T}$	$[A] = \text{m}^2$

5. Arten des Magnetismus
a) W e i c h e i s e n ist nur solange magnetisch, wie es sich im Magnetfeld befindet. (zeitlicher od. temporärer Magn.)
b) Hartes Eisen bleibt auch noch etwas magnetisch, nachdem es aus dem Kraftfeld genommen wurde. (zurückbleibender od. permanenter Magnetismus)
c) S t a h l behält seine magnetische Kraft dauernd bei, wenn er magnetisiert wurde. (dauerhaft magnetisch od. permanenter Mag.)

6. Entmagnetisieren
Magnetismus = Ordnung der Molekularmagnete
Unmagnetisch = Unordnung der Molekularmagnete

Diese Unordnung wird erreicht:
a) durch Beklopfen (Erschütterung)
b) durch Ausglühen (Hitze)
c) durch Wechselfeld (Wechselstrom)

Der magnetische Fluß Φ (phi):

Einheit: $[\Phi] = 1Vs = 1Wb$

Die Anzahl der magnetischen Feldlinien wir als sog. magnetischer Fluß Φ (phi) bez.

Magnetische Flußdichte B:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

$$A = \frac{\Phi}{B}$$

$$\Phi = B \cdot A$$

$$[B] = \frac{Vs}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T$$

B = magnetische Flußdichte in T (Tesla)

Φ = magnetischer Fluß in Wb

A = Fläche in m^2

Die magnetische Durchflutung Θ (theta):

$$\Theta = I \cdot N$$

$$I = \frac{\Theta}{N}$$

$$N = \frac{\Theta}{I}$$

Θ = magnetische Durchflutung in A (auch magnetische Spannung)

I = Strom in A

N = Anzahl der Windungen der Spule

Magnetische Feldstärke H:

$$H = \frac{I \cdot N}{l_m}$$

$$l_m = \frac{I \cdot N}{H}$$

$$I = \frac{H \cdot l_m}{N}$$

$$N = \frac{H \cdot l_m}{I}$$

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

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

$$\Theta = l_m \cdot H$$

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

H = magnetische Feldstärke in $\frac{A}{m}$

I = Strom in A

N = Anzahl der Windungen der Spule

l_m = mittlere Feldlinienlänge in m

Θ = magnetische Durchflutung in A (auch magnetische Spannung)

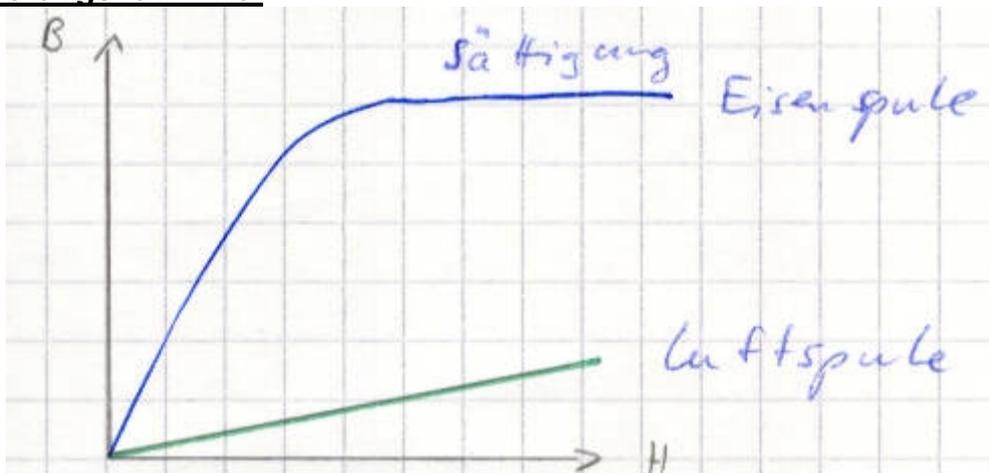
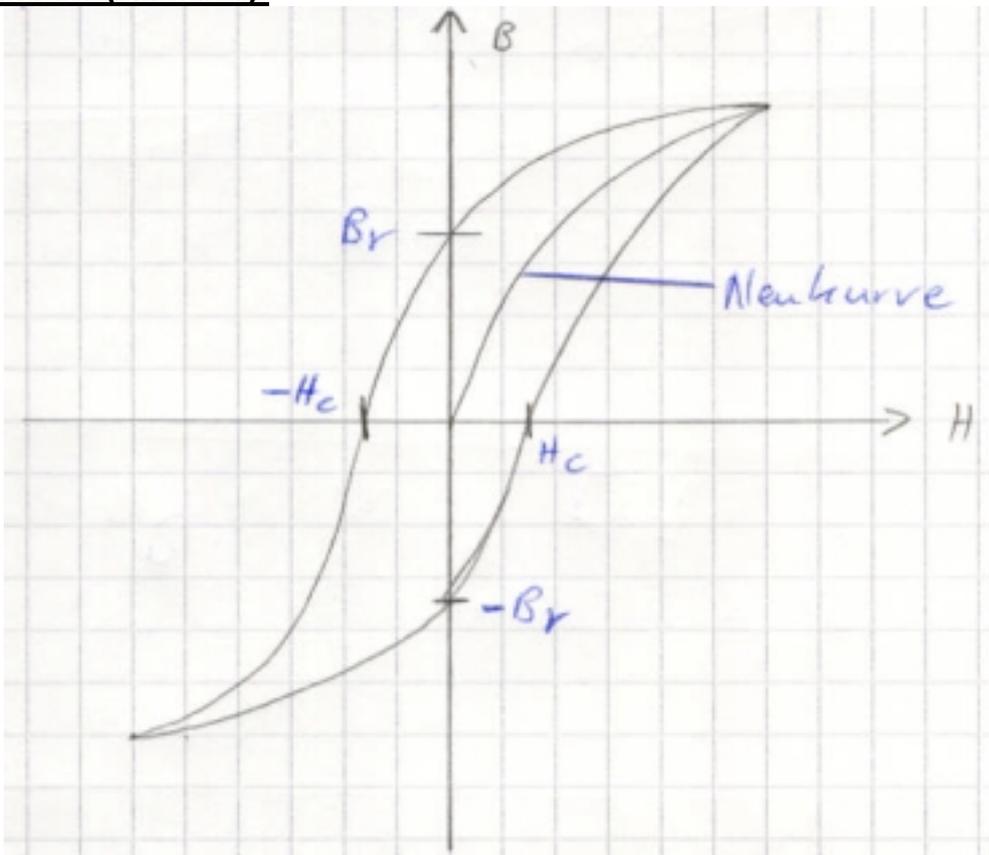
Zusammenhang zwischen magnetischer Flußdichte B und Feldstärke H:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

