

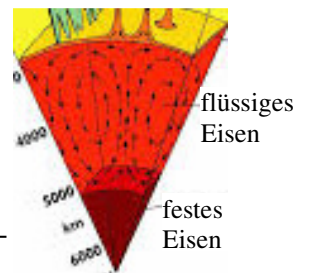
## A) Magnetismus

### 1) Erste Begegnung mit dem Magnetismus.

- a) Der Magnetismus fasziniert die Menschen seit alters her. Auch heute gibt es wunderbare Magnetspielzeuge und Kompassse für Kinder. Elektrizität ist gefährlich, mit dem Magnetismus kann man spielen. Daher ist uns der Magnetismus vertrauter als die Elektrizität. Früher wurde nach den Sternen navigiert. Mit dem Kompass war die Seefahrt für die großen Entdecker ganz anders aufgestellt. Die Seite der Kompassnadel, die nach Norden zeigt, wurde rot angemalt und erhielt den Namen „Nordpol“. Weil sich auch beim Magnetismus gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige anziehen, muss sich dort, wo der „Nordpol“ des Kompasses hinzeigt, ein „Südpol“ befinden. So kommt es, dass sich der magnetische Südpol am geographischen Nordpol befindet.

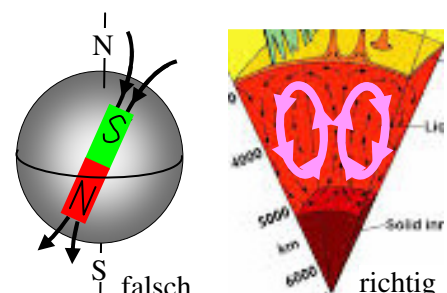


- b) Erdmagnetismus. Die Erde ist ca. 4,5 Milliarden Jahre alt und anfangs war alles mehr als 9000°C heiß. Was nicht in die Gasatmosphäre aufstieg, bildete die flüssige Erdkugel. Die „leichten“ Gesteine schwammen nach oben auf und das „schwere“ Eisen sank zur Mitte. Doch mit der allmählichen Abkühlung verfestigte sich nicht nur die äußere Erdkruste, sondern auch die heiße Mitte, obwohl diese nach wie vor am heißesten war. Bzgl. des Aggregatzustandes besteht nämlich eine Konkurrenz zwischen Temperatur und Druck. So siedet Wasser in 2000m Höhe, bei einem Druck von 0,77 bar, bereits bei 93°C. Auch der Erstarrungspunkt ist druckabhängig: Bei Normaldruck von 1 bar wird Eisen über 1500°C flüssig. Doch im *Erdmittelpunkt* herrschen 3,6 Mio bar. Bei den anfänglichen 9000°C war das Eisen dort flüssig denn der Erstarrungspunkt liegt bei diesem Druck bei 7300°C. Als die Temperatur in der Erdmitte jedoch unter diesen Wert auf heute 7000°C sank, erstarrte das Eisen und bildete den festen Erdkern. Das ist ca. 3 Milliarden Jahre her. In der Schicht darüber betragen Druck und Temperatur 2,5 Mio bar und 5000°C. Doch bei 2,5 Mio bar erstarrt das Eisen „erst“ bei 4000°C. So blieb das Eisen, obwohl kälter als im Erdmittelpunkt, in der Schicht darüber bis heute flüssig. Über dem flüssigen Eisen kommen die flüssigen und zähflüssigen Gesteine und letztlich die feste Erdkruste. Der Planet Erde besitzt also die besondere Schichtung „fest, flüssig, fest“. Vor der Verfestigung des Erdkerns war die Wärmebewegung im Erdinneren *chaotisch*. Doch dann begann das flüssige Eisen über dem superheißen festen Eisenkern, wie Öl in der Bratpfanne, *reguläre* Konvektionsbewegungen auszuführen. Durch Reibung lud sich das flüssige Eisen zusätzlich elektrisch auf, so dass die Strömung des Eisens einem elektrischen Strom gleichkommt. Dieser Strom erzeugt ein Magnetfeld, welches den Strom noch weiter verstärkt. Seit dieser *Geodynamo* vor etwa 3 Milliarden Jahren angesprungen ist, besitzt unsere Erde ein so starkes Magnetfeld, dass das werdende Leben auf der nun auch fest werdenden Erdoberfläche vor der Zerstörung durch Sonnenwinde und kosmische Strahlung geschützt ist.



### 2) Woher kommt der Magnetismus?

Die Kenntnis über den Magnetismus begann mit Magnetsteinen, aus denen Kompassnadeln gefertigt wurden. Deshalb dachte man, dass das Erdinnere selbst eine riesige „Kompassnadel“ enthalten müsse. Doch später wurde klar, dass *elektrische Ringströme* das Magnetfeld erzeugen und die Kompassnadel nur *vorgetäuscht* ist. Wenn die Erde also keine Kompassnadel enthält und ihr Magnetismus auf *Ringströmen* beruht, warum sollte es dann beim Magnetstein und den Stab- oder Hufeisenmagneten anders sein. Doch wo ist der Ringstrom im Stabmagneten? Er steckt in der Kreisbewegung der Elektronen um den Atomkern und um sich selbst.

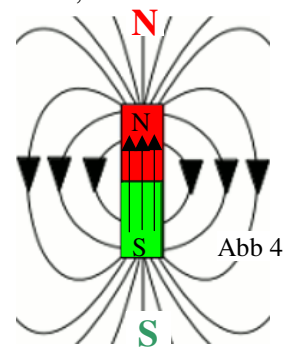
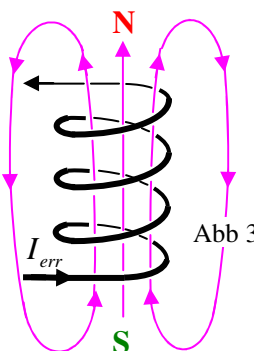
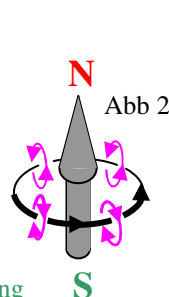
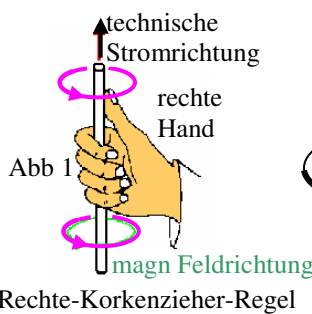


3) Wie kommt der Magnetismus zustande? Was sind die magnetischen Pole **N** und **S** ?

Der Magnetismus kommt *ausschließlich* durch die Bewegung von elektrischen Ladungsträgern zustande, also durch elektrischen *Strom*. Einen anderen Magnetismus gibt es (zunächst) *nicht*. Der *einfachste* Stromverlauf ist der Strom durch eine *gerade* Ader, durch einen *linearen* Leiter. In Abb.1 fließt der *technische* Strom senkrecht nach oben. Beim technischen Strom denkt man sich *positive* bewegte Ladungsträger. Man verwendet (gedanklich) positive Ladungsträger, weil auch die Probeladung  $q$ , welche zur Bestimmung der Richtung des elektrischen Feldes verwendet wurde, *positiv* gewählt wurde. **Die Korkenzieher-Regel der rechten Hand** zeigt uns dann, in welcher Richtung die magnetischen Feldlinien den linearen Leiter *umkreisen*:

Daumen in Stromrichtung. Die übrigen Finger geben die Richtung des Magnetfeldes an.

Auf einem Kreis sind alle Punkte *gleichwertig*, es gibt keine bevorzugte Stelle. Es gibt also nichts, was man beim Magnetfeld des *linearen* Leiters Nord- bzw. Südpol nennen könnte. Daran sieht man bereits, dass magnetische Pole *keine ursächlichen* Dinge sind, es sind konstruierte Gebilde. In den weiteren Abbildungen erkennen wir, dass die magnetischen Pole in Wirklichkeit nur *Durchlaufgebiete* von magnetischen Feldlinien sind. In Abb.2 führen wir den Daumen, also die Stromrichtung, im Kreis herum. Immer zeigen die übrigen Finger die Magnetfeldrichtung an. Abb. 2 zeigt, dass die Magnetfeldlinien innerhalb des (schwarzen) Stromkreises stets nach oben und außerhalb stets nach unten laufen. Da wir nicht in den Stromring hinein kriechen, sondern ihn nur von außen betrachten, haben wir oben eine Stelle aus der Feldlinien *heraus* treten und unten eine Stelle, in die Feldlinien *hinein* laufen. Die Stelle aus der Feldlinien heraus kommen nennt man **Nordpol** und malt sie **rot** an. Die Stelle, in die die Feldlinien hinein



Die Feldlinien sind kreisförmig, es gibt keine Pole.

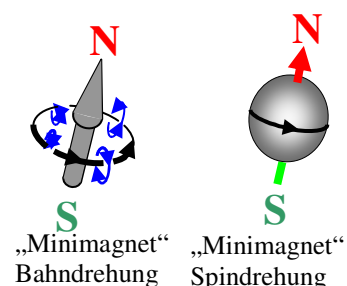
Feldlinien sind geschlossene Linien. Beim Magnetismus gibt es keine echten Pole, sondern nur Scheinpole. Diese sind lediglich Durchflussgebiete von Feldlinie.

laufen, nennt man **Südpol** und malt sie **grün** an. Der durchgebrochne Stabmagnet in Abb.5 zeigt, dass *jede* Stelle in Wirklichkeit *sowohl* Nord- *als auch* Südpol ist, je nach dem, von welcher Seite man guckt. Wiederholt man den *Stromring* von Abb.2 mehrfach, so ergibt sich in Abb.3 eine *Spule*. Jetzt schlüpft man noch weniger in das Spuleninnere und sieht die Ein- und Austrittsgebiete der Feldlinien ausschließlich von außen. Da werden die Scheinpole, die nur Durchtrittsgebiete sind, noch täuschend echter zu Polen. Vollends hinters Licht führt uns der Stabmagnet. In ihn können wir selbst bei bestem Willen nicht hineinschlüpfen. Die beiden Pole scheinen dann wirklich echt zu sein, denn man vergisst allzu gern, dass auch hier die Feldlinien im *Inneren* vom Süd- zum Nordpol zurücklaufen. Im Inneren ist also der Südpol der Nordpol und der Nordpol der Südpol. Kurzum:

Magnetische Pole sind *Scheinpole*, sie sind nur Durchlaufgebiete geschlossener Feldlinien. Warum sich **N** und **S** anziehen bzw. abstoßen, obwohl sie nur *Scheinpole* sind, das kommt später.

4) Magnetismus der Atome

Der Magnetismus der Materie beruht auf dem Magnetismus der Atome. In den Atomen umkreisen Elektronen den Atomkern und sie kreisen mit ihrem Spin um sich selbst. Beide Bewegungen bilden Ringströme, welche „Minimagnete“ mit **N** und **S** erzeugen. Doch *alle* Stoffe bestehen aus Atomen. Warum sind einige Stoffe *stark* magnetisch, andere nur schwach magnetisch und einige sogar antimagnetisch. Warum ist das Verhalten so unterschiedlich?



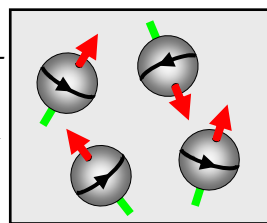
Die Antwort: Jeder „Minimagnet“ innerhalb eines Atoms hat durch die Drehachse seines Ringstromes eine gewisse räumliche Orientierung. Sind diese Orientierungen *gleichgerichtet*, so *verstärken* sich ihre Magnetfelder. In diesem Fall besitzt das Atom ein von null verschiedenes magnetisches *Eigenmoment*. Das Atom ist dann als Ganzes ein atomarer Magnet bzw. ein *atomarer Elementarmagnet*. Stoffe dieser Art heißen paramagnetisch. Kommt noch ein „Nachbareffekt“ hinzu, so kann ein paramagnetischer Stoff sogar ferromagnetisch werden. Sind die Orientierungen der „Minimagnete“ innerhalb eines Atoms ganz oder teilweise *entgegengerichtet*, so heben sich ihre Magnetfelder ganz oder teilweise auf. Ist das magnetische *Eigenmoment*  $m$ , also die Summe aller Teilfelder, gleich null, so heißt der Stoff diamagnetisch. Interessanterweise ist ein diamagnetischer Stoff mit  $m = 0$  jedoch nicht unmagnetisch, sondern sogar „antimagnetisch“. Wie wir unten sehen werden *schwächt* der diamagnetische Stoff das äußere Feld. Also: Wir müssen den Irrtum bei Seite legen, dass nur Eisen, Kobalt und Nickel magnetisch wären. *Ausnahmslos alle* Stoffe wirken magnetisch, ob nun positiv oder negativ.

a) Paramagnetismus

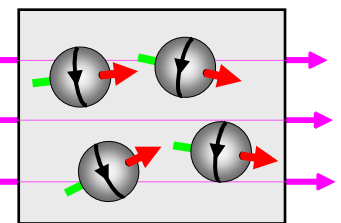
Meist ist die Eigendrehung, also der Spin, für das magnetische Verhalten wichtiger als der Anteil, der von den Umlaufbahnen stammt. Das liegt am Aufbau des Periodensystems. Z.B. werden beim Stickstoff von den fünf

N	2s	2p		
	↑↓	↑	↑	↑

Elektronen der zweiten Schale die drei *p*-Orbitale nach der Hundschen Regel mit *paralleler* Spinausrichtung zunächst *einfach* besetzt. Jeder Spin hat die Quantenzahl  $\frac{1}{2}$ . Beim N-Atom addieren sich die Spins damit zum Gesamtspin  $\frac{3}{2}$  und das Atom besitzt ein *Eigenmoment* und ist *paramagnetisch*. Die Eigenmomente richten sich im äußeren Magnetfeld nach diesem aus und *verstärken* es. Beim Neon kompensieren sich alle Spins zum Gesamtspin 0 und Neon ist *diamagnetisch*. Beim Eisen gibt es noch mehr ungepaarte Spins als beim Stickstoff.



Paramagnetische Atome ohne äußeres Feld



Paramagnetische Atome: Orientierung mit dem äußeres Feld

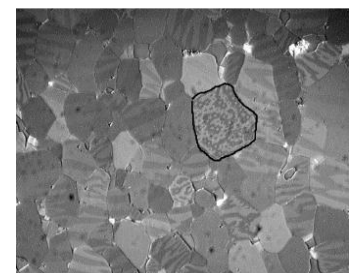
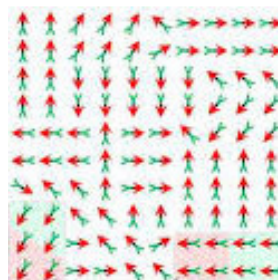
Das führt zu noch stärkeren Paramagnetismus und ermöglicht sogar den Ferromagnetismus.

Ne	2s	2p			
	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	

Fe	3s	3p			3d				
	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑

b) Ferromagnetismus

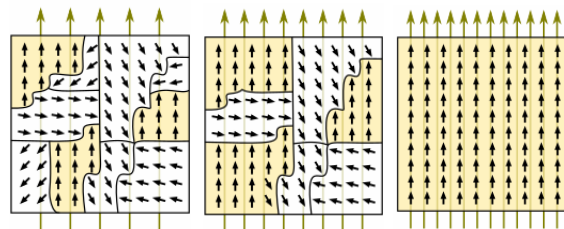
Bei Eisen, Cobalt, Nickel, etlichen Legierungen und *Seltenen Erden* mit hochgradig un abgeschlossenen Schalen und parallel ausgerichteten Spins, kommt zum Paramagnetismus der isolierten Atome noch ein *Nachbarschaftseffekt* hinzu. Zunächst ist die Ausrichtung der einzelnen atomaren Elementarmagnete *chaotisch*. Beim reinen Paramagnetismus bleibt das auch so. Weil es aber garnicht so viele mögliche räumliche Orientierungen für die Elementarmagnete gibt, kommt es immer wieder vor, dass eine kleine Anzahl benachbarter Atome *gleich* orientiert ist. Beim Ferromagnetismus hat das eine große Auswirkung, weil solch eine gleichgerichtete Insel ihre Umgebung mitreißt und in die eigene Richtung hinein dreht. Das Wachstum der Insel wird so immer schneller. Da es überall solche Keimzellen für Gleichausrichtung gibt, wachsen die Zonen so lange, bis sie mit anderen aneinander stoßen und dann stehen bleiben. Die so gebildeten Gebiete gleicher magnetischer Ausrichtung heißen nach Pierre-Ernest Weiss *Weißsche Bezirke*. Stoffe mit dieser nachbarschaftlichen Fähigkeit heißen *ferromagnetisch* (von ferrum, lat. = Eisen)



Die Kantenlängen der Bezirke beträgt 10 bis 100  $\mu\text{m}$ , sie sind mit dem Mikroskop erkennbar. Ein Paramagnet wirkt von sich aus unmagnetisch, weil die Ausrichtung der einzelnen Atome chaotisch ist. Ein Ferromagnet wirkt auch von sich aus unmagnetisch, weil die Ausrichtung

tung der Weißschen Bezirke ebenfalls chaotisch ist. Erst wenn die Stoffe in ein *äußeres* Magnetfeld gebracht werden, übernimmt das äußere Magnetfeld das Kommando:

Beim Paramagneten klappen die atomaren Magnete etwas mühsam in die äußere Magnetfeldrichtung. Beim Ferromagneten klappen die Weißschen Bezirke mit Milliarden von Atomen schlagartig auf einmal in die vorgegebene Richtung und *verstärken* das äußere Feld *enorm*.

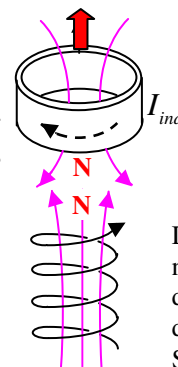


Reines Eisen ohne besondere Legierungszusätze heißt *Weicheisen*. Sobald ein äußeres Magnetfeld eingeschaltet wird, richten sich die Weißschen Bezirke nach diesem aus und verstärken das Feld. Nach dem Ausschalten purzeln die Bezirke jedoch durcheinander und das Weicheisen wird wieder unmagnetisch. Die *Remanