

4 ET1 - Elektrische und magnetische Felder, Induktivitäten und Kapazitäten

4	ET1 - Elektrische und magnetische Felder, Induktivitäten und Kapazitäten	1
4.1	Allgemeines zu den elektrischen und magnetischen Feldern	2
4.2	Übersicht elektrisches Feld.....	2
4.2.1	Der elektrische Strom in einem homogenen, langen Leiter.....	2
4.2.2	Das elektrische Feld in einem Leiter	3
4.2.3	Das elektrische Feld im Nichtleiter.....	3
4.2.4	Die Kraft auf Ladungen im elektrischen Feld.....	4
4.2.5	Äquipotenziallinien und Feldlinien.....	4
4.3	Übersicht magnetisches Feld.....	5
4.3.1	Aspekte und Beispiele von Magnetfeldern	5
4.3.2	Der elektrische Strom und die magnetischen Feldgrößen	9
4.3.3	Das Faradaysche Induktionsgesetz.....	11
4.3.4	Kraft auf Leiter im Magnetfeld: Lorentzkraft	12
4.3.5	Lenzsche Regel	13
4.3.6	Übersicht magnetischer Größen	16
4.4	Linearer Verlauf von Spannung und Strom an einem Kondensator und an einer Spule	16
4.5	Spannung und Strom an einer Spule	18

4.1 Allgemeines zu den elektrischen und magnetischen Feldern

Lange bevor über Strom, Spannung, Widerstand gesprochen wurde, waren Phänomene mit Feldern bekannt:

- Blitz und Donner bei Gewittern, beim Kämmen der Haare folgen diese dem Kamm, beim Ausziehen der Nylonstrümpfe im Dunkeln knistert es manchmal ggf. mit kleinen Funken
- Eine wichtige Orientierung auf der Erde ist ihr Magnetfeld: Zugvögel fliegen nach ihm, Schiffe, Flugzeuge und ... orientieren sich nach ihm

Die Felder werden eingeteilt in

- Elektrische Felder in Nichtleitern
- Elektrische Felder in Leitern
- Magnetische Felder
- Elektromagnetische Felder

Dabei sind **elektrische Felder** Effekte bei **ruhenden Ladungen** und **magnetische Felder** Effekte bei **bewegten Ladungen** (Ströme). Magnetische Felder entstehen sowohl bei stromdurchflossenen Leitern, wie auch bei Permanentmagneten (PM). Letztlich kann der Magnetismus von PM auch auf Ströme = Kreisbahnen der Elektronen um die Kerne zurückgeführt werden (wenn sich das Elektron mit der Ladung q_e um den Kern dreht (an jeder einzelnen Stelle der Umlaufbahn ändert sich die Ladung zyklisch $dq_e/dt > 0$), dann ist das gleichbedeutend einem Strom $I = dq_e/dt$).

Felder sind mathematisch aufwändig zu behandeln. Sie hängen nicht nur von den elektrischen Größen U , I , dem Material κ , ϵ , μ (Leitfähigkeit κ , Dielektrizitätskonstante oder Permittivität ϵ , Permeabilität μ) und der Zeit t , sondern auch vom Ort (x , y , z) ab und sind vektorielle Größen \vec{E} (elektrische Feldstärke), \vec{H} (magnetische Feldstärke), \vec{J} (Stromdichte) usw. Wenn es andere Möglichkeiten der Berechnung gibt versucht man, die Felder zu umgehen und verwendet **skalare, integrale Größen** wie U oder I , **die durch Integration der Feldgrößen entstehen** $U = \int E ds$ oder $I = \iint J dA$. So wurde bislang die Gleichstromtechnik behandelt und nicht erwähnt, dass das elektrische Feld, das die Spannungsquelle im Leiter erzeugt, die Ursache der Kraft auf die Elektronen und damit für den Strom ist.

4.2 Übersicht elektrisches Feld

4.2.1 Der elektrische Strom in einem homogenen, langen Leiter

(homogen und lang: überall gleicher Querschnitt und gleiches Material und nur schwach gekrümmt)

Ausgangspunkt ist das Ohmsche Gesetz. **Die Spannung ist die Ursache, der Strom ist die Wirkung.** Die Spannung ist der Antrieb des (Elektronen-) Stroms.

$$I = \frac{1}{R} U = GU \quad (4.1)$$

Für einen homogenen, langen Leiter, der Länge l , den Querschnitt A und den spezifischen Widerstand $\rho = \sigma^{-1}$ gilt

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

$$I = \frac{1}{R} U = \frac{A}{\rho l} U = \frac{\sigma A}{l} U$$

4.2.2 Das elektrische Feld in einem Leiter

Bezieht man nun die Spannung auf die Länge $U/l=E$, so spricht man von der elektrischen Feldstärke E, \vec{E} .

Verallgemeinert lautet die Beziehung

Der Strom pro Fläche wird Stromdichte $J=I/A$ genannt, siehe rechts. Dabei treibt **das elektrische Feld \vec{E} als Ursache die Stromdichte \vec{J} als Wirkung**. κ ist die Materialkonstante für das elektrische Feld im Leiter, die **Leitfähigkeit**.

Verallgemeinert wird daraus der vektorielle Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke und der Stromdichte rechts. Man nennt diese Gleichung auch das **mikroskopische Ohmsche Gesetz**.

$$J = \frac{I}{A} = \sigma \frac{U}{l} = \kappa E$$

$$U = U_{12} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\vec{J} = \kappa \vec{E} \quad (4.2)$$

\vec{E} elektrische Feldstärke in $\frac{V}{m}$
 \vec{J} Stromdichte in $\frac{A}{m^2}$
 σ Leitfähigkeit in $\frac{S}{m} = \frac{1}{\Omega m}$

4.2.3 Das elektrische Feld im Nichtleiter

Eine Spannungsquelle U wird mit zwei Elektroden verbunden, die sich in einem nichtleitenden Medium $\kappa=0$ befinden. Diese laden sich mit den Ladungen $+Q$ und $-Q$ auf. Entlang eines beliebigen Weges l von der oberen Elektrode zur unteren Elektrode, z. B. auch entlang einer Feldlinie, fällt die Spannung U ab. Wird die Spannung auf die Länge bezogen, so entsteht auch im Fall des isolierenden Mediums eine elektrische Feldstärke \vec{E} gemäß Gl. (4.2.2).

