Stationäres Magnetfeld

Magnetische Feldstärke

Magnetische Flussdichte

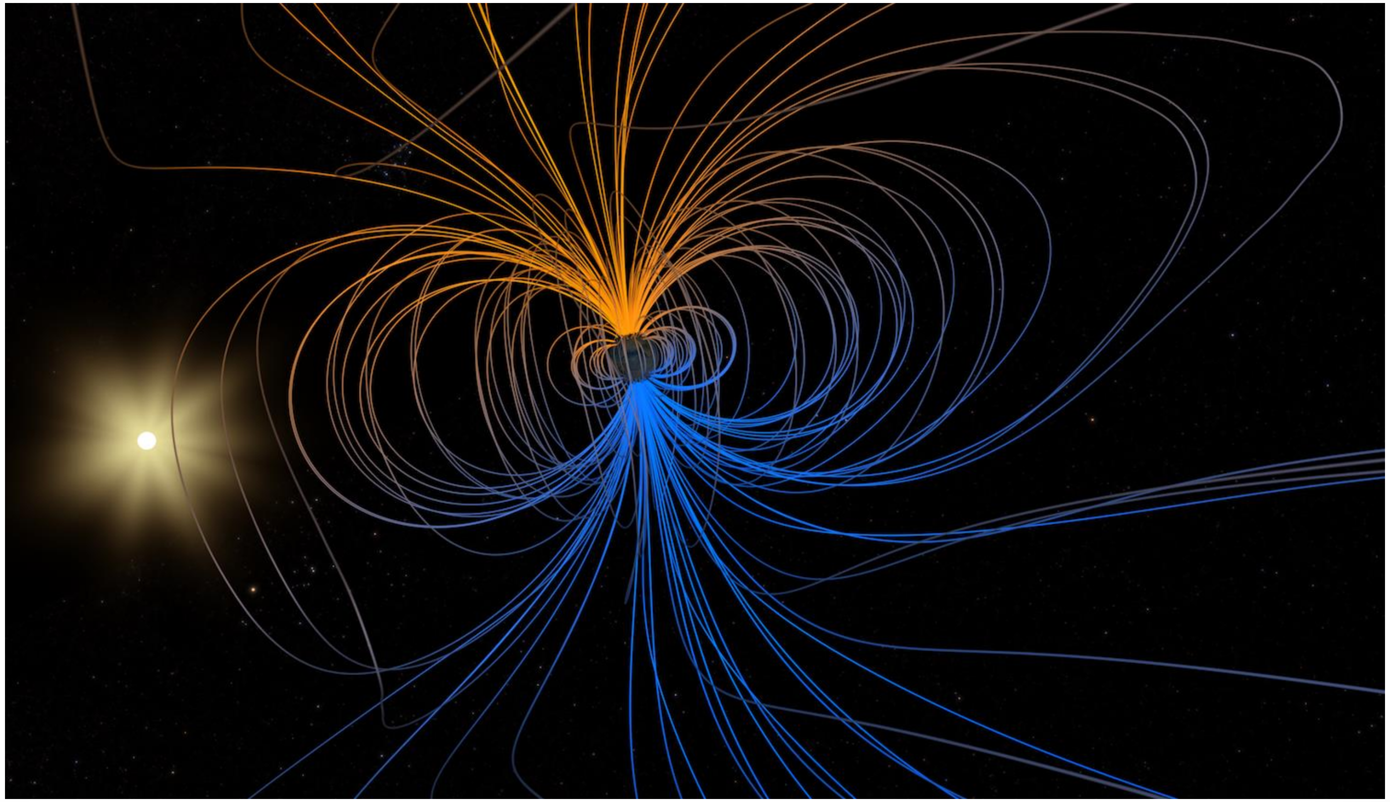
Hysteresekurve

Durchflutung

Reluktanzmodel

Induktivität

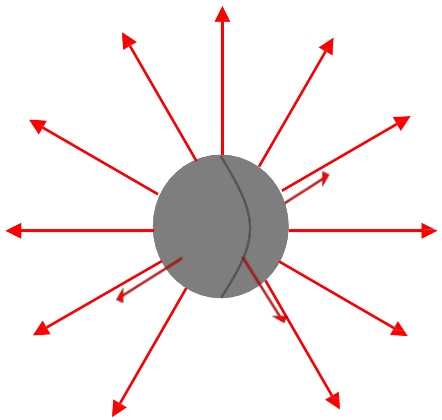
Verhalten an Grenzflächen



Magnetfeld

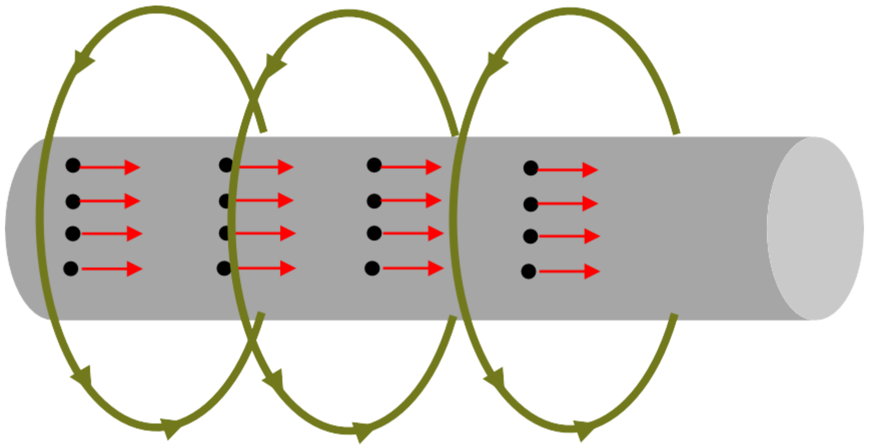
Ladungen lösen **E-Feld** aus

Quelle: Ladungen Q

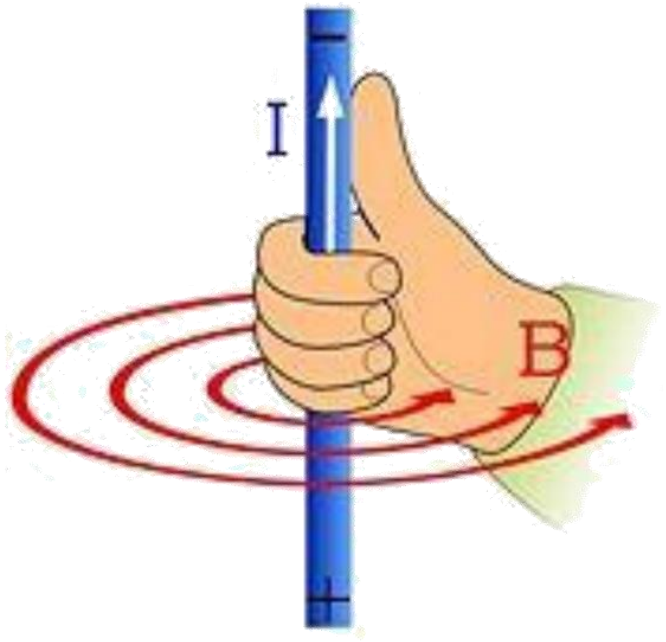


Bewegte Ladungen lösen Magnetfeld (**H-Feld**) aus

Quelle: Strom



Magnetfeld



Das Magnetfeld baut sich kreisförmig, um einen Stromdurchflossenen Leiter auf.
Dabei zeigt der Daumen in Richtung des Stromes und die Finger in Richtung des Feldes

Kraft auf bewegte Ladungen

Kraft von Magnetfeld auf Ladungen

$$\overrightarrow{F_M} = q\ (\vec{v} \times \vec{B})$$

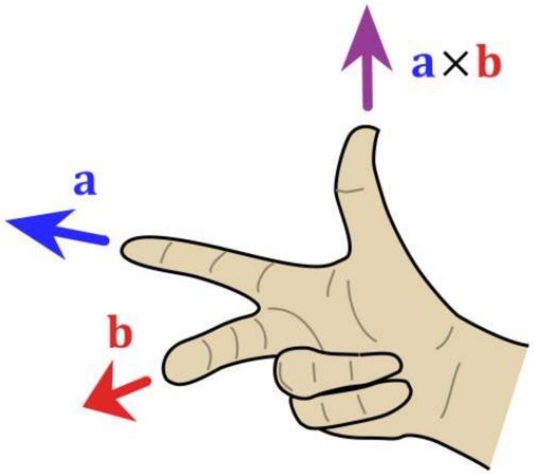
Kraft eines E-Feld auf Ladungen

$$\overrightarrow{F_C} = q \cdot \vec{E}$$

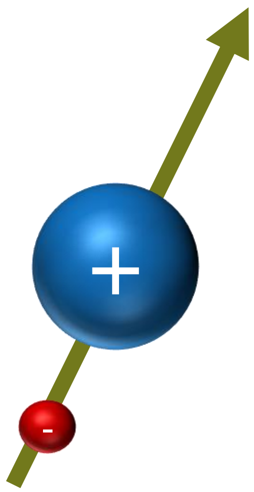
Lorentzkraft

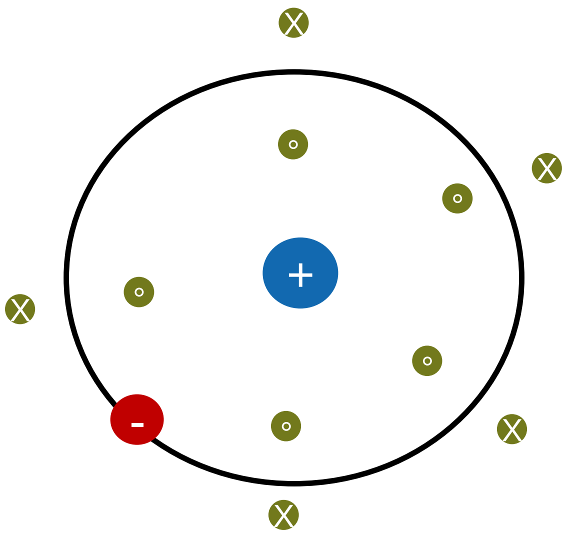
$$\overrightarrow{F_L} = q \cdot \vec{E} + q\ (\vec{v} \times \vec{B})$$

Die magnetische Kraft zeigt immer senkrecht
zur Bewegungsrichtung.
Desshalb werden Teilchen nicht beschleunigt, sondern nur abgelenkt



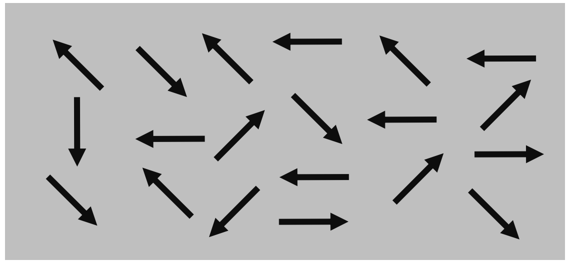
Magnetische Dipole



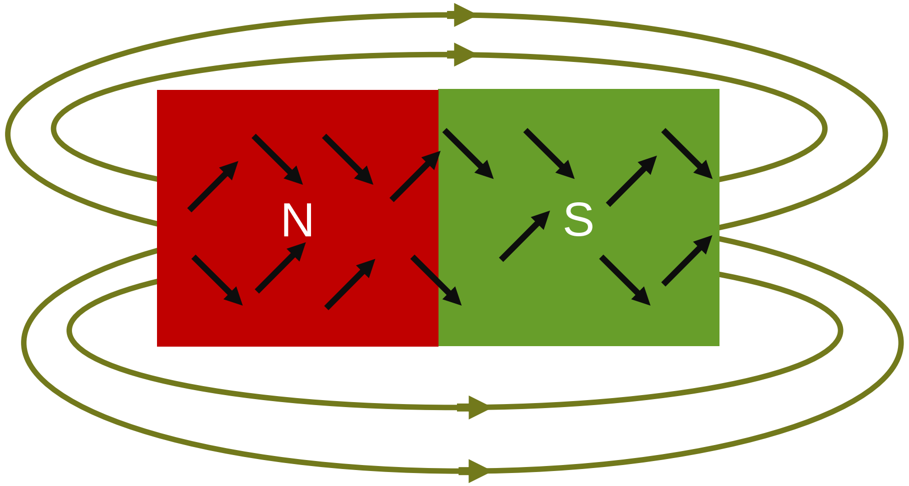


Beispiel: Stabmagnet

Dipole zufällig angeordnet, nicht magnetisch



Dipole mit Tendenz in eine Richtung, Stabmagnet



Magnetische Flussdichte und Fluss: B-Feld / Φ

Frage: Wieviel Magnetfeld fliesst durch eine Fläche unabhängig des Materials ?
Wir definieren **B** als die **Magnetische Flussdichte**. Diese Grösse soll «*unabhängig vom Material*» sein.

Es gilt: $\vec{\boldsymbol{B}} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}, \quad [B] = T = \frac{Vs}{m^2}$

Analog zu: $\vec{\boldsymbol{D}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E}, \quad [D] = \frac{As}{m^2}$

Magnetischer Fluss Φ

Der magnetische Fluss Φ beschreibt, wie viel **Magnetfeld** durch eine **Fläche** fliesst.

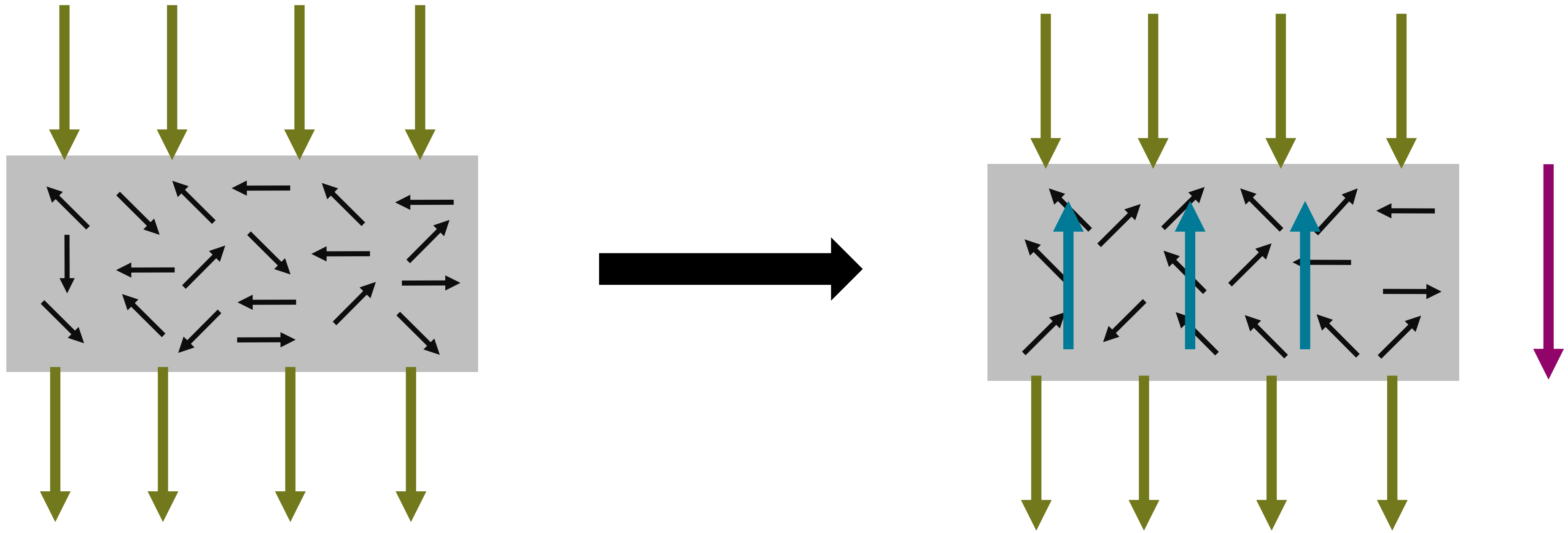
$$\boxed{\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}}$$

Der Fluss durch eine geschlossene Hüllfläche ist **immer** gleich 0

$$\boxed{\Phi = \oiint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}}$$

Zusammenhang B und H Feld

Wird eine magnetische Flussdichte von aussen an ein Material angelegt, so richten sich die mangetischen Dipole innerhalb des Materiales gegen das Feld und schwächen es ab.
Wie gut sich die Dipole ausrichten lassen, beschreibt die Grösse μ_r



$$\vec{H} = \vec{B} + \vec{M}$$

$$\rightarrow \vec{B} = \mu_0 \mu_r \cdot \vec{H}$$

Durchflutungsgesetz

Frage: Wie hängt das Magnetfeld mit dem Strom zusammen?

„Fliesst Strom durch eine Fläche, so entsteht ein Magnetfeld **H**, dessen Wert ähnlich zur Fläche und Stromstärke ist“

$$\boxed{\Theta = \oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = I_{eff}}$$

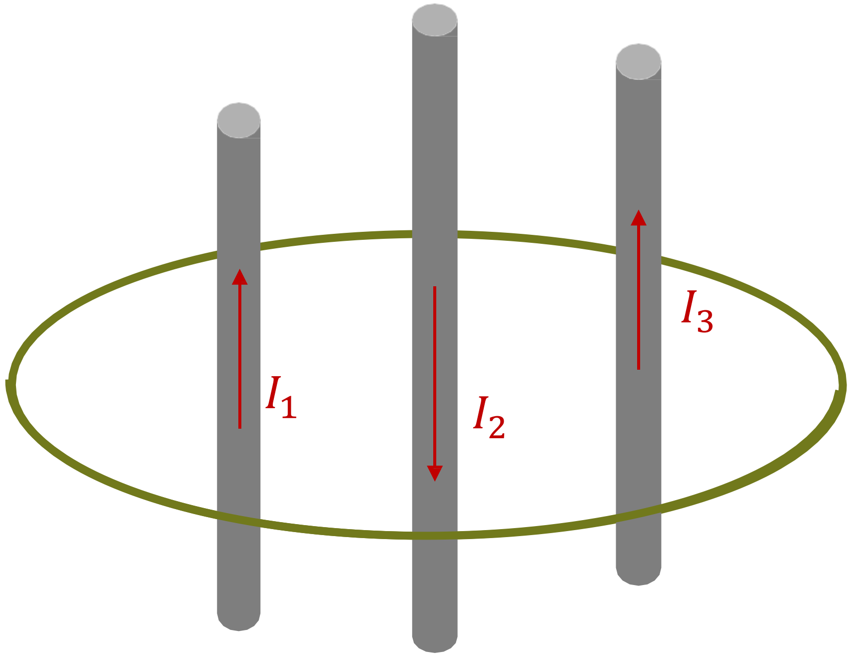
↓

H parallel zu Weg und Konstant,

(j senkrecht zu Fläche und konstant)

↓

$$\boxed{|H| \cdot |s| = |j| \cdot A_{eff} = I_{eff}}$$



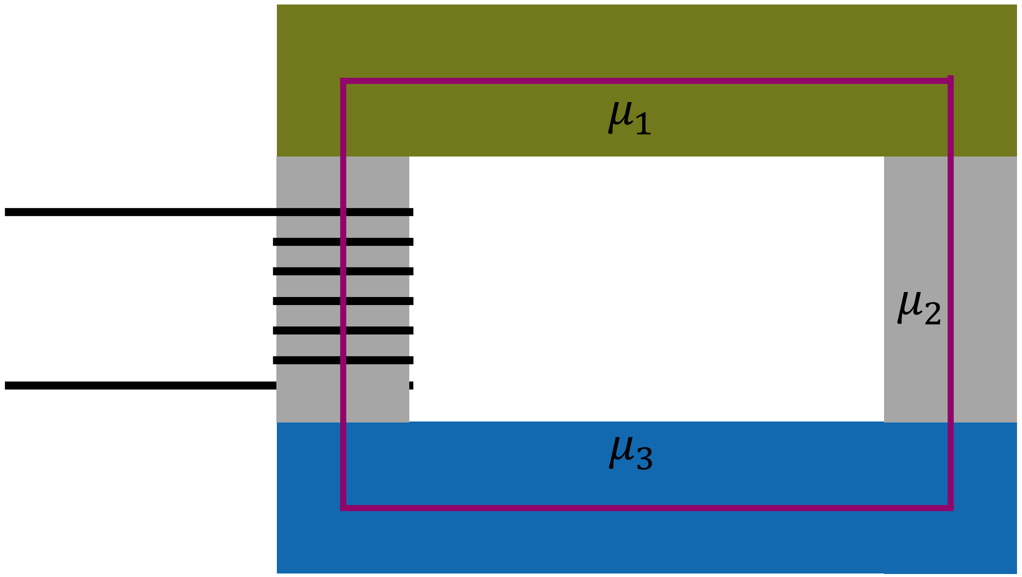
$$\boxed{\Theta = I_1 - I_2 + I_3}$$

Beispiel Spule (Wandtafel):

Durch eine Spule mit N Windungen und Länge l fliesst einen Strom I. Berechnen sie das Magnetfeld der Spule. Ausserhalb der Spule, kann das Magnetfeld als vernachlässigbar klein angenommen werden.

