

GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK 1 - ET1

Teil 09

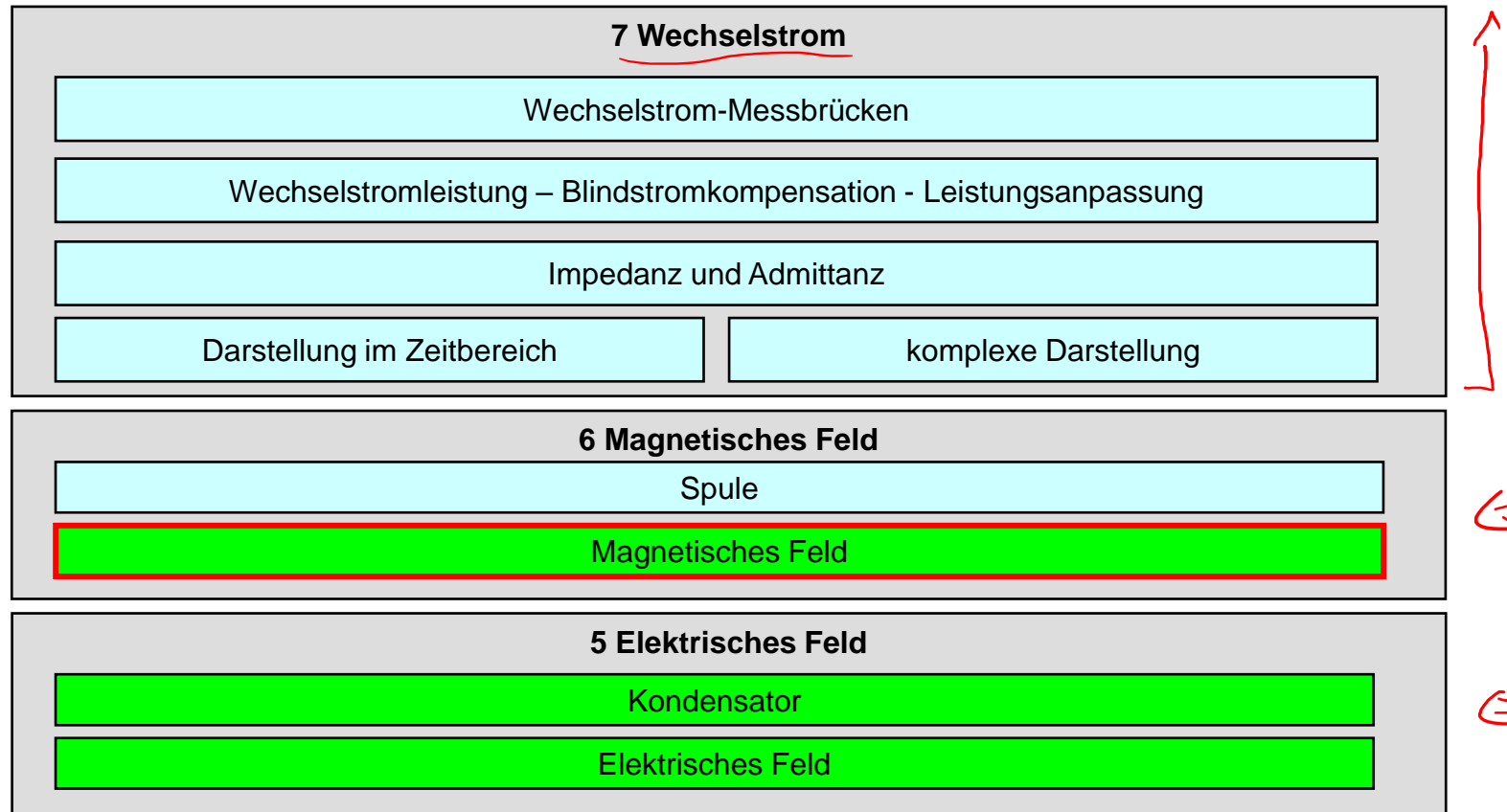
Magnetisches Feld und Spule



WECHSELSTROM

Inhalte der Kapitel 5 bis 7: Wechselstrom

8/Filter
9) Schaltvorgänge



REVIEW ZUM ELEKTRISCHEN FELD

Begriffe

- Feldlinie
- Äquipotentiallinie

homogenes und inhomogenes Feld

- Unterschied verstehen
- Ausrichtung von Feldlinien und Äquipotentiallinien kennen
- Spannung und Feldstärke im homogenen Feld berechnen können

Influenz

- Effekt der Influenz beschreiben können
- Definition der Flussdichte kennen und anwenden können
- Anwendung der Flussdichte verstehen

Zusammenhang zwischen Q , E , D , U

- formelmäßigen Zusammenhang zwischen den Größen verstehen
- Formeln anwenden können

Permittivität

- Begriff verstehen und erklären

REVIEW ZUM KONDENSATOR

Kondensator

- Aufbau und Funktionsprinzip verstehen und erklären
- Definition der Kapazität kennen: $C =$
- Kondensatorgleichung herleiten und anwenden: $i =$
- Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren
Reihenschaltung: $C_S =$
Parallelschaltung: $C_P =$
- Energie im Kondensator berechnen: $W =$
- Kapazität eines Kondensators berechnen: $C =$
- Bauformen erkennen

6 **MAGNETISCHES FELD**

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

6.7 Andere magnetische Effekte

BEGRIFFE DES MAGNETISCHEN FELDES

Magnet

- Körper, der Eisenteile anzieht

Pole

- Enden eines Magneten

Magnetisches Feld

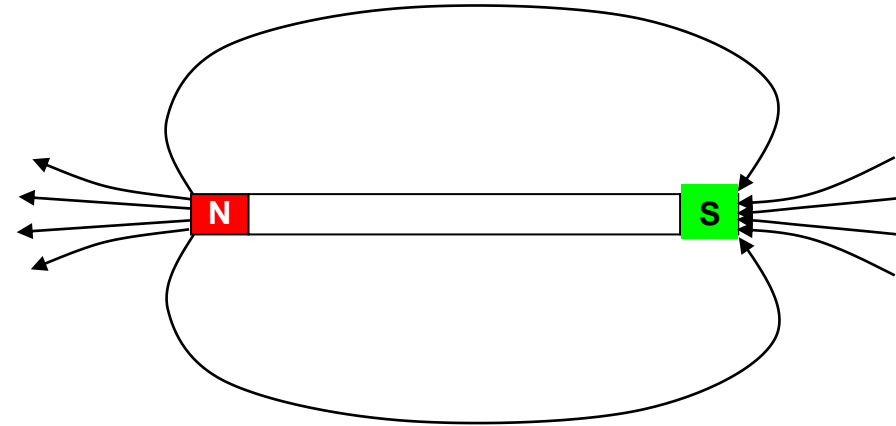
- Raumgebiet, in dem man magnetische Wirkungen nachweisen kann

Ursache

- magnetisches Feld entsteht durch magnetische Materialien &
- magnetisches Feld entsteht durch bewegte Ladungen &
- Zeitliche Änderung des elektrischen Feldes

Feldlinien

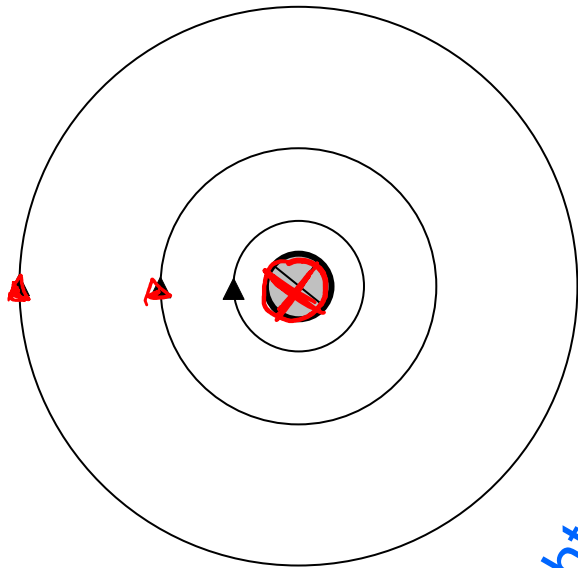
- geben die Richtung des Feldes an
- Dichte der Feldlinien ist ein Maß für die Stärke des Feldes



