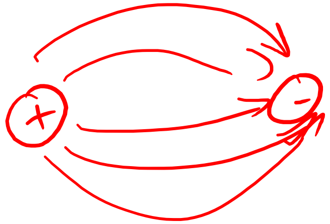
GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK 1 - ET1

Teil 09
Magnetisches Feld und Spule

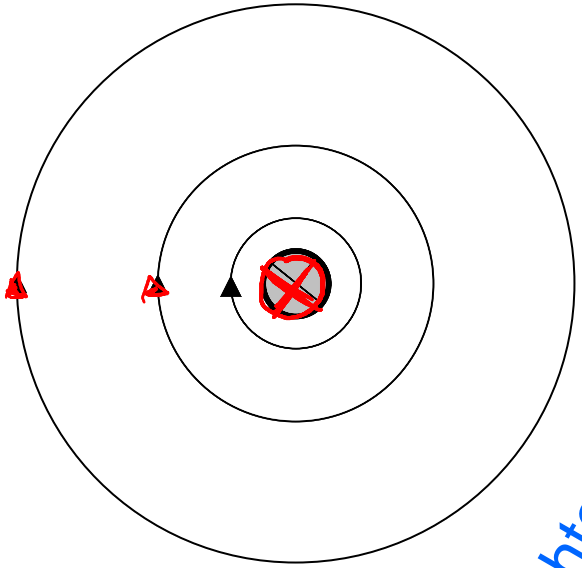
WIRBELFELD

Magnetische Feldlinien sind stets in sich geschlossen ⇒ Wirbelfeld

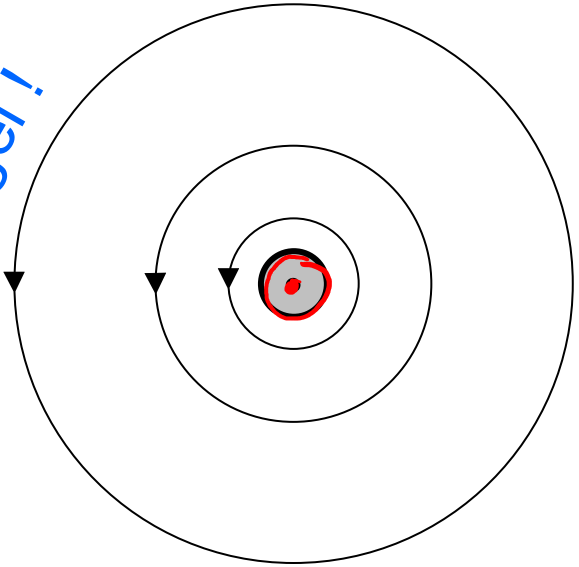


Strom fließt von Betrachter weg

(Kreuz symbolisiert Pfeilende)



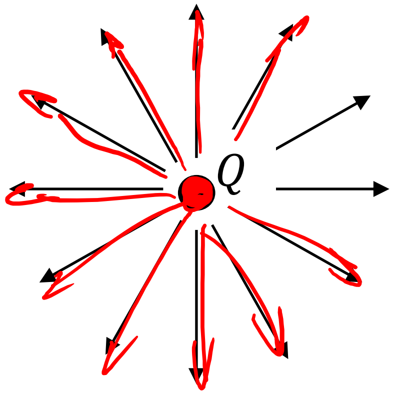
Rechte-Hand-Regel !



Strom fließt auf Betrachter zu

(Punkt symbolisiert Pfeilspitze)

Vergleiche mit dem elektrischen Feld: Jede Feldlinie hat einen Ladungsträger als Anfang und Ende ⇒ Quellenfeld

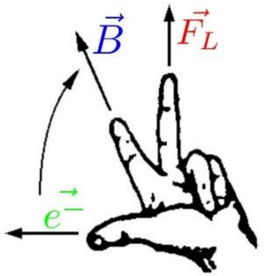


LORENTZ-KRAFT

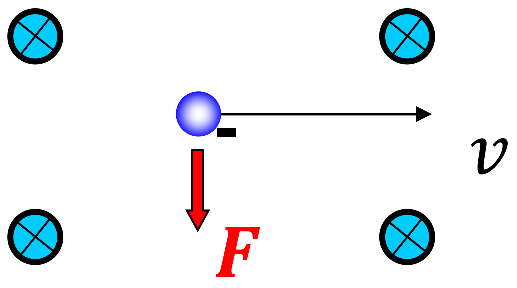
Bewegte Ladungsträger in einem Magnetfeld:

- Ladungsträger werden abgelenkt
- Kraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung
- Kraft wirkt senkrecht zur Magnetfeldrichtung

$\Rightarrow$ Lorentz-Kraft $$\vec{F} = Q \cdot \left(\vec{v} \times \vec{B}\right)$$

