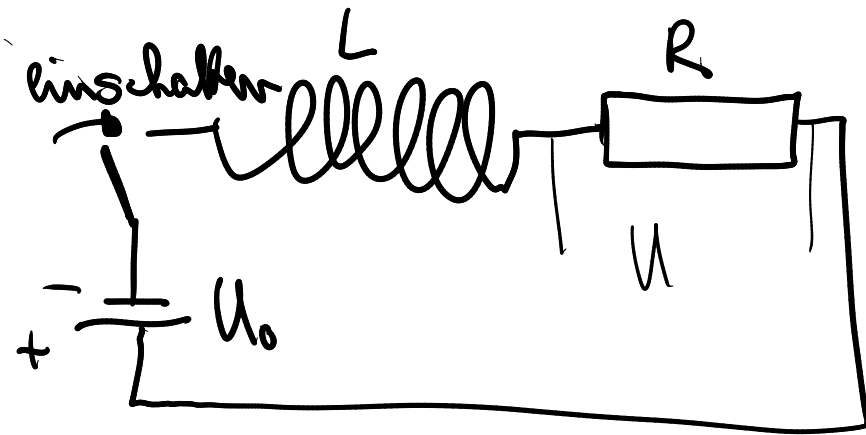


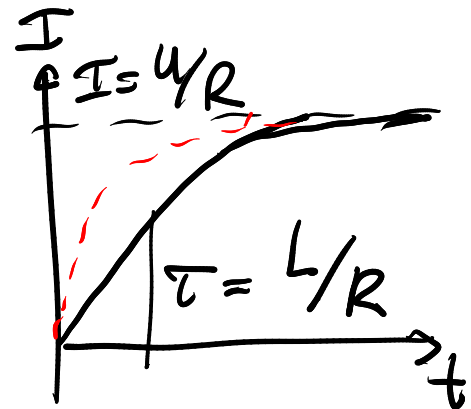
# Aufladen der Spule



Lenz'sche Regel bewirkt, daß die Selbstinduktivität einer Spule jede

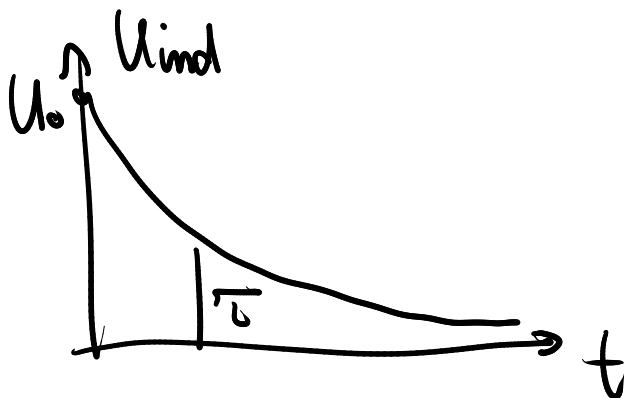
Stromänderung hemmt.

Einschalten: 
$$IR = U_0 + U_{\text{ind}}$$
$$= U_0 - L \dot{I}$$



$$\leadsto LI + RI = U_0$$

$$\leadsto I(t) = \frac{U_0}{R} \left( 1 - e^{-t/(L/R)} \right)$$

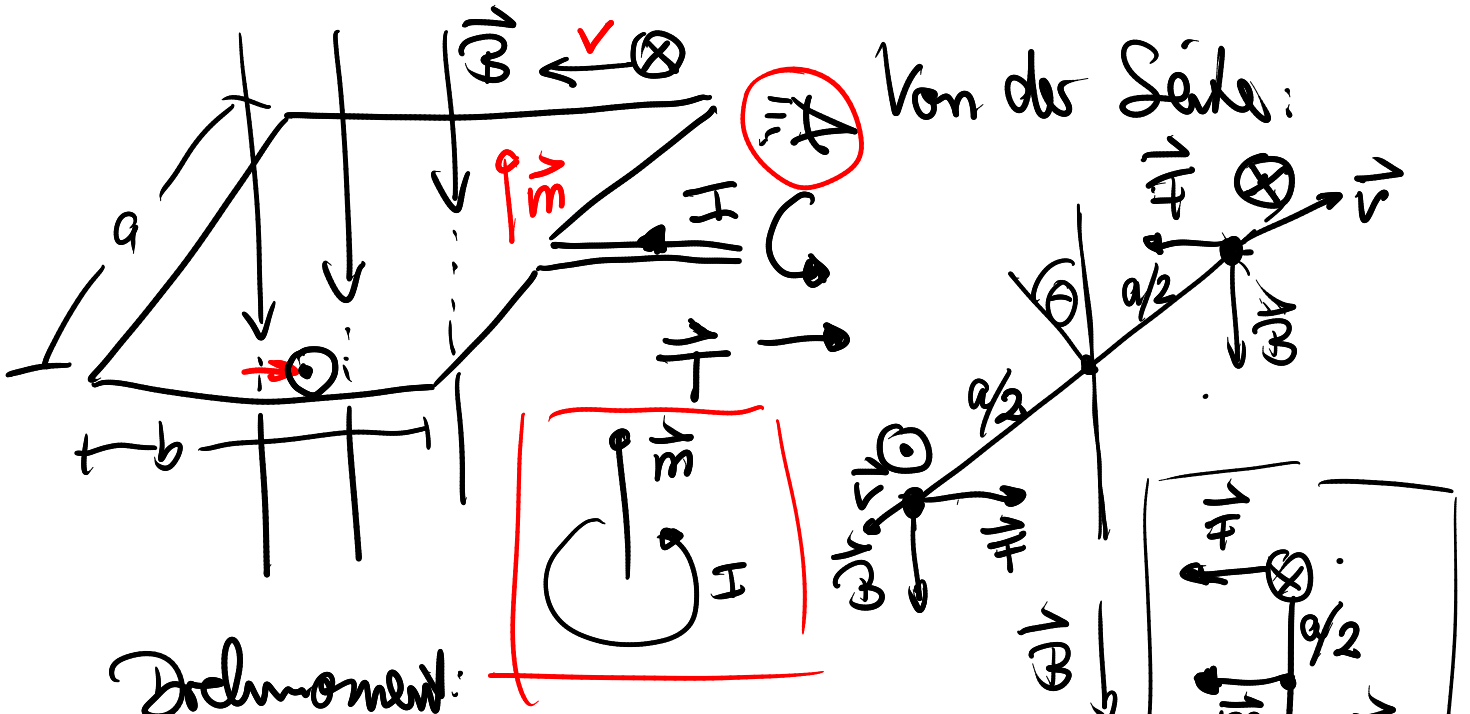


$$L = 670 \text{ H}$$

$$R = 310 \Omega$$

$$\tau \approx 2,15 \text{ s}$$

# Drehmoment auf magn. Dipol

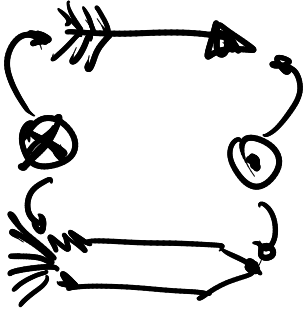


Drehmoment:

$$T = 2 \cdot F \cdot \frac{a}{2} \sin \theta$$

$$= I \cdot B \cdot b \cdot a \sin \theta$$

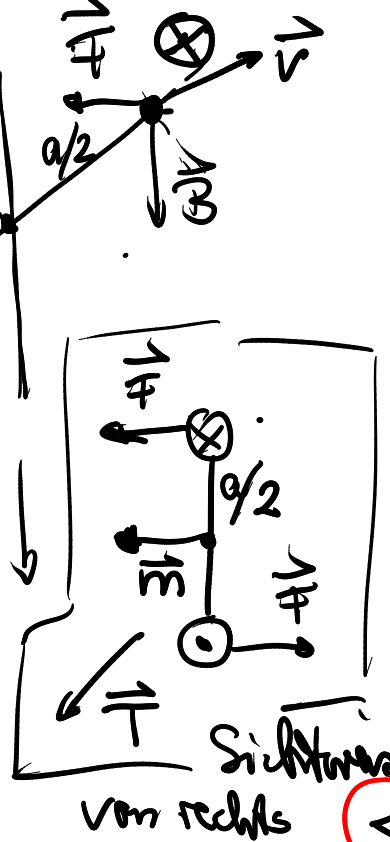
$$= m \cdot B \cdot \sin \theta \quad \leadsto \quad \vec{T} = \vec{m} \times \vec{B}$$



$I \cdot a \cdot b$ : magn. Dipol

Analog: Kraft auf ausgerichteten Magneten im Magnetfeld:  
 $\vec{F} = m \cdot \text{grad } B$   
 $(\vec{F} = \vec{m} \cdot \text{grad } B)$

Von der Seite:



Sichtweise von rechts

Motor: Spule im Feld, die Stromrichtung wird nach  $180^\circ$  Drehung umgepolt mittels Kommutatorschleifen.

Maximale Drehzahl: Angelegte Spannung  
= induzierte Drehzahl  
(Spannung  $\sim$  Drehzahl)

Synchronmotor;  
Außenläufer: Permanentmagnete drehen sich im Feld einer festen Spule(n), an welche Wechselstrom angelegt ist.

## Energie des Magnetfelds

Wegen der Selbstinduktivität muß eine Ladung gegen die induzierte Spannung getrieben werden.

$$\begin{aligned} \text{Leistung: } P &= I \cdot U = \frac{dW}{dt} \\ &= I \cdot U_{\text{ind}} \\ &= I \cdot L \cdot \frac{dI}{dt} \quad \text{so } dW = L \cdot I \cdot dI \end{aligned}$$

$$\sim W = \int_{I=0}^{I_0} L \cdot I \cdot dI = \frac{L}{2} I_0^2$$

(siehe:  $W = \frac{C}{2} U^2$ )

Für lange Spule:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A \rightarrow W = \frac{\mu_0}{2} \frac{N^2}{l} A I^2$$

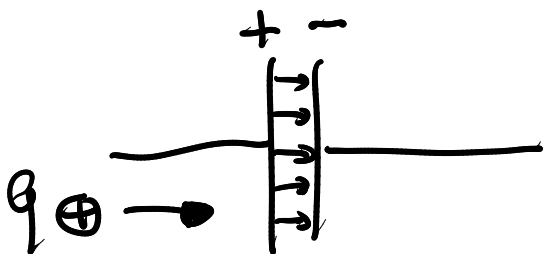


$$W = \frac{\mu_0 A}{2l} \cdot \frac{B^2 l^2}{\mu_0^2} = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot \underbrace{A \cdot l}_{\text{Volumen}}$$

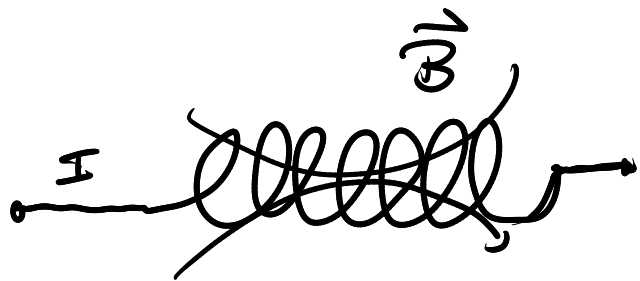
$$N^2 I^2 = \frac{B^2 l^2}{\mu_0^2}$$

$\sim$  Energiedichte:  $\frac{W_B}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$

$$\left[ \frac{W_E}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \right]$$

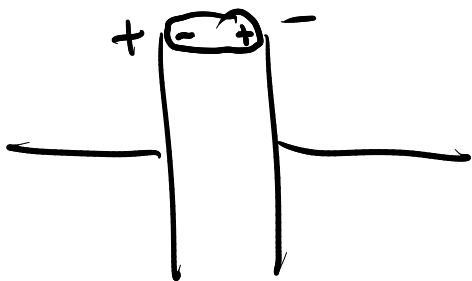


$E \uparrow$  wenn  $q$   
 dazugeladen  
 (Elektrost. Abstößung)



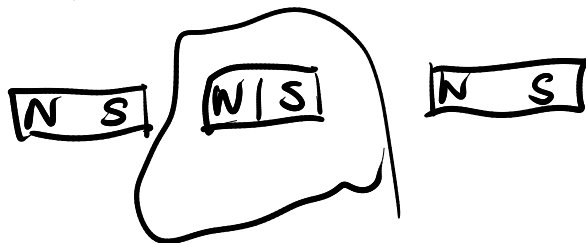
mehr Strom  $\sim B \uparrow$   
 $U_{\text{ind}} = -L \dot{I}$ : Ind-Spannung