WIRBELFELD

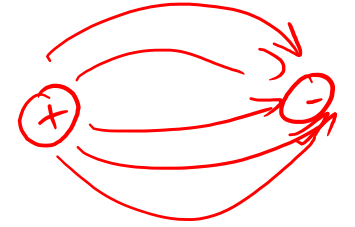
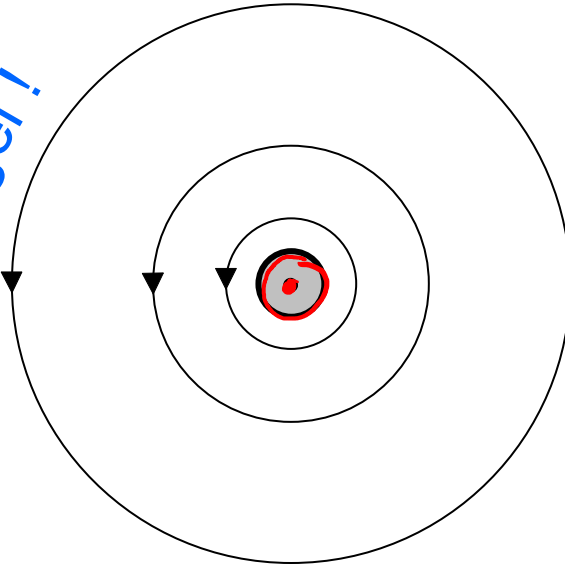
Magnetische Feldlinien sind stets in sich geschlossen \Rightarrow Wirbelfeld

Strom fließt von Betrachter weg
(Kreuz symbolisiert Pfeilende)

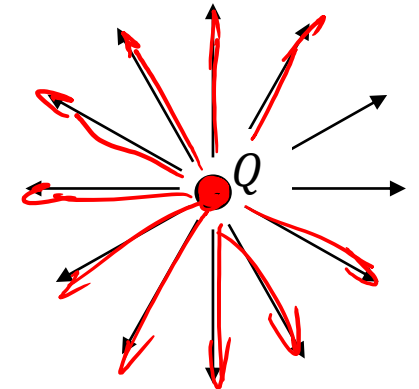


Rechte-Hand-Regel !

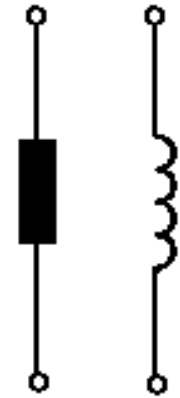
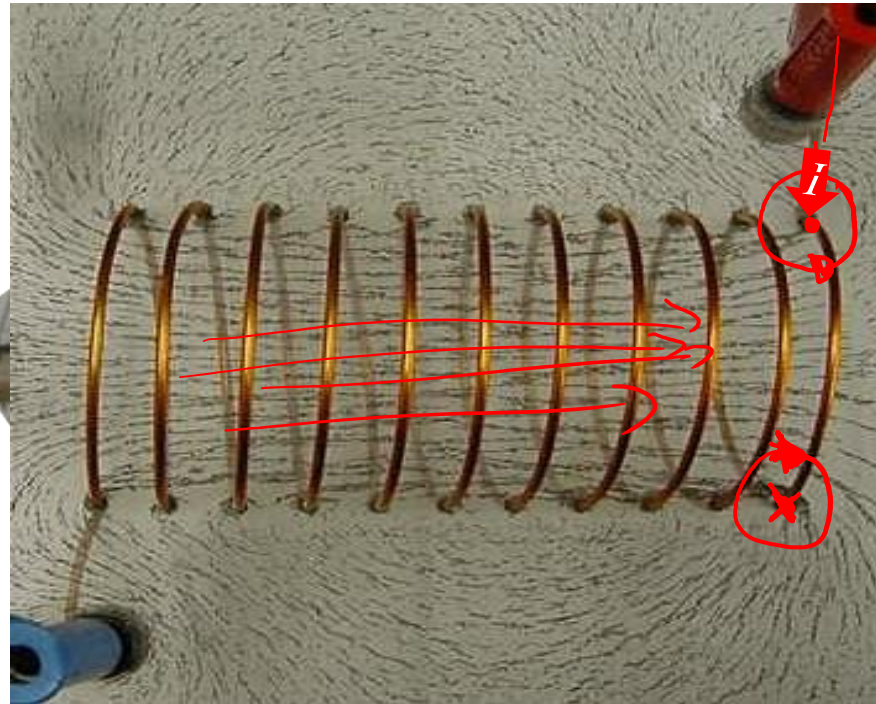
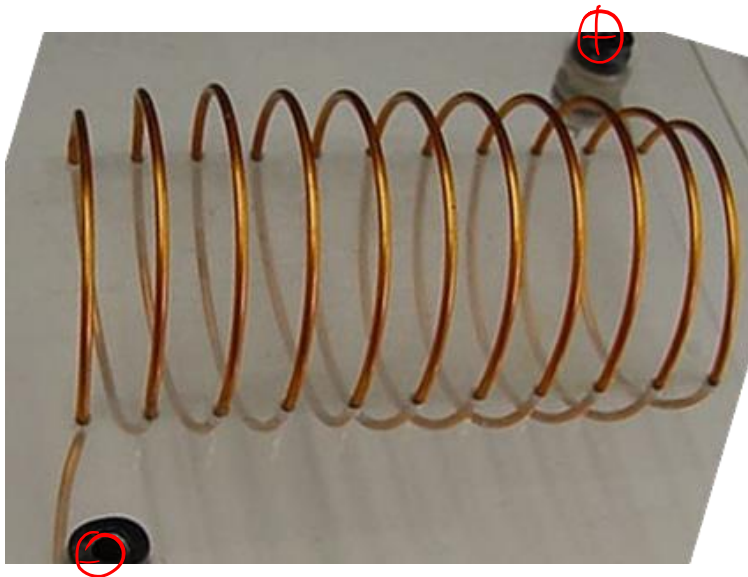
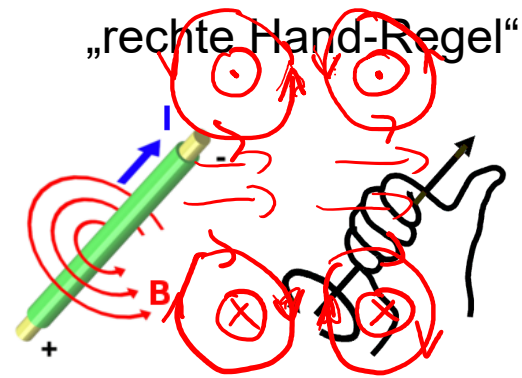
Strom fließt auf Betrachter zu
(Punkt symbolisiert Pfeilspitze)



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



AUFBAU DER SPULE



links: IEC 617-4
rechts: normgerecht
DIN EN 60617-4

Frage:
Welche Richtung hat das Magnetfeld?

WOZU IST DIE SPULE GUT?

