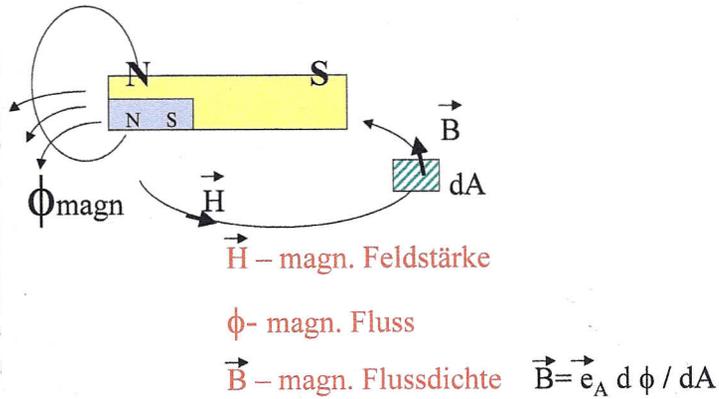
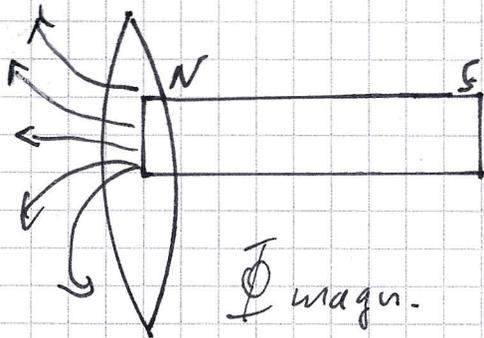


MAGNETOSTATISCHES FELD im Vakuum

Permanentmagnet : Fluss, Flussdichte, Feldstärke

Quellenfeld und Wirbelfeld

Magnetfeld des Permanentmagneten: ein Quellenfeld?

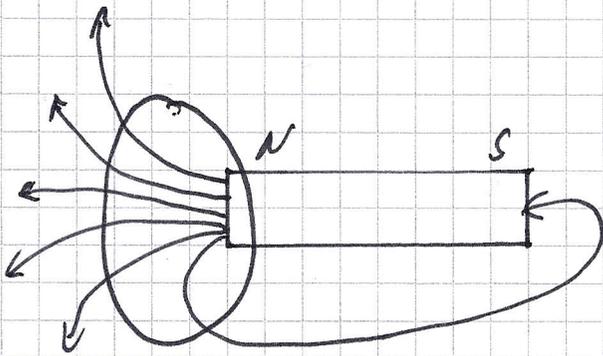


$\text{div } \vec{B} < 0$ wenn S als
 Feldsenke aufgefasst würde

Nord und Süd können
 nicht vereinzelt werden

$\text{div } \vec{B} > 0$ wenn N als Feldquelle aufgefasst wird.

Das Magnetfeld des Permanentmagneten ist
 ein Wirbelfeld.



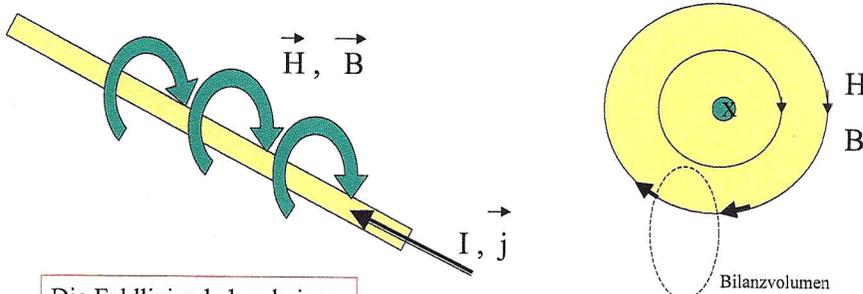
$\text{div } B = 0$

$\text{div } B = 0$ Vorstellung:

- die Feldlinien sind im Permanentmagneten in sich geschlossen

MAGNETOSTATIK, MAGNETOSTATISCHES FELD

Magn. Feld des stromdurchflossenen Drahtes



Die Feldlinien haben keinen Anfang und kein Ende
(Wirbelfeld)

$B_{\text{ein}} = B_{\text{aus}}$
 $\text{div } \vec{B} = 0$ (quellenfrei)

MAGNETOSTATIK, MAGNETOSTATISCHES FELD

Quellenfeld und Wirbelfeld

Statisches elektr. Feld	Quellenfeld wirbelfrei	$\text{div } D > 0$ $\text{div } D < 0$ oder $\text{div } D = 0$ $\text{div } E > 0$ $\text{div } E < 0$ oder $\text{div } E = 0$ $\text{rot } E = 0$
Stationäres elektr. Strömungsfeld	quellenfrei (wenn Bilanzhülle keine Stromquelle umschließt) wirbelfrei	$\text{div } j = 0$ $\text{div } E = 0$ $\text{rot } E = 0$
magn. Feld	Wirbelfeld	(quellenfrei) $\text{div } B = 0$ $\oint B \cdot dA = 0$ generell, weil N und S nicht zu trennen sind $\text{rot } H = j$

Durchflutung, Durchflutungsgesetz

Linie s umschließt eine Fläche A
besteht aus vielen ds ,

A besteht aus vielen dA .

