

# Wiederholung vom 23.05.2019

## Ferromagnetismus - Hysteresekurve

Sättigungsmagnetisierung  $M_S$

Remanenz  $M_R$

Koerzitivfeldstärke  $B_C$  ( $H_C$ )

## Magnetische Feldgleichungen in Materie

magnetische Erregung  $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}$$

$\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  Stetigkeitsbedingungen an Grenzflächen

# Themen heute

$\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  Stetigkeitsbedingungen an Grenzflächen

Zeitabhängige Felder – Elektromagnetismus

**Faradaysches Induktionsgesetz**

**Lenzsche Regel**

Beispiele:      Wechsellspannungsgenerator  
                    Wirbelstrombremse

**Selbstinduktion**

Beispiel:        Induktivität einer Spule

# 4. Magnetostatik

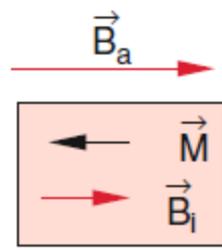
## Magnetismus von Materialien: Klassifizierung

Einheiten bezügl. cgs-System!\*

### i) Diamagnetismus

Induktion magn. Momente

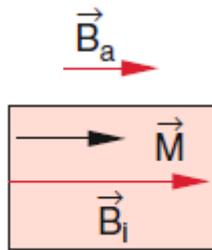
$$\chi_{Dia} < 0, \mu < 1$$



### ii) Paramagnetismus

induzierte Ausrichtung  
vorhandener magn. Momente

$$\chi_{Para} > 0, \mu > 1$$



### iii) Ferromagnetismus

spontane Ausrichtung  
vorhandener magnetischer Momente

$$\chi_{ferro} > 0, \mu > 1, \chi_{ferro} \gg \chi_{para}$$

\*Umrechnung cgs- nach SI-System:

$$\chi_{cgs} = \frac{1}{4\pi} \chi_{SI}$$

a) Diamagnetische Stoffe  $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$   $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$

| Gase           | $\chi_{\text{mol}} / \text{cm}^3/\text{mol}$ | Stoff            | $\chi_{\text{mol}} / \text{cm}^3/\text{mol}$ |
|----------------|--|------------------|--|
| He             | - 1,9  | Cu               | - 5,46                                       |
| Ne             | - 7,2  | Ag               | - 19,5                                       |
| Ar             | -19,5  | Au               | - 28   |
| Kr             | -28,8  | Pb               | - 23   |
| Xe             | -43,9  | Te               | - 39,5                                       |
| H <sub>2</sub> | - 4,0  | Bi               | -280   |
| N <sub>2</sub> | -12,0  | H <sub>2</sub> O | - 13   |

b) Paramagnetische Stoffe  $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$   $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$

| Stoff          | $\chi_{\text{mol}} / \text{cm}^3/\text{mol}$ | Stoff                          | $\chi_{\text{mol}} / \text{cm}^3/\text{mol}$ |
|----------------|--|--------------------------------|--|
| Al             | + 16,5                                       | O <sub>2</sub>                 | +3450  |
| Na             | + 16,0                                       | FeCO <sub>3</sub>              | +11 300                                      |
| Mn( $\alpha$ ) | +529   | CoBN <sub>2</sub>              | 13 000                                       |
| Ho             | 72 900                                       | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 53 200                                       |

c) Ferromagnetische Stoffe

| Stoff                            | $\mu$           |
|----------------------------------|-----------------|
| Eisen je nach Vorbehandlung      | 500-10 000      |
| Kobalt                           | 80-200          |
| Permalloy 78 % Ni. 3 % Mo        | $10^4$ - $10^5$ |
| Mumetall 76 % Ni. 5 % Cu. 2 % Co | $10^5$          |
| Supermalloy                      | $10^5$ - $10^6$ |