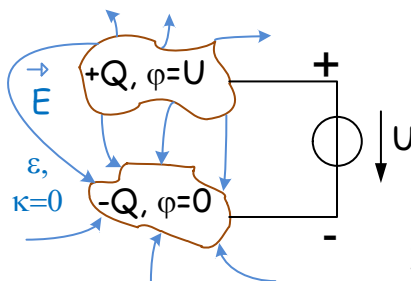


Bild 4.1 Spannungsquelle an zwei Elektroden, die geladen werden

Die elektrische Feldstärke \vec{E} verursacht nun im nichtleitenden Medium einen elektrischen Fluss Φ_{el} und eine elektrische Flussdichte \vec{D} . Die Gesamtheit der Flussdichte ist der Fluss (, wie die Gesamtheit (=Flächenintegral) der Stromdichte der Strom ist oder die Gesamtheit des Drucks die Kraft ist). Die Ursache ist die elektrische Feldstärke und die Wirkung der elektrische Fluss (, analog zum Fall des Leiters).

Das Integral der elektrischen Flussdichte \vec{D} über eine geschlossene Fläche \vec{A} ergibt die eingeschlossene Ladung Q .

Die Spannungsquelle versorgt die Elektroden mit Ladungen. Wird nun bei einer festen Anordnung gemäß obigem Bild die Spannung

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (4.3)$$

\vec{D} elektrische Flussdichte in $\frac{As}{m^2}$
 ϵ Dielektrizitätskonstante, oder Permittivität
 ϵ_0 absolute Dielektrizitätskonst. $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
 ϵ_r relative Dielektrizitätskonst., einheitenlos

$$Q = \oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (4.4)$$

$$Q \sim U$$

verändert, so ändern sich mit ihr die Ladungen auf den angeschlossenen Elektroden.

Experiment: Proportionalität zwischen Ladung und Spannung

Je nach Anordnung der Elektroden: Größe, Abstand zu einander, Art des Mediums, werden auf den Elektroden unterschiedlich viele Ladungen gespeichert (in einer geladenen Wolke wird es wohl mehr als in den geladenen Haaren eines Kopfes geben). So wird aus der Proportionalität die Gleichung rechts. Die Proportionalitätskonstante wird Kapazität C genannt und hängt (prinzipielle) nur von der Geometrie und vom Material ab.

$$Q = CU \quad (4.5)$$

C Kapazität in Farad $F = \frac{As}{V}$

Die elektrische Spannung U und die elektrische Ladung Q an einer Elektrodenanordnung sind proportional.

Wird der Ausdruck die Gl. 4.5 nach der Zeit abgeleitet und die Definition des Stromes $I = dq/dt$ mit $Q = Q(t) = q$ und $U = U(t) = u$ beachtet, dann entsteht ein Ausdruck für das Verhalten von Strom und Spannung an einer Kapazität C (wie das Ohmsche Gesetz das Verhalten von Strom und Spannung an einem Ohmschen Widerstand R beschreibt).

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (4.6)$$

4.2.4 Die Kraft auf Ladungen im elektrischen Feld

Durch Messungen wurde herausgefunden, dass auf eine Ladung Q im elektrischen Feld \vec{E} eine Kraft ausgeübt wird.

Die Strömung der Elektronen in einem Leiter (s.o.) kann nun genauer beschrieben werden: An einem Leiter liegt die Spannung U . Diese verursacht im Leiter das elektrische Feld $\vec{E} = \frac{U}{l}$. Da Elektronen die Ladung $Q = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ tragen, wirkt auf sie eine Kraft \vec{F} ,

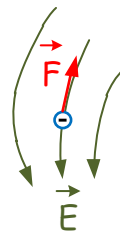


Bild 4.2 Elektron im elektrischen Feld

$$\vec{F} = Q\vec{E} \quad (4.7)$$

die (wegen des VZ) der Feldrichtung \vec{E} entgegen wirkt. Die Elektronen (Masse) werden durch die Kraft beschleunigt, stoßen mit den Atomrümpfen zusammen und es stellt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit ein.

Unter dem elektrischen Feld versteht man den Raumbereich, in dem Kräfte zwischen Ladungen gemessen werden können.

4.2.5 Äquipotenziallinien und Feldlinien

Äquipotenziallinien (x,y) (bzw. Flächen (x,y,z)) sind Linien gleichen Potentials. So sind gut leitende Elektroden, z.B. Metallelektroden, Äquipotenziallinien. Üblich ist es, dass zwischen Äquipotenziallinien eine gleiche Potentialdifferenz besteht. In Bereichen eng beieinander liegenden Linien ist die elektrische Feldstärke größer als in Bereichen weiter auseinander liegender Linien.

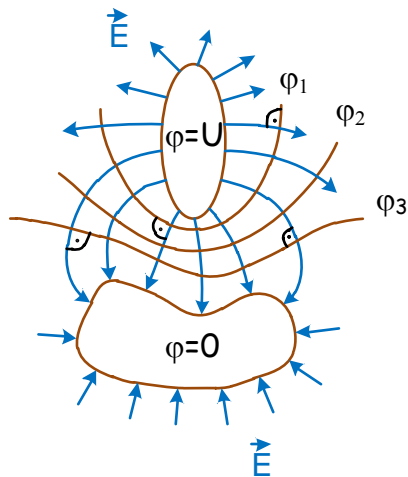


Bild 4.3 Feldlinien und Äquipotenziallinien

Die elektrische Feldstärke steht senkrecht auf den Äquipotenziallinien. Die Richtung der Feldstärke an einem beliebigen Ort ist identisch mit der Kraftrichtung auf eine Probeladung an diesem Ort. Eine Feldlinie ist die Aneinanderreihung der Kraftvektoren zu einer monotonen Kurve und ist gerichtet. Sie weisen von positiven Ladungen weg und zeigen auf negative Ladungen und sie stehen senkrecht auf leitenden Flächen.

4.3 Übersicht magnetisches Feld

4.3.1 Aspekte und Beispiele von Magnetfeldern

Beobachtungen

- Jeder Strom erzeugt ein Magnetfeld (Erkennungsmerkmal des Stroms)
- Spule und Stabmagnet zeigen ein ähnliches Magnetfeld

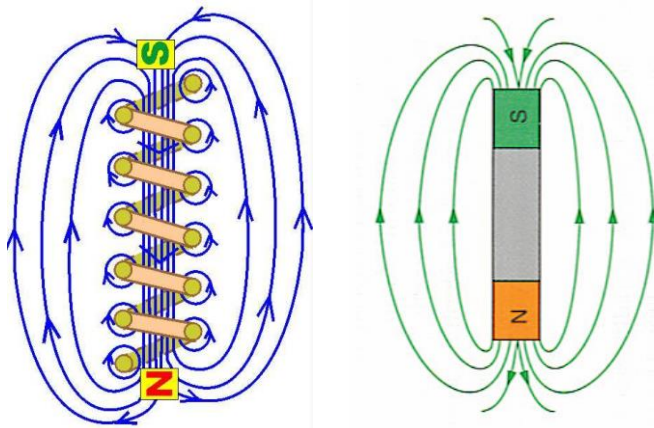


Bild 4.4 Feldbild einer Spule und das eines Permanentmagnet

Unter dem magnetischen Feld versteht man den Raumbereich, in dem Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern und/oder permanenten Magneten gemessen werden können.

Fakten zu Magneten, Magnetfeld und magnetischen Feldlinien:

- In Permanentmagneten und Spulen konzentrieren sich die Feldlinien
- Im Außenbereich verschwindet das Magnetfeld mit größer werdender Entfernung. Oft wird es vernachlässigt.
- Die Ursache eines jeden Magnetfeldes ist der elektrische Strom. Bei Permanentmagneten sind es die Elementarströme: Elektronen kreisen bei gleicher Drehachsrückung vieler Atome um dem Kern, was man als $d\mathbf{Q}/dt=\mathbf{I}$ interpretieren kann.
- Eine lange Spule und ein Stabmagnet haben ein ähnliches Magnetfeld.
- Magnetische Feldlinien sind immer in sich geschlossen und haben eine Richtung.
- Die Feldlinien außerhalb von Magneten zeigen vom Nordpol zum Südpol.
- Die Dichte der Feldlinien ist ein Maß für den Betrag der Kraft – große Dichte gleich große Kraft, hohe Feldstärke.
- Die Tangente an die Feldlinie gibt die Richtung der Kraftwirkung an.
- Es gibt keine magnetischen Einzelpole
- Zwei ungleiche Pole ziehen sich an, zwei gleiche stoßen sich ab

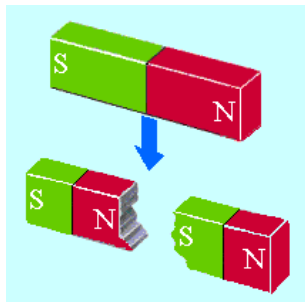


Bild 4.5 Teilung eines Permanentmagneten

- Wird ein PM geteilt, entstehen zwei Magnete mit je einem Nord- und einem Südpol.
- Wird ein PM mit einem ferromagnetischen Schenkel verlängert, dann wirkt die Verlängerung wie ein PM.

Es folgen nun einige selbsterklärende Bilder, siehe auch Anhang:

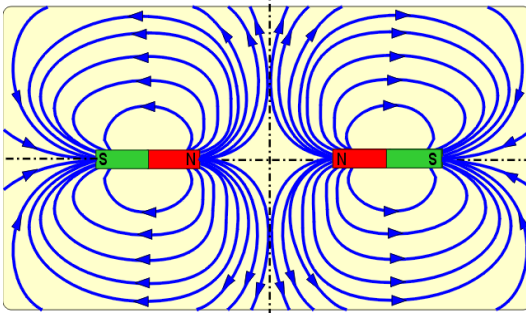


Bild 4.6 Das Felddiagramm zweier Permanentmagnete (1)

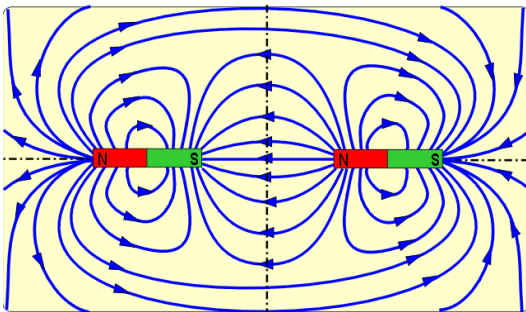


Bild 4.7 Das Felddiagramm zweier Permanentmagnete (2)

Die Erde hat die Wirkung eines großen Stabmagneten, dessen Magnetpole N und S in etwa entgegengesetzt zu den gleichnamigen geografischen Erdpolen liegen. dabei ist die magnetische Achse etwa 12° zur Rotationsachse der Erde geneigt. Die Kompassnadel zeigt immer in die aktuelle Feldrichtung zum magnetischen Südpol an. Die magnetische Wirkung wird durch elektrische Ströme bei der Konvektion im flüssigen, äußeren Erdkern verursacht.

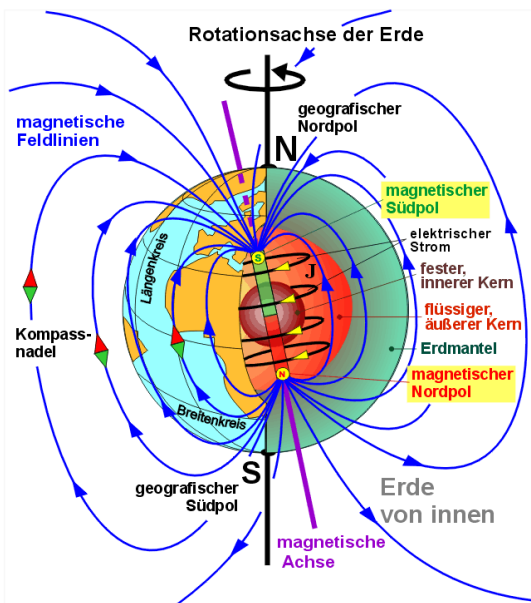


Bild 4.8 Das Magnetfeld der Erde und eine Kompassnadel.

Die folgenden Bilder zeigen den Zusammenhang zwischen Stromrichtung und magnetischer Feldstärke und deren Richtung.

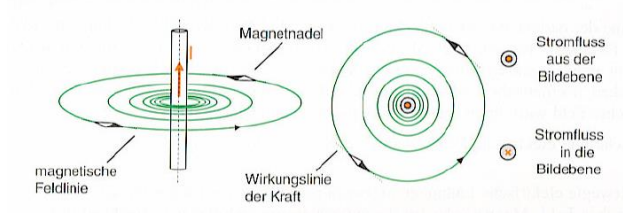


Bild 4.9 Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

- Die Magnetfeldlinien eines "geraden" Leiters sind konzentrische (geschlossene) Kreise

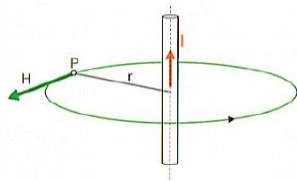


Bild 4.109 Feldstärke im Außenraum eines Leiters



Bild 4.11 Erklärung der Rechten-Hand-Regel

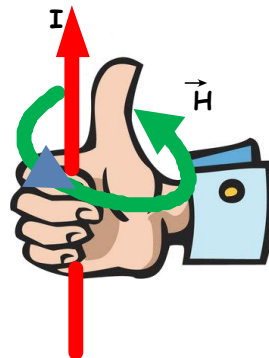


Bild 4.12 Rechten-Hand-Regel mit der rechten Hand

Wenn der Daumen der rechten Hand in Stromrichtung zeigt, dann zeigen die ihn umschließenden Finger in die Richtung des magnetischen Feldes.

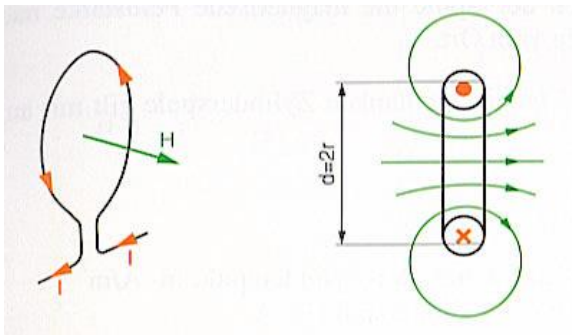


Bild 4.13 Die magnetische Feldstärke einer Stromschleife mittels Rechte-Hand-Regel

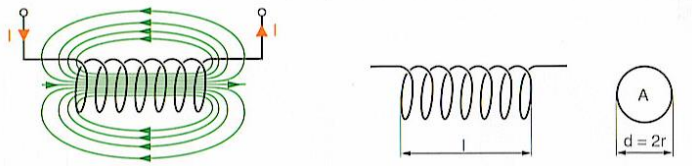


Bild 4.14 Das Magnetfeld einer Zylinderspule

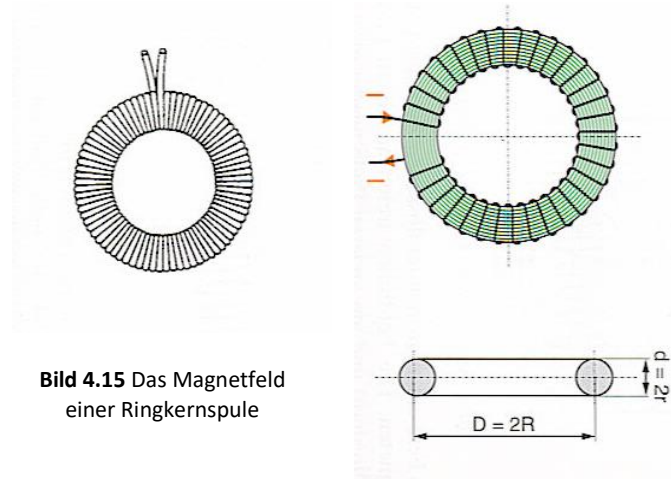


Bild 4.15 Das Magnetfeld einer Ringkernspule

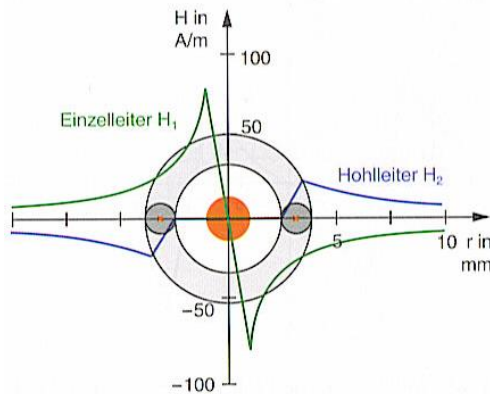


Bild 4.16 Die magnetische Feldstärke eines Hohlleiters und eines geraden Leiters, beides lang

4.3.2 Der elektrische Strom und die magnetischen Feldgrößen

Oerstedt (dänischer Physiker und Chemiker 1777 – 1851) hat durch Messung nachgewiesen, dass der Strom I und die magnetische Feldstärke H , \vec{H} miteinander verknüpft sind (Gesetz von Oerstedt). Die Integration der magnetischen Feldstärke \vec{H} entlang eines beliebigen Weges C um einen Leiter ergibt den im Leiter fließenden Strom I . (Beispiel langer Leiter und Zylinderspule).

$$\oint_C \vec{H} \, d\vec{s} = I \quad (4.8)$$

- \vec{H} magnetische Feldstärke in A/m
- I elektrischer Strom in A
- C geschlossener Weg um einen Leiter
- $d\vec{s}$ Wegelement auf dem Leiter

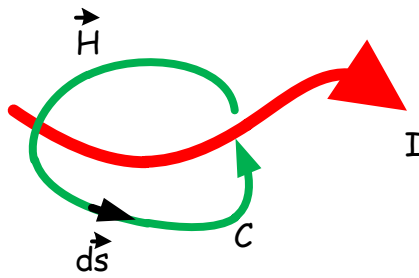


Bild 4.17 Verknüpfung von Strom und magnetfeld

Analog dem elektrischen Feld wird die magnetische Flussdichte \vec{D} und der magnetische Fluss Φ definiert. Die Materialkonstante des magnetischen Feldes heißt Permeabilität μ .

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (4.9)$$

- \vec{B} magnetische Flussdichte in Vs/m²
- \vec{H} magnetische Feldstärke in A/m
- μ Permeabilität in Vs/Am
- μ_0 absolute Permeabilität des Vakuums = $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
- μ_r relative Permeabilität, einheitenlos

Der magnetische Fluss Φ durch eine geschlossene Fläche A ist das Integral der Flussdichte \vec{B} über die Fläche.

