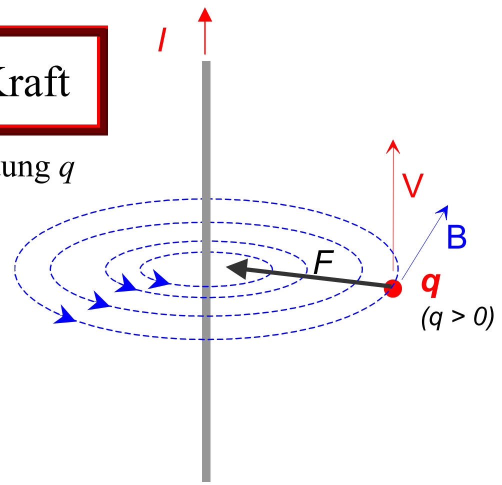
3.2.2.2 b.) Lorentz-Kraft

<u>Magn. Kraft</u> auf bewegte Ladung q

- $|\vec{F}| \propto q$
- $|\vec{F}| \propto |\vec{v}|$
- $|\vec{F}| \propto |\vec{B}|$
- $\vec{F} \perp \vec{v}$
- $\vec{F} \perp \vec{B}$

⇨ Vektor-Gleichung …



$$\boxed{\textbf{Lorentzkraft:} \quad \vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \qquad (+q\vec{E})}$$

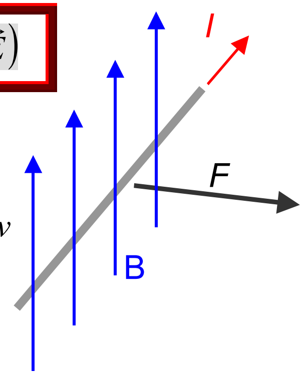
- **Kraft auf Leiter in Magnetfeld**

Leiter: Länge l, Querschnittsfl. A

N_e Elektronen , Geschwindigkeit v

Elektronendichte $n = \dfrac{N_e}{A \cdot l}$

Strom : $I = enA \cdot |\vec{v}|$



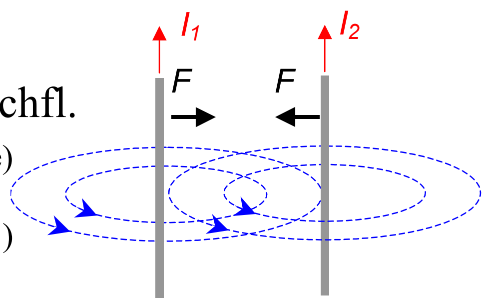
L.-Kraft $\quad \vec{F} = (-e) \cdot N_e \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = -e \cdot n \cdot Al \cdot (\vec{v} \times \vec{B}).$

Für $\vec{v} \perp \vec{B}$ … $\boxed{|\vec{F}| = I \cdot l \cdot |\vec{B}|}$

- **Kraft zw. 2 stromdurchfl. Leitern** (parallele Drähte)

➤ abstoßend / anziehend
(abh. von Stromrichtungen!)

$$|\vec{F}| = I_1 \cdot l \cdot |\vec{B}_2(r)| = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$



☞ **SI**-Definition des Ampere: $\quad \Rightarrow \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

1 A ⇨ 1 m Abstd., Kraft pro m Länge = 2 10^{-7} N

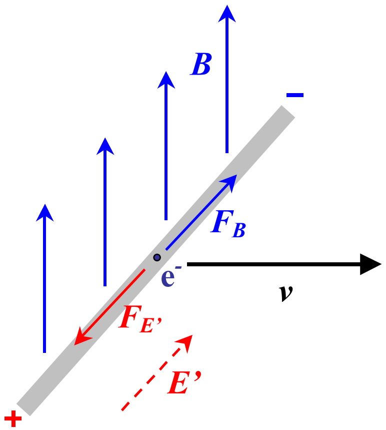
Induktion

➤ Leiter bewegt sich quer zu B-Feld

➤ Elektronen ($q < 0$!) werden durch Lorentz-Kraft $\boldsymbol{F_B}$ verschoben

➤ elektr. <u>Gegen</u>feld $\boldsymbol{E'}$, elektrostatische Kraft $\boldsymbol{F_{E'}}$ kompensiert L-Kraft:

$$q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) + q\vec{E}' = \vec{0}$$



➤ Potentialdifferenz an den Enden: $|U| = |\Delta\varphi| = |l \cdot E'| = lvB$!