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

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

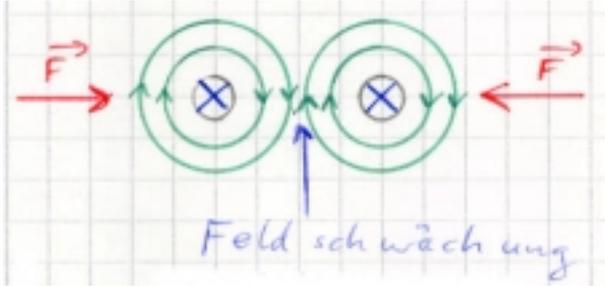
μ_0 = magnetische Feldkonstante $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$; μ_r = Permeabilitätszahl (bei Luft $\approx \mu_r=1$)

Magnetisierungskennlinie:**Hysteresekurve (-schleife):**

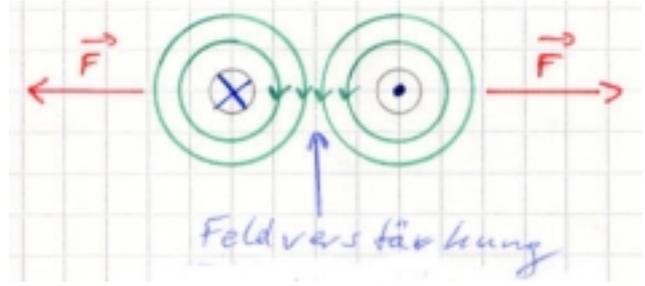
B_R = Remanenz (= Restmagnetismus)

H_C = Koerzitivfeldstärke (=Ummagnetisierungsfeldstärke)

Kräfte auf stromdurchflossene Leiter:



Feldlinien laufen entgegengesetzt
 ⇒ Feldschwächung
 ⇒ Leiter ziehen sich an



Feldlinien laufen gleich
 ⇒ Feldverstärkung
 ⇒ Leiter stoßen sich ab

Die Bewegung der Leiter folgt immer zum schwächeren Feld hin.

$$F = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$F = \frac{k \cdot l \cdot I_1 \cdot I_2}{r}$$

$$k = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi}$$

$$r = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot F}$$

$$r = \frac{k \cdot l \cdot I_1 \cdot I_2}{F}$$

$$I_2 = \frac{F \cdot r}{k \cdot l \cdot I_1}$$

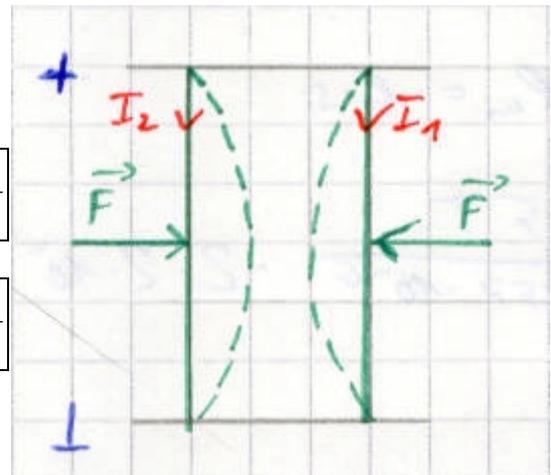
$$I_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot r}{\mu_0 \cdot l \cdot I_1}$$

$$I_1 = \frac{F \cdot r}{k \cdot l \cdot I_2}$$

$$l = \frac{F \cdot r}{k \cdot I_2 \cdot I_1}$$

$$I_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot r}{\mu_0 \cdot l \cdot I_2}$$

$$l = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot r}{\mu_0 \cdot I_2 \cdot I_1}$$