## 4. Magnetostatik

### Magnetfelder: Stetigkeitsbedingungen an Grenzflächen



Komponente senkrecht zur Oberfläche

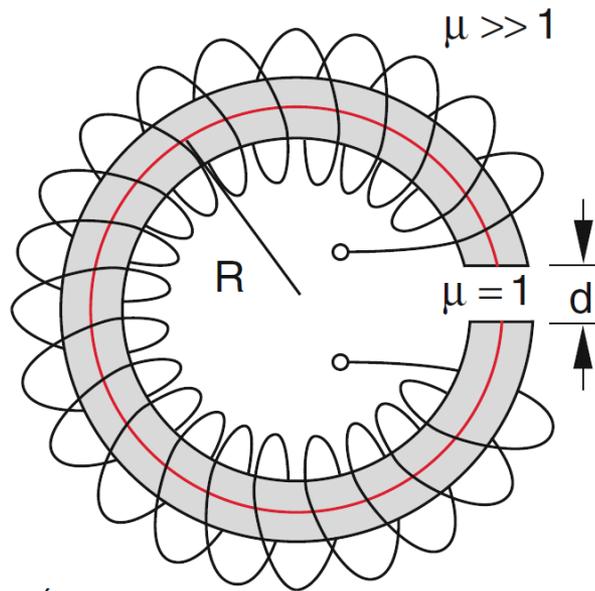
$$B_{1\perp} = B_{2\perp}$$
$$\mu_1 H_{1\perp} = \mu_2 H_{2\perp}$$

Komponente parallel zur Oberfläche

$$H_{1\parallel} = H_{2\parallel}$$
$$\frac{1}{\mu_1} B_{1\parallel} = \frac{1}{\mu_2} B_{2\parallel}$$

## 4. Magnetostatik

Beispiel: Spule mit Eisenkern



im Eisenkern:

$$\vec{B}_E = \mu\mu_0\vec{H} = \mu\vec{B}_{Spule}$$

Eisen:  $\mu = 500 - 10000!$

im Luftspalt:

$$\text{für } d \rightarrow 0: \vec{B}_{Luftspalt} = \vec{B}_E$$

(quantitativ  $\Rightarrow$  Übungsblatt 7)



Demonstration: magnetische Verstärkung

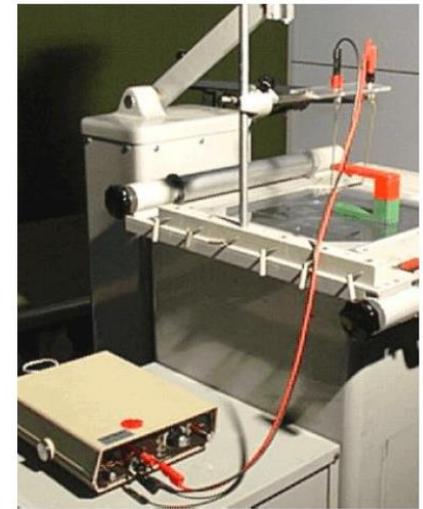
## 5. Elektromagnetische Felder

### Faradaysches Induktionsgesetz

$$U_{ind} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \Phi_{mag}$$

$$rot \vec{E} = -\frac{d}{dt} \vec{B}$$

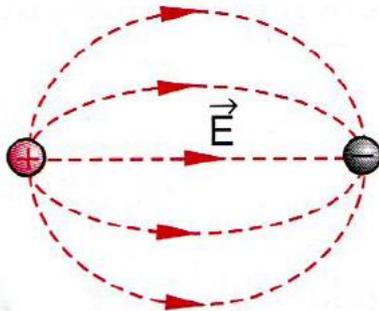
ein magnetisches Feld, das sich zeitlich ändert, erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld!



Induktion in Leiterschaukel

Elektrostatik

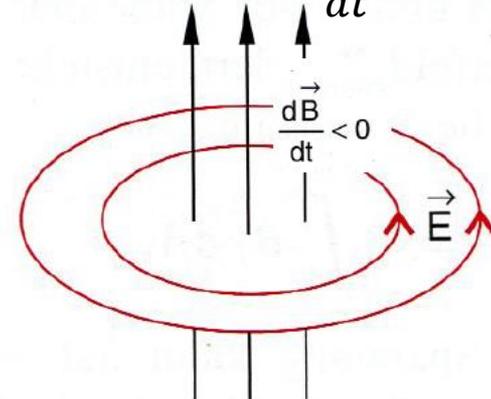
$$rot \vec{E} = 0$$



konservativ

Magnetodynamik

$$rot \vec{E} = -\frac{d}{dt} \vec{B}$$



nicht-konservativ

### Maxwell-Gleichungen: *Magnetostatik* $\Leftrightarrow$ *Magnetodynamik*

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad \text{Ladungen sind Quellen der elektrischen Felder}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Magnetfelder sind quellfrei}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad \text{elektrische Felder sind wirbelfrei}$$

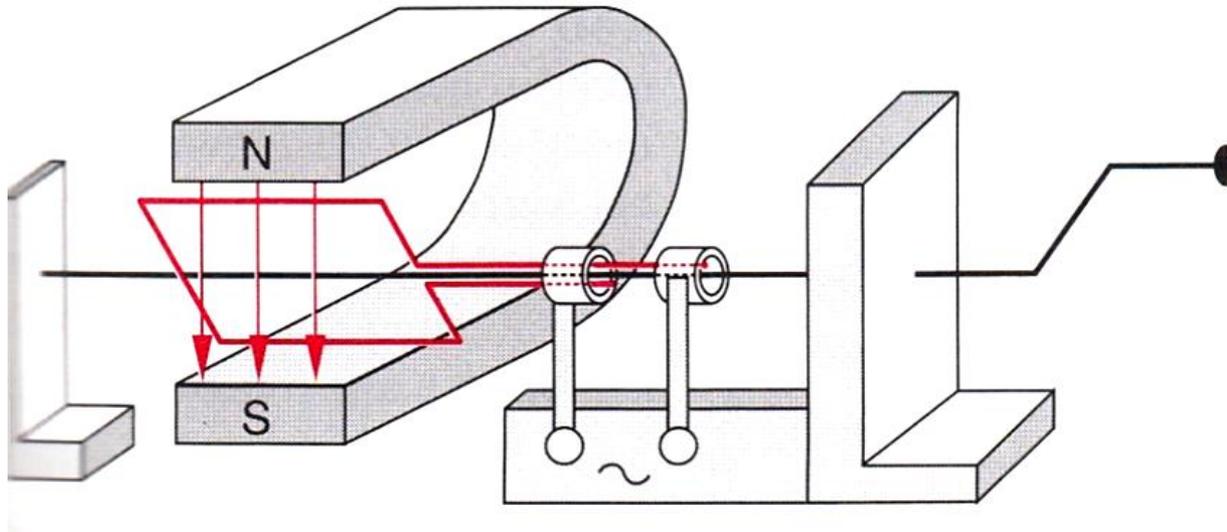
$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad \text{zeitlich veränderliche Magnetfelder erzeugen  
Wirbel im elektrischen Feld}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad \text{Ströme erzeugen Wirbel im Magnetfeld}$$

### Beispiele Induktion - Wechselspannungsgenerator

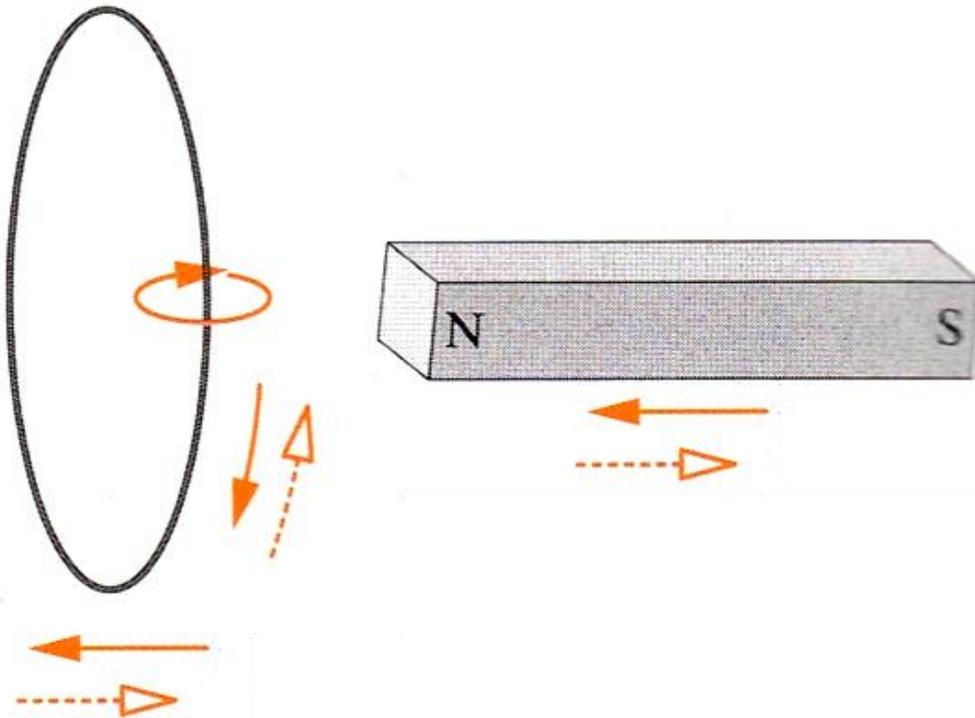
$$\Phi_{mag} = |\vec{B}| \cdot |\vec{A}| \cdot \cos(\omega t)$$

