

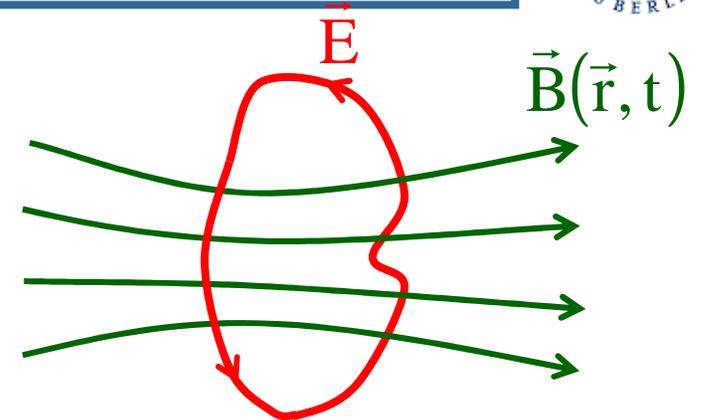
4. Zeitlich Variable Felder



- 4.1. Faradaysches Induktionsgesetz
- 4.2. Lenzsche Regel
- 4.3. Selbstinduktion und gegenseitige Induktion
- 4.4. Energie des magnetischen Feldes
- 4.5. Verschiebungsstrom
- 4.6. Die Maxwellschen Gleichungen

4.1. Induktionsgesetz

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ind}} &\equiv \oint \vec{E} d\vec{s} \stackrel{\text{Stokes}}{=} \int \text{rot} \vec{E} d\vec{a} \\
 &= - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{a} \stackrel{\substack{\text{feste} \\ \text{Schleife}}}{=} - \frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{a} = -\dot{\Phi}_M
 \end{aligned}$$



gilt auch für bewegliche Schleifen variabler Form

- fiktiver geschlossener Weg
- reale Leiterschleife

U_{ind} : **induzierte Spannung** gemessen in der Schleife

Φ_M : **magnetischer Fluss** gemessen im Labor

Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -\dot{\Phi}_M$$

Bemerkung: U_{ind} ist wegabhängig \Rightarrow keine Potentialdifferenz.

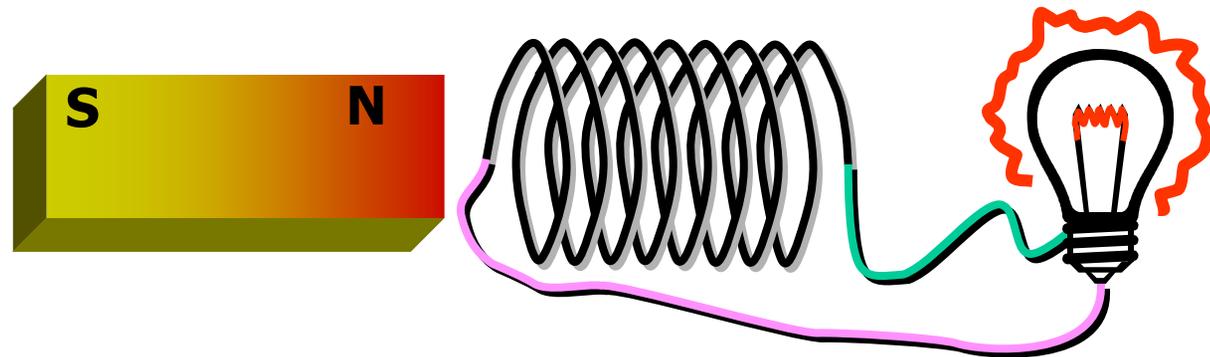
Daher oft Bezeichnung: $U_{\text{ind}} \equiv$ **EMK** (**E**lektro-**M**otorische **K**raft)

Experimenteller Test 1



B-Feld: variabel **Leiterschleife: fest**

$$U_{\text{ind}} = - \int \dot{\vec{B}} d\vec{a}$$



- $U_{\text{ind}} \propto$ Zahl der Spulenwicklungen
- Vorzeichen von U_{ind} wechselt mit Bewegungsrichtung des Magneten
- Vorzeichen von U_{ind} wechselt mit Magnetorientierung
- Effekt durch Eisenkern verstärkbar
- Magnet ersetzbar durch Spule mit variierendem Stromfluss