F = Kraft in N

μ_0 = magnetische Feldkonstante $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

l = wirksame Leiterlänge in m

$I_1 ; I_2$ = Strom durch den jeweiligen Leiter in A

r = Abstand der Leiter

Tragkraft eines Magneten:

$$F = \left(\frac{A \cdot B_L^2}{2 \cdot \mu_0} \right)$$

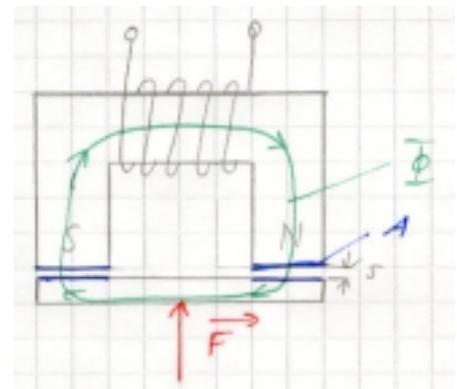
$$A = \frac{F \cdot 2 \cdot \mu_0}{B_L^2}$$

$$B_L = \sqrt{\frac{F \cdot 2 \cdot \mu_0}{A}}$$

$$W = F \cdot s$$

$$F = \frac{W}{s}$$

$$s = \frac{W}{F}$$



F = Kraft in N ; W = Hubarbeit des Magneten in Nm

A = wirksame Ankeroberfläche

B_L = magnetische Flußdichte der Spule in T

μ_0 = magnetische Feldkonstante $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

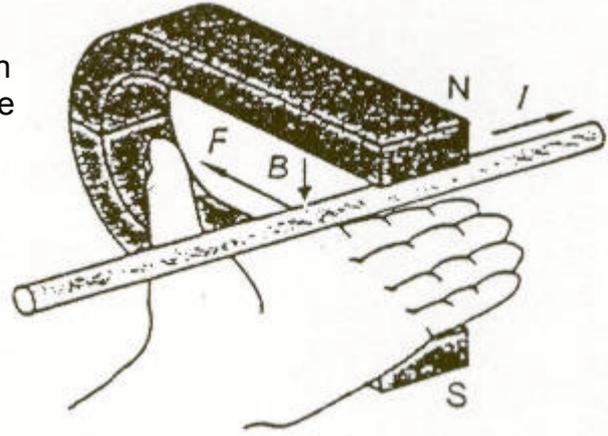
s = Abstand von Anker und Magnet in m

Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld (Motorprinzip):

Der stromdurchflossene Leiter bildet mit seinem Magnetfeld und dem des Dauermagneten ein resultierendes Magnetfeld. Es entsteht eine Feldverstärkung und eine Feldschwächung. Der stromdurchflossene Leiter bewegt sich in Richtung Feldschwächung.

Linke-Hand-Regel:

Hält man die linke Hand so, dass die Feldlinien auf die Innenfläche der Hand auftreffen und die gestreckten Finger in Stromrichtung zeigen, dann gibt der abgespreizte Daumen die Richtung der Kraft F an.

**U-V-W-Regel (rechte Hand):**

Ursache: Strom I

Vermittlung: Magnetfeld B

Wirkung: Kraft F

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot N$$

$$B = \frac{F}{I \cdot l \cdot N}$$

$$I = \frac{F}{B \cdot l \cdot N}$$

$$l = \frac{F}{B \cdot I \cdot N}$$

$$N = \frac{F}{B \cdot I \cdot l}$$

$$[F] = \frac{Vs}{m^2} \cdot A \cdot m = \frac{Ws}{m} = \frac{Nm}{m} = N$$

F = Kraft in N

B = Flußdichte in $\frac{Vs}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T$

I = Strom in A

l = wirksame Leiterlänge in m

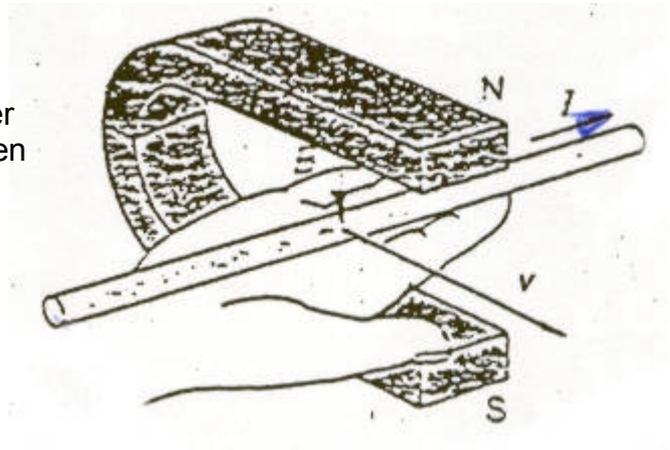
N = Anzahl der Leiter im Magnetfeld

Induktion (Generatorprinzip):

Schneidet ein Leiter die Feldlinien eines Magnetfeldes, so wird in dem Leiter eine Spannung erzeugt (=induziert).

