

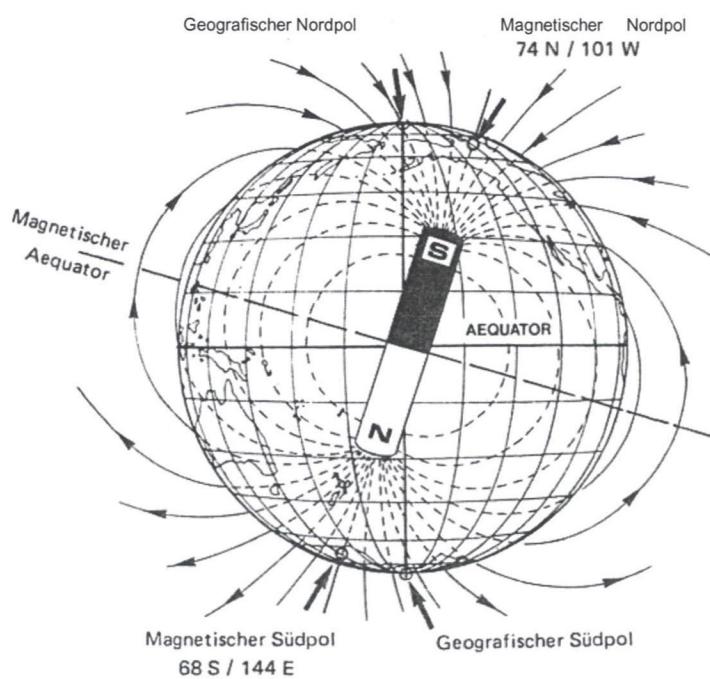
## 4 Magnetisches Feld, Spule

### 4.1 Erdmagnetismus

Seit über 1000 Jahren wird von Chinesen und Mongolen der Erdmagnetismus zur Navigation verwendet. Auch heutzutage wird der Kompass in der Luft- und Seefahrt eingesetzt. Auf den nächsten drei Seiten befindet sich ein Auszug von einem Pilotenlehrgang der Flugschule Altenrhein. Lesen Sie diesen durch und markieren Sie sich die relevanten Fachbegriffe. Übrigens, da in der Luftfahrt die Kommunikation in Englisch abgehalten wird, sind die Englischen Übersetzungen im Text erwähnt.

#### 4.1.1 Erdmagnetfeld

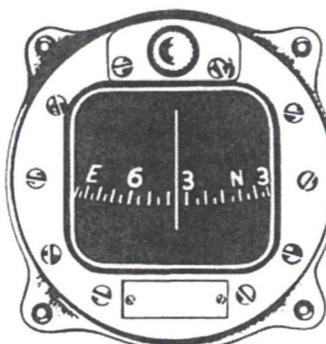
Die genaue Ursache des Erdmagnetfeldes ist nicht vollständig geklärt, es wird unter anderem durch Vorgänge im Erdinneren (Konvektionsströme) verursacht. Die Polarität dieses Magnetfeldes liegt gegenüber der geografischen Erdachse schief, das heißt die **magnetischen Pole haben eine andere Position als die geografischen**, durch die **Erdrotation** gegebenen Pole. Die Feldlinien des Erdmagnetfeldes verlaufen nicht genau gerade, sondern werden durch geologisch bedingte magnetische Störfelder in der Erdkruste verformt, welche sich mit der Zeit etwas verändern.



#### 4.1.2 Der Magnetkompass

In der Navigation wird zur Kursbestimmung die Richtung nach dem erdmagnetischen Feld mittels eines Magnetkompasses gemessen.

Der Magnetkompass richtet sich also immer nach dem erdmagnetischen Feld, welches mit den bereits erwähnten Abweichungen zwischen den magnetischen Polen aufgebaut ist.



Magnetkompass

#### MAGNETIC NORTH/MN

Richtung der Feldlinien des Erdmagnetfeldes (Horizontalkomponente) an einer bestimmten Position. Annähernd Richtung magnetischen Nordpol.

#### 4.1.3 Inklination / Inclination

Die Feldlinien des Erdmagnetfeldes verlaufen nicht parallel zur Erdoberfläche, viel mehr sind sie von einem parallelen Verlauf am Äquator gegen die Pole hin immer stärker geneigt.

**INCLINATION**

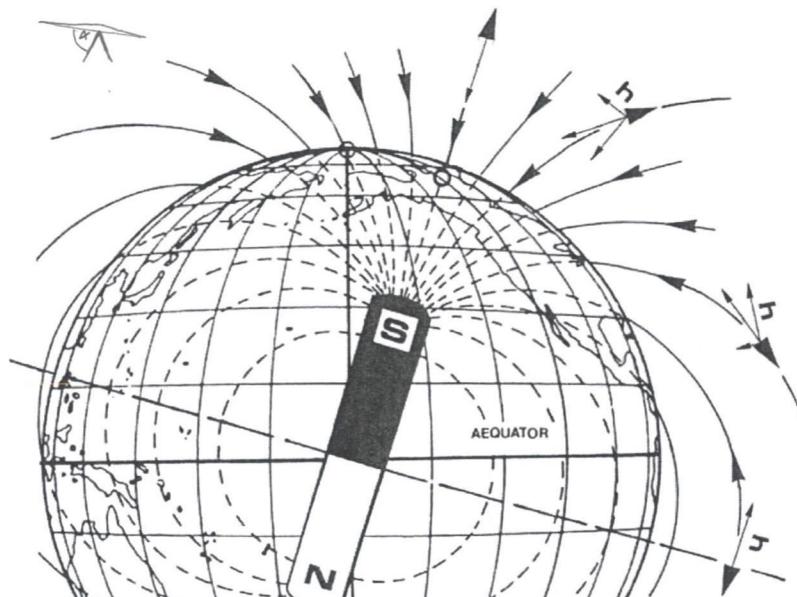
Winkel zwischen den Feldlinien des Erdmagnetfeldes und dem Horizont.

In der Schweiz beträgt die Inklinierung bereits 60 bis 65°.

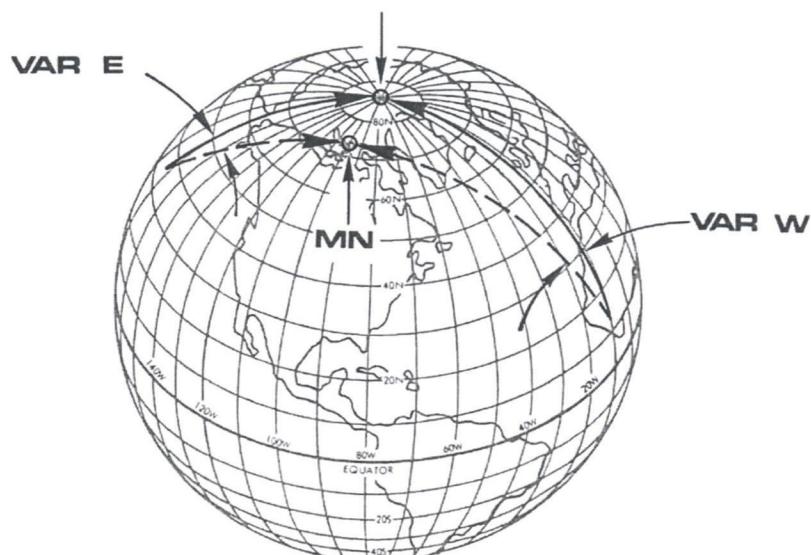
Für die Richtungsanzeige des Magnetkompasses ist die Horizontalkomponente ( $h$ ) des Erdmagnetfeldes bedeutend. Gegen die Pole wird diese Komponente immer kleiner, demzufolge wird der Magnetkompass in den Polgegenden unbrauchbar.

Die **Inklination** bewirkt ein **Vorausseilen der Kompassnadel bei Kurven gegen Norden** und ein **Nachhinken bei Kurven gegen Süden**.

**Wichtig:**  
Die Anzeige des Magnetkompasses ist wegen der Massenträgheit nur im unbeschleunigten Geradeausflug brauchbar.

**4.1.4 Ortsmissweisung / Variation (auch Deklination genannt)****VARIATION / VAR**

Winkel zwischen TN (true north) und MN (magnetic north)



Von unserer Position abhängig, kann der magnetische Nordpol östlich oder westlich vom geografischen Nordpol liegen:

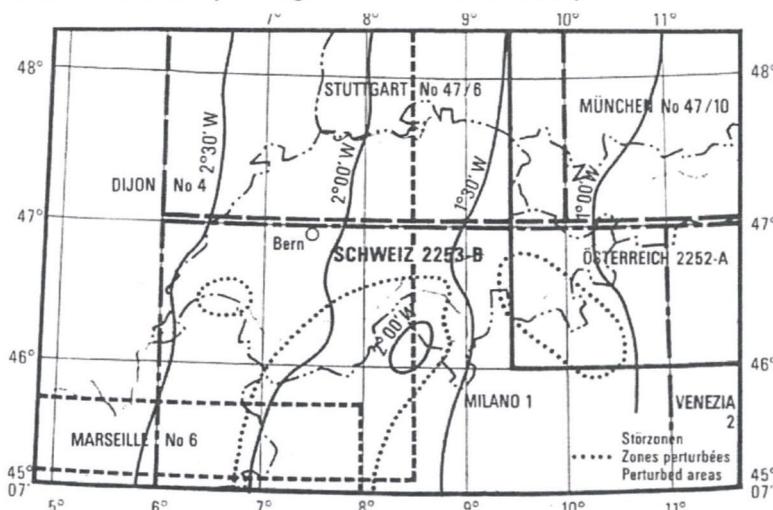
Liegt er östlich, so haben wir östliche Variation (VAR E).

Liegt er westlich, so haben wir westliche Variation (VAR W)

Auf Navigationskarten wird die Variation mittels Linien gleicher Missweisung (Isogonen) angegeben. Die Linie mit der Variation  $0^\circ$  wird als A-gone bezeichnet.

Die Isogonen verlaufen nicht geradlinig. Sie werden durch Störfelder in der Richtung abgelenkt. Diese Störfelder haben den Ursprung in der Zusammensetzung (z. B. Eisenerzfelder) und Beschaffenheit (z. B. Gebirge) und Erdkruste.

Anschlussblätter	Linien gleicher Missweisung.	Jährliche Veränderung:	-7'	1982
Feuilles adjacentes	Lignes d'égale declinaison magnétique.	Modification annuelle:	-7'	
Adjoining sheets	Lines of equal magnetic variation.	Annual change:	-7'	



Das Erdmagnetfeld verändert sich mit der Zeit. Diese Veränderung der Variation ist auf der Isogenen Karte der ICAO-Luftfahrtkarte vermerkt.

Im Jahre 1991 betrug die Variation in der Schweiz ca.  $1^\circ\text{W}$ . Zum Beispiel im Jahre 1820 betrug sie  $21^\circ\text{W}$ !

Die Variation kann je nach Lage eines Gebietes erhebliche Werte aufweisen (Kanada bis  $40^\circ$ ) und muss deshalb immer zur Kursbestimmung berücksichtigt werden.  
(Fliegerschule Altenrhein, 1991)

Aufgabe: Beschreiben sie in eigenen Worten die folgenden 3 Fachbegriffe:  
(Erdmagnetfeld)

Inklination: Der Winkel zwischen den Feldlinien und der Erdoberfläche.

Deklination: Der Winkel zwischen dem geografischen Nordpol und dem magnetischen (realen) Nordpol.

Isogene: Isogone sind die realen Magnetfelder, welche von Störfeldern beeinflusst werden.

Welchen Einfluss hat die Ortsmissweisung für einen Pfadfinder oder einen OL-läufer?

Keinen, da sie kleine Strecken ablaufen

Viele Smartphones haben einen Magnetkompass eingebaut. Auf was muss man bei der Navigation achten um die Richtung möglichst genau zu bestimmen?

Der Magnetkompass muss still gehalten werden und waagrecht.

## 4.2 Magnetisches Feld

Lehrziele:

- Das magnetische Feld mit Hilfe von Kraftlinien, Kraftlinienrichtung und Polbezeichnung aufzeichnen
- Kraftwirkung an Beispielen beschreiben
- Beziehung zwischen Kraftwirkrichtung und Feldrichtung beschreiben

### 4.2.1 Kraftwirkung und Pole

FI \_\_\_\_\_  
ME \_\_\_\_\_

#### Aufgabe

Was ist für Sie Magnetismus? Jeder schreibt mindestens auf zwei Karten je ein Stichwort auf. Hängen Sie die Karten an der Wandtafel auf.

#### 1. Versuch

Was passiert, wenn sich eine Kompassnadel in der Nähe eines Magneten befindet?

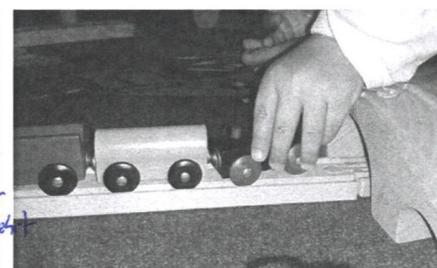
Das Magnet beeinflusst die Nadel.

#### 2. Versuch

Beobachten Sie den Lehrerversuch mit Dauermagneten und schreiben Sie Notizen dazu.  
Beobachtungshinweise:

Welche zwei Kraftwirkungen können Sie feststellen? Wie verhält sich der zusammengesetzte Magnet? Unterscheidet sich die Kraftwirkung zwischen der Längs- und Querrichtung?

Der Nordpol des Magneten kann nur mit dem Südpol eines anderen Magneten zusammengeführt werden. <sup>oder umgedreht</sup>



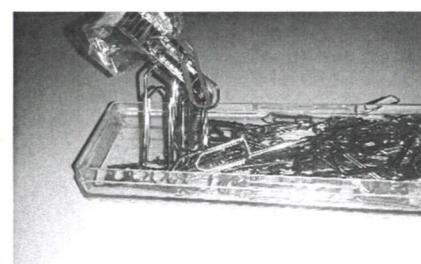
Zwei Nord- oder Südpole stoßen sich gegeneinander ab.

#### 3. Versuch

Magnetismus ist ansteckend. Was passiert mit Eisenenteilen, wenn diese den Dauermagnet berühren?

Beobachtungshinweis: Was passiert, wenn der Magnet wieder entfernt wird?

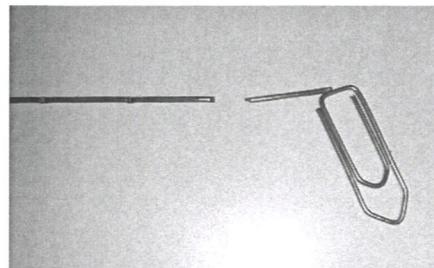
- Sie werden magnetisch
- Sie sind solange magnetisch, bis ein Schlag erfolgt



## 4. Versuch

Was passiert mit einem Magneten, wenn dieser durchtrennt wird?

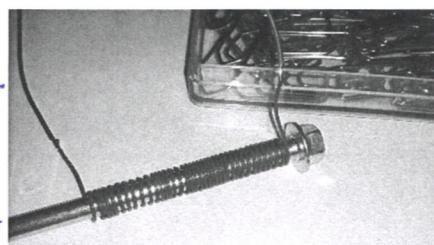
Es bleibt magnetisch, solange die Durchtrennung kein Schlag war.



## 5. Versuch

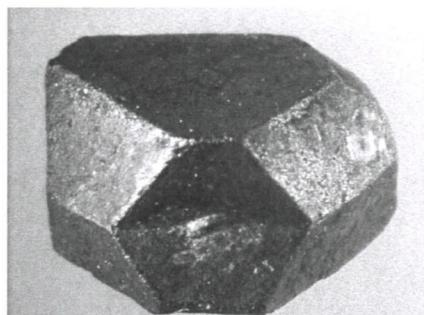
Ein Eisenstab wird in eine Wicklung gehalten. Die Wicklung wird an eine 9 V Batterie angeschlossen. Wie reagieren die Eisenteile auf diesen Eisenstab?

Der Eisenstab wird magnetisch.  
Die Strom erzeugt ein Magnetfeld und der Eisenstab verstärkt das Magnetfeld.  
\*Welche durch die Spule fliess.

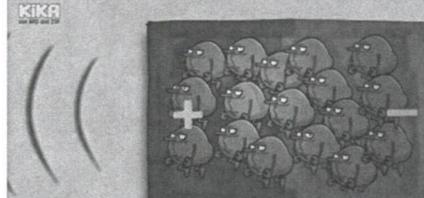


## Erklärung

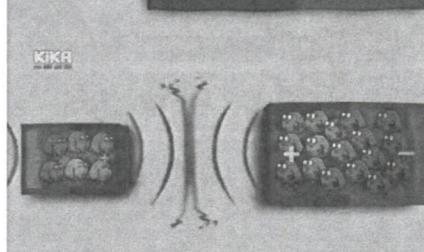
Grund für die Bezeichnung **Magnetismus** ist ein vulkanisches Gestein, welches heute **Magnetit** genannt wird. Kleine Eisenoxid-Kristalle haben sich beim Abkühlen der Lava nach dem **Erdmagnetfeld** ausgerichtet. Das Gestein ist daher ein Dauermagnet. Die alten Griechen haben in der heutigen Türkei dieses Gestein entdeckt. Der Begriff **Magnetismus** steht für die **Kraftwirkung von Dauermagneten**.



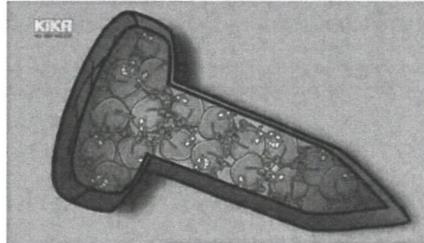
Ein **Dauermagnet** besteht aus sehr vielen, nur **wenige nm kleinen Magneten**. Diese nennt man **Molekularmagnete**. Diese sind alle in die **gleiche Richtung ausgerichtet**.



Wenn **zwei Magnete** nah genug beieinander sind, möchten sie sich gegenseitig ausrichten. Wenn nötig **wirkt eine Kraft** auf den kleineren Magneten bis sich dieser dreht. Die beiden Magnete verbinden sich danach. Die Magnetische Kraft der beiden Magnete ist grösser als die Kraft der einzelnen Magnete.



Eisenteile bestehen auch aus Molekularmagneten. Diese sind aber nicht ausgerichtet. Die magnetischen Kräfte heben sich auf. Wenn ein Magnet in die Nähe gehalten wird, werden diese sofort ausgerichtet.



### Zusammenfassung

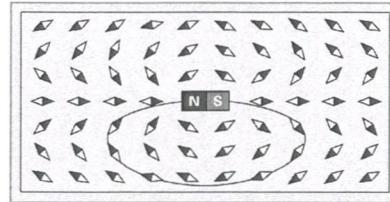
1. Ein Dauermagnet (auch Permanentmagnet genannt - permanare bedeutet sich erhaltend) übt eine Kraft auf eisenlegierte Werkstoffe an. Diese werden als Ferromagnetische Werkstoffe bezeichnet. Ferromagnetische Werkstoffe sind:
  - Eisen (Fe 26)
  - Kobalt (Co 27)
  - Nickel (Ni 28)
2. Die anziehende Kraft ist an den Enden des Magneten besonders stark. Die Enden werden auch als Pole bezeichnet.
3. Ungleichnamige Pole ziehen sich an, gleichnamige Pole stoßen sich ab.
4. Ein, um eine vertikale Achse drehbar gelagerter Dauermagnet, richtet sich auf der Erde so aus, dass die Verbindungsgeraden der beiden Pole ungefähr geografischer Nord-Süd-Richtung liegen. Aus diesem Grund wird der Pol des Magneten, welcher nach Norden zeigt als Nordpol (N) bezeichnet, der gegenüberliegende als Südpol (S).  
Anwendung: Magnetnadeln im Kompass für die Navigation
5. Der Nordpol eines Dauermagneten wird rot und der Südpol grün eingefärbt.
6. Die Kraftwirkung ist auch im leeren Raum wirksam.
7. Der Bereich dieser Kraftwirkung wird als magnetisches Kraftfeld oder kurz Magnetfeld bezeichnet.

Betrachten Sie nochmals die Grafik zum Kapitel 4.1.1. Die Erde stellt einen sehr grossen Dauermagneten dar. Die Ursachen des Erdmagnetismus sind auf eisenhaltiges flüssige Lavaströme im Erdinneren zurückzuführen. Der in der Grafik eingezeichnete Dauermagnet symbolisiert das Erdmagnetfeld.

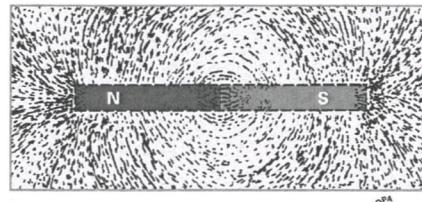
#### 4.2.2 Feldlinienbilder von Permanentmagneten und deren Kraftwirkungen

Beobachten Sie den Lehrerversuch mit Dauermagneten und schreiben Sie Notizen dazu.

Die Feldlinien bewegen sich  
vom Nordpol in den Südpol.  
Das Magnet ist dabei nicht überall  
gleich stark.



Europa  
Europäische  
Union

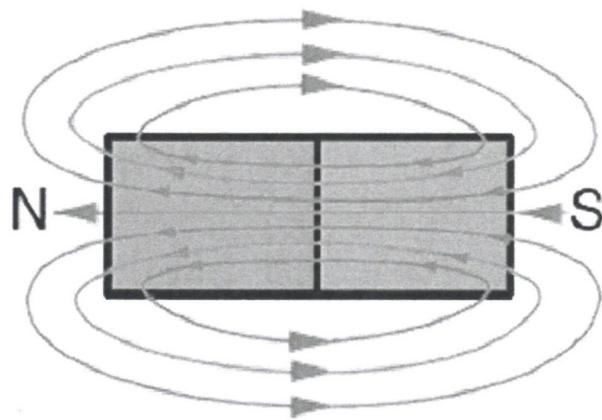


Europa  
Europäische  
Union

Aufgabe:

Lesen Sie im FI das Kapitel „Magnetische Feldlinien“. Markieren Sie die Textstellen welche die Zeichenregeln für die Feldlinien Beschreiben.

Im folgenden Bild sind die Feldlinien für einen Permanentmagneten eingezeichnet



(Universität Bayreuth, 2010)

Welche vier Regeln gelten für die Feldlinien?

- Ungleichnamige Pole ziehen sich an, gleichnamige Pole stoßen sich ab.
- Um jeden Magneten befindet sich ein magnetisches Feld.
- Jeder elektrische Strom erzeugt ein magnetisches Feld.
- Die magnetischen Feldlinien verlaufen außerhalb des Magneten vom Nordpol zum Südpol, innerhalb vom Südpol zum Nordpol. Sie sind in sich geschlossene Linien.

## Aufgabe:

Ergänzen sie die Darstellung mit den entsprechenden Feldlinienbildern. Tragen sie beim beweglichen Magneten einen Pfeil mit roter Farbe in Richtung der Kraftwirkung ein.

Fest:



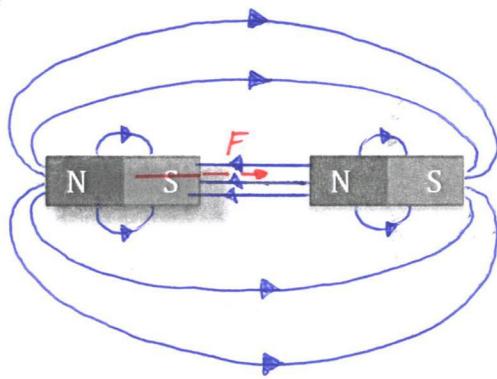
Beweglich:



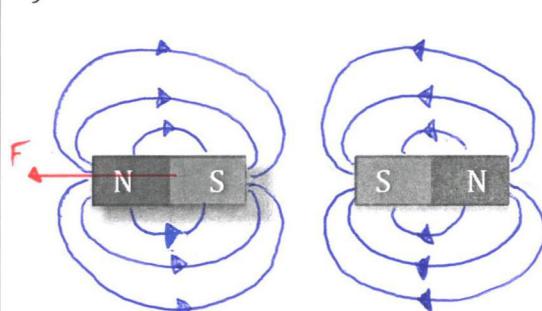
magnetisierbar:



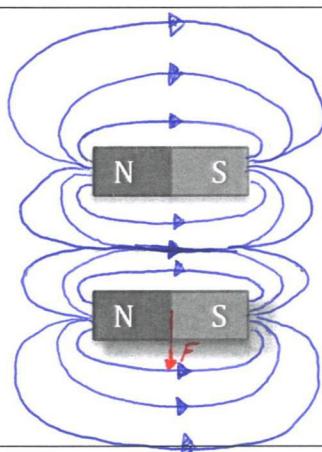
1)



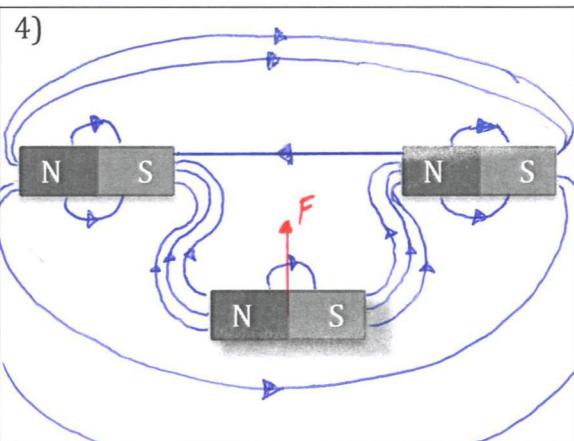
2)



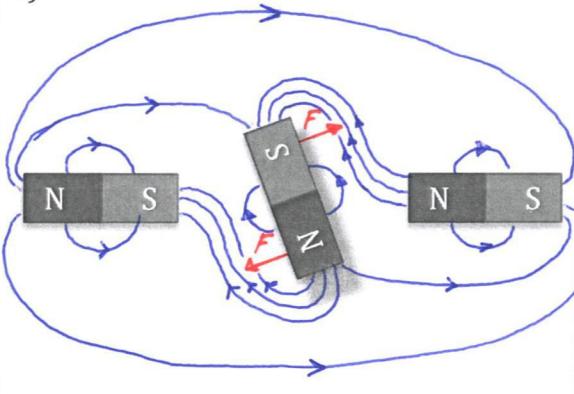
3)



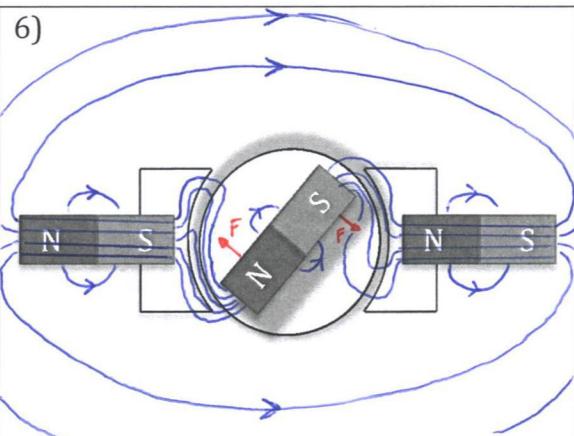
4)



5)



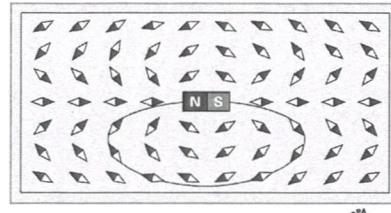
6)



Regeln: Das bewegliche Teil verändert seine Lage so, dass die Feldlinien kürzer werden und das der gegenseitige Feldlinienabstand vergrößert wird.

### 4.2.3 Magnetisieren und Entmagnetisieren

Beobachten Sie den Versuch zum Magnetisieren und schreiben schreiben Sie Notizen.



EUROPA  
LEHRMITTEL

Magnetisieren bedeutet Molekularmagnete in dieselbe Richtung ausrichten. Folgende drei Verfahren können angewandt werden:

1. In das Feld eines anderen Magneten halten.
  2. In eine durch Gleichstrom durchflossene Spule halten.
  3. In Nordrichtung bringen und beklopfen.

Wenn das Magnetfeld entfällt, bleiben bei den Ferromagnetischen Stoffen die Molekularmagnete wenigstens teilweise ausgerichtet. Beim magnetisch weichen Material drehen sich die meisten Molekularmagnete infolge der Wärmebewegung der Atome wieder in den nicht ausgerichteten Zustand. Bei magnetisch hartem Material bleiben viele Molekularmagnete ausgerichtet.

Entmagnetisieren bedeutet Molekularmagnete wieder zerstreuen. Folgende drei Verfahren können angewandt werden:

1. Über die Curie- Temperatur erwärmen
  2. In eine durch Wechselstrom durchflossene Spule halten und langsam aus dem Wechselfeld herausziehen.
  3. Erschütterungen (Beklopfen)

Die Curie Temperatur ist Materialabhängig.

**Tabelle 1: Curie-Temperaturen**

Material	Temperaturen
Eisen	769 °C
Nickel	356 °C
Kobalt	1075 °C
Weichmagnetische Ferrite	50 °C bis 600 °C

EUROPA  
LEHRMITTEL

Lesen Sie im FB das Kapitel zu den Weiss'sche Bezirken. Beantworten Sie danach folgende Fragen:

## Was sind Weiss'sche Bezirke?

Weiss'sche Bezirke sind kleine Bezirke, welche gleich ausgerichtete Molekularmagnete besitzt. Jeder Bezirk besitzt anders ausgerichtete Magnete.

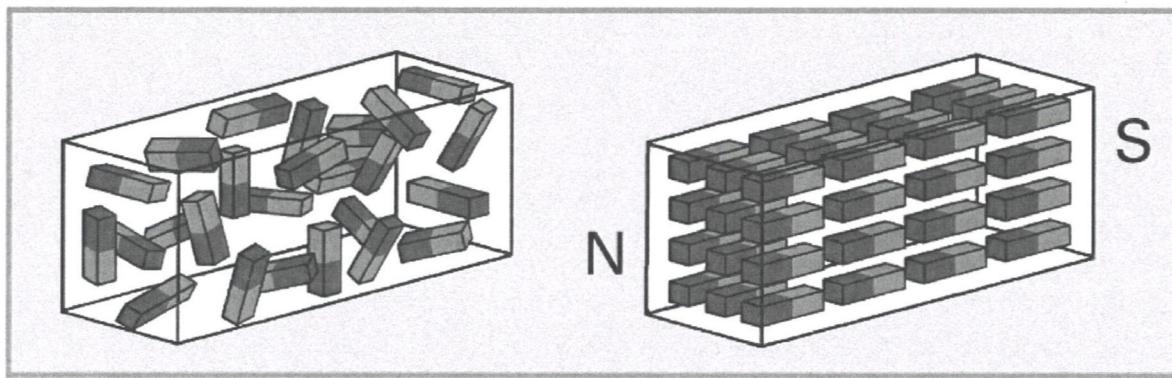
Was sind Bloch Wände?

Mehrere Weiss'sche Bezirke werden durch Bloch Wände eingeteilt (vishell nicht rec!). Beim Magnetisieren lösen sich diese Wände auf und die Molekularmagnete richten sich alle gleich aus.

imaginäre

#### 4.2.4 Innerer Aufbau

Denkt man sich einen Magneten immer weiter geteilt, so erhält man schliesslich als kleinste Magnete sogenannte Molekularmagnete. Bei einem Magneten sind die Molekularmagnete nach einer Richtung geordnet.



Jeder Ferromagnetische (und Ferrimagnetische) Stoff ist aus Molekularmagneten aufgebaut. Diese nehmen alle möglichen Richtungen ein. Die verschiedenen Magnetfelder heben sich gegenseitig auf. Der Stoff wirkt deshalb nach aussen unmagnetisch.

Nähert man einen Ferro- oder Ferrimagnetischen Stoff einem Magneten, so richten sich die Molekularmagnete nach einer Richtung aus. Der Ferromagnetische Stoff ist magnetisch geworden.

Sättigung:

Wenn alle Molekularmagnete in der Magnetisierungsrichtung ausgerichtet sind, so ist der Stoff magnetisch gesättigt.

-> Der Magnet kann kein stärkeres magnetisches Feld erzeugen.

Seltene-Erden-Magnete:

Die typischen ferromagnetischen Stoffe Fe, Co und Ni können durch diverse seltene Stoffe legiert werden. Diese zeichnen sich durch besonders hohe Energiedichte aus. Die Materialkosten sind aber höher. Typische Legierungen sind Samarium-Kobalt (SmCo) und Neodym-Eisen-Bor (NdFeB).

**Hartmagnetisch:** Stahllegierungen mit hohem Kohlenstoff Anteil sind hart und lassen sich **dauermagnetisch machen**.

**Weichmagnetisch:** Stahllegierungen mit kleinem Kohlenstoff Anteil sind weich und lassen sich nur **bedingt dauermagnetisch machen**.

Die Reaktion verschiedener Materialien ist unterschiedlich. Diese lassen sich daher in verschiedene Gruppen einteilen:

- **Ferromagnetische Stoffe** (= magnetisch wie Eisen):  
Typische Materialien sind Stahl, Gusseisen, Nickel und Kobalt.
- **Ferrimagnetische Stoffe** (= ähnlich wie Eisen):  
keramische Werkstoffe aus Metalloxyden. Die magnetische Sättigung wird jedoch schon bei kleineren magnetischen Kräften erreicht. Die Ferrimagnetischen Stoffe haben einen grossen spezifischen Widerstand.
- **Paramagnetische Stoffe** (= beinahe):  
Bei ihnen heben sich bei einer Magnetisierung die Wirkungen der Molekularmagnete in den Weiss'schen Bezirke nach aussen fast vollständig auf. Dadurch erzeugt die magnetisierende Kraft nur eine kleine zusätzliche Kraft in die gleiche Richtung.
- **Diamagnetische Stoffe** (= entgegen):  
Bei diesen Stoffen erzeugt die Magnetisierung eine Kraft, die der erzeugenden Kraft entgegengerichtet ist und diese schwächt.



#### 4.2.5 Anwendungen

Zählen Sie je 6 Anwendungen für hart- und weichmagnetische Werkstoffe auf:

größer CO<sub>2</sub> Anteil

kleiner CO<sub>2</sub> Anteil

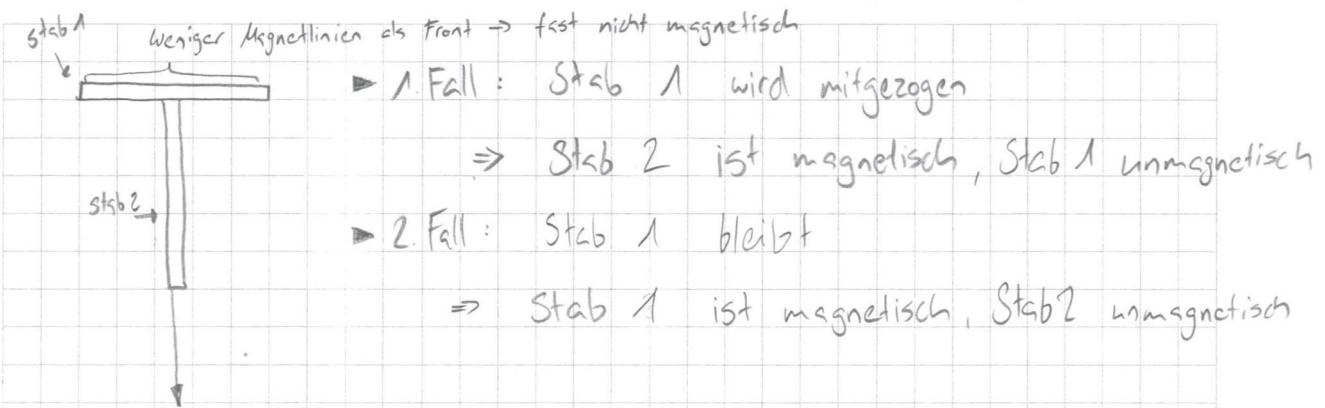
Hartmagnetische Anwendungen:

- Haftmagnet (Türmagnet)
- Lagerung
- Kompassnadel
- Dauermagnet
- Magnete in Motoren
- Wirkelstrombremse
- Lautsprecher / Mikrofon
- Reedkontakte

- Motoren und Generatoren
- Transformatoren
- Induktive Sensoren
- Relais und Schütze
- Fl-Schutzschalter
- Diebstahlsicherung

#### Denkaufgabe:

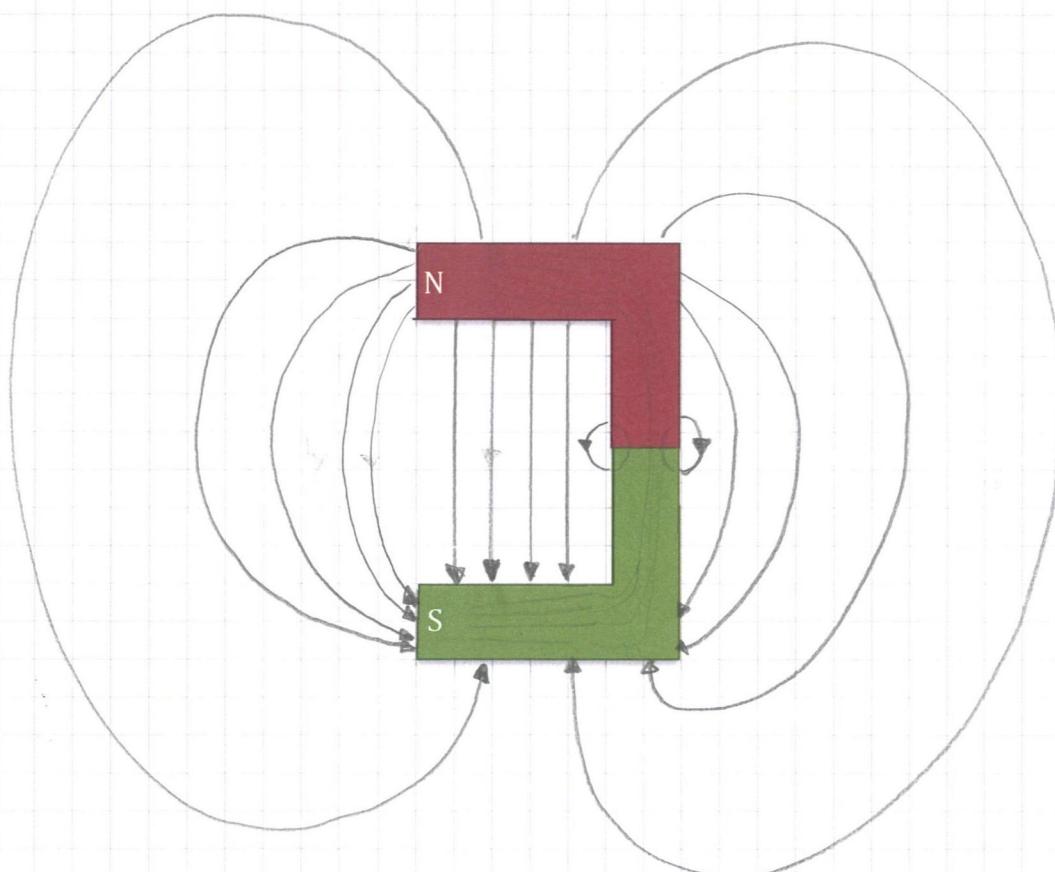
Zwei äusserlich gleiche Stäbe sind ein Magnet und ein Eisenstab. Wie kann man ohne weitere Hilfsmittel feststellen, welches der Eisenstab ist? (2 Möglichkeiten)



Methode 2: So lange auf den Boden fallen lassen bis Magnet nicht mehr magnetisch ist

**Lernkontrolle**

Zeichnen Sie die magnetischen Feldlinien für diesen Hufeisenmagneten ein:



## Lernkontrolle Magnetismus

Nennen Sie die 4 Werkstoffklassen in Bezug auf Magnetismus:

- 1) Ferromagnetisch
- 2) Ferrimagnetisch

- 3) Paramagnetisch
- 4) Diamagnetisch

Ordnen Sie die 4 Klassen den Beschreibungen in folgender Tabelle zu:

Magnetisch wie Eisen	1
Ähnlich wie Eisen	2
Beinahe magnetisch	3
Schwächt magnetische Felder	4

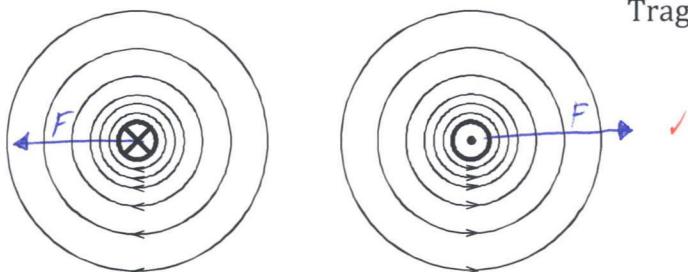
Welche Verfahren können zum Magnetisieren verwendet werden?