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (4.10)$$

- Φ magnetischer Fluss in Vs
- A Fläche

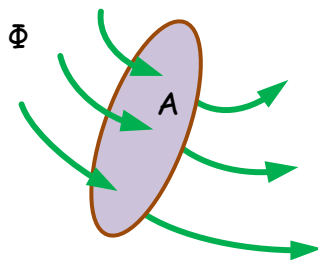


Bild 4.18 Verknüpfung von magnetischer Flussdichte und magnetischem Fluss

Analog dem Kapitel 4.2.3 ($Q \sim U$) erzeugt der Strom I das Magnetfeld, genauer den magnetischen Fluss Φ , was messtechnisch gezeigt werden kann.

$$\Phi \sim I$$

Experiment: Proportionalität zwischen Strom und magnetischem Fluss.

$$\Phi = LI \quad (4.11)$$

- L Induktivität in H = Henry = Vs/A

Der magnetische Fluss Φ und der elektrische Strom I einer Magnenanordnung sind proportional.

Bei gleichem Strom gibt es für unterschiedliche Magnenanordnungen (Zylinderspule, Drahting, langer Leiter) und in unterschiedlichen Materialien (Luft, Eisen, ..) unterschiedliche magnetische Flüsse. Der Quotient aus Fluss und Strom wird Induktivität L genannt. Sie ist (prinzipiell) wie die Kapazität eine Konstante, die nur von der Geometrie und vom Material (ϵ im elektrischen Feld = Dielektrizitätskonstante, μ im magnetischen Feld = Permeabilität) abhängt.

4.3.3 Das Faradaysche Induktionsgesetz

Zu den fünf wichtigsten Gesetzen der Elektrotechnik gehört das in der Überschrift genannte Gesetz. Auf ihm basiert die Stromerzeugung in rotierenden Maschinen. Darüber findet es zahlreiche Anwendungen wie z.B. in Motoren und Sensoren.

Ähnliche Experimente hat Herr Faraday (englischer Physiker und Chemiker 1791 – 1867) zum Nachweis des nach ihm benannten Gesetzes durchgeführt:

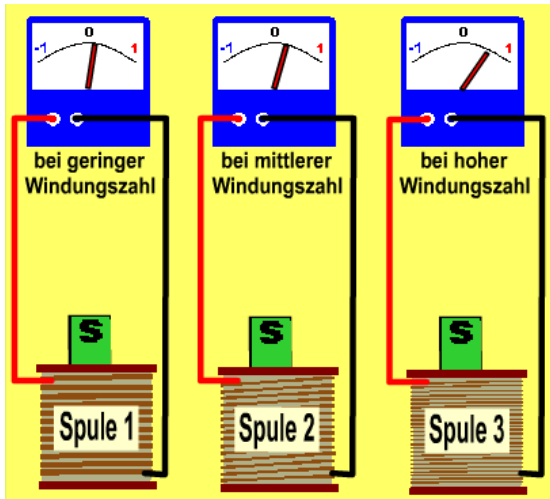


Bild 4.19a In drei Spulen unterschiedlicher Windungszahlen werden drei Permanentmagnete gleichartig langsam hinein und heraus bewegt.

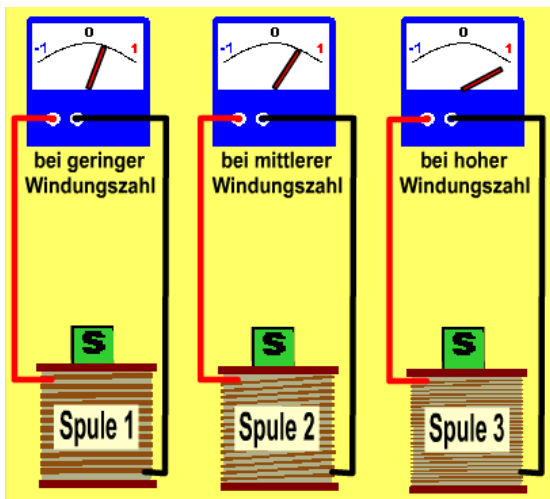


Bild 4.19b In drei Spulen unterschiedlicher Windungszahlen werden drei Permanentmagnete gleichartig schnell hinein und heraus bewegt.

Das Ergebnis war: Die erzeugte Spannung $u = u(t)$ ist umso höher, je größer die Windungszahl N und je schneller der sich der magnetische Fluss $\Phi = \Phi(t)$ ändert.

Wird der Zusammenhang zwischen Strom und magnetischem Fluss (Gl. 4.11) in Gl. 4.12) berücksichtigt, dann entsteht der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an einer Induktivität L Gl. 4.13 (wie Gl. 4.6 den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an einer Kapazität C beschreibt).

$$u = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.12)$$

- u induzierte Spannung in V
- N Windungszahl
- Φ magnetischer Fluss in Vs

$$u = L \frac{dI}{dt} \quad (4.13)$$

4.3.4 Kraft auf Leiter im Magnetfeld: Lorentzkraft

Mit der Lorentzkraft wird die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld beschrieben. Sie tritt beispielsweise auf in Elektromotoren und vielen Aktoren.

Den Zusammenhang kann man gut experimentell zeigen:

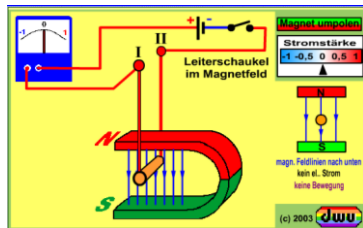


Bild 20a Stromschaukel unbestromt

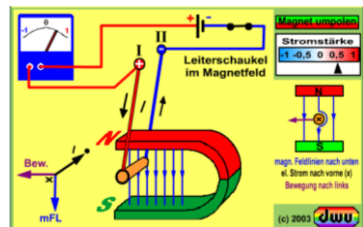


Bild 20b Stromschaukel bei kleinem Strom

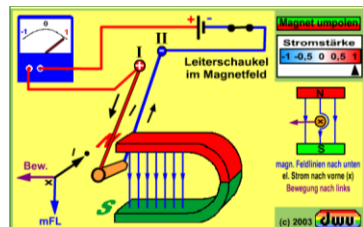


Bild 20c Stromschaukel bei großem Strom

Beobachtung und Erkenntnis

Der Leiter bewegt sich in den Bildern 20 b/c aus dem Hufeisenmagnet heraus. In den kleinen Querschnittzeichnungen (rechter Bildrand) sind die Überlagerungen der Magnetfelder vom Hufeisenmagnet und vom Leiter zu sehen. Rechts vom Leiter verstärken sich die Magnetfelder und links gibt es eine Feldschwächung, in die der Leiter „auszuweichen“ versucht. Die Kraft \vec{F} ist also nach links gerichtet. Mathematisch vektoriell beschreibt das Gl. 4.14. Üblicherweise ist der Strom keine vektorielle Größe, mit der Form \vec{I} ist also neben dem Betrag I auch die Stromrichtung gemeint. Rechte-Hand-Regel hierzu: Rechte Hand, gerade Finger, abgepreszter Daumen: Wenn der Strom in die Handinnenfläche eintritt und die Finger in Magnetfeldrichtung zeigen, dann zeigt der Daumen in die Richtung der Kraft.

$$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B} \quad (4.14)$$

- l Länge des Leiters innerhalb des Magnetfeldes
- \vec{B} magnetische Flussdichte
- \vec{F} Kraft auf den Leiter

Die Überlagerung der Magnetfelder im Detail zu den ebenen Querschnittsbildern (rechter Bildrand). zeigt das folgende Bild. Es liegt eine andere Fluss und Stromrichtung vor.

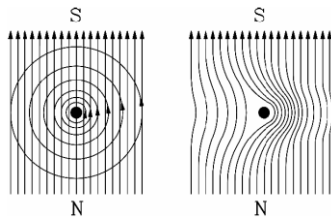


Bild 20d Detaillierte Überlagerung der Magnetfelder

Details

- Das Magnetfeld des Permanentmagneten zeigt von unten nach oben
- Der Strom im Leiter erzeugt ein Magnetfeld aus konzentrischen Kreisen nach der Rechtschraubregel und zeigt zum Leser
- Die Überlagerung der Felder zeigt eine größere Dichte rechts vom Leiter und eine kleinere links vom Leiter
- Feldlinien "elastische Gummischnüre" (Maxwellscher zug) wollen sich verkürzen → Die Kraft auf den Leiter wirkt nach links!

4.3.5 Lenzsche Regel

Ein Hufeisenmagnet pendelt gemäß folgendem Bild in eine Spule hinein und heraus. An den Klemmen der Spule liegen ein Voltmeter und ein Amperemeter in Reihe. Im 2.) Schritt des Versuchs wird das Voltmeter kurzgeschlossen.

1.) Ein Hufeisenmagnet schwingt in einer unbelasteten Spule

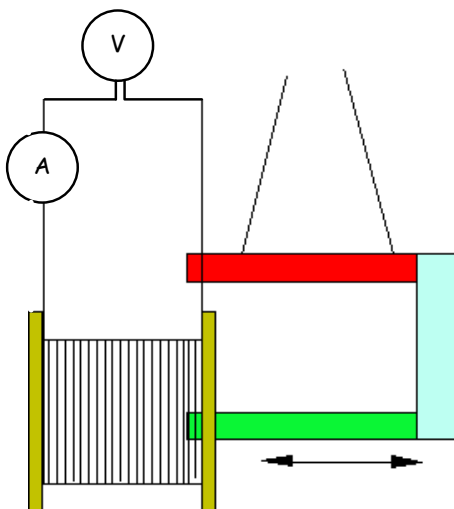


Bild 21a Ein Hufeisenmagnet schwingt in eine Spule hinein und heraus, an den Spulenklammern entsteht eine Wechselspannung

Beobachtung und Erkenntnis

Wie bei den Versuchen von Faraday wird in der Spule eine Spannung induziert. Wegen des erheblich geringeren Innenwiderstand eines Amperemeters, wie ihn ein Voltmeter hat, fällt nahezu die gesamte Induktionsspannung (Faradaysches Induktionsgesetz) am Voltmeter ab und man beobachtet ein identisches Verhalten wie in den Bildern 21: Die Spannung pendelt wie der Magnet von $U_{\max} \dots U_{\min} \dots U_{\max} \dots$ usw.

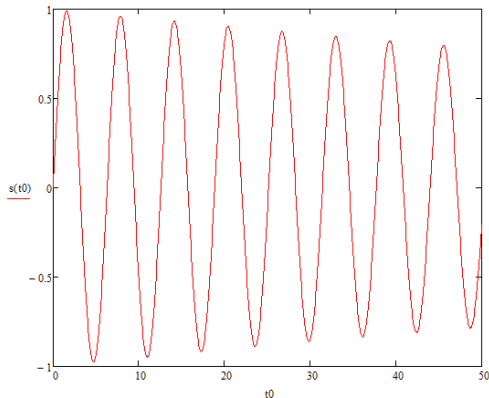


Bild 21b Es entsteht eine langsam abklingende Schwingung

- 2.) Ein Hufeisenmagnet schwingt in einer kurzgeschlossenen Spule

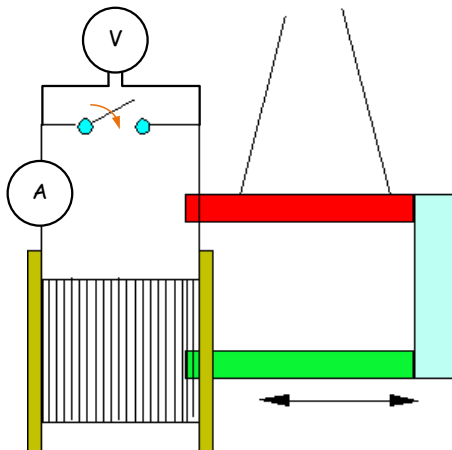


Bild 22a Ein Hufeisenmagnet schwingt in eine Spule hinein und heraus, an den Spulenklammern entsteht eine Wechselspannung

Beobachtung und Erkenntnis

Das Voltmeter ist kurzgeschlossen. Wie bei den Versuchen von Faraday wird in der Spule eine Wechselspannung induziert, die jedoch wegen des Kurzschlusses jetzt einen Wechselstrom hervorruft. Dieser ist am Amperemeter zu verfolgen. Durch diesen Strom aber wird die Spule zu einem Elektromagneten. Es kommt zu einer Wechselwirkung zwischen zwei Magneten: dem pendelnden Hufeisenmagneten und dem durch den Induktionsstrom erzeugten Elektromagneten.

Schwingt der Nordpol des Bügelmagneten in die Spule hinein, so kann das Abbremsen nur dann erfolgen, wenn an der Spulenseite, die dem Magneten zugewandt ist, ebenfalls ein Nordpol entstanden ist. Bewegt sich der Nordpol des Bügelmagneten dann aus der Spule heraus, so muss sich der zuvor entstandene Nordpol der Spule in einen Südpol umgewandelt haben.

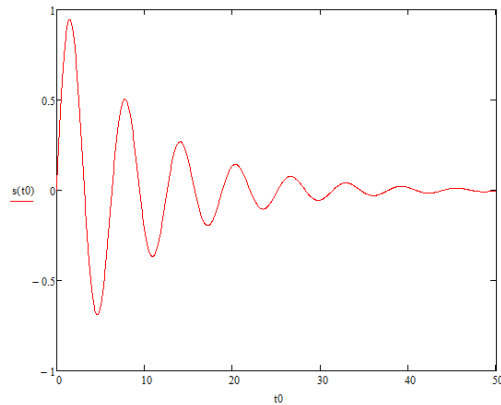


Bild 22b Es entsteht eine schnell abklingende Schwingung

Warum kommt es zur großen Dämpfung?

Schwingt der Nordpol des Bügelmagneten in die Spule hinein, so kann das Abbremsen nur dann erfolgen, wenn an der Spulenseite, die dem Magneten zugewandt ist, ebenfalls ein Nordpol entstanden ist – beide Nordpole stoßen sich ab. Bewegt sich der Nordpol des Bügelmagneten dann aus der Spule heraus, so muss sich der zuvor entstandene Nordpol der Spule in einen Südpol umgewandelt haben – Südpol der Spule zieht den Nordpol des Hufeisenmagneten an.

Lenzsche Regel

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er die Ursache seiner Entstehung zu hemmen sucht.

4.3.6 Übersicht magnetischer Größen

Tabelle 1: Zusammenstellung wichtiger magnetischer

Physikalische Größe	Einheit	Bezeichnung, Bemerkung
H	$\frac{A}{m}$	magnetische Feldstärke
$B = \mu H$	$\frac{Vs}{m^2} = T$ (Tesla)	magnetische Flussdichte, Induktion
$\mu = \mu_r \mu_0$	$\frac{Vs}{Am}$	Permeabilität
μ_r	1	relative Permeabilität
$\mu_r = 1$		in Luft
$\mu_r = 200 \dots 1000 \dots$		in ferromagnetischen Materialien
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$	$\frac{Vs}{Am}$	absolute Permeabilität
$\Phi = \iint_A \vec{B} d\vec{A}$	$Vs = Wb$ (Weber)	magnetischer Fluss

4.4 Linearer Verlauf von Spannung und Strom an einem Kondensator und an einer Spule

Mittels Gl. 4.6 und Gl. 4.xx können für den Kondensator und die Spule die in der Überschrift benannten Verläufe angegeben werden

Spannung und Strom am Kondensator sind durch die Beziehung $i = C \frac{du}{dt}$ verknüpft. Für zwei unterschiedliche Spannungsverläufe zeigen sich folgende Stromverläufe.



Bild x: Stromverläufe an einer Kapazität bei linearen Spannungsverläufen

Nur wenn ein unendlicher Strom angelegt wird (was es in der Natur nicht vorkommen kann), gibt es einen Spannungssprung (Spannungsverlauf mit unendlicher Steigung).

Satz

Die Spannung an einem Kondensator kann sich nicht sprunghaft ändern.

Anwendung: Diese Eigenschaft macht man sich bei den Geräten zu Nutze, die eine konstante Spannung liefern sollen: Netzgeräte, Stromversorgungen für elektronische Geräte, ...

Für die Induktivität gilt $u=L \frac{di}{dt}$. Zwei unterschiedliche Spannungs- und Stromverläufe sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Manchmal hilft auch die Integraldarstellung weiter $i=\frac{1}{L} \int u dt+ i_0$.



Bild x: Spannungsverläufe an einer Induktivität bei linearen Stromverläufen

Nur wenn eine unendliche Spannung angelegt wird (was es in der Natur nicht vorkommt), gibt es einen Stromsprung (Stromverlauf mit unendlicher Steigung).

Satz

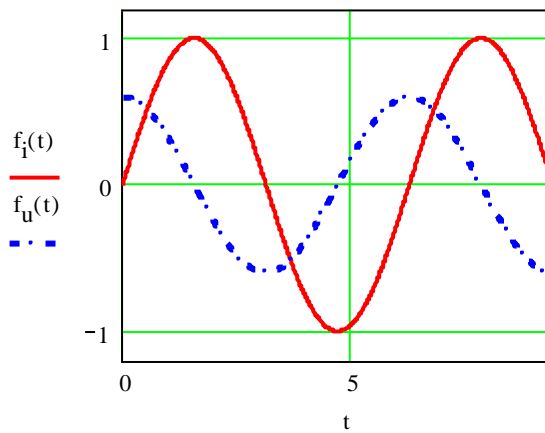
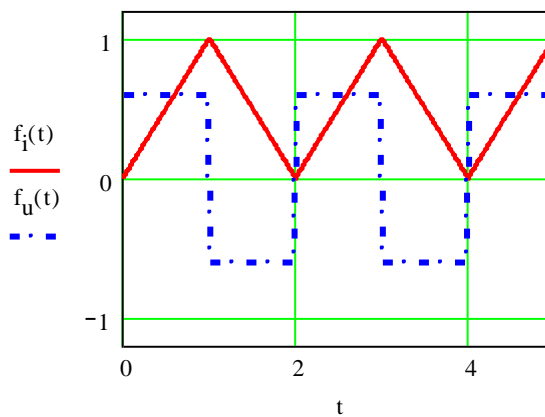
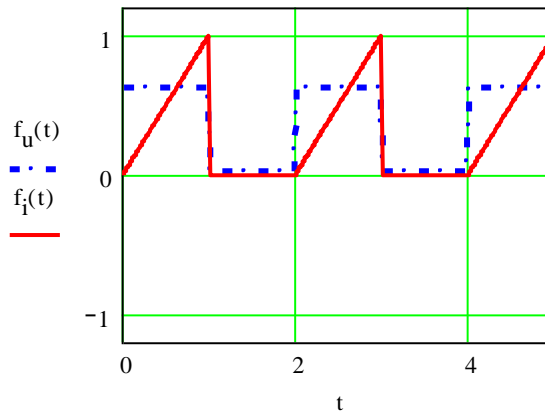
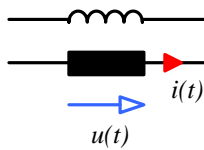
Der Strom in einer Induktivität kann sich nicht sprunghaft ändern.