Rechte-Hand-Regel:

Treffen die Feldlinien auf die Innenfläche der Hand auf und zeigt der abgespreizte Daumen in Richtung der Leiterbewegung, dann fließt der induzierte Strom in Richtung der ausgestreckten Finger.

**U-V-W-Regel (rechte Hand):**

Ursache: Kraft F (Bewegung v)

Vermittlung: Magnetfeld B

Wirkung: Strom I

$$U_i = -B \cdot v \cdot l \cdot N$$

$$B = -\frac{U_i}{v \cdot l \cdot N}$$

$$v = -\frac{U_i}{B \cdot l \cdot N}$$

$$l = -\frac{U_i}{B \cdot v \cdot N}$$

$$N = -\frac{U_i}{B \cdot v \cdot l}$$

$$[U_i] = \frac{Vs}{m^2} \cdot \frac{m}{s} \cdot m = V$$

U_i = induzierte Spannung in V

B = Flußdichte in $\frac{Vs}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T$

v = Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

l = wirksame Leiterlänge in m

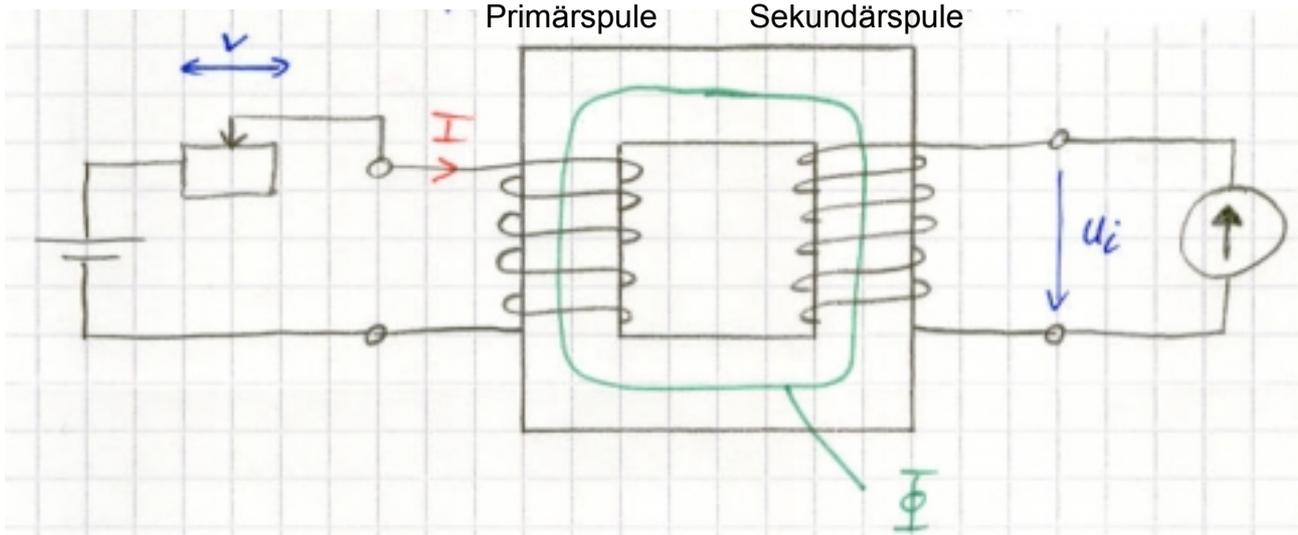
N = Anzahl der Leiter im Magnetfeld

Die induzierte Spannung U_i ist negativ, da sie nach der Lenzschen Regel so gerichtet ist, dass sie ihrer Ursache entgegenwirkt.

Lenzsche Regel:

Die induzierte Spannung U_i ist stets so gerichtet, dass sie ihrer Ursache (Kraft F) entgegenwirkt.

