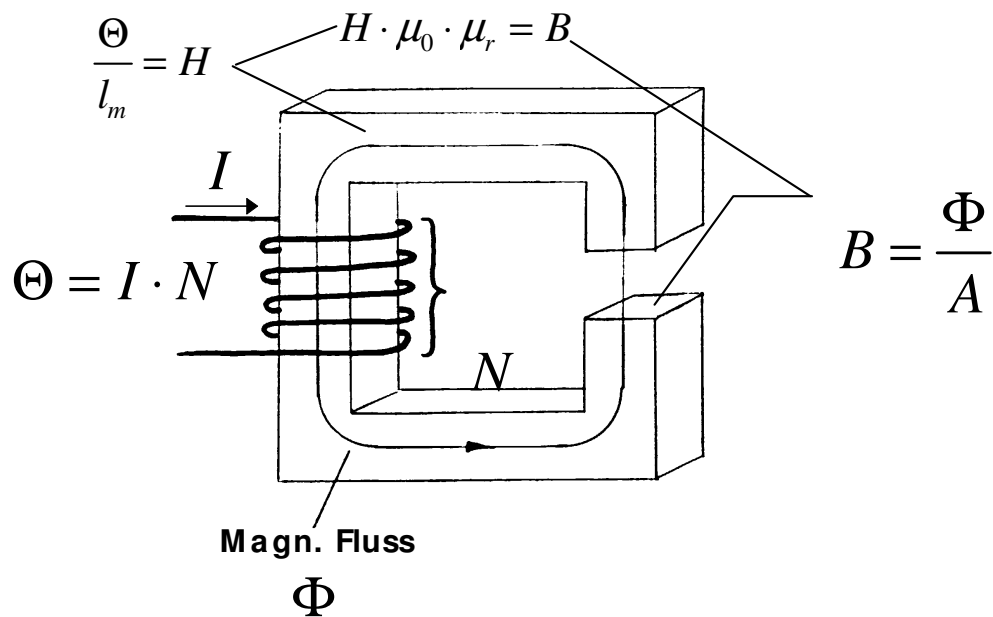


Kapitel 8

Magnetismus



Verfasser:
 Hans-Rudolf Niederberger
 Elektroingenieur FH/HTL
 Vordergut 1, 8772 Nidfurn
 055 - 654 12 87

Ausgabe:
 Januar 2010

Inhaltsverzeichnis

8 MAGNETISMUS

8.1 Erdmagnetfeld, Grundlagen

- 8.1.1 Erdmagnetfeld
- 8.1.2 Magnetfeld an einem Dauermagneten
- 8.1.3 Wirkung magnetischer Felder aufeinander
- 8.1.4 Kraftwirkung von Dauermagneten aufeinander
- 8.1.5 Weich- und hartmagnetische ferromagnetische Stoffe
- 8.1.6 Ferro-, Para- und Diamagnetwerkstoffe

8.2 Elektromagnetismus

- 8.2.1 Stromdurchflossener Leiter
- 8.2.2 Stromfluss- und Magnetfeldrichtung
- 8.2.3 Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

8.3 Der magnetische Kreis

- 8.3.1 Die magnetische Durchflutung
- 8.3.2 Die magnetische Feldstärke
- 8.3.3 Die mittlere Länge der Feldlinien von Spulen
- 8.3.4 Der magnetische Fluss
- 8.3.5 Die magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion
- 8.3.6 Die relative Permeabilitätszahl von eisenhaltigen Stoffen
- 8.3.7 Der magnetische Widerstand
- 8.3.8 Vergleich Stromkreises mit magnetischem Kreis

8.4 Spulen mit Eisenkern

- 8.4.1 Kerntypen
- 8.4.2 Luftspalt
- 8.4.3 Hysteresiskurve

8.5 Anwendungen magnetischer Kraftwirkungen

- 8.5.1 Zugkraft von Magneten
- 8.5.2 Kraftwirkung paralleler stromdurchflossener Leiter
- 8.5.3 Kraftwirkung stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld
- 8.5.4 Kraftwirkung zwischen elektromagnetischen Spulen
- 8.5.5 Lautsprecher und Mikrofon
- 8.5.6 Motoren
- 8.5.7 Analoge Messgeräte

BiVo

Probleme umfassend bearbeiten
Verstehen und anwenden
Erinnern

TD Technische Dokumentation

BET Bearbeitungstechnik
2.1 Werkstoffe

2.1.2 Elektrische Eigenschaften

- Leitfähigkeit
- Durchschlagsfestigkeit
- Magnetische Eigenschaften
- Dielektrische Eigenschaften

TG Technologische Grundlagen
3.2 Elektrotechnik
3.2.1 Wesen der Elektrizität

- Kräfte und Bewegung der elektrischen Ladungs- oder Kraftträger: (Elektronen, Ionen)

3.2.1 Elektrische Vorgänge

- Erzeugung (Entstehung) und Nutzung elektrischer Kräfte
- Elektrischer Stromkreis als geschlossener Wirkungskreis elektrischer und magnetischer Kräfte

3.2.5 Magnetische und elektromagnetische Felder

- Ursach der Ladungsträgerbewegung (elektrischer Strom)
- Feldverlauf (Beispiele)
- Feldgrößen
- Raumausbreitung und Strahlung

3.2.6 Spule

- Spule als Speicher magnetischer Energie

EST Elektrische Systemtechnik
5.1 Installationstechnik und Technik der Energieverteilung

5.1.9 EMV und ihre Wirkung auf den Menschen

- Erscheinungsbild der EMV
- Gesundheitsrisiko und Problemstellung

5.1.9 EMV- und NISV- Richtlinien

- Zweck
- Installationstechnische Bestimmungen

5.1.9 Kundenbezogene Lösungsansätze

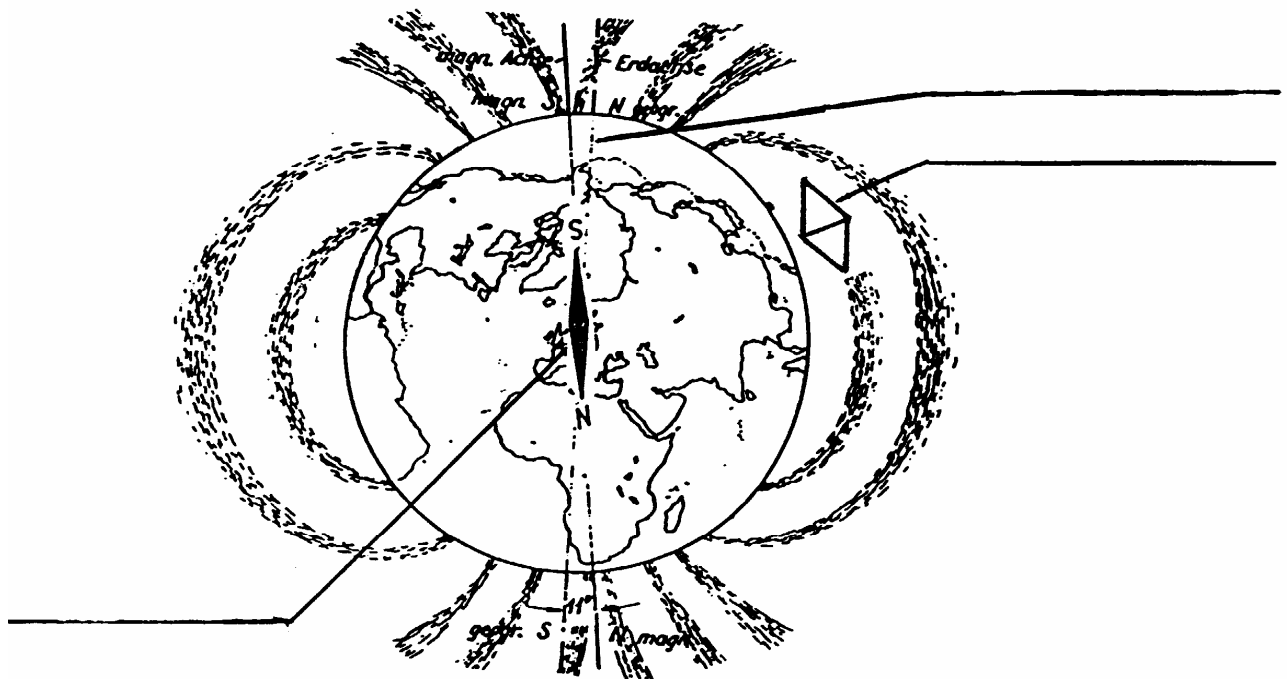
- Fachtechnische Massnahmen
- Persönliches Verhalten

KOM Kommunikationstechnik

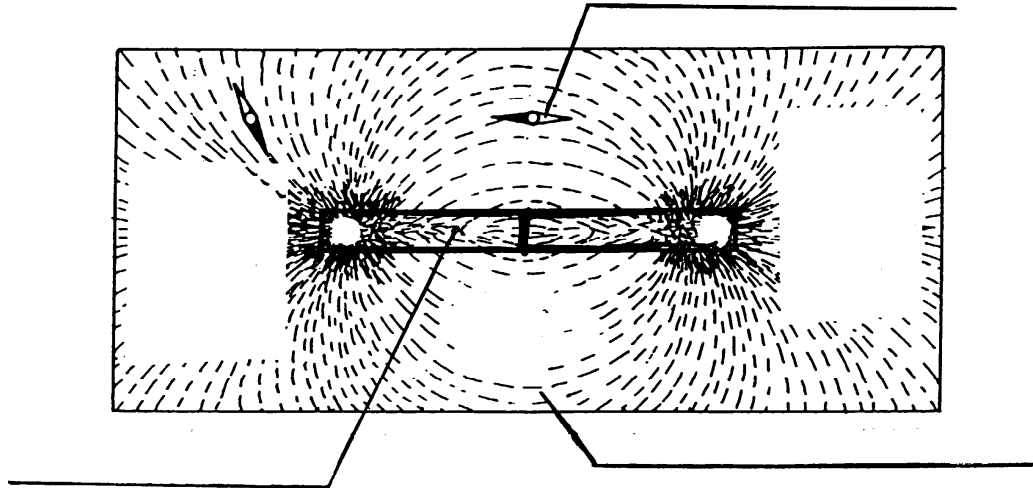
8 Magnetismus

8.1 Erdmagnetfeld, Grundlagen

8.1.1 Erdmagnetfeld



8.1.2 Magnetfeld an einem Dauermagneten



Stahl

Hufeisenmagnete Dauermagnete wurden früher aus Stahl erzeugt. Sie sind aber sehr schwach und lassen sich sehr leicht entmagnetisieren. Die bekannteste Form sind Hufeisenmagnete.

Fe

Magnetwerkstoffe auf Basis Eisen haben zu den Begriffen hartmagnetisch und weichmagnetisch geführt: harter, kohlenstoffreicher Stahl lässt sich dauermagnetisch machen, während sich kohlenstoffärmeres weiches Eisen (Weicheisen) kaum dauermagnetisieren lässt und sich daher besser zur Herstellung von Eisenkernen für Elektromagnete eignet.

In Stahlwerkzeugen können sich Dauermagnetisierungen auch durch plastische mechanische Verformung bilden. Das ist ein Hinweis auf deren mechanische Überlastung.

Ferrite

Magnete aus Ferriten sind kostengünstig, aber relativ schwach. Typische Anwendung sind Haftmagnete und Feldmagnete von Gleichstrommotoren und elektrodynamischen Lautsprechern.

Wismanol

Wismut und Mangan bilden ebenfalls ein Permanentmagnetmaterial

BiMg

Aluminium-Nickel-Cobalt

AlNiCo-Magnete bestehen aus Eisenlegierungen mit Aluminium, Nickel und Cobalt als Hauptlegierungselemente. Diese Materialien sind bis 500 °C einsetzbar, haben aber eine relativ geringe Energiedichte und Koerzitivfeldstärke. Die Remanenz ist höher als bei den Ferritmagneten. Die Herstellung erfolgt durch Gießen oder pulvermetallurgische Verfahren. Sie haben eine gute Korrosionsbeständigkeit, sind aber zerbrechlich und hart.

AlNiCo

Samarium-Cobalt

Samarium-Cobalt (SmCo) ermöglicht starke Dauermagnete mit hoher Energiedichte und hoher Einsatztemperatur. Nachteilig ist der hohe Preis.

SmCo

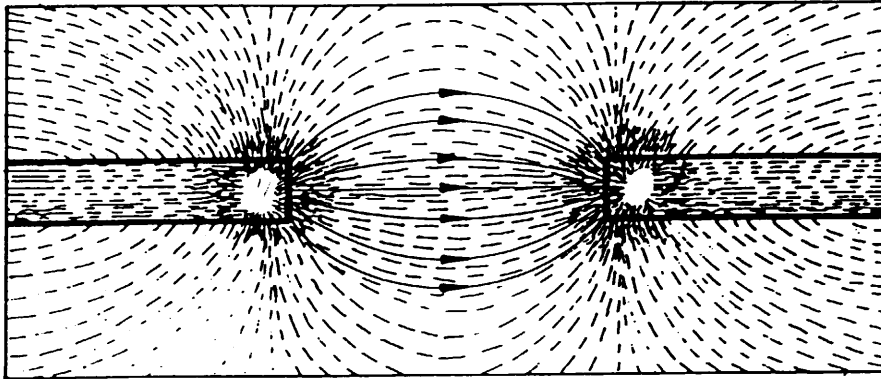
Neodym-Eisen-Bor

Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) ermöglicht sehr starke Magnete zu verhältnismäßig günstigen Kosten. Die Herstellung erfolgt über pulvermetallurgische Verfahren, heute aber vermehrt als kunststoffgebundene Magnete. Lange Zeit waren die Einsatztemperaturen auf maximal 60–120 °C begrenzt. Bei einigen neueren Entwicklungen werden Einsatztemperaturen bis 200 °C angegeben.

