GET it digital

Modul 6: Magnetische Größen

Stand: 2. September 2025

Lizenz

Lernziele: Magnetische Größen

Die Studierenden

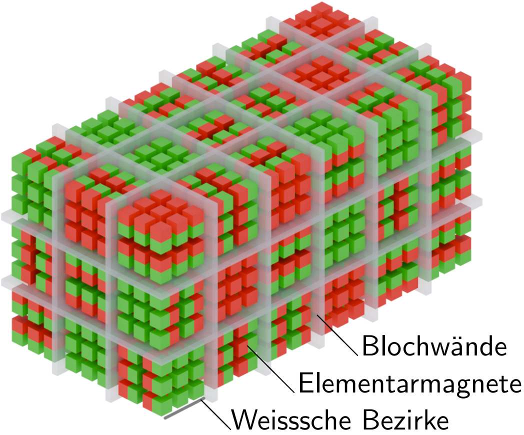
- kennen die grundlegenden magnetischen Größen im magnetischen Kreis.
- verstehen physikalischen Wirkprinzipien hinter den einzelnen magnetischen Größen.
- können die Wechselwirkungen der magnetischen Größen zueinander beschreiben.
- können die einzelnen Größen im magnetischen Kreis berechnen.

Lernziele

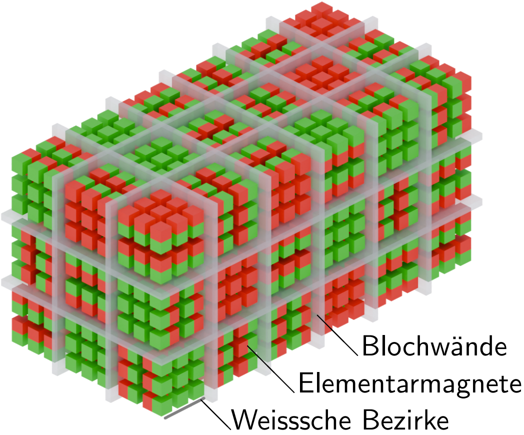
Lernziele: Einführung in den Magnetismus

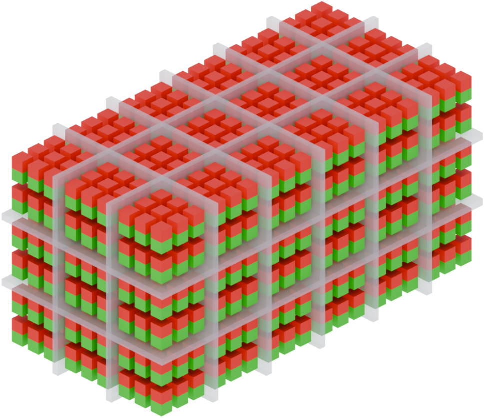
- Ihr kennt den Aufbau eines Permanentmagnet erklären
- Ihr könnt das magnetische Feld und seinen Eigenschaften beschreiben

Magnetismus

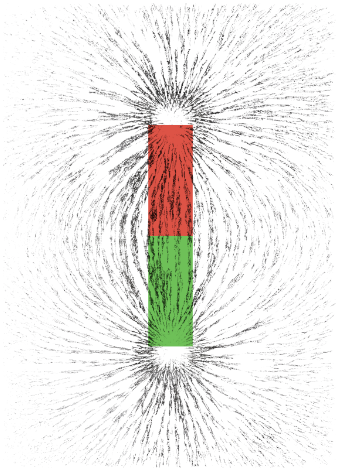


Magnetismus

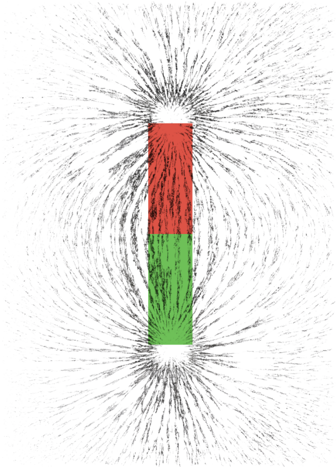


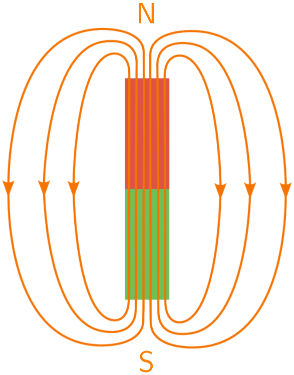


Magnetisches Feld

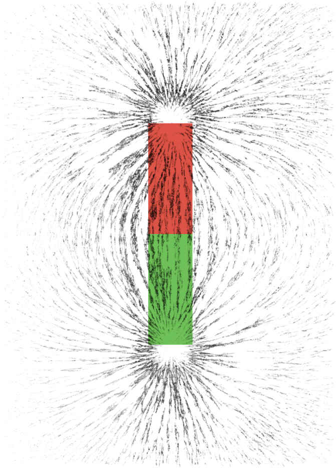


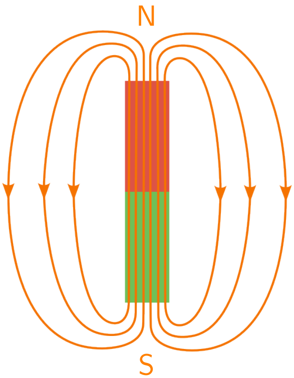
Magnetisches Feld





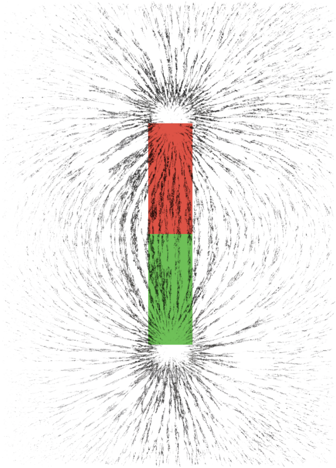
Magnetisches Feld

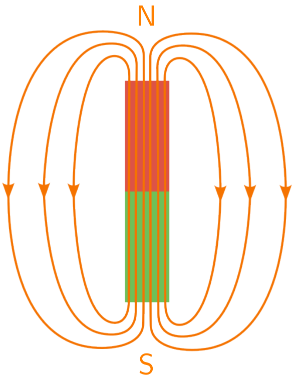




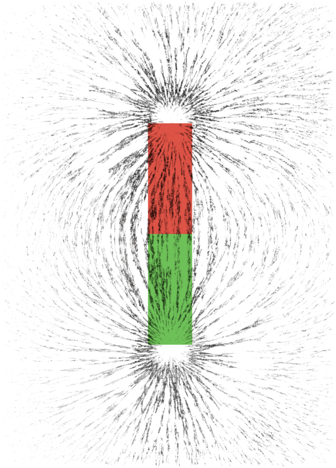
- Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen (Quellenfrei).

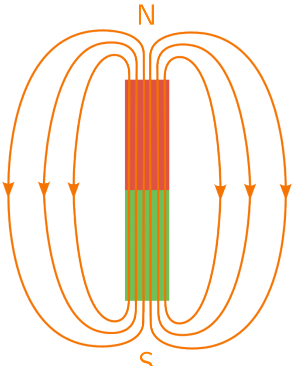
Magnetisches Feld





- Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen (Quellenfrei).
- Außerhalb des Magneten verlaufen sie vom Nord- zum Südpol.





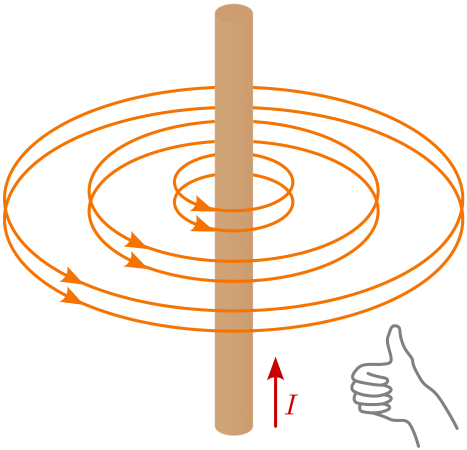
- Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen (Quellenfrei).
- Außerhalb des Magneten verlaufen sie vom Nord- zum Südpol.
- Sie treten immer senkrecht aus der Magnetoberfläche aus bzw. ein.

Lernziele

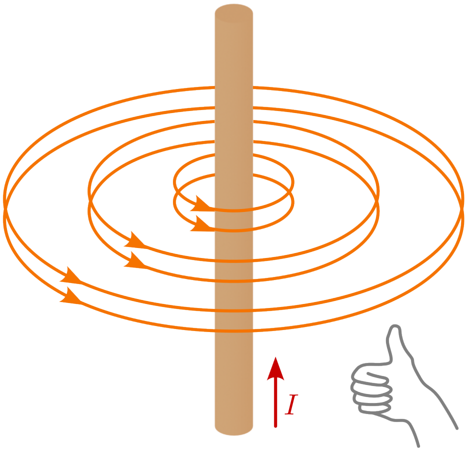
Lernziele: Einführung in den Magnetismus

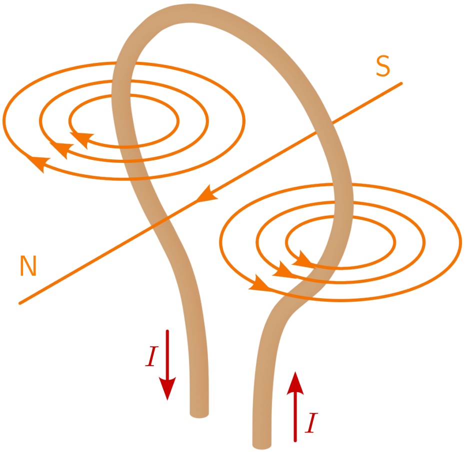
- Ihr könnt die Entstehung elektromagnetischer Felder erklären
- Ihr könnt das magnetische Durchflutung definieren
- Ihr könnt magnetische Felder berechnen

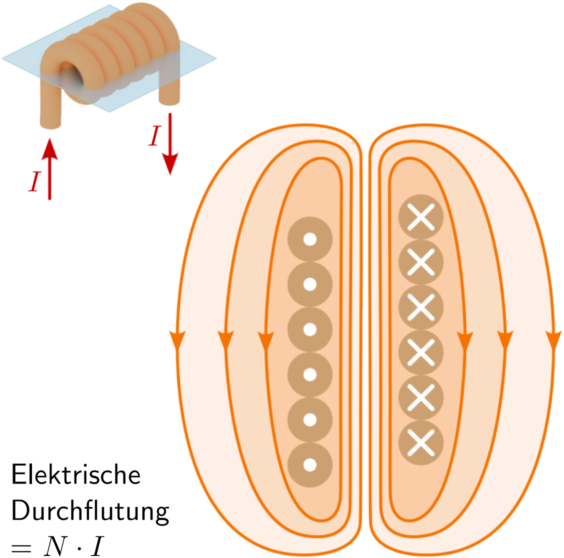
Elektromagnetismus



Elektromagnetismus

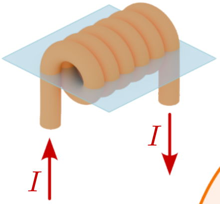


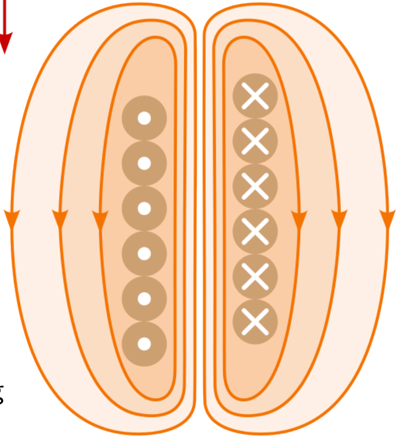




Durchflutung oder magnetische Spannung Θ (Theta) = Gesamtstrom einer durchfluteten Fläche

Elektrische Durchflutung $= N \cdot I$



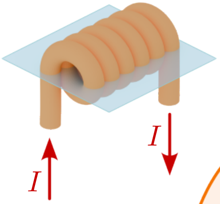


Elektrische Durchflutung $= N \cdot I$

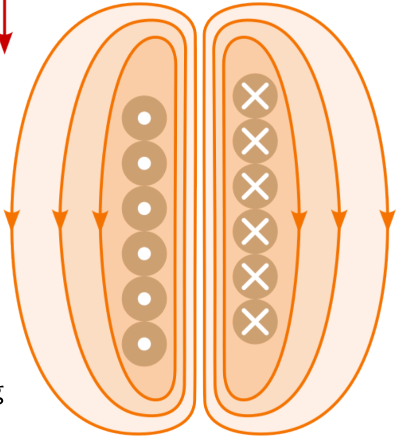
Durchflutung oder magnetische Spannung Θ (Theta) = Gesamtstrom einer durchfluteten Fläche

$$\Theta = \sum_{\mathrm{n}} I_{\mathrm{n}} = N \cdot I \qquad \text{(vereinfacht)}$$

Magnetische Durchflutung



Elektrische Durchflutung $= N \cdot I$

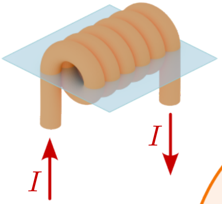


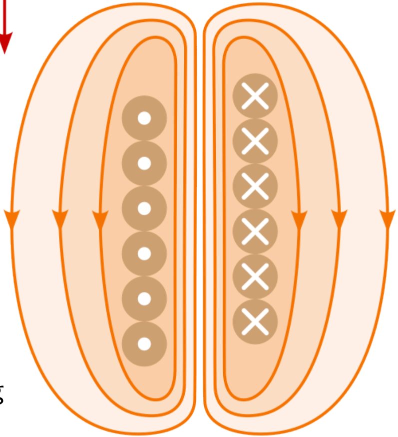
Durchflutung oder magnetische Spannung Θ (Theta) = Gesamtstrom einer durchfluteten Fläche

$$\Theta = \sum_{n} I_{n} = N \cdot I \qquad \text{(vereinfacht)}$$

$$\Theta = \iint_{A} \vec{J} \cdot \mathrm{d}\vec{A} \qquad \text{(allgemein)}$$

Magnetische Durchflutung





Elektrische Durchflutung $= N \cdot I$

Durchflutung oder magnetische Spannung Θ (Theta) $=$ Gesamtstrom einer durchfluteten Fläche

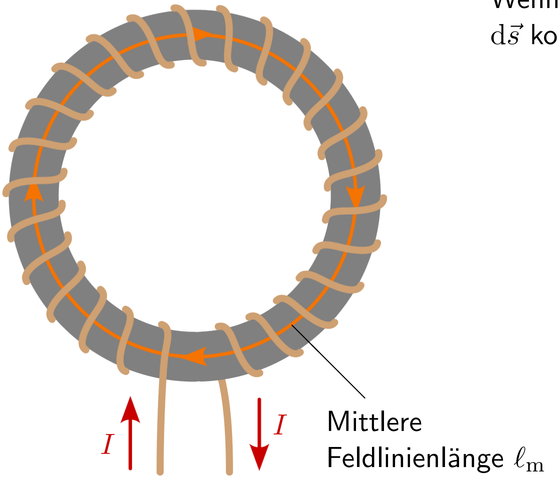
$$\Theta = \sum_{\mathrm{n}} I_{\mathrm{n}} = N \cdot I \qquad \text{(vereinfacht)}$$

$$\Theta = \iint_A \vec{J} \cdot \mathrm{d}\vec{A} \qquad \text{(allgemein)}$$

$$\Theta = \oint_s \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{s} \qquad [\mathrm{A}]$$

H ist die magnetische Feldstärke
s ist der Rand der Fläche A

Magnetische Feldstärke



Wenn $\vec{H}$ über dem Integrationsweg $\mathrm{d}\vec{s}$ konstant ist:

$$\oint_s \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = |\vec{H}| \cdot \ell_{\mathrm{m}}$$

$$|\vec{H}| = \frac{\Theta}{\ell_{\mathrm{m}}} \qquad \left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}\right]$$

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

$$\Theta = H \cdot \ell_{\mathrm{m}} = N \cdot I$$

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

$$\Theta = H \cdot \ell_{\mathrm{m}} = N \cdot I$$

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_{\mathrm{m}}}$$

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

$$\Theta = H \cdot \ell_\mathrm{m} = N \cdot I$$
$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_\mathrm{m}} = \frac{1000 \cdot 0{,}1\,\mathrm{A}}{0{,}5\,\mathrm{m}} = 200\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$$

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

$$\varTheta = H \cdot \ell_\mathrm{m} = N \cdot I$$

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_\mathrm{m}} = \frac{1000 \cdot 0{,}1\,\mathrm{A}}{0{,}5\,\mathrm{m}} = 200\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$$

Ein gerader Leiter wird mit einem Strom von $I = 50\,\mathrm{A}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke in einem Abstand von $r = 20\,\mathrm{cm}$?

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

$$\varTheta = H \cdot \ell_{\mathrm{m}} = N \cdot I$$
$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_{\mathrm{m}}} = \frac{1000 \cdot 0{,}1\ \mathrm{A}}{0{,}5\,\mathrm{m}} = 200\ \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$$

Ein gerader Leiter wird mit einem Strom von $I = 50\,\mathrm{A}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke in einem Abstand von $r = 20\,\mathrm{cm}$?

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_{\mathrm{m}}}$$

Beispiel: Magnetische Feldstärke

Eine Ringspule mit 1000 Windungen und einer mittleren Feldlinienlänge von $50\,\mathrm{cm}$ wird von einer Stromstärke von $100\,\mathrm{mA}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

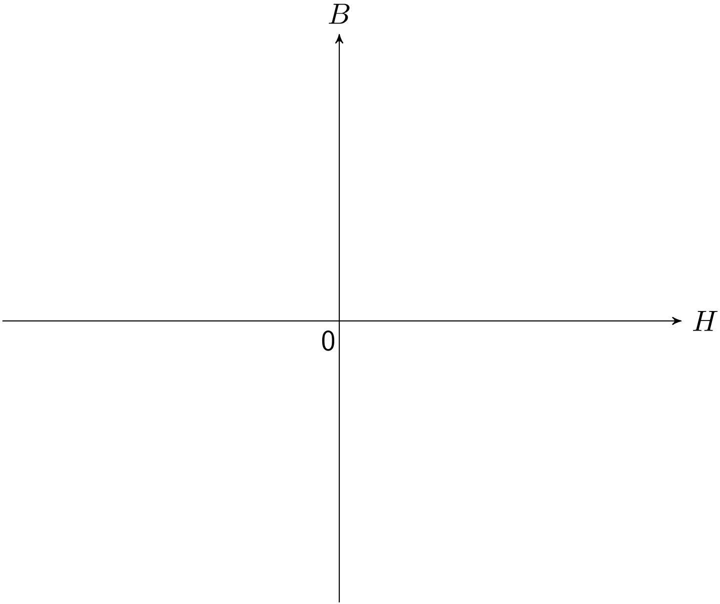
$$\Theta = H \cdot \ell_\mathrm{m} = N \cdot I$$

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_\mathrm{m}} = \frac{1000 \cdot 0{,}1\,\mathrm{A}}{0{,}5\,\mathrm{m}} = 200\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$$

Ein gerader Leiter wird mit einem Strom von $I = 50\,\mathrm{A}$ durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke in einem Abstand von $r = 20\,\mathrm{cm}$?

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell_\mathrm{m}} = \frac{1 \cdot 50\,\mathrm{A}}{2\pi \cdot 0{,}2\,\mathrm{m}} = 39{,}79\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$$

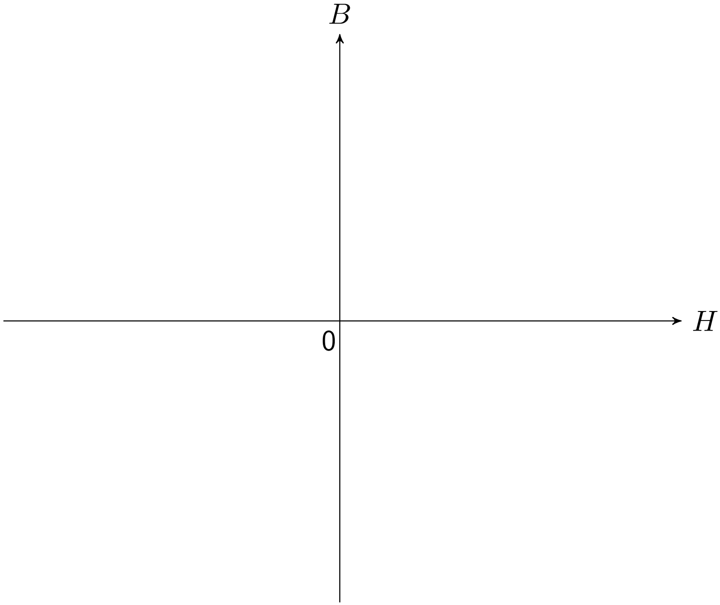
Magnetischer Fluss und Flussdichte



Magnetische Flussdichte:
$\vec{B}$ $\quad[\mathrm{T}]$
Permeabilität:
μ $\quad[1]$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_\mathrm{r} \cdot \vec{H}$$

Magnetischer Fluss und Flussdichte



Magnetische Flussdichte:

$\vec{B} \quad [\mathrm{T}]$

Permeabilität:

$\mu \quad [1]$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_\mathrm{r} \cdot \vec{H}$$

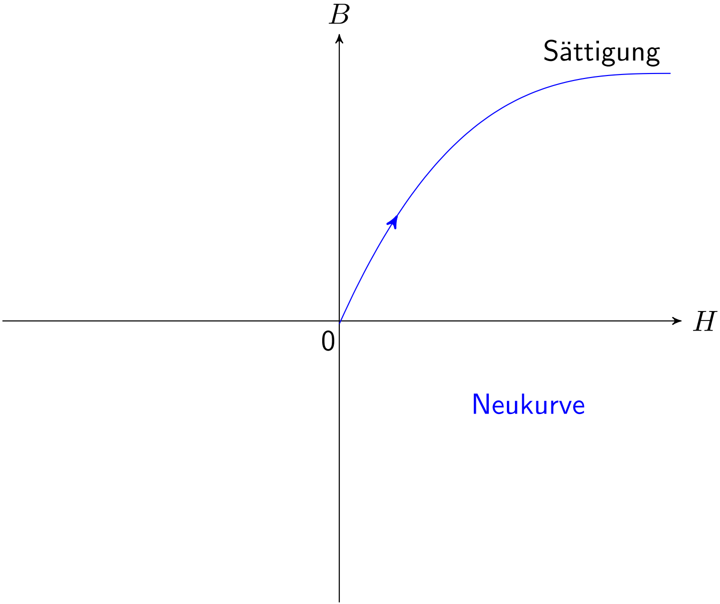
Magnetischer Fluss:

$\Phi \quad [\mathrm{Wb}]$

$$\Phi = \iint\limits_A \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{A}$$

$$\vec{B} = \frac{\Phi}{\vec{A}}$$

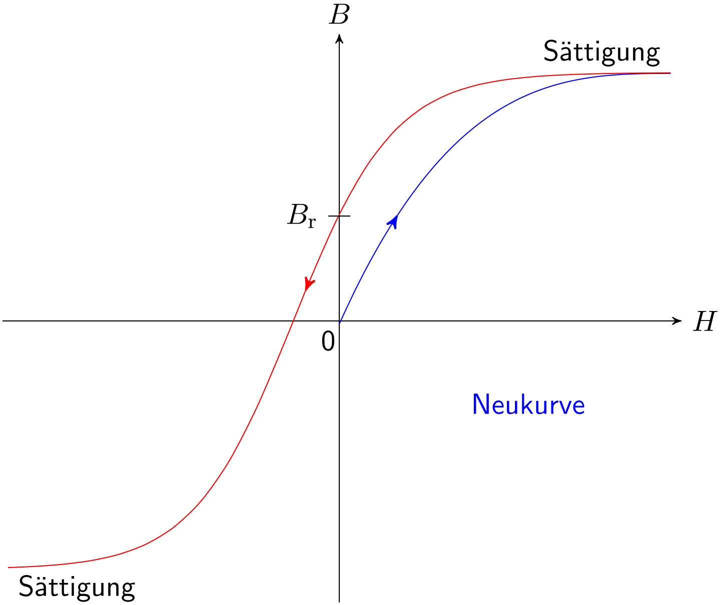
Magnetischer Fluss und Flussdichte



Hartmagnetisch:
$H_c > 10 \cdot 10^3 \,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
z. B. Permanentmagnete

Weichmagnetisch:
$H_c < 500 \,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
z. B. Aktoren

Magnetischer Fluss und Flussdichte

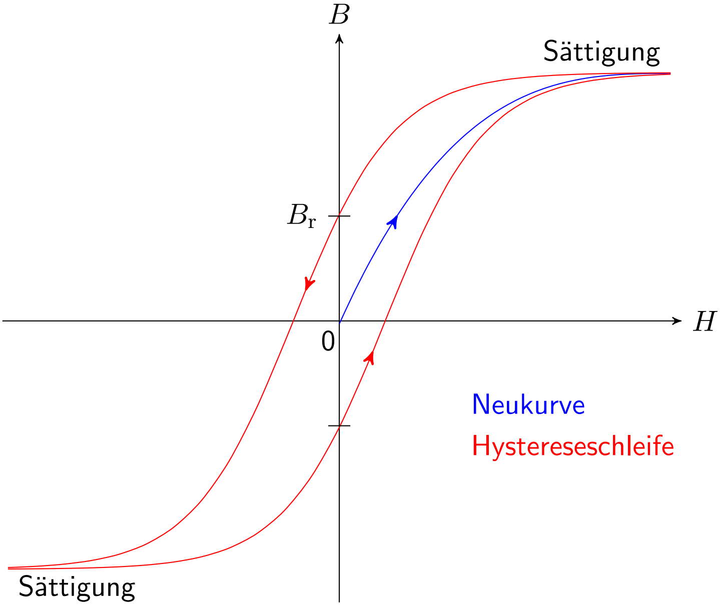


Hartmagnetisch:
$H_\mathrm{c} > 10 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
z. B. Permanentmagnete

Weichmagnetisch:
$H_\mathrm{c} < 500\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
z. B. Aktoren

Remanenzflußdichte B_r

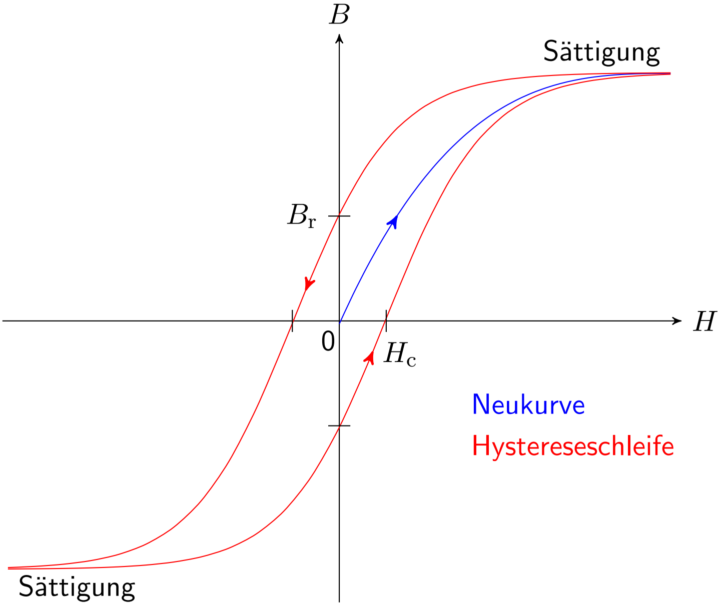
Magnetischer Fluss und Flussdichte



Hartmagnetisch:
$H_c > 10 \cdot 10^3 \, \frac{A}{m}$
z. B. Permanentmagnete

Weichmagnetisch:
$H_c < 500 \, \frac{A}{m}$
z. B. Aktoren

Remanenzflußdichte B_r



Hartmagnetisch:
$H_\mathrm{c} > 10 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
z. B. Permanentmagnete

Weichmagnetisch:
$H_\mathrm{c} < 500\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
z. B. Aktoren

Remanenzflußdichte B_r

Koerzitivfeldstärke H_c

Beispiel: Magnetische Flussdichte

Im Inneren einer dicht gewickelten Ringspule soll die magnetische Feldstärke $H = 100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$ erzeugt werden. Die Spule hat einen mittleren Radius von $5\,\mathrm{cm}$.

1. Berechnen Sie die erforderliche Stromstärke I wenn die Spule mit $N = 200$ Wicklungen versehen ist.

Beispiel: Magnetische Flussdichte

Im Inneren einer dicht gewickelten Ringspule soll die magnetische Feldstärke $H = 100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$ erzeugt werden. Die Spule hat einen mittleren Radius von $5\,\mathrm{cm}$.

1. Berechnen Sie die erforderliche Stromstärke I wenn die Spule mit $N = 200$ Wicklungen versehen ist.

$$\Theta = H \cdot \ell_{\mathrm{m}} = N \cdot I$$

$$I = \frac{H \cdot \ell_{\mathrm{m}}}{N} = \frac{100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}}{200} = 157{,}08\,\mathrm{mA}$$

Beispiel: Magnetische Flussdichte

Im Inneren einer dicht gewickelten Ringspule soll die magnetische Feldstärke $H = 100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$ erzeugt werden. Die Spule hat einen mittleren Radius von $5\,\mathrm{cm}$.

1. Berechnen Sie die erforderliche Stromstärke I wenn die Spule mit $N = 200$ Wicklungen versehen ist.

$$\Theta = H \cdot \ell_\mathrm{m} = N \cdot I$$

$$I = \frac{H \cdot \ell_\mathrm{m}}{N} = \frac{100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}}{200} = 157{,}08\,\mathrm{mA}$$

2. Wie groß wird die Flussdichte B im Falle einer Luftspule ($\mu_\mathrm{r} = 1$) oder einer eisengefüllten Spule ($\mu_\mathrm{r} = 2000$ im Arbeitspunkt)?

Im Inneren einer dicht gewickelten Ringspule soll die magnetische Feldstärke $H = 100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$ erzeugt werden. Die Spule hat einen mittleren Radius von $5\,\mathrm{cm}$.

1. Berechnen Sie die erforderliche Stromstärke I wenn die Spule mit $N = 200$ Wicklungen versehen ist.

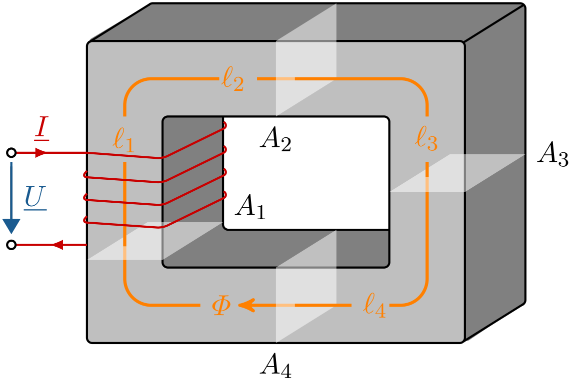
$$\Theta = H \cdot \ell_\mathrm{m} = N \cdot I$$

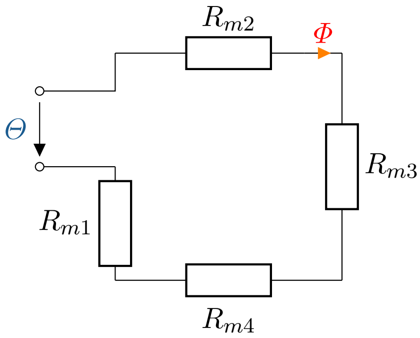
$$I = \frac{H \cdot \ell_\mathrm{m}}{N} = \frac{100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}}{200} = 157{,}08\,\mathrm{mA}$$

2. Wie groß wird die Flussdichte B im Falle einer Luftspule ($\mu_\mathrm{r} = 1$) oder einer eisengefüllten Spule ($\mu_\mathrm{r} = 2000$ im Arbeitspunkt)?

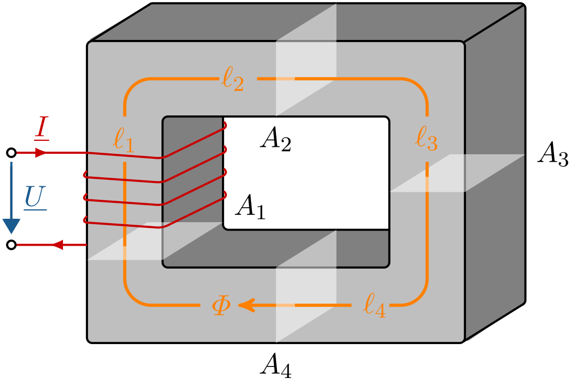
$$B_\mathrm{Luft} = \mu_0 \cdot \mu_\mathrm{r} \cdot H = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 100\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} = 125{,}6\,\mu\mathrm{T}$$

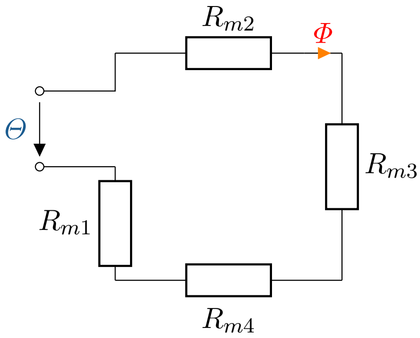
$$B_\mathrm{Eisen} = 2000 \cdot B_\mathrm{Luft} = 251{,}2\,\mathrm{mT}$$


I
U
ℓ_1
ℓ_2
ℓ_3
ℓ_4
A_1
A_2
A_3
A_4
Φ


R_{m2}
Φ
Θ
R_{m3}
R_{m1}
R_{m4}

Magnetischer Widerstand





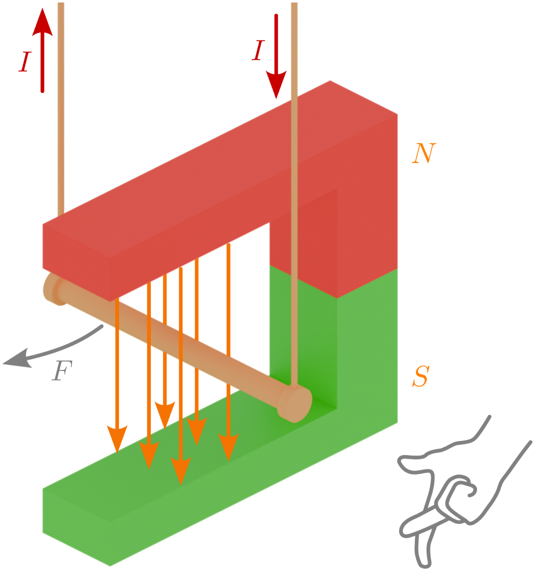
$$R_\mathrm{m} = \frac{\ell_\mathrm{m}}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A} \qquad \left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V} \cdot \mathrm{s}}\right]$$

Magnetischer Kreis

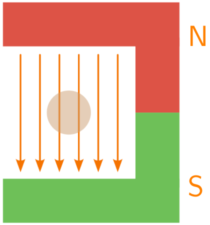
Analog zum elektrischen Ohmschen Gesetz gilt für den magnetischen Kreis:

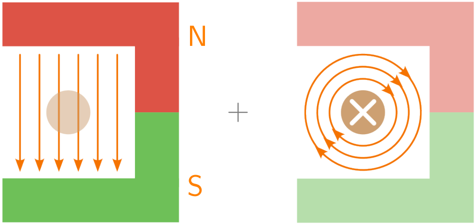
$$\Theta = R_{\mathrm{m}} \cdot \Phi$$

Lorentzkraft

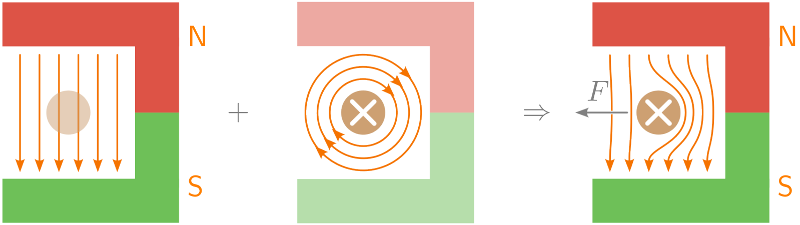


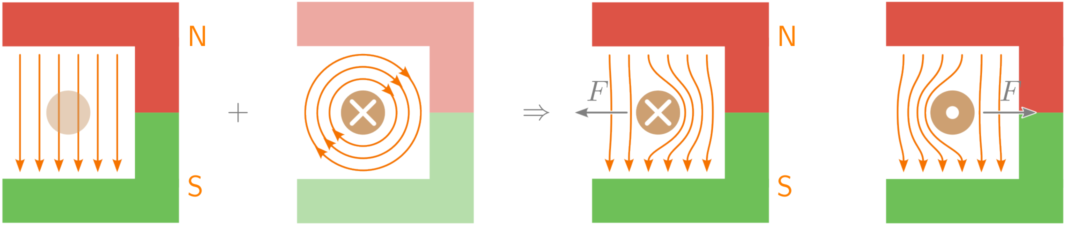
Lorentzkraft




N
S

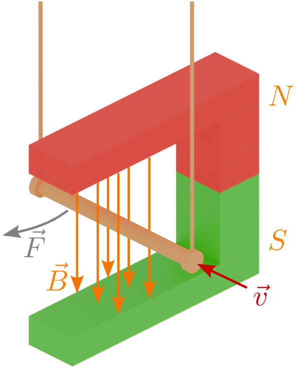
Lorentzkraft




N
S
+
⇒
F
N
S
F
N
S

Auf eine mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ bewegte Einheitsladung q im Magnetfeld $\vec{B}$ wirkt eine Kraft:

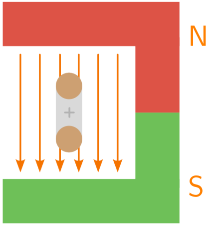
$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \cdot \vec{B})$$

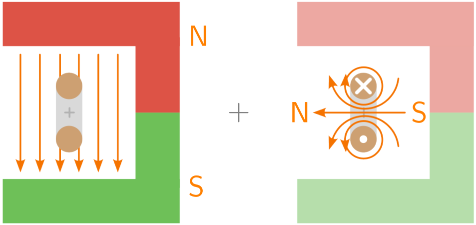


Lorentzkraft

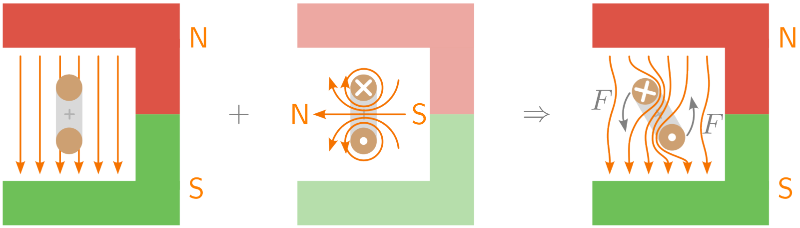
$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$$
$$F = I \cdot \ell \cdot N \cdot B \cdot \sin\alpha$$

Lorentzkraft

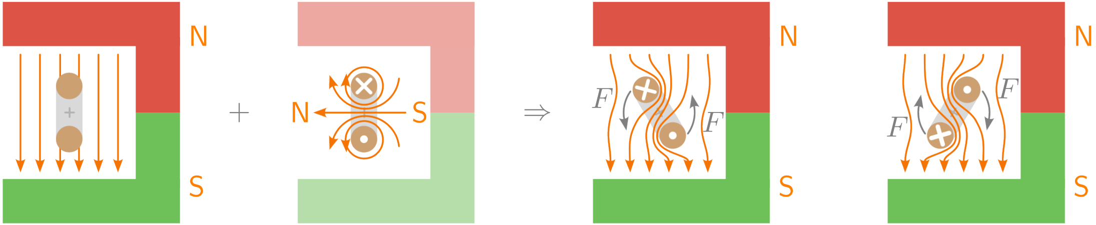



N
S
+
N
S

Lorentzkraft



Lorentzkraft



Beispiel: Lorentzkraft

Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von $B = 0{,}8\,\mathrm{T}$. Unter den Polen befinden sich insgesamt $N = 400$ Wicklungen, die mit einem Strom von $I = 10\,\mathrm{A}$ durchflossen werden. Die wirksame Leiterlänge ist $\ell = 150\,\mathrm{mm}$. Berechnen Sie die Kraft F am Umfang des Ankers.

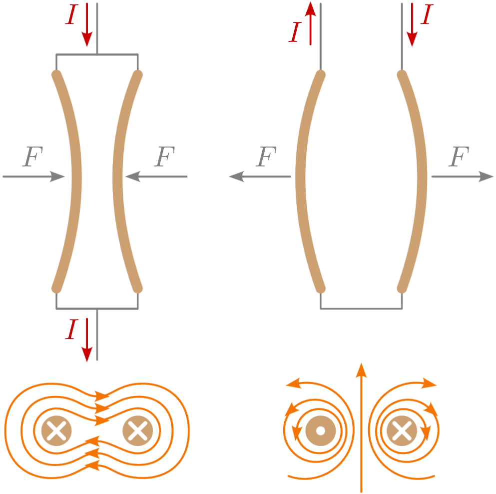
Beispiel: Lorentzkraft

Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von $B = 0{,}8\,\mathrm{T}$. Unter den Polen befinden sich insgesamt $N = 400$ Wicklungen, die mit einem Strom von $I = 10\,\mathrm{A}$ durchflossen werden. Die wirksame Leiterlänge ist $\ell = 150\,\mathrm{mm}$. Berechnen Sie die Kraft F am Umfang des Ankers.

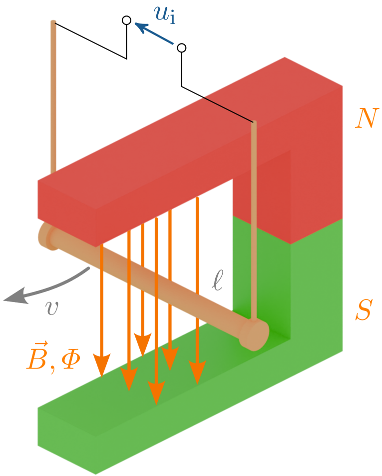
$$
\begin{aligned}
F &= B \cdot I \cdot \ell \cdot N \\
&= 0{,}8\,\tfrac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2} \cdot 10\,\mathrm{A} \cdot 0{,}15\,\mathrm{m} \cdot 400 \\
&= 480\,\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^3 \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^2} = 480\,\mathrm{N}
\end{aligned}
$$

Kraft zwischen zwei geraden, parallelen, dünnen und unendlich langen Leitern:

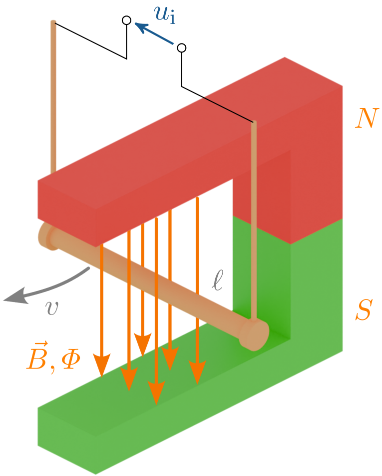
$$F_{12} = \frac{\ell \cdot \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Induktion



Induktion



$$u_{\mathrm{i}} = B \cdot \ell \cdot v \cdot N$$

Die Höhe der induzierten Spannung hängt ab von:

- der magnetischen Flussdichte B
- der Länge des Leiters im Magnetfeld ℓ
- der Geschwindigkeit der Bewegung oder Flussänderung v
- der Anzahl der Leiter im Magnetfeld N

Induktion

Allgemeines Induktionsgesetz:

$$u_\mathrm{i} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

Induktion

Allgemeines Induktionsgesetz:

$$u_\mathrm{i} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\mathit{\Phi}}{\mathrm{d}t}$$

Lenzsche Regel:

Ursache und Wirkung sind stets entgegengesetzt.

Induktivität

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \qquad [\mathrm{H}]$$

Induktivität

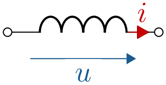
$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \qquad [\mathrm{H}]$$

$$u = -L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

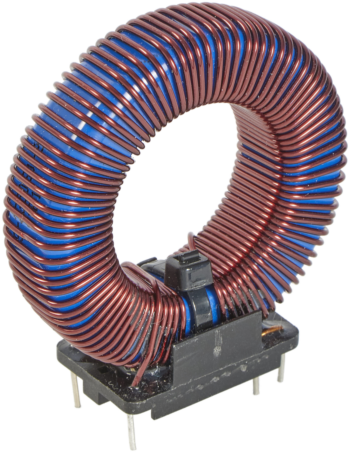
Induktivität

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \qquad [\mathrm{H}]$$

$$u = -L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$



Bestimmung der Induktivität



Bei einfachen geometrischen Strukturen kann die Induktivität über den magnetischen Widerstand bestimmt werden:

$$L = \frac{N^2}{R_\mathrm{m}}$$

Bestimmung der Induktivität

Weg 1 über die Feldgrößen:

1. Annahme einer Stromstärke I → Durchflutung $\Theta = N \cdot I$
2. Feldstärke berechnen $H = \frac{\Theta}{\ell_\mathrm{m}}$
3. Flussdichte berechnen $B = \mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot H$
4. Magnetischen Fluss bestimmen $\Phi = \iint\limits_A \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{A}$
5. Induktivität $L = \frac{N \cdot \Phi}{I}$

Bestimmung der Induktivität

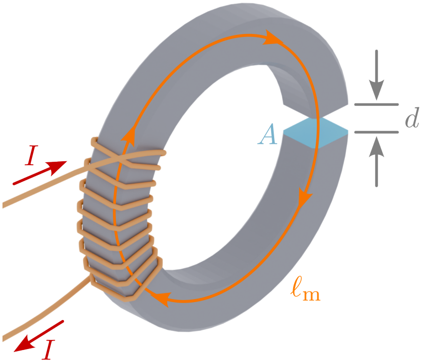
Weg 1 über die Feldgrößen:

1. Annahme einer Stromstärke $I \rightarrow$ Durchflutung $\Theta = N \cdot I$
2. Feldstärke berechnen $H = \frac{\Theta}{\ell_\mathrm{m}}$
3. Flussdichte berechnen $B = \mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot H$
4. Magnetischen Fluss bestimmen $\Phi = \iint\limits_A \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{A}$
5. Induktivität $L = \frac{N \cdot \Phi}{I}$

Weg 2 über den magnetischen Widerstand:

1. Magnetkreis in Teilabschnitte zerlegen und magnetischen Widerstand R_m berechnen $R_\mathrm{m} = \frac{\ell_\mathrm{m}}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A}$
2. Gesamtwiderstand berechnen (bei Reihenstruktur) $R_{m,\mathrm{ges}} = \sum R_\mathrm{m}$
3. Induktivität $L = \frac{N^2}{R_{m,\mathrm{ges}}}$

Bei einer Spule mit Eisenkern und Luftspalt soll der Einfluss des Luftspaltes d auf die Induktivität L untersucht werden. Die Spule hat $N = 100$ Windungen. Die relative Permeabilität beträgt $\mu_\mathrm{r} = 2000$. Die mittlere Eisenkernlänge beträgt $\ell_\mathrm{m} = 5\,\mathrm{cm}$. Die Querschnittsfläche beträgt $A = 1\,\mathrm{cm}^2$.



Beispiel: Induktivität

- Der Luftspalt ist vorerst nicht vorhanden: $d = 0$. Wie groß ist die Induktivität L?

Beispiel: Induktivität

- Der Luftspalt ist vorerst nicht vorhanden: $d = 0$. Wie groß ist die Induktivität L?

$$R_\mathrm{m} = \frac{\ell_\mathrm{m}}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A}$$
$$L = \frac{N^2}{R_\mathrm{m}}$$

Beispiel: Induktivität

- Der Luftspalt ist vorerst nicht vorhanden: $d = 0$. Wie groß ist die Induktivität L?

$$R_\mathrm{m} = \frac{\ell_\mathrm{m}}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A}$$

$$L = \frac{N^2}{R_\mathrm{m}}$$

$$L = \frac{100^2 \cdot 2000 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2}{0{,}05\,\mathrm{m}}$$

Beispiel: Induktivität

- Der Luftspalt ist vorerst nicht vorhanden: $d = 0$. Wie groß ist die Induktivität L?

$$R_\mathrm{m} = \frac{\ell_\mathrm{m}}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A}$$

$$L = \frac{N^2}{R_\mathrm{m}}$$

$$L = \frac{100^2 \cdot 2000 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2}{0{,}05\,\mathrm{m}}$$

$$L = 0{,}05\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}} = 50\,\mathrm{mH}$$

Beispiel: Induktivität

- Der Luftspalt beträgt nun $d = 1\,\mathrm{mm}$. Wie groß ist die Induktivität?

- Der Luftspalt beträgt nun $d = 1\,\mathrm{mm}$. Wie groß ist die Induktivität?

$$
\begin{aligned}
R_\mathrm{m} &= R_{m,\mathrm{Fe}} + R_{m,\mathrm{L}} \\
&= \frac{\ell_\mathrm{m} - d}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A} + \frac{d}{\mu_0 \cdot A}
\end{aligned}
$$

- Der Luftspalt beträgt nun $d = 1\,\mathrm{mm}$. Wie groß ist die Induktivität?

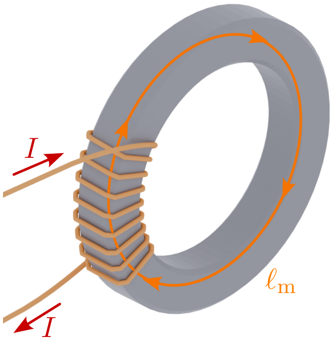
$$
\begin{aligned}
R_\mathrm{m} &= R_{m,\mathrm{Fe}} + R_{m,\mathrm{L}} \\
&= \frac{\ell_\mathrm{m} - d}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A} + \frac{d}{\mu_0 \cdot A} \\
&= \frac{0{,}05\,\mathrm{m} - 0{,}001\,\mathrm{m}}{2000 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2} + \frac{0{,}001\,\mathrm{m}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2}
\end{aligned}
$$

Beispiel: Induktivität

- Der Luftspalt beträgt nun $d = 1\,\mathrm{mm}$. Wie groß ist die Induktivität?

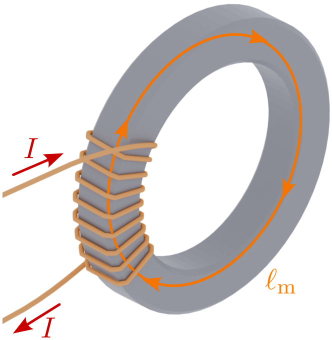
$$
\begin{aligned}
R_\mathrm{m} &= R_{m,\mathrm{Fe}} + R_{m,\mathrm{L}} \\
&= \frac{\ell_\mathrm{m} - d}{\mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \cdot A} + \frac{d}{\mu_0 \cdot A} \\
&= \frac{0{,}05\,\mathrm{m} - 0{,}001\,\mathrm{m}}{2000 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2} + \frac{0{,}001\,\mathrm{m}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2} \\
L &= 1{,}226\,\mathrm{mH}
\end{aligned}
$$

Energie im magnetischen Feld



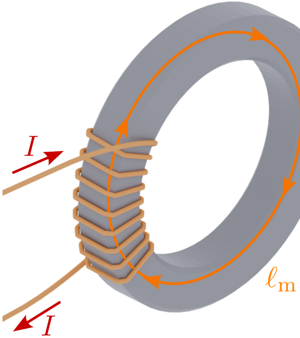
$$p = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = u \cdot i \qquad u = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

Energie im magnetischen Feld



$$p = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = u \cdot i \qquad u = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$\mathrm{d}W_{\mathrm{m}} = u_{\mathrm{L}} \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}t = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}t = L \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}i_{\mathrm{L}}$$



$$p = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = u \cdot i \qquad u = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$\mathrm{d}W_{\mathrm{m}} = u_{\mathrm{L}} \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}t = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}t = L \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}i_{\mathrm{L}}$$

$$W_{\mathrm{m}} = L \cdot \int_0^I i_{\mathrm{L}} \cdot \mathrm{d}i_{\mathrm{L}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot N \cdot \varPhi \cdot I$$

Berechnung über die Feldgrößen:

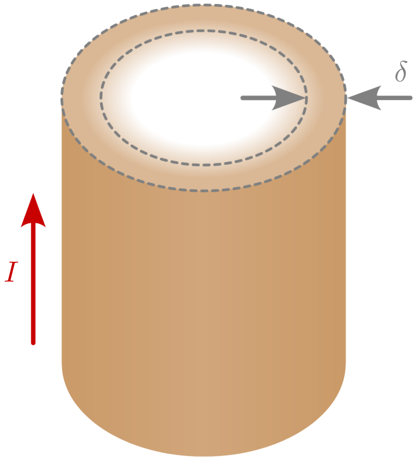
$$\begin{aligned} W_\mathrm{m} &= \ell_\mathrm{m} \cdot A \cdot \int\limits_0^{B_L} H \,\mathrm{d}B \\ &= \ell_\mathrm{m} \cdot A \cdot \frac{B_\mathrm{L}^2}{2 \cdot \mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0} \end{aligned} \tag{1}$$

Berechnung über die Feldgrößen:

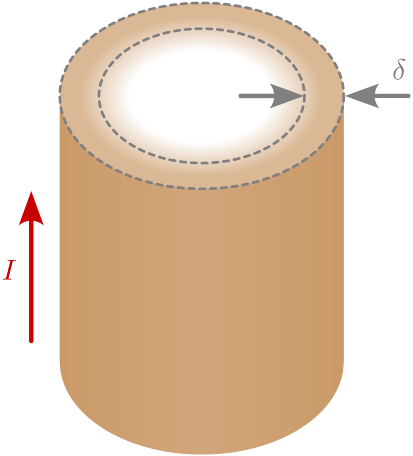
$$\begin{aligned} W_\mathrm{m} &= \ell_\mathrm{m} \cdot A \cdot \int\limits_0^{B_L} H \,\mathrm{d}B \\ &= \ell_\mathrm{m} \cdot A \cdot \frac{B_\mathrm{L}^2}{2 \cdot \mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0} \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{W_\mathrm{m}}{V} = \frac{B_\mathrm{L}^2}{2 \cdot \mu_0} = \frac{F}{A}$$

Skin-Effekt



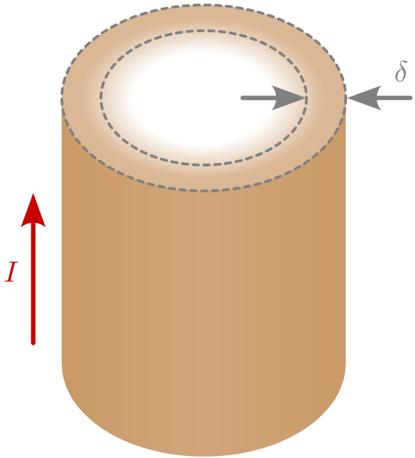
Wechselspannung nutzt nur die Oberfläche eines Leiters.