Induktion der Ruhe (Trafoprinzip)



Ändert sich der magnetische Fluss durch die Stromänderung I, so wird in der Sekundärspule während der Änderung eine Spannung U_i induziert. (Lenzsche Regel)

$$U_i = - \frac{N \cdot \Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$\Delta t = - \frac{N \cdot \Delta\Phi}{U_i}$$

$$N = - \frac{U_i \cdot \Delta t}{\Delta\Phi}$$

$$\Delta\Phi = - \frac{U_i \cdot \Delta t}{N}$$

- U_i = induziert Spannung in V
- N = Anzahl der Windungen der Sekundärspule
- $\Delta\Phi$ = magnetischer Flußdifferenz in Wb
- Δt = Zeitänderung in s

Spannungsübersetzungsverhältnis:

$$\ddot{u} = \frac{u_1}{u_2}$$

$$u_2 = \frac{u_1}{\ddot{u}}$$

$$u_1 = \ddot{u} \cdot u_2$$

- u_1 = Primärspannung in V
- u_2 = Sekundärspannung in V
- \ddot{u} = Übersetzungsverhältnis des Trafo

Stromübersetzungsverhältnis:

$$\ddot{i} = \frac{i_2}{i_1}$$

$$i_1 = \frac{i_2}{\ddot{i}}$$

$$i_2 = \ddot{i} \cdot i_1$$

- i_1 = Strom in der Primärspule in A
- i_2 = Strom in der Sekundärspule in A
- \ddot{i} = Übersetzungsverhältnis des Trafo

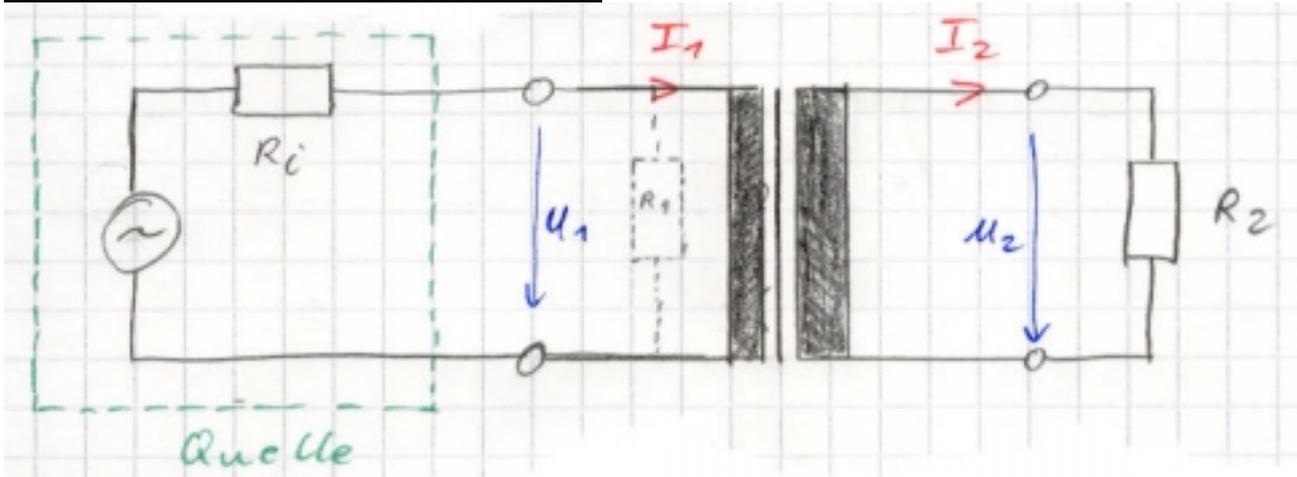
$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$N_2 = \frac{N_1}{\ddot{u}}$$

$$N_1 = \ddot{u} \cdot N_2$$

- N_1 = Anzahl der Windungen auf der Primärspule
- N_2 = Anzahl der Windungen auf der Sekundärspule

Widerstandsübersetzung (-übertrager):



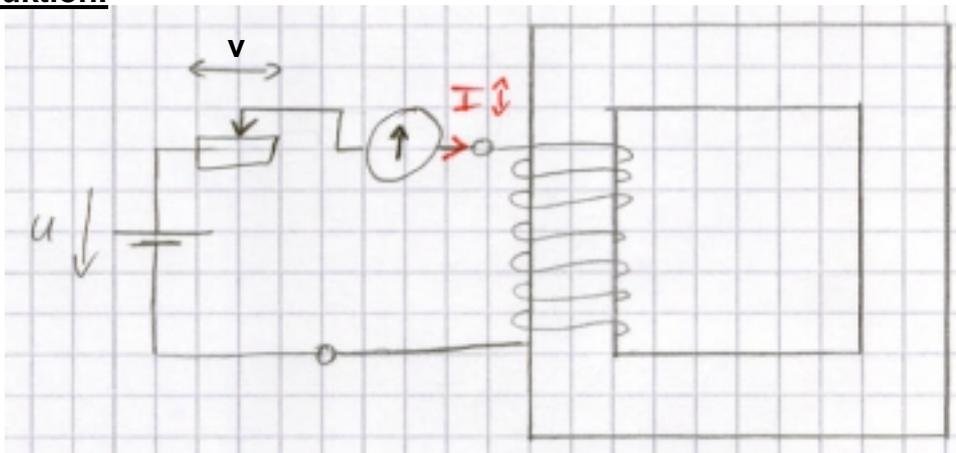
$$R_1 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\ddot{u}^2}$$

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

\$R_1\$ = Widerstand der in der Quelle wirkt in \$\Omega\$
 \$R_2\$ = Widerstand im Sekundärkreis in \$\Omega\$
 \$\ddot{u}\$ = Übersetzungsverhältnis des Trafo

Selbstinduktion:



Ändert sich in einer Spule das Magnetfeld (\$\Delta I \rightarrow \Delta \Phi \rightarrow \Delta B\$), so wird in der Spule selbst eine Spannung induziert.