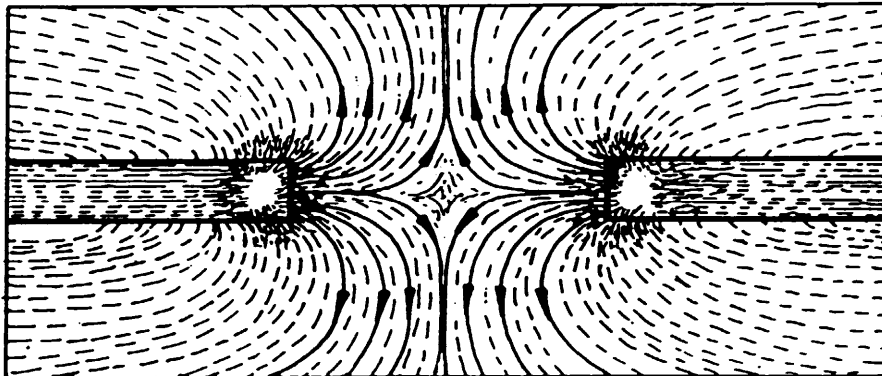
NdFeCo

8.1.3 Wirkung magnetischer Felder aufeinander

Kraftlinienverlauf bei Anziehung



Kraftlinienverlauf bei Abstossung

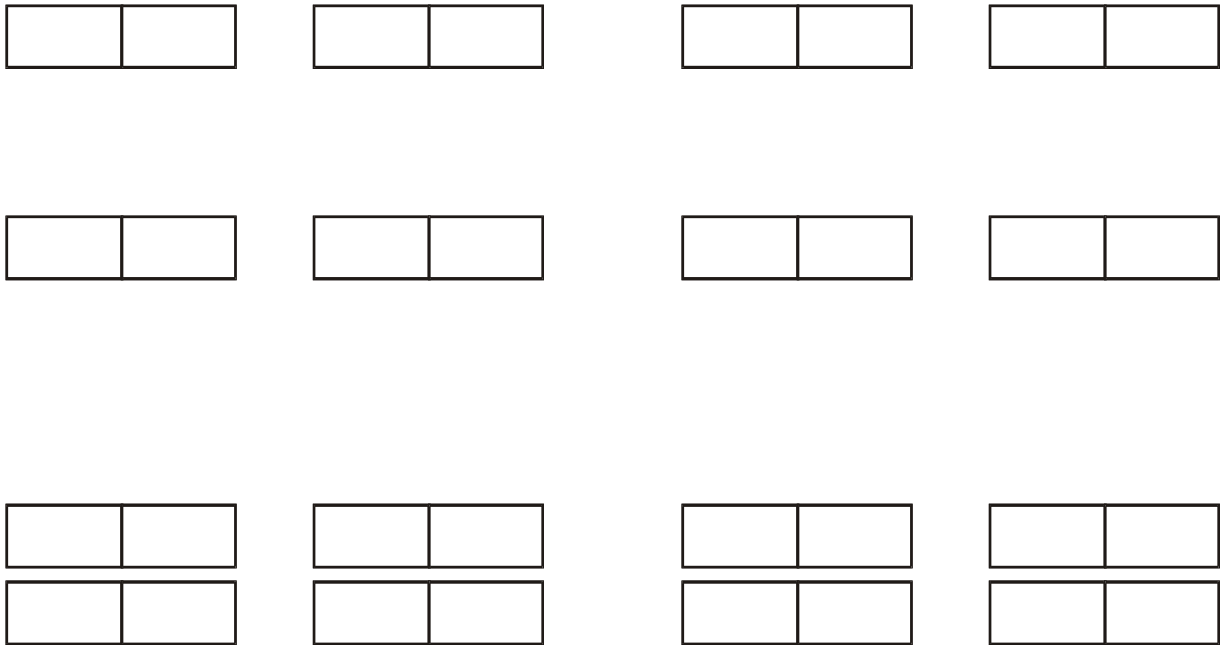


8.1.4 Kraftwirkung von Dauermagneten aufeinander

Zeichnen Sie die magnetischen Pole und die daraus resultierend wirkenden Kräfte der Dauermagneten in den unteren Skizzen ein.

Gleichnamige Pole

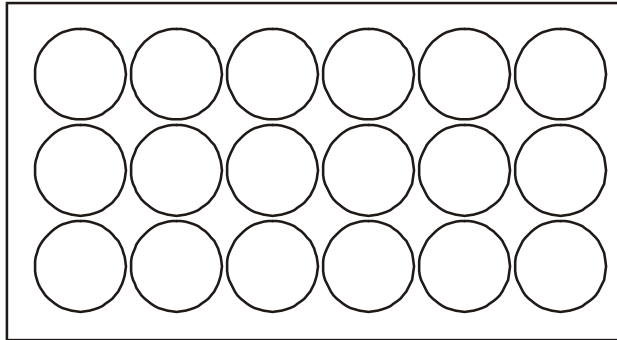
Ungleichnamige Pole



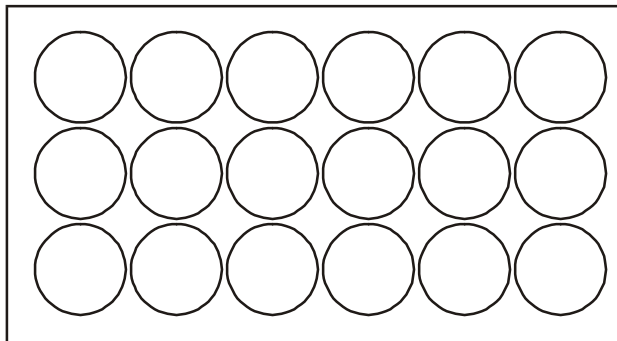
Bemerkung

Beschreiben Sie in Worten die Erkenntnisse der oberen Darstellungen auf.

8.1.5 Weich- und hartmagnetische ferromagnetische Stoffe



(weichmagnetischer Stoff)

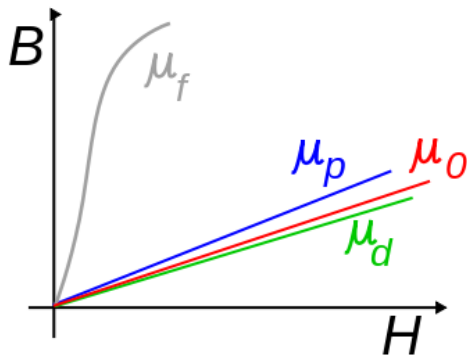


(ferromagnetischer Stoff im Magnetfeld)

Bemerkungen

Beschreiben Sie in Worten die Erkenntnisse der oberen Darstellungen auf.

8.1.6 Ferro-, Para- und Diamagnetwerkstoffe



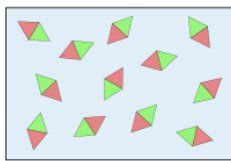
μ_0 Permeabilität im Vakuum

Ursprung

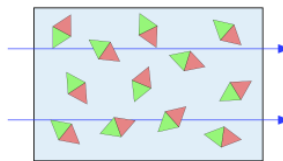
Paramagnetismus tritt nur in den Stoffen auf, die ungepaarte Elektronen besitzen (Radikale, Übergangsmetallkationen, Lanthanoidkationen) und deren Atome bzw. Moleküle ein magnetisches Moment besitzen. Ursachen dafür sind u.a. der Eigendrehimpuls (Spin) sowie Bahndrehimpuls der Elektronen bei ihrer Bewegung um den Atomkern.

Anwendung

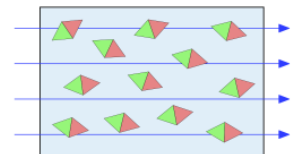
Der Paramagnetismus von Sauerstoff wird bei der physikalischen Gasanalyse genutzt.



Illustrationen einer paramagnetischen Probe ohne äußeres Magnetfeld,



... in einem schwachen Magnetfeld ...



... und in einem starken Magnetfeld.

Paramagnetische Werkstoffe (μ_p)

Dies sind Elemente (Alkalimetalle=Edelgaskonfiguration, Erdalkalimetalle, Seltene Erden, Stickdioxid, Sauerstoff, Magnetit = Fe_3O_4) bei denen die Permeabilitätszahl grösser ist als 1. Paramagnetismus ist eine der Ausprägungsformen des Magnetismus in Materie: Paramagneten sind nur so lange magnetisch, wie sie in der Nähe eines Magneten sind. Sie magnetisieren sich in einem externen Magnetfeld so, dass sich das Magnetfeld in ihrem Innern verstärkt, jedoch nur solange das äußere Magnetfeld existiert (im Gegensatz zur stabilen Magnetisierung beim Ferromagnetismus). Paramagnetische Materialien haben die Tendenz, in ein Magnetfeld hineingezogen zu werden.

Ferromagnetische Werkstoffe (μ_f)

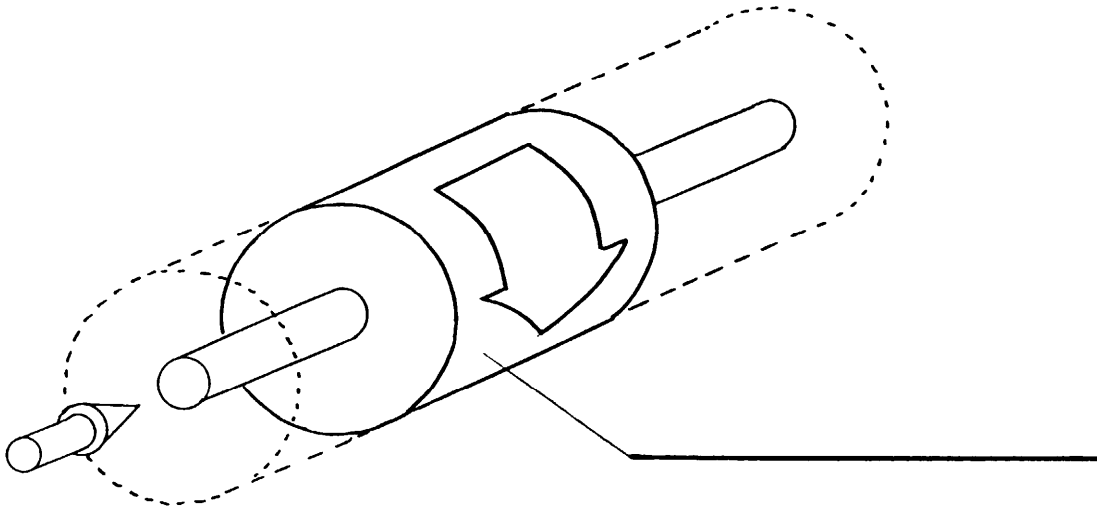
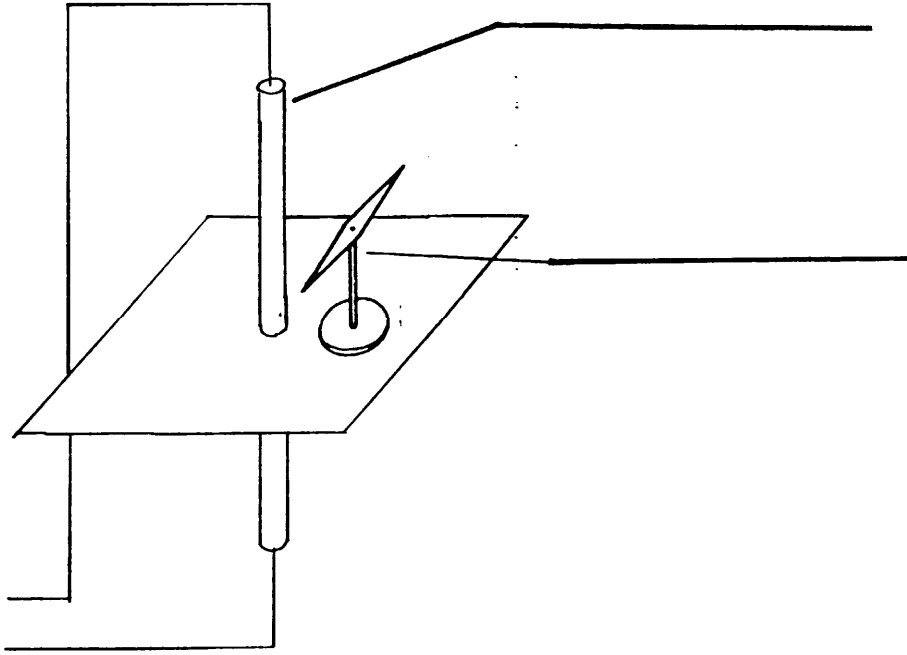
Dies sind Elemente bei denen die Permeabilitätszahl viel grösser ist als 1. Ferromagnetische Werkstoffe haben die Eigenschaft, dass sie eisenhaltige Stoffe anziehen. Ferromagnetische Stoffe bzw. seine Permeabilität ist stark von der Feldstärke abhängig. Diese Werte können aus der Magnetisierungskurve abgeleitet werden.

Diamagnetische Werkstoffe (μ_d)

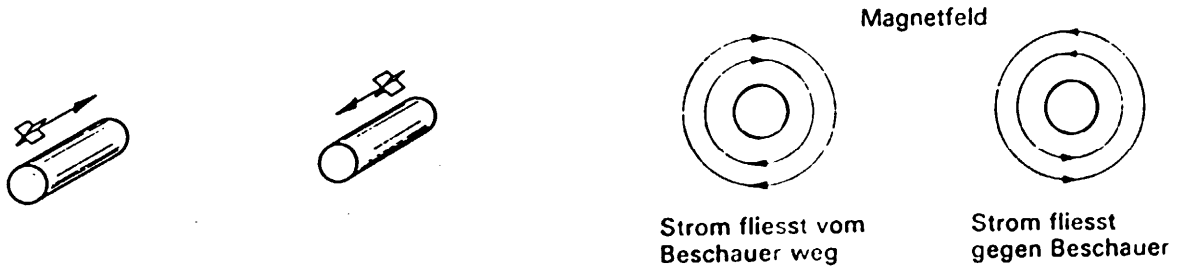
Dies sind Elemente, organische oder anorganische Stoffe bei denen die Permeabilitätszahl kleiner ist als 1.

8.2 Elektromagnetismus

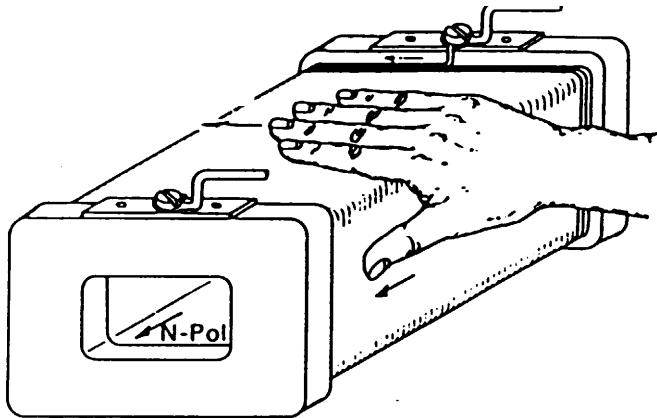
8.2.1 Stromdurchflossener Leiter



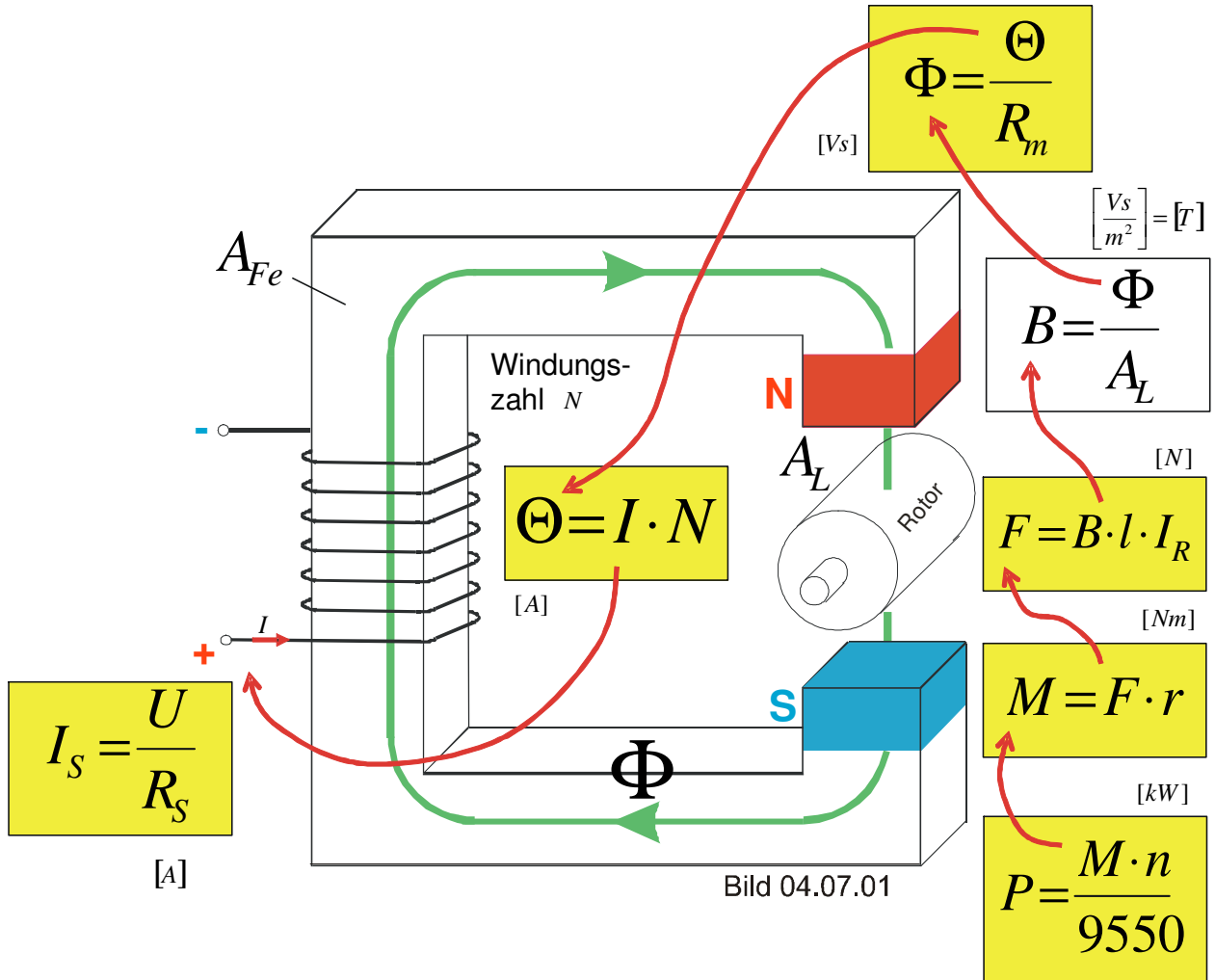
8.2.2 Stromfluss- und Magnetfeldrichtung



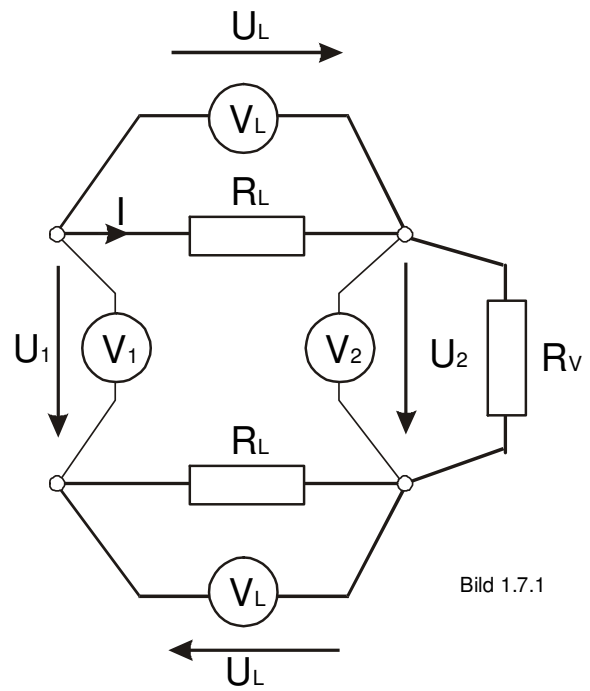
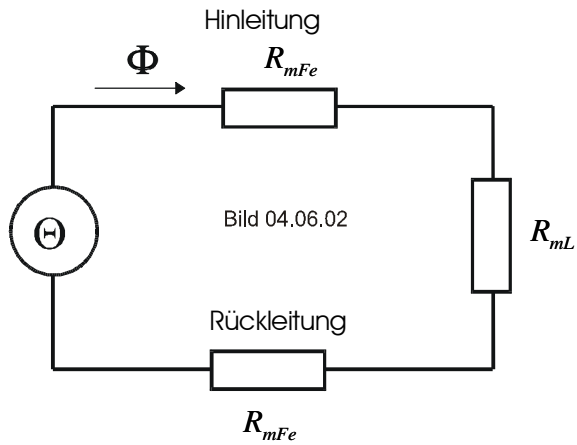
8.2.3 Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule



8.3 Der magnetische Kreis



Vergleich magnetischer und elektrischer Kreis

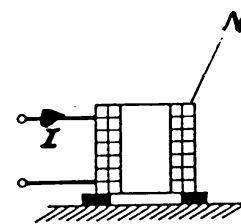
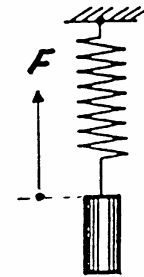


8.3.1 Die magnetische Durchflutung

Spule		
N [-]	I [A]	F [N]
500	2	12

Spule		
N [-]	I [A]	F [N]
1000	1	12

F ist die Kraft in Newton [N].



Die Kraft F wird mit einem Feder-Newton-Meter gemessen.

Beobachtung

Spulen mit dem gleichen Produkt aus Strom x Windungszahl zeigen gleiche Wirkung (Newton-Meter).

Sie bilden die gleiche Anzahl von Feldlinien bzw. Kraftlinien also gleiche Stärke des Magnetfeldes

$$\Theta = I \cdot N$$

I	Spulenstrom	[A]
N	Windungszahl	[-]
Θ	magn. Durchflutung	[A]

Θ sprich „Gross Theta“

Merke:

Die Durchflutung, Ursache des magnetischen Flusses stellt in Bezug auf den magnetischen Kreis die gesamte treibende magnetomotorische Kraft dar. Sie entspricht der elektromotorischen Kraft des elektrischen Stromkreises.

8.3.2 Die magnetische Feldstärke

Wird die magnetomotorische Kraft bzw. die Durchflutung Θ durch die mittlere Länge der von ihr erzeugten Feldlinien dividiert, erhält man die magnetische Feldstärke H .

$$\text{magn. Feldstärke} = \frac{\text{magn. Durchflutung}}{\text{mittlere Feldlinienlänge}}$$

Merke:

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

H	magn. Feldstärke	$[A / m]$
Θ	magn. Durchflutung	$[A]$
l_m	mittlere Feldlinienlänge	$[m]$

Um die Wirkung der in verschiedenen magnetischen Werkstoffen direkt vergleichen zu können verwendet man die magnetische Feldstärke (siehe Magnetisierungskurven).

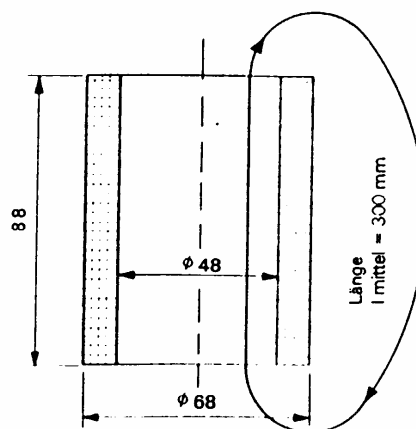
8.3.3 Die mittlere Länge der Feldlinien von Spulen

Die Feldliniendichte ist im Spulenhohlraum, wo das magnetische Feld bei langen Spulen homogen ist, gross und ausserhalb wird die Feldliniendichte kleiner.

Bei Spulen mit den üblichen Abmessungsverhältnissen genügt es daher, mit ca. der **1,5-fachen** Spulenlänge für die mittlere Länge der Feldlinien zu rechnen.

$$l_m = 1,5 \cdot l_s$$

[m]



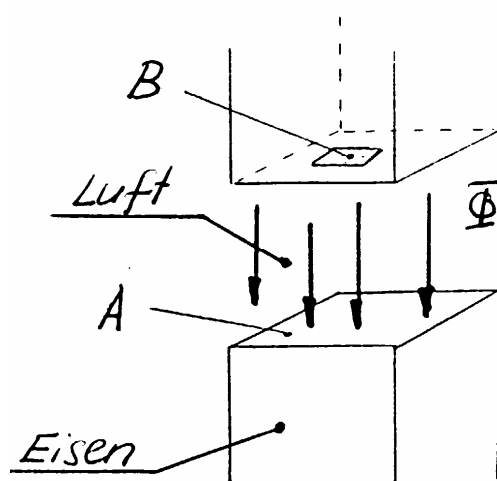
8.3.4 Der magnetische Fluss

Analog wie im elektrischen Stromkreis stellt sich bei gegebenem magnetischen Widerstand ein Fluss ϕ ein, welcher der vorhandenen Durchflutung θ proportional ist. Dieser Fluss ist entlang des Kreises konstant wobei sich je nach dem örtlichen verfügbaren Querschnitt A eine unterschiedliche Flussdichte B (Induktion) einstellen kann.

$$\Phi = \textit{konstant}$$

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

$$\Phi = B \cdot A$$



Φ **magn. Fluss** $[Vs] = [Wb]$

Wb = Weber

B **magn. Flussdichte** $\left[\frac{Vs}{m^2} \right] = [T]$

A **Fläche, innerhalb welcher die magn. Induktion vorhanden ist** $[m^2]$

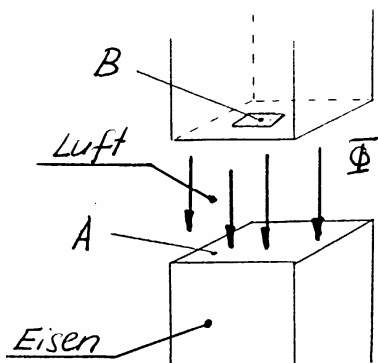
(T = Tesla)

8.3.5 Die magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion

Merke:

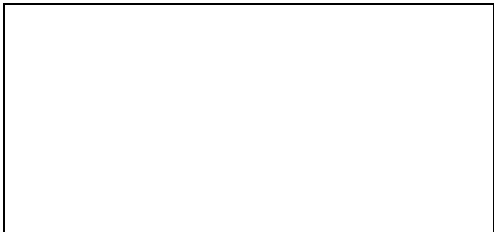
Die magnetische Induktion B ist von der magnetischen Leitfähigkeit bzw. Permeabilität und der Feldstärke H abhängig.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$



In Luft ist die Permeabilitätszahl $\mu_r = 1$

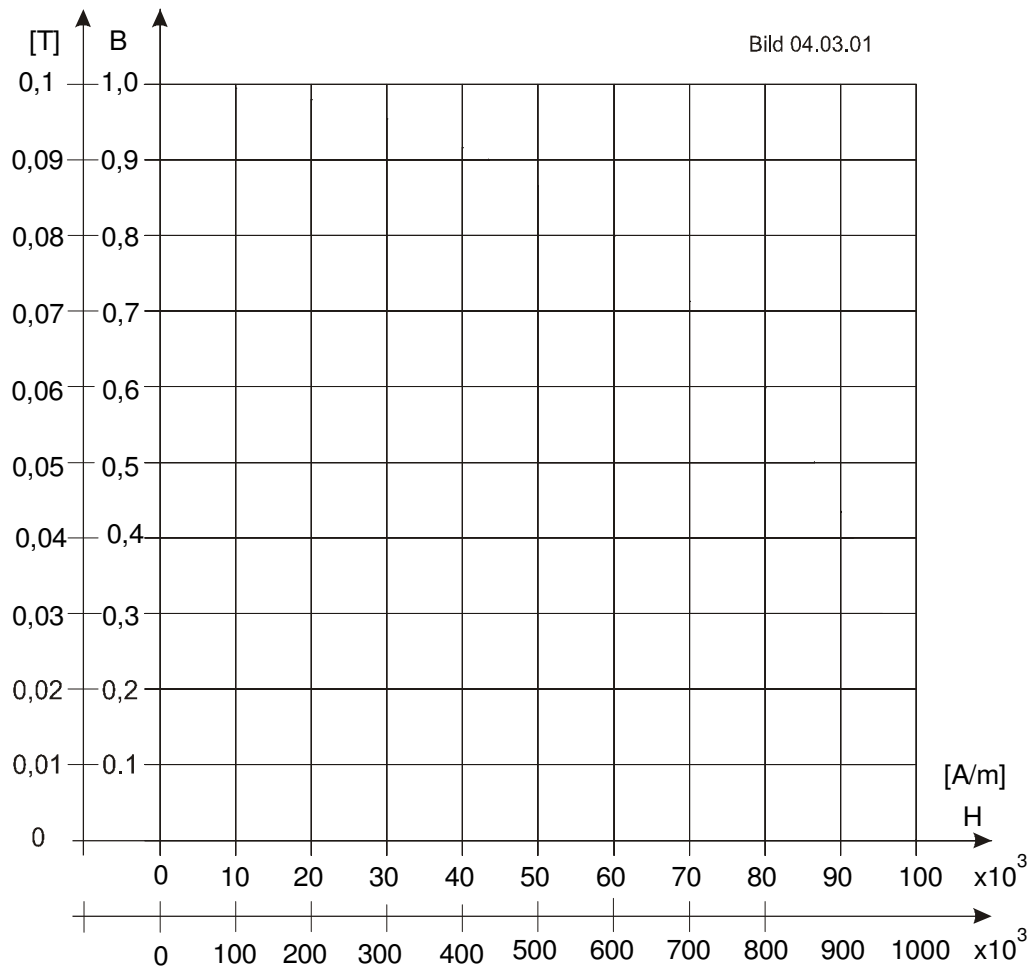
H	magn. Feldstärke	$[A / m]$
μ_0	magn. Feldkonstante	$\left[\frac{Vs}{Am} \right]$
$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$		
μ_r	Permeabilitätszahl oder relative Permeabilität	$[-]$
B	magn. Flussdichte, Induktion	$\left[\frac{Vs}{m^2} \right] = [T]$
$(T = \text{Tesla})$		



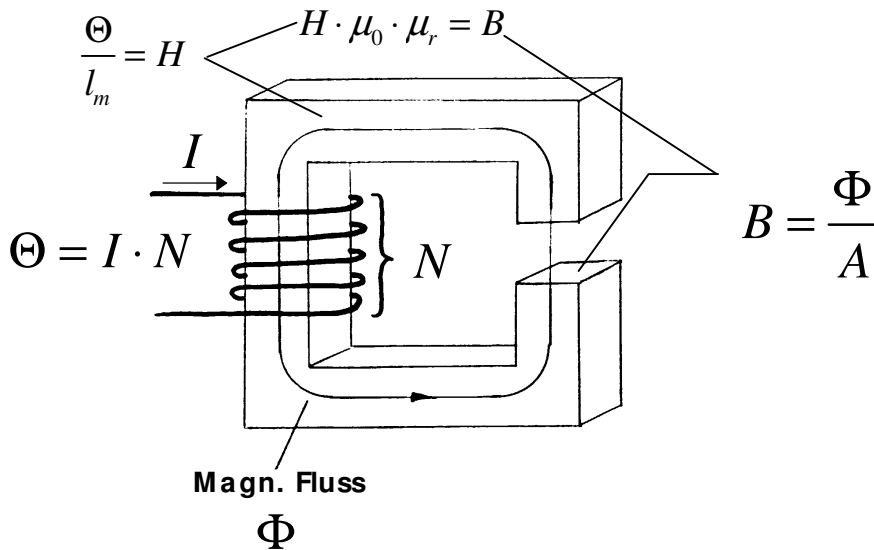
Merke:

Je stärker die magnetische Wirkung an einer Stelle des magnetischen Feldes ist, um so dichter hat man sich dort die Feldlinien vorzustellen.
 Diese Feldliniendichte wird als magnetische Induktion B bezeichnet.
 Die Induktion ist um so grösser, je grösser der senkrecht durch eine Fläche hindurchtretende magnetische Fluss ist.

8.3.5.1 Die Magnetisierungskurve von Luft



8.3.5.2 Zusammenhang magnetischen Fluss und Durchflutung

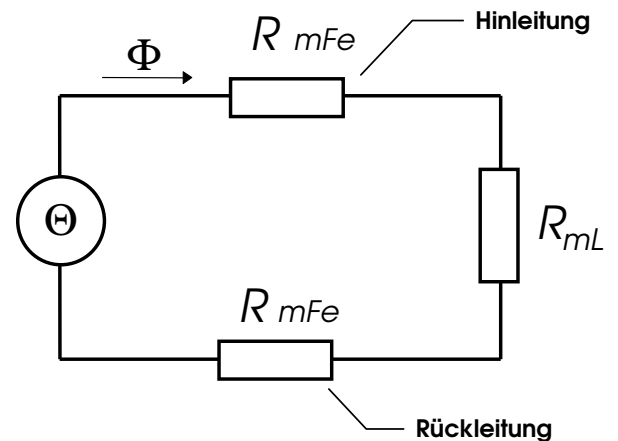


Ersatzschaltung

Aus der Ersatzschaltung ist ersichtlich, dass die **Durchflutung** die freibende Kraft des magnetischen Kreises ist.

Es kann analog des elektrischen Kreises das Gesetz des

Magnetismus definiert werden.



$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m}$$

Φ	magn. Fluss	$[Vs] = [Wb]$
Θ	magn. Durchflutung	$[A]$
R_m	magn. Widerstand	$[A / Vs]$

8.3.6 Die relative Permeabilitätszahl von eisenhaltigen Stoffen

8.3.6.1 Permeabilitätszahl in Funktion der Induktion

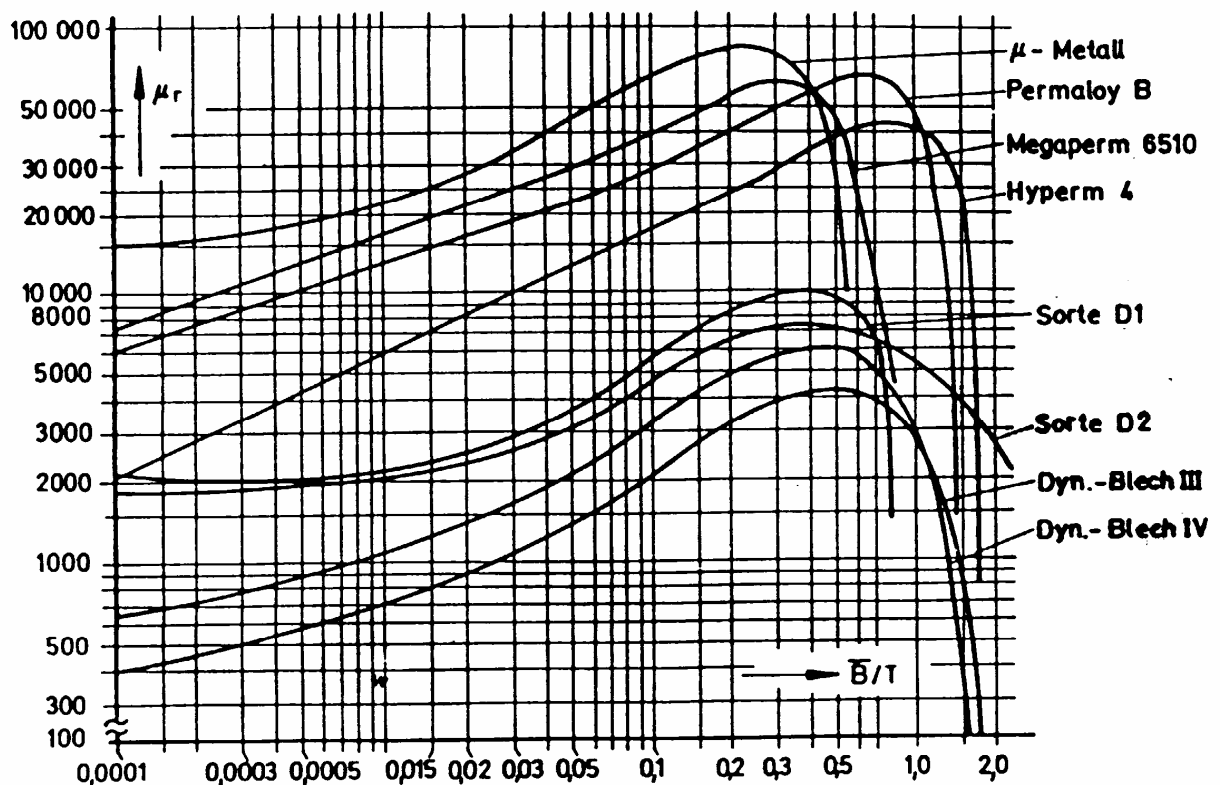
Taucht man in die Luftspule einen Weicheisenkern, leitet dieser die magnetischen Feldlinien wesentlich besser als die Luft. Dies kann aus den bisherigen Versuchen ersehen werden. In der Praxis interessiert vor allem, in welcher Mass, verglichen mit Luft, ein Eisenkern die magnetische Wirkung vergrössert. Man gibt daher in der Regel nur die Permeabilitätszahl an; es ist dies ein reiner Zahlenwert.

Merke:

Spezialeisen kann bis zu 200'000 mal besser leiten als Luft.

Man bezeichnet diesen Faktor mit μ_r als die relative Permeabilität.

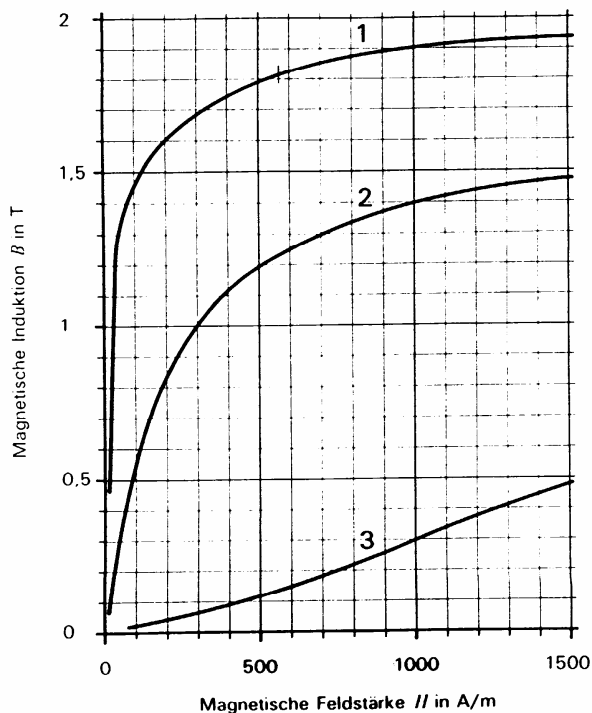
(Nicht zu verwechseln mit μ_0 , der Feldkonstanten)



8.3.6.2 Bestimmung der Permeabilitätszahl

Weichmagnetische Materialien bilden unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes einen Magneten und gehen nach dem Abschalten des Feldes grösstenteils wieder in den unmagnetischen Zustand über. Einfaches Dynamoblech IV konnte magnetisch mit maximal 12.000 Gauß = 1,2 T (Tesla) ausgenutzt werden.

- 1 Elektroblech I (kornorientiert, kaltgewalzt)
- 2 Elektroblech II (warmgewalzt), Stahlguss
- 3 Gusseisen



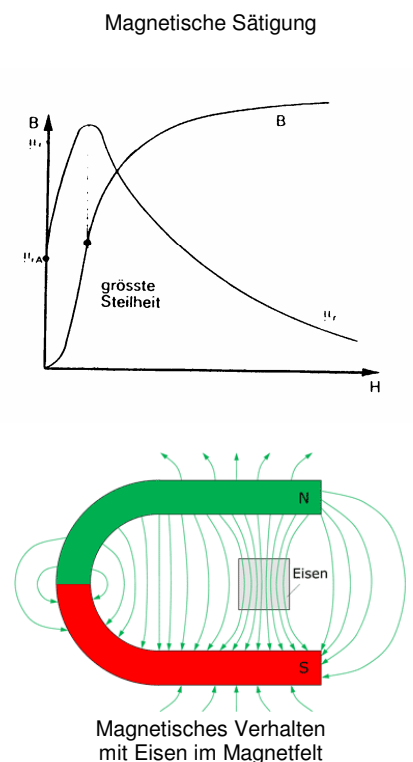
Aufgabe

Bestimmen Sie aus nebenstehender Grafik die Permeabilität von Elektroblech II bei 1,2 T.

Zusammenhang zwischen den Magnetischen Grössen und der Permeabilität:

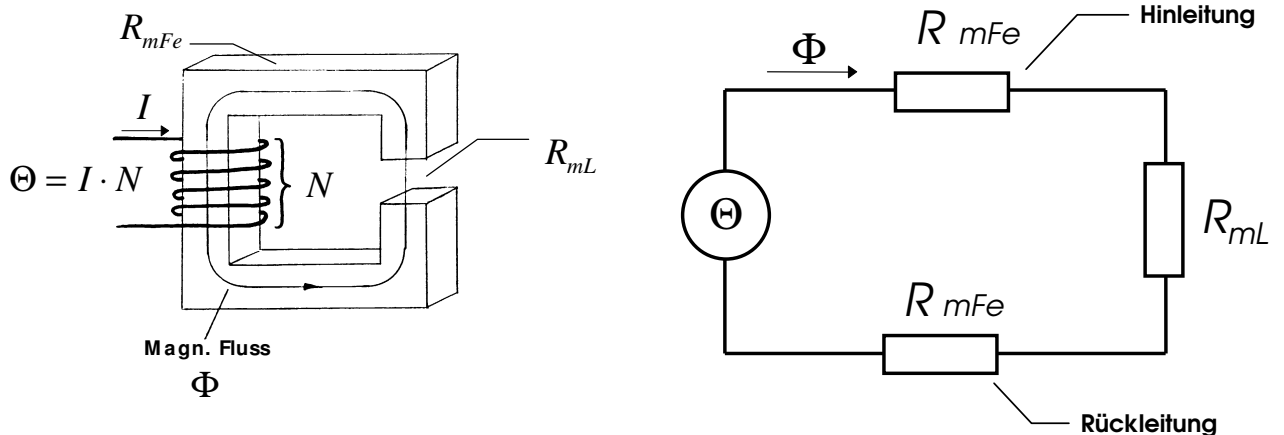
$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

Weiterentwickelte Eisen-Silizium-Legierungen ermöglichten Flußdichten bis etwa 1,75 T.



8.3.7 Der magnetische Widerstand

Analog dem elektrischen Widerstand im ohm'schen Kreis, kann hier vom magnetischen Widerstand gesprochen werden, der dem magnetischen Fluss entgegengesetzt wirkt.



Merke

Alle im magnetischen Kreis vorkommenden Medien bilden magnetische Widerstände. Sie werden alle addiert. Die einzelnen magnetischen Widerstände werden wie folgt berechnet:

$$R_m = 2 \cdot R_{mFe} + R_{mL}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$

R_m magnetischer Widerstand [A / Vs]

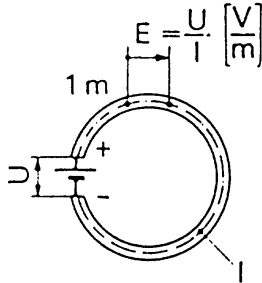
R_{mFe} magnetischer Widerstand des Eisens [A / Vs]

R_{mL} magnetischer Widerstand der Luft [A / Vs]

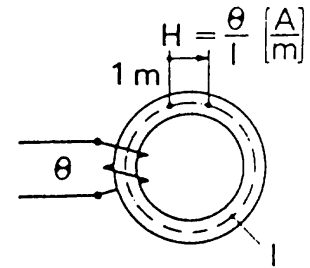
l mittlere Länge der wirksamen Feldlinien in den Medien [m]

8.3.8 Vergleich Stromkreises mit magnetischem Kreis

Elektrisch



Magnetisch



Draht	Leiter	Eisenkern
Spannung U [V]	Ursache	Durchflutung $\Theta = I \cdot N$ [A]
Strom I [A]	Fluss	Magnetischer Fluss Φ [Vs]
$R =$ [Ω]	Widerstand	$R_m =$ [A/Vs]
$E =$ [V/m]	Feldstärke	$H =$ [A/m]
$I =$ [A]	Ohmsches Gesetz	$\Phi =$ [Vs] = [Wb]
$S =$ [A/m ²]	Flussdichte	$B =$ [Vs/m ²] = [T]

R_m = Magnetischer Widerstand

8.4 Spulen mit Eisenkern

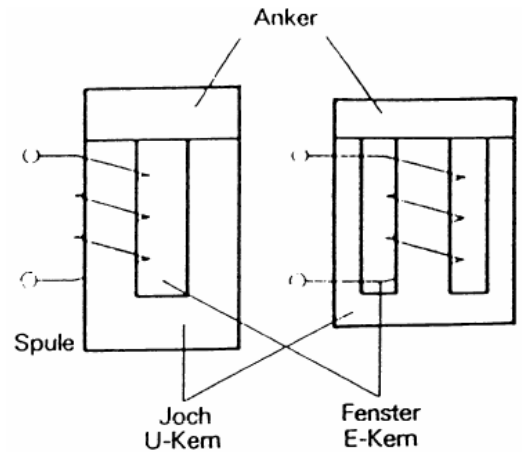
8.4.1 Kerntypen

U-Kerne und E-Kerne sind die gebräuchlichsten Kerntypen.

Bei dem E-Kern wird die Spule auf dem mittleren Schenkel angeordnet.

Der magnetische Fluss teilt sich in die zwei Aussenschenkel auf, die je den halben Querschnitt besitzen (Mantelkern).

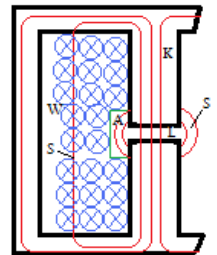
Wird ein gewöhnlicher Transformator kurzgeschlossen, fließen sehr hohe Primär- und Sekundärströme, die sich aus der geringen Streuinduktivität und den Wicklungswiderständen ergeben. Damit verbunden sind hohe Verluste.



Merke:

Da schon bei kleinsten Luftspalten die magnetische Durchflutung rapid zunimmt, müssen diese klein gehalten werden. Während bei Transformatoren die Luftspalte praktisch auf Null reduziert werden können, ist bei rotierenden Maschinen zwischen dem feststehenden Teil, dem Stator, und dem rotierenden Teil, dem Rotor, ein Luftspalt nötig, der so klein gemacht wird, wie es die rationelle Fabrikation der elektrischen Maschine zulässt.

***Streufeldtrafo**
Streufeldtransformatoren weisen naturgemäß in ihrer Umgebung erhöhte magnetische Flussdichten auf.



W Wicklung
S Streuflüsse
K Kern
A Aufpolsterung
L Luftspalt

8.4.2 Luftspalt

Richtlinie für Luftspalt:

δ minimaler Luftspalt [mm]
 d_R Rotordurchmesser [mm]

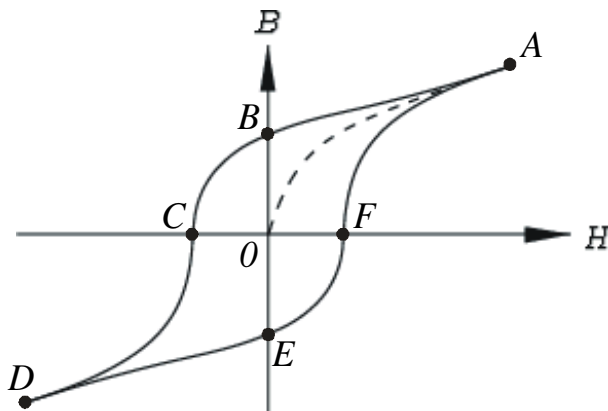
$$\delta = 0,2 + \frac{d_R}{1000}$$

<p>Joch</p>	<p>Transformatoren Erhöhung oder Verringerung der Wechselspannungen.</p> <p>Netztrafo</p>	<p>*Vorschaltgerät für Leuchtkehlame-Röhren</p>	<p>*Klingeltransformator (Aufgabe: Kurzschlussfestigkeit und geringe Leerlaufverluste)</p>
	<p>*Schweißtransformator muss ein Streufeldtransformator sein (Aufgabe: einstellbare Strombegrenzung für den Schweißlichtbogen)</p>	<p>Besonders sichere *Stromversorgungen (Aufgabe: Kurzschlussfestigkeit und besonders hohe Zuverlässigkeit)</p>	

Als Luftspalt wird in der Elektrotechnik im Rahmen magnetischer Kreise der Raum oder Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen bezeichnet, welche einen magnetischen Fluss führen.

8.4.3 Hysteresiskurve

8.4.3.1 Entstehung der Hysteresisschleife



Gestrichelt ist die Kurve einer bisher unmagnetisierten Probe gezeichnet (Neukurve $O-A$).

In nebenstehender Kurve verläuft die Erstmagnetisierung von $0 \dots A$ (Nullkurve).

Bei Verkleinerung der Feldstärke H wird auch die Induktion B wieder schwächer, doch stellt sich eine Verschiebung ein gegenüber der Erstmagnetisierungskurve, weil ein Teil der Elementarmagnete ihrer Trägheit zufolge in ihrer Stellung verbleiben.

Die Induktion $0 \dots B$, die noch vorhanden ist bei vollständiger Entregung wird als Restinduktion, Restmagnetismus oder REMANENZINDUKTION B_r bezeichnet.

Um diese Remanenz zum Verschwinden zu bringen muss eine negative Erregung $0 \dots C$, die sogenannte Koerzitivkraft – KOERZITVfeldstärke H_c aufgebracht werden. Wird die Erregung noch mehr negativ gesteuert, so wird das Eisen negativ magnetisiert $C \dots D$, und bei Entfernung der negativen Erregung bleibt eine negative Remanenz $0 \dots E$, die durch die Koerzitivkraft $0 \dots F$ wieder aufgehoben werden kann.

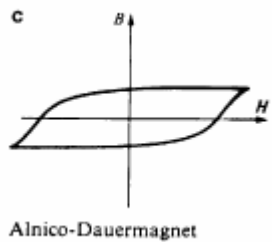
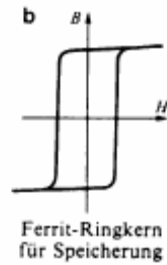
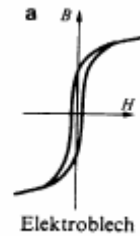
Durch weitere positive Erregung gelangt man wieder zum Punkt A , womit die Magnetisierungskurve zu einer geschlossenen Schleife wird, zur HYSTERESSCHLEIFE.

Die Form der Hysteresisschleife eines Materials ist entscheidend für die Beurteilung dessen magnetischen Verhaltens. Lassen sich die Elementarmagnete leicht drehen so spricht man von magnetisch weichem Eisen. Remanenz und Koerzitivkraft non magnetisch weichem Eisen sind klein, was einer schlanken Hysteresisschleife entspricht, im Gegensatz zu derjenigen von magnetisch hartem Eisen (Stahl) mit grosser Remanenz und Koerzitivkraft.

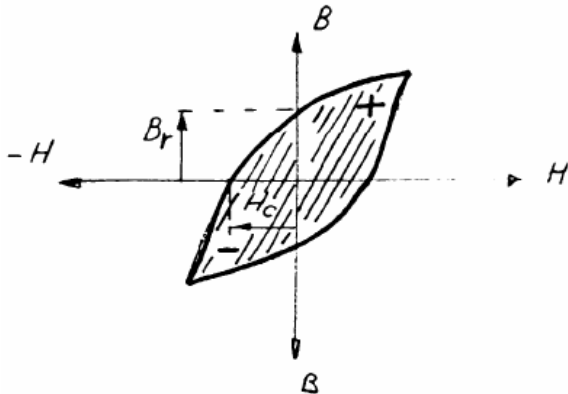
8.4.3.2 Hysteresisschleifen verschiedener Werkstoffe

Durch geeignete Legierungen und Herstellungsverfahren können die Werte B_r und H_C beeinflusst werden, und man erhält so z.B. die dargestellten Hysteresisschleifen.

	Anwendung	Bemerkung
a	Trafo Generatoren Elektromotoren Schützen, Relais Drosseln (Elektroblech)	Um kleinere Hysteresisverluste zu erreichen muss H_C einen kleinen Wert ergeben. Dies äussert sich mit einer schmalen bzw. schlanken Schleife.
b	Ferrit-Ring Kerne (Speicher)	Bei Magnetspeichern ist vor allem eine annähernd rechteckige Form der Hysteresisschleife erforderlich.
c	Alnico Dauermagnete	Bei Material für Dauermagnete sollte das Produkt aus H_C und B_r möglichst gross sein.



8.4.3.3 Ummagnetisierungsverluste

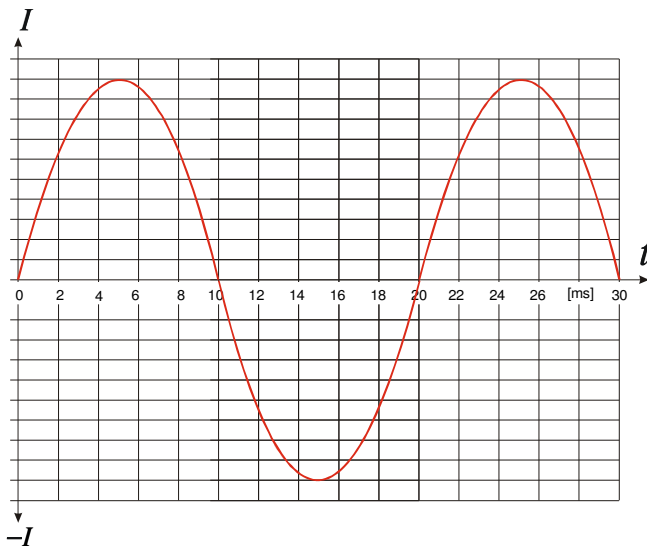


H_C Koerzitivfeldstärke [A/m]

B_r Remanenzinduktion [Vs/m²]

Merke:

Beim magnetisieren mit Wechselstrom stellen sich in der aufeinanderfolgenden Halbperiode die Molekularmagnete jeweils um.



Diese vom magnetisierenden Wechselfeld aufgezwungene

Drehbewegung erfordert eine gewisse Arbeit; sie wird im Material

restlos in Wärme umgesetzt und äussert sich demnach als

Verluste.

Diese Hysteresisverluste - sind ein Teil der Eisenverluste

- sind um so grösser, je grösser die Koerzitivfeldstärke ist.

8	MAGNETISMUS
4	SPULE MIT EISENKERN
2	HYSTERESEKURVE

8.4.3.4 Der relative Gütefaktor

Wie schon erwähnt sind die magnetischen Eigenschaften durch die

Remanenzinduktion und durch die **Koerzitivkraft** gekennzeichnet.

Eine grosse Remanenzinduktion ist nur dann von Nutzen, wenn auch die Koerzitivfeldstärke möglichst gross ist.

Deshalb wird auch das Produkt aus **$B_r \cdot H_C$** , der sogenannte **Gütefaktor**, als kennzeichnender Wert angegeben.

Der Gütefaktor wird in Bezug zu Kohlenstoffstahl angegeben.

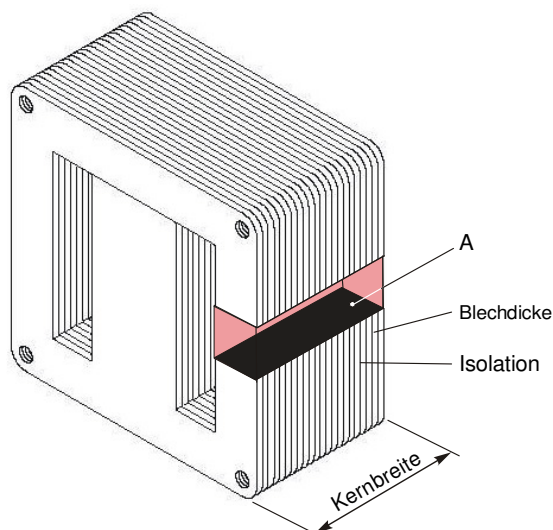
Material	Legierungsbestandteile (ausser Eisen)	B_r Remanenzinduktion* T bzw. V_s / mm^2	H_C Koerzitivfeldstärke A / m	G_r Relativer Gütefaktor**
Kohlenstoffstahl	Kohlenstoff (C) 0,8%	0,8	4'000	1,0
Wolframstahl	Wolfram (W)	1,05	4'800	1,6
Kobaltstahl	Kobalt (Co), Chrom (Cr), W	0,85	20'000	5,3
Alni	Aluminium (Al), Nickel (Ni)	0,65	40'000	8,1
Alnico	Al, Ni, Co, Kupfer (Cu)	1,25	44'000	17,2
Ticonal	Titan (Ti), Al, Ni, Co, Cu	1,26	47'000	18,5
Oerstit 220	Al, Ni, Co, Cu, Ti	0,60	90'000	16,8
Recoma	Co, Samarium	0,80	550'000	137

$$G_r = \frac{B_r \cdot H_C}{3'200}$$

*Gilt nur für geschlossenen Ring

**Vergleichswerte: für C-Stahl = 1 gesetzt

8.4.3.5 Der Füllfaktor



Der Füllfaktor ist bei Elektromagnetenkernen von Bedeutung.

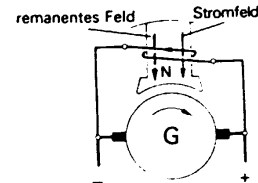
Er gibt an, in welchem Verhältnis die Elektromagnetenblechdicke zu derjenigen der Magnetenkernbreite steht.

$$F_A = \frac{\text{Blechdicke} \times \text{Anzahl Bleche}}{\text{Kernbreite}}$$

8	MAGNETISMUS
4	SPULE MIT EISENKERN
2	HYSTERESEKURVE

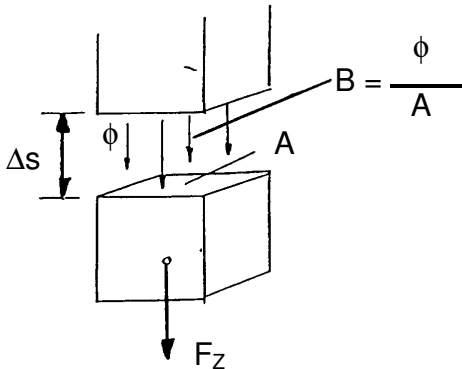
8.4.3.6 Entmagnetisieren

- Die Beseitigung von unerwünschtem remanentem Magnetismus erfolgt meist so, dass man den betreffenden Gegenstand langsam durch ein Wechselstrom-Magnetfeld bewegt. Eine genügend starke Erwärmung wirkt ebenfalls entmagnetisierend.
- Auch die mit Gleichstrom erregten Polräder oder Statoren von Gleichstrom-Generatoren weisen remanenten magnetismus auf. Er ist die Voraussetzung für die sogenannte Selbsterregung. Ein entgegengesetzter Erregerstrom hebt den remanenten Magnetismus auf.
- Der remanente Magnetismus im Eisenkörper eines Schützes kann nach dessen Abschaltung verhindern, dass der Anker abfällt; dem wird durch Einfügen eines Luftspaltes bzw. Anbringen eines Klebestiftes begegnet, denn diese Massnahme verringert die Remanenzinduktion.



8.5 Anwendungen magnetischer Kraftwirkungen

8.5.1 Zugkraft von Magneten



Die Zugkraft lässt sich errechnen aus der Gegenüberstellung der Energie (1Joul=1Nm=1Ws), die aufzuwenden ist um ein Stück Eisen um den kleinen Weg Δs vom Magneten abzuheben und der im Feldraum $A \Delta s$ vorhandene Feldenergie.

$$F_z \cdot \Delta s = \frac{H \cdot B}{2} \cdot A \cdot \Delta s$$

Dividiert man die Gleichung mit Δs so erhält man die Formeln der Zugkraft.

$$F_z = \frac{H \cdot B \cdot A}{2}$$

In der Luft, ist $H = B / \mu_0$. Setzt man dies in der Formel ein, so erhält man wieder die Zugkraft aber man konnte eine Grösse eliminieren.

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

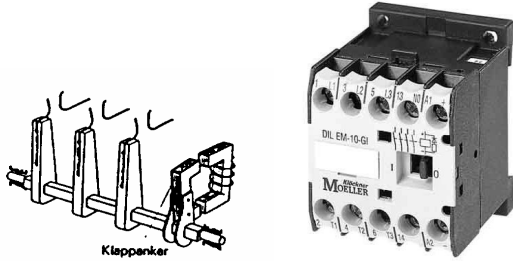
Diese Formel gilt nur solange als das Eisenstück am Magneten haftet. Sobald es von diesem abgehoben wird, entsteht magnetische Streuung die ein rasches Absinken der Zugkraft zur Folge hat.

H	Magnetische	
	Feldstärke	[A/m]
B	Magnetische	
	Induktion	[Vs/m ²]
A	Fläche	[m ²]
φ	Magnetischer	
	Fluss	[Vs]
F _z	Zugkraft	[N]
Δs	Strecke	[m]
μ ₀	Magnetische	
	Feldkonstante	[Vs/Am]



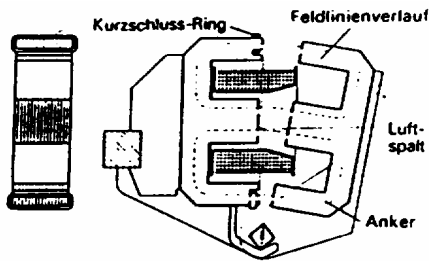
Lasthebemagnet

8.5.1.1 Schütz und Relais



Die Schütze werden bei Motorensteuerungen eingesetzt.

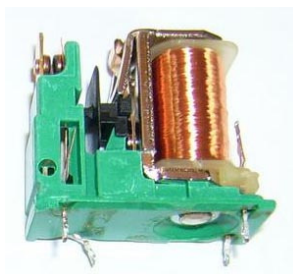
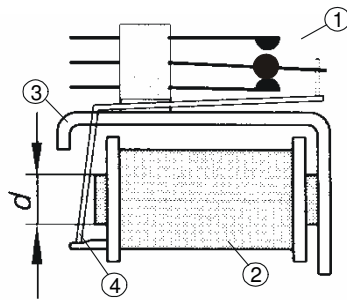
Schütz mit verschiedenen Magnetformen.



Relais werden meist in der Schwachstrom-technik verwendet.

Der Klebestift bildet den notwendigen Luftspalt, um ein Klebenbleiben des Ankers zu verhindern.

- ① **Kontakte**
- ② **Relaispule**
- ③ **Feldlinienweg**
- ④ **Winkelanker**



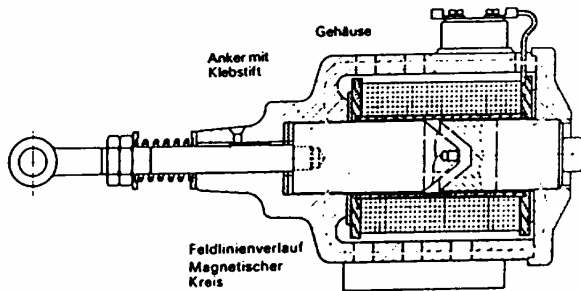
Wichtige Anwendungsbezeichnungen für Schaltkontakte:

AC 1 Lastschalter, nicht induktive Belastungen, Widerstandsöfen	AC 2 Schleifringläufermotoren mit begrenzten Anlaufstrom, YD- Anlauf (kleinere und mittlere Motorleistungen)
AC 3 Direkte Einschaltungen von Kurzschlussläufermotoren, YD- Anlauf (grössere Motorleistungen)	AC 4 Extremlast, Tippen, Reversieren, Gegenstrombremsen von Kurzschlussläufern
AC 5 AC-5a Schalten von Gasentladungslampen. AC-5b Schalten von Glühlampen.	AC 6 AC-6a Schalten von Transformatoren. AC-6b Schalten von Kondensatorbatterien.
AC 7 AC-7a Schwach induktive Lasten von Haushaltsgeräten und ähnliche Anwendungen. AC-7b Motoren von Haushaltsgeräten.	AC 8 AC-8a Schalten von hermetisch gekapselten Kühlkompressormotoren mit manueller Rücksetzung der Überlastauslöser. AC-8b Schalten von hermetisch gekapselten Kühlkompressormotoren mit automatischer Rücksetzung der Überlastauslöser.
AC 11 Elektromagnete z.B. für Spannzeuge oder Hubmagnete	AC 12 Steuerung von ohmschen Lasten und induktiven Lasten bei Trennung durch Optokoppler.
AC 13 Steuerung von Halbleiter-Lasten bei Trennung durch Transformatoren.	AC 14 Steuerung von kleinen elektromagnetischen Lasten (< 72 VA).
AC 15 Steuerung von elektromagnetischen Lasten (> 72 VA).	

Luftspalt

Bei Gleichstrom-Relais vermeidet ein Luftspalt das Haftenbleiben des Magnetankers am Spulenkerne, da auch bei stromloser Spule eine geringe Restmagnetisierung erhalten bleibt. Er wird hier mit einem nicht ferromagnetischen Niet oder einer Folie ausgefüllt.

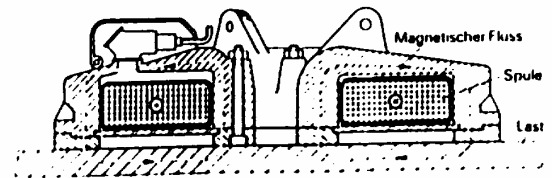
8.5.1.2 Topfmagnet



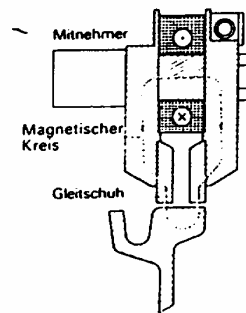
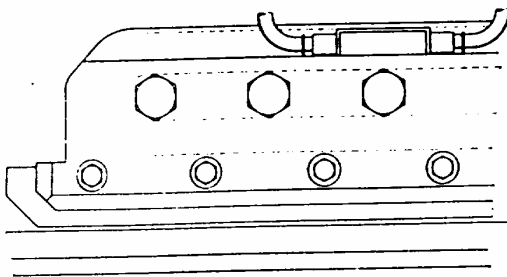
Mit ihnen können grosse Zugkräfte ausgeübt werden. Sie werden bei der Weichenstellung bei der Strassenbahn oder zur Bremslüftung bei Hebezeugen eingesetzt.

8.5.1.3 Lasthebemagnet

Man kann damit Schrott und Späne ferromagnetischer Werkstoffe (Eisen, Nickel, Kobalt) transportieren.



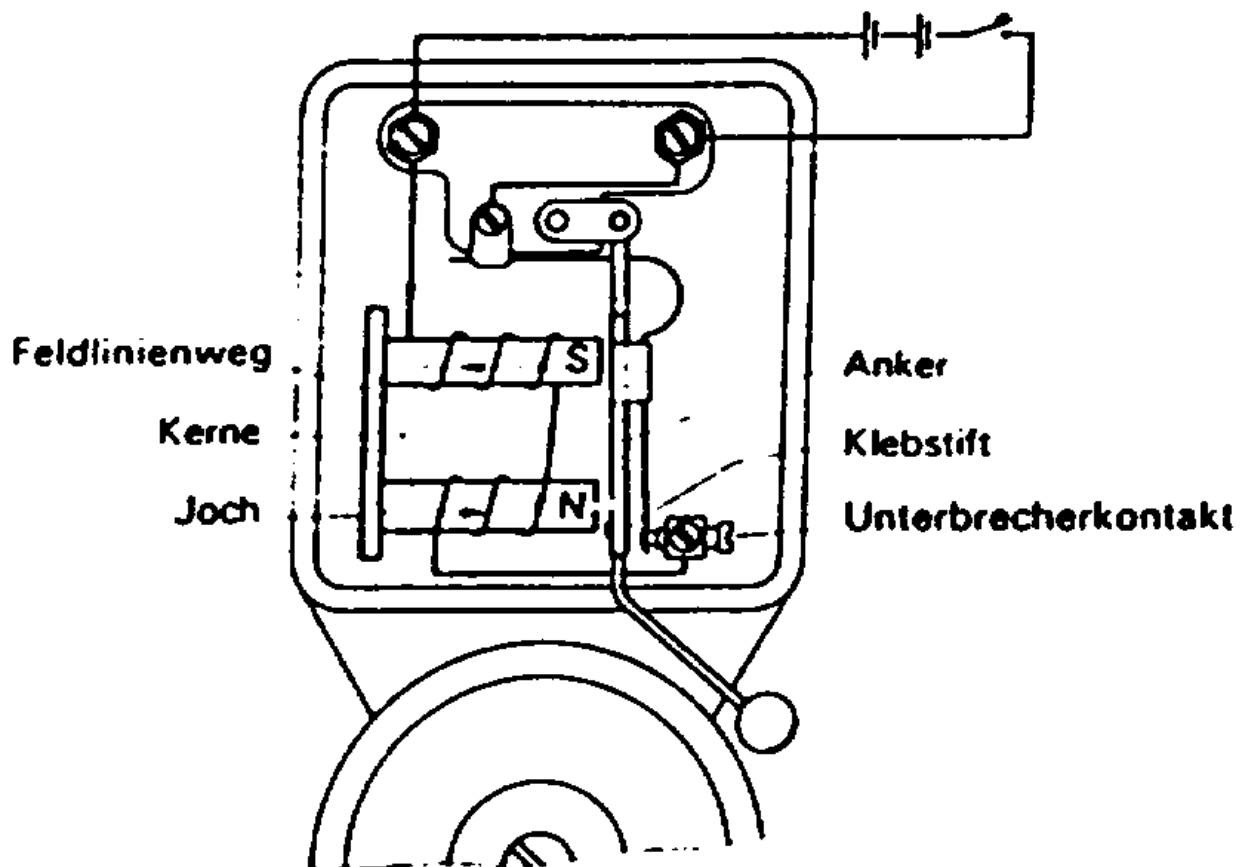
8.5.1.4 Schienenbremse



Bei Straßenbahnen werden Elektromagnete als zusätzliche Bremsen verwendet. Solange der Strom für diese Bremsen nicht eingeschaltet ist, werden sie von starken Federn dicht über die Schiene gehalten.

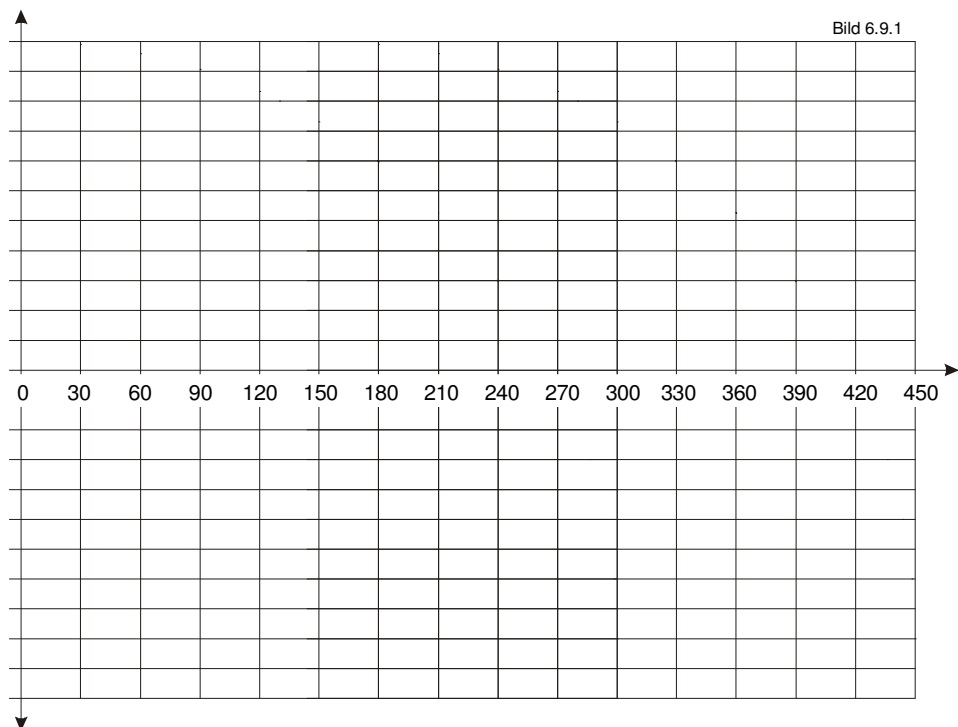
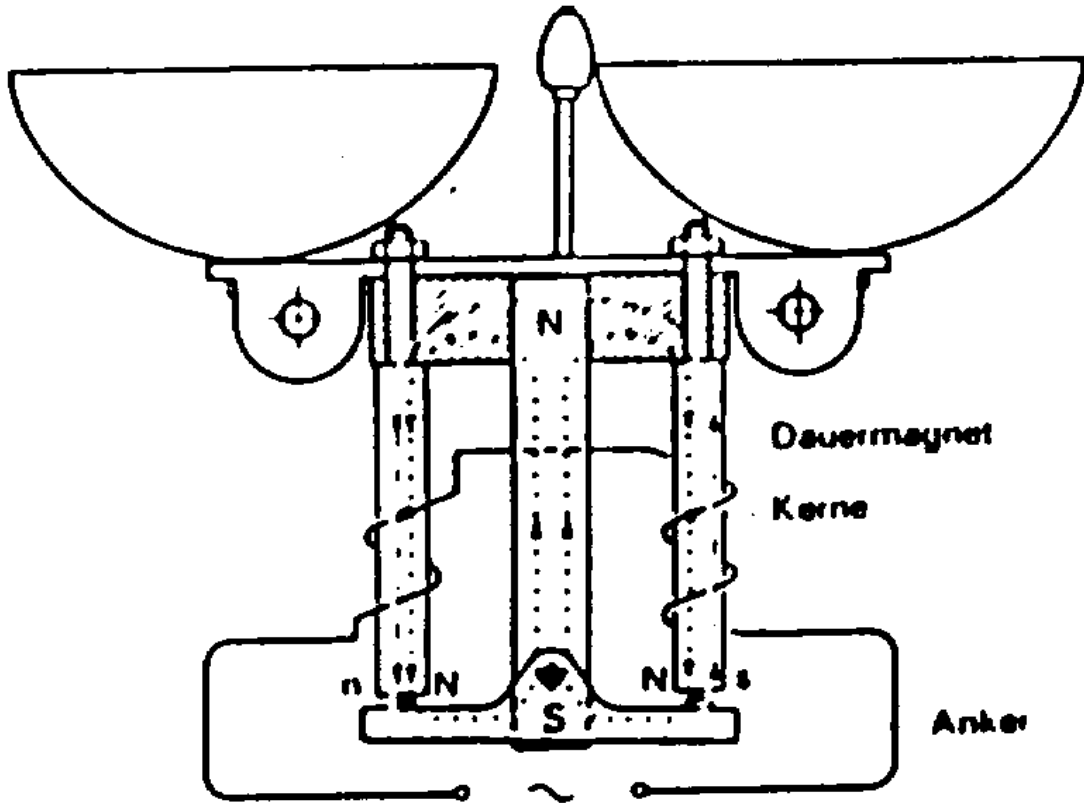
8.5.1.5 Gleichstromglocke

Nach diesem Prinzip des Selbstunterbrecher arbeiten auch Summer und elektrische Hupen.



8.5.1.6 Wechselstromglocke

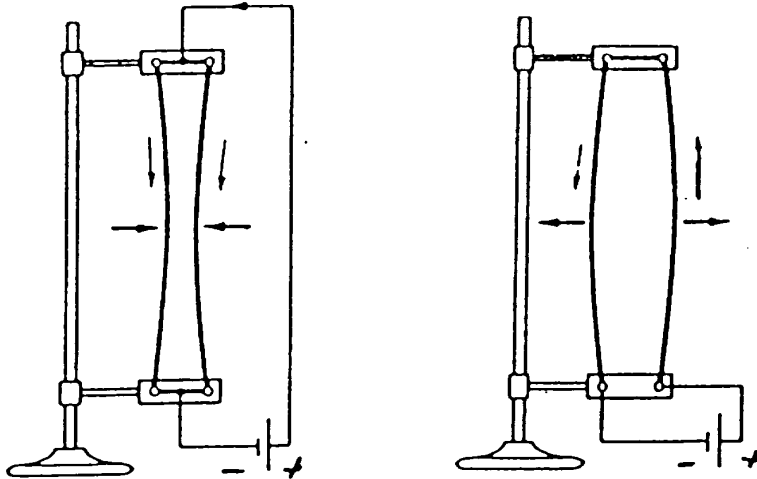
Wechselstrom-Wecker oder polarisierter Elektromagnet. Dies ist eine Verbindung von Elektro- und Dauermagnet.



8.5.2 Kraftwirkung paralleler stromdurchflossener Leiter

8.5.2.1 Beobachtungen bei stromdurchflossenen Leitern

Versuche



Feststellung

Es entsteht eine
 Anziehung

Es entsteht eine
 Abstossung

Bemerkung

Gleichsinnig fliessende
 Ströme verursachen
 Anziehung

Entgegengesetzt
 fliessende Ströme
 verursachen Abstossung



Stromdurchflossene Leiter erzeugen Magnetfelder
 Demzufolge besteht zwischen ihnen eine Kraftwirkung.

Die zwischen zwei parallel verlaufenden Stromleitern sich ergebende Kraft ist genau berechenbar; sie ist abhängig vom Strom, der Leiterlänge und dem Leiterabstand. Kennt man diese Grössen und misst die Kraft (z.B. mit einer Waage) so lässt sich daraus die wirksame Stromstärke ermitteln.

Aufgrund dieses Zusammenhangs hat man die Einheit der Stromstärke (Ampère) definiert:

Das Ampère ist die Stärke eines Stromes, der, durch zwei parallele und einem Abstand von 1m aufweisende Leiter fliesst und bei einem Meter Leiterlänge eine gegenseitige Anziehungskraft von 2×10^{-7} N hervorruft.

Die Kraft zwischen zwei parallelen, in Luft verlaufenden Stromleiter berechnet sich wie folgt:

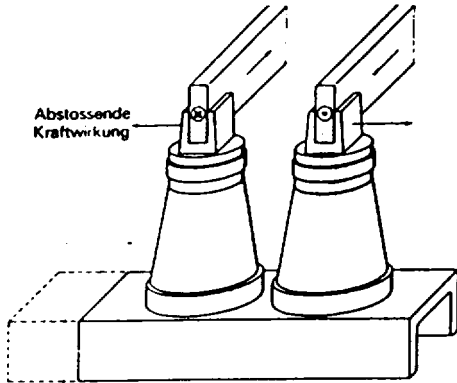
$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

$$F = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{a}$$

F	Kraft	[N]
a	Leiterabstand	[m]
l	Leiterlänge	[m]
I_1, I_2	Leiterströme	[A]

Verlaufen die Leiter in Luft ($\mu=1$) und setzt man für $\mu_0=1,257 \times 10^{-6}$ Vs/Am und π die Zahlenwerte ein, so erhält man folgende praktische Formel:

8.5.2.2 Anwendung paralleler stromdurchflossener Leitern

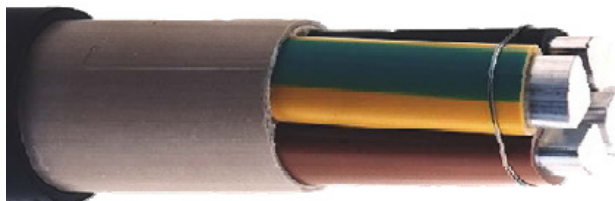
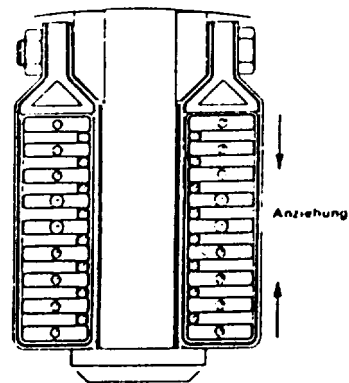


Beispiel 1

Sammelschiene

Beispiel 2

Wendepole für Beschleunigung der Stromwendung



Beispiel 3

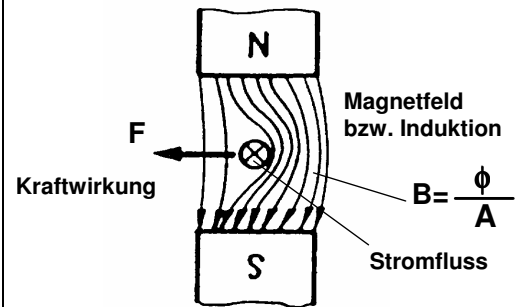
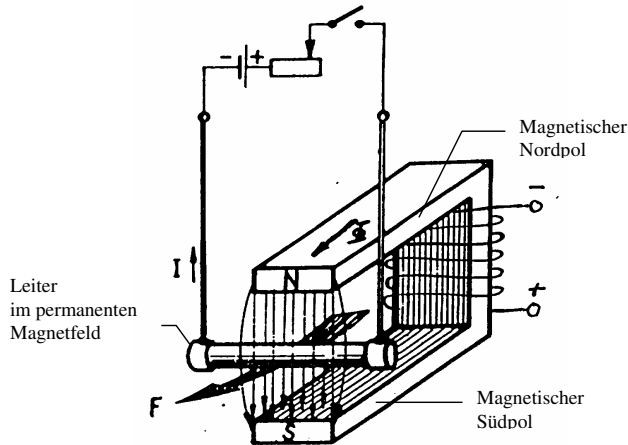
Parallele Leiter in einem Niederspannungskabel

Netzkabel
Sektorkabel aus Aluminium

8.5.3 Kraftwirkung stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld

8.5.3.1 Motorenregel, Beobachtung und Abhängigkeiten

Versuch

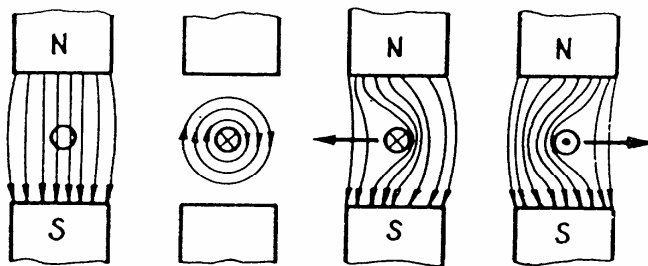


$$F = B \cdot l \cdot I$$

Die Ablenkung ist abhängig von der Richtung des Polfeldes sowie von der Stromrichtung im Leiter. Die Ablenkung ist auch abhängig von der Stärke des Polfeldes und auch von der Grösse des Leiterstromes.

- F Kraft
- B Induktion
- l Im Magnetfeld liegende Leiterlänge
- I Leiterstrom bzw. Stromfluss

8.5.3.2 Anschauung und Wirkungen der vorhandenen Felder



Polfeld Leiterfeld Kombination der Felder mit zwei Stromrichtungen im Leiter

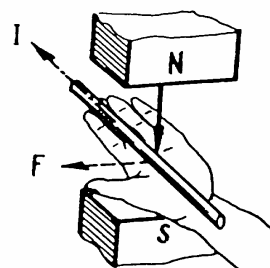
Merke

Auf der einen Seite des Leiters entsteht so eine Kraftlinienüberzahl. Auf der anderen Seite entsteht ein Kraftlinienmangel.

Ablenkungsrichtung → →
 Ausgleichstenden

Merke

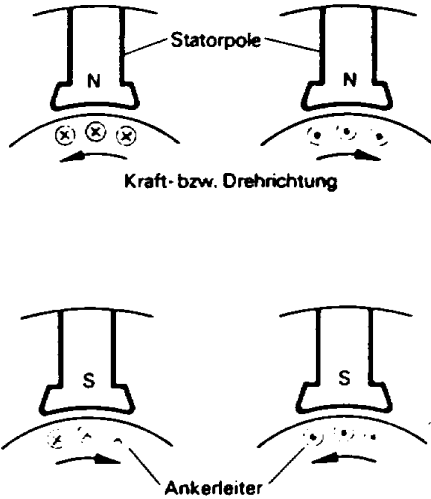
Mit dieser Handregel (Motorenregel) kann für eine fehlende dritte Grösse jederzeit die Richtung dieser festgelegt werden.



Aus den bisherigen Beobachtungen lässt sich eine einfache Regel herleiten, welche die Beziehungen zwischen der Magnetfeldrichtung, Krafrichtung und Stromrichtung besteht.

8.5.3.3 Stromdurchflussener Leiter im permanenten Magnetfeld

Motor



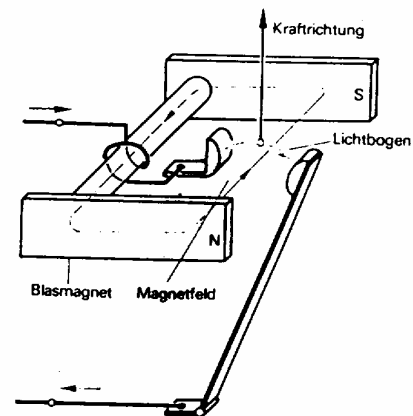
Erläuterung

Durch Änderung der
 Stromflussrichtung im
 Anker oder des Magnet-
 feldes des Stators kann
 die Drehrichtung des
 Motors beeinflusst
 werden.

8.5.3.4 Funkenlöschung bei Gleichstromschaltern

Erläuterung

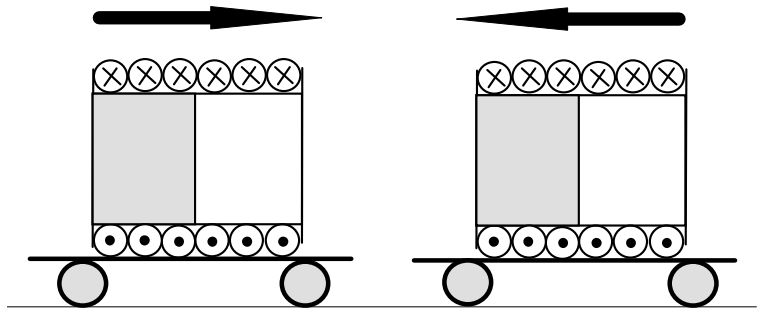
Der Lichtbogen bzw. die
 Strombahn wird vom
 Magnetfeld wegge-
 blasen.



8.5.4 Kraftwirkung zwischen elektromagnetischen Spulen

Versuch 1

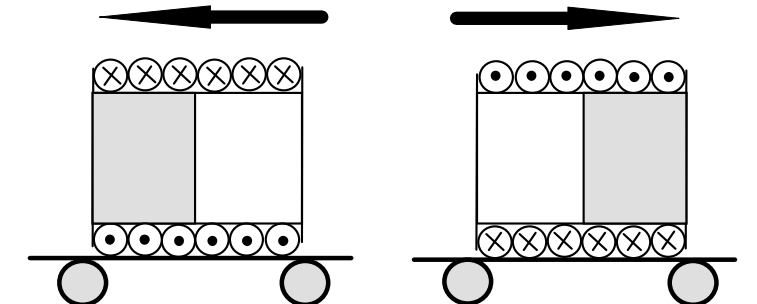
Elektromagneten mit
Spulenstrom
gleicher Richtung



Anziehung

Versuch 2

Elektromagneten mit
Spulenstrom
entgegengesetzter
Richtung



Abstossung

Merke

Die Abhängigkeit ist dieselbe wie bei der Kraftwirkung zwischen parallel verlaufenden stromdurchflossenen Leitern.

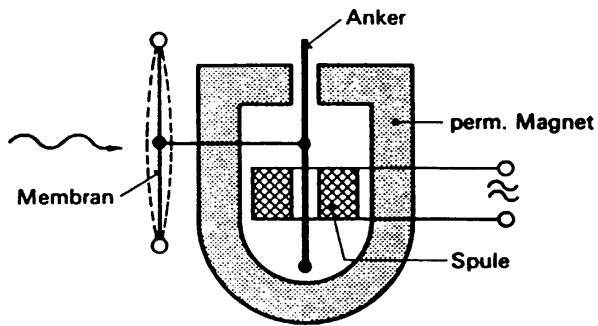
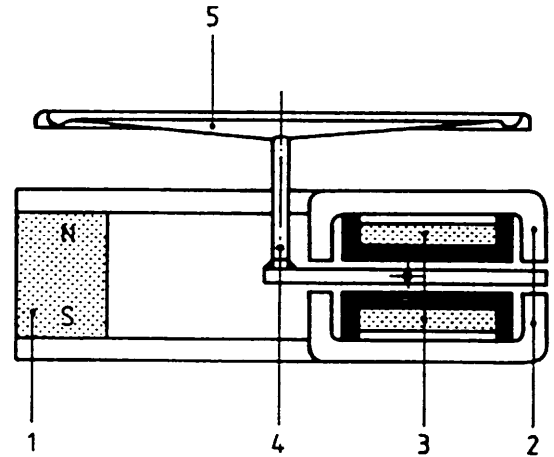
Die Kraftwirkung kann mit der Stromstärke und durch Einsetzen von Fe-Kernen in die Spule erhöht werden.

Die Sättigung des Eisens begrenzt die Kraftwirkung des Elektromagneten.

8.5.5 Lautsprecher und Mikrophon

Aufbau der vierpoligen Hörer-
kapsel:

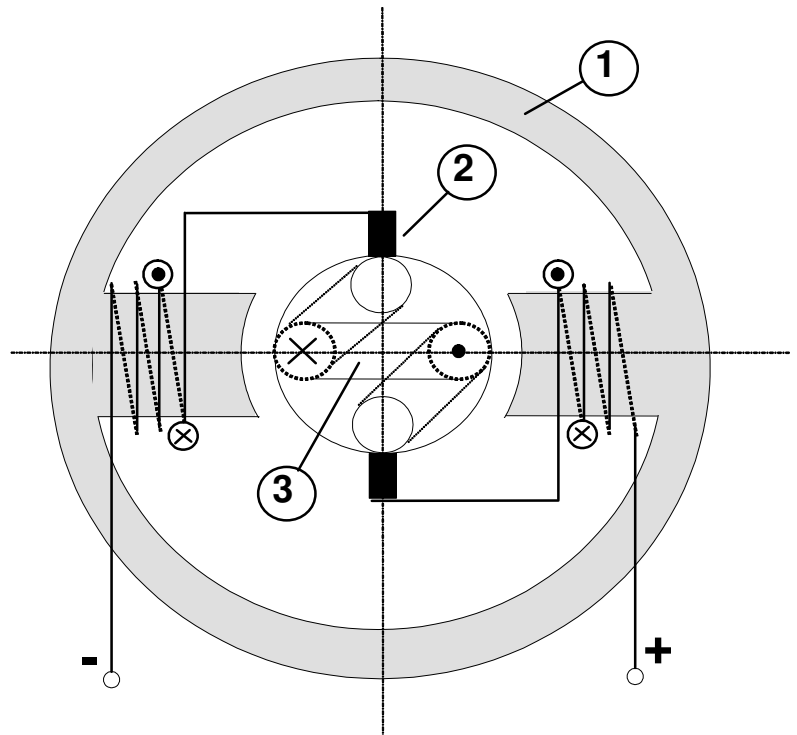
- 1 **Dauermagnet**
- 2 **Weicheisenspule**
- 3 **Magnetspule**
- 4 **Anker aus Weicheisen
in der Mitte gelagert**
- 5 **Membrane**



8.5.6 Motoren

Drehbare Spule im elektrischen Magnetfeld

- ① Fe-Ring
Stator
- ② Kollektor
Kohlenbürsten
- ③ Drahtschleifen,
Spule
Rotor



8.5.7 Analoge Messgeräte

Drehspulmesswerk für

Gleichstrom-
messung

Dreheisenmesswerk für

Gleich- und
Wechselstrommessung