Experimenteller Test 2

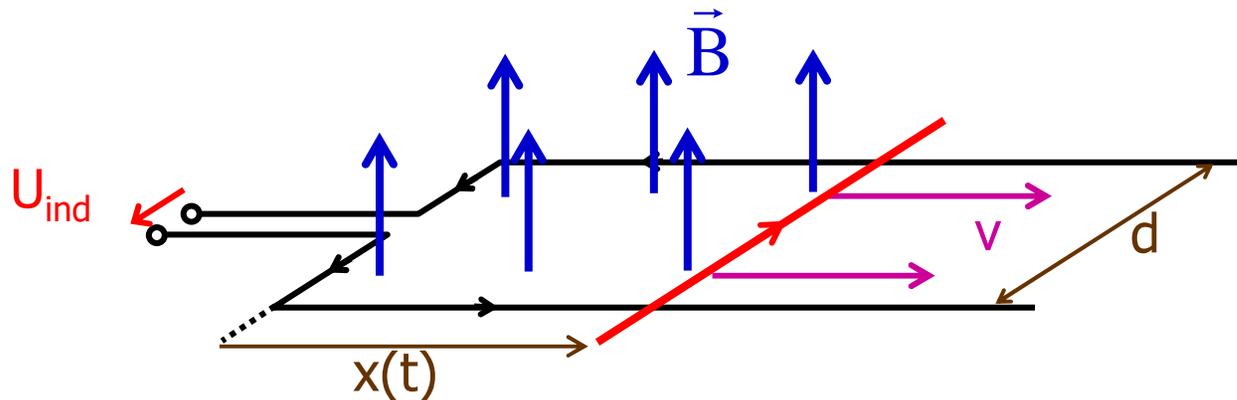


B-Feld: konstant **Leiterschleife: variable Form**

Spezialfall: B homogen, Schleife eben, Orientierung fest

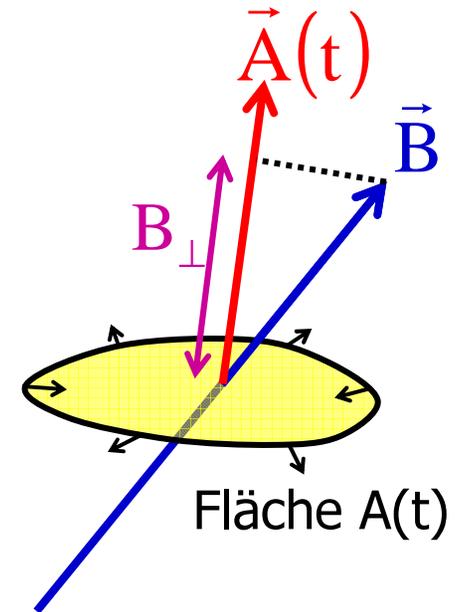
$$\Phi_M = \vec{B} \cdot \vec{A}(t) = B_{\perp} A(t) \quad \Rightarrow \quad U_{\text{ind}} = -B_{\perp} \dot{A}(t)$$

Beispiel:



$$A(t) = x(t)d \quad \Rightarrow \quad \dot{A}(t) = \dot{x}(t)d = vd$$

$$B_{\perp} = B \quad \Rightarrow \quad U_{\text{ind}} = -Bvd$$



Experimenteller Test 3

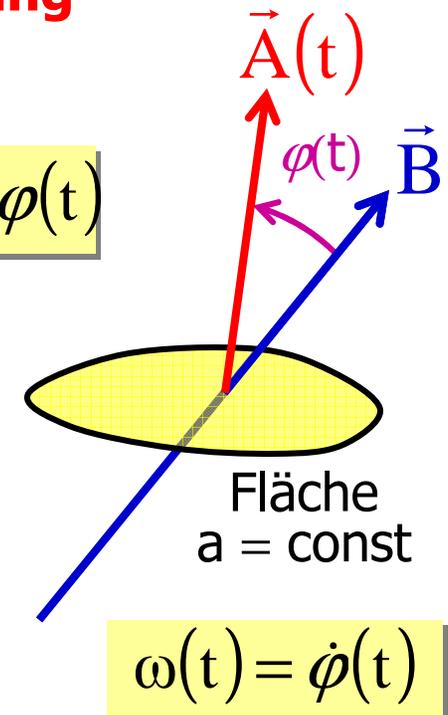
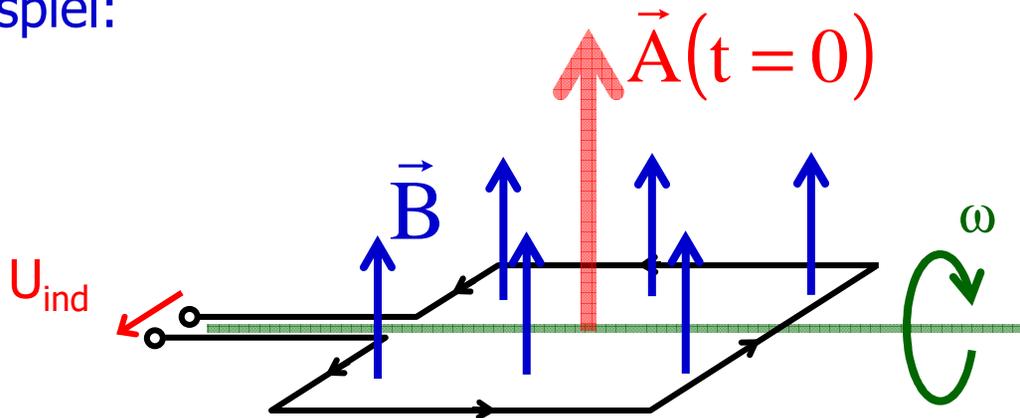


B-Feld: konstant Leiterschleife: variable Orientierung

Spezialfall: B homogen , Schleife eben

$$\Phi_M = \vec{B} \cdot \vec{A}(t) = B A \cos \varphi(t) \Rightarrow U_{\text{ind}} = B A \omega(t) \sin \varphi(t)$$

Beispiel:



$$\omega = \text{const.}, \quad \varphi(t) = \omega t \Rightarrow U_{\text{ind}} = B A \omega \sin(\omega t)$$

\Rightarrow Wechselspannungsgenerator (**Dynamo**)

4.2. Lenzsche Regel



Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -\dot{\Phi}_M$$



Lenzsche Regel: Die Induktion wirkt ihrer Ursache stets **entgegen**
(Gegenspannungen, Gegenkräfte etc.)

Herleitung:

- im Einzelfall: $U_{\text{ind}} \Rightarrow I_{\text{ind}} \Rightarrow$ Gegenfeld B_{ind}
- generell: $U_{\text{ind}} \Rightarrow I_{\text{ind}} \Rightarrow$ Energieverbrauch
 \Rightarrow Ursache muss Arbeit verrichten \Rightarrow Gegen-„Kraft“

Anwendungsbeispiel: **Wirbelstrombremse**