\$\Rightarrow\$ Selbstinduktionsspannung \$U_i\$

$$U_i = - \frac{L \cdot \Delta I}{\Delta t}$$

$$\Delta t = - \frac{L \cdot \Delta I}{U_i}$$

$$L = - \frac{U_i \cdot \Delta t}{\Delta I}$$

$$\Delta I = - \frac{U_i \cdot \Delta t}{L}$$

\$U_i\$ = Selbstinduktionsspannung in V
 \$L\$ = Induktivität in H
 \$\Delta I\$ = Stromänderung in A
 \$\Delta t\$ = Zeitänderung in s

Induktivität:

Herleitung:

$$U_i = -\frac{N \cdot \Delta\Phi}{\Delta t}; \Delta\Phi = \Delta B \cdot A; \Delta B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \Delta H; \Delta H = \frac{\Delta I \cdot N}{l_m};$$

$$U_i = -\frac{N \cdot \Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{N \cdot \Delta B \cdot A}{\Delta t} = -\frac{N \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \Delta H \cdot A}{\Delta t} = -\frac{N \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \Delta I \cdot N \cdot A}{\Delta t \cdot l_m}$$

$$U_i = -\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A \cdot N \cdot N \cdot \Delta I}{l_m \cdot \Delta t} = -\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l_m} \cdot N^2 \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{L \cdot \Delta I}{\Delta t}$$

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

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

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

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}}$$

$$[L] = \frac{Vs \cdot m^2}{Am \cdot m} = \frac{Vs}{A} = H$$

L = Induktivität in H (Henry)

 $\mu_0 = \text{magnetische Feldkonstante } 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$
 $\mu_r = \text{Permeabilitätszahl (bei Luft } \approx \mu_r=1)$ A = Fläche in m^2 $l_m = \text{mittlere Feldlinienlänge in m}$

N = Windungsanzahl

Energie im magnetischen Feld:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

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

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot W}{L}}$$

W = Energie (=Arbeit) in Ws

L = Induktivität in H

U = Spannung in V

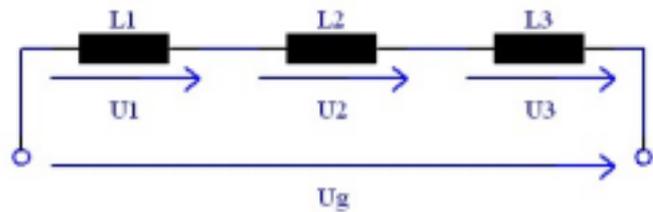
$$1 \text{ Ws} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kWs} = \frac{1}{3,6} \cdot 10^{-3} \text{ Wh} = \frac{1}{3,6} \cdot 10^{-6} \text{ kWh} = 0,278 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} = 1 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 1 \cdot 10^3 \text{ Wh} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ kWs} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Reihenschaltung von Spulen:

$$U_g = U_1 + U_2 + U_3$$

$$L_g = L_1 + L_2 + L_3$$

**Parallelschaltung von Spulen:**

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

$$\frac{1}{L_g} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$



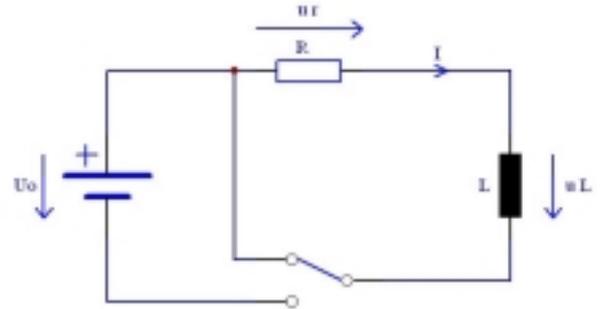
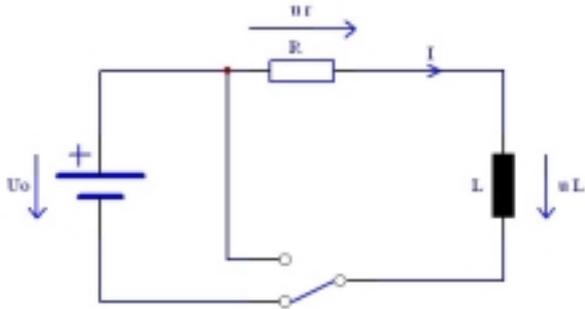
für 2 Spulen gilt:

$$L_g = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

$$L_1 = \frac{L_2 \cdot L_g}{L_2 - L_g}$$

$$L_2 = \frac{L_1 \cdot L_g}{L_1 - L_g}$$

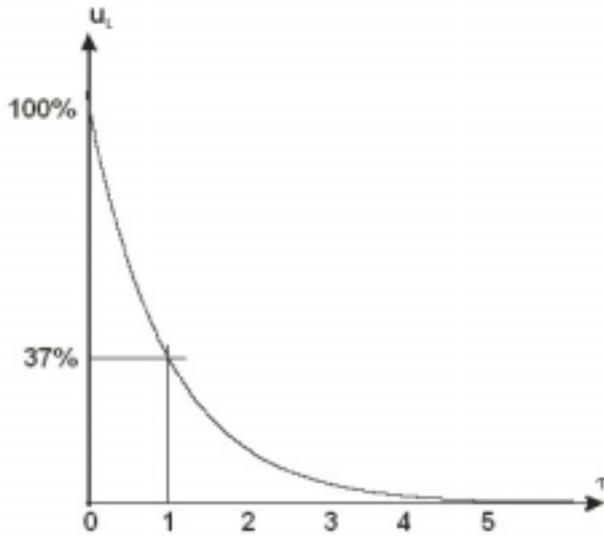
Ein- und Ausschalten einer Spule:



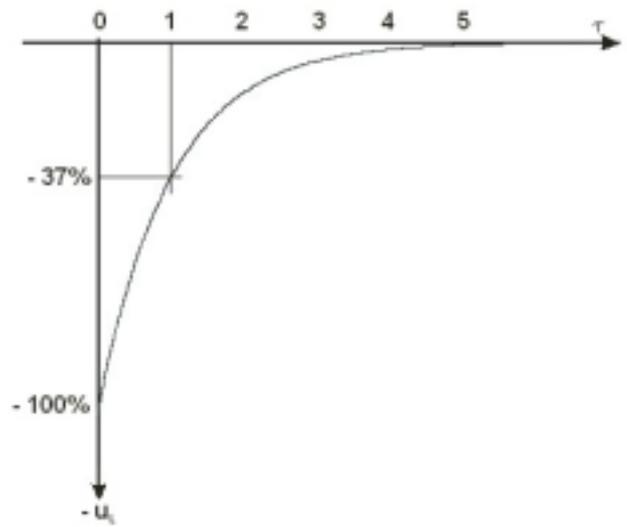
Einschalten der Spule

Ausschalten der Spule

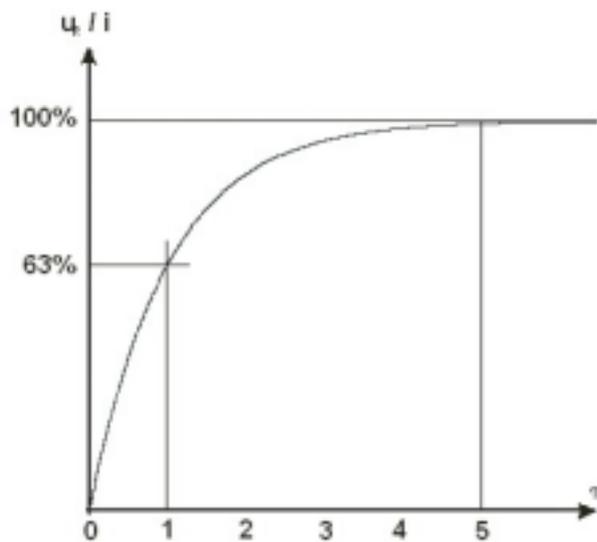
Spannung an der Spule:



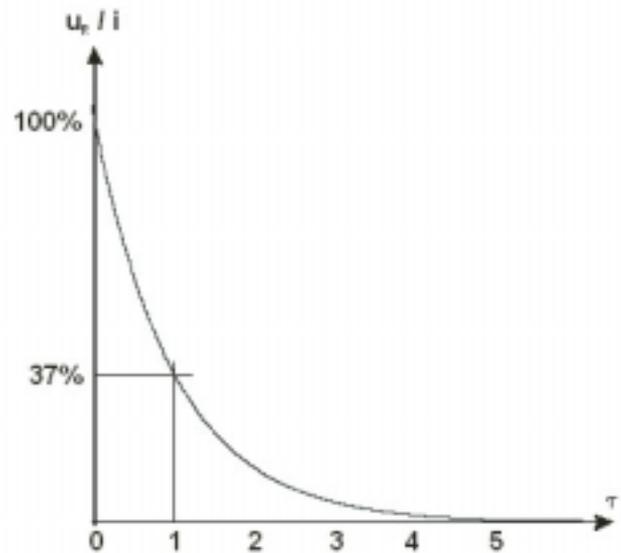
Spannung an der Spule:



Spannung am Widerstand, Strom i:



Spannung am Widerstand, Strom i:



Nach 1τ fließt 63%, nach 2τ fließt 86%, nach 3τ fließt 95%, nach 4τ fließt 98% und nach 5τ fließt 100% von i_{max}

Durch die Gegeninduktion in der Spule liegt nach 1τ noch 37%, nach 2τ noch 14%, nach 3τ noch 5%, nach 4τ noch 2% von U_R und nach 5τ keine Spannung mehr an.