4.5 Spannung und Strom an einer Spule

Experiment: Eine Spule wird mit Spannungen unterschiedlicher Kurvenform gespeist: Sinus, Rechteck, Dreieck. Der Strom und die Spannung werden oszillographiert, d.h. mit einem Messgerät werden die Zeitverläufe sichtbar gemacht.

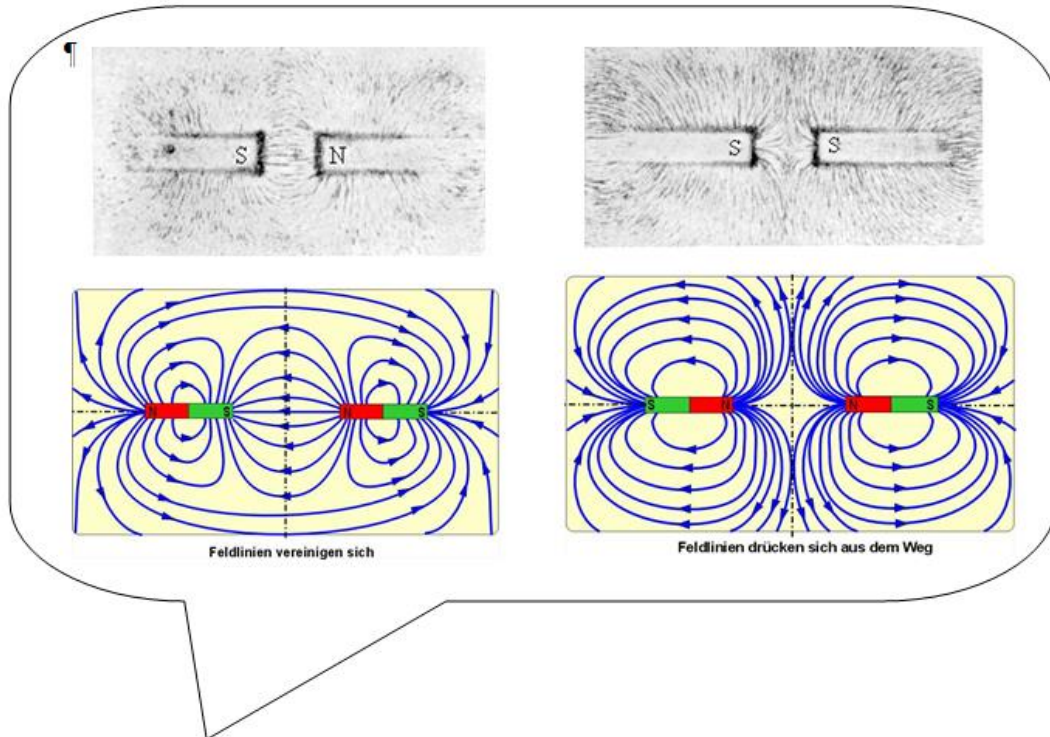
Am Bildschirm zeigen sich folgende Diagramme

Für die drei Diagramme gelten die Schaltsymbole und die Festlegungen für den Strom $i(t)$ — und die Spannung $u(t)$




Anhang zu Magnetfeldern

Gemessene und simulierte Felder von Stabmagneten



Das Elementarmagnetmodell



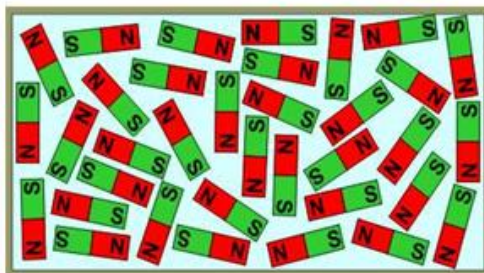

 beim Elementarmagnetmodell denkt man sich alle magnetisierbaren Materialien aus unvorstellbar vielen, unvorstellbar kleinen Elementarmagneten zusammengesetzt. Diese kleinsten Magnete lassen sich nicht weiter zerlegen.

a) der magnetische Zustand:



Beim magnetischen Zustand liegen die Elementarmagnete in geordneter Form vor.

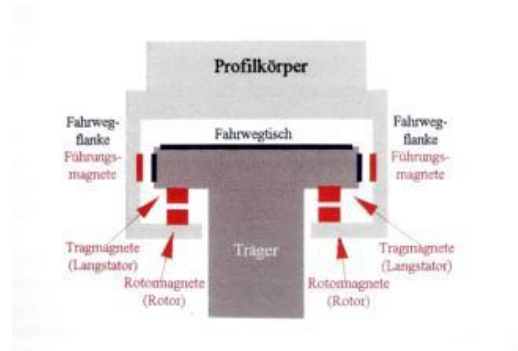
b) der unmagnetische Zustand:



nach außen
keine
magnetische
Wirkung

Liegen die Elementarmagnete in ungeordneter Form vor, so ist der Gegenstand unmagnetisch.

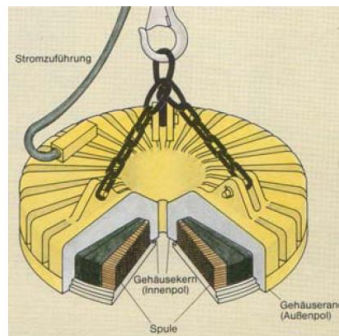
Der Transrapid



Ein Elektromagnet auf einem Schrottplatz



Auf Schrottplätzen müssen häufig sperrige Eisen-teile von einem Ort zum anderen transportiert werden. Die Teile werden nicht von einer Klaue er-fasst, sondern hängen un-ter einer dicken Platte. Es sieht so aus, als wäre dies ein großer Magnet.



Die Innenansicht zeigt uns, dass dort nur eine Spule ist . Dies ist im Prinzip nur ein kreisförmig angeordnetes Stromkabel.