# Materie im Magnetfeld



$E$  kleiner  
in Materie

$$E = \frac{E_0}{\epsilon} < E_0$$



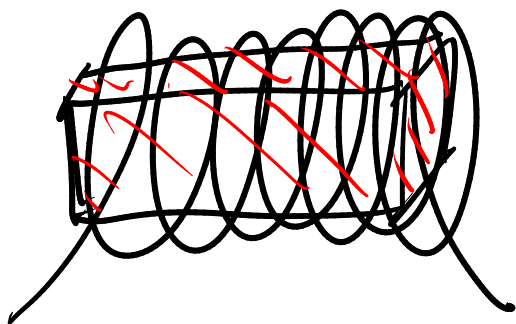
$B$  größer  
in Materie

$$B = \mu B_0 \text{ in Materie}$$

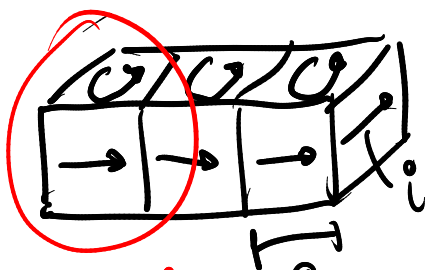
(oft:  $B > B_0$ )

Grund: Ausrichtung permanenter  
Dipole ergibt Zusatzfeld

↳ Atomare Kreisströme  
Bahndrehimpuls  
Spins von ungepaarten Elektronen)



Zu den äußeren Spulenströmen kommen die  
atomaren Ströme hinzu:



Atomares Dipolmoment  
 $m = ia^2$

$$\vec{B} \quad B = \mu_0 (nI)$$

$n$ : Wicklung pro Länge  $N/l = n$

$i$ : Oberflächenstrom (atomar)

$a$ : atomare Länge

Magnetisierung  $M = \frac{\text{magn. Dipolmoment}}{\text{Volumen}}$

$$= \frac{m}{a^3} = \frac{i a^2}{a^3} = i/a$$

Maxwellgesetz erweitern:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 i$$

Wegen:  $i = \oint \vec{M} \cdot d\vec{s}$

eingesetzt:  $\oint (\vec{B} - \mu_0 \vec{M}) \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{\text{frei}}$

Dafür häufig angenommen:

$$\mu_0 \vec{H} = \vec{B} - \mu_0 \vec{M} \stackrel{!}{=} \frac{\vec{B}}{\mu}$$

Dafür muß man annehmen:  $\vec{M} \parallel \vec{B}$  und  $\vec{M} \sim \vec{B}$

Magnetische Suszeptibilität:

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B} \quad \text{so} \quad \mu = 1 + \chi$$

$$\left( \mu = \frac{1}{1 - \chi} \approx 1 + \chi \right)$$

Vorher:  $\epsilon = 1 + \chi$

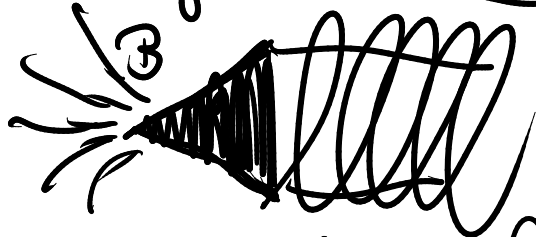
↳ Dielektrische Suszeptibilität

Erinnerung:  $\oint (\vec{E} + \frac{\vec{P}}{\epsilon_0}) \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{frei}}}{\epsilon_0}$

# Klassifizierung der Materialien

$\chi > 0$ : paramagnetisch B↑ M↑ (permanente Dipole)

Alu



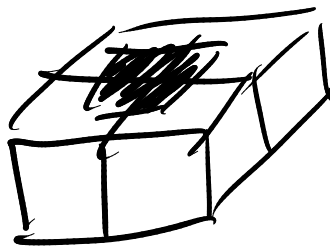
(flüssiges  $O_2$ )

Inhomogenes Magnetfeld  $\approx$  Anziehung

$\chi < 0$ : diamagnetisch B↑ M↓ (induzierte Dipole)

Bismut

Inhomogenes Magnetfeld  $\approx$  Abstoßung



Graphitplättchen auf Magneten

$\approx$  Abstoßung durch Diamagnetismus.

## Ferromagnetismus

Es existieren Materialien mit permanenter Magnetisierung (= Ausrichtung permanenter Dipole im Feld der anderen Dipole)