Zeitkonstante:

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

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

$$L = R \cdot \tau$$

R = Widerstand in Ω ; L = Induktivität in H; τ in s

Nach 5τ fließt der maximale Strom i_{\max} :

$$i_{\max} = \frac{U_0}{R}$$

$$R = \frac{U_0}{i_{\max}}$$

$$U_0 = R \cdot i_{\max}$$

U_0 = maximale Spannung an der Spule

R = Widerstand in Ω

i_{\max} = maximaler Strom

Zu jedem Zeitpunkt gilt:

$$U_0 = u_R + u_L$$

Berechnung zum Einschaltvorgang der Spule:**Spannung an der Spule:**

$$u_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{u_L}{U_0}\right)$$

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(\frac{u_L}{U_0}\right)}$$

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

$$t = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{u_L}{U_0}\right)}{-R}$$

$$R = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{u_L}{U_0}\right)}{-t}$$

$$L = \frac{-t \cdot R}{\ln\left(\frac{u_L}{U_0}\right)}$$

Spannung um Widerstand:

$$u_R(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$t = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{u_R}{U_0}\right)$$

$$\tau = \frac{(-t)}{\ln\left(1 - \frac{u_R}{U_0}\right)}$$

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

$$t = \frac{L \cdot \ln\left(1 - \frac{u_R}{U_0}\right)}{-R}$$

$$R = \frac{L \cdot \ln\left(1 - \frac{u_R}{U_0}\right)}{-t}$$

$$L = \frac{-t \cdot R}{\ln\left(1 - \frac{u_R}{U_0}\right)}$$

Strom:

$$i(t) = i_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$t = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\max}}\right)$$

$$\tau = \frac{(-t)}{\ln\left(1 - \frac{i}{i_{\max}}\right)}$$

$$i(t) = i_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t \cdot R}{L}}\right)$$

$$t = \frac{L \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\max}}\right)}{-R}$$

$$R = \frac{L \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\max}}\right)}{-t}$$

$$L = \frac{-t \cdot R}{\ln\left(1 - \frac{i}{i_{\max}}\right)}$$

$$t_E = 5 \cdot \tau$$

U_0 = Maximale Spannung an der Spule in V

$u_L(t)$ = Spannung an der Spule zum Zeitpunkt t in V

$u_R(t)$ = Spannung am Widerstand zum Zeitpunkt t in V

$i(t)$ = Strom zum Zeitpunkt t in A

t = Zeitpunkt in s

τ = Zeitkonstante in s

R = Widerstand in Ω

L = Induktivität in H

t_E = Zeit bis nahezu der maximale Strom fließt

Berechnung zum Ausschaltvorgang der Spule:**Spannung der Spule:**

$$u_L(t) = -U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{u_L}{-U_0}\right)$$

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(\frac{u_L}{-U_0}\right)}$$

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

$$t = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{u_L}{-U_0}\right)}{-R}$$

$$R = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{u_L}{-U_0}\right)}{-t}$$

$$L = -\frac{t \cdot R}{\ln\left(\frac{u_L}{-U_0}\right)}$$

Spannung um Widerstand:

$$u_R(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{u_R}{U_0}\right)$$

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(\frac{u_R}{U_0}\right)}$$

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

$$t = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{u_R}{U_0}\right)}{-R}$$

$$R = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{u_R}{U_0}\right)}{-t}$$

$$L = -\frac{t \cdot R}{\ln\left(\frac{u_R}{U_0}\right)}$$

Strom:

$$i(t) = i_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{\max}}\right)$$

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(\frac{i}{i_{\max}}\right)}$$

$$i(t) = i_{\max} \cdot e^{-\frac{t \cdot R}{L}}$$

$$t = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{\max}}\right)}{-R}$$

$$R = \frac{L \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{\max}}\right)}{-t}$$

$$L = -\frac{t \cdot R}{\ln\left(\frac{i}{i_{\max}}\right)}$$

$$t_A = 5 \cdot \tau$$

U_0 = Maximale Spannung an der Spule in V

$u_L(t)$ = Spannung an der Spule zum Zeitpunkt t in V

$u_R(t)$ = Spannung am Widerstand zum Zeitpunkt t in V

$i(t)$ = Strom zum Zeitpunkt t in A

t = Zeitpunkt in s

τ = Zeitkonstante in s

R = Widerstand in Ω

L = Induktivität in H

t_A = Zeit bis der Gegeninduktionsspannung der Spule abgeklungen ist