DURCHFLUTUNGSGESETZ

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

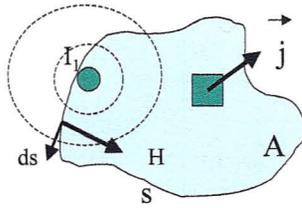


$$= \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

$$\rightarrow \oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

Auch der zeitliche
Wechsel der
Verschiebungsdichte D
verursacht ein magn. Feld

$$\rightarrow \oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A (\vec{j} + \vec{D}) \cdot d\vec{A}$$



Die geschlossenen Linien kann einen Draht
(Stromstärke I) umfassen.

I um gibt sich mit einem Magnetfeld
(Feldstärke H).

Man kann überall auf s das Produkt $H \cdot ds$ bilden

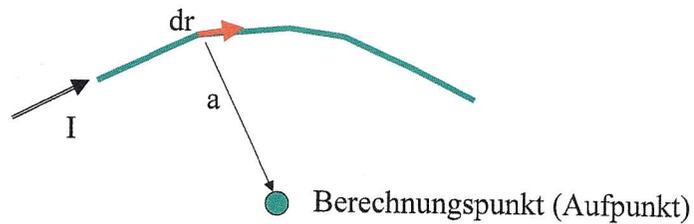
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I$$

Umfasst die geschlossene Linie mehrere I
so heißt die Summe der I „Durchflutung“

Biot-Savart-Gesetz

Strom in einem Draht als Ursache des magnetischen Feldes

Von einem Strom I (im Draht, Länge L) geht ein Magnetfeld H aus.



$$\vec{H} = I / 4\pi \int_L (\vec{dr} \times \vec{a}) / a^3$$

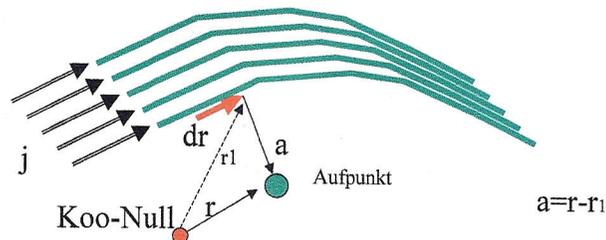
$H \perp a, dr$

3-D Stromverteilung als Ursache des magnetischen Feldes

Im räumlichen Leiter existiert eine räumliche j -Verteilung.

Sie ist Ursache für ein Magnetfeld H im Aufpunkt.

Nun ist über alle dV zu summieren, die einen H -Beitrag im Berechnungspunkt liefern.



$$\vec{H} = 1/4\pi \int_V (\vec{j} dV \times \vec{a}) / a^3$$

$H \perp r, dr$

Magnetischer Dipol

$$E \quad \vec{p} = \vec{d} Q$$

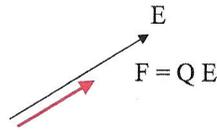
$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$$

$$M \quad \vec{m} = \vec{d} \vec{J}_m$$

Lorentz-Kraft

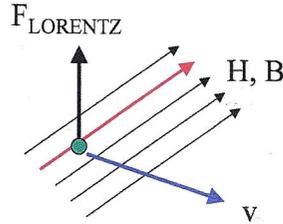
COULOMB-Kraft

Wirkt auf ruhende und bewegte elektrische Ladungen im elektrischen Feld



LORENTZ-Kraft

Wirkt **nur** auf bewegte elektrische Ladungen im **magnetischen** Feld



Die elektromagnetische Kraft F_{Lorentz} wirkt senkrecht zur v-B-Ebene.

Elektromagnetische Kraft / Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = Q \vec{v} \times \vec{B}$$

Kraft auf eine bewegte Ladung Q

$$\vec{F}_L = n e^- \vec{v} \times \vec{B}$$

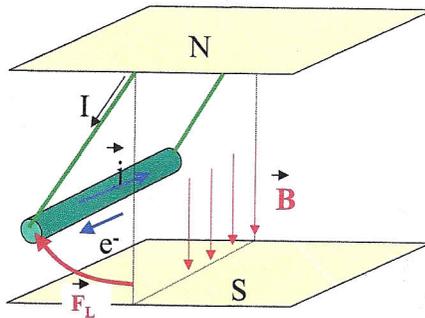
Kraft auf n bewegte Ladungen e⁻

$$\mathbf{I} = n^* e^- v_e \mathbf{A} \quad (\text{die „Richtung“ von I ist entgegen den } e^- \text{ def.})$$

- I Stromstärke (A)
- n* Ladungsträgerkonzentration (1/m³) n* = n/V = n/(L·A)
- e⁻ Elementarladung (As)
- v_e Wanderungsgeschwindigkeit (m/s)

Die Summe der Kräfte auf die n bewegten Ladungen e⁻ ergibt die Gesamtkraft auf den waagerechten Draht.

$$\vec{F}_L = \mathbf{I} \cdot \mathbf{L} \times \mathbf{B}$$



Für Kontinua ist die „Kraftdichte“ $\vec{f}_L = dF_L/dV$ sinnvoll.

$$\vec{f}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

Mithilfe des R_H können bestimmt werden:

- die Ladungsträgerkonzentration n^*
- die Polarität +/- der Ladungsträger
(Löcherleitung / Elektronenleitung)
- die Ladungsträgerbeweglichkeit

$$\mu = \rho \cdot R_H = \rho / (n^* \cdot e^-)$$

Cu Kupfer (Elektronenleiter) $R_H = -5,5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$

Su Zinn (Löcherleiter) $R_H = 1,4 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$

Bi Wismut (Halbleiter) $R_H = 5,0 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$

Induktion / Induktionsgesetz

Instationäres Feld

- zeitlich veränderliche elektrische Ströme,
Spannungen, Flüsse oder Felder

Durchflutungsgesetz: elektrischer Strom erzeugt
Magnetfeld

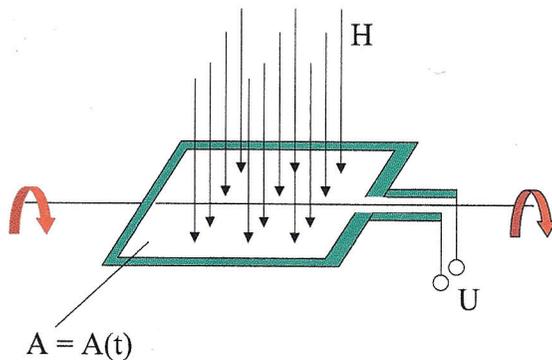
Induktionsgesetz: zeitliche Änderung des Magnetfeldes erzeugt elektrische
Feldstärke / Spannung

INDUKTION, INDUKTIONSGESETZ

Instationäres Feld : zeitlich veränderliche elektrische Ströme, Spannungen, Flüsse oder Felder

BEOBACHTUNG:

bei $H = \text{const}$, aber $A = A(t) \rightarrow$ wird U induziert



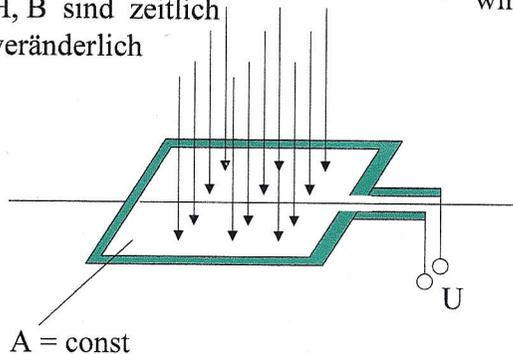
MAGNETOSTATIK, MAGNETOSTATISCHES FELD
Induktion Induktionsgesetz

BEOBACHTUNG:

bei $A = \text{const}$, aber $H = H(t)$

\rightarrow wird U induziert

H, B sind zeitlich
veränderlich



MAGNETOSTATIK, MAGNETOSTATISCHES FELD
Induktion Induktionsgesetz

Interpretation der Beobachtung :

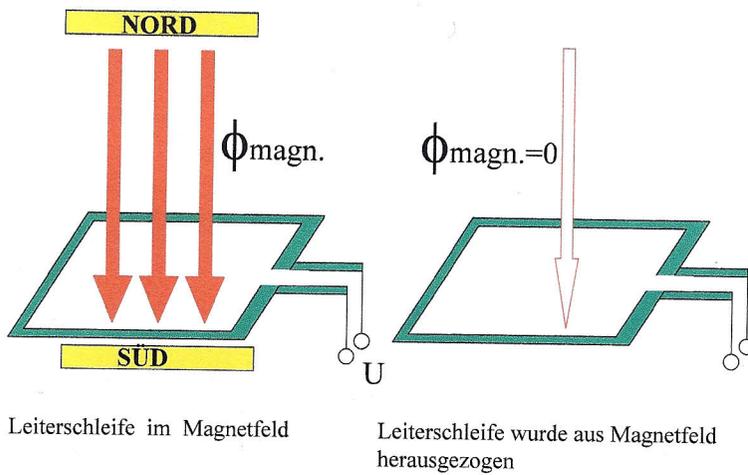
Wenn sich der magnetische Fluss ϕ_{magn} durch eine gegebene
Leiter-Geometrie zeitlich ändert, wird eine Spannung induziert.

Allgemein :

Wenn sich die magnetische Flussdichte $\vec{B} = \vec{e}_A d\phi / dA$
zeitlich ändert, wird eine elektrische Feldstärke induziert.

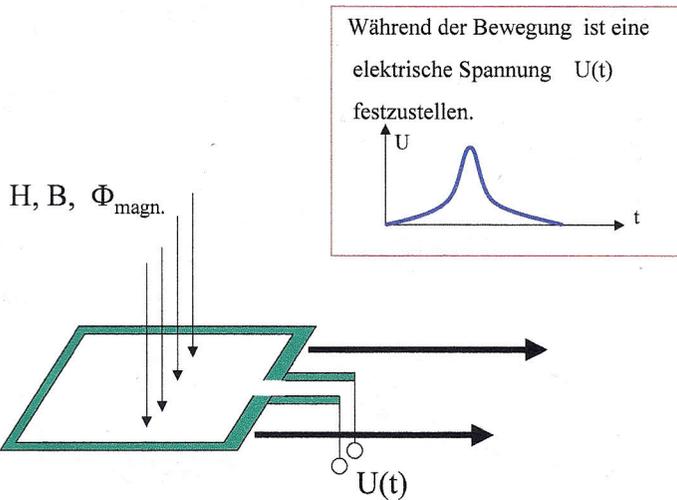
M. FARADAY 1831 :

Eine Leiterschleife wird aus dem magn. Feld gezogen



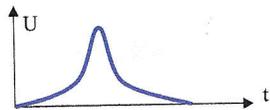
MAGNETOSTATIK, MAGNETOSTATISCHES FELD

Induktion Induktionsgesetz



MAGNETOSTATIK, MAGNETOSTATISCHES FELD
Induktion Induktionsgesetz

Der „Spannungsstoß“ $\int U(t) dt$ ist die Fläche unter der Kurve $U(t)$



und entspricht der Änderung des magnetischen Flusses

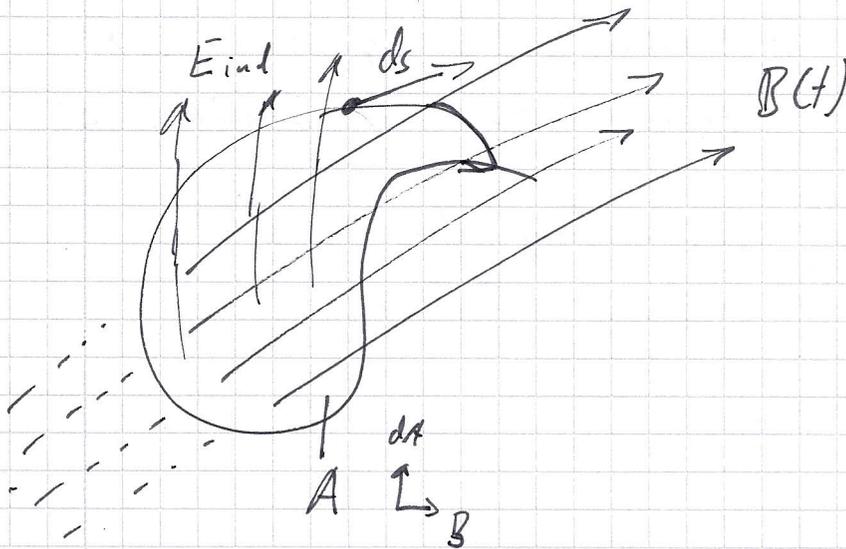
$$\int U(t) dt = \Delta \Phi_{\text{magn}}$$

$U_{\text{ind}} = \frac{-\Delta \Phi_{\text{magn}}}{\Delta t} = \frac{-d\Phi_{\text{magn}}}{dt}$	(-) LENZsche Regel
--	--------------------

Lenz'sche Regel 1833

Zeitliche Änderungen des magnetischen Flusses verursachen Induktionen.

Die so bewirkten Spannungen, Ströme oder Kräfte sind so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegengerichtet sind bzw. ihre Ursache kennen.



allgemein

B durchsetzt A

Die zeitliche Änderung von B ist die Ursache für eine induzierte E -Verteilung.

$$\oint \vec{E} \, d\vec{s} = - \frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \left. \vphantom{\int} \right\} \text{ integrale Schreibweise des Induktionsgesetzes}$$

Für eine kleine Fläche dA gilt:

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

$$\text{rot } \vec{E}_{\text{ind}} = - \dot{\vec{B}}$$

} differentielle Schreibweise
des Induktionsgesetzes

Anwendungen:

- Mischen und Entgasen von Flüssigkeiten mit Lorentzkraft
- Anwendung der zwei-Frequenz-Technik