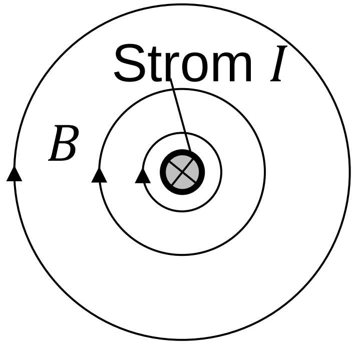


Left-hand-rule



MAGNETISCHE FELDSTÄRKE H

Magnetische Flussdichte eines stromdurchflossenen Leiters:



$$\boxed{B = \mu \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r}}$$

- $\mu = \mu_0 \mu_\mathrm{r}$ Permeabilität
- μ_r: relative Permeabilität
- μ_0: Permeabilität des Vakuums (magn. Feldkonstante):

$$\boxed{\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}}$$

Flussdichte ist materialabhängig

$\Rightarrow$ man definiert die material**un**abhängige magn. Feldstärke H

$$\boxed{H = \frac{B}{\mu}}$$

mit $[H] = 1\,\mathrm{Vs/m^2} \cdot \mathrm{Am/Vs} = \mathrm{A/m}$

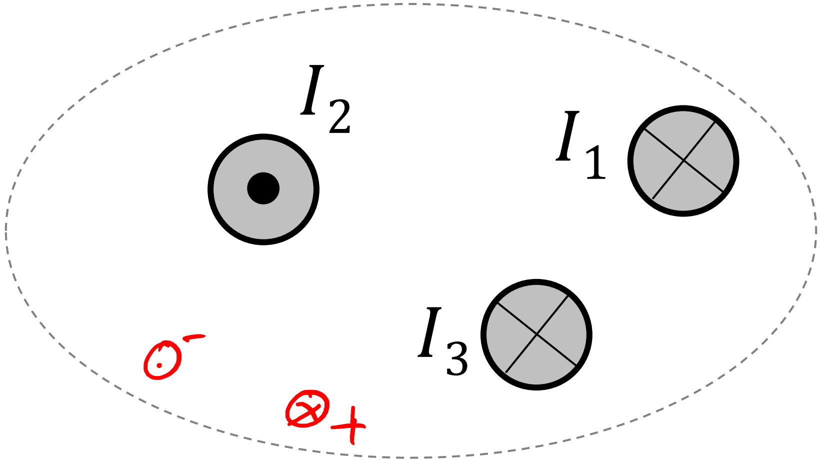
$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

DURCHFLUTUNG Θ „groß THETA"

Summe, der durch einen Ring fließenden Ströme

$$\boxed{\Theta = I_1 + I_2 + \ldots \text{ mit } [\Theta] = A}$$

Beispiel:

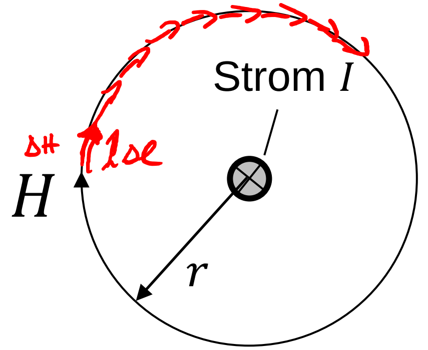


$\Theta = I_1 - I_2 - I_3$

DURCHFLUTUNGSGESETZ

Verallgemeinerung des Falles für einen stromdurchflossenen Leiter:

$$\boxed{H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \Rightarrow I = 2\pi \cdot r \cdot H}$$



Durchflutungsgesetz:

Für einen beliebigen geschlossenen Weg gilt, wenn die Feldstärke konstant über ein Teilstück ist:

$$\boxed{\text{Durchflutung} = \Sigma \text{ Feldstärke auf Teilstück} \cdot \text{Länge des Teilstücks}}$$

Allgemeine Form: $\boxed{\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s}}$

→ eine der Maxwellschen Gleichungen

Frage: Wozu ist das gut?

MATERIE IM MAGNETFELD

$B = \mu_0 H$ gilt nur im Vakuum, befindet sich im Raum ein Material, so gilt:

$\Rightarrow$ $\boxed{B = \mu H \quad \text{mit} \quad \mu = \mu_r \mu_0}$

mit:

μ: Permeabilität

μ_0: Permeabilität des Vakuums $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