Transformatoren

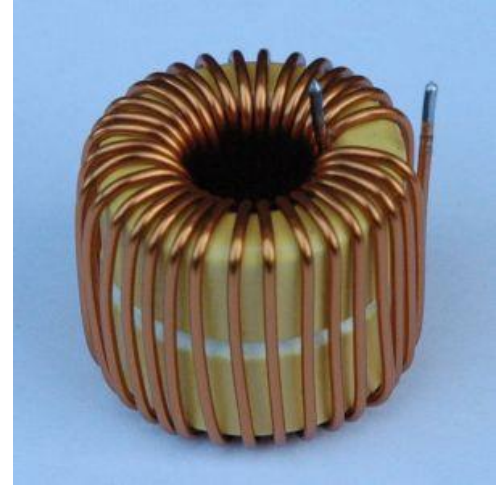
Generatoren

Motoren

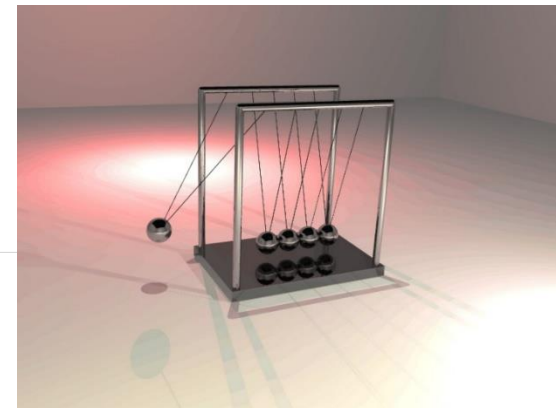
Induktionsschleifen

Frequenzabhängiger
Widerstand

→ Entstördrossel



Energiespeicher für
Schwingkreise



6 **MAGNETISCHES FELD**

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

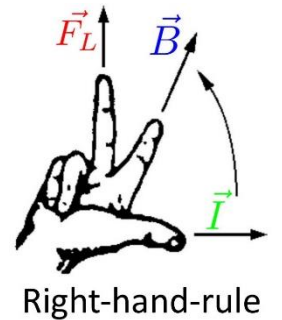
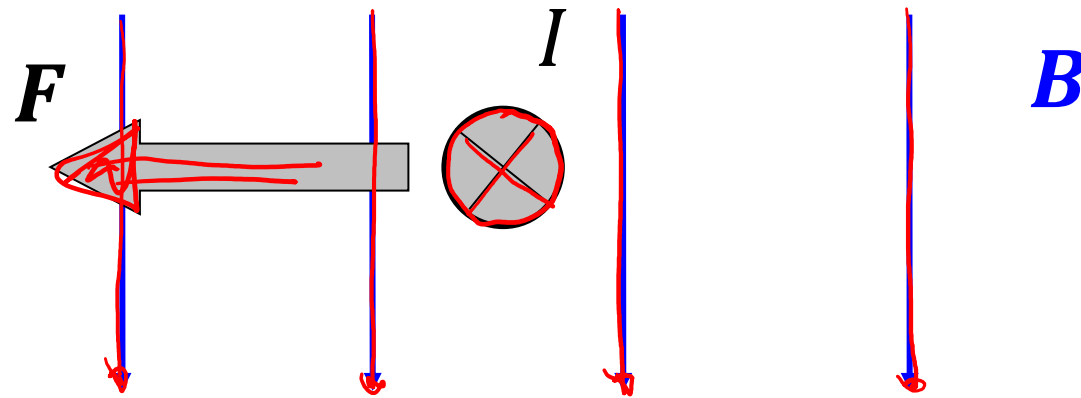
6.6 Spulen

6.7 Andere magnetische Effekte

MAGNETISCHE FLUSSDICHTE B

Magnetische Flussdichte B gibt Intensität eines magnetischen Feldes an

Ermittlung: Kraftwirkung auf einen geraden langen Leiter



Es gilt mit der Kraft F , der Stromstärke I und der Länge l :

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \quad \text{mit } [B] = 1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ T (Tesla)}$$

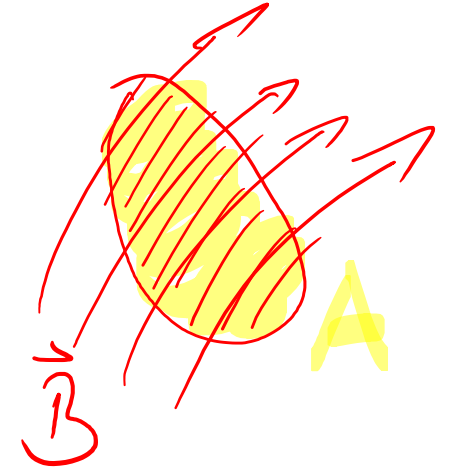
MAGNETISCHER FLUSS Φ

„großes Φ H I“ ρ

Flussdichte B · Fläche A (senkrecht davon durchsetzt)

In einem homogenen Magnetfeld gilt:

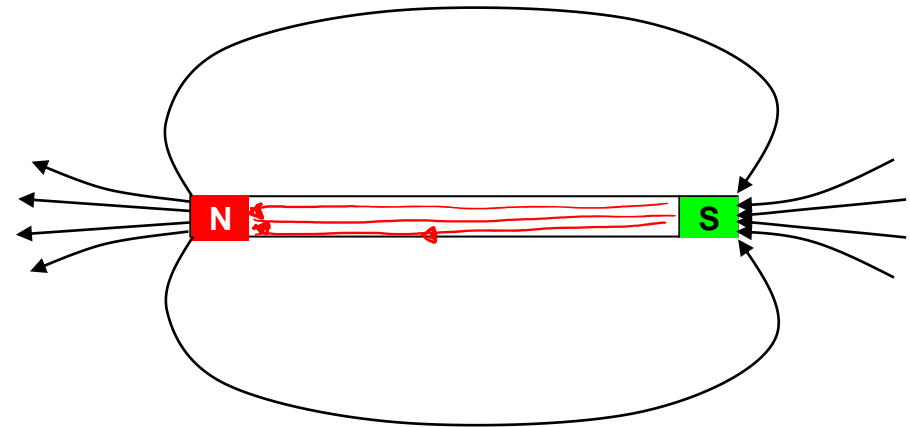
$$\Phi = B \cdot A$$



mit $[\Phi] = 1 \text{ T m}^2 = 1 \text{ Vs} = \underline{1 \text{ Wb (Weber)}}$

Frage:

Wo ist das Feld hier homogen?



6 **MAGNETISCHES FELD**

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

6.7 Andere magnetische Effekte

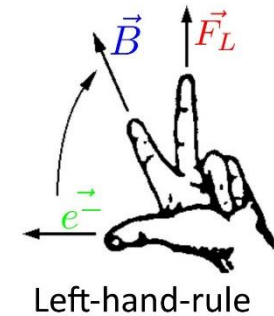
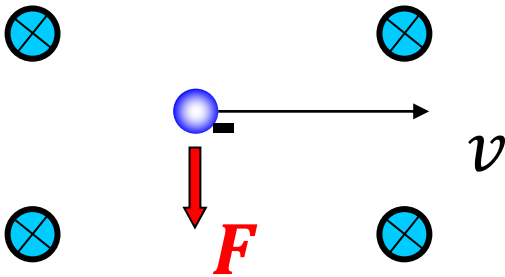
LORENTZ-KRAFT

Bewegte Ladungsträger in einem Magnetfeld:

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

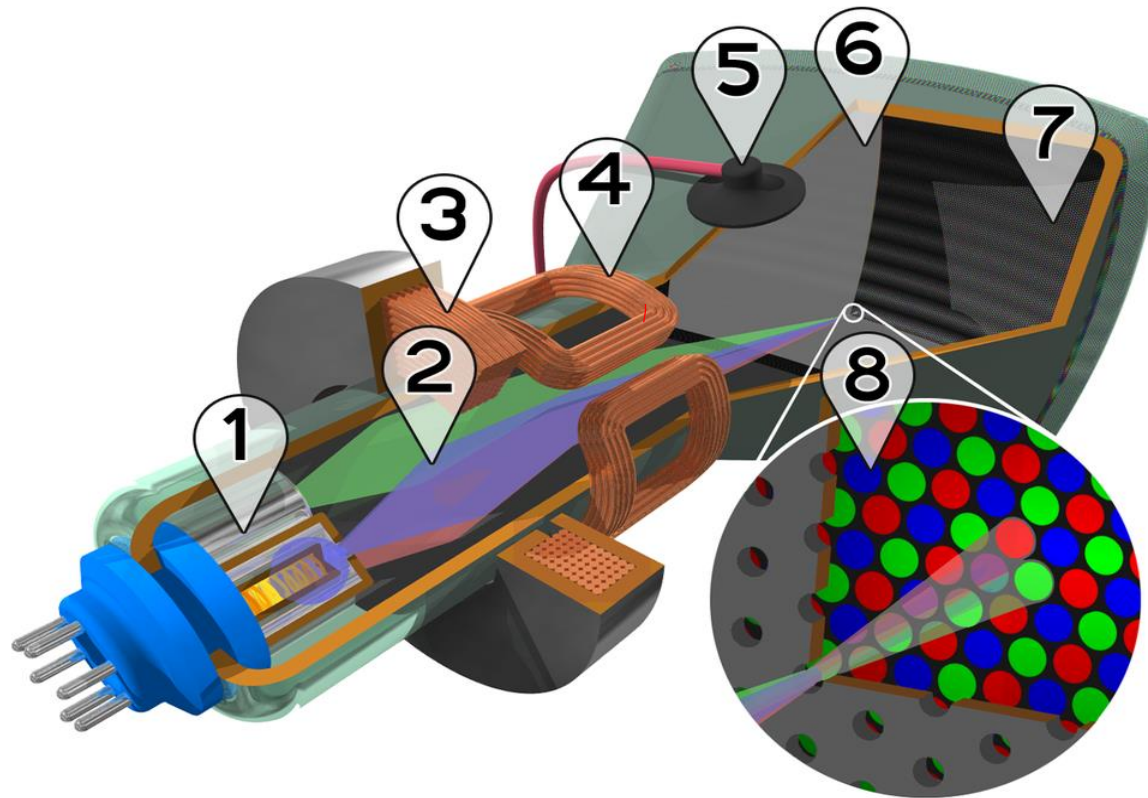
⇒ Lorentz-Kraft

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$



ANWENDUNG DER LORENTZ-KRAFT

Erklären Sie die Funktion der Kathodenstrahlröhre.
Was ist an der Darstellung nicht korrekt?



6 **MAGNETISCHES FELD**

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

6.7 Andere magnetische Effekte

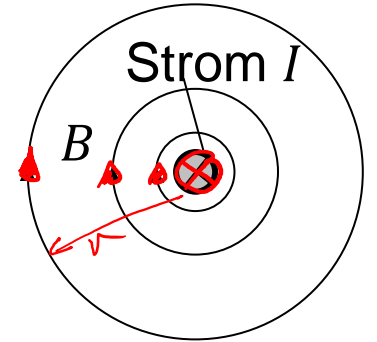
MAGNETISCHE FELDSTÄRKE H

Magnetische Flussdichte eines stromdurchflossenen Leiters:

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

- $\mu = \mu_0 \mu_r$ Permeabilität
- μ_r : relative Permeabilität
- μ_0 : Permeabilität des Vakuums (magn. Feldkonstante):

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



Flussdichte ist materialabhängig

⇒ man definiert die materialunabhängige magn. Feldstärke H

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

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

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

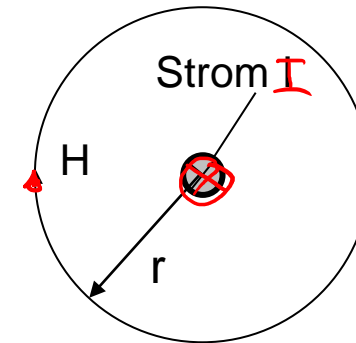
AUFGABE

Wie groß ist die magnetische Feldstärke und die Flussdichte im Abstand von 10 mm von einem langen Draht, der von einem Strom von 1 A durchflossen wird? (Luft verhält sich hier wie Vakuum)

$$H = \frac{I}{2\pi r} = 15,9 \text{ A/m} \quad \mu_r = 1$$

$$B = \mu \cdot H = 20 \mu\text{T} \quad H = B/\mu$$

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



DURCHFLUTUNG Θ

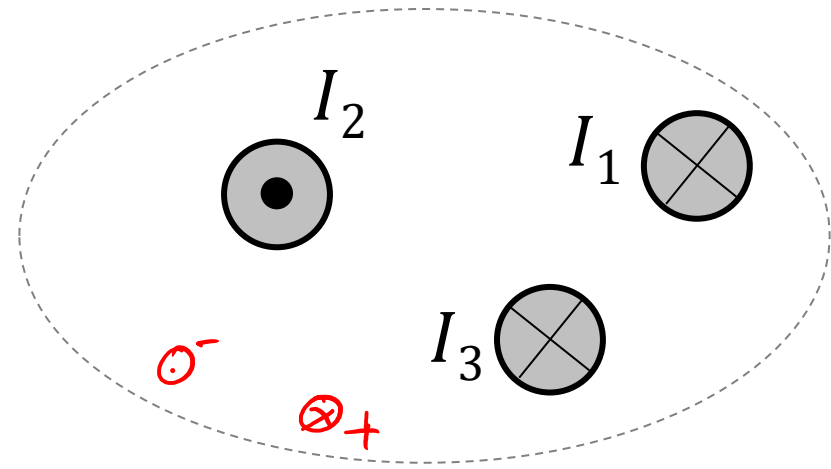
"groß THETA"

Summe, der durch einen Ring fließenden Ströme

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

Beispiel:

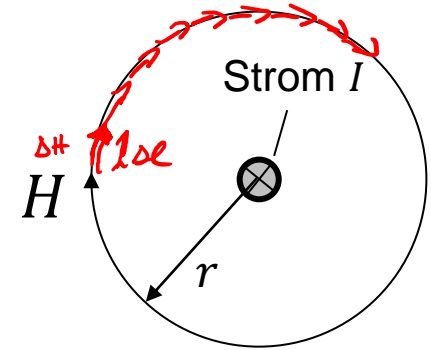
$$\Theta = \underline{I_1} - \underline{I_2} - \underline{I_3}$$



DURCHFLUTUNGSGESETZ

Verallgemeinerung des Falles für einen stromdurchflossenen Leiter:

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



Durchflutungsgesetz:

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

Durchflutung = Σ Feldstärke auf Teilstück · Länge des Teilstücks

Allgemeine Form:

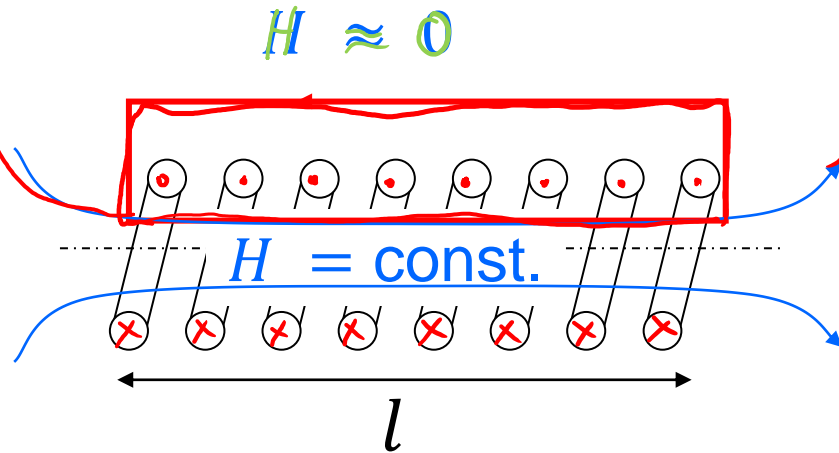
$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s}$$

Frage: Wozu ist das gut?