(Gleichstrom)

- Mit einer Spule und DC-Spannung den Eisenkern magnetisieren
- Mit einem anderen Magnet magnetisieren
- In Nordrichtung ausrichten und beklopfen

In welche Richtung entstehen Kräfte auf die folgenden stromdurchflossenen Leiter?

Tragen Sie die Kraftvektoren ein.



Welches ist die Ursache des magnetischen Feldes im Elektromagnetismus?

~~Das~~ Pro Die Durchflutung der Spule  $\Theta$

Durch was kann ein Dauermagnet im Elektromagnetismus ersetzt werden?

Durch eine Magnetspule (langgestreckte Spule (bestromt))

### 4.3 Elektromagnetismus

#### Lehrziele

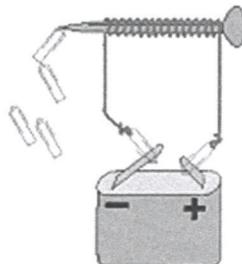
- Die magnetische Wirkung des Stromes beschreiben und Anwendungsbeispiele aufzeigen
- Zusammenhang zwischen den magnetischen Grundgrößen wiedergeben
- Beziehung zwischen den Ursachen (Strom, Durchflutung, Feldstärke) und der Wirkung (Fluss, Flussdichte) erklären

#### Lehrerversuch

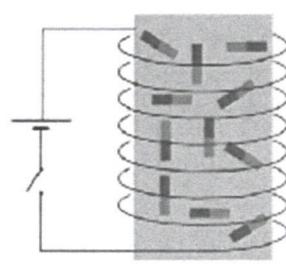
Ein Eisennagel wird magnetisiert, wenn dieser in einer mit Gleichstrom durchflossenen Spule eingelegt wird.



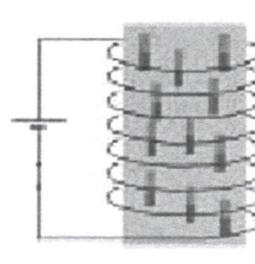
Magnetisierung eines Eisennagels:  
(R., S. 3) Uni Regensburg



ohne Stromfluss

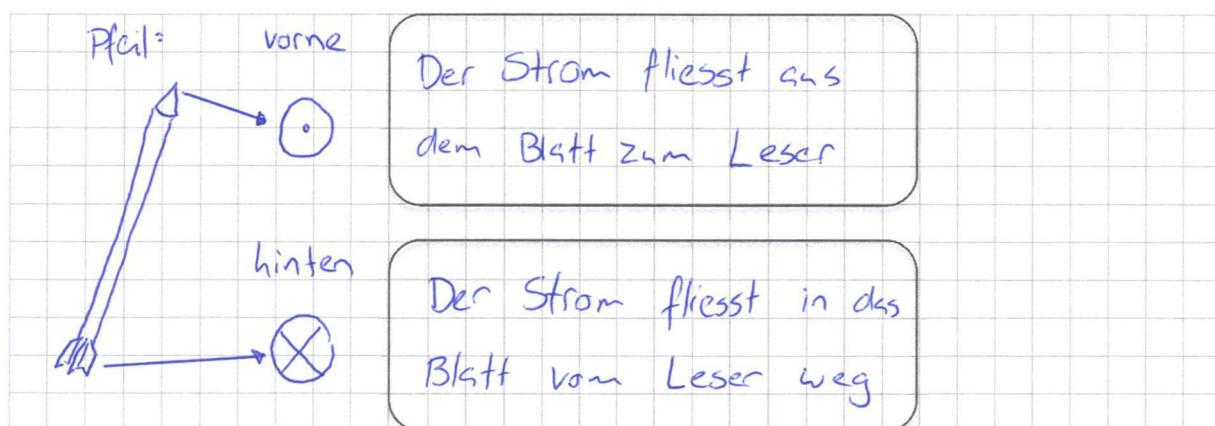


bei Stromfluss

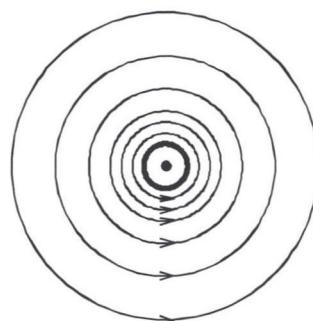
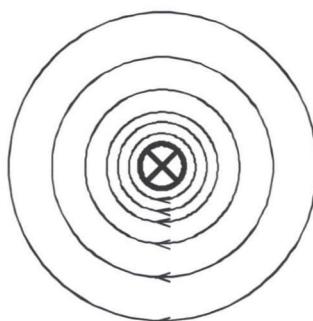
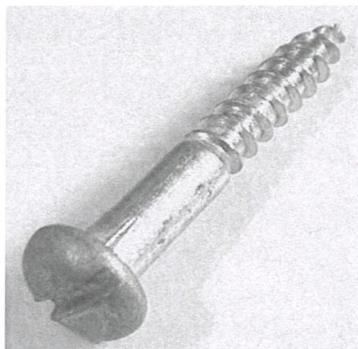


#### 4.3.1 Symbole für Stromrichtung

FI \_\_\_\_\_  
ME \_\_\_\_\_



## 4.3.2 Feldlinienbilder und Stromdurchflossene Leiter

FI \_\_\_\_\_  
ME \_\_\_\_\_

Schraubenregel:

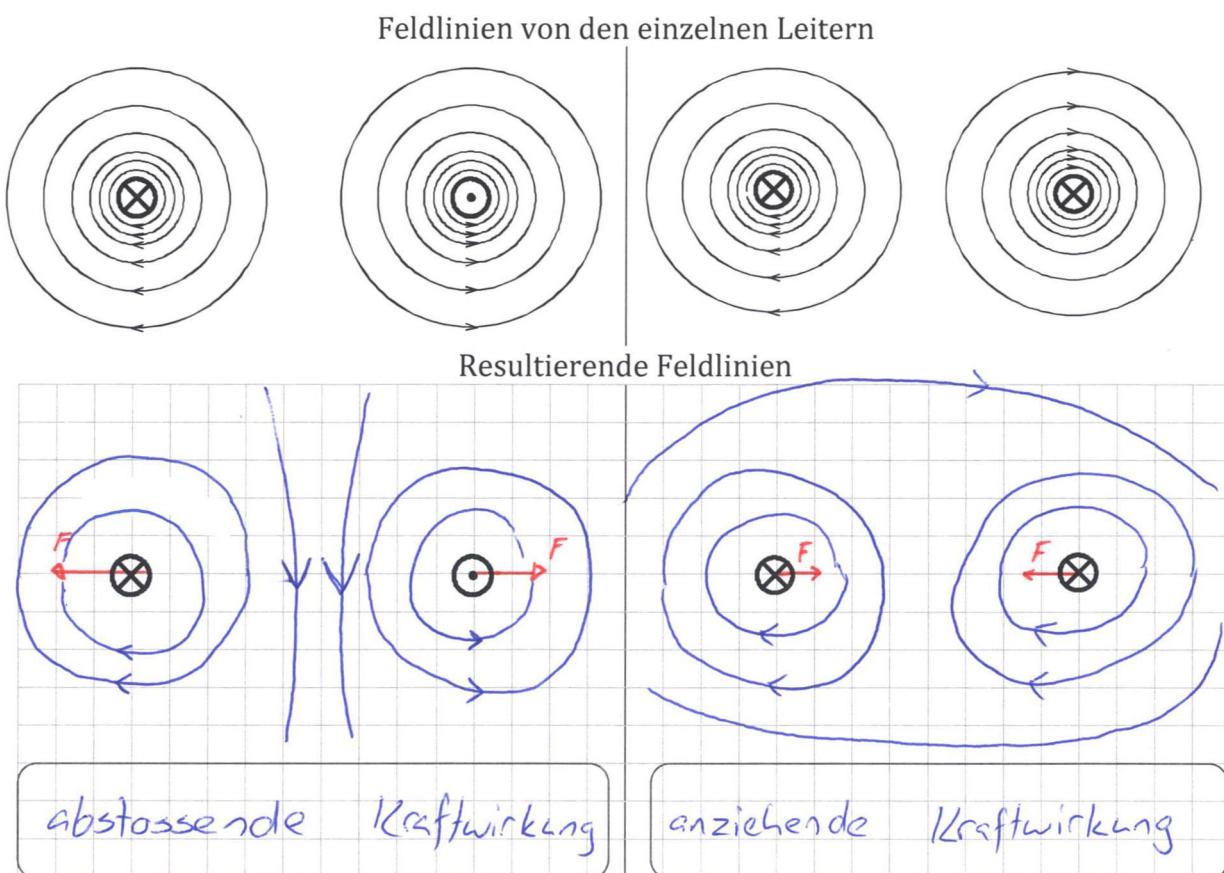
Schraube mit Rechtsgewinde:

Entspricht die Bewegungsrichtung der Schraube der Stromrichtung,  
so gibt die Drehrichtung die Richtung des magnetischen Feldes an.

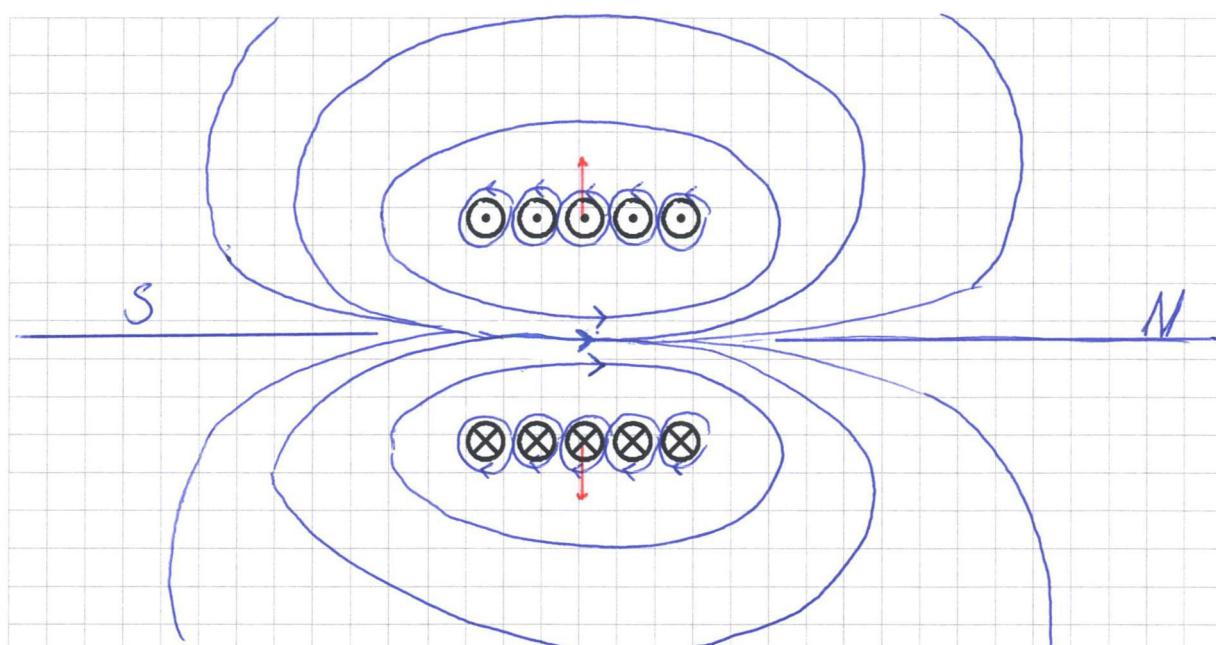
Merke: Hinweis Unterschied E&H Feld

- Fließt in einem elektrischen Leiter Strom, ist immer ein Magnetfeld vorhanden.
- Nahe am Leiter sind die Feldlinien am dichtesten (starkes Magnetfeld). Die Kraftlinien des magnetischen Feldes sind immer geschlossene Linien.

## Zwei Stromdurchflossene Leiter



## Mehrere Leiter zu einer Spule angeordnet



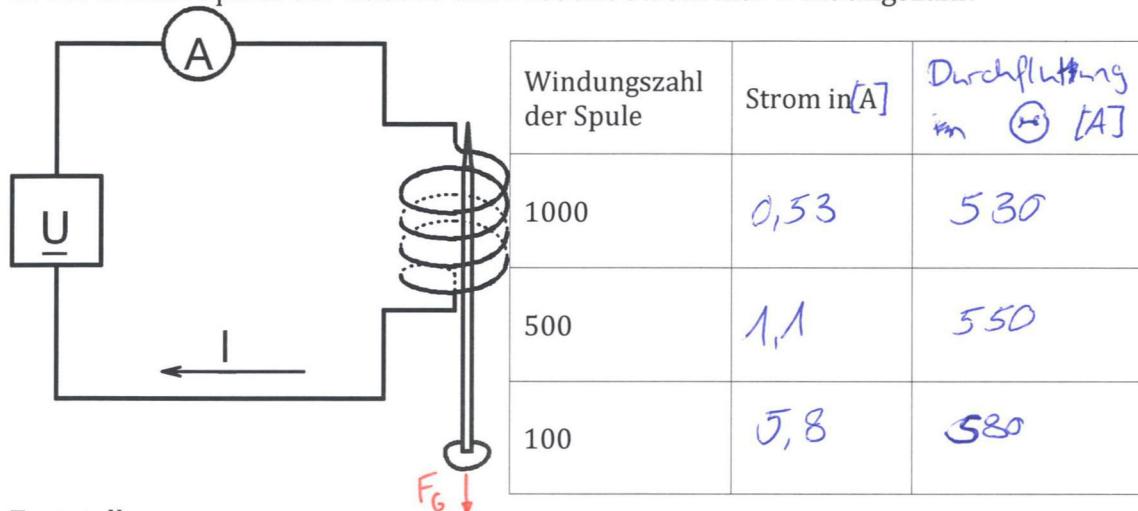
Merke: Das Magnettfeld einer langgestreckten, geraden, Stromdurchflossenen Spule entspricht dem eines Stabmagneten. An den Spulenenden befinden sich die Pole.

### 4.3.3 Magnetische Größen

#### Durchflutung

Versuch:

Der Strom durch eine Spule wird so eingestellt, dass der Nagel gerade noch gehalten wird. Dies wird mit Spulen mit anderen Windungszahlen wiederholt. Bilden Sie jeweils in der letzten Spalte der Tabelle das Produkt Strom mal Windungszahl!



Feststellung:

Für die gleiche magnetische Wirkung (Kraft auf dem Nagel) ist das Produkt Strom mal Windungszahl gleich.

Definition:

Das Produkt Strom mal Windungszahl ist die Ursache des magn. Feldes.  
Diese Produkt nennt man Durchflutung  $\Theta$  (magnetische Spannung)

$$\Theta = I \cdot N$$

$\Theta$ : Durchflutung in A (griechischer Buchstabe Theta)

I: Strom in A

N: Windungszahl der Spule (ohne Einheit)

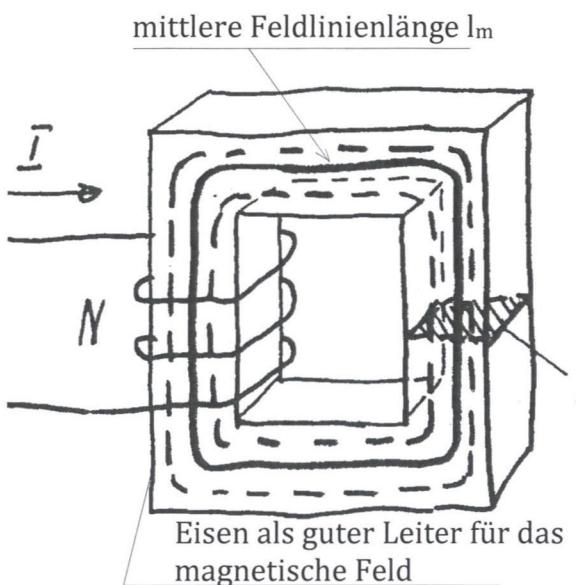
#### Magnetische Größen Aufgabe 1

Mit einer Spule muss eine Durchflutung von 50 A erzeugt werden. Das vorhandene Netzgerät liefert eine maximale Leistung von 6 W bei einer Spannung von 30 V. Berechnen Sie die erforderliche minimale Windungszahl der Spule.

$$P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{6W}{30V} = 0,2A$$

$$\Theta = I \cdot N \Rightarrow N = \frac{\Theta}{I} = \frac{50A}{0,2A} = 250$$

## Der magnetische Fluss



Fließt in der Spule der Strom  $I$ , so entsteht ein Magnetfeld.  
Versuch: Vergleich Luftspule mit und ohne Eisenkern.

Die stromdurchflossene Spule zieht allenfalls einige Büroklammern an. Mit einem Eisenkern ist die Kraftwirkung größer.