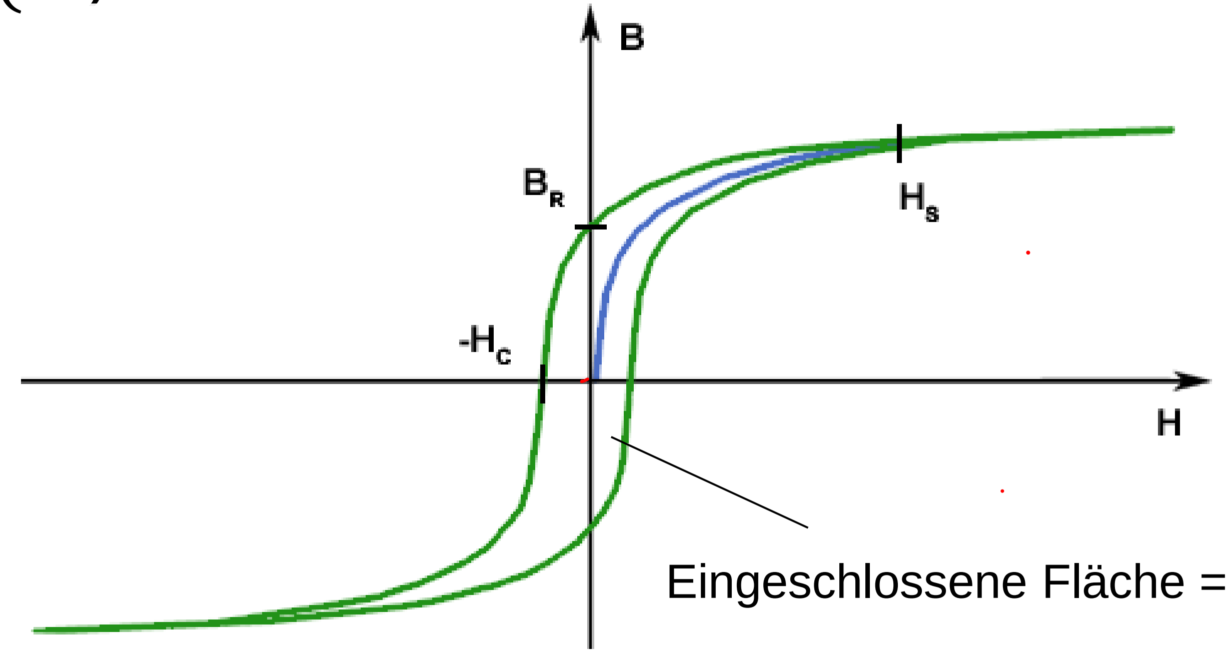
μ_r : relative Permeabilität

Man unterscheidet:

- $\mu_r < 1$ als **diamagnetisch** (Silber, Blei)
- $\mu_r > 1$ als **paramagnetisch** (Aluminium, Platin)
- $\mu_r >> 1$ als **ferromagnetisch** (Eisen, Nickel, Kobalt)

FERROMAGNETISCHE STOFFE

- Magnetisierungskurve = Hysteresekurve
- $B = f(H)$ ist nichtlinear

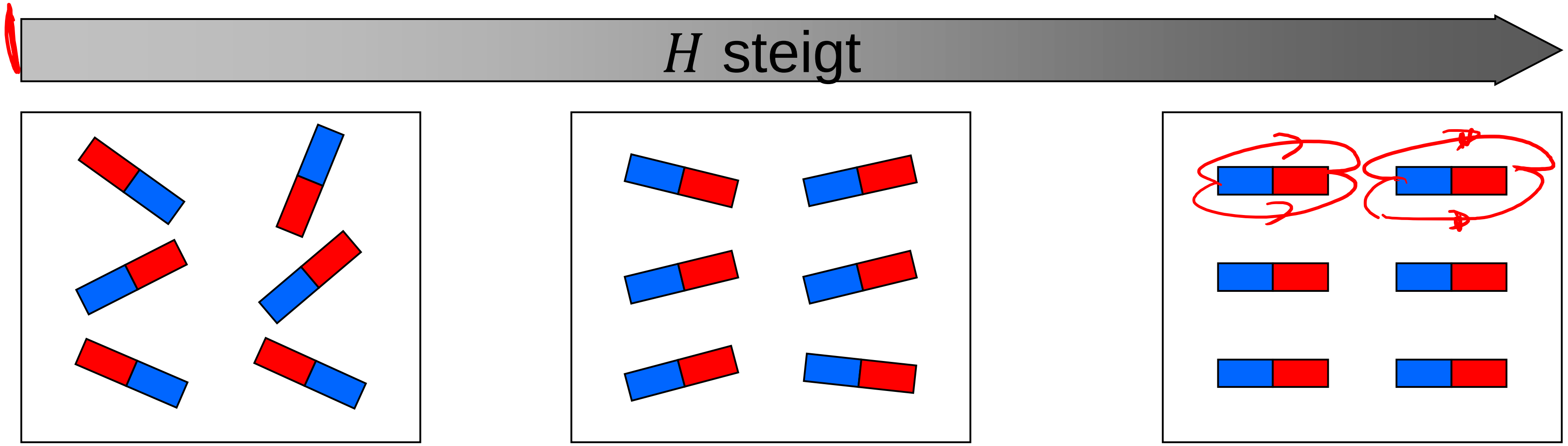


Ummagnetisieren kostet Energie.
Je höher die Frequenz, desto höher der Verlust.

H_s : Sättigungsfeldstärke
B_r : Remanzflussdichte oder Remanenz (verbleibende Flussdichte bei $H = 0$)
H_c : Koerzitivfeldstärke (bei der das Material wieder entmagnetisiert ist)

FERROMAGNETISCHE STOFFE

Erklärung der Magnetisierungskurve über Elementarmagnete



Ferromagnetische Eigenschaften verschwinden oberhalb der **Curie-Temperatur** (770°C bei Eisen).

INDUKTIONSGESETZ

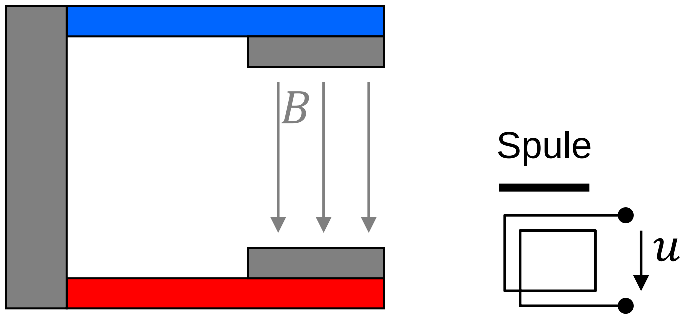
Verändert sich ein magnetisches Feld in einer Spule, so wird eine Spannung induziert.

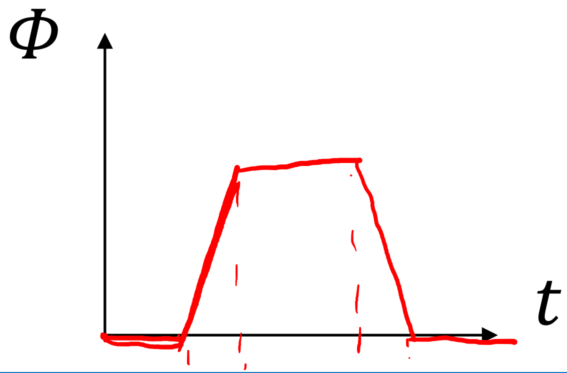
$$\boxed{u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}}$$

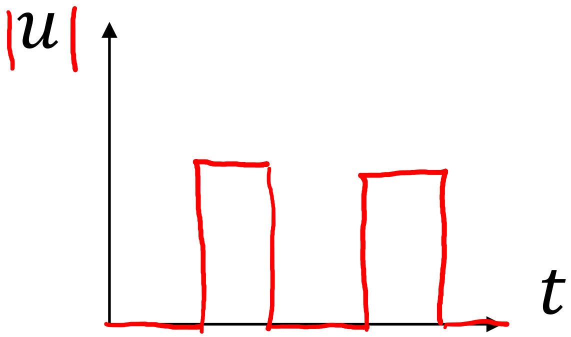
Lenzsche Regel
Ein durch Induktion erzeugter Strom fließt stets so, dass er ein magnetisches Feld erzeugt, das der verursachenden Flussänderung entgegenwirkt.

Frage:

Welcher zeitliche Verlauf der Spannung ergibt sich, wenn man eine Spule in ein räumlich begrenztes Magnetfeld schiebt?







MAGNETISCHES FELD „KOMPAKT“

Magnetische Flussdichte B

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

Magnetische Feldstärke H

$$\Phi = B \cdot A$$

Durchflutungssatz

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s}$$

Magnetischer Fluss Φ

Durchflutung Θ

$$u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Induktionsgesetz

$$\Theta = \sum_i I$$

Spannung u

Strom i

INDUKTIVITÄT L

Ein Strom durch eine Spule erzeugt ein magnetisches Feld

Frage:
- Wie verhält sich das magnetische Feld in Abhängigkeit des Stromes durch die Spule?

$H \propto I$

$\Rightarrow$ Proportionalitätskonstante: Induktivität L

Es gilt bei einer Spule mit N Windungen:

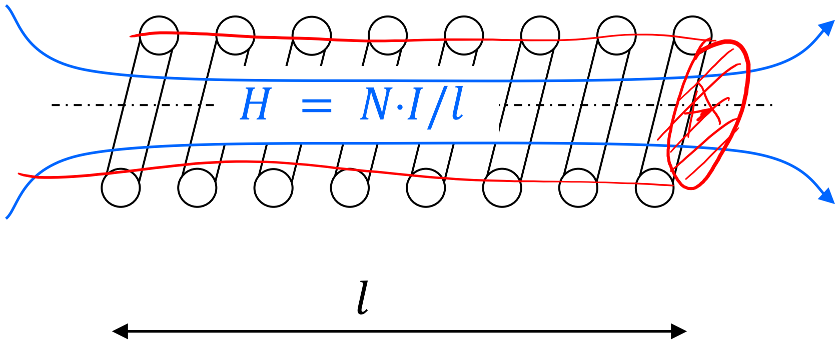
$$\boxed{N \cdot \Phi = L \cdot I \qquad \text{mit } [L] = 1\,\mathrm{Vs/A} = 1\,\mathrm{Henry} = \underline{1\,\mathrm{H}}}$$

vgl. mit $Q = C \cdot U$

INDUKTIVITÄT DER ZYLINDERSPULE

$N \cdot I / l$

Aus dem Durchflutungssatz folgt:



Wir erhalten aus $H = N{\cdot}I\,/\,l$:

(1) $B = \mu H = \mu \cdot N \cdot I / l$

(2) $\Phi = B \cdot A = \mu \cdot N \cdot I \cdot A / l$

Substitution von B in (2) durch (1):

(3) $N \cdot \Phi = \mu \cdot N^2 \cdot I \cdot A / l$

Aus der Definition von L folgt: $N \cdot \phi = L \cdot I$

(4) $L = \mu \cdot N^2 \cdot A / l$

$$\boxed{\Rightarrow L = \mu_0 \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}}$$

N: Windungszahl
I: Strom
l: Länge der Spule
A: Spulenquerschnittsfläche

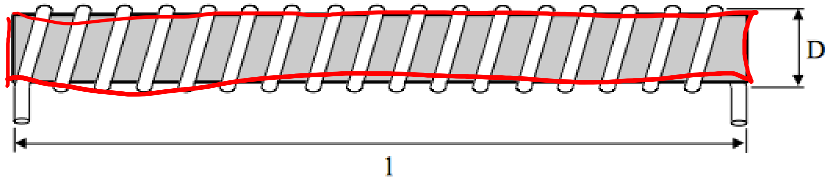
INDUKTIVITÄT DER ZYLINDERSPULE

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

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

$$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$$

L .... Induktivität
N .... Windungsanzahl
μ_r .... Permeabilitätszahl des Spulenkerns
μ_0 .... Magnetische Feldkonstante
A .... Spulenquerschnitt
l .... Spulenlänge
D .... Spulendurchmesser



vergleiche: $C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$

Hohe Induktivität erfordert:

- $A \uparrow$
  Abmessung hoch, aber Platzbedarf
- $l \downarrow$
  so dicht wie möglich wickeln
- $N \uparrow$
  aber: Platzbedarf, Verlustwiderstand
- $\mu_r \uparrow$

  Luft: 1
  Ferrite: 2000 … 3000

STROM UND SPANNUNG IN DER SPULE

Für eine Spule mit N –Windungen gilt:

(1) $N \cdot \Phi = L \cdot I \iff N \cdot \phi = L \cdot i \quad | \; d/dt$

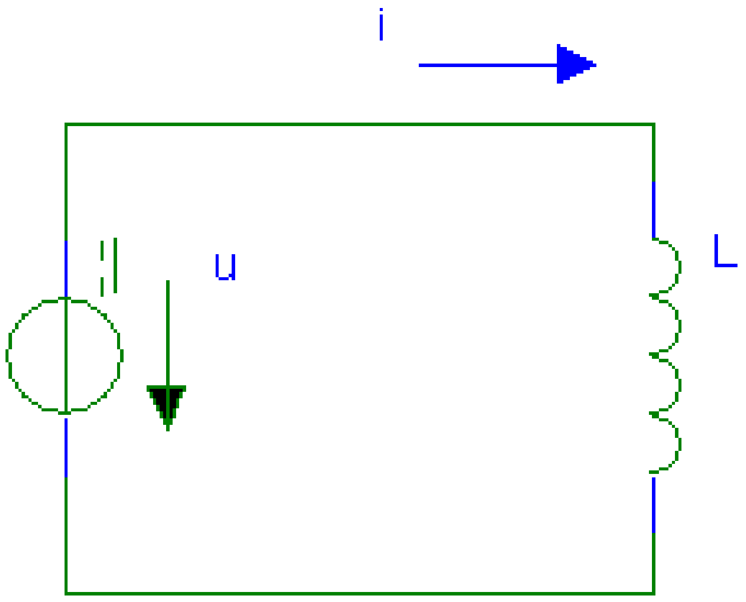
$$\underbrace{N \cdot \frac{d\phi}{dt}}_{u} = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Das Induktionsgesetz besagt:

(2) $u = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$

Substitution von Φ in (2) durch (1):

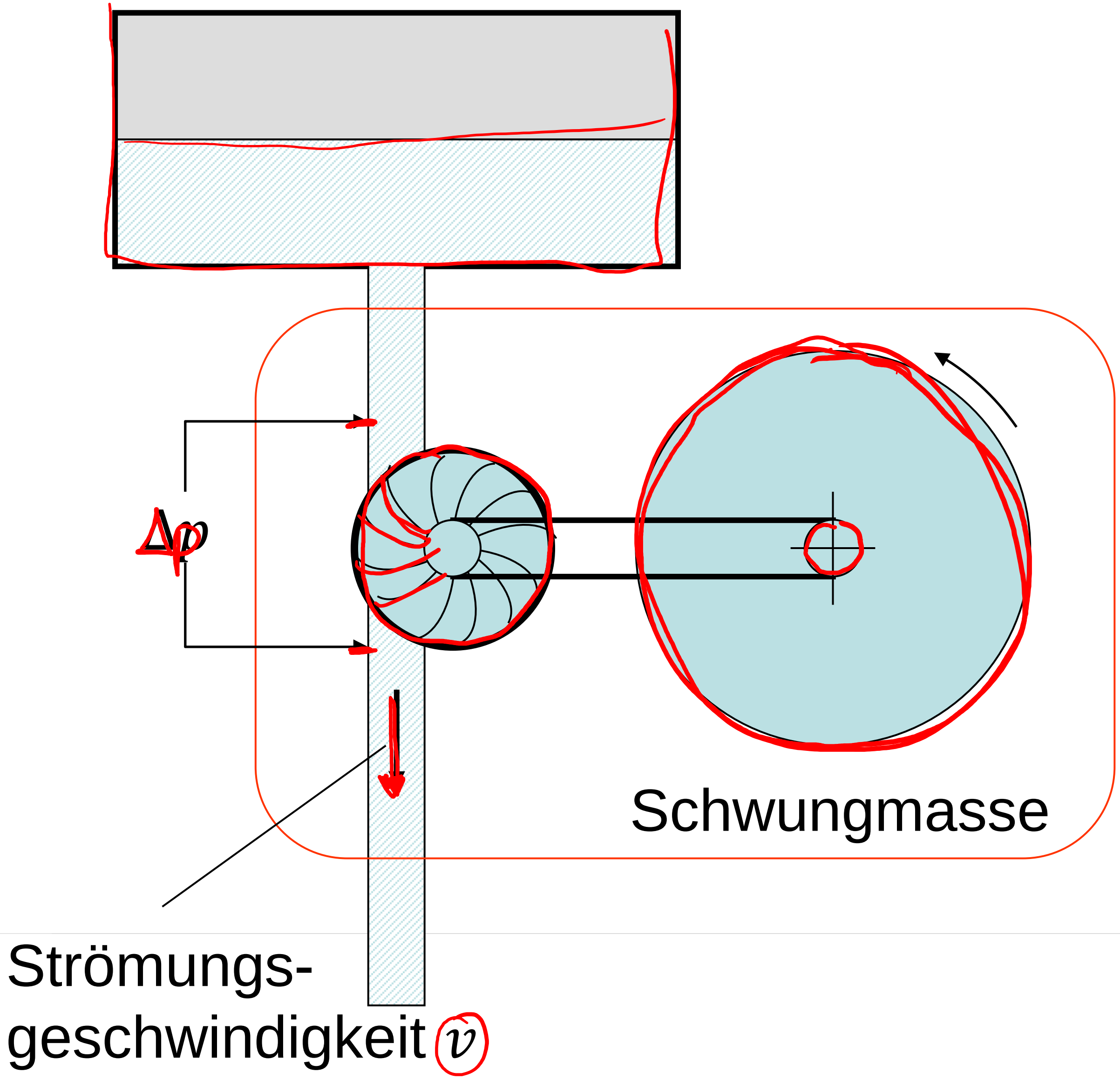
$$\boxed{u(t) = L\frac{di(t)}{dt}} \Leftarrow$$



Interpretation:

- es liegt nur dann eine Spannung an, wenn der Strom sich ändert
- liegt eine konstante Spannung an, so nimmt der Strom stetig zu

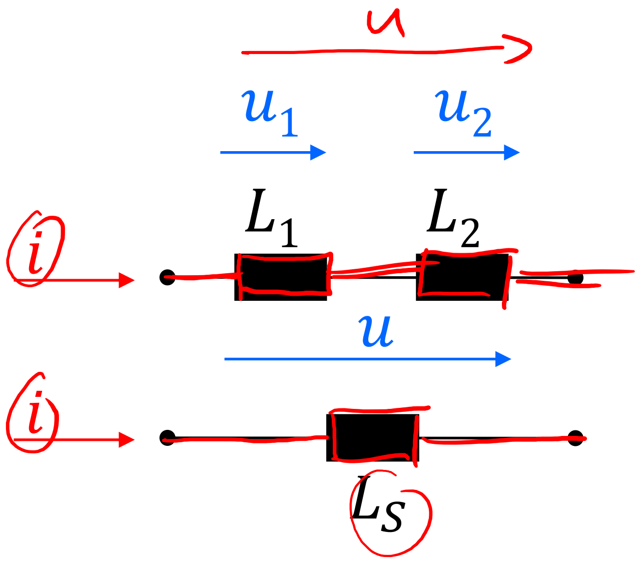
ANALOGIE SPULE UND WASSERKREISLAUF



Analogie Spule

- Strom: Strömungsgeschwindigkeit des Wasser
- Spannung: Druckunterschied
- Induktivität: Maß für die Trägheit

REIHENSCHALTUNG VON SPULEN



Durch beide Spulen fließt derselbe Strom.

Aus der Kirchhoffschen Maschenregel folgt:

$$u = u_1 + u_2$$

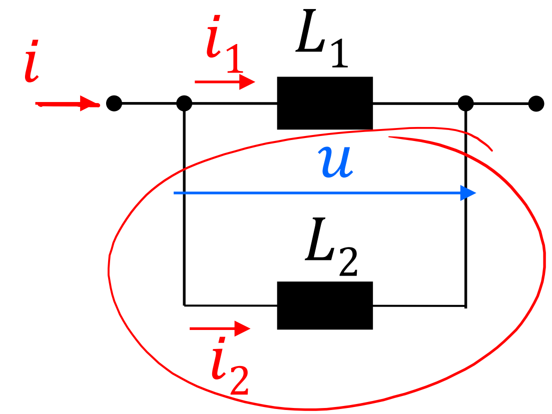
Mit der Spulengleichung $\boxed{u = L \cdot \frac{di}{dt}}$ folgt:

$$L_S \cdot \cancel{\frac{di}{dt}} = L_1 \cdot \cancel{\frac{di}{dt}} + L_2 \cancel{\frac{di}{dt}}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{L_S = L_1 + L_2}$$

„Reihenschaltung von Spulen wie bei Widerständen“

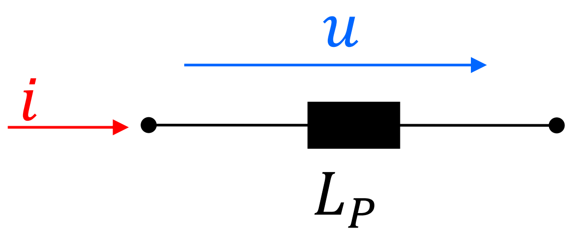
PARALLELSCHALTUNG VON SPULEN



Aus der Kirchhoffschen Knotenregel folgt:

$$i = i_1 + i_2$$

Aus $i = \frac{1}{L} \cdot \int u \, dt$ folgt damit:



$$i = \frac{1}{L_P} \cdot \cancel{\int u \, dt} = \frac{1}{L_1} \cdot \cancel{\int u \, dt} + \frac{1}{L_2} \cancel{\int u \, dt}$$