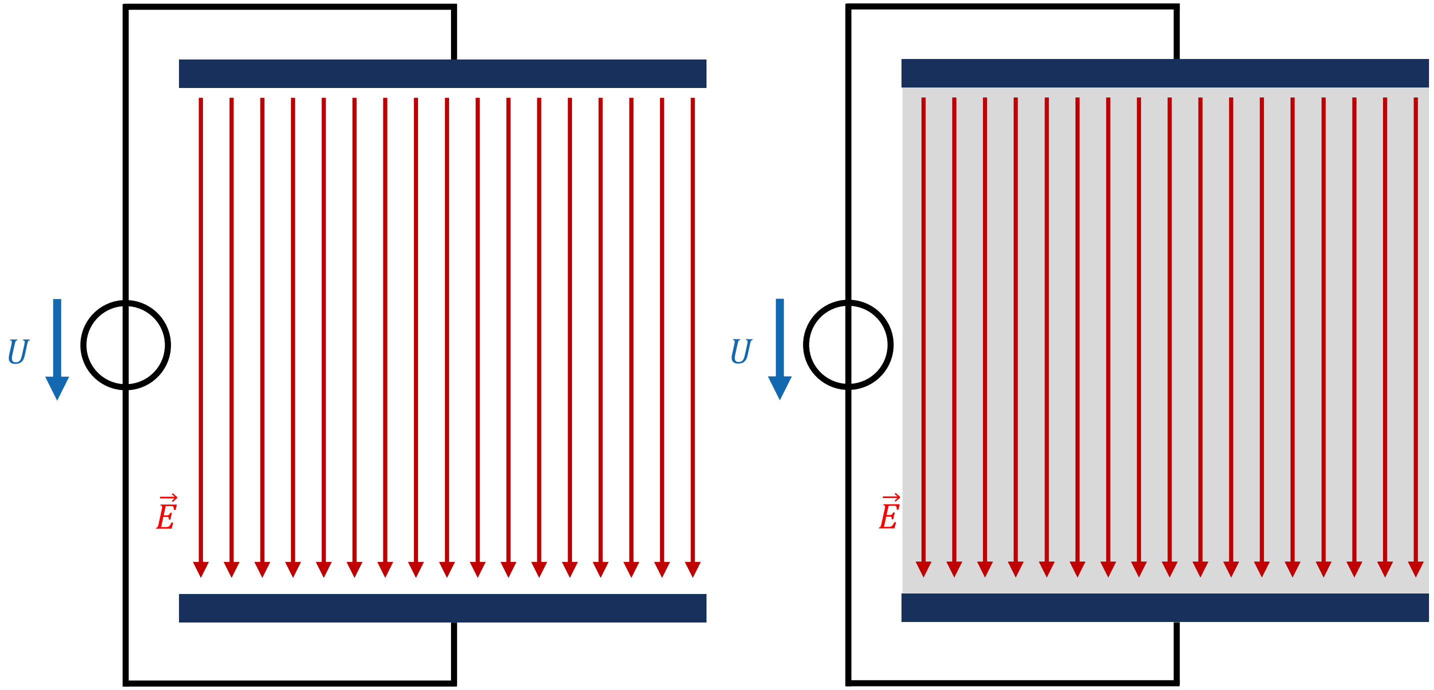
Beispiel:

Durch eine Spule mit N Windungen fliesst einen Strom I.
Die Spule ist um einen Eisenkern mit 3 verschiedenen Materialien gewickelt.
Berechnen Sie die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ in den einzelnen Materialien



Kondensator und Spannung

Legen wir eine Spannung an einen Kondensator an, so **kontrollieren** wir das **E-Feld**

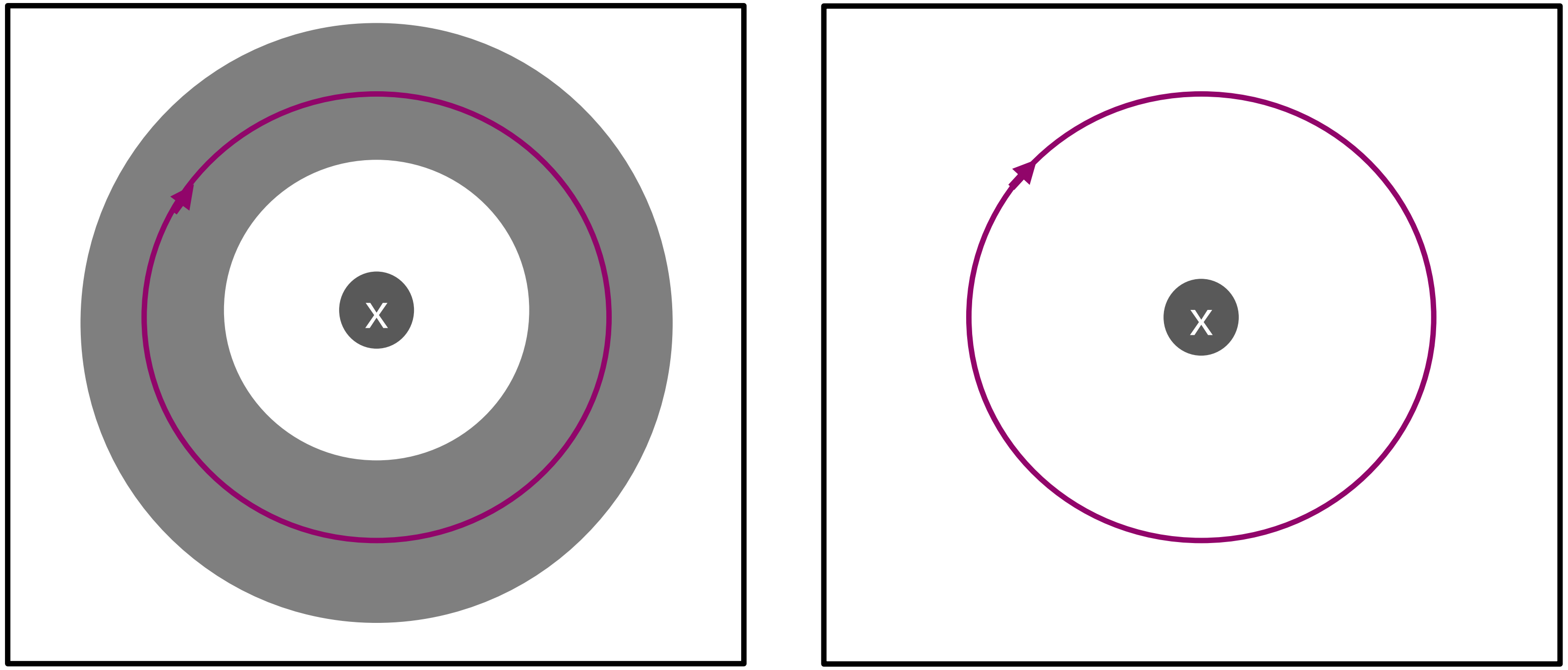


$$\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = U_{AB}$$

$$\boxed{E = \frac{U_{AB}}{d}}$$

Kondensator und Spannung

Lassen wir einen **Strom** durch eine Fläche fliessen, kontrollieren wir das **H-Feld**

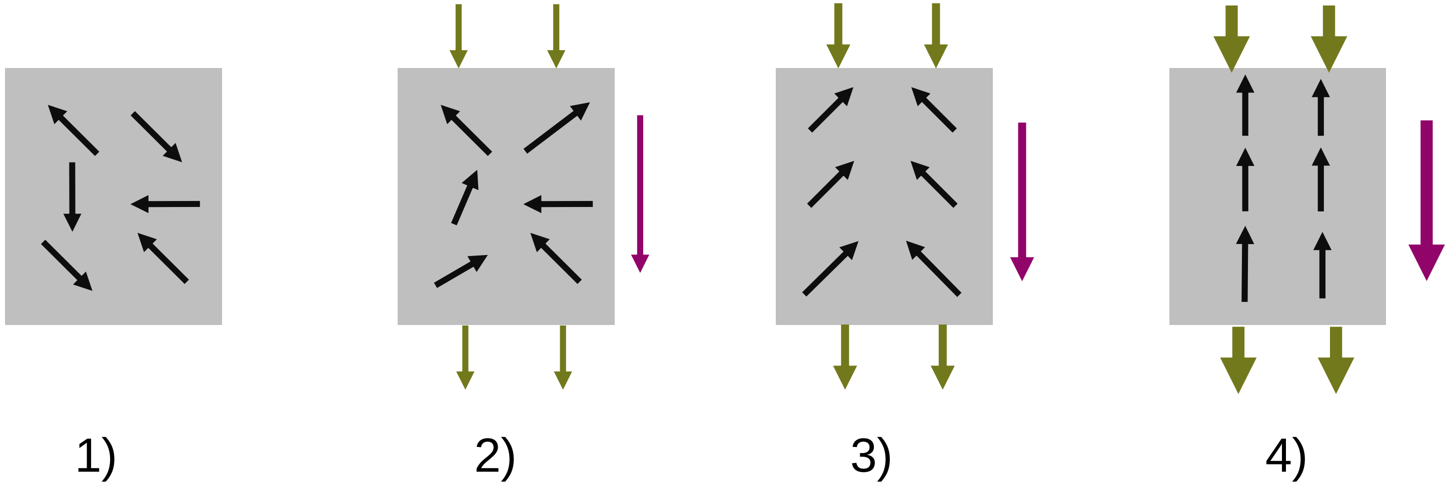


$$\oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = I$$

$$\boxed{H = \frac{I}{s}}$$

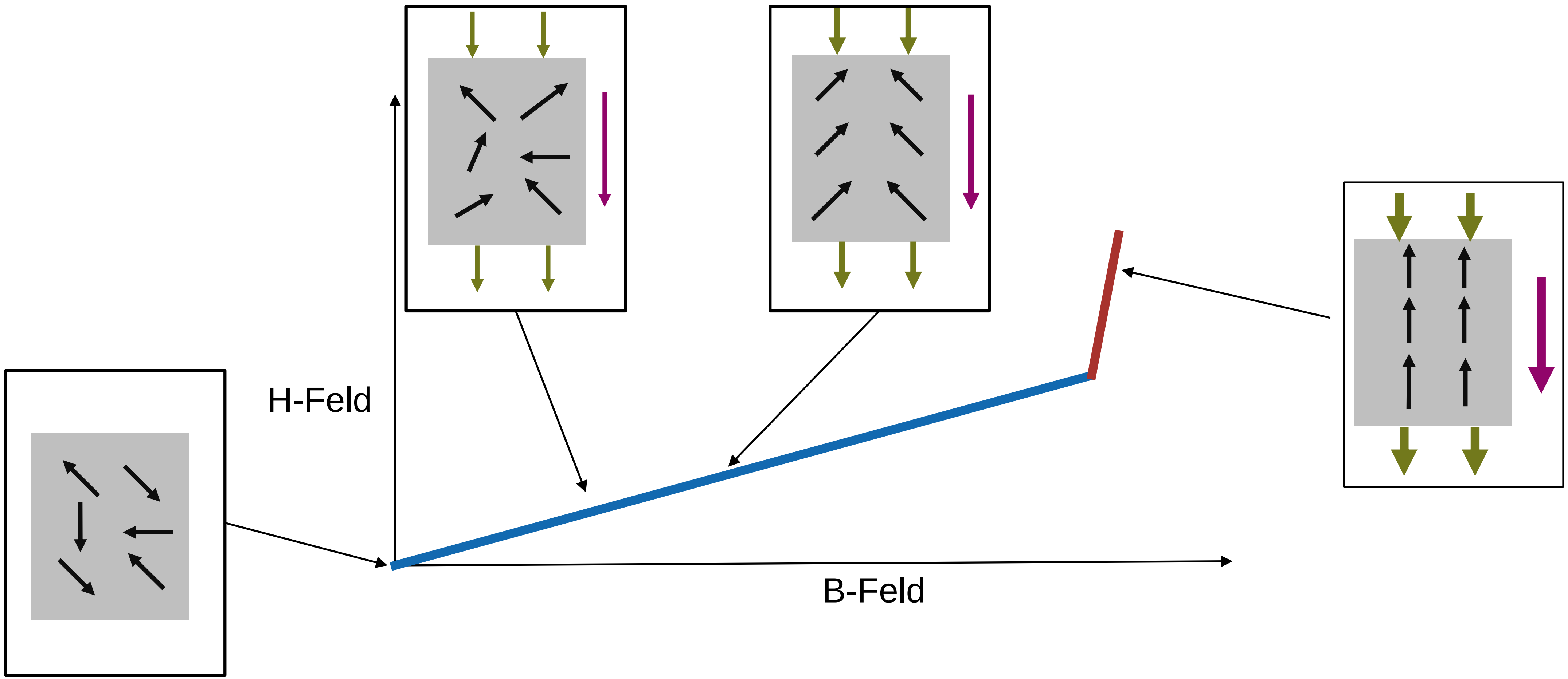
Hysterese

Wir betrachten den Zusammenhang von B- und H-Feld



1. Das Material ist nicht magnetisiert und es existiert kein B-Feld → Beide Felder sind 0
2. Ein B-Feld wird eingeführt, Dipole richten sich aus, ein H-Feld entsteht
3. Das B-Feld wird stärker, die Dipole richten sich stärker aus.
4. Es können sich **keine Dipole mehr ausrichten**. Das Material hat keinen Einfluss auf das H-Feld mehr

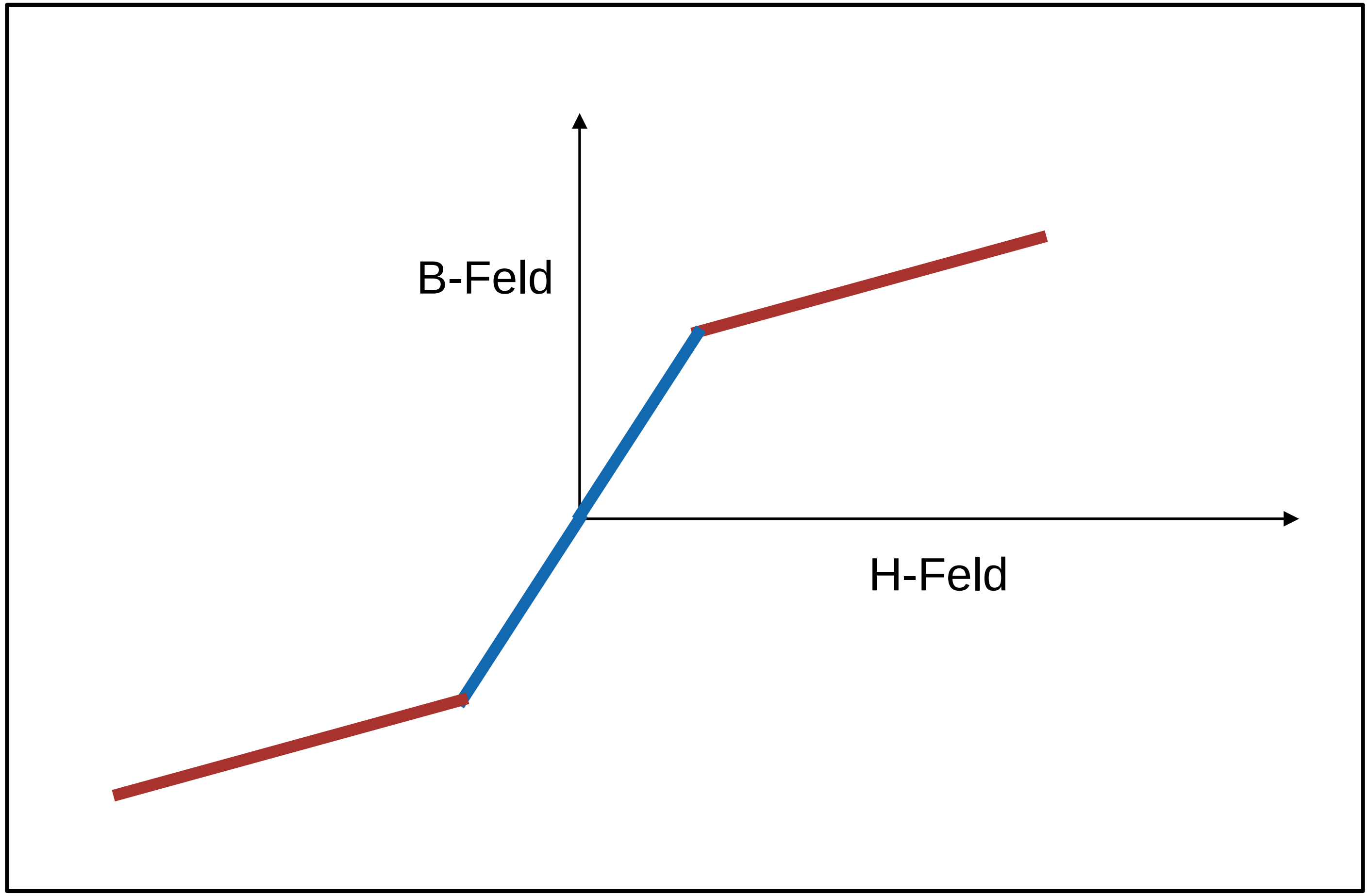
Hysterese



Im blauen Bereich: $H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r}$ Im roten Bereich: $H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r}$

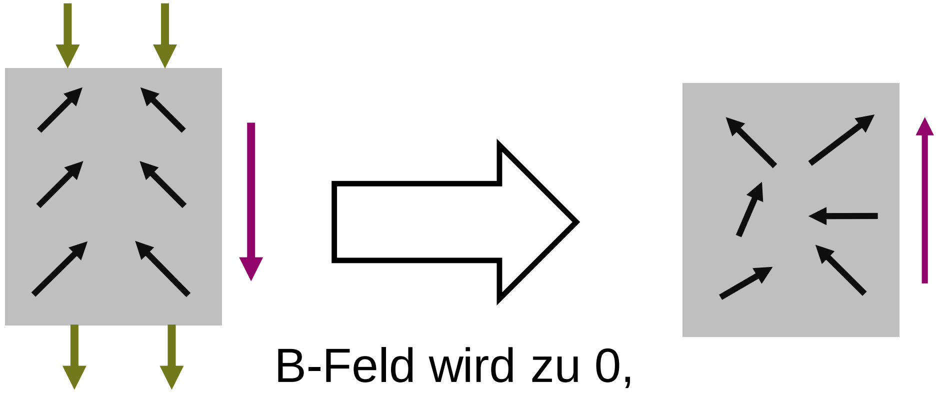
Wir kontrollieren das H-Feld, nicht das B-Feld

Graph gedreht

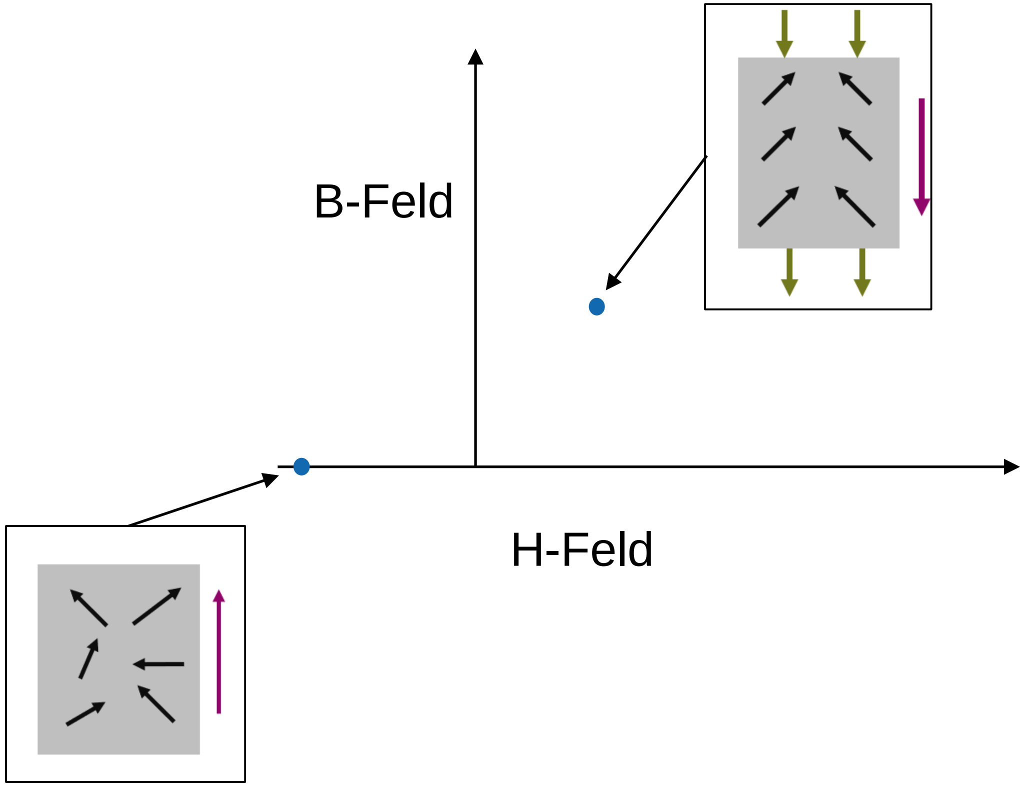


Magnetische Materialien haben ein Gedächnis

Wurde ein magnetisches Material zuvor von einem B-Feld durchflossen, so ist es auch später noch magnetisch