$$U_{Ind} = |\vec{B}| \cdot |\vec{A}| \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$



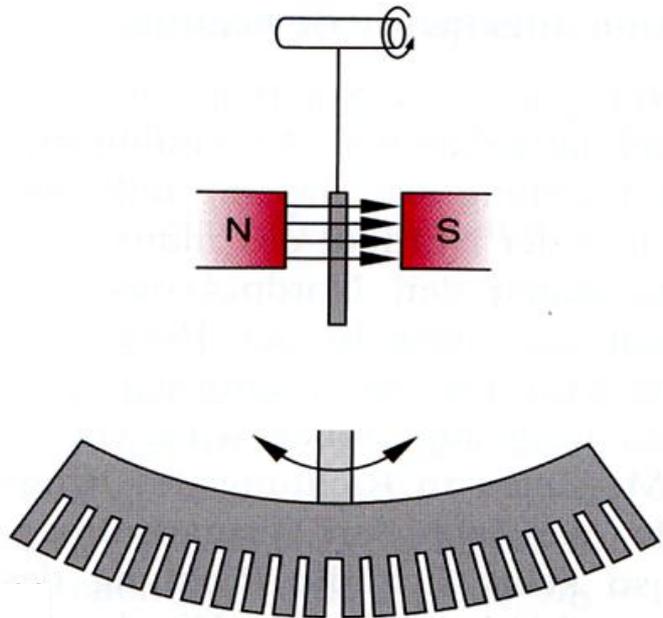
### Lenzsche Regel

Die durch Induktion entstehenden Ströme erzeugen ein Magnetfeld, das der Flussänderung immer entgegenwirkt



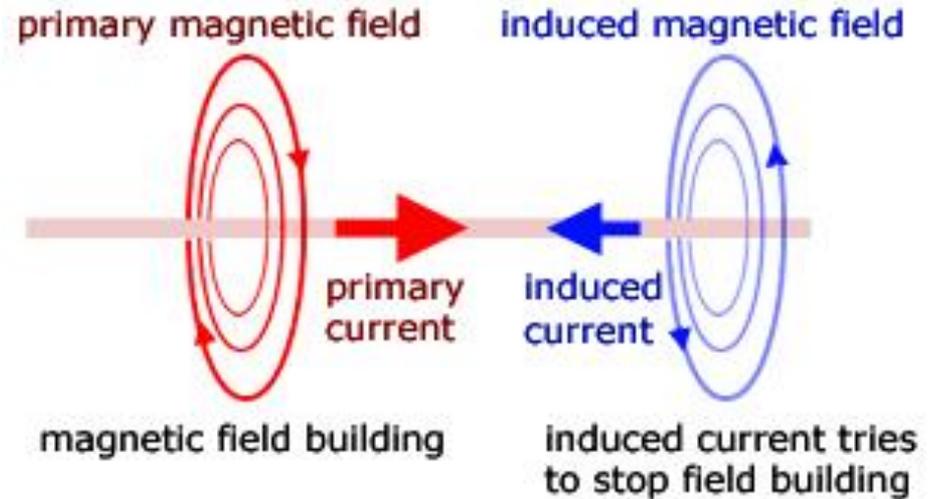
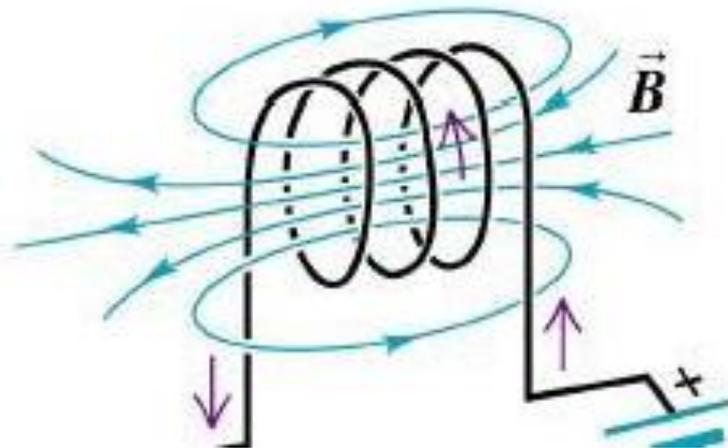
*Demonstration Lenz'sche Regel*

### Beispiel Lenzsche Regel - Wirbelstrombremse



*Demonstration Waltenhofsches Pendel*

## Selbstinduktion



magnetischer Fluss durch die Spule:

$$\Phi_{mag} = L \cdot I \quad L \dots (\text{Selbst-})\text{Induktivität, } [L] = 1 \text{ Henry} = 1 \text{ H}$$

$$\Rightarrow U_{ind} = -\frac{d}{dt} \Phi_{mag} = -L \frac{d}{dt} I \quad (\text{Kap. 3: } U_L = -U_{ind} = L \frac{d}{dt} I!)$$

$L$  ist Maß für die selbstinduzierte Spannung bei einer gegebenen zeitlichen Änderung eines Stroms

### 3. Passive Bauelemente und Netzwerke

#### Knoten- und Maschenregel:

#### Vorzeichenkonvention - „Quellen-/Erzeuger- Zählpfeilsystem

1. Strompfeile einzeichnen:

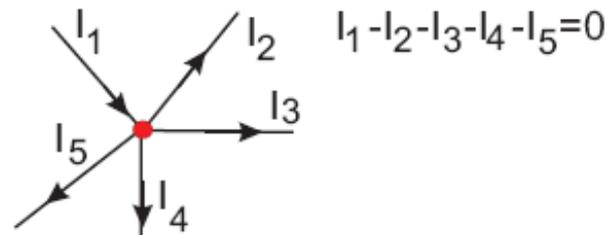
Batterie: Strompfeil zeigt vom “+” Pol weg.

R,L,C: willkürliche Richtung .

2. Knotenregel anwenden:

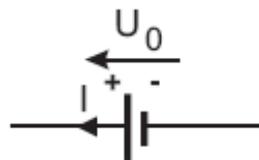
Die Summe aller Ströme in einen Knoten ist null.

Vorzeichen: Strompfeil zeigt in Richtung des Knotens: +, vom Knoten weg: -

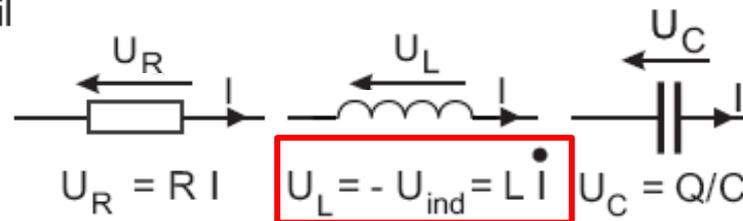


3. Spannungspfeile einzeichnen:

Batterie: vom “-” zum “+” Pol, also  
Spannungspfeil || Strompfeil



R,L,C: antiparallel zum Strompfeil



4. Umlaufsinn der Maschen im Netzwerk: willkürlich wählen.

5. Maschenregel anwenden:

Bei einem Umlauf in einer Masche müssen sich die Spannungen zu null addieren.

Vorzeichen: Spannungspfeile im Umlaufsinn orientiert: +, entgegengesetzt: -