➤ **Laborsystem**:

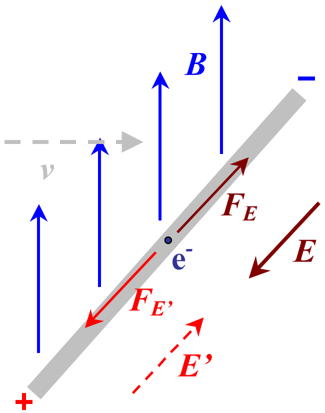
☞ Ladungen im Draht werden bewegt

☞ Lorentzkraft verschiebt Ladungen

➤ **Mitbewegtes Bezugssystem:**

☞ Ladungen ruhen

☞ **keine** Lorentzkraft **!**

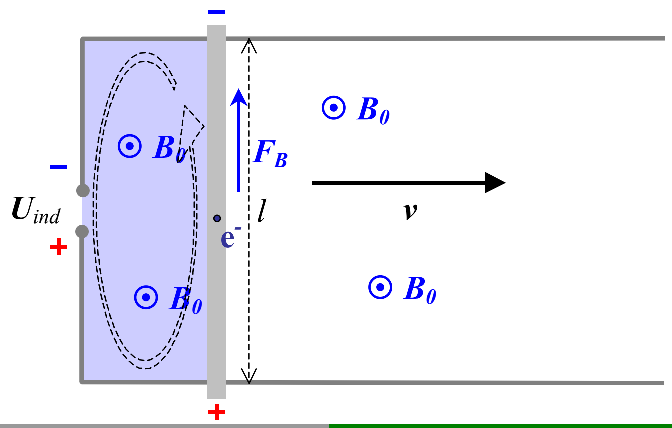


➤ **B-Feld** (Lab.) ⇨ **E-Feld** (bew. Sys.) !

☞ **E-Feld** verschiebt Ladungen !

$$\boxed{\textbf{B-Feld (Lab.)} \Rightarrow \textbf{E-Feld (bew. Sys.)}: \quad \vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}}$$

Magnetischer Fluss, Induktionsgesetz



Lab-System	mitbew. System
➢ L-Kraft verschiebt Ladungen $q\cdot\left(\vec{v}\times\vec{B}\right)+q\vec{E}'=\vec{0}$	➢ E-Feld ($\vec{E}=\vec{v}\times\vec{B}$) verschiebt Ladungen $q\vec{E}+q\vec{E}'=\vec{0}$
➢ Spannung an (oberer) Klemme: $U_{ind}=l\cdot E'=-lvB$	➢ Spannung an (oberer) Klemme: $U_{ind}=l\cdot E'=-lvB$

➢ **Magnetischer Fluss** : $\Phi=\int_A \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{a}$

hier: homogenes Feld! ⇨ $\Phi=\int_A \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{a}=B_0 A$

Fläche A : $A=l\cdot vt$ ⇨ $\Phi=B_0 lv\cdot t$

➢ **Veränd**. des magn. Flusses: $\dot{\Phi}=\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=B_0 lv$

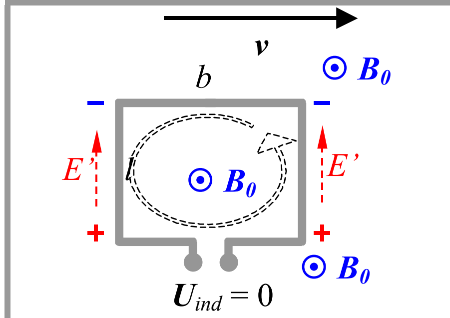
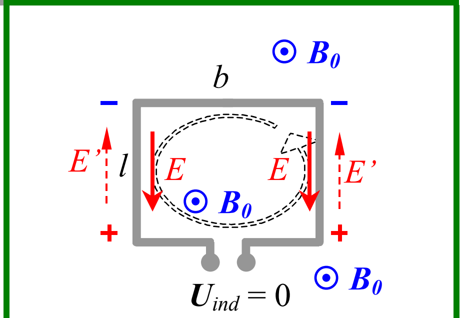
Induktionsgesetz: $U_{ind}=-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$

Gilt $U_{ind}=-\dot{\Phi}$ auch, wenn der magnetische Fluss sich verändert **ohne** dass sich ein Leiter bewegt **?**

Induktionsgesetz

➢ Bewegung einer rechteckigen Leiterschleife (LS) im homogenen / *in*homogenen Magnetfeld

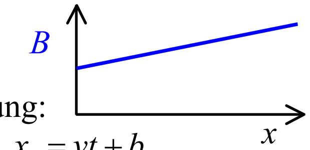
a) Homogenes Magnetfeld

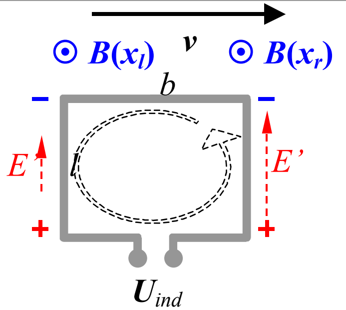
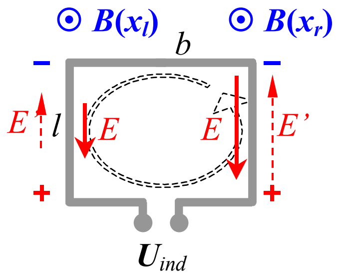
Lab-System	mitbew. System
	