→ eine der Maxwellschen Gleichungen

ANWENDUNGSBEISPIEL

Beispiel Zylinderspule = Draht um zylindrischen Körper



N : Windungszahl

I : Strom

l : Länge der Spule

A : Spulenquerschnittsfläche

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

Annahmen:

- Außenraum: *Feld vernachlässigbar*
- Innenraum: *Feld homogen*

→ Durchflutung (des rot umrandeten Bereiches):

$$\Theta = N \cdot I$$

Durchflutungssatz (entlang des roten Weges):

$$N \cdot I = H \cdot l$$

$$\Rightarrow \text{Feldstärke in Zylinderspule } H = \frac{N \cdot I}{l}$$

6 **MAGNETISCHES FELD**

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität μ

6.6 Spulen

6.7 Andere magnetische Effekte

MATERIE IM MAGNETFELD

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

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

mit:

μ : Permeabilität

μ_0 : Permeabilität des Vakuums

μ_r : relative Permeabilität

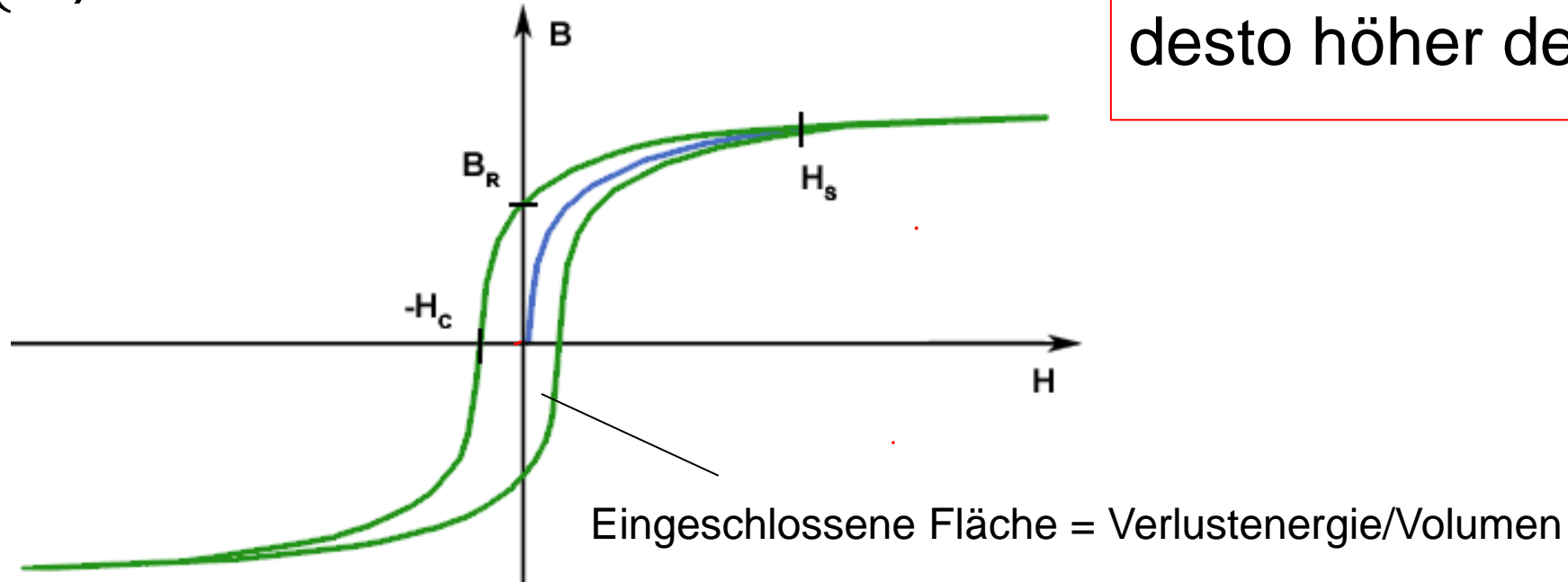
$$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

Man unterscheidet:

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

FERROMAGNETISCHE STOFFE

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

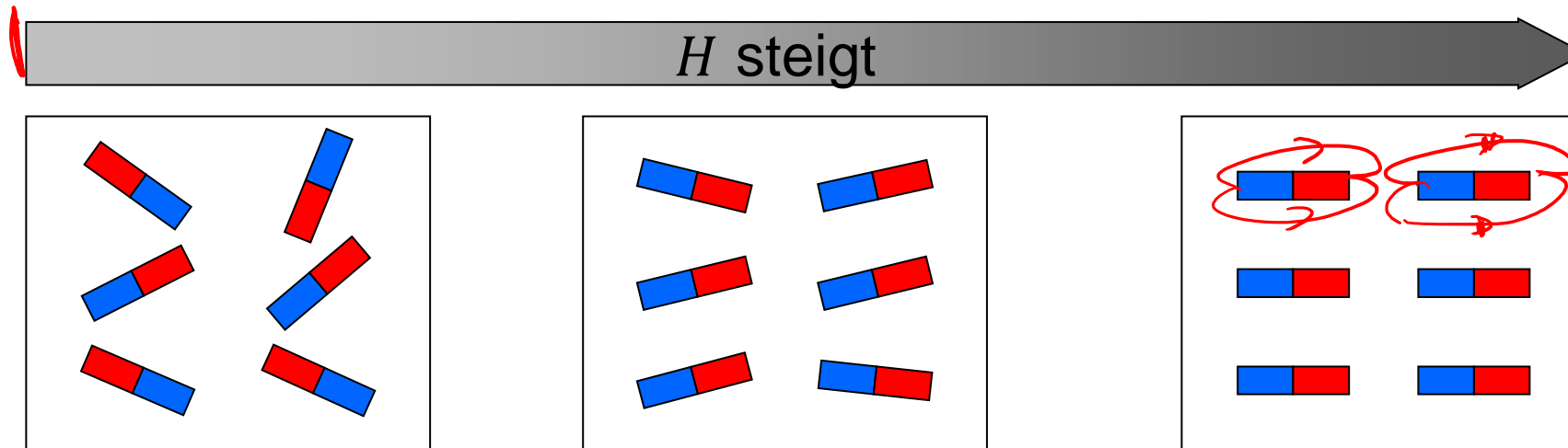


Ummagnetisieren
kostet Energie.
Je höher die Frequenz,
desto höher der Verlust.

- 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).

6 MAGNETISCHES FELD

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

- **Induktionsgesetz**
- Induktivität
- Strom und Spannung der Spule
- Reihen- und Parallelschaltung
- Energie in der Spule
- Bauformen

6.7 Andere magnetische Effekte

INDUKTIONSGESETZ

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

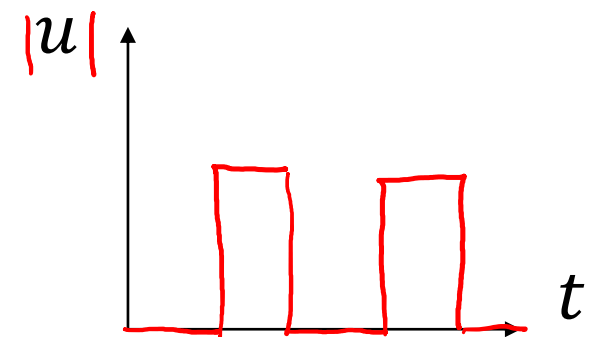
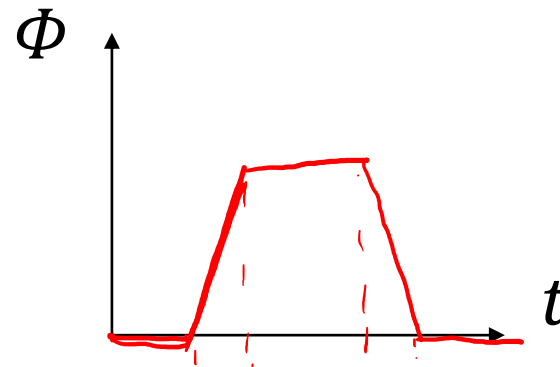
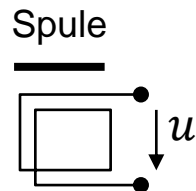
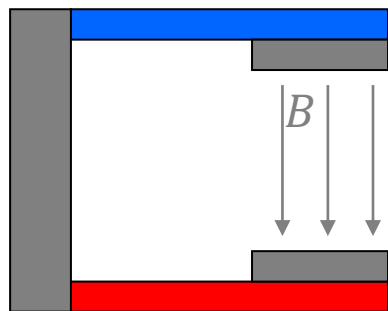
$$u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