Der Eisenkern leitet die Feldlinien besser als Luft. Aus diesem Grund befinden sich fast alle magnetischen Feldlinien im Eisenkern.

Merke: Die Summe aller Feldlinien wird als magnetischer Fluss  $\Phi$  bezeichnet

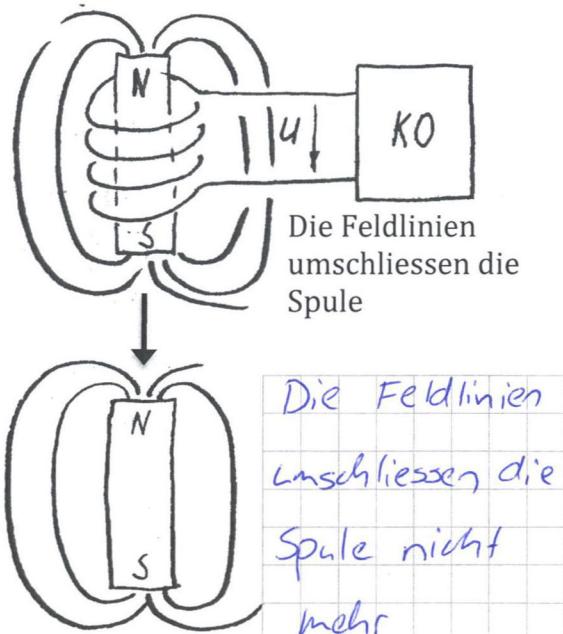
$\Phi$ : griechischer Buchstabe Phi

$[\Phi] = \text{Vs}$

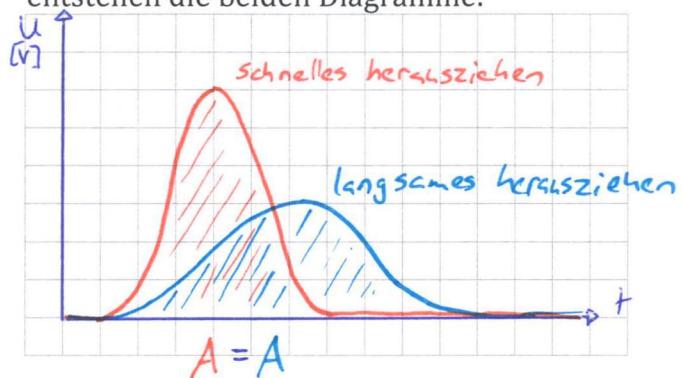
$1\text{Vs} = 1\text{Wb}$  (Weber: deutscher Physiker)

## Messung

Ein Stabmagnet wird aus einer Spule herausgezogen.



Der Stabmagnet wird unterschiedlich schnell aus der Spule herausgezogen. Dabei entstehen die beiden Diagramme:



Die beiden Flächen sind gleich gross! Die dargestellte Fläche besitzt die Einheit Vs, entspricht also dem magnetischen Fluss  $\phi$ .

### Die Magnetische Flussdichte B

Wird der magnetische Fluss  $\phi$  durch die Querschnittsfläche A dividiert erhält man die Flussdichte B.

$$B = \frac{\phi}{A}$$

$\phi$ : Fluss in Vs  
 A: Querschnitt in  $m^2$   
 B: Flussdichte in  $\frac{Vs}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T$

### Magnetische Größen Aufgabe 2 (ME 72 Nr. 3)

Ein Elektromagnet mit 800 Windungen braucht die Durchflutung  $\Theta = 150$  A. Welcher Magnetisierungsstrom ist erforderlich.

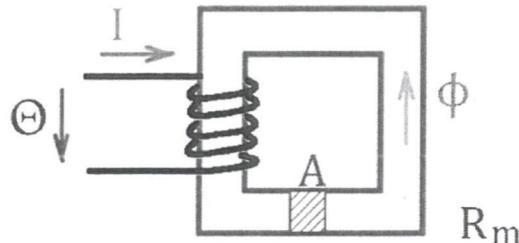
$$\Theta = N \cdot I \Rightarrow I = \frac{\Theta}{N} = \frac{150A}{800} = \underline{\underline{187,5mA}} \quad \checkmark$$

### Magnetische Größen Aufgabe 3 (ME 72 Nr. 4)

Ein Elektromagnet wird mit  $N_1 = 1200$  Windungen und Strom  $I_1 = 0,15$  A durchflossen. Welcher Stromstärke  $I_2$  benötigt ein Magnet mit  $N_2 = 2000$  Windungen für die gleiche Durchflutung?

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\Theta_1}} &= N_1 \cdot I_1 = 1200 \cdot 0,15A = \underline{\underline{180A}} \\ \underline{\underline{\Theta_2}} &= N_2 \cdot I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{\Theta_2}{N_2} = \frac{180A}{2000} = \underline{\underline{90mA}} \quad \checkmark \end{aligned}$$

## Vergleich zwischen dem magnetischen und dem elektrischen Kreis



Die Ursache des magnetischen Feldes ist die Durchflutung (magnetische Spannung)

$\Theta$  baut den Fluss  $\Phi$  auf.

$$\text{magn. Widerstand} = \frac{\text{Durchflutung}}{\text{magn. Fluss}}$$

$$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} \quad [R_m] = \frac{A}{Vs}$$

Die Berechnung des magnetischen Widerstandes aus den geometrischen Abmessungen und des verwendeten Werkstoffes erfolgt gemäss folgenden Zusammenhang.

$$R_m = \frac{l_m}{\mu \cdot A}$$

$l_m$ : Mittlere Feldlinien

A: Fläche des durch den Fluss durchfluteten Querschnittes in  $m^2$ .

$\mu$ : Permeabilität

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$\mu_0$ : magnetische Feldkonstante  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

Der Faktor  $\mu_r$  gibt an, um wieviel die magnetische Leitfähigkeit grösser oder kleiner als die des Vakuums ist.

$\mu_r < 1$ : Diamagnetische Stoffe wie beispielsweise Blei, Kupfer, Zink, Silber oder Wismut

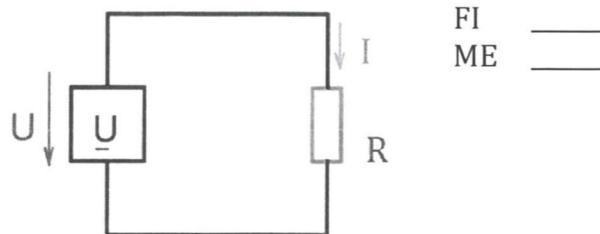
$\mu_r = 1$ : Vakuum = Luft

$\mu_r > 1$ : Stoffe wie beispielsweise Aluminium und Platin

$\mu_r \gg 1$ : Stoffe wie beispielsweise Eisen, Nickel oder Kobalt

Magnetische Flussdichte B

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



Die Ladungstrennung in der Spannungsquelle bewirkt die Spannung U.

U bewirkt den Strom I

$$\text{ohmischer Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

Die Berechnung des ohmschen Widerstandes aus den geometrischen Abmessungen und des verwendeten Werkstoffes erfolgt gemäss folgenden Zusammenhang.

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

l: Leiterlänge in m.

A: Querschnittsfläche des Leiters

$\gamma$ : spezifische Leitfähigkeit

$$[\gamma] = \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$$

Stromdichte J

$$J = \frac{I}{A}$$

## Die magnetische Feldstärke

FI  
ME

$$H = \frac{\Theta}{l_m}$$

H: magnetische Feldstärke [H] =  $\frac{A}{m}$  ( )

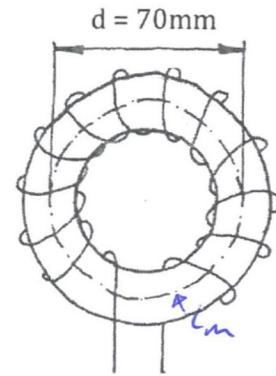
## Magnetische Größen Aufgabe 4

Durch die nebenan gezeichnete Spule fliesst ein Strom von 2 A. Die Windungszahl beträgt 180. Berechnen Sie die Feldstärke innerhalb der Spule, wenn der Spulenkörper aus einem Kunststoff gefertigt ist?

$$l_m = d \cdot \pi = 70\text{mm} \cdot \pi = 219,911\text{mm}^2$$

$$\Theta = N \cdot I = 180 \cdot 2\text{A} = 360\text{A}$$

$$H = \frac{\Theta}{l_m} = \frac{360\text{A}}{219,911\text{mm}^2} = 1637,02 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

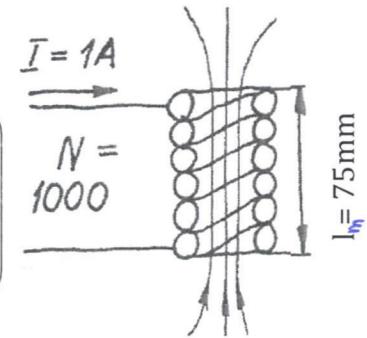


## Magnetische Größen Aufgabe 5

Wie gross ist die magnetische Feldstärke im inneren der skizzierten «langen Spule» ohne Eisenkern?

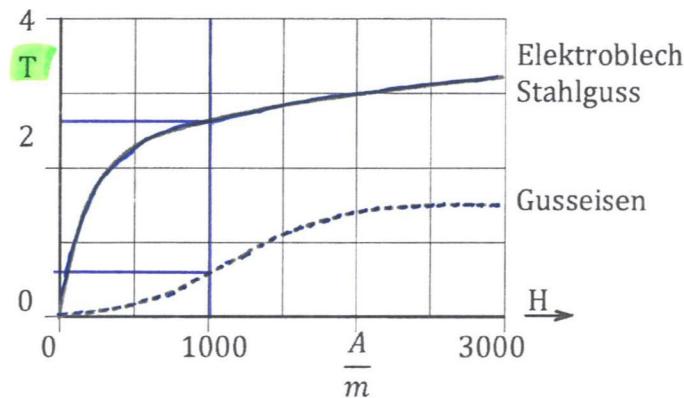
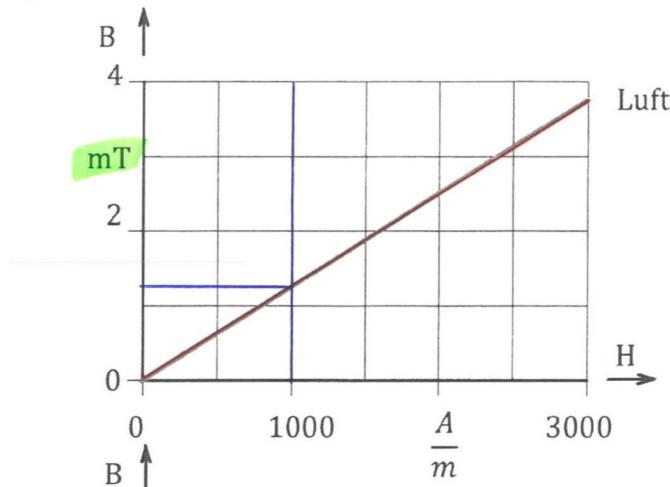
Voraussetzung:

Ist die Spule so lang, dass das Magnetfeld im Innern homogen ist, so handelt es sich um eine «gestreckte Ringspule». Für die die Berechnung der Feldstärke kann mit der Spulenlänge als mittlere Feldlinienlänge gerechnet werden.



$$H = \frac{\Theta}{l_m} = \frac{N \cdot I}{l_m} = \frac{1000 \cdot 1\text{A}}{75\text{mm}} = 13333,33 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

## Zusammenhang zwischen Flussdichte und Feldstärke



$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Wird die Feldstärke vergrössert, kommt bei ferromagnetischen Stoffen eine Sättigung zustande. Obwohl die Feldstärke weiter zunimmt, wird die Flussdichte immer weniger zunehmen (sind alle Molekularmagnete ausgerichtet, kann die magnetische Wirkung des ferromagnetischen Werkstoffes nicht mehr merkbar zunehmen).

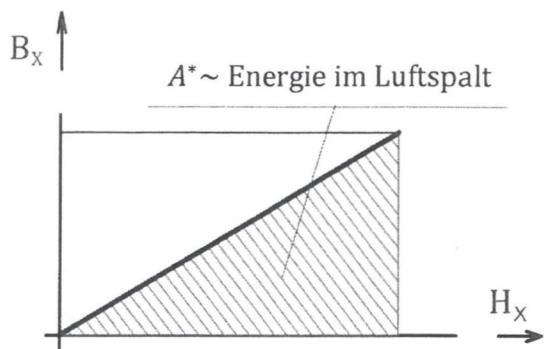
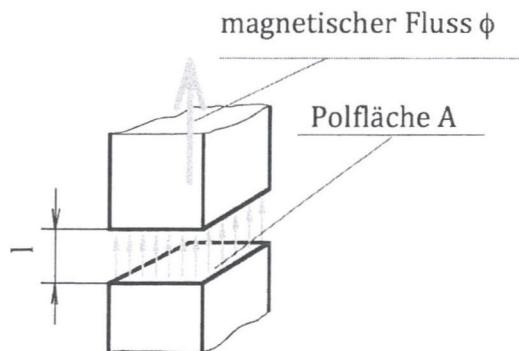
## Magnetische Größen Aufgabe 6

Bestimmen Sie aus den obigen Kennlinien die Flussdichten bei einer Feldstärke von  $1000 \frac{A}{m}$ :

- a) für Luft
- b) für Elektroblech
- c) für Gusseisen

a)  $1,25 \text{ mT}$     b)  $2,6 \text{ T}$     c)  $0,6 \text{ T}$

## Die gespeicherte Energie im Feld erfüllten Raum

FI \_\_\_\_\_  
ME \_\_\_\_\_In der Luft ist  $B \sim H$ 

$$A^* = \frac{B_x \cdot H_x}{2}; B = \frac{\phi}{A}; H = \frac{I \cdot N}{l}$$

$$A^* = \frac{\phi \cdot I \cdot N}{A \cdot l}$$

$$\text{Einheit: } [A^*] = \frac{V \cdot s}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{W \cdot s}{m^3}$$

Für den Aufbau eines magnetischen Feldes wird Energie benötigt. Diese Energie ist im Luftspalt gespeichert.

Für ein homogenes Feld gilt:

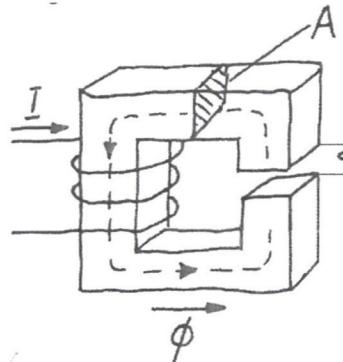
$$W = \frac{B \cdot H}{2} \cdot A \cdot L = \frac{B \cdot H}{2} \cdot V$$

W: Energie [ $W$ ] =  $\frac{V \cdot s}{m^2} \cdot \frac{A}{m} \cdot m^2 \cdot m = Vs \cdot A = Ws = J$ B: Flussdichte in  $\frac{V \cdot s}{m^2}$ H: Feldstärke in  $\frac{A}{m}$ A: Polfläche in  $m^2$ 

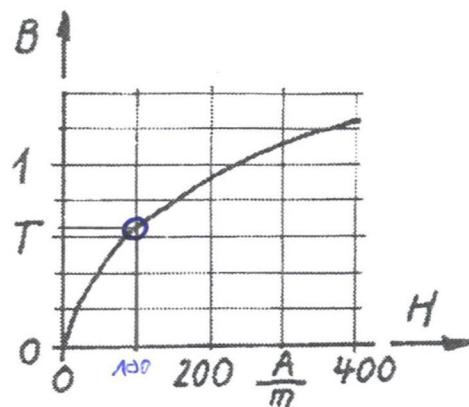
L: Länge des Luftspaltes in m

V: Volumen des Luftspaltes in  $m^3$

## Magnetische Größen Aufgabe 7



Gegeben sind:  
 $N=1000$  Windungen;  
 $I=1A$ ;  $l=2\text{mm}$ ;  
 $A=4\text{cm}^2$   
 $\mu = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$   
 $4\text{cm}^2 = 0,0004\text{m}^2$



Berechnen Sie unter der Bedingung, dass der Widerstand des Stahlgusskerns (Zustandskurve rechts) vernachlässigt wird:

- a) ... die Feldstärke  $H$  im Luftspalt
- b) ... die im Luftspalt vorhandene Energie
- c) ... die Permeabilitätszahl des Eisenkerns mit Hilfe der Zustandskurve ( $\mu_r$ )

$$B = \text{konst.} \Rightarrow B_L = B_{Eisen}$$

Zusatzaufgabe: **10**

Wie lang ist  $l_m$  im Stahlgusskern?

~~$$\Theta = N \cdot I = 1000 \cdot 1A = 1000A$$~~

~~$$V = A \cdot l = 4\text{cm}^2 \cdot 2\text{mm} = 800 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$~~

$$a) \underline{H_L} = \frac{\Theta}{L} = \frac{1000A}{2\text{mm}} = \underline{500'000 \frac{A}{m}}$$

$$\underline{R_L} = \frac{l}{\mu \cdot A} = \frac{2\text{mm}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 4\text{cm}^2} = 3,98 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{Vs}}$$

$$B \frac{\Phi}{A} \quad R_L = \frac{\Theta}{\Phi} \Rightarrow B = \frac{\Theta}{R_L \cdot A} = \frac{1000A}{3,98 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{Vs}} \cdot 4\text{cm}^2}$$

$$\underline{B = 0,629 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} \quad \left( B = \nu \cdot H = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 500'000 \frac{A}{m} = 0,629 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \right)$$

$$c) \underline{H = 100 \frac{A}{m}} \\ \underline{\mu = \frac{B}{H} = \frac{0,629 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}}{100 \frac{A}{m}} = 6,283 \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}} \xrightarrow{\cdot 10^3} \underline{\frac{N}{\mu_0} = \mu_r = 5000}$$

$$b) \underline{W = \frac{B \cdot H}{2} \cdot A \cdot L = 1,257 \text{ mJ}}$$

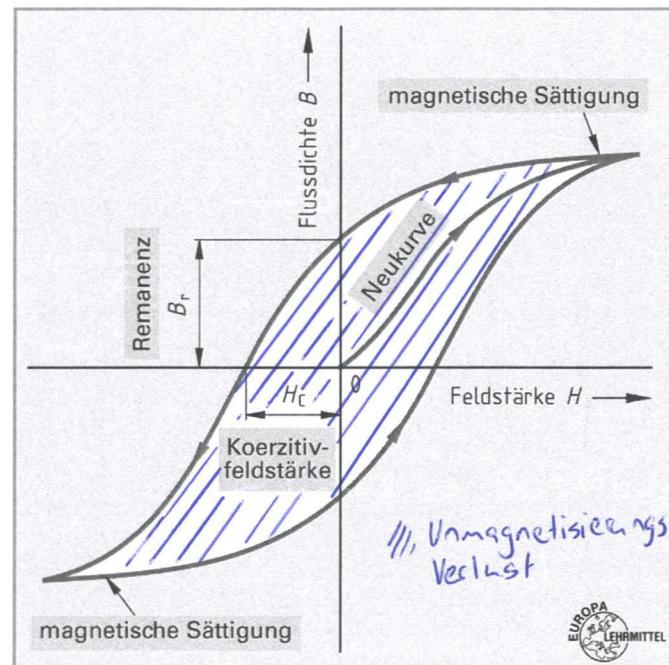
### Die magnetische Hysterese

Die magnetische Hysterese zeigt den Zusammenhang der magnetischen Feldstärke und Flussdichte eines Ferromagnetischen Stoffes beim Betrieb mit Wechselstrom auf.

Zu Beginn ist der Werkstoff nicht magnetisch. Der Strom wird erhöht bis die Sättigung erreicht ist (Neukurve). Danach wird der Strom wieder verkleinert. Wenn der Strom = 0 ist, ist die Feldstärke  $0 \frac{A}{m}$ . Im Eisenkern bleibt eine magnetische Remanenz  $B_r$  (Restmagnetismus) zurück. Kehrt die Stromrichtung um, so wird mit einem kleinen Strom die Flussdichte 0 T. Die Molekularmagnete haben sich wieder in die ursprüngliche Lage versetzt. Der Eisenwerkstoff ist wieder entmagnetisiert. Die Feldstärke wird Koerzitivfeldstärke  $H_c$  genannt. Wird der Strom weiter erhöht, so nimmt die magnetische Flussdichte in umgekehrter Richtung wieder zu, bis wieder die magnetische Sättigung erreicht wird. Es entsteht eine Hystereseschleife.

Hinweis:

Elektrobleche haben sehr kleine Magnetisierungsverluste, da die Zustandskurve wie die Neukurve aussieht und die Hysterese (Fläche) nahezu null ist.



Remanenz  $B_r$ :

*Restmagnetismus! Obwohl  $H=0$  bleiben Molekularmagnete ausgerichtet*

Koerzitivfeldstärke  $H_c$ :

*Die Feldstärke, die angelegt werden muss, damit  $B = 0$  wird (Entmagnetisieren)*

Anwendungen:

- grosse Hysterese

- kleine Hysterese

$\Rightarrow$  Hartmagnetisch

Dauermagnet

$\Rightarrow$  weichmagnetisch

Transformatorbleche

## Magnetische Größen Aufgabe 8

Berechnen Sie die spezifischen Hystereseverluste ( $\frac{P}{m} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Masse}}$ ) des Eisenkerns aus Elektroblech mit der Hysteresekurve vom Bild. Die Frequenz der Netzspannung beträgt 50 Hz. Die Dichte des Elektroblechs beträgt  $7,3 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$ !

Hinweis:

Die umschlossene Fläche der Hysteresekurve ist ein Mass für die Arbeit oder Energie, die bei der Ummagnetisierung auftritt. Die Einheit der Fläche ist  $\frac{Ws}{m^3}$ .

$$\frac{W}{V} = \frac{\frac{B \cdot H}{2} \cdot V}{V} \quad \frac{W}{V} = \frac{B \cdot H}{2} = \frac{143 \cdot 0,1T \cdot 10 \frac{A}{m}}{2} = 71,5 \frac{Ws}{m^3}$$

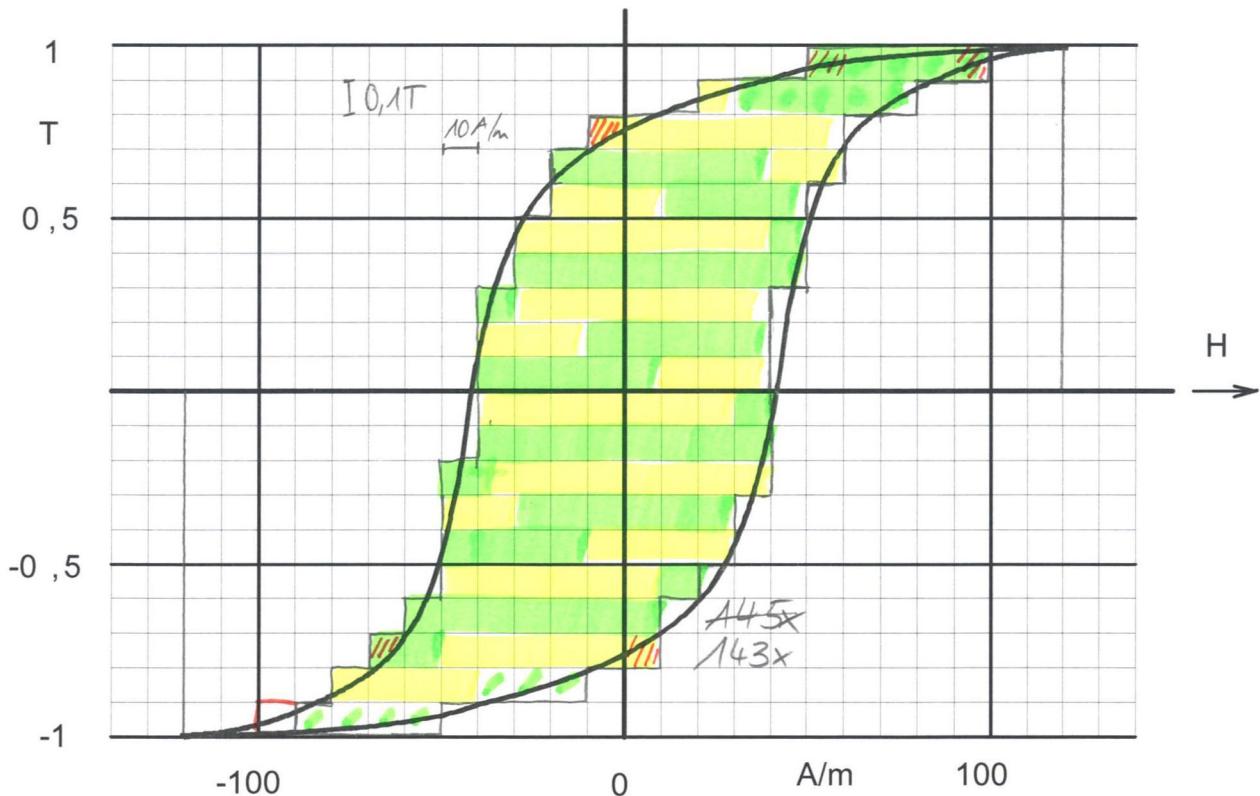
①  $m = Q \cdot V$    ②  $w = p \cdot t \Rightarrow P = \frac{w}{t}$    ③  $\frac{P}{m}$

$$\frac{P}{m} = \frac{w}{V \cdot Q} \quad \frac{1}{V} = f / V = 1 \text{ cm}^3$$

$$\frac{P}{m} = \frac{W \cdot f}{V \cdot Q} = \frac{71,5 \text{ Ws} \cdot 50 \frac{1}{s}}{1 \text{ m}^3 \cdot 7300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,4897 \dots \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \approx 490 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

Somit können die ~~Umgebungs~~ Ummagnetisierungsverluste berechnet werden

$B$  ↑



## Lernkontrolle

Beschreiben Sie den Begriff Durchflutung?

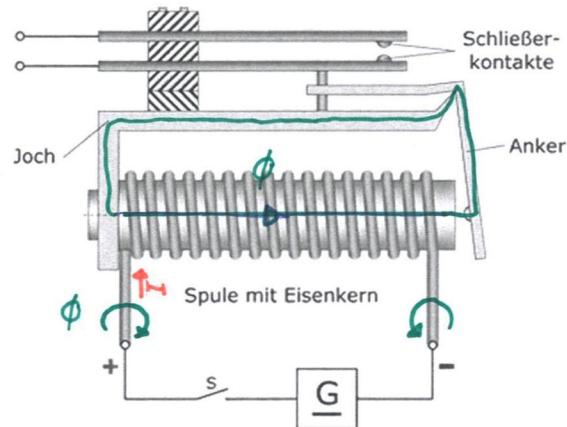
Die Summe aller Feldlinien ✓

Ein Elektromagnet mit  $N_1=1200$  Windungen wird vom Strom  $I_1=0,15A$  durchflossen. Welche Stromstärke  $I_2$  benötigt ein Elektromagnet mit  $N_2=2000$  Windungen für die gleiche Durchflutung?

$$\Theta = N_1 \cdot I_1 = 1200 \cdot 0,15A = 180A$$

$$I_2 = \frac{\Theta}{N_2} = \frac{180A}{2000} = 90mA \quad \checkmark$$

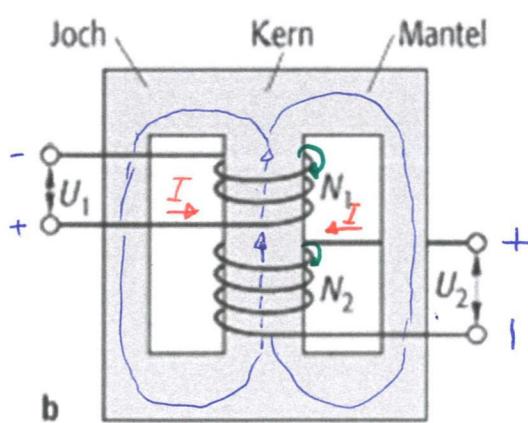
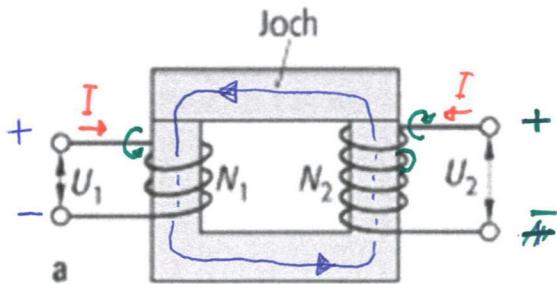
In welcher Richtung wird der magnetische Fluss im Relais aufgebaut?



Bezeichnen Sie die Polarität der Anschluss Klemmen, damit der gezeichnete magnetische Fluss entsteht.

S | N

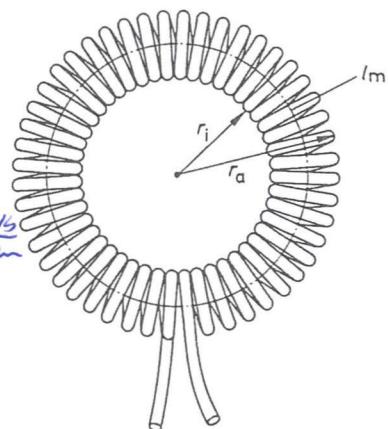
Bestimmen Sie Polarität der fehlenden Anschlussklemmen.



## Lernkontrolle Magnetische Größen

Die Ringspule wird von einem Strom  $I = 3,1 \text{ A}$  durchflossen. Die Windungszahl  $N$  ist 100. Der innere Radius hat  $r_i = 30 \text{ mm}$  und der äussere Radius  $r_a = 37 \text{ mm}$ . Der Drahtquerschnitt beträgt  $2,5 \text{ mm}^2$ . Die Ringspule ist eine Luftspule.

- Wie gross ist die Durchflutung?  $\Theta$
- Wie gross ist die Feldstärke?  $H$
- Wie gross ist die Flussdichte?  $B$
- Wie gross ist der magnetischen Fluss?  $\Phi$
- Welche magnetischen Größen ändern sich, wenn die mittlere Feldlinienlänge verdoppelt wird?



$$a) \underline{\Theta} = N \cdot I = 100 \cdot 3,1 \text{ A} = \underline{310 \text{ A}}$$

$$b) H = \frac{\Theta}{l_m} \quad l_m = \left( \frac{r_a + r_i}{2} \right) 2 \cdot \pi = \left( \frac{0,03\text{m} + 0,037\text{m}}{2} \right) 2\pi$$

$$\underline{l_m = 0,211\text{m}}$$

$$\underline{H = \frac{310\text{A}}{0,211\text{m}}} = \underline{1472,78 \frac{\text{A}}{\text{m}}}$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad | \cdot H \cancel{\cdot \mu}$$

$$c) \underline{B = H \cdot \mu} = 1472,78 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = \underline{1,85 \text{ mT}}$$

$$d) \underline{B = \frac{\Phi}{A}} \quad | \cdot A$$

$$\underline{\Phi B = A \cdot B = 2,5 \text{ mm}^2 \cdot 1,85 \text{ mT} = 4,63 \text{ Vs}}$$

$$c) H : \text{halbier}t \quad B : \text{Halbiert}$$

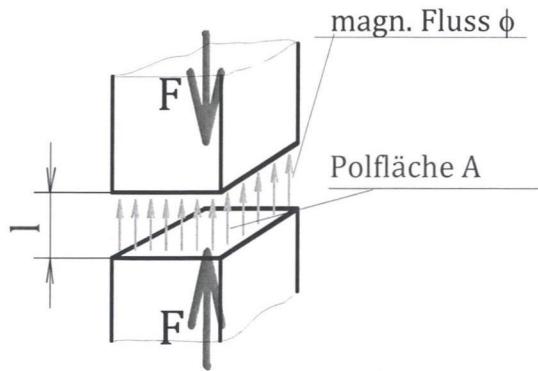
$$\Phi : \text{halbier}t \quad R_m : \text{verdoppelt}$$

$$\Theta : \text{bleibt} \quad \mu : \text{bleibt}$$

$A_L$

### 4.3.4 Auswirkungen des magnetischen Feldes

#### Kraftwirkung zwischen zwei Polen



Die Energie im Luftspalt errechnet sich:

$$\textcircled{1} W = \frac{1}{2} B \cdot H \cdot V \quad \textcircled{2} V = A \cdot L$$

$$\textcircled{3} H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$

$$\textcircled{2.3 \text{ in } 1: } W = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot A \cdot L$$

$$\textcircled{4} W = F \cdot s \quad \textcircled{5} L = s$$

$$\hookrightarrow F = \frac{W}{s}$$

$$F = \frac{W}{s} = \frac{A \cdot B^2 \cdot L}{2 \mu_0 \mu_r \cdot l} = \frac{A \cdot B^2}{2 \mu_0 \mu_r}, \mu_r = 1$$

Für das homogene Feld gilt:

Die anziehende Kraft von einem Pol beträgt: (Im Luftspalt)  $\mu_r = 1$

$$F = \frac{A \cdot B^2}{2 \cdot \mu_0}$$

Es wird nur die Kraft für 1 Pol berechnet

F: Kraft in N

A: Fläche von einem Pol in  $m^2$

B: Flussdichte in  $\frac{Vs}{m^2}$

$\mu_0: 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

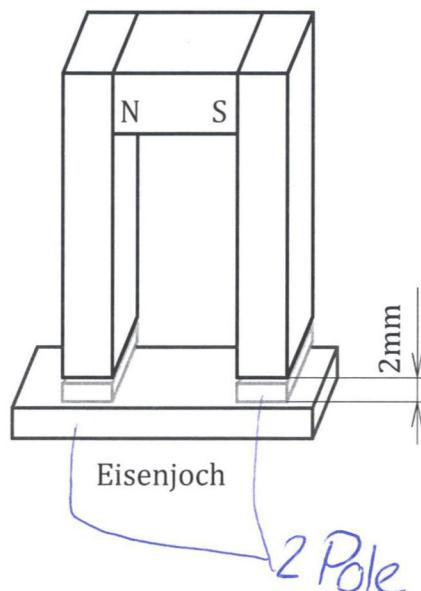
#### Beispiel

Welche Kraft  $F_{ges}$  ist notwendig um das Eisenjoch vom Hufeisenmagneten zu trennen? Der magnetische Fluss  $\phi$  beträgt  $2,5 \cdot 10^{-4} Vs$ . Die Fläche eines Poles beträgt  $4cm^2$ .

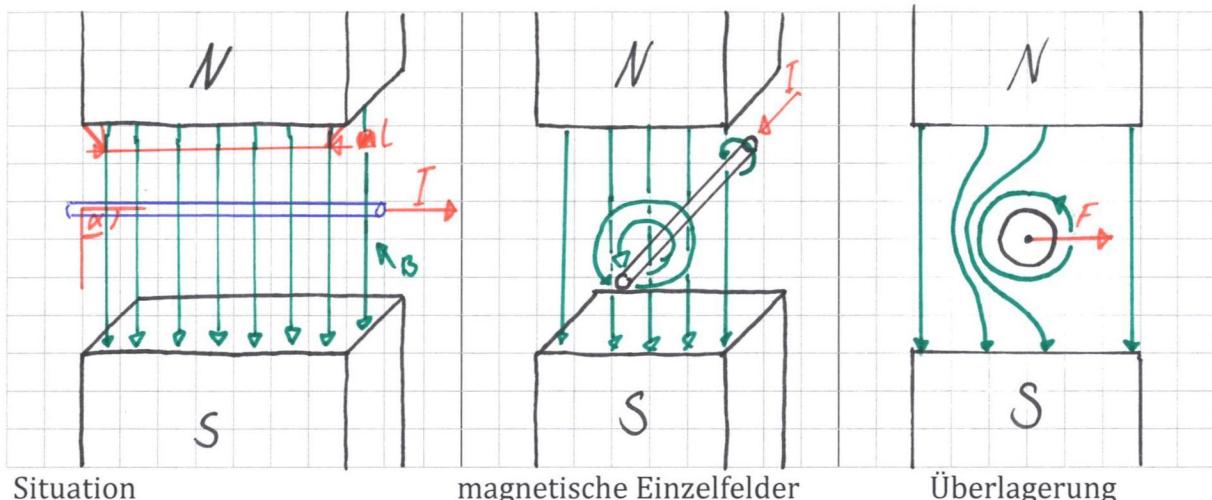
$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4} Vs}{4 cm^2} = 0,625 T$$

$$F = \frac{A \cdot B^2}{2 \cdot \mu_0} = \frac{4 cm^2 \cdot (0,625 T)^2}{2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}}$$

$$F = 62,15 N \xrightarrow{\cdot 2} F_{ges} = 124 N$$



## Kraftwirkung auf stromdurchflossene elektrische Leiter



Situation magnet  
Für das homogene Feld und n Leiter gilt:

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot n \cdot \sin(\alpha)$$

F: Kraft in N

I: Strom in A

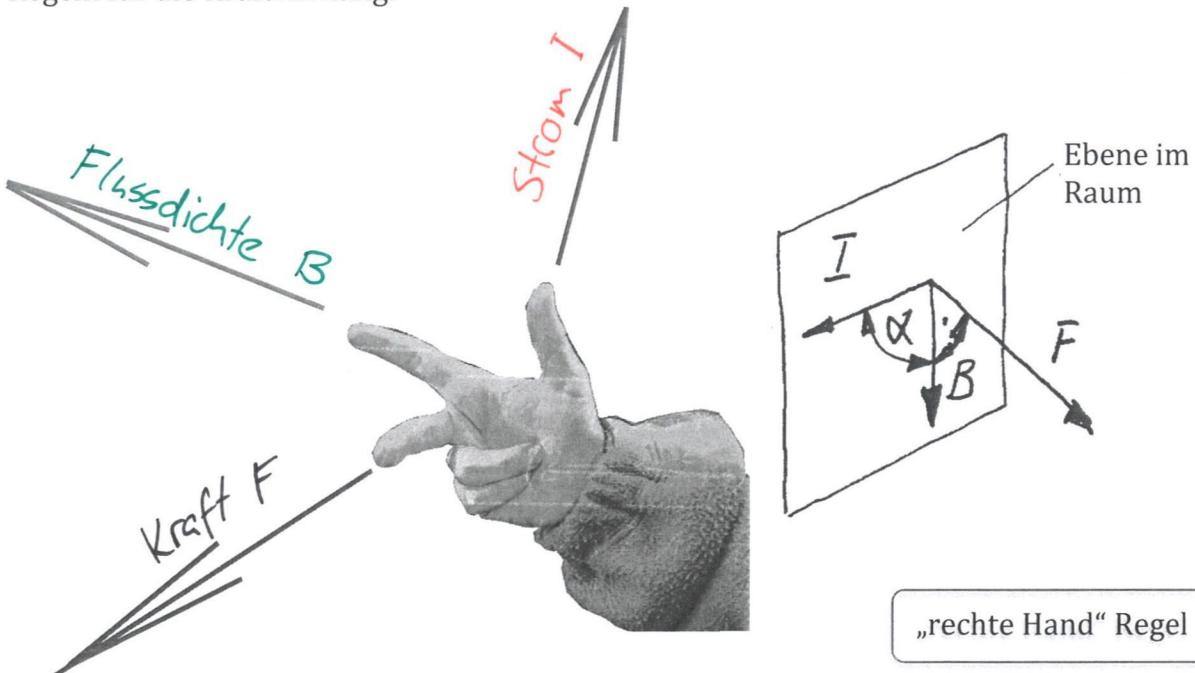
n: Anzahl stromdurchflossener Leiter

l: Leiterlänge im Magnetfeld in m

$$B: \text{ Flussdichte in } \frac{Vm}{m^2} = T$$

$\alpha$ : Winkel zwischen Strom und magnetischen Fluss

## Regeln für die Kraftwirkung:



Anwendungen : • dynamisches Mikrofon, dynamischer Lautsprecher  
• Motoren Generatoren  
• Drehspuluhlmessinstrument

## Verschiedene Aufgaben

## Aufgabe 1 „Drehspulmesswerk“

Der Zeiger ist mit der Spule verbunden. Die Spule mit  $N=50$  ist drehbar gelagert. Durch die Spule fließt ein Strom von  $100\text{mA}$ . Die Flussdichte im Luftspalt beträgt  $350\text{mT}$ .

- Berechnen Sie das Drehmoment, welches auf die Spule wirkt.  $M = F \cdot l$
- In welche Richtung wird der Zeiger ausgelenkt?

$$A = b \cdot l = 0,012\text{m} \cdot 0,018\text{m} = 2,16 \cdot 10^{-5}\text{m}^2$$

$$a) M = 2 \cdot F \cdot r ; F = I \cdot B \cdot L \cdot n \cdot \sin(\alpha)$$

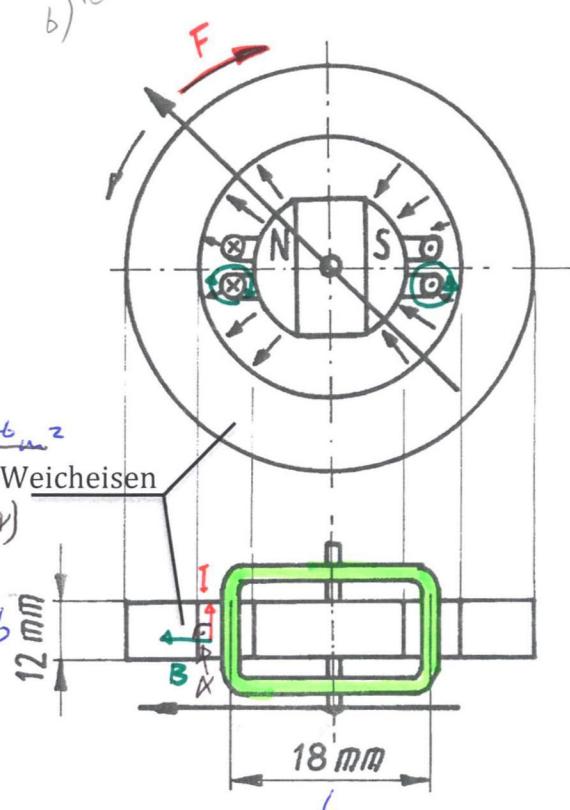
$$M = 2 \cdot I \cdot B \cdot L \cdot n \cdot \sin(\alpha)$$

$$\alpha = 90^\circ ; l = 12\text{mm} ; r = 9\text{mm}$$

$$M = 2 \cdot 0,1\text{A} \cdot 0,35\text{T} \cdot 0,012\text{m} \cdot 50 \cdot \frac{\sin(90^\circ)}{=1} \cdot 0,009\text{m}$$

$$M = 0,378 \text{ mNm}$$

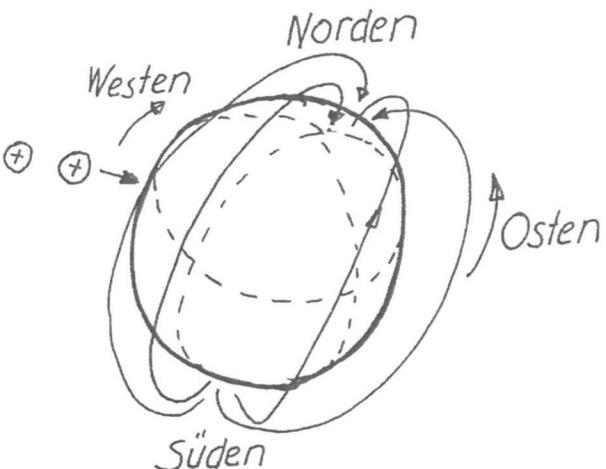
b) rechte hand Regel



## Aufgabe 2 „Regen über dem Äquator“

Über dem Äquator geht ein Gewitterregen nieder. In welche Richtung werden positiv geladene Regentropfen bei Windstille abgelenkt?

- Die Regentropfen gehen in den Osten



## Aufgabe 3 „Querschnitt durch einen Motor“

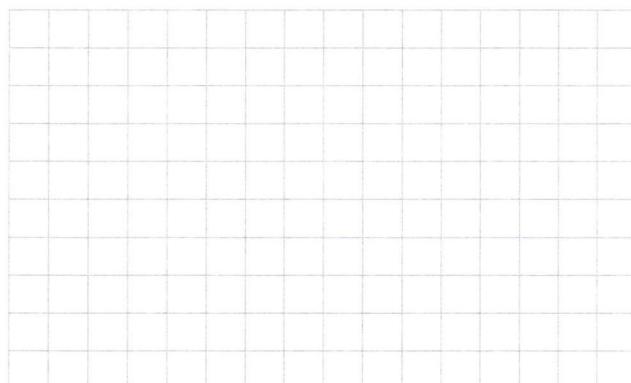
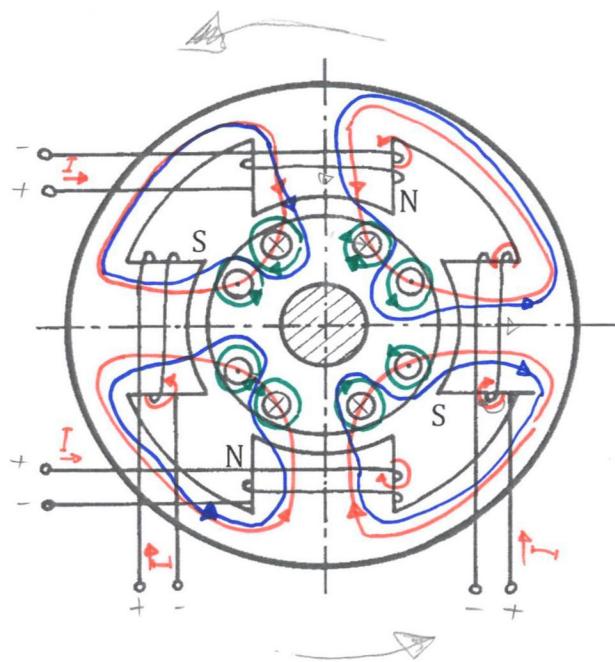
Der Rotor und Stator bestehen aus einem Weichmagnetischen Werkstoff.

- Zeichnen Sie in grüner Farbe für jeden Leiter im Rotor eine Feldlinie ein.
- Zeichnen Sie in roter Farbe die Feldlinien ein, welche nur von der Statorwicklung verursacht werden. (zwei pro Pol genügen)
- Bezeichnen Sie alle Statoranschlüsse mit der benötigten Polzeichen (+ oder -) damit sich die magnetischen Nord und Südpole bilden.
- Zeichnen Sie die resultierenden Feldlinien in blauer Farbe ein, die durch die Überlagerung entstehen.
- Zeichnen Sie den Drehsinn der Welle ein.

## Aufgabe 4 „Hystereseschleife“

Zeichnen Sie die Hystereseschleife eines hartmagnetischen Werkstoffes. Wie heißen die zu den Achsabschnitten gehörenden wichtigen Größen?

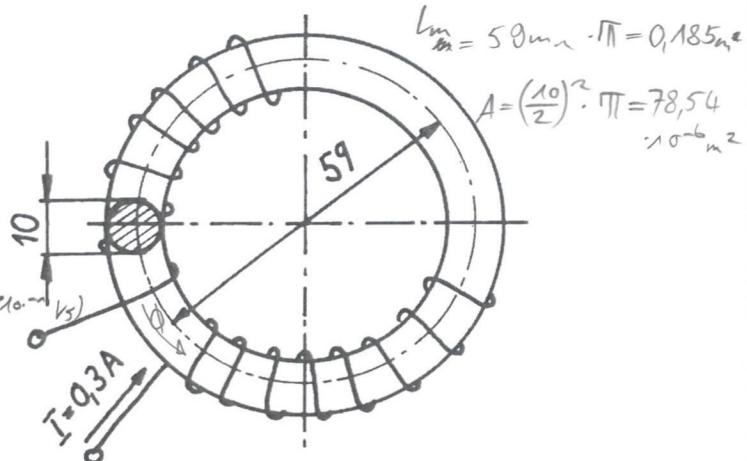
Tragen Sie die Größen mit den richtigen Einheiten ein. Beschriften Sie die Achsen vollständig.



## Aufgabe 5 „Ringkern“

Berechnen Sie für den skizzierten Ringkern diverse magnetische Größen. Die Windungszahl ist 56 und die Permeabilitätszahl 150.  $\mu_r$

- Wie gross ist die Durchflutung? (16,8 A)
- Wie gross ist die Feldstärke? ( $90,64 \frac{A}{m}$ )
- Wie gross ist die Flussdichte? ( $17,1 mT$ )
- Wie gross ist der magnetische Fluss? ( $1,34 \cdot 10^{-6} Vs$ )
- Welche magnetischen Größen ändern sich wie, wenn die mittlere Feldlinienlänge verdoppelt wird?



$$a) \underline{\underline{\Theta}} = N \cdot I = 56 \cdot 0,3A = \underline{\underline{16,8A}}$$

$$b) \underline{\underline{H}} = \frac{\underline{\underline{\Theta}}}{l_m} = \frac{16,8A}{0,185m} = \underline{\underline{90,64 \frac{A}{m}}}$$

$$c) \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{H}} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r = 90,64 \frac{A}{m} \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \cdot 150 = \underline{\underline{17,1 mT}}$$

$$d) \underline{\underline{\phi}} = \underline{\underline{B}} \cdot A = 17,1 mT \cdot 78,54 \cdot 10^{-6} m^2 = 1,34 \cdot 10^{-6} Vs$$

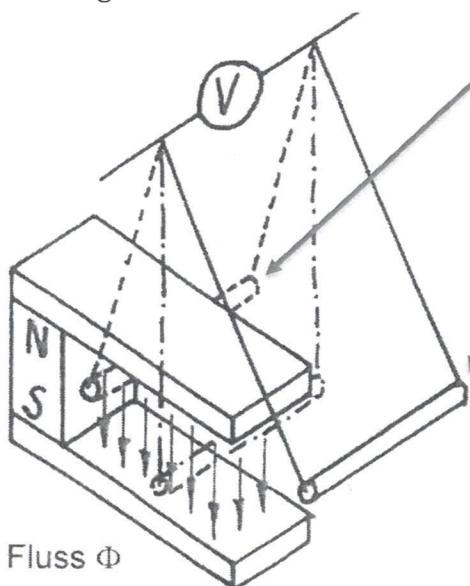
## 4.4 Induktionswirkung

Lehrziele:

- Spannungserzeugung durch die Induktion beschreiben
- Einflussgrößen bei der Spannungserzeugung durch die Induktion erläutern
- Lenz'sche Regel anwenden
- Induzierte Spannung berechnen und den Spannungsverlauf grafisch darstellen

### 4.4.1 Induktionsgesetz

Messung:



$$U = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

- a) Die Leiterschleife umschliesst den gesamten magnetischen Fluss.
- b) Die Leiterschleife ist außerhalb vom homogenen Feld (kein Fluss)

Feststellung:

Bewegt sich die Leiterschleife von A nach B in der Zeit  $\Delta t$ , kommt eine Änderung des Flusses zustande.

Merke:

Ändert in einer geschlossenen Leiterschleife (oder Spule) der magnetische Fluss, so entsteht eine Spannung

N: Windungszahl der Spule

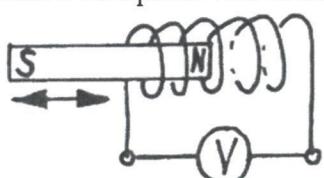
$\Delta \Phi$ : Flussänderung in Vs

### Lenz'sche Regel

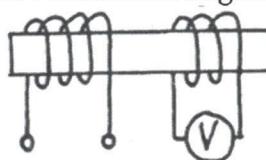
(Russischer Wissenschaftler 1804 - 1865)

Die entstehende Spannung ist so gerichtet, dass der Ursache (in unserem Beispiel die Flussänderung) entgegengewirkt wird. Der durch die Spannung erzeugte Strom bewirkt ein magnetisches Feld, welches dem Feld des Dauermagneten entgegenwirkt.

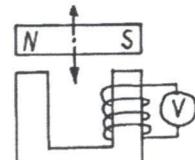
Weitere Beispiele von erzwungenen Flussänderungen:



Bewegen eines Dauermagneten in einer Spule, damit eine Flussänderung zustande kommt



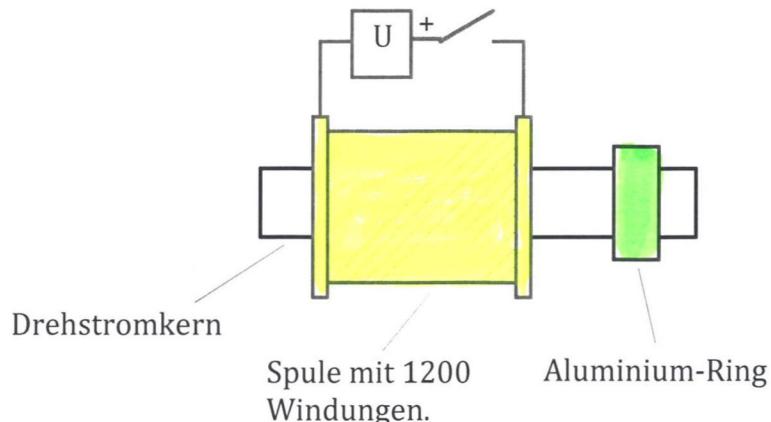
Die Änderung des Stromes in der linken Spule bewirkt die Flussänderung, welche in der rechten Spule eine Spannung erzeugt.



Die mechanischen Bewegungen des Dauermagneten bewirken im Kern eine Flussänderung, welche in der Spule eine Spannung erzeugt.

**Versuch**

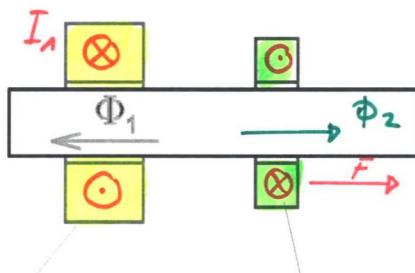
Auf einem ferromagnetischen Kern befindet sich eine Spule, durch welche der Strom ein- und ausgeschaltet werden kann. Beim Umschalten des Stromes wird der bewegliche Al-Ring durch eine Kraft verschoben.

**Aufgabe**

Ergänzen Sie die beiden Skizzen durch die Richtungssymbole für den Strom für den Einschalt- und für den Ausschaltvorgang. Überlegen Sie sich die Feldlinienbilder für die feste und auch für die bewegliche Spule (Al-Ring).

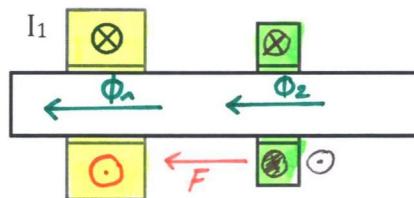
Zeichnen Sie nun mit Farbe die Bewegungsrichtung des Al-Rings ein!

Einschalten des Stromes



Spule mit 1200 Aluminium Ring  
Windungen

Ausschalten des Stromes



$I_1$  ist zunehmend

$\rightarrow \Phi_1$  ist zunehmend

•  $\Phi_2$  wirkt der Vergrößerung von  $\Phi_1$  entgegen.

Der Ring wird abgestossen

$I_1$  abnehmend

$\rightarrow \Phi_1$  ist abnehmend

•  $\Phi_2$  wirkt der Verkleinerung von  $\Phi_1$  entgegen

Der Ring wird angezogen

**Lenz'sche Regel (Lenz'sches Gesetz):**

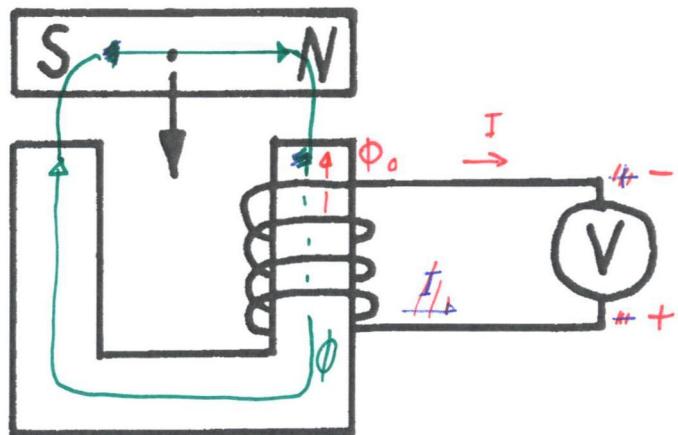
ein von Heinrich Lenz gefundenes Gesetz (1834) zur elektromagnetischen Induktion:

Die induzierte Spannung ist stets so gerichtet, dass das Magnetfeld des durch sie verursachten Stromes der Induktionsursache entgegenwirkt.

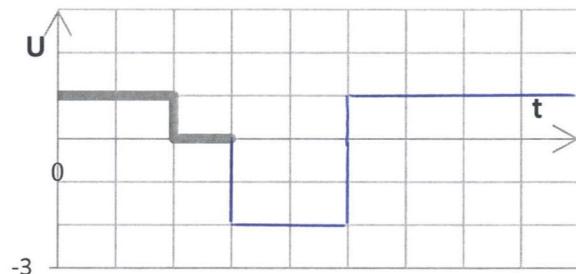
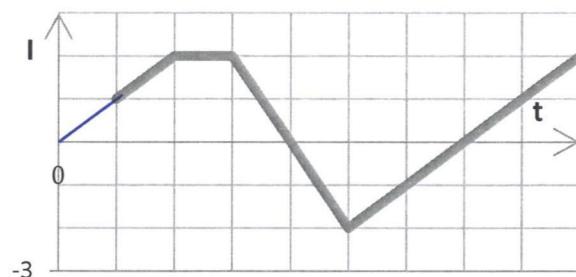
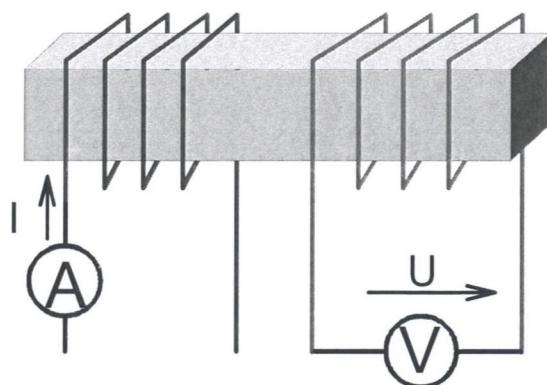
**Aufgabe1**

Welche Polarität hat die Spannung beim Absenken des Magneten?

- Durch das Absenken des Magneten vergrössert sich der Fluss  $\phi$  im Eisenkern
- Der induzierte Strom wirkt der Vergrösserung des Feldes entgegen  $\phi_0$  wird erzeugt.
- Mit Hilfe der Grafik kann die technische Stromrichtung ermittelt werden  $\Rightarrow$  Die Polarität am Voltmeter kann jetzt eingetragen werden.

**Aufgabe 2**

Ergänzen Sie die Diagramme



#### 4.4.2 Wirbelströme

Jede(r) Lernende stellt sich Notizen aus der Fachliteratur zusammen. Beantworten Sie danach die folgenden Fragen:

Wie entstehen Wirbelströme?

Durchdringt ein magnetisches Wechselfeld Metall, so werden dort Wirbelströme erzeugt

\*

Was passiert mit einem Eisenkern in einem Wechselfeld? Nennen Sie eine Anwendung.

Der Eisenkern erwärmt sich. Es kann sogar schmelzen.



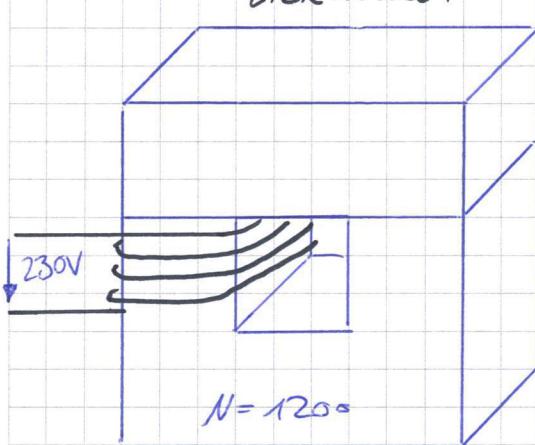
<https://www.youtube.com/watch?v=8i20VqWo9s0>

Was passiert mit geschichteten Eisenblechen in einem Wechselfeld? Nennen Sie eine Anwendung.

Der Aufbau und die Zugsäge von Si bewirkt, dass die entstehenden Wirbelströme kleiner werden.

Versuchsaufbau

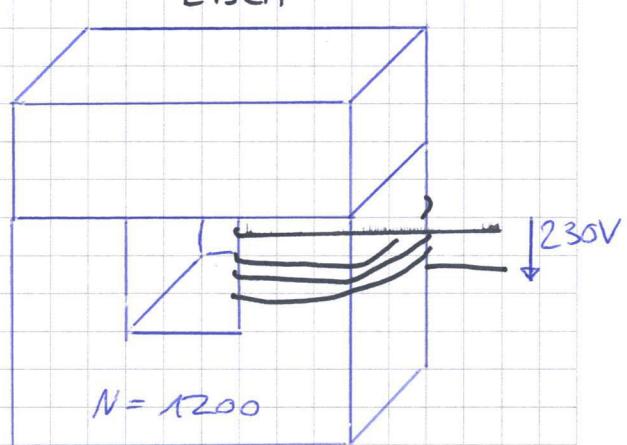
Elektroblech



Starttemperatur) 23,8 °C

Endtemperatur) 23,8 °C

Eisen



23,8 °C

39,3 °C

**Lernkontrolle**

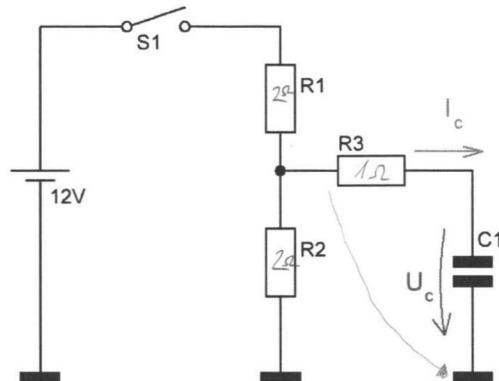
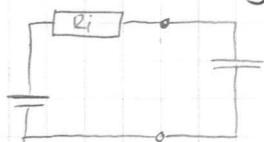
Bei der folgenden Schaltung ist der Kondensator entladen. Wenn der Schalter S1 betätigt wird, wird der Kondensator C<sub>1</sub> geladen.

Folgende Werte sind gegeben:

$$C_1 = 10 \text{ mF}; R_1 = 2 \Omega; R_2 = 2 \Omega; R_3 = 1 \Omega;$$

Berechnen Sie:

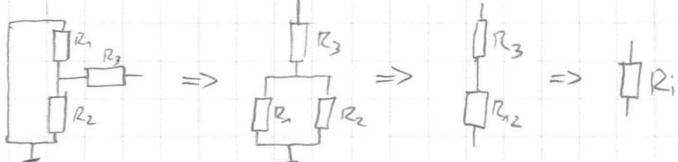
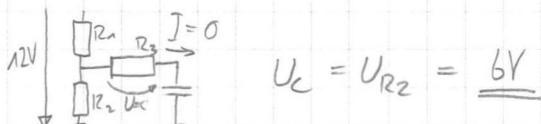
- Die Zeit t bis der Kondensator geladen ist. ( $5\tau$ )
- Die Spannung U<sub>C</sub> am Kondensator nach dem Ladevorgang.
- Der maximale Ladestrom I<sub>C</sub>.

**a) Ersatzspannungsquelle**

$$R_i = R_1 \parallel R_2 + R_3$$

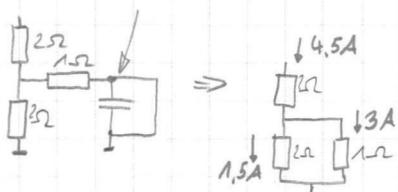
$$R_i = 2\Omega \parallel 2\Omega + 1\Omega = \underline{\underline{1\Omega}}$$

$$\underline{\underline{t_{5T} = 5 \cdot C \cdot R_i = 5 \cdot 10 \mu F \cdot 2 \Omega = 100 \text{ ms}}}$$

**b) Wenn C geladen ist, ist I<sub>C</sub> = 0A  $\Rightarrow$  unbelasteter Spannungsteiler**

$$U_C = U_{R_2} = \underline{\underline{6V}}$$

$$c) R_C = 0\Omega \xrightarrow{\text{erst wenn Spannung angelegt}} \text{ wird } \rightarrow R_C \neq 0\Omega \quad R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 \parallel R_3 = 2\Omega + \frac{2\Omega}{3\Omega} = \underline{\underline{2,67\Omega}}$$



$$I_{\text{ges}} = \frac{U_b}{R_{\text{ges}}} = \frac{12V}{2,67\Omega} = \underline{\underline{4,5A}}$$

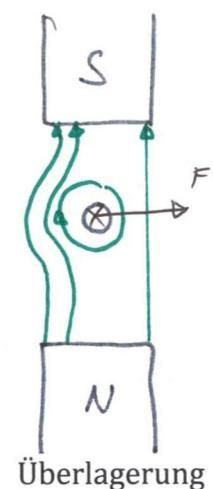
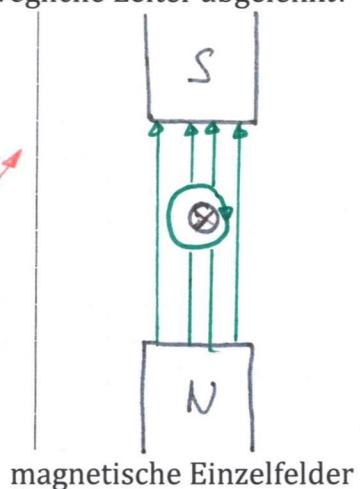
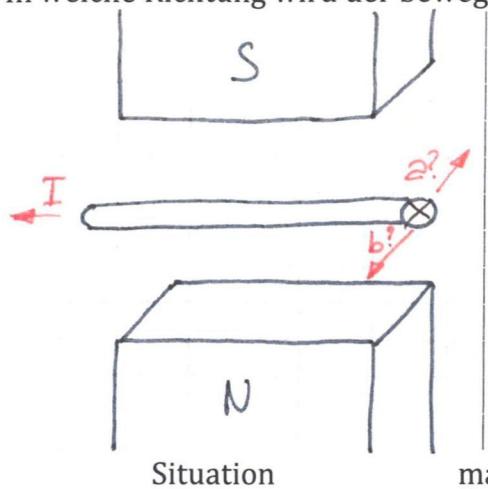
$$U_1 = R_1 \cdot I_{\text{ges}} = 2 \cdot 2 \cdot 4,5A = \underline{\underline{9V}}$$

$$U_2 = U_i = U_b - U_1 = 12V - 9V = \underline{\underline{3V}}$$

$$I_C = \frac{U_i}{R_3} = \frac{3V}{1\Omega} = \underline{\underline{3A}}$$

**Lernkontrolle**

In welche Richtung wird der bewegliche Leiter abgelenkt?



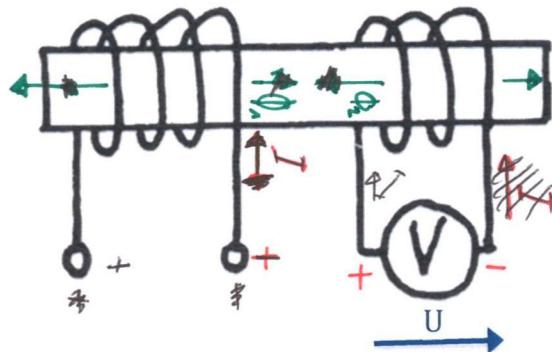
Antwort:

a) ✓

b)

Bei der Linken Spule wird der Strom eingeschaltet. Das Voltmeter misst eine Positive Spannung. Vorgehen:

- Zeichen Sie den passenden magnetischen Fluss  $\phi_2$  im Eisenkern bei der rechten Spule ein.
- Zeichen Sie den passenden magnetischen Fluss  $\phi_1$  im Eisenkern bei der linken Spule ein.
- Zeichnen Sie die Stromrichtung bei der linken Spule ein, welcher den magnetischen Fluss  $\phi_1$  erzeugt.
- Beschriften Sie die Klemmen mit der passenden Polarität.

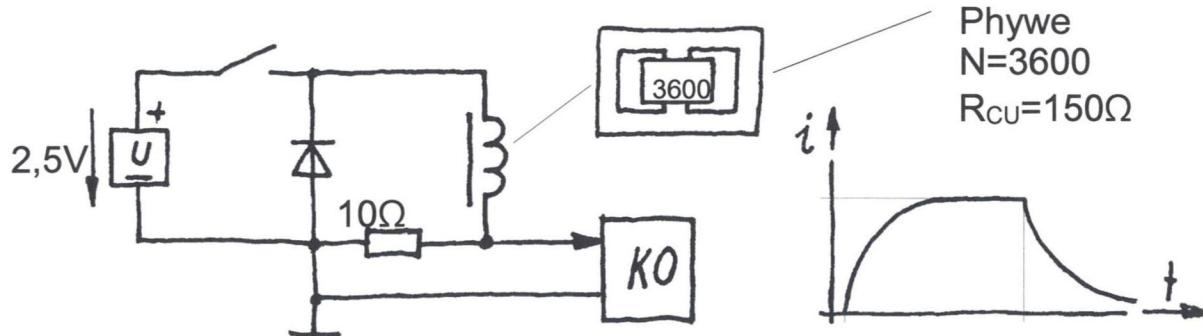


## 4.5 Induktivität

Lehrziele:

- Definition der Induktivität wiedergeben
- Induktivität einer Spule berechnen

### 4.5.1 Die Spule als Energiespeicher



Feststellung

Beim Ein- und Ausschalten ändert der Strom verzögert.

→ Es dauert einige Zeit, bis die Energie im magnetischen Feld gespeichert ist

→ Das Fassungsvermögen ist vom magnetischen Kreis abhängig.

Zur Erinnerung:

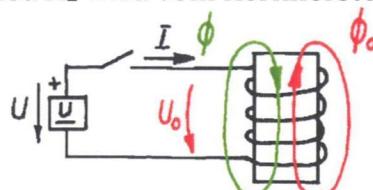
$$R_m = \frac{L_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} = \frac{\Theta}{\Phi}$$

Neue Definition

$$A_L = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{L_m} = \frac{\Phi}{\Theta}$$

$A_L$ : Spulenkonstante in  $\frac{Vs}{A}$

$A_L$  ist der magnetische Leitwert der Spule und wird auch als Spulenkonstante bezeichnet.  $A_L$  wird vom Kernhersteller der Spule angegeben.



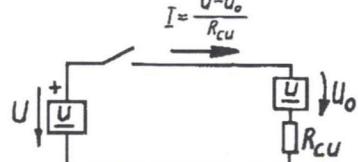
Gedankenexperiment:  $I$  wird grösser  $\rightarrow \Phi$  wird grösser

Lenzsche Regel: Es entsteht  $\Phi_0$  der  $\Phi$  entgegenwirkt.

⇒ In der Wicklung wird  $U_0$  induziert

$$U_0 = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

⇒  $U_0$  Gegenspannung zu  $U$  → wirkt der Vergrösserung von  $I$  entgegen.



$$U_0 = -N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -N \cdot \frac{A_L \cdot \Delta \Theta}{\Delta t} = -N \frac{A_L \cdot \Delta I \cdot N}{\Delta t} = \underbrace{A_L \cdot N^2}_{L} \cdot \frac{-\Delta I}{\Delta t}$$

$$A_L = \frac{\Phi}{\Theta} \rightarrow \Phi = A_L \cdot \Theta$$

$$L = A_L \cdot N^2$$

L: Induktivität in  $\frac{Vs}{A}$  1  $\frac{Vs}{A}$  = 1H (Henry)

$$U_0 = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$U_0$ : induzierte Spannung in V

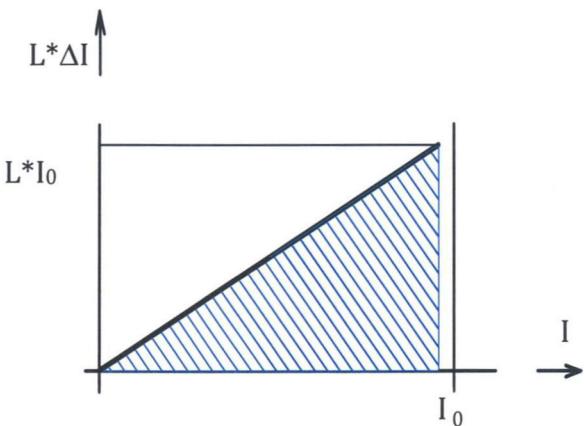
Energieladegesetz der Spule:

Vergleichen sie auch mit dem Energieladegesetz des Kondensators.

$$U_0 \cdot \Delta t = L \cdot \Delta I$$

$$I_0 \cdot t = C_0 U = Q$$

Die Induktivität speichert Energie im magnetischen Feld,  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$



$$\text{Fläche} = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

$$\left[ \frac{L \cdot I^2}{2} \right] = \frac{V \cdot s \cdot A^2}{A} = VAs = Ws = J$$

$$W = V \cdot \frac{B \cdot H}{2} = V \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot H^2}{2}$$

$$V = A \cdot L \quad H = \frac{\Theta}{L}$$

$$\Theta = I \cdot N \quad \Theta = \frac{I \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{2} \cdot \frac{\Theta}{L} \cdot \frac{\Theta}{L} = \frac{\mu \cdot A}{L} \cdot \frac{(N \cdot I)^2}{2}$$

$$W = \frac{\mu \cdot A}{L} \cdot \frac{N^2}{2} \cdot \frac{I^2}{2}$$

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2} = A_L \cdot N^2 \cdot \frac{I^2}{2}$$

Merke:

Nur solange Strom fließt, ist Energie im magnetischen Speicher (Spule) vorhanden.

**Aufgabe 1**

Schreiben Sie analoge Formeln für andere Bereiche der Physik auf.  
(kinetische, potentielle Energie – Energie im elektrischen Feld)

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{Kinematik}) ; W_p = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (\text{potentiell}) ; W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (\text{elek. Feld})$$

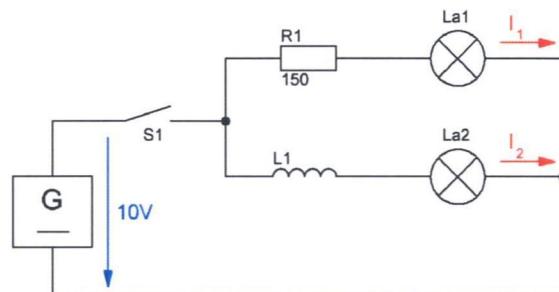
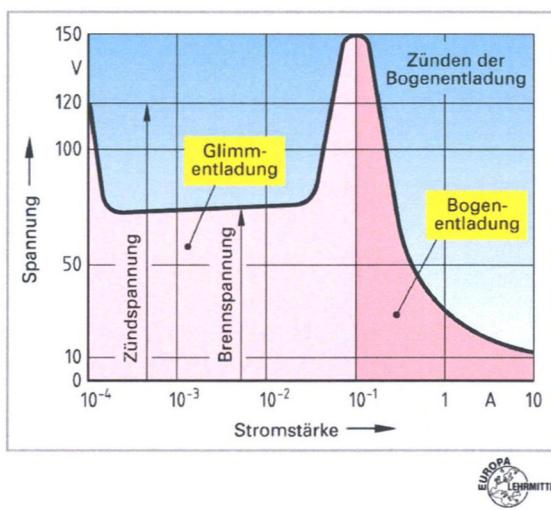
**Versuch 1**

Einschaltvorgang der Lampen beobachten:

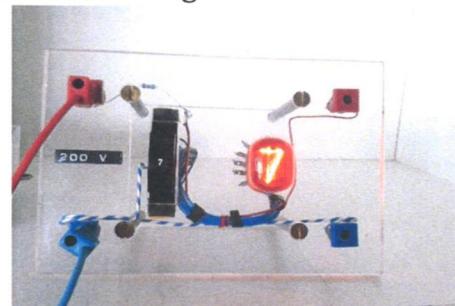
La<sub>1</sub>, La<sub>2</sub>: 40mA @ 4V

L: Phwey Drehstromkern mit N = 3600, R<sub>cu</sub> = 150Ω

Wegen der Selbstinduktion wird  
I<sub>2</sub> verzögert  
⇒ Der Energiespeicher muss  
zuerst geladen werden.