➢ L-Kraft verschiebt Ladungen ➢ Gegenfeld *E'*	➢ E-Feld $\vec{E}=\vec{v}\times\vec{B}$ verschiebt Ladungen ➢ Gegenfeld *E'*
➢ links/rechts gleich ➢ Klemme: $U_{ind}=0$!	➢ links/rechts gleich ➢ Klemme: $U_{ind}=0$!
➢ Magn. Fluss zeitl. konst. $\Phi=\int_A \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{a}=B_0\cdot lb=\mathrm{const.}$ $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=0$	➢ Magn. Fluss zeitl. konst. $\Phi=\int_A \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{a}=B_0\cdot lb=\mathrm{const.}$ $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=0$ ➢ ***kein*** elektr. ***Wirbel***feld ! $U_{ind}=\oint_{LS}\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=0$

Induktionsgesetz

- Bewegung einer rechteckigen Leiterschleife im homogenen / ***in***homogenen Magnetfeld

b) ***In***homogenes Magnetfeld
z. B. $B(x) = B_0 + C \cdot x$
Leiterschleife bewegt sich in x-Richtung:
linke Seite: $x_l = vt$; rechte Seite: $x_r = vt + b$

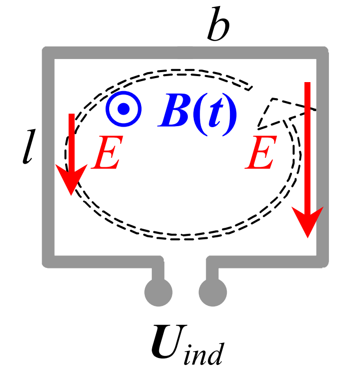


Lab-System	**mitbew. System**
	
L-Kraft	E-Feld $\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$
B-Feld links ≠ *B*-Feld rechts $B(x_l) \neq B(x_r)$	*E*-Feld links ≠ *E*-Feld rechts $E(x_l) \neq E(x_r)$
Klemme: $U_{ind} = U_l - U_r \neq 0$! $U_{ind} = lv \cdot (B(x_l) - B(x_r))$ $= -lv \cdot Cb$	elektr. ***Wirbel***feld $U_{ind} = l(E(x_l) - E(x_r))$ $= -lvCb$
Leiterschleife bewegt sich im ***in***homogenen B-Feld	Leiterschleife **ruht**, **zeitabhängiges** *B*-Feld
Magn. Fluss zeitabhängig $\Phi(t) = \{B_0 + C \cdot \underbrace{(vt + \frac{b}{2})}_{x_{\text{Mitte}}}\} \cdot lb$ $\frac{d\Phi}{dt} = lbCv \neq 0$	Magn. Fluss zeitabhängig $\Phi(t) = \{B_0 + C \cdot (vt + \frac{b}{2})\} \cdot lb$ $\frac{d\Phi}{dt} = lbCv \neq 0$

Induktionsgesetz

Mitbewegtes System

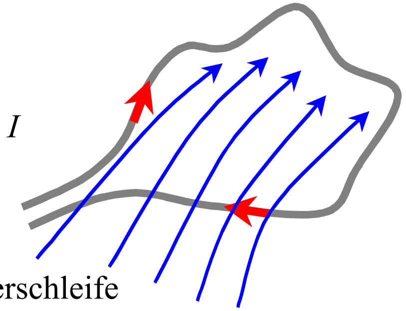
- Für einen **Beobachter** spielt es keine Rolle, warum sich das *B*-Feld bzw. der magnetische Fluss ändert!
- **Jede** Änderung $\frac{d\Phi}{dt}$ des magnetischen Flusses führt zu einem **elektrischen Wirbelfeld**!



- Elektr. Wirbelfeld ⇨ Induktionsspannung
  $U_{ind} = \oint_{LS} \vec{E} \cdot d\vec{s} \neq 0$

- Induktionsgesetz: $U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$
- Veränderung des magn. Flusses
  ⇘Elektr. ***Wirbel***feld: $\oint_{LS} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \oint_{A} \vec{B} \cdot d\vec{a}$

Selbstinduktion



- Leiterschleife Strom I
- Magnetfeld $B \sim I$
- magn. Fluss $\Phi = \int_A \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{a} \sim I$
- Def. Induktivität L: $\Phi = L \cdot I$

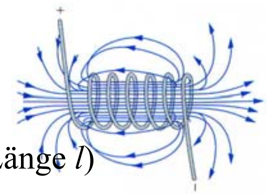
Veränderung des Stroms in der Leiterschleife

↳ Veränderung des ***B*-Feldes**, des **magn. Flusses**

↳ **Induktionsspannung** in der Leiterschleife

$$U_{ind} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -L \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

- **„ - “ Lenzsche Regel**:
  Induktionsspannung wirkt der Ursache entgegen !
- Magnetfeld einer Leiteranordnung
  ↳ **Induktivität** !



Beispiel:

- **Lange Zylinderspule** (N Windungen, Länge l)
- Feld: $B = \mu_0 \frac{N}{l} \cdot I$
  (homogenes Feld im Innern)

- Fluss : $\Phi = \underbrace{(NA) \cdot \mu_0 \frac{N}{l}}_{=L} \cdot I$ (in allen N Windungen zus. !)
- Induktivität: $L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$

d …