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

$$B = \mu \cdot H$$

Handwritten red note: $\mu = \mu_0 \mu_r$ with an arrow pointing to μ

Magnetische Feldstärke H

Durchflutungssatz

$$\Phi = B \cdot A$$

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

Magnetischer Fluss Φ

Durchflutung Θ

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

$$\Theta = \sum I$$

Induktionsgesetz

Spannung u

Strom i

6 MAGNETISCHES FELD

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

- Induktionsgesetz
- **Induktivität**
- Strom und Spannung der Spule
- Reihen- und Parallelschaltung
- Energie in der Spule
- Bauformen

6.7 Andere magnetische Effekte

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?

$$H \propto I$$

⇒ Proportionalitätskonstante: Induktivität L

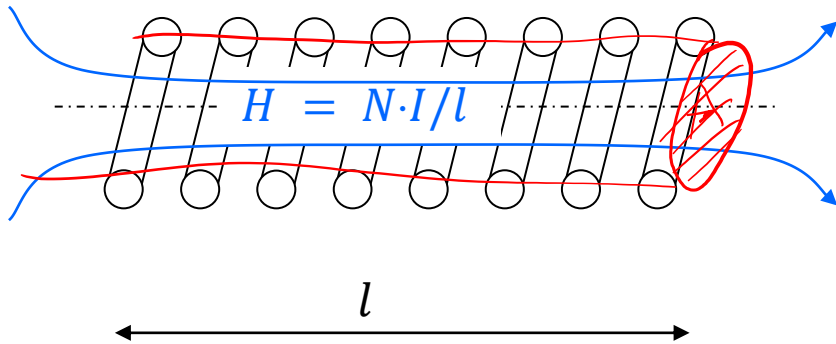
Es gilt bei einer Spule mit N Windungen:

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

vgl. mit $Q = C \cdot U$

INDUKTIVITÄT DER ZYLINDERSPULE

Aus dem Durchflutungssatz folgt:



N : Windungszahl

I : Strom

l : Länge der Spule

A : Spulenquerschnittsfläche

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

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

$$(2) \Phi = B \cdot A = \mu \cdot N \cdot I \cdot \frac{A}{l}$$

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

$$(3) \Phi = \mu \cdot N^2 \cdot I \cdot \frac{A}{l}$$

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

$$(4) L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

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

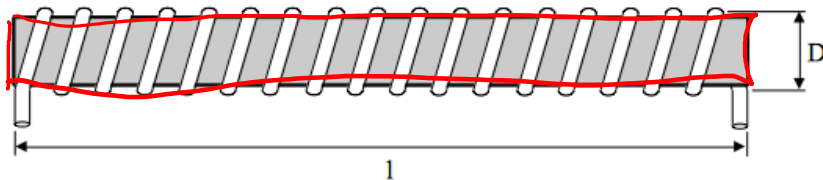
INDUKTIVITÄT DER ZYLINDERSPULE

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

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

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

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



vergleiche: $C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$

Hohe Induktivität erfordert:

- $A \uparrow$
Abmessung hoch, aber Platzbedarf
- $\ell \downarrow$
so dicht wie möglich wickeln
- $N \uparrow$
aber: Platzbedarf, Verlustwiderstand
- $\mu_r \uparrow$
Luft: 1
Ferrite: 2000 ... 3000

6 MAGNETISCHES FELD

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

- Induktionsgesetz
- Induktivität
- **Strom und Spannung der Spule**
- Reihen- und Parallelschaltung
- Energie in der Spule
- Bauformen

6.7 Andere magnetische Effekte

STROM UND SPANNUNG IN DER SPULE

Für eine Spule mit N –Windungen gilt:

$$(1) \quad N \cdot \Phi = L \cdot I \Leftrightarrow N \cdot \Phi = L \cdot i \quad \left| \frac{d}{dt} \right|$$

Das Induktionsgesetz besagt:

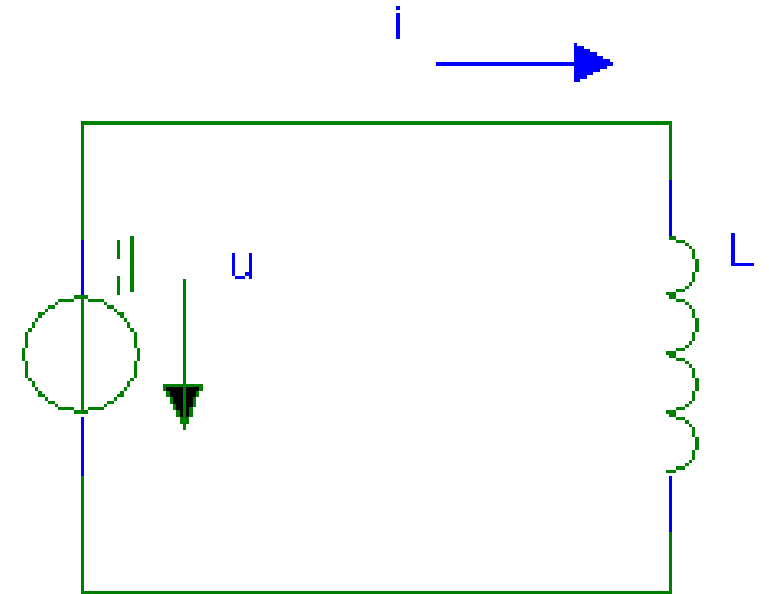
$$(2) \quad \underbrace{N \cdot \frac{d\Phi}{dt}}_u = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Substitution von Φ in (2) durch (1):

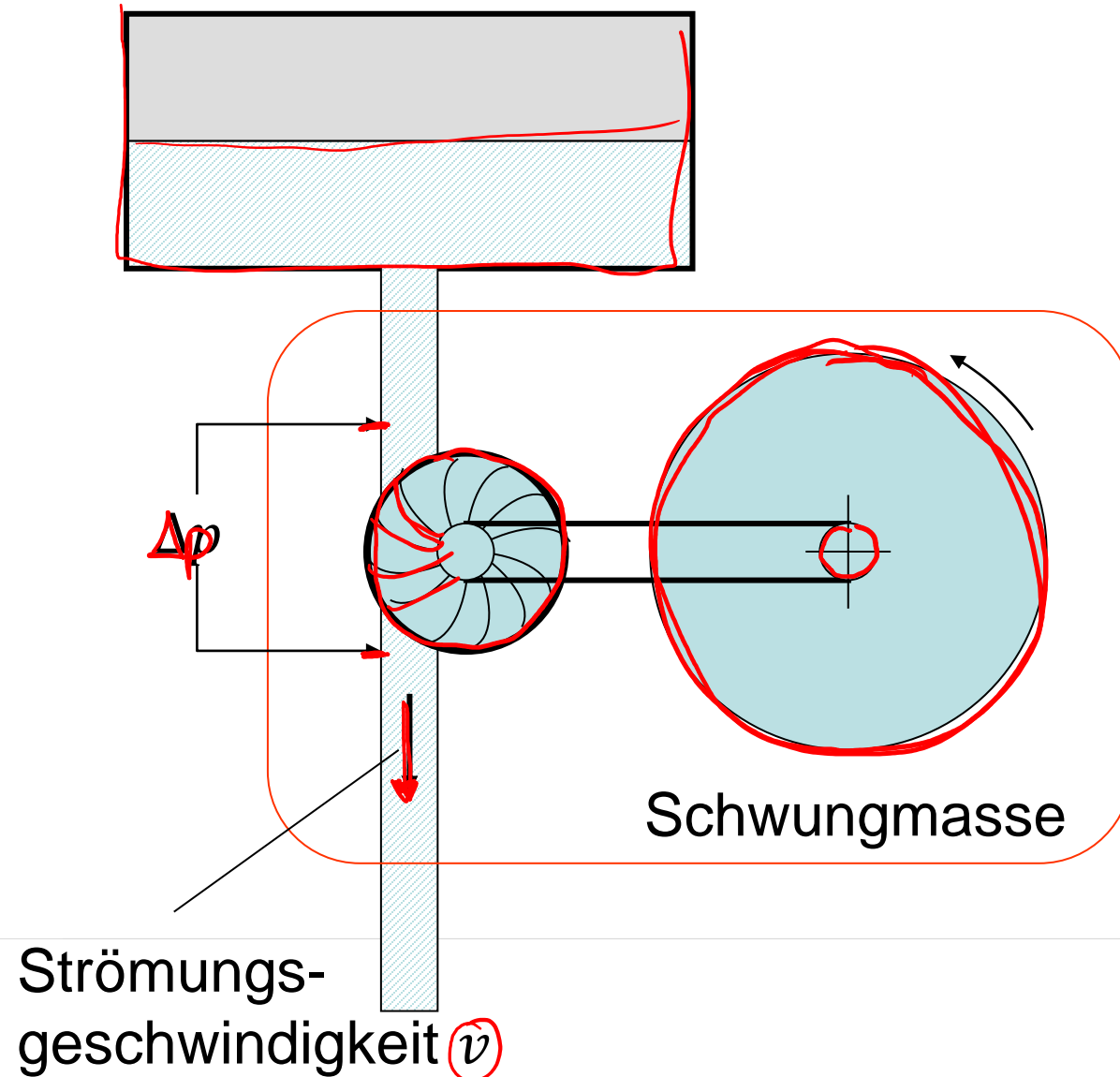
$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad \Leftarrow$$

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*

6 MAGNETISCHES FELD

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

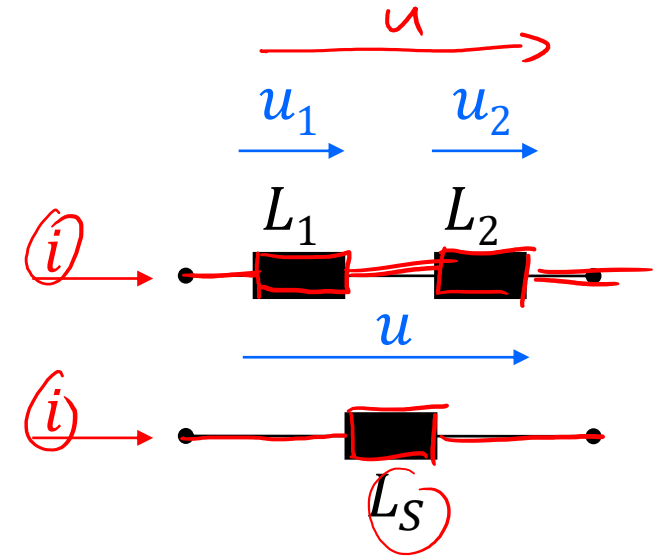
- Induktionsgesetz
- Induktivität
- Strom und Spannung der Spule
- **Reihen- und Parallelschaltung**
- Energie in der Spule
- Bauformen

6.7 Andere magnetische Effekte

REIHENSCHALTUNG VON SPULEN

Durch beide Spulen fließt derselbe Strom.

Aus der Kirchhoffschen Maschenregel folgt:



$$u = u_1 + u_2$$

Mit der Spulengleichung

$$u = L \cdot \frac{di}{dt}$$

folgt:

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

\Rightarrow

$$L_S = L_1 + L_2$$

„Reihenschaltung von Spulen wie bei Widerständen“

PARALLELSCHALTUNG VON SPULEN

Aus der Kirchhoffschen Knotenregel folgt:

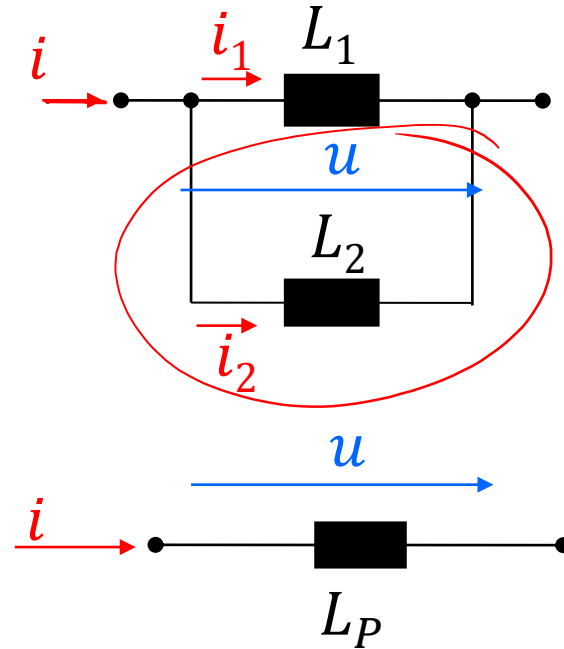
$$i = i_1 + i_2$$

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

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

\Rightarrow

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



\Rightarrow „Parallelschaltung von Spulen wie bei Widerständen“

6 MAGNETISCHES FELD

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

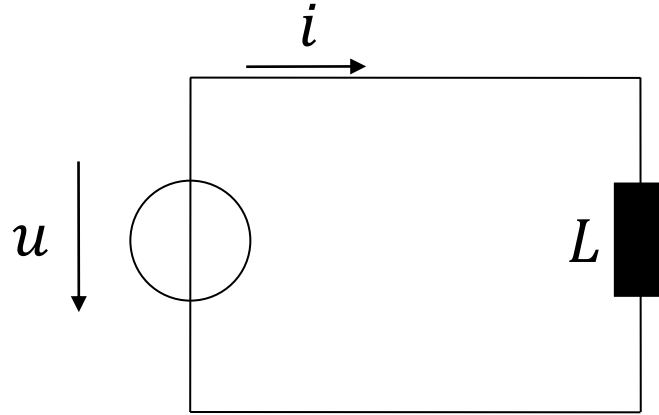
6.6 Spulen

- Induktionsgesetz
- Induktivität
- Strom und Spannung der Spule
- Reihen- und Parallelschaltung
- **Energie in der Spule**
- Bauformen

6.7 Andere magnetische Effekte

ENERGIE IN DER SPULE

Spannung an Spule:



Leistung:

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

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

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

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

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

\Rightarrow In der Spule gespeicherte Energie:

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

vgl. mit $W = \frac{1}{2} C U^2$

6 MAGNETISCHES FELD

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

6.5 Permeabilität

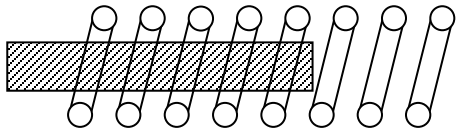
6.6 Spulen

- Induktionsgesetz
- Induktivität
- Strom und Spannung der Spule
- Reihen- und Parallelschaltung
- Energie in der Spule
- **Bauformen**

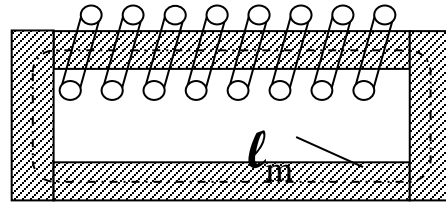
6.7 Andere magnetische Effekte

BAUFORMEN VON FERRITSPULEN

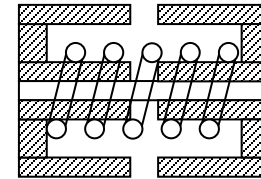
offene Spule
mit (Schraub-)kern



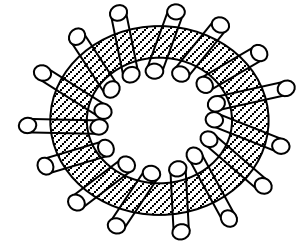
geschlossene
Spule



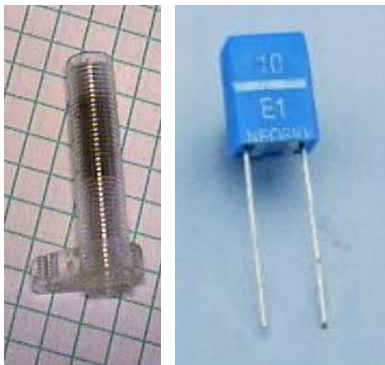
Schalenkernspule



Ringkernspule



Schraubkern
eindrehbar
→ L variabel



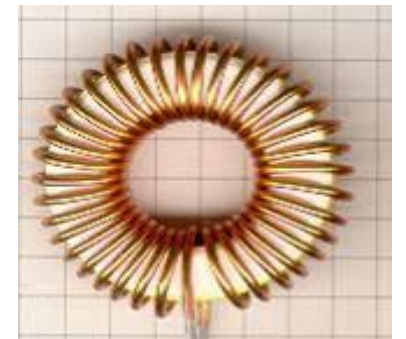
Feldlinien im Kern
geführt → geringe
Streuverluste



Feldlinien geführt +
Schraubkern
eindrehbar
→ L variabel



sehr geringes
Streufeld
Entstördrosseln



ANWENDUNGEN

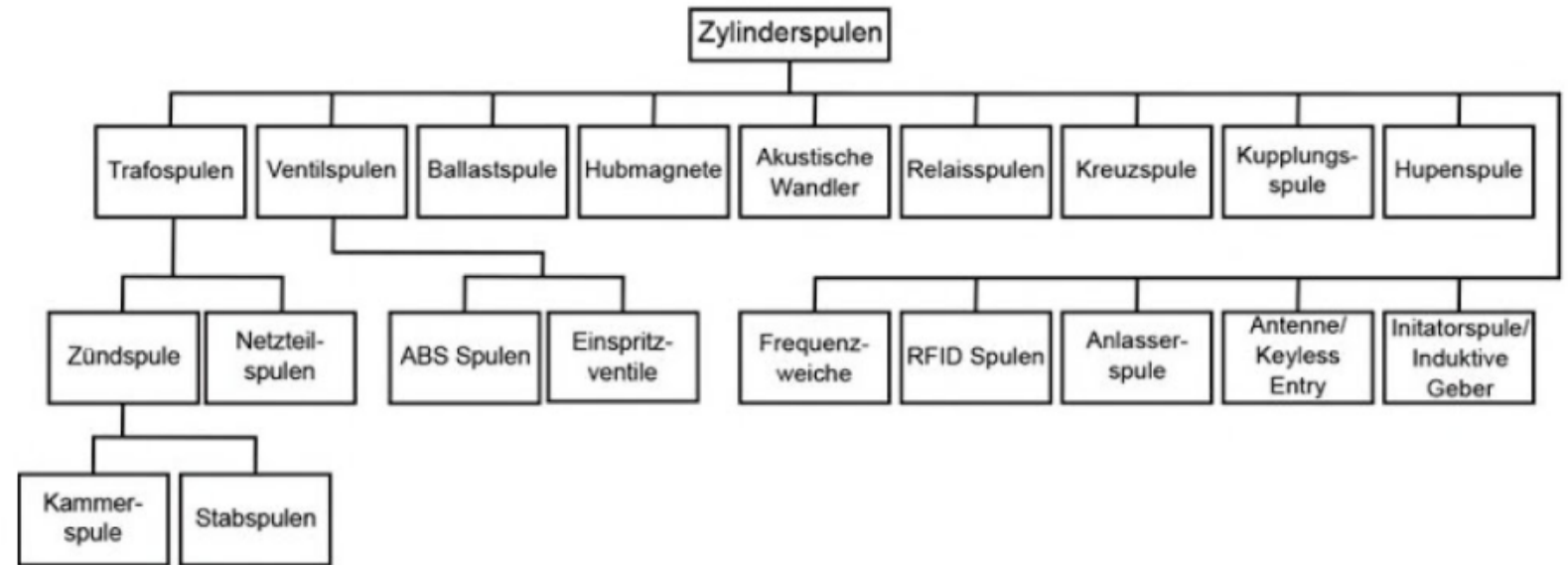


Abb. 1.15 Darstellung verschiedener Anwendungen für die Zylinderspule



Abb. 1.16 Darstellung verschiedener Anwendungen für weitere Spulenarten

6 **MAGNETISCHES FELD**

6.1 Einführung

6.2 Flussdichte und Fluss

6.3 Lorentz-Kraft

6.4 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

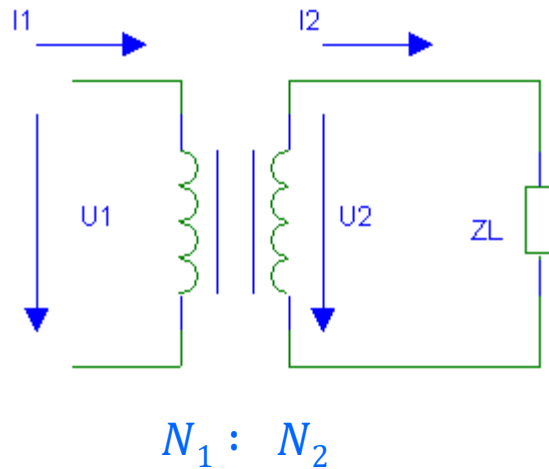
6.5 Permeabilität

6.6 Spulen

6.7 Andere magnetische Effekte

TRANSFORMATOR

- zwei magnetisch gekoppelte Spulen
 - Primärspule mit N_1 Wicklungen
 - Sekundärspule mit N_2 Wicklungen
 - Wechselspannung an einer Spule
- ⇒ Energie wird von der einen auf die andere übertragen



Bei einem idealen Transformator gilt:

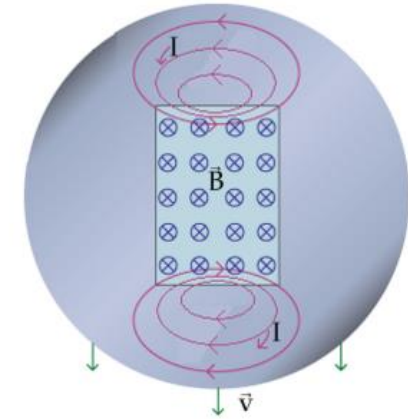
$$\frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$



ANDERE MAGNETISCHE EFFEKTE

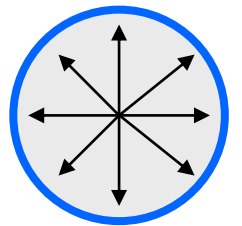
Wirbelstromverluste

- innerhalb eines Metalls werden Ströme induziert
⇒ meist unerwünschte Verluste
⇒ Nutzung: Wirbelstrombremse, Induktionskochfeld



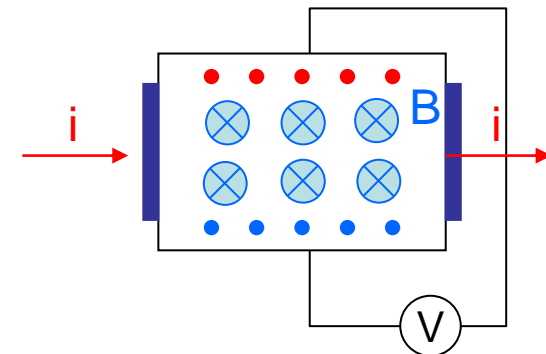
Skineffekt

- Wirbelströme im Leiter verdrängen Strom an die Oberfläche
- nur die Oberfläche des Leiters leitet bei hohen Frequenzen
⇒ Widerstand steigt, Verluste
⇒ bei HF werden Rohre statt Volleiter verwendet



Hall-Effekt

- Ablenkung von Ladungsträgern in Halbleiter
führen zu messbarer Spannung
⇒ Messung eines Magnetfeldes möglich



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