Wechselspannung nutzt nur die Oberfläche eines Leiters.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{R}}}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

Skin-Effekt



Wechselspannung nutzt nur die Oberfläche eines Leiters.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_\mathrm{R}}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

Frequenz	**Skin-Tiefe** δ_{Cu}
$5\,\mathrm{Hz}$	$29{,}7\,\mathrm{mm}$
$50\,\mathrm{Hz}$	$9{,}38\,\mathrm{mm}$
$500\,\mathrm{Hz}$	$2{,}97\,\mathrm{mm}$
$500\,\mathrm{kHz}$	$93{,}8\,\mu\mathrm{m}$

Beispiel: Skin-Tiefe

Ein Kupferleiter wird mit Strom der Frequenz $f = 50\,\mathrm{Hz}$ durchflossen. Für den Leiter sind folgende Werte gegeben:

- Absolute magnetische Permeabilität: $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$
- Spezifischer Widerstand: $\rho_R = 0{,}01721\,\frac{\Omega\cdot\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

Berechnen Sie die Skin-Tiefe δ des Leiters.

Beispiel: Skin-Tiefe

Ein Kupferleiter wird mit Strom der Frequenz $f = 50\,\mathrm{Hz}$ durchflossen. Für den Leiter sind folgende Werte gegeben:

- Absolute magnetische Permeabilität: $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$
- Spezifischer Widerstand: $\rho_R = 0{,}01721\,\frac{\Omega\cdot\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

Berechnen Sie die Skin-Tiefe δ des Leiters.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_\mathrm{R}}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

Beispiel: Skin-Tiefe

Ein Kupferleiter wird mit Strom der Frequenz $f = 50\,\mathrm{Hz}$ durchflossen. Für den Leiter sind folgende Werte gegeben:

- Absolute magnetische Permeabilität: $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$
- Spezifischer Widerstand: $\rho_R = 0{,}01721\,\frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

Berechnen Sie die Skin-Tiefe δ des Leiters.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_\mathrm{R}}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{0{,}01721\,\frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}}{\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 50\,\mathrm{Hz}}}$$

Beispiel: Skin-Tiefe

Ein Kupferleiter wird mit Strom der Frequenz $f = 50\,\mathrm{Hz}$ durchflossen. Für den Leiter sind folgende Werte gegeben:

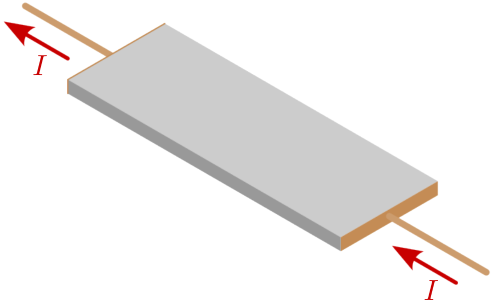
- Absolute magnetische Permeabilität: $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$
- Spezifischer Widerstand: $\rho_R = 0{,}01721\,\frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

Berechnen Sie die Skin-Tiefe δ des Leiters.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_\mathrm{R}}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

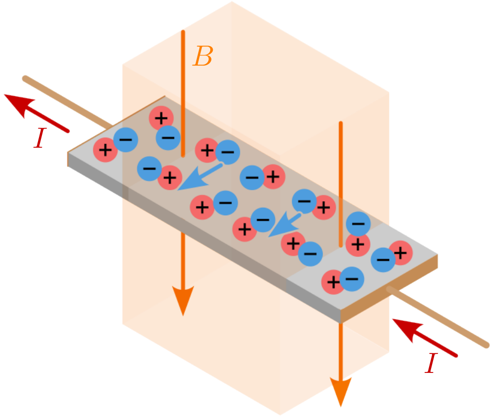
$$\delta = \sqrt{\frac{0{,}01721\,\frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}}{\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \cdot 50\,\mathrm{Hz}}}$$

$$\delta \approx 9{,}34\,\mathrm{mm}$$



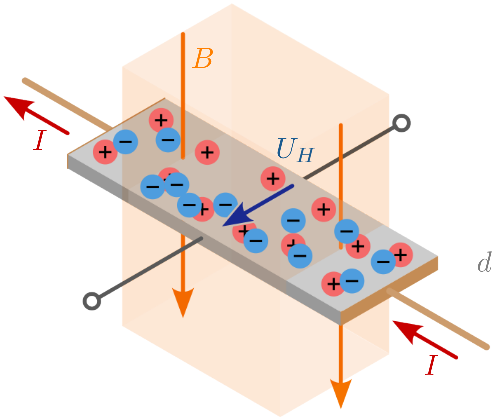
- Ein Leiterplättchen wird mit Strom I durchflossen.

Hall-Effekt



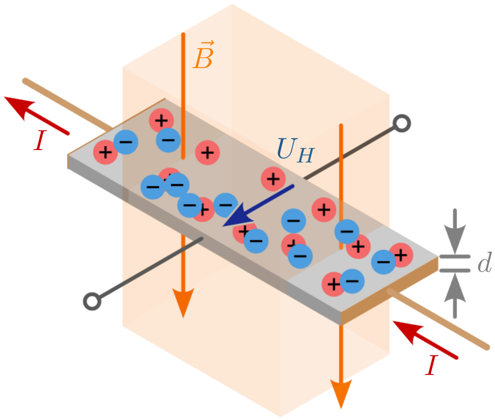
- Ein Leiterplättchen wird mit Strom I durchflossen.
- Die Lorentzkraft lenkt die bewegten Ladungsträger an den Rand ab.

Hall-Effekt



- Ein Leiterplättchen wird mit Strom I durchflossen.
- Die Lorentzkraft lenkt die bewegten Ladungsträger an den Rand ab.
- Durch die Ladungsverschiebung wird ein elektrisches Feld erzeugt.

Hall-Effekt



- Ein Leiterplättchen wird mit Strom I durchflossen.
- Die Lorentzkraft lenkt die bewegten Ladungsträger an den Rand ab.
- Durch die Ladungsverschiebung wird ein elektrisches Feld erzeugt.
- Dieses wird als Hall-Spannung U_H gemessen.

$$U_\mathrm{H} = A_\mathrm{H} \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

Beispiel: Hall-Spannung

Ein mit der Stromstärke $I = 2\,\mathrm{A}$ stromdurchflossenes Metallplättchen mit der Dicke $d = 1\,\mathrm{cm}$ befindet sich in einem Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 0{,}5\,\mathrm{T}$. Die Hall-Konstante des Materials beträgt $A_{\mathrm{H}} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{C}}$. Berechnen Sie die Hall-Spannung.

Beispiel: Hall-Spannung

Ein mit der Stromstärke $I = 2\,\mathrm{A}$ stromdurchflossenes Metallplättchen mit der Dicke $d = 1\,\mathrm{cm}$ befindet sich in einem Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 0{,}5\,\mathrm{T}$. Die Hall-Konstante des Materials beträgt $A_\mathrm{H} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{C}}$. Berechnen Sie die Hall-Spannung.

$$U_\mathrm{H} = A_\mathrm{H} \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

Beispiel: Hall-Spannung

Ein mit der Stromstärke $I = 2\,\mathrm{A}$ stromdurchflossenes Metallplättchen mit der Dicke $d = 1\,\mathrm{cm}$ befindet sich in einem Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 0{,}5\,\mathrm{T}$. Die Hall-Konstante des Materials beträgt $A_\mathrm{H} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{C}}$. Berechnen Sie die Hall-Spannung.

$$U_\mathrm{H} = A_\mathrm{H} \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

$$U_\mathrm{H} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{C}} \cdot \frac{2\,\mathrm{A} \cdot 0{,}5\,\mathrm{T}}{0{,}01\,\mathrm{m}}$$

Beispiel: Hall-Spannung

Ein mit der Stromstärke $I = 2\,\mathrm{A}$ stromdurchflossenes Metallplättchen mit der Dicke $d = 1\,\mathrm{cm}$ befindet sich in einem Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 0{,}5\,\mathrm{T}$. Die Hall-Konstante des Materials beträgt $A_\mathrm{H} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{C}}$. Berechnen Sie die Hall-Spannung.

$$U_\mathrm{H} = A_\mathrm{H} \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

$$U_\mathrm{H} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{C}} \cdot \frac{2\,\mathrm{A} \cdot 0{,}5\,\mathrm{T}}{0{,}01\,\mathrm{m}}$$

$$U_\mathrm{H} = 0{,}32\,\mathrm{V}$$