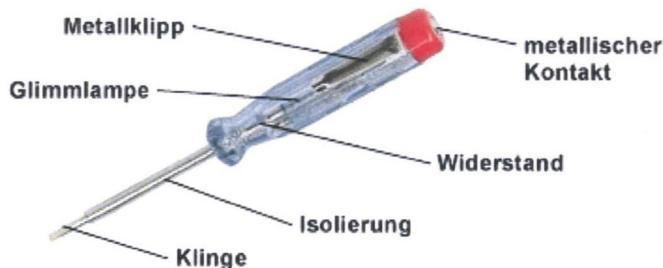
**Die Glimmlampe**

Lesen Sie im FI das Kapitel Gasentladungs-  
röhren bis und mit Glimmlampen.  
Früher wurden Glimmlampen für Signal-  
leuchten und als Anzeigen verwendet.



In Schweissergeräten werden Glimmlampen ohne Vorwiderstand betrieben. Dabei wird bei der Bogenentladung die nötige Energie zum Schweißen abgegeben. Mittlerweile werden auch Schweissergeräte mit Leistungshalbleitern hergestellt (Umrichter Technologie).

Bis heute werden Glimmlampen in Phasenprüfern verwendet.

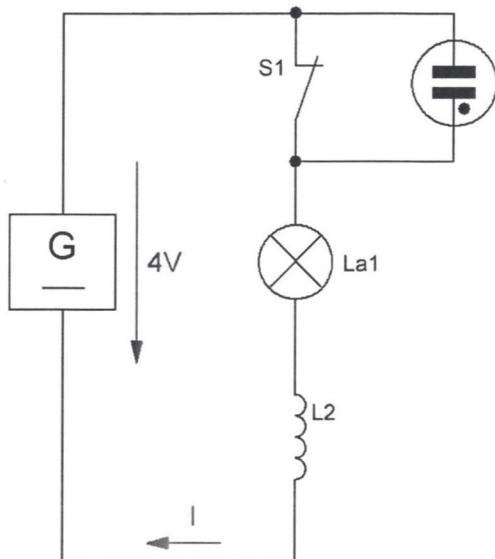


(Schnabel)

Mit diesen ist es möglich Spannungsführende Leitungen zu erkennen.

**Versuch 2**

Die Glimmlampe für diesen Versuch hat eine Zündspannung von 137V.

**Beobachtung**

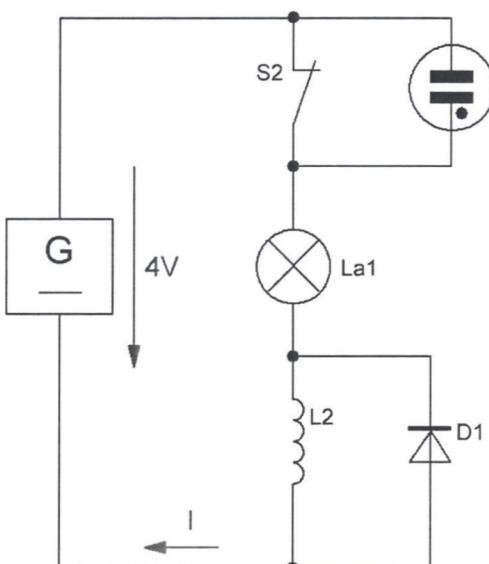
Kurzes Blitzen der Glimmlampe beim öffnen des von Schalter S1.

Durch unterbrechen vom Stromkreis wird der Strom abgeschaltet. Stromänderung  $\rightarrow$  induzierte Spannung  $\rightarrow$  Glimmlampe leuchtet

**Schutzmassnahmen:**

Werden Transistoren zum Schalten von Induktivitäten (Motoren, Relais, Spulen) eingesetzt, so muss mit Hilfe einer Schutzschaltung eine zu grosse Spannung am Transistor verhindert werden. Ohne Schutzeinrichtung kann der Transistor beim Schalten zerstört werden!

Die Schaltkontakte von Relais und Schaltern können aus demselben Grund abbrennen oder verkleben (Verschweissung).

**Versuch 3****Beobachtung**

$D_1$  sperrt normalerweise. Beim unterbrechen des Stromkreises kann, der durch die Spule erzeugte Strom über  $D_1$  weiterfliessen, bis die gesamte Energie vom Magnetfeld in Wärme umgewandelt sind.

- keine Überspannung am „Schalter“
- keine Zerstörungsgefahr des Schalttransistors.

$$i = \frac{U \cdot t}{L} \quad u = \frac{L \cdot I}{t}$$

## Aufgabe 2

Berechnen Sie  $i_L$  und  $u_L$  für die Zeitpunkte  $t_1 = 1\text{s}$ ,  $t_2 = 5\text{s}$  und  $t_3 = 20\text{s}$  nach schliessen des Stromkreises.

$$i_1 = \frac{U \cdot t_1}{L} = \frac{10V \cdot 1s}{0,2H} = \underline{\underline{50A}}$$

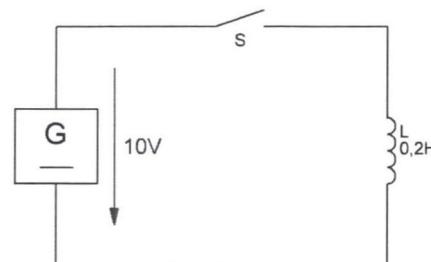
$$u_1 = 10V$$

$$i_2 = 250A$$

$$u_2 = 10V$$

$$i_3 = 1000A$$

$$u_3 = 10V$$



Merke:

idealerweise würde der Strom beliebig ansteigen

- max. möglicher Strom aus der Quelle
- max. Stromdichte der Spule
- ohmischer Widerstand des Stromkreises
- Sättigung des magnetischen Kreises

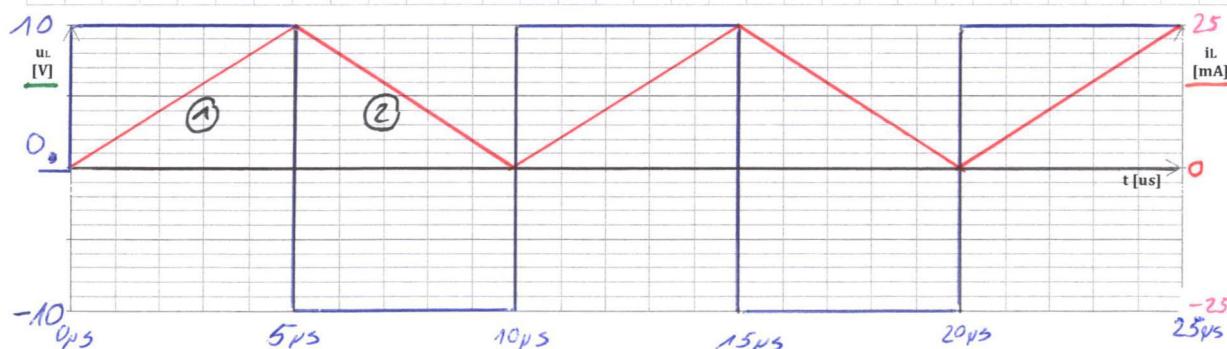
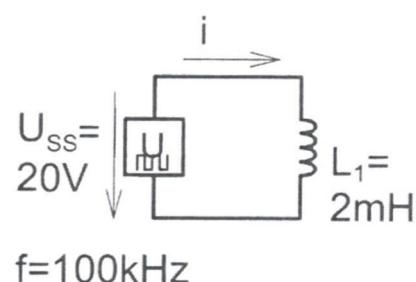
## Aufgabe 3

Stellen Sie in einem Liniendiagramm  $i = f(t)$  und  $u_L = f(t)$  für den Zeitbereich  $t = 0\text{s}$  bis  $t = 2,5T$  (2,5 Perioden) dar.

Die Spannungsquelle liefert eine symmetrische, rechteckförmige Wechselspannung.

$$\textcircled{1} \quad \Delta i = \frac{U_0 \cdot \Delta t}{L} = \frac{10V \cdot 5\mu s}{2mH} = \underline{\underline{25mA}}$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta i = \frac{U_0 \cdot \Delta t}{L} = \frac{-10V \cdot 5\mu s}{2mH} = \underline{\underline{-25mA}}$$



**Aufgabe 4**

Gegeben ist der Verlauf  $u_R = f(t)$ . Zeichnen Sie den Verlauf  $u_L = f(t)$ .

$$\textcircled{1} \quad \Delta u_R = R \cdot \Delta i$$

$$\Delta i = \frac{\Delta U}{R} = \frac{2V}{1\Omega} = 2A$$

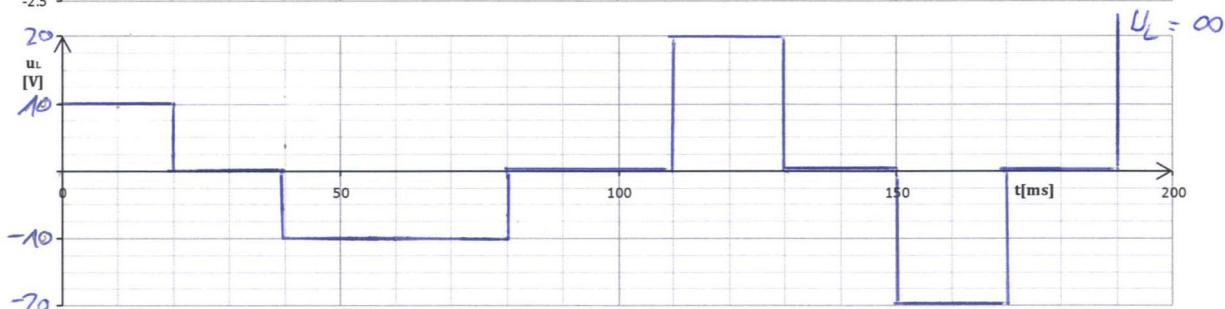
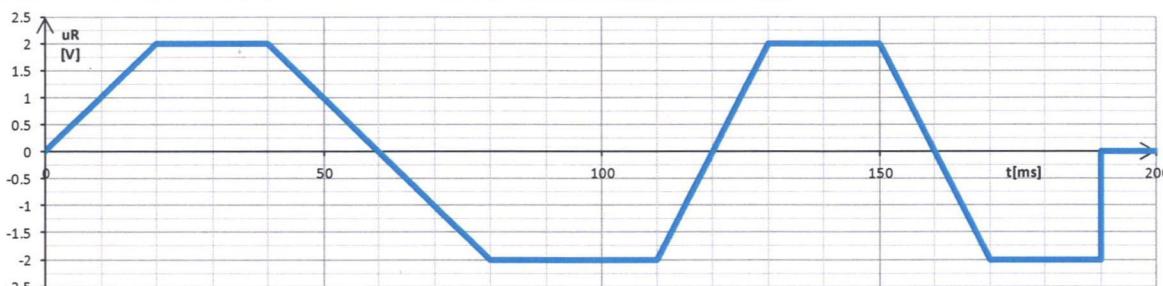
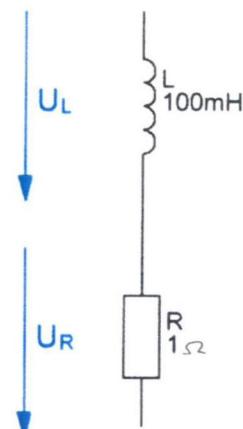
$$\Delta t = 20ms$$

$$u_L = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} = 0,1H \cdot \frac{2A}{20ms} = 10V$$

$$\textcircled{2} \cdot (-1)$$

$$\textcircled{3} \cdot 2$$

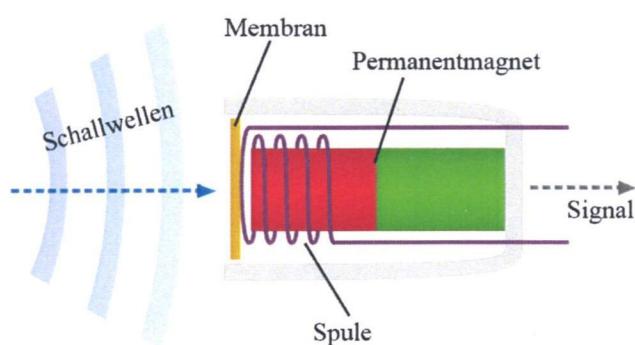
$$\textcircled{4} \cdot (-2)$$

**4.5.2 Induzierte Spannung bei bewegten Leiterschleifen**

Induzierte Spannung bei bewegten Leiterschleifen am Beispiel eines Tauchspulmikrofones (dynamisches Mikrofon).

Schematischer Aufbau eines **Tauchspulenmikrofons**:

Eintreffende Schallwellen bewegen die Membran, die die Spule entlang des Permanentmagneten bewegt. Die relative Bewegung von Spule und Magnet erzeugt per Induktion das Signal als Spannung am Ausgang.



$$u_i = B \cdot l \cdot v \cdot z$$

B: Magnetische Flussdichte

l: Wirksame Breite des Magnetfeldes

v: Geschwindigkeit der Leiterschleife

z: Anzahl der Leiterschleifen

**Aufgabe**

Die Tauchspule eines dynamischen Mikrofons mit  $z = 50$  Windungen befindet sich in einem Magnetfeld mit der Flussdichte  $B = 1,2 \text{ T}$  und der wirksamen Breite von  $18,8 \text{ mm}$ . Welche Spannung wird induziert, wenn sich die an der Membran befestigte Tauschspule mit einer Geschwindigkeit von  $0,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bewegt?

$$u_i = B \cdot l \cdot v \cdot z = 1,2 \cdot 0,0188 \cdot 0,22 \cdot 50 \frac{\text{V}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m}$$

$$\underline{\underline{u_i = 248,16 \text{ mV}}}$$

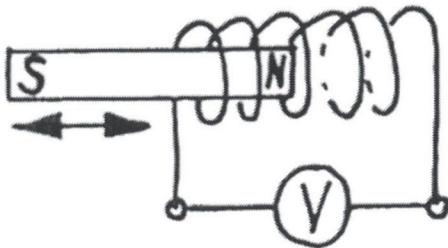
**Aufgabe 2**

In einem Magnetfeld mit der Flussdichte von  $1,15 \text{ T}$  und der wirksamen Breite (Windungslänge) von  $20,4 \text{ mm}$  befindet sich die Tauchspule eines dynamischen Mikrofons, die  $40$  Windungen besitzt. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich die Tauschspule, während die induzierte Spannung  $180 \text{ mV}$  beträgt?

$$u_i = B \cdot l \cdot v \cdot z \quad | : (B \cdot l \cdot z) \quad | \leftrightarrow :$$

$$v = \frac{u_i}{B \cdot l \cdot z} = \frac{0,18}{1,15 \cdot 0,0204 \cdot 40} \frac{\text{V}}{\text{s} \cdot \text{m}} = \underline{\underline{0,196 \text{ m/s}}}$$

## Lernkontrolle



Aus einer Spule mit 1200 Windungen wird ein Magnet so herausgezogen, dass der die Spule durchsetzende Fluss während 5s gleichmässig vom 0,4mWb auf null zurückgeht. Welche Spannung wird dabei in der Spule induziert?

$$\text{Geg: } \Delta\Phi = -0,4 \text{ mWb} ; N = 1200 ; \Delta t = 5 \text{ s}$$

Ges:  $U_i$

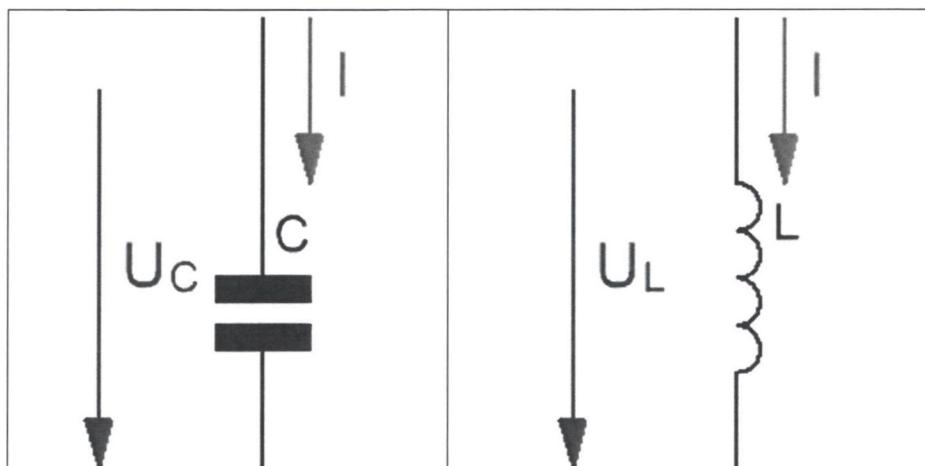
$$U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -1200 \cdot \frac{-0,4 \text{ mWb}}{5 \text{ s}} = \underline{\underline{96 \text{ mV}}}$$

4

Wirkung der Induktion

Die induzierte Spannung  $U_i$  ist der ursprünglichen entgegengesetzt.

## 4.5.3 Gegenüberstellung der beiden Energiespeicher L und C



Füllstrom	Strom $I$	Spannung $U_L$
Füllhöhe	Spannung $U_C$	Strom $I$
Speicherfüllung	$Q$ Ladung $Q = I \cdot t$	$\phi$ magnetischer Fluss $\phi = \frac{U \cdot t}{N}$
Gefäßart	$C$ Kapazität $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{l}$	$L$ Induktivität $L = \frac{N_o \cdot \mu_r \cdot A}{l} \cdot N^2$
Ladegesetz	$I \cdot \Delta t = C \cdot \Delta U$	$U \cdot \Delta t = L \cdot \Delta I$
Energieinhalt	$W = \frac{C \cdot U^2}{2}$	$W = \frac{L \cdot I^2}{2}$

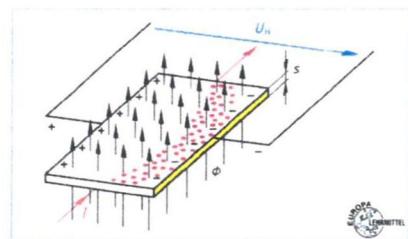
## 4.6 Anwendungen

Lehrziele:

- Eigenschaften von typischen Anwendungen wie elektromagnetische Schaltelemente, Energiespeicher, Schallgeber, Wirbelstrombremse aufzählen

Stellen Sie aus dem Skript alle Anwendungen aus dem Magnetismus zusammen:

Bezeichnung	Beschreibung
Motor	
Generator	
Wirbelstrombremse	
Magnetsicher	
Elektromagnet	
Reed-Kontakt	
Relais	
Kompass	



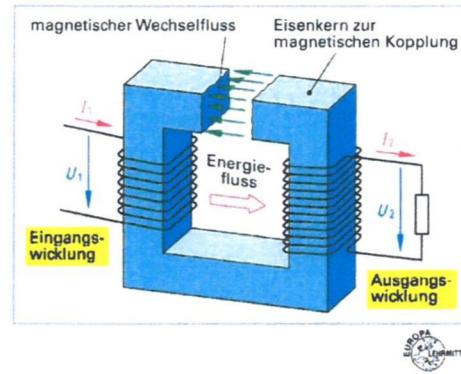
Hallsensor  
(FI S.81/82)

$$[U_H] = \frac{m^3/C \cdot A \cdot T}{m} = V \quad U_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{s}$$

$U_H$  Hallspannung  
 $R_H$  Hallkoeffizient in  $m^3/C$   
 $I$  Stromstärke  
 $B$  magnetische Flussdichte  
 $s$  Leiterdicke



## Transformator



## Tachosphälemikro

## Lautsprecher