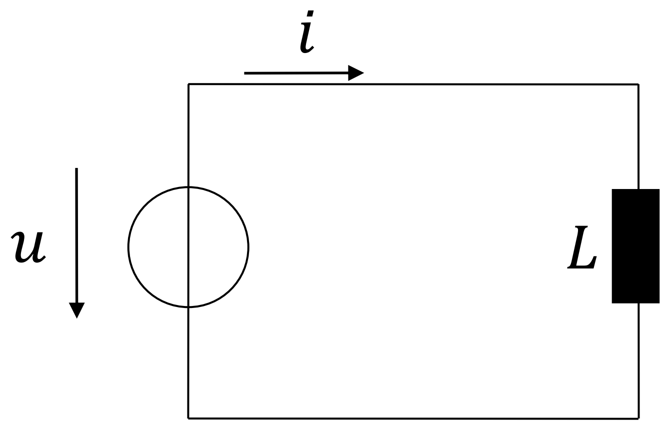
$$\Rightarrow \boxed{\frac{1}{L_P} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}}$$

$\Rightarrow$ „Parallelschaltung von Spulen wie bei Widerständen“

ENERGIE IN DER SPULE

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\,i(t)^2 = \boxed{2\cdot i(t)\cdot\frac{di(t)}{dt}}$$

Spannung an Spule:



Leistung:

$$p(t) = u(t)\cdot i(t)$$

mit : $u(t) = L\,\frac{di(t)}{dt}$

$$\Rightarrow \quad p(t) = L\cdot\frac{di(t)}{dt}\cdot i(t)$$

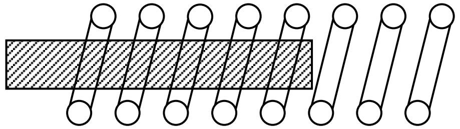
$$\Rightarrow W = \int p(t)\,dt = \int L\cdot\frac{di(t)}{dt}\cdot i(t)\,dt = \int L\cdot\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}i(t)^2\right)\cdot dt = \int\frac{d}{\cancel{dt}}\left(\frac{1}{2}L\cdot i(t)^2\right)\cdot\cancel{dt}$$

$\Rightarrow$ In der Spule gespeicherte Energie: $\boxed{W = \frac{1}{2}L\cdot i^2}$

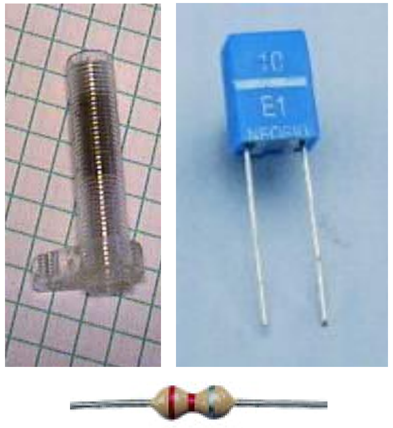
vgl. mit W = ½ $C\,U^2$

BAUFORMEN VON FERRITSPULEN

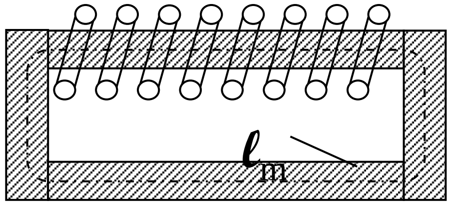
offene Spule
mit (Schraub-)kern



Schraubkern
eindrehbar
→ L variabel

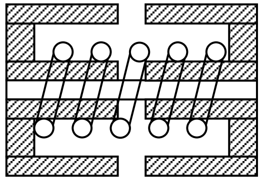


geschlossene
Spule



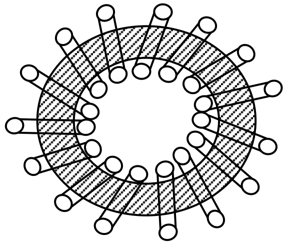
Feldlinien im Kern
geführt → geringe
Streuverluste

Schalenkernspule

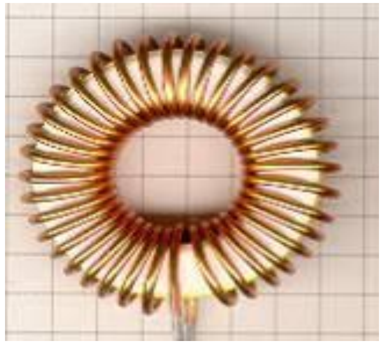


Feldlinien geführt +
Schraubkern
eindrehbar
→ L variabel

Ringkernspule



sehr geringes
Streufeld
Entstördrosseln



ANWENDUNGEN

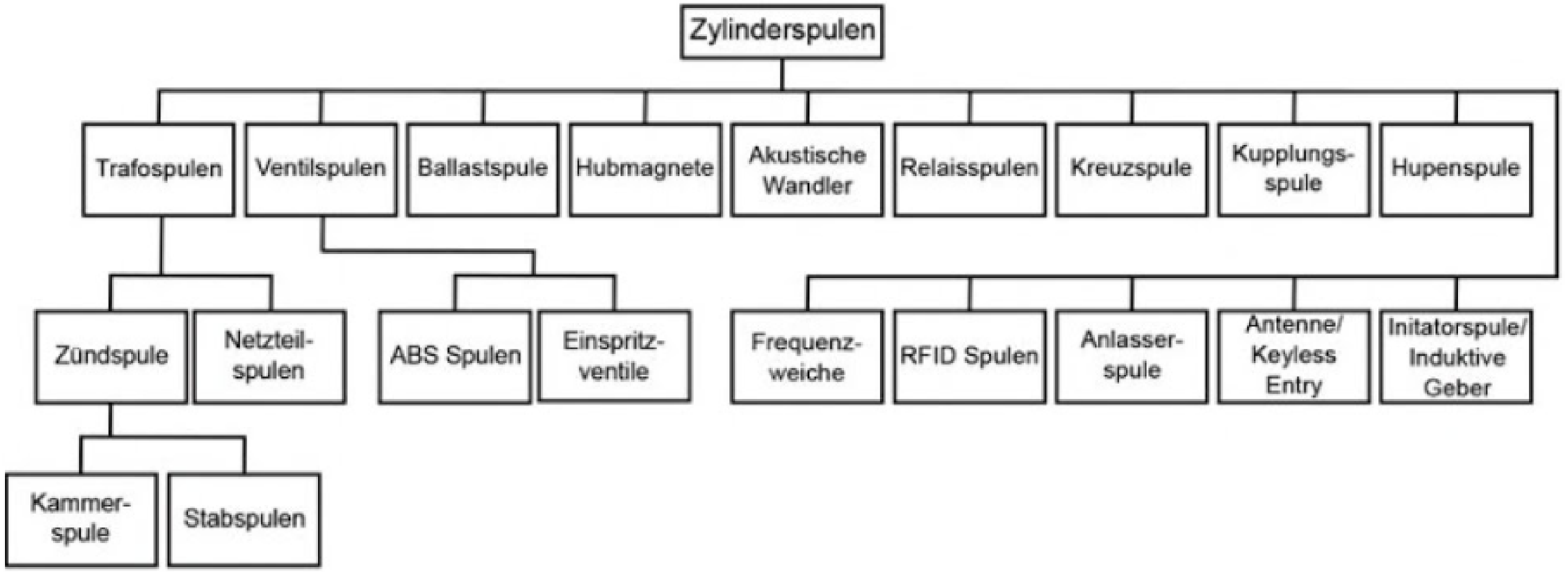


Abb. 1.15 Darstellung verschiedener Anwendungen für die Zylinderspule

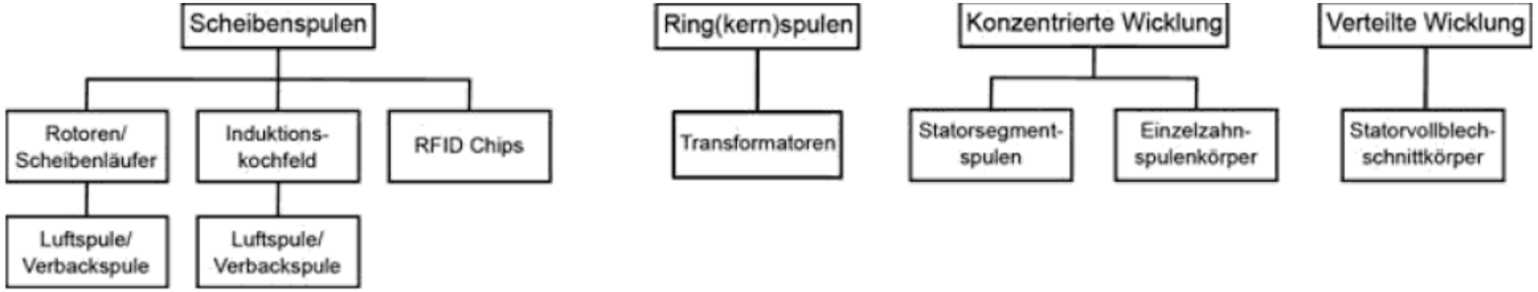


Abb. 1.16 Darstellung verschiedener Anwendungen für weitere Spulenarten

Aus: „Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz"

WAS SIE MITNEHMEN SOLLEN…

- Begriffe des magnetischen Feldes kennen und verstehen
- Unterschiede zum elektrischen Feld kennen und verstehen
- Definition der magnetischen Größen kennen und anwenden
  - Flussdichte
  - Fluss
  - Feldstärke
  - Durchflutung
  - Permeabilität und Magnetisierungskurve
- Durchflutungsgesetz kennen und *anwenden*
- Induktionsgesetz kennen und anwenden
- Spulen verstehen und berechnen können
  - Induktivität, Strom und Spannung, Reihen- und Parallelschaltung, Energie
- Transformator, Wirbelstromverluste, Skin- und Halleffekt kennen