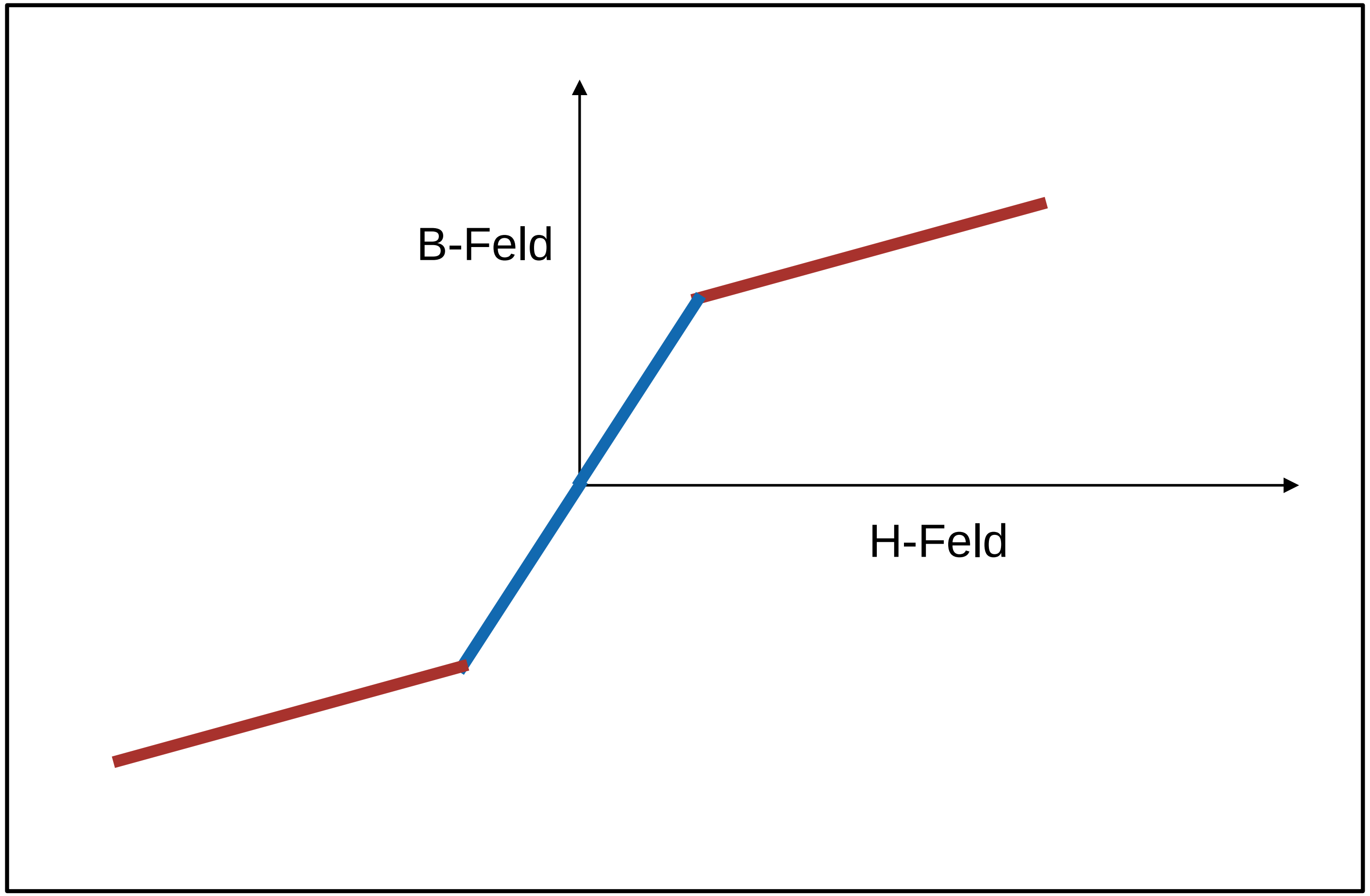


B-Feld wird zu 0,
Material bleibt
magnetisch



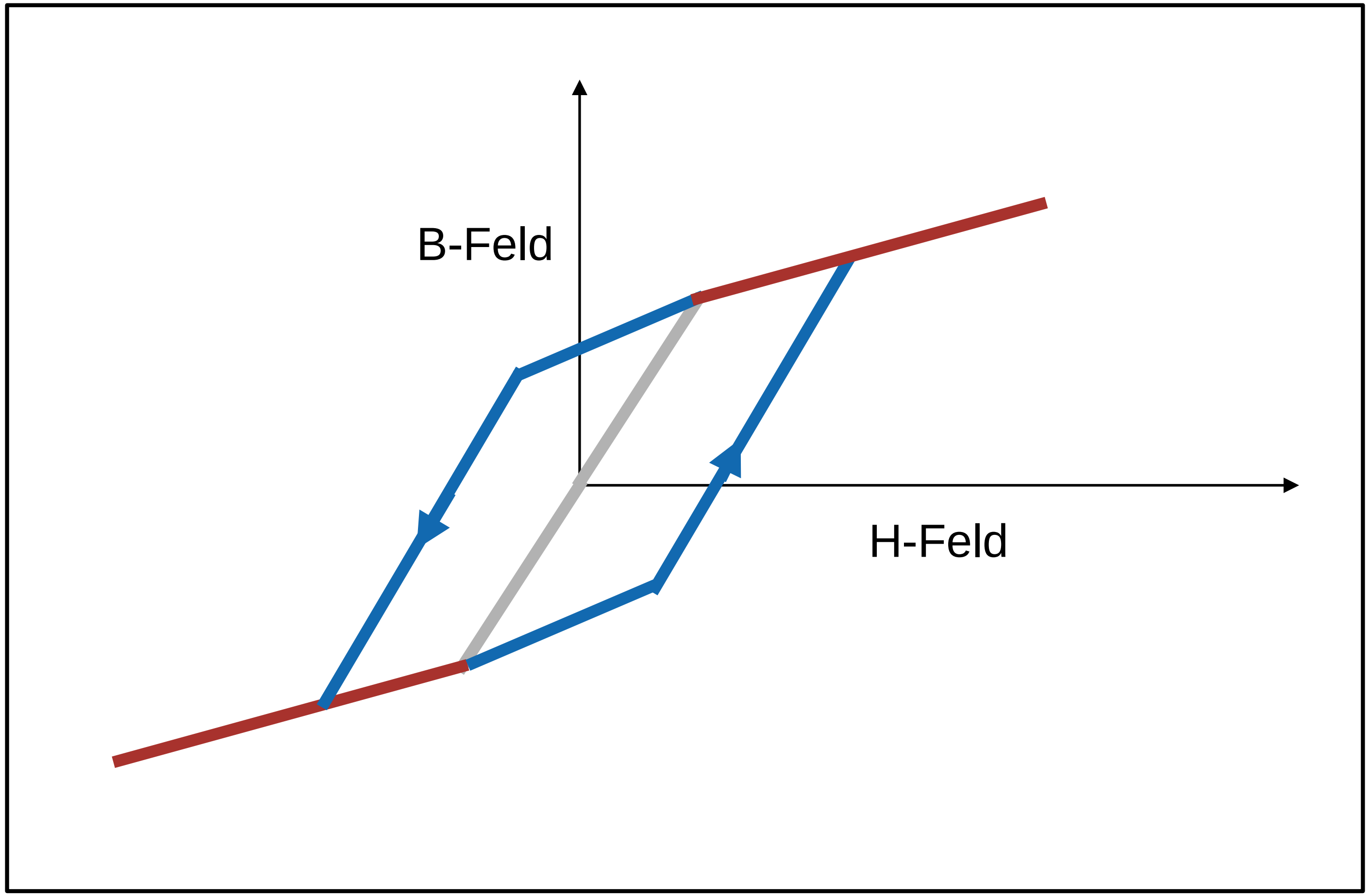
Hysteresekurve

Ideal, Material hat kein Gedächtnis



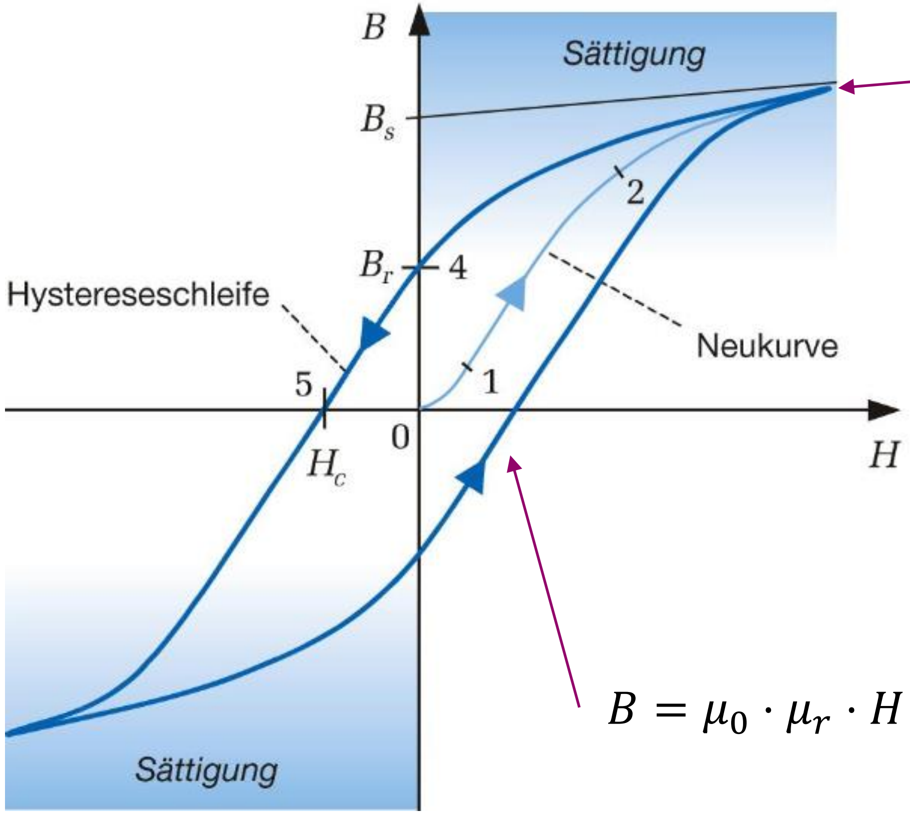
Hysteresekurve

(fast) Real. Material hat Gedächtnis



Hysteresekurve

Realität



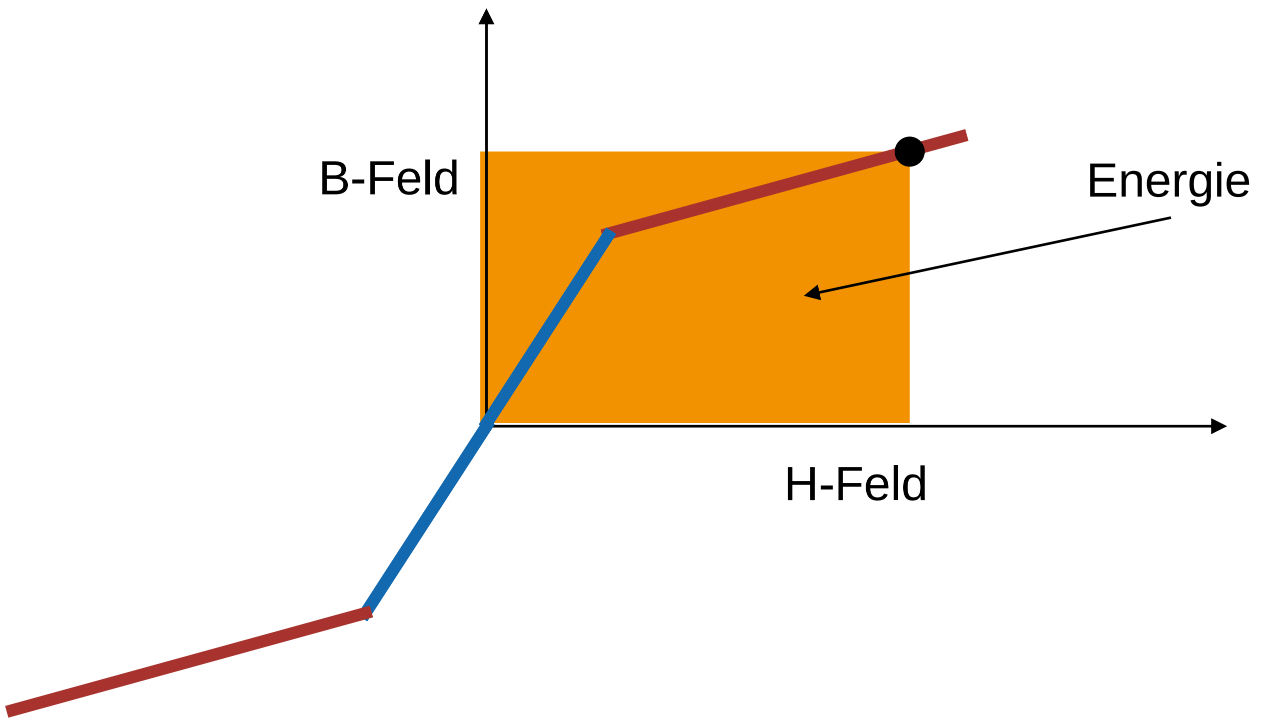
$B = \mu_0 \cdot H$

Material kann nicht mehr weiter Magnetisiert werden

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

Hystereseverluste

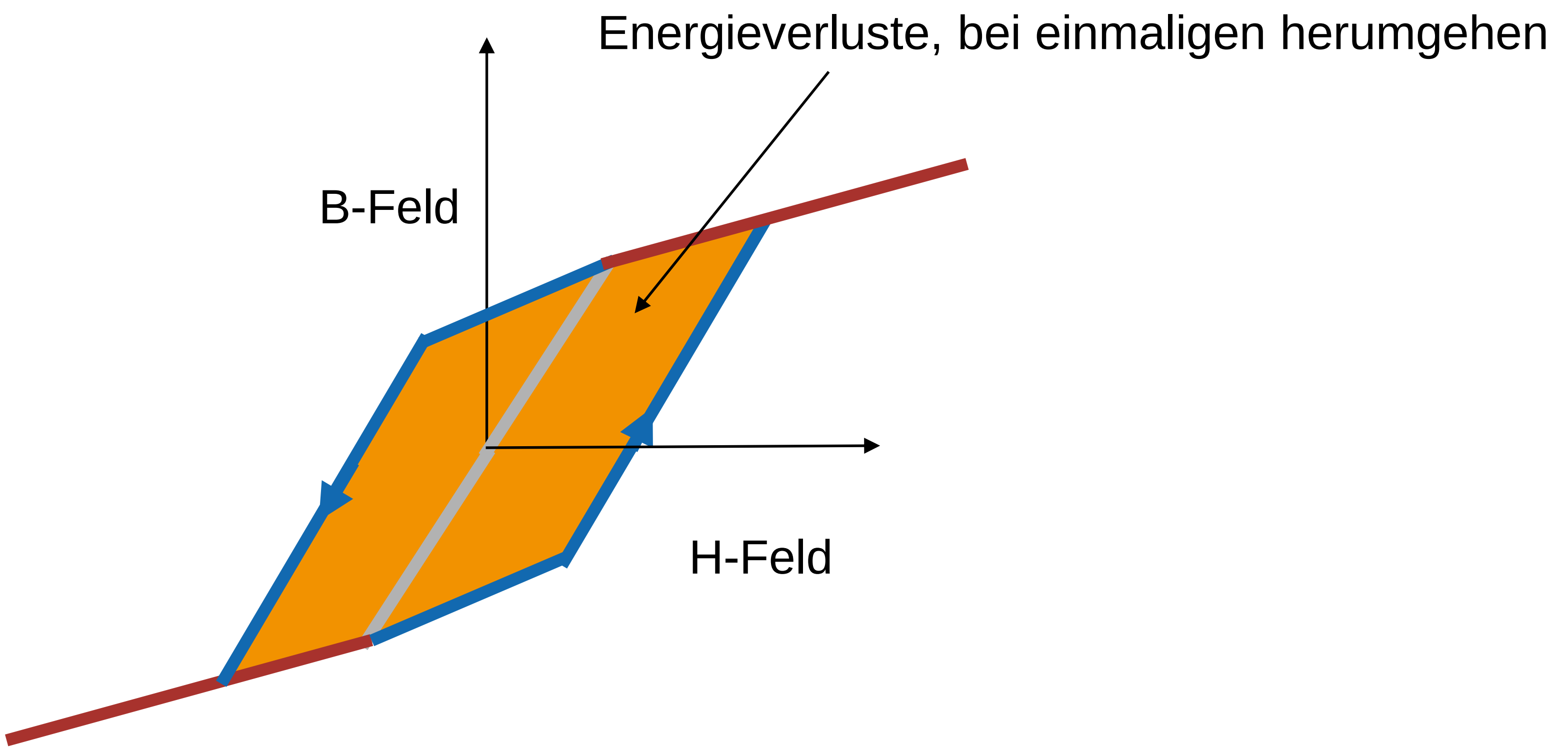
Es gilt: $W_M = \iiint_V \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV \simeq \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot V$, ist die im Magnetfeld gespeicherte Energie



In einem perfekten Magnetischen Material geht keine Energie verloren.
Sie wird lediglich zwischengespeichert.

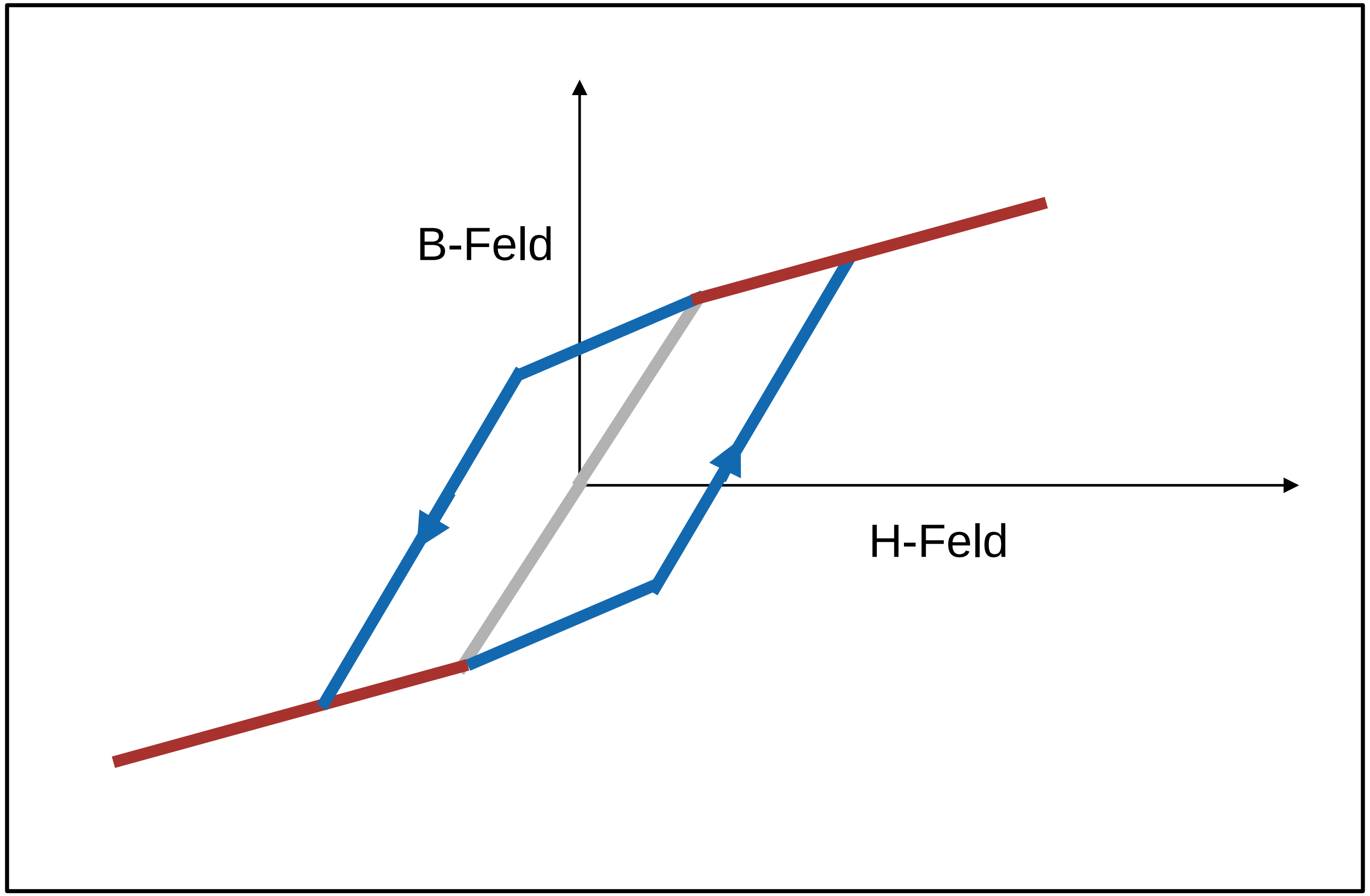
Hystereseverluste

Es gilt: $W_M = \iiint_V \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV \simeq \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot V$, ist die im Magnetfeld gespeicherte Energie



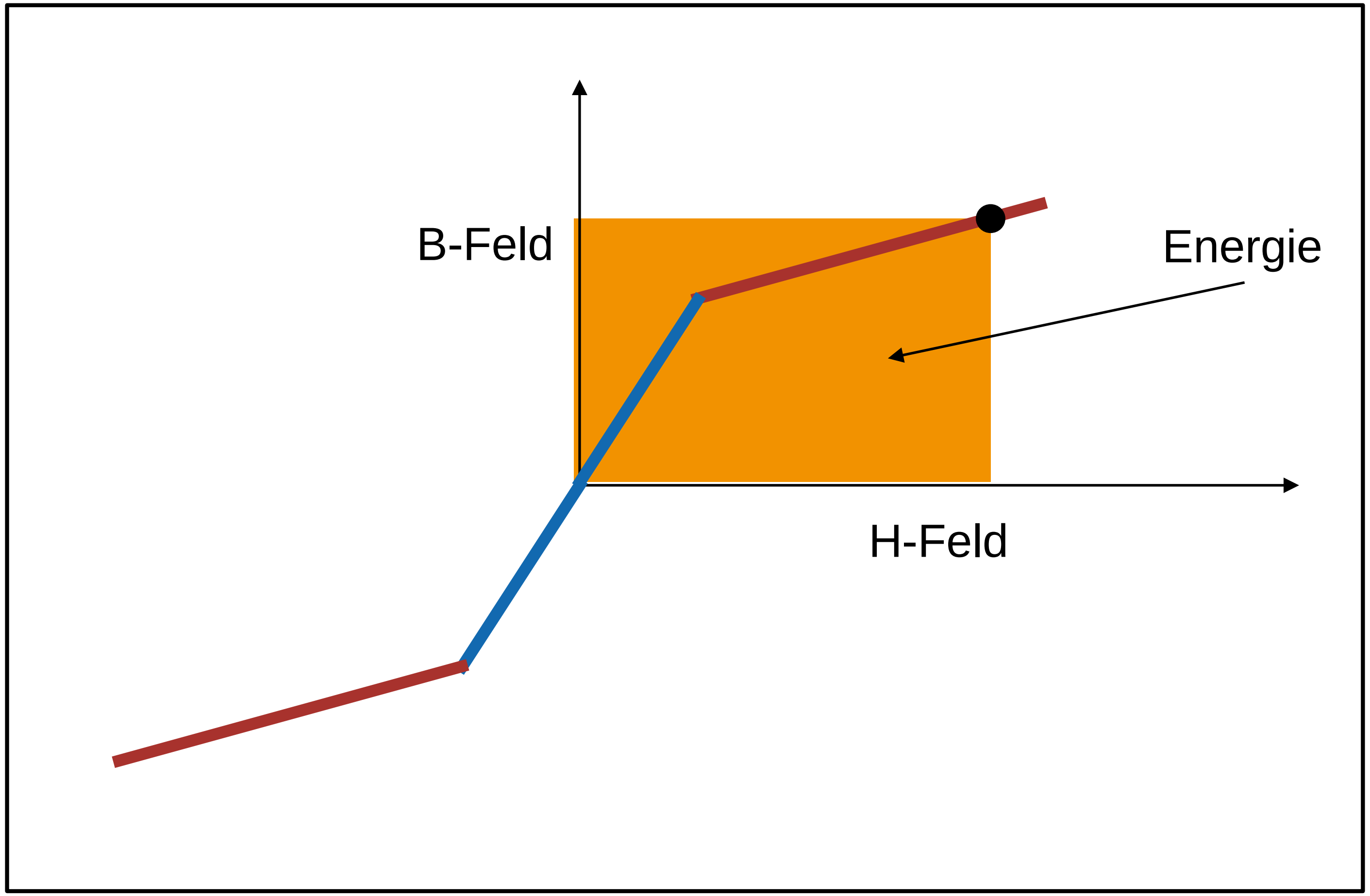
Hysteresekurve

(fast) Real. Material hat Gedächtnis



Hystereseverluste

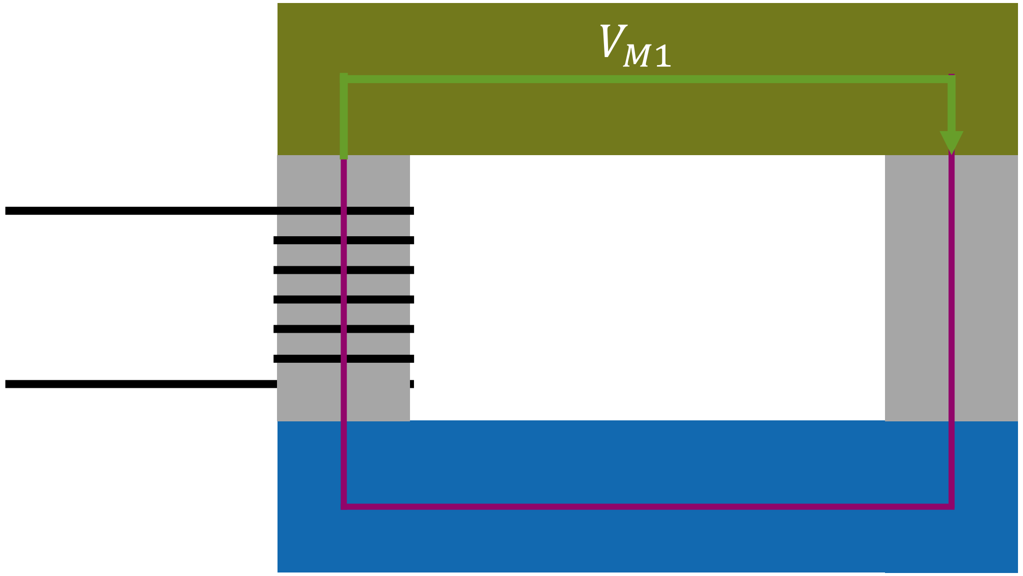
Es gilt: $W_M = \iiint_V \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV \simeq \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot V$, ist die im Magnetfeld gespeicherte Energie



Reluktanzmodel – Magnetische Spannung und Widerstand

Die **Magnetische Spannung** $\boldsymbol{V_M}$ beschreibt das Wegintegral über das H-Feld. Es ist eine Hilfsgrösse

Die Summe der Magnetischen Spannungen ist gleich der Durchflutung



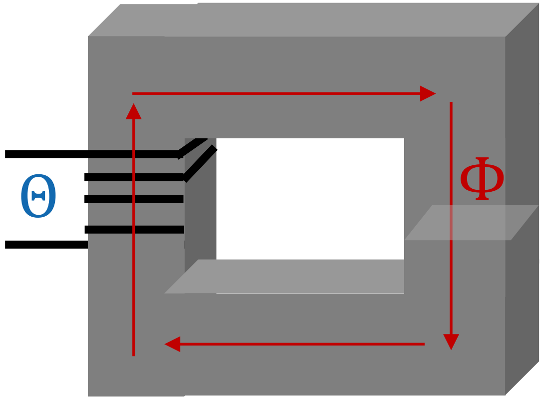
$$\Theta = \int_{s1} \vec{H}_1 \cdot d\vec{s} + \int_{s2} \vec{H}_2 \cdot d\vec{s} + \int_{s3} \vec{H}_3 \cdot d\vec{s} + \int_{s4} \vec{H}_4 \cdot d\vec{s} = V_{M1} + V_{M2} + V_{M3} + V_{M4}$$

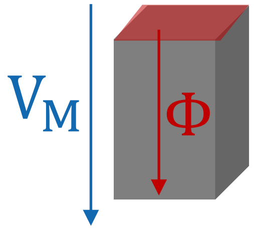
Reluktanzmodel - Magnetischer Widerstand

Frage: Wie viel Magnetischer Fluss ($\Phi \propto \boldsymbol{B}$) baut sich in einem Material auf, wenn eine gewisse Magnetische Spannung ($\mathrm{V_M} \propto \boldsymbol{H}$) angelegt wird?

$$R_M = \frac{V_M}{I_M} = \frac{\mathrm{V_M}}{\Phi} = \frac{\int_s \vec{H} \cdot d\vec{s}}{\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}}$$

$$\cong \frac{H \cdot l_s}{B \cdot A} = \frac{\frac{B}{\mu_s} \cdot l_s}{B \cdot A} = \frac{l_s}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A}$$

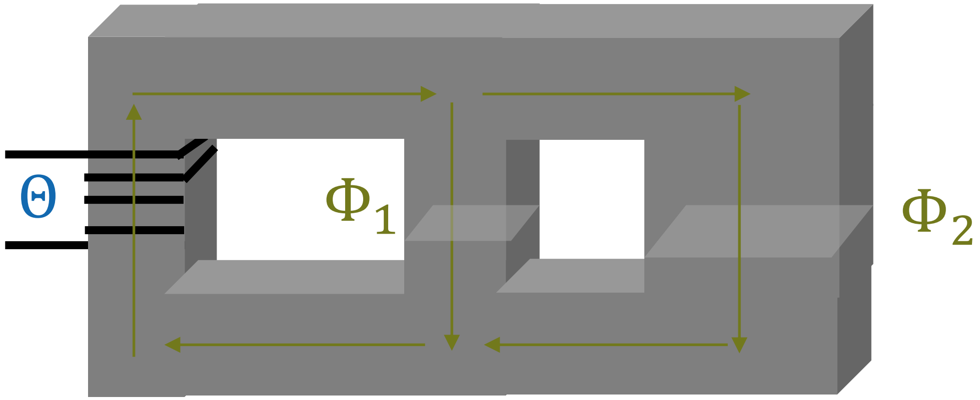


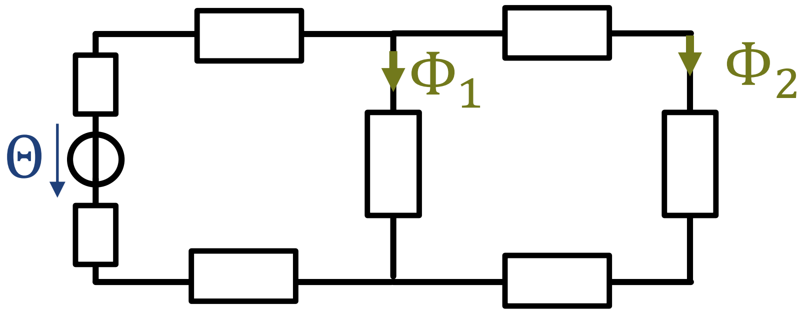


Das Reluktanzmodel

	Magnetische Grösse	Elektrische Grösse
Spannung	$V_M = \int_s \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{s}$	$U = \int_s \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s}$
Strom	$\Phi = \iint_A \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{A} = \iint_A \mu \cdot \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{A}$	$\mathrm{I} = \iint_A \kappa\boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{A}$
Widerstand	$R_m = \frac{\theta}{\Phi} = \frac{\mathrm{l}}{\mu \cdot A}$	$R = \frac{U}{\mathrm{I}} = \frac{l}{\kappa \cdot A}$

Das Reluktanzmodel





	Magnetische Grösse	Elektrische Grösse
U=RI	$V_M = \Phi \cdot R_M$	$U = R \cdot I$
Knotengleichung	$0 = \sum_{Knoten} \Phi_i$	$0 = \sum_{Knoten} \mathrm{I}_i$
Maschengleichung	$0 = \sum_{Masche} V_M$	$0 = \sum_{Masche} U$

Nur, falls als Quelle Θ eingezeichnet.
Sonst $\Theta = \sum_{Masche} V_M$

Induktivität

Wieviel **magnetischer Fluss** baut sich im Material auf, wenn ein gewisser **Strom** fliesst?

$$\Phi_{\text{ges}} = I \cdot L$$

$$\boxed{L \ := \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{\mathrm{N}^2}{R_m}, \qquad [L] = H}$$

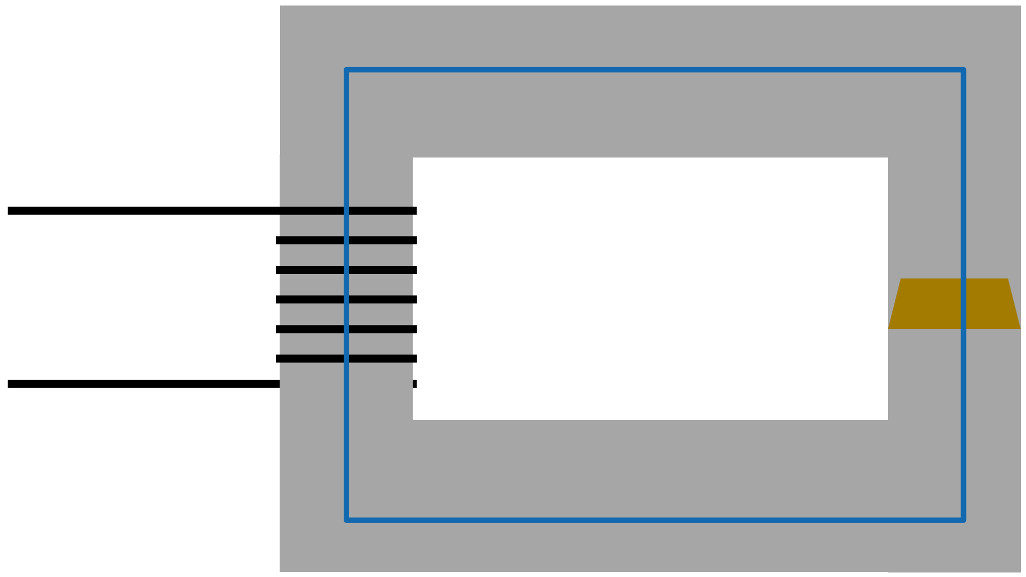
Fliesst der Fluss durch N Windungen, wird er N mal gezählt

$\Phi_{ges} = N \cdot \Phi$, bezeichnet den Fluss bezüglich der von der Schleife **aufgespannter Fläche** (N mal Fläche einer Schleife)

Beispiel Induktivität

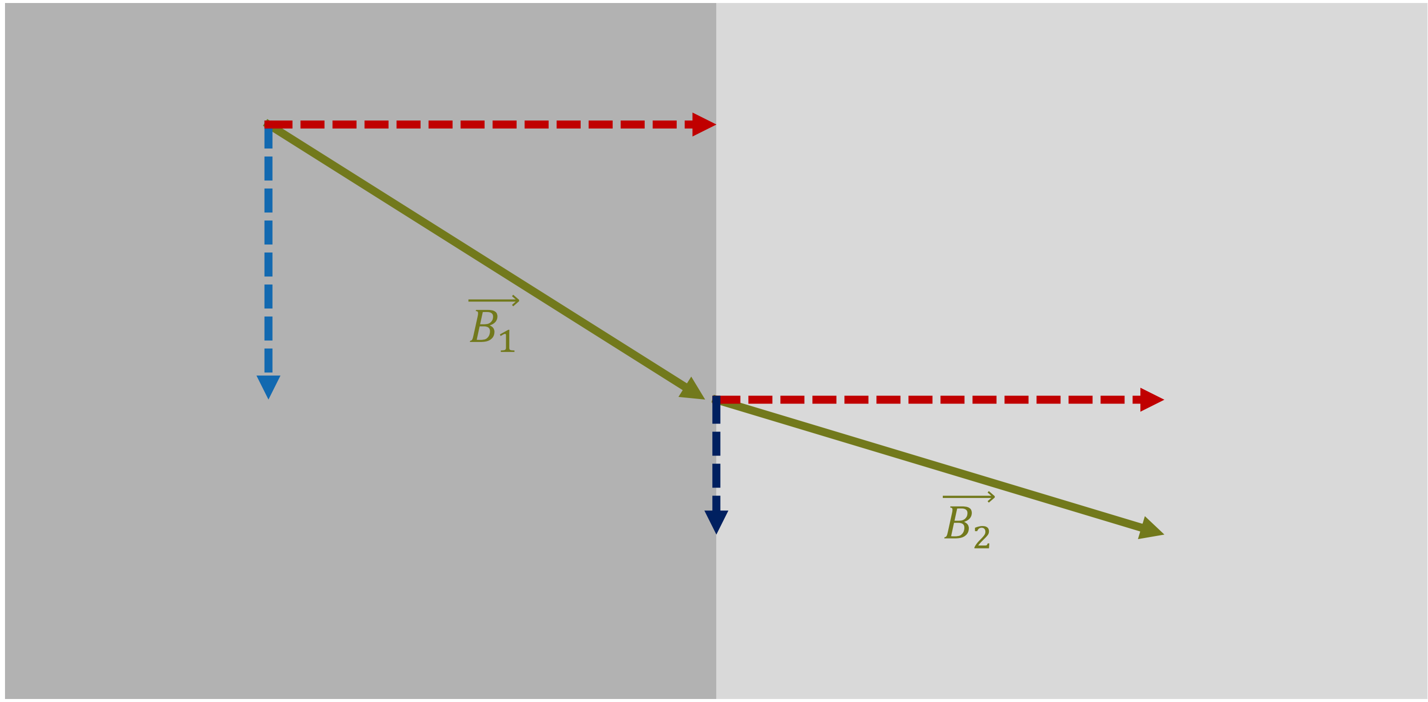
Berechnen sie die Induktivität folgender Anordnung

Anzahl Wicklungen: **N**
Effektive Weglänge im Kern: $\boldsymbol{l}$
Querschnittsfläche: $\boldsymbol{A}$
Permitivität: $\boldsymbol{\mu_r}$



Verhalten an Randflächen: B-Feld

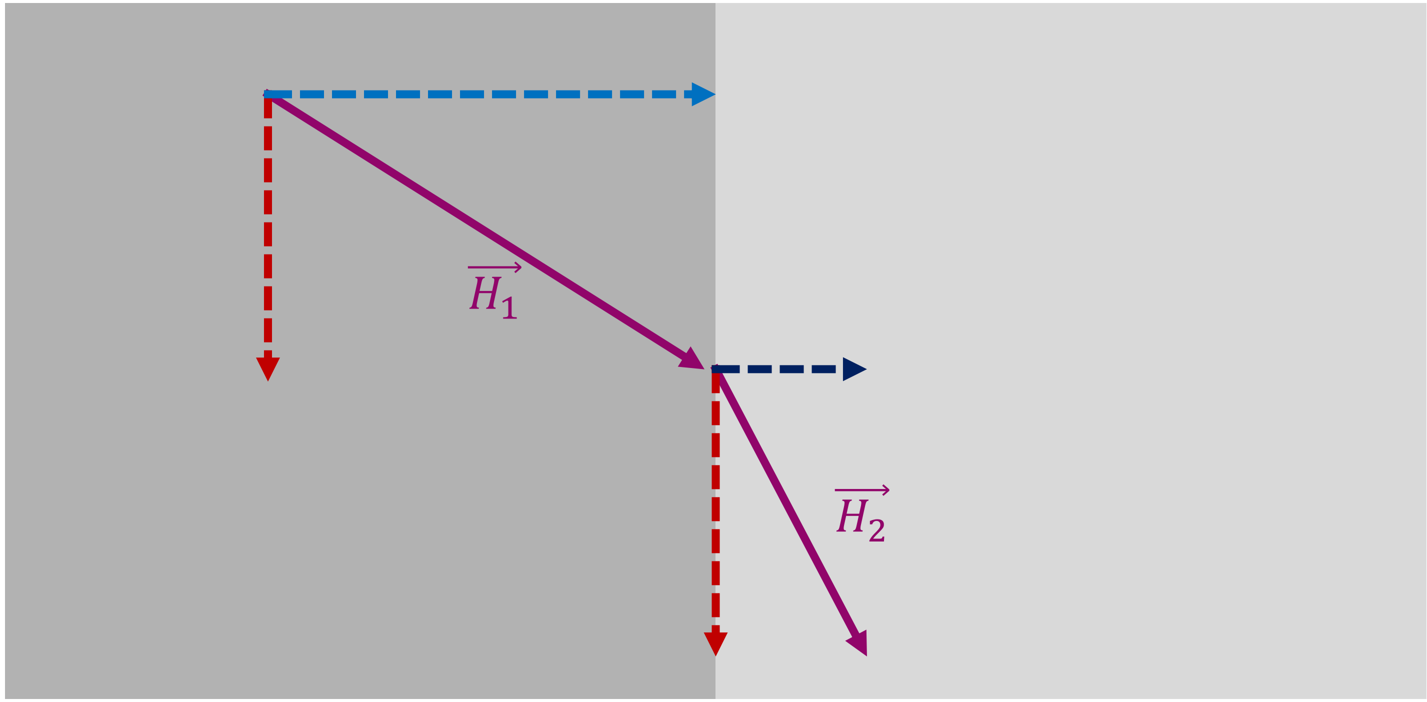
Tritt ein B-Feld auf ein Materialübergang, so bleibt die **Normalkomponente** gleich Gross



Es gilt: $B_{t2} = B_{t1} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1}$

Verhalten an Randflächen: H-Feld

Trift ein H-Feld auf ein Materialübergang, so bleibt die **Tangentialkomponente** gleich Gross



Es gilt: $H_{n1} = H_{n2} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1}$

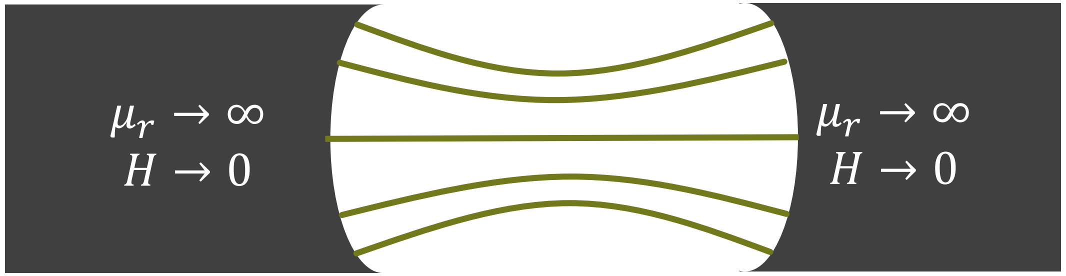
Konsequenz

1) «Feldlinien treten senkrecht aus idealen magnetischen Leiter aus»

$$B_{t2} = \lim_{\mu_1 \to \infty} B_{t1} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1} = 0$$

2) «Das H-Feld in einem idealen Leiter verschwindet»

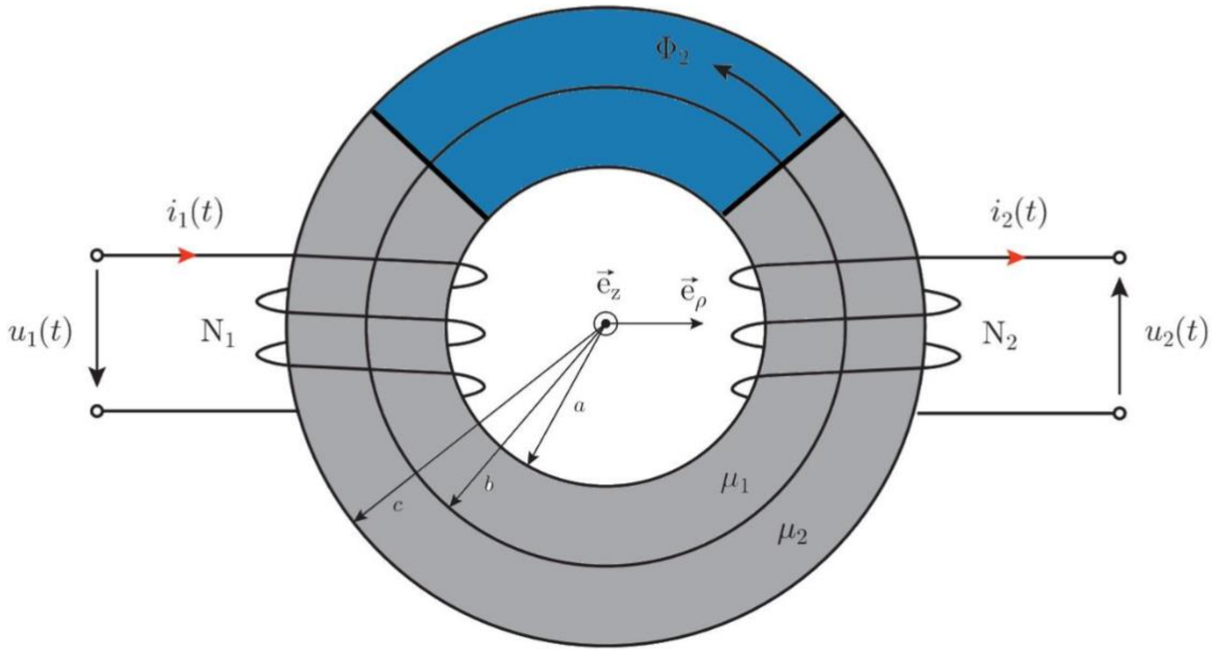
$$H = \lim_{\mu \to \infty} \frac{B}{\mu} = 0$$



Konsequenz

Fliesst ein Magnetfeld senkrecht durch eine Materialänderung, so bleibt das B-Feld konstant im gesamten Kern

$$B_1 = B_2 \qquad H_1 = \frac{B_1}{\mu_1}, \qquad H_2 = \frac{B_2}{\mu_2}$$



Um B-Feld zu berechnen nutze:

$$N_{eff} \cdot I_{eff} = \oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = B_1 \cdot \left(\frac{l_G}{\mu_1} + \frac{l_B}{\mu_2} \right)$$

$$H = \begin{cases} B \cdot \dfrac{1}{\mu_1}, im\ grauen\ Bereich \\ B \cdot \dfrac{1}{\mu_2}, im\ blauen\ Bereich \end{cases}$$

Konsequenz

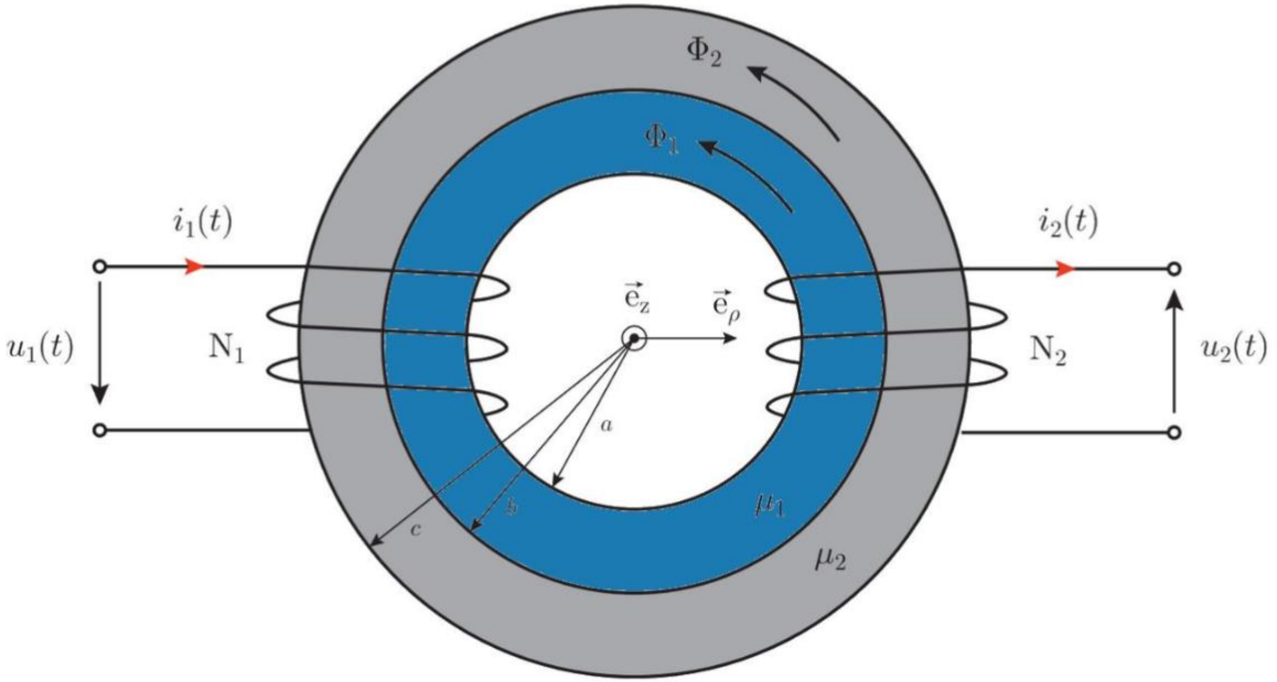
Fliesst ein Magnetfeld parallel zu einer Materialänderung, so bleibt das **H-Feld** konstant im gesamten Kern

$$H_1 = H_2 \qquad B_1 = \mu_1 \cdot H_1, \qquad B_2 = \mu_2 \cdot H_2$$

Um B-Feld zu berechnen nutze:

$$N_{eff} \cdot I_{eff} = \oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot l_s$$

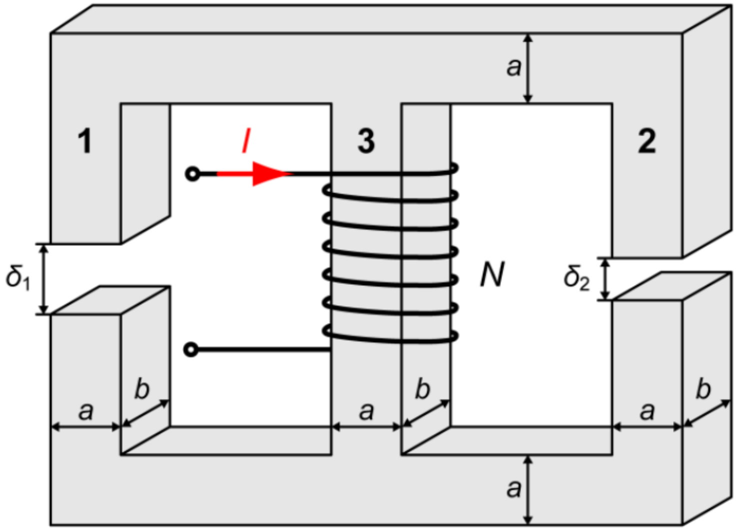
$$B(r) = \begin{cases} H \cdot \mu_1, & grauen\ Bereich \\ H \cdot \mu_2, & blauen\ Bereich \end{cases}$$



Aufgabe

Aufgabe NuS I-4: Magnetischer Kreis und Induktivität

Gegeben sei die Anordnung einer Induktivität, welche gemäss **Fig. 4.1** aus einer Wicklung mit Windungszahl N auf einem dreischenkligen Kern besteht. Die Schenkel **1** und **2** des Kerns weisen je einen Luftspalt mit den Spaltbreiten δ_1 bzw. δ_2 auf. Alle Querschnittsflächen des Kerns sind gleich gross und besitzen die Abmessungen a = 5 mm und b = 12 mm. Sie dürfen von einer relativen Permeabilität $\mu_r \to \infty$ des Kernmaterials ausgehen.



a = 5 mm

b = 12 mm

δ_1 = 5 mm

δ_2 = 3 mm

B_{sat} = 0.75 T

I = 100 A

$\mu_r \to \infty$

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

Fig. 4.1: Wicklung auf dreischenkligem Kern.

Zusatzaufgabe

Aufgabe 5.9 | Induktivitätsberechnung

Die beiden Außenschenkel des aus Ferritmaterial (Permeabilitätszahl μ_r) bestehenden Kerns besitzen die Querschnittsfläche A und die effektive Weglänge l_A. Der Mittelschenkel besitzt die Querschnittsfläche $2A$ und die effektive Weglänge l_M. Aus dem Mittelschenkel wird ein Teil des Ferritmaterials entfernt, sodass ein Luftspalt der Länge l_g entsteht.

Auf dem Kern befinden sich drei in Reihe geschaltete Wicklungen mit den Windungszahlen N_1, N_2 und N_3. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die magnetische Flussdichte $\vec{\mathbf{B}}$ homogen über den Kernquerschnitt verteilt ist. Der Streufluss beim Luftspalt wird vernachlässigt, sodass für den Luftspalt der gleiche Querschnitt wie für den Mittelschenkel angenommen werden kann.

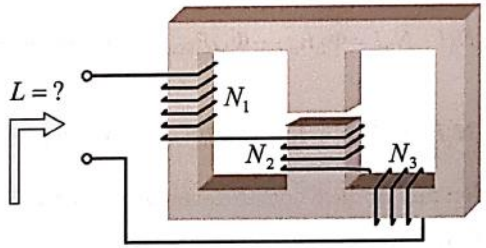


Abbildung 1: Permeabler Kern mit Luftspalt

1. Erstellen Sie ein vollständiges magnetisches Ersatzschaltbild.
2. Berechnen Sie die Flüsse Φ_L und Φ_R durch den linken und den rechten Schenkel sowie Φ_M durch den Mittelschenkel.
3. Berechnen Sie die Induktivität der Anordnung in Abhängigkeit von den gegebenen Parametern.

Zeitlich veränderliches Magnetfeld

Induktionsgesetz

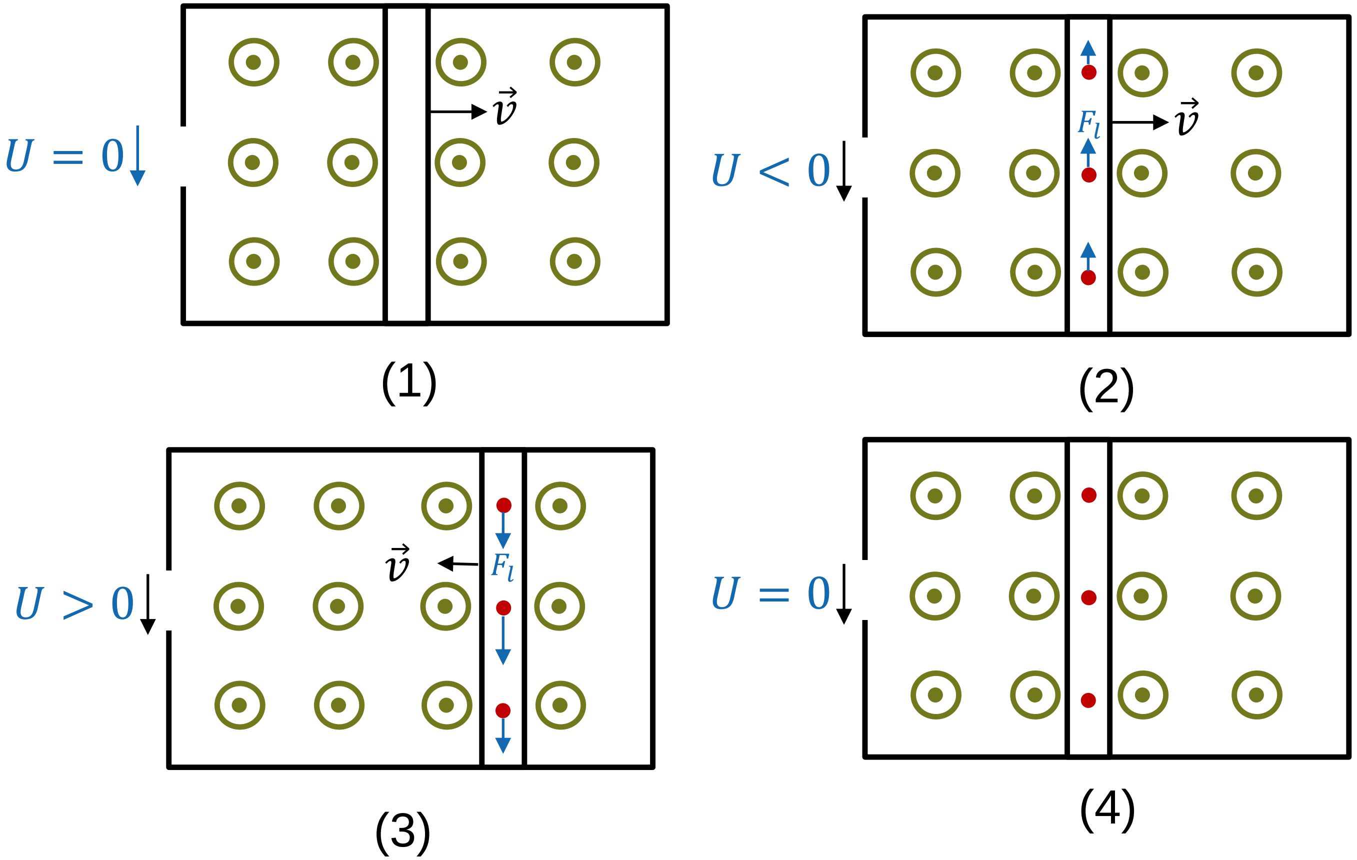
Bewegungsinduktion

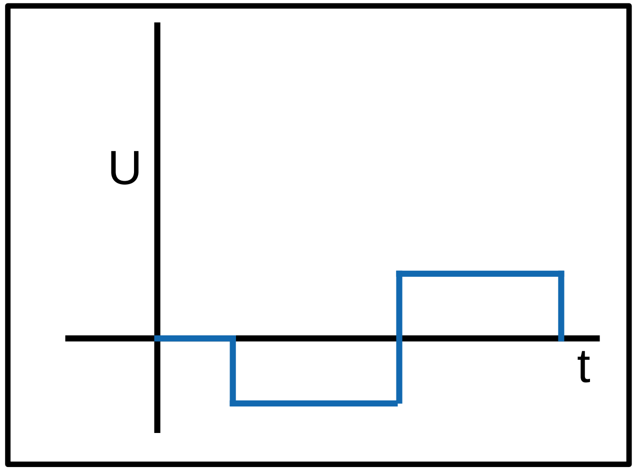
Gegeninduktion

Drehstrom

Übertrager

Induktionsgesetz





Feststellung: Ändern wir den von einer Leiterschleife **eingeschlossenen magnetischen Fluss**, so entsteht eine Spannung

Induktionsgesetz

Bis jetzt:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

Mit:

$$U_{AB} = \varphi(A) - \varphi(B) = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Neu:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt}\left(\iint_{A_s} \vec{B} \cdot d\vec{A}\right) = -\frac{d}{dt}(\mathbf{\Phi})$$

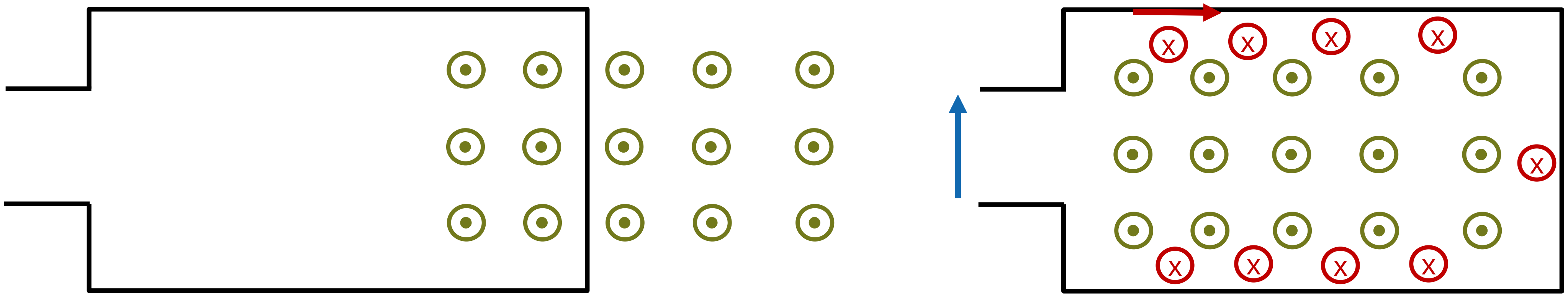
Mit:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s},$$

$$u_{ind} = -\frac{d}{dt}(\mathbf{\Phi})$$

Ändern wir einen **magnetischen Fluss**, so können wir eine **Spannung** generieren

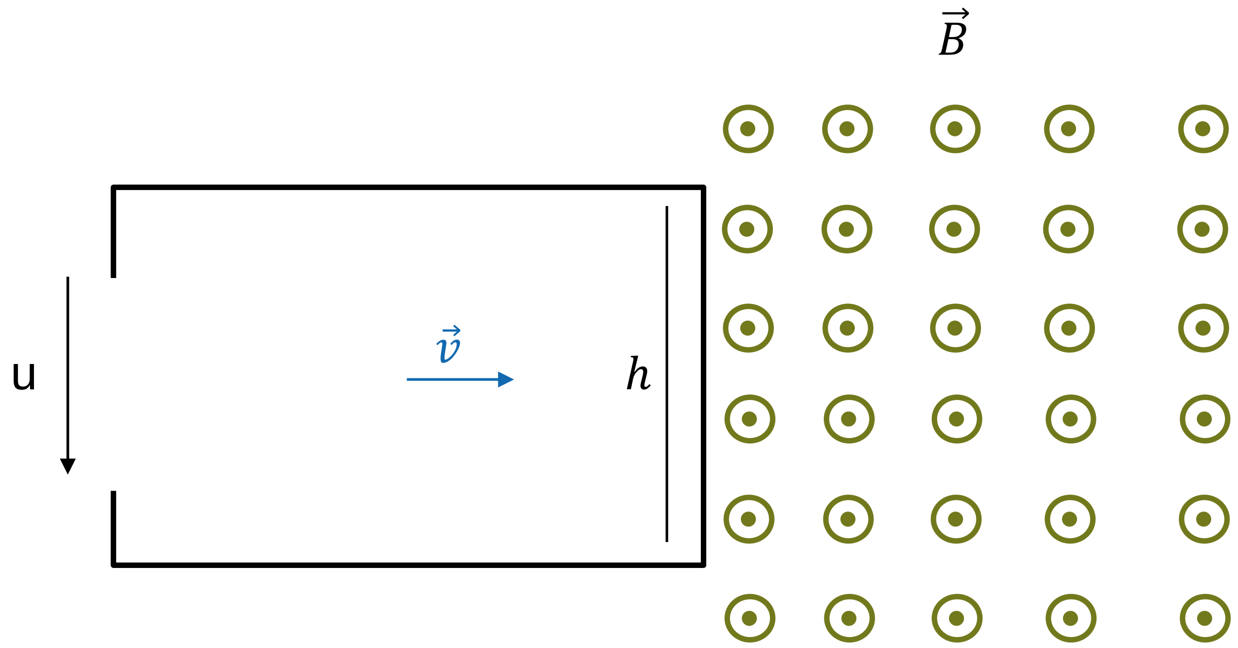
Lenzsche Regel



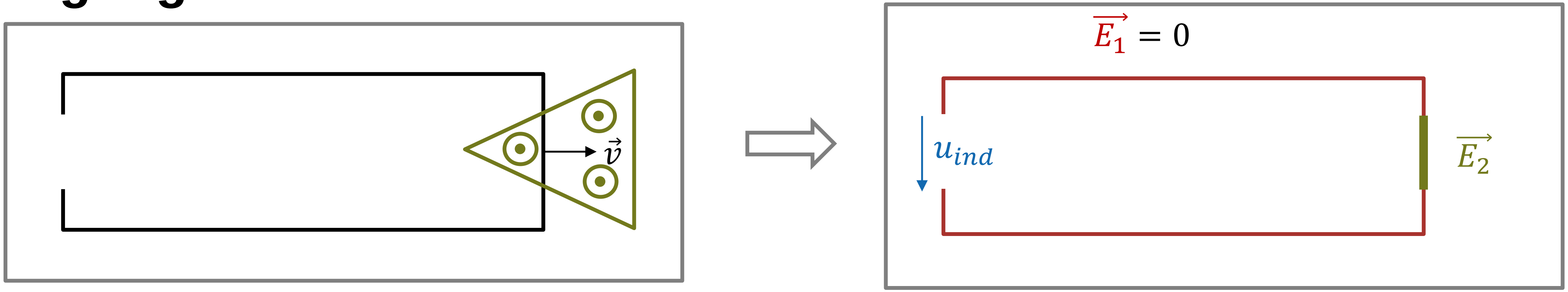
«Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.»

Beispiel

Wie gross ist die gemessene Spannung u? (In Abhängigkeit von v, h, B)



Bewegungsinduktion



Möchten wir nun die Spannung u_{ind} berechnen, so müssen wir das Wegintegral über den Leiter berechnen:

$$\boxed{u_{ind} = \int_{s1} \overrightarrow{E_1} \cdot d\vec{s} + \int_{s2} \overrightarrow{E_2} \cdot d\vec{s} = \int_{s2} \overrightarrow{E_2} \cdot d\vec{s}}$$

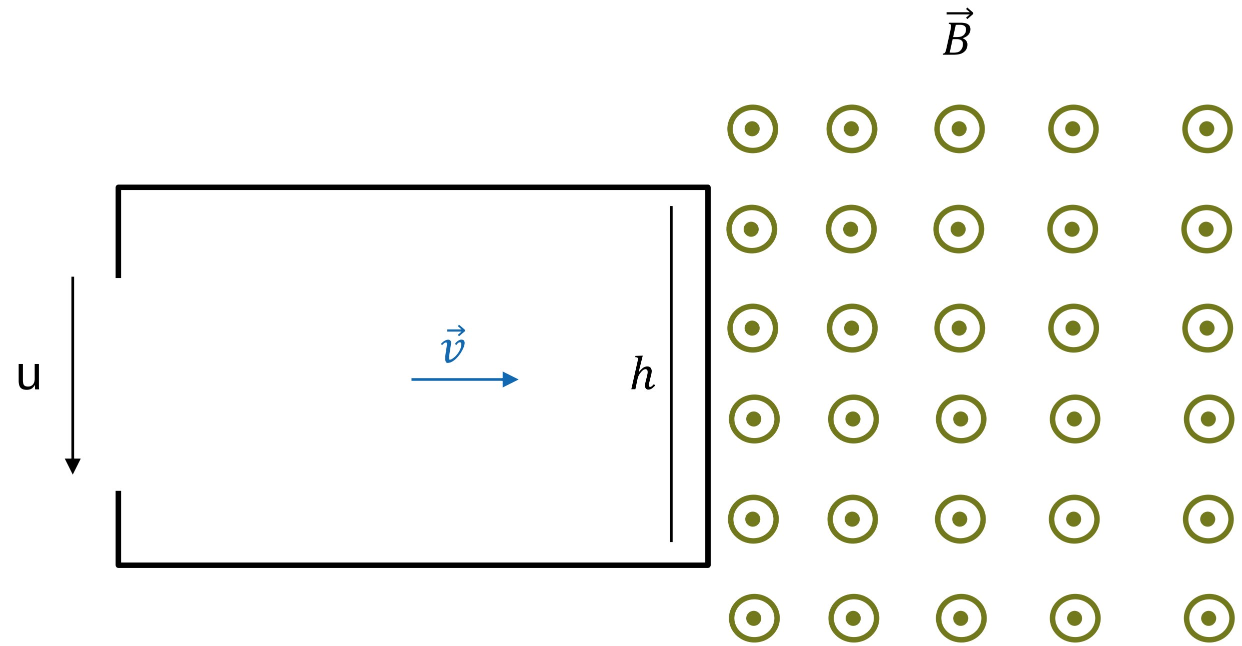
Falls E-Feld und Weg parallel sind:

Effektive Leiterlänge im Magnetfeld.
(Kann abhängig der Zeit sein)

$$\boxed{u_{ind} = E_2 \cdot l_{eff}(t)}$$

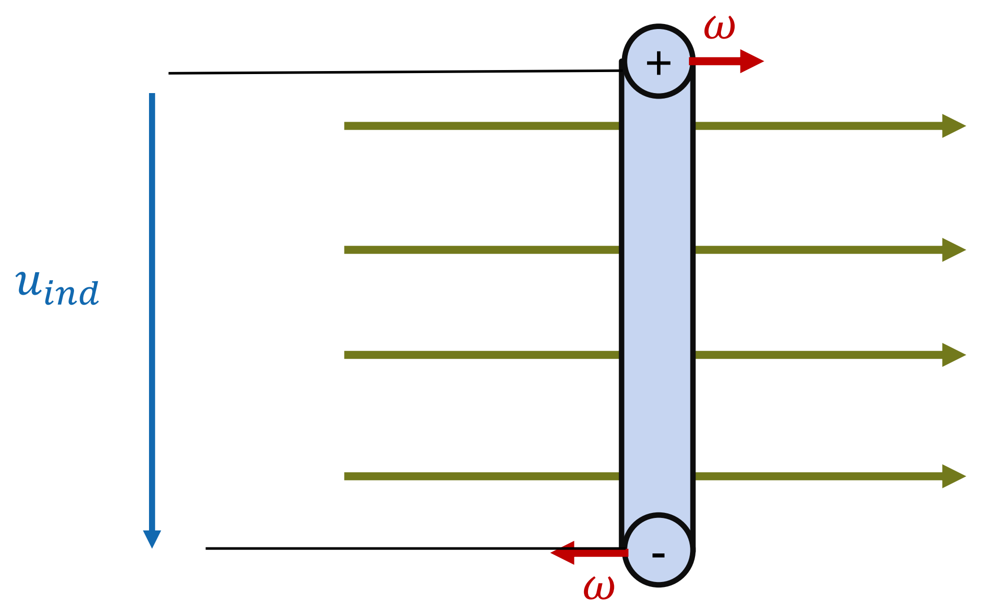
Beispiel

Wie gross ist die gemessene Spannung u? (In Abhängigkeit von v, h, B)

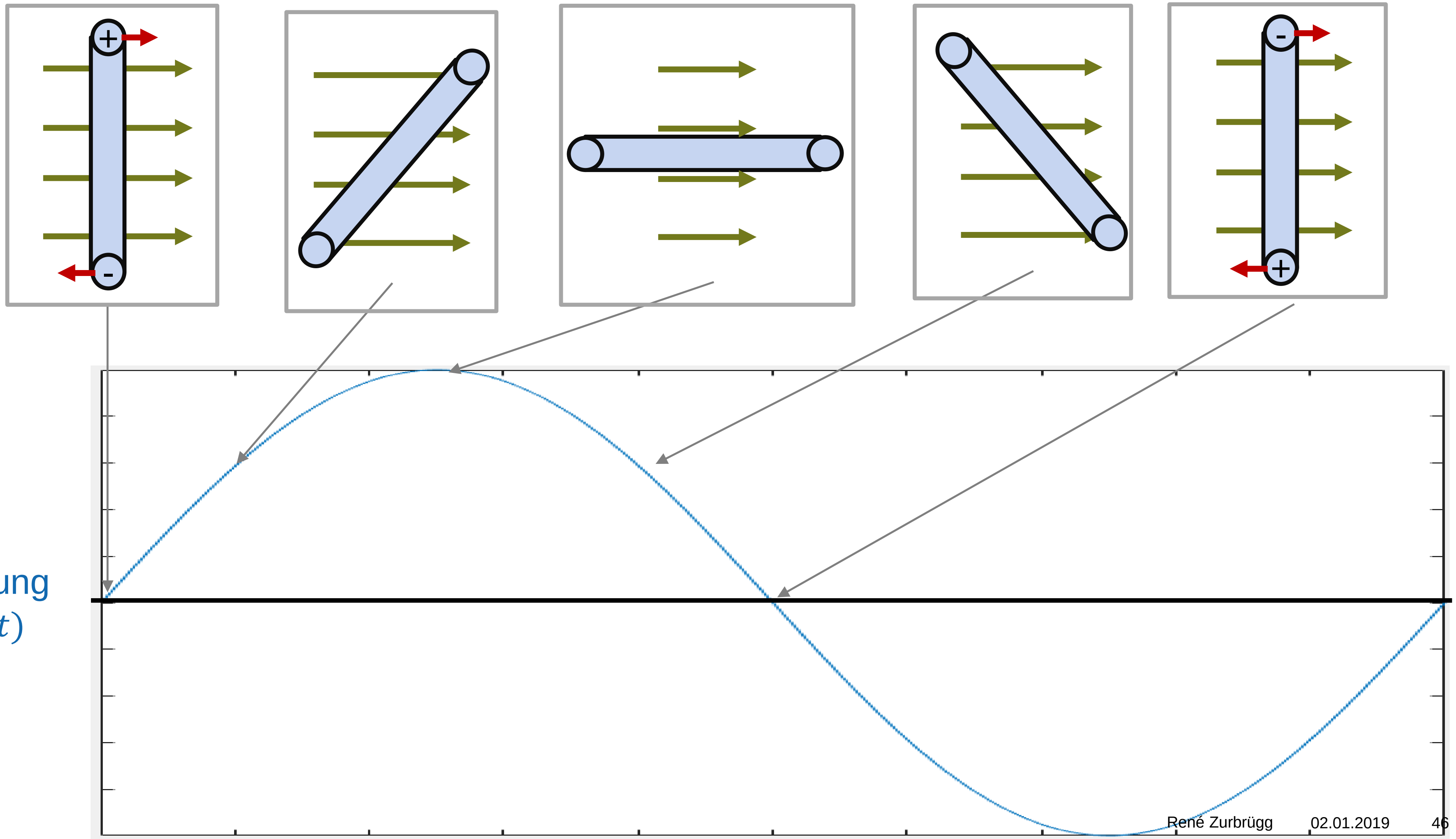


Drehstrom

Eine Leiterschleife dreht sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω in einem konstantem Magnetfeld

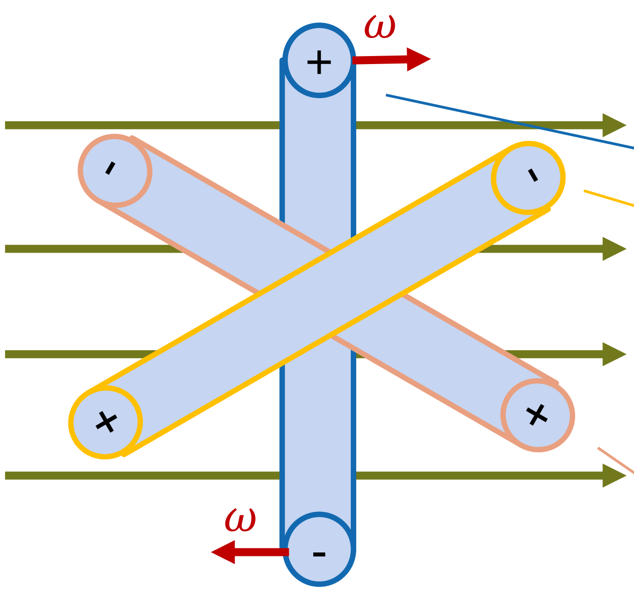


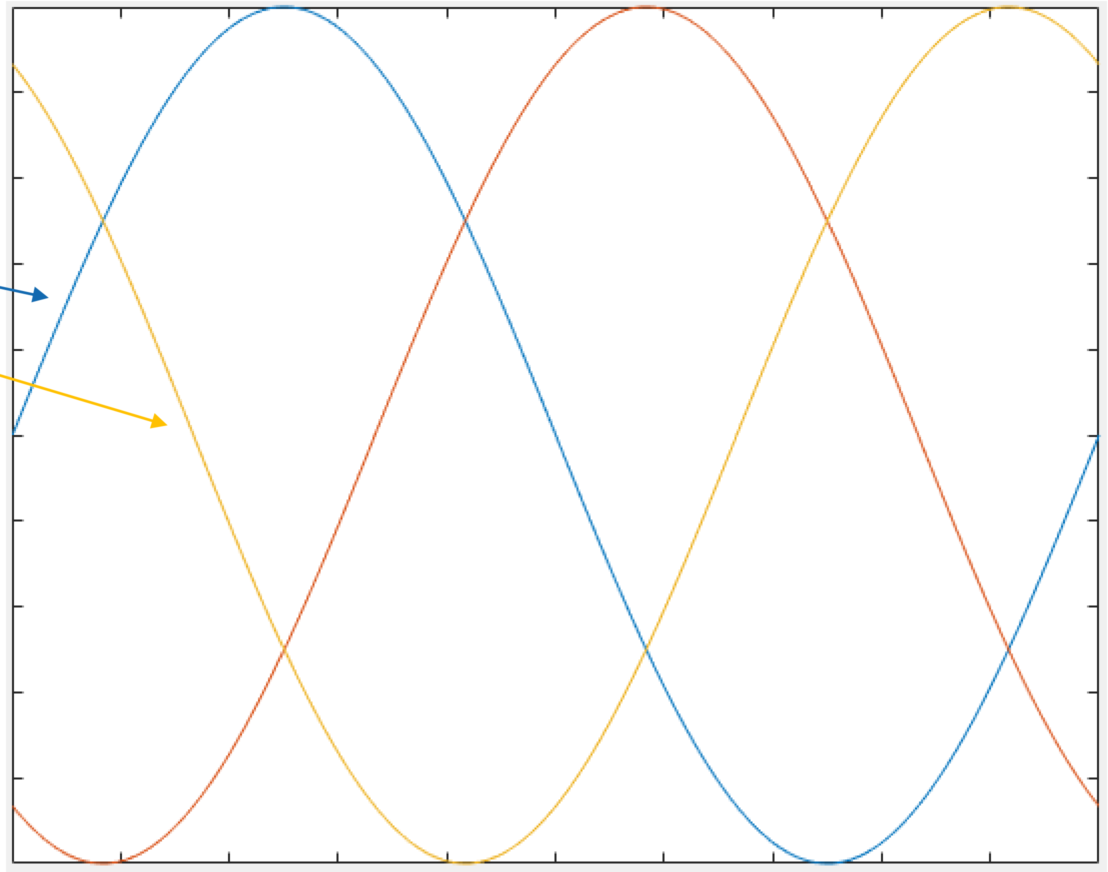
Drehstrom



Induzierte Spannung
$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$

3 – Phasen Wechselstrom



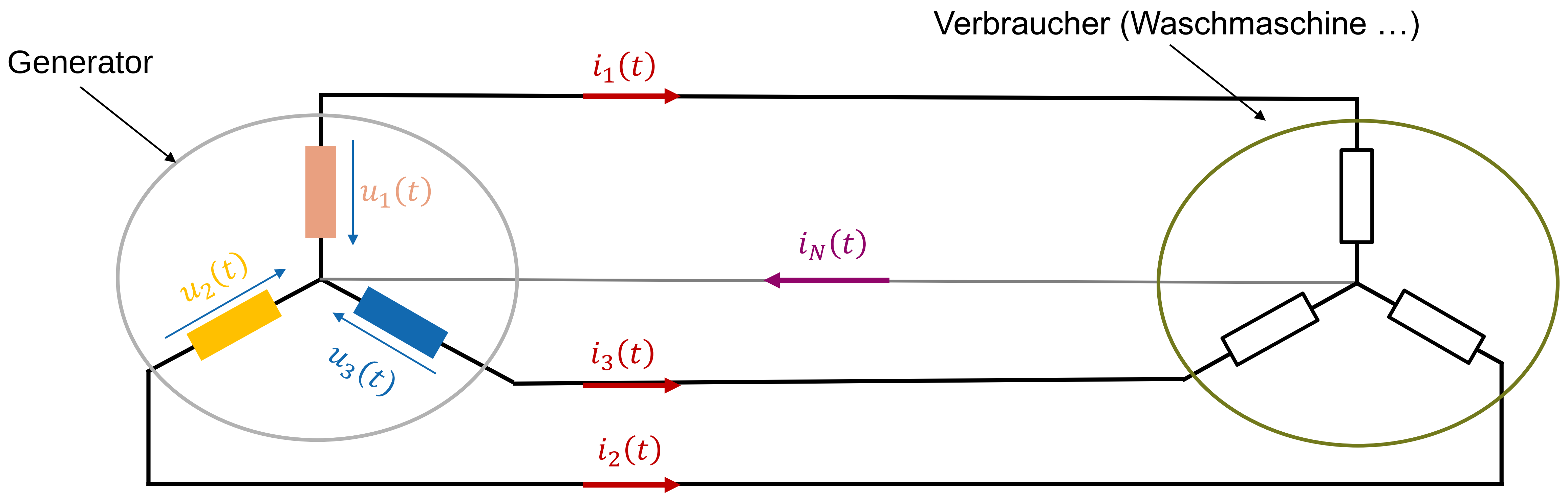


$\hat{u} \cdot \sin(\omega\, t)$

$\hat{u} \cdot \sin(\omega\, t + 120°)$

$\hat{u} \cdot \sin(\omega\, t + 240°)$

3 – Phasen Wechselstrom



$u_1(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$

$u_2(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + 120°)$

$u_3(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + 240°)$

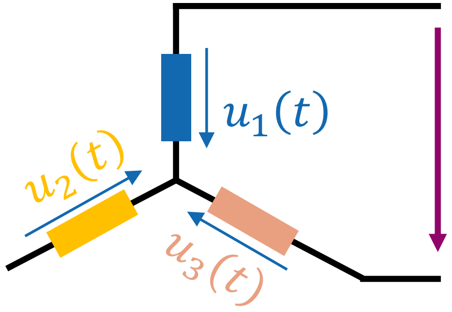
$i_1(t) = \hat{\imath} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

$i_2(t) = \hat{\imath} \cdot \sin(\omega t + 120° + \varphi)$

$i_3(t) = \hat{\imath} \cdot \sin(\omega t + 240° + \varphi)$

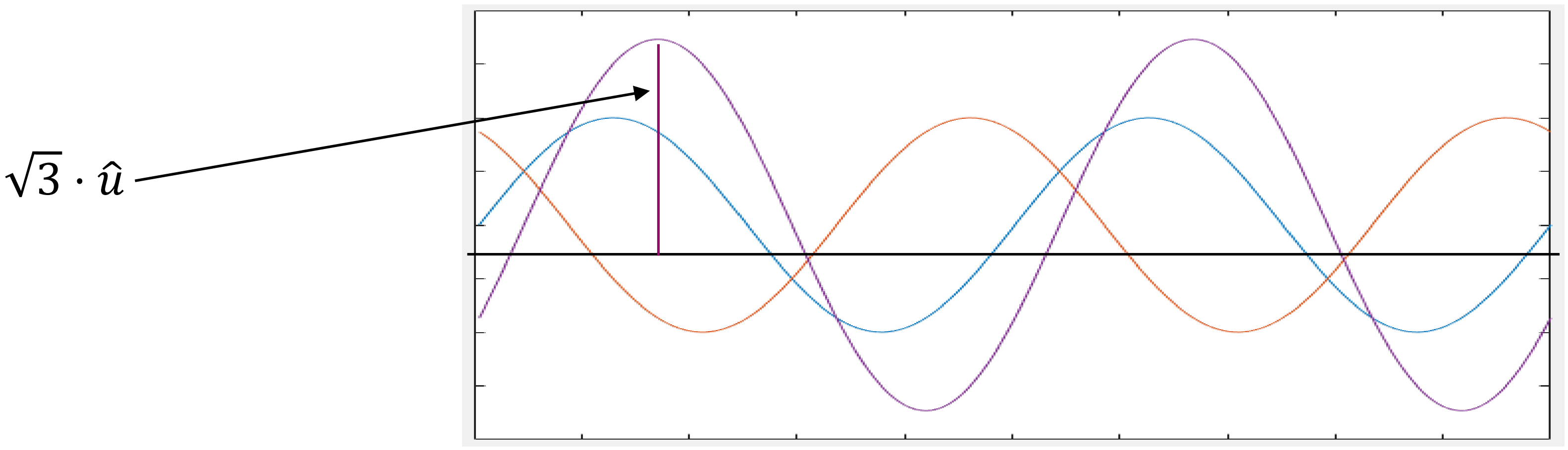
3 – Phasen Wechselstrom

- Die **Amplitude** der Spannungen zwischen den **Aussenleitern** ist um $\sqrt{3}$ **grösser**



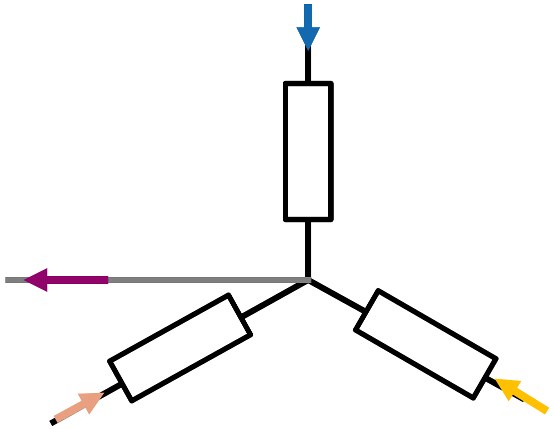
$$u_{a13}(t) = u_1(t) - u_3(t) = \hat{u}\ \left(\sin(\omega t) - \sin(\omega t + 120°)\right)$$

$$= \sqrt{\mathbf{3}} \cdot \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

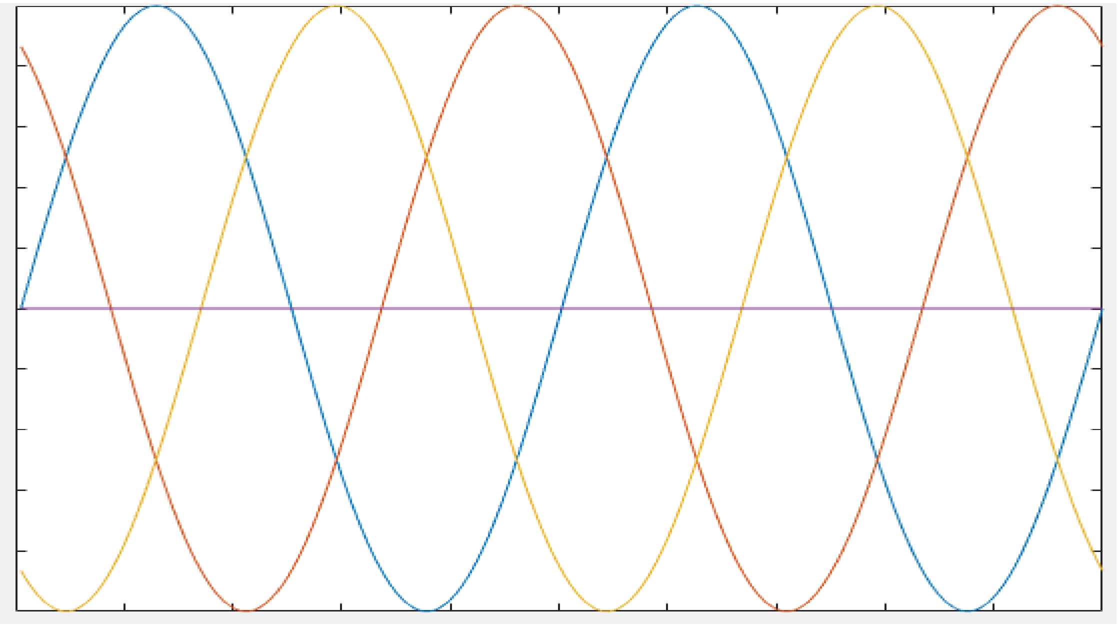


3 – Phasen Wechselstrom

- Die Ströme kompensieren sich im Sternmittelpunkt, so dass der **Neutralleiter nicht benötigt** wird



$$i_n(t) = \mathrm{i}_1(\mathrm{t}) + \mathrm{i}_2(\mathrm{t}) + \mathrm{i}_3(\mathrm{t}) = \frac{1}{\mathrm{R}}\left(\mathrm{u}_1(\mathrm{t}) + \mathrm{u}_2(\mathrm{t}) + \mathrm{u}_3(\mathrm{t})\right)$$
$$= \frac{\hat{\mathrm{u}}}{R}\left(\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 120°) + \sin(\omega t + 240°)\right) = 0A$$



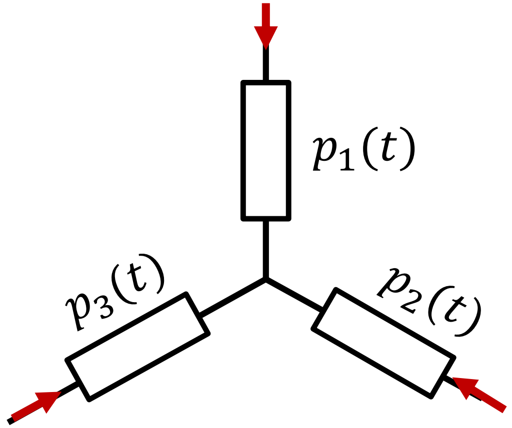
3 – Phasen Wechselstrom

- Die gesamte abgegebene Leistung bei symmetrischer Belastung ist **Konstant und Zeitunabhängig**

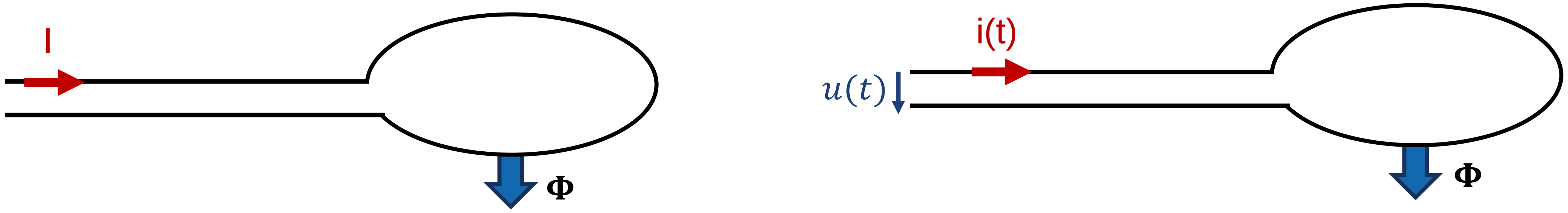
$$P_{ges}(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = u_1(t) \cdot i_1\ (t) + u_2(t) \cdot i_2(t) + u_3(t) \cdot i_3(t)$$

$$= \hat{u} \cdot \hat{\imath} \frac{3}{2} \cos(\varphi)$$

Nicht abhängig der Zeit



Selbstinduktion



Der Strom I, erzeugt einen magnetischen Fluss **Φ** in der Leiterschleife
Ändert sich der Strom i(t) zeitlich, so ändert sich auch der Fluss **Φ**

$$\boxed{u(t) = \frac{d}{dt}(\Phi)}$$

Da die Induktivität sagt, wie Strom und Spannung zusammenhängt:

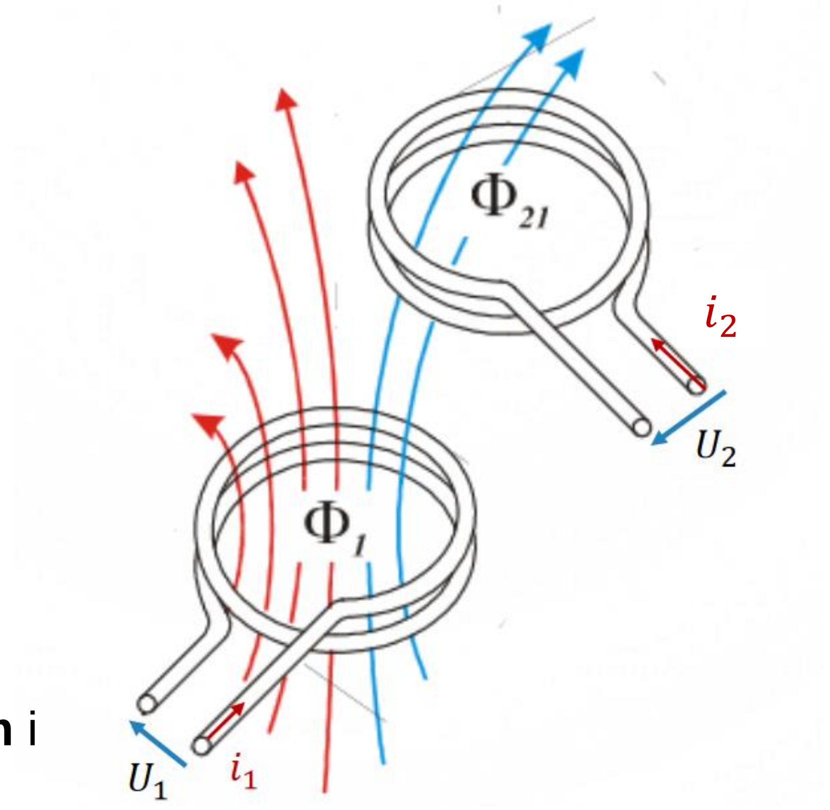
$$\boxed{\Phi = L \cdot i(t) \rightarrow u(t) = L \cdot \frac{d}{dt}(i(t))}$$

Induktivität: Wieviel **magnetischer Fluss** durchsetzt die Leiterschleife **bei einem Strom** i

$$L_1 = N_1 \cdot \frac{\boldsymbol{\Phi_1}}{i_1} \qquad L_2 = N_2 \cdot \frac{\boldsymbol{\Phi_2}}{i_2}$$

N_i da Fluss durch N_i Wicklungen geht

$$u_1(t) = L_1 \cdot \frac{d}{dt}\left(i_1(t)\right) \qquad u_2(t) = L_2 \cdot \frac{d}{dt}\left(i_2(t)\right)$$



Gegeninduktivität: Wieviel **magnetischer Fluss** durchsetzt eine andere Leiterschleife **bei einem Strom** i

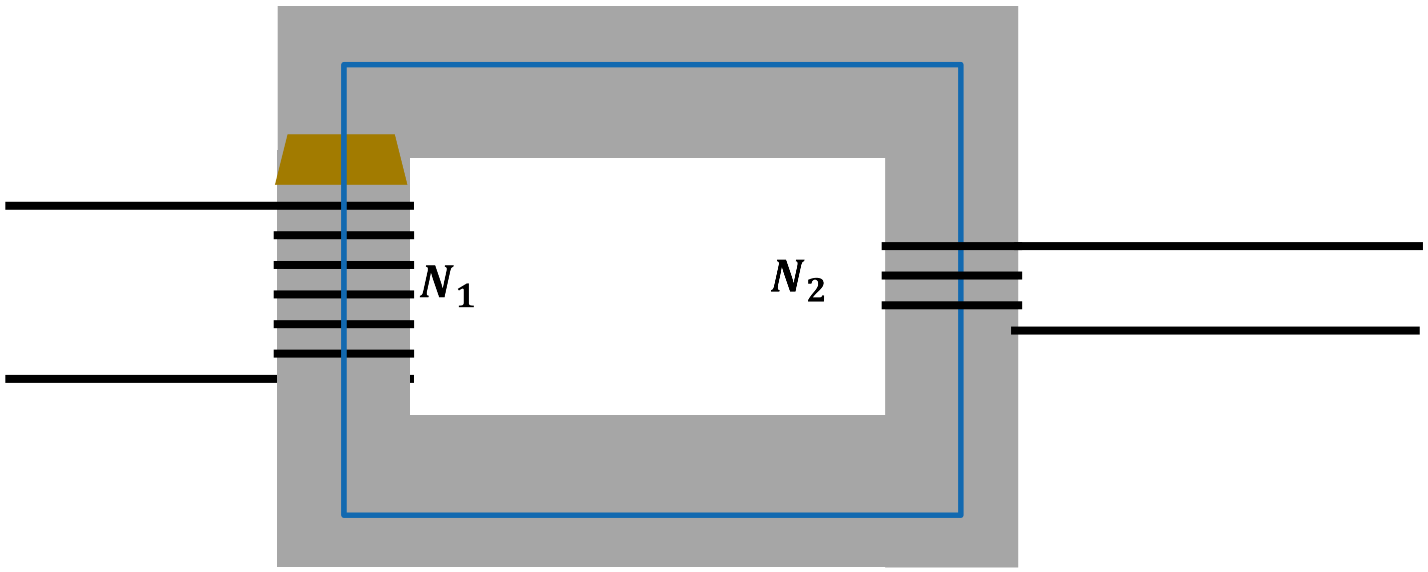
$$L_{21} = N_2 \cdot \frac{\boldsymbol{\Phi_{21}}}{i_1} \qquad L_{12} = N_1 \cdot \frac{\boldsymbol{\Phi_{12}}}{i_2}$$

$$u_2(t) = L_{21} \cdot \frac{d}{dt}\left(i_1(t)\right) \qquad u_1(t) = L_{12} \cdot \frac{d}{dt}\left(i_2(t)\right)$$

Beispiel Gegeninduktivität

Berechnen sie die Gegeninduktivität folgender Anordnung

Anzahl Wicklungen Links: $\boldsymbol{N_1}$
Anzahl Wicklungen Rechts: $\boldsymbol{N_2}$
Effektive Weglänge im Kern: $\boldsymbol{l}$
Querschnittsfläche: $\boldsymbol{A}$
Permitivität: $\boldsymbol{\mu_r}$

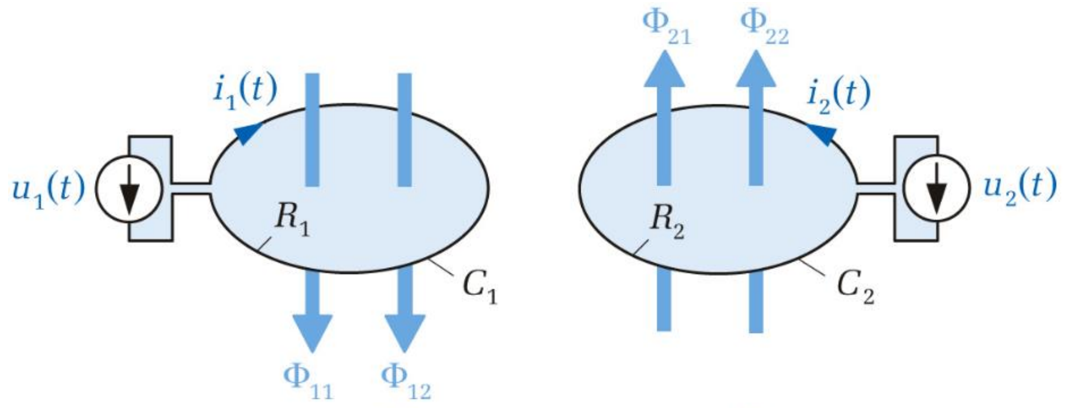


Gegeninduktion

Durchsetzt der Fluss der einen Leiterschleife eine andere Leiterschleife, so kann eine Spannung in der anderen Schleife induziert werden

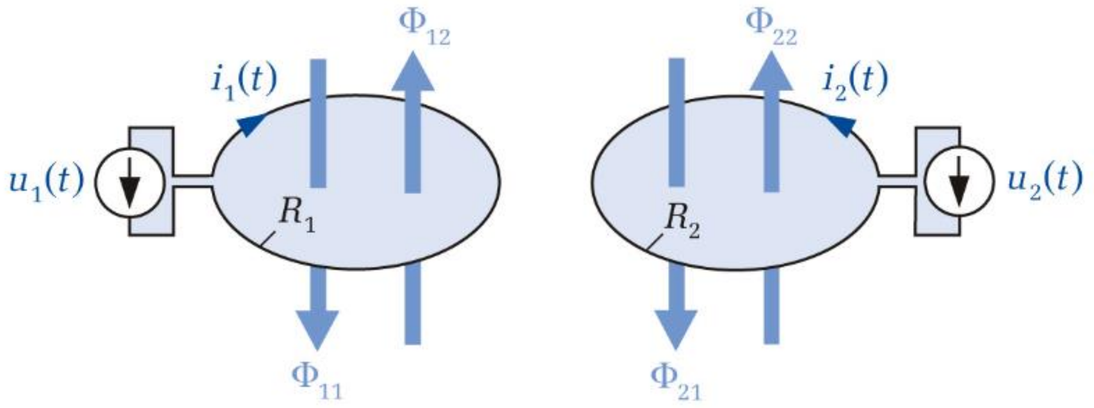
$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + \frac{d}{dt}(\Phi_{11} + \Phi_{12}) = R_1 \cdot i_1 + L_{11}\frac{di_1}{dt} + L_{12} \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + \frac{d}{dt}(\Phi_{22} + \Phi_{21}) = R_2 \cdot i_2 + L_{22}\frac{di_2}{dt} + L_{21} \cdot \frac{di_1}{dt}$$



$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + \frac{d}{dt}(\Phi_{11} - \Phi_{12}) = R_1 \cdot i_1 + L_{11}\frac{di_1}{dt} - L_{12} \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + \frac{d}{dt}(\Phi_{22} - \Phi_{21}) = R_2 \cdot i_2 + L_{22}\frac{di_2}{dt} - L_{21} \cdot \frac{di_1}{dt}$$



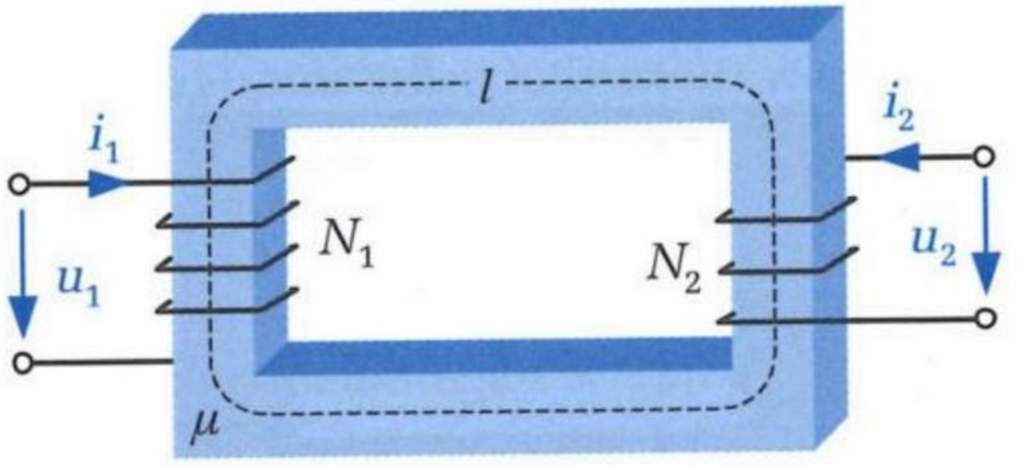
Wie können wir ein Transformator in einem Schaltbild darstellen?

$$u_1 = L_{11} \cdot \frac{d}{dt}(i_1(t)) - M \cdot \frac{d}{dt}(i_2(t))$$

$$u_2 = L_{22} \cdot \frac{d}{dt}(i_2(t)) - M \cdot \frac{d}{dt}(i_1(t))$$

L_{ii} = Selbstinduktivität

$M = Gegeninduktivität$ = Magnetische Koppelung



Wie können wir ein Transformator in einem Schaltbild darstellen?

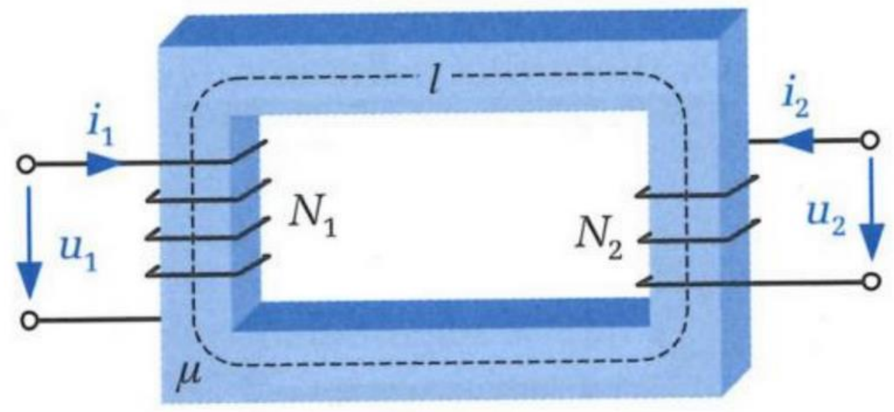
$$u_1 = L_{11} \cdot \frac{d}{dt}\left(i_1(t)\right) - M \cdot \frac{d}{dt}\left(i_2(t)\right) + \left[M \frac{d}{dt}\left(i_1(t)\right) \; - M \frac{d}{dt}\left(i_1(t)\right)\right]$$

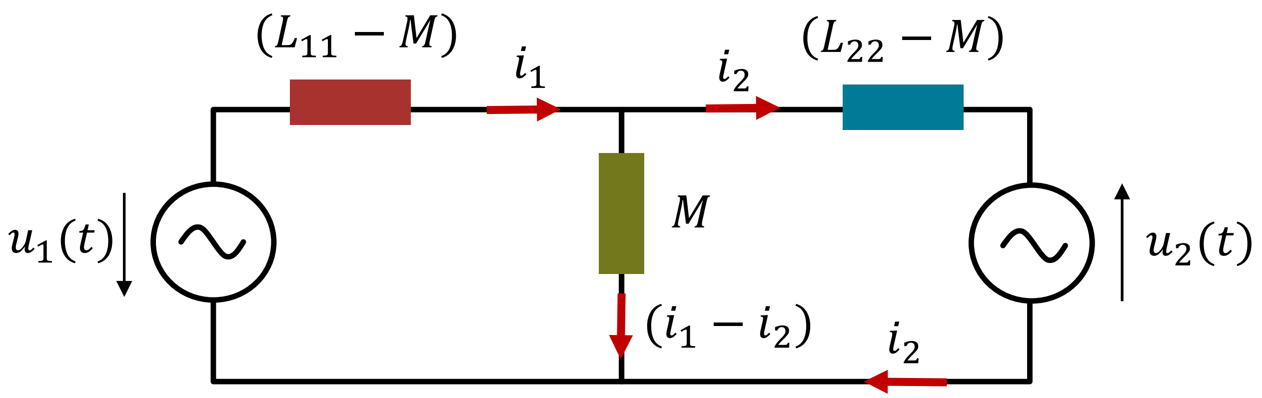
$$= (L_{11} - M) \cdot \frac{d}{dt}\left(i_1(t)\right) - M \frac{d}{dt}\left(i_2(t) - i_1(t)\right)$$

$$u_2 = L_{22} \cdot \frac{d}{dt}(i_2(t)) - M \cdot \frac{d}{dt}(i_1(t)) + \left[M \frac{d}{dt}\left(i_2(t)\right) \; - M \frac{d}{dt}\left(i_2(t)\right)\right]$$

$$= (L_{22} - M) \cdot \frac{d}{dt}\left(i_2(t)\right) - M \cdot \frac{d}{dt}(i_1(t) - i_2(t))$$

Wie können wir ein Transformator in einem Schaltbild darstellen?





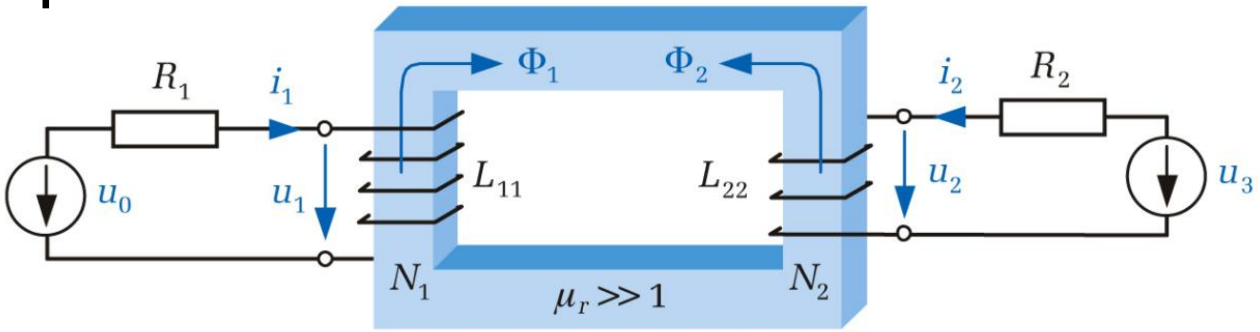
$$u_1 = (L_{11} - M) \cdot \frac{d}{dt}\big(i_1(t)\big) - M \frac{d}{dt}\big(i_2(t) - i_1(t)\big)$$

$$u_2 = (L_{22} - M) \cdot \frac{d}{dt}\big(i_2(t)\big) - M \cdot \frac{d}{dt}(i_1(t) - i_2(t))$$

Verlustloser Übertrager

Annahme: **Gesamter Fluss fliesst durch andere Spule**

$$u_1 = N_1 \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\Phi_1} - \boldsymbol{\Phi_2}) \qquad u_2 = N_2 \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\Phi}_2 - \boldsymbol{\Phi_1})$$



$$u_1 = -\frac{N_1}{N_2} \cdot u_2$$

Übersetzungsverhältnis

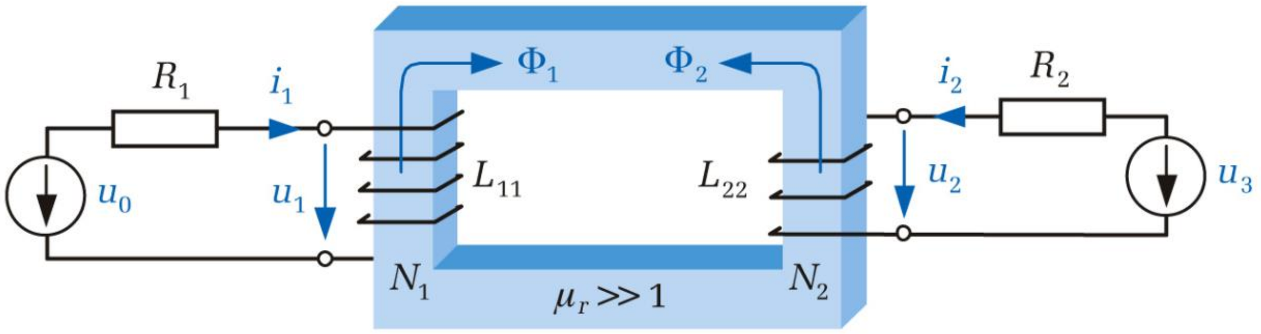
$$\pm \text{ü} := \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Abhängig der Wicklungsrichtungen

Idealer Übertrager

Falls Übertrager verlustfrei und $\mu_r \to \infty$

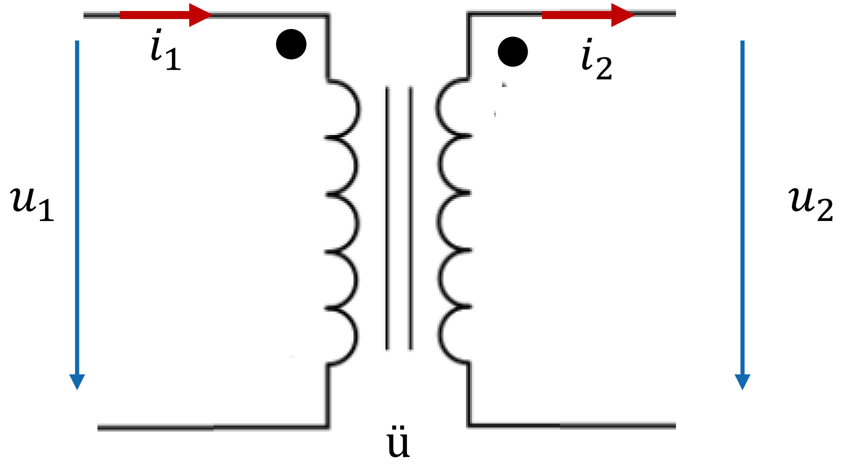
$$ü := \pm\frac{u_1}{u_2} = \pm\frac{N_1}{N_2}$$



Leistungen müssen konstant bleiben

$$u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$$

Schaltbild:



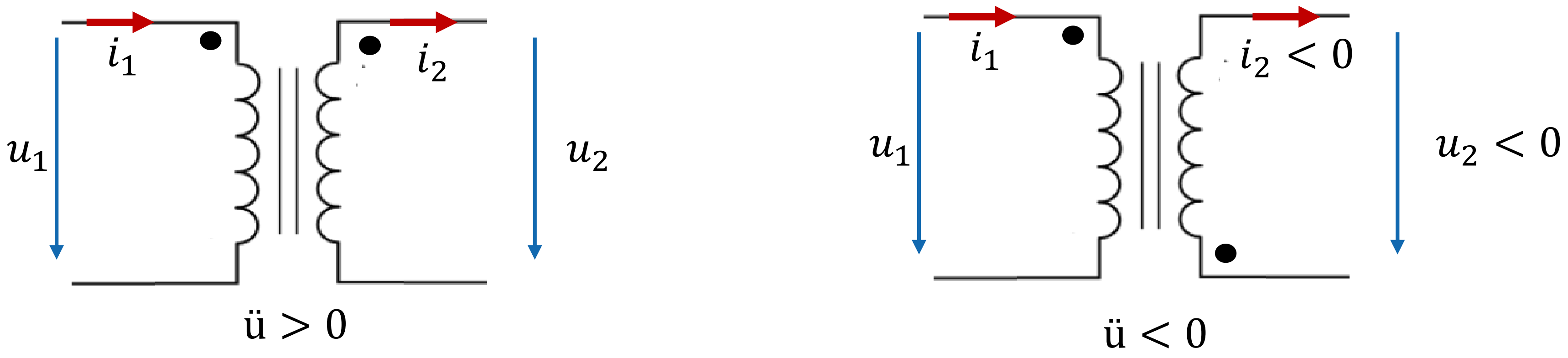
Ströme teilen sich umgekehrt zur Windungszahl auf

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{ü} = \frac{N_2}{N_1}$$

Da $\mu_r \to \infty$ ist das H-Feld im inneren des Kernes = 0 und es Wird keine Energie im Material gespeichert

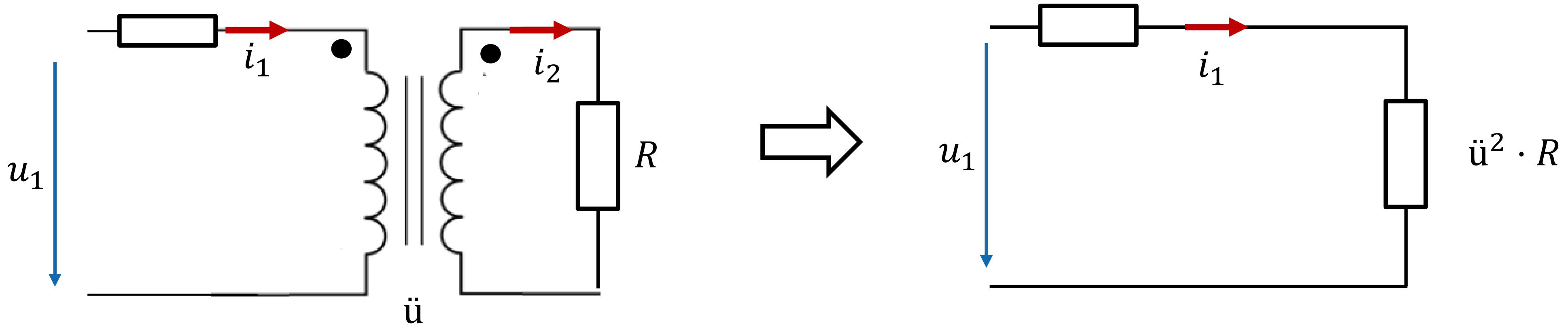
Punktkonvention

Punkte geben an, in welche Richtung Spannung und Strom zeigen, abhängig der Primärseite



Idealer Übertrager - Widerstandstransformation

Befindet sich ein Widerstand hinter einem idealen Übertrage, so kann er mit $\ddot{u}^2 \cdot \boldsymbol{R}$ ersetzt werden,



Aufgabe

6.3 Level 2

Aufgabe 6.8 | **U-Kern mit bewegtem I-Joch, Induktionsgesetz**

Gegeben ist die aus einem Ferritmaterial der Permeabilität μ bestehende Kombination aus einem U-Kern und einem I-Joch. Alle Schenkel haben einen quadratischen Querschnitt mit der Seitenlänge a. Die einzelnen Abschnitte der effektiven Weglängen sind in Abb. 1 eingezeichnet.

Auf dem U-Kern befindet sich eine Wicklung mit der Windungszahl N_1, die vom Gleichstrom I_q in der angegebenen Richtung durchflossen wird. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die magnetische Flussdichte $\vec{\mathbf{B}}$ homogen über den Kernquerschnitt verteilt ist.

Nun wird das I-Joch, beginnend beim Startpunkt $s(t=0)=0$, mit konstanter Geschwindigkeit $\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{e}}_x v_0$ in Richtung der Koordinate x bewegt. Infolge des sich ändernden Flusses $\Phi(t)$ stellt sich an den offenen Klemmen der zweiten Wicklung mit der Windungszahl N_2 die Induktionsspannung $u(t)$ ein.

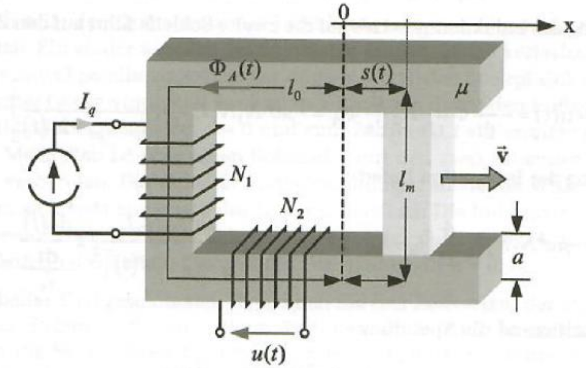


Abbildung 1: U-Kern mit bewegtem I-Joch

1. Berechnen Sie den Fluss $\Phi_A(t)$ in Abhängigkeit des Stromes I_q.
2. Geben Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung $u(t)$ an.

Aufgabe

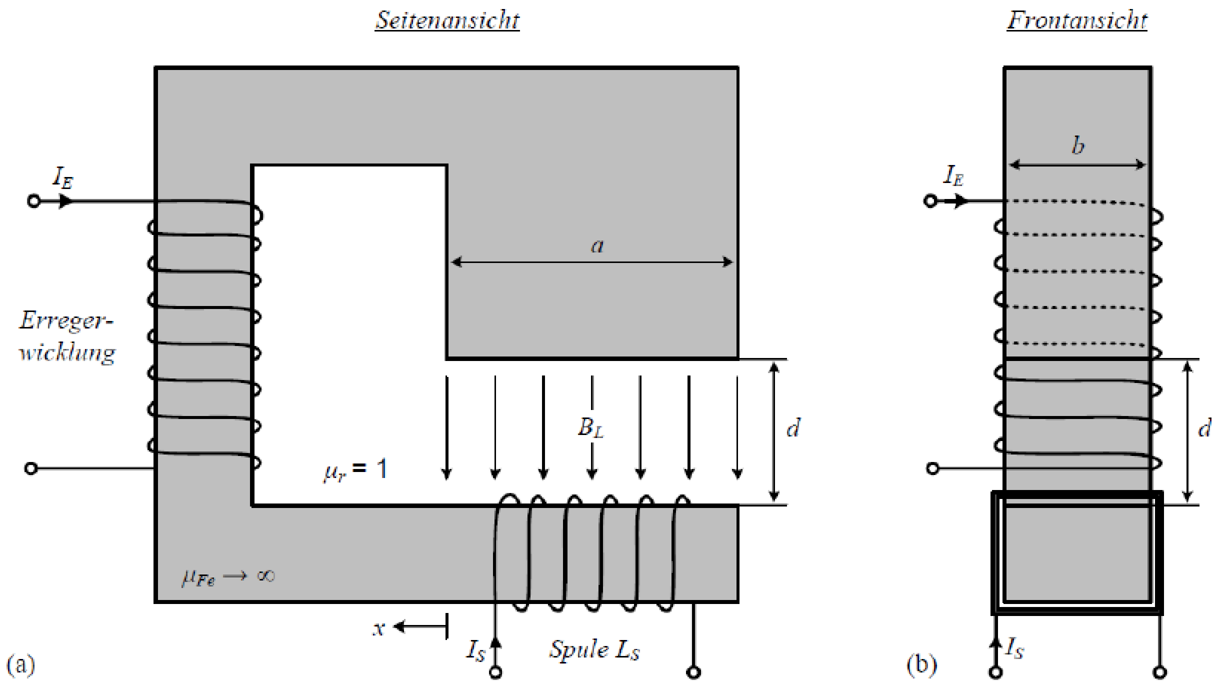


Abb. 1: Seitenansicht (a) und Frontansicht (b) des Linearantriebs.

Zur Prüfung

Prüfung

- Verliert keine Punkte beim Einheiten einsetzen!

$$R = \frac{l}{\varepsilon \cdot A} = \frac{1\mu m}{\varepsilon \cdot (1mm)^2} \underbrace{=}_{ZF} \frac{1 \cdot 10^{-6}\, m}{\varepsilon \cdot (1 \cdot 10^{-3} m)^2}$$

- Lernt den Taschenrechner zu bedienen
  - Wie löse ich Integrale, Gleichungssysteme. **Parallelschaltung** vorprogrammieren!

Üben

- Alte Serien nochmals durchgehen, Probleme markieren
- Albach Übungsbuch. (Achtung Aufgaben mit Integralen welche sich nicht vereinfachen nicht relevant)
- Prüfungen von Prof. Albach aus Nürnberg (Siehe meine Webseite)
- Prüfungskatalog (Auch auf meiner Webseite)

Prüfung

- Trainiert Geschwindigkeit, die NuS Prüfung ist nur 1.5h

- Übt Multiple Choice Aufgaben auf Moodle und aus dem Buch

- Achtung mit Notation!
  - Vektoren haben **immer** Pfeile
  - **Achsen** bei Graphen **beschriften**
  - **Einheiten** nicht vergessen

- Falls ihr an einer Aufgabe hängen bleibt, versucht Punkte zu «schinden»
  - Schreibt alle Formeln auf die passen könnten

  - Falls b) von a) abhängt: Rechnet mit Variabeln (U_a für Spannung von a)…)

Prüfungstag

- Nehmt eine Uhr mit
- Seit mind. 30min früher dort
- Taschenrechner, Albach und Zusammenfassung nicht vergessen!
- Essen mitnehmen ist erlaubt

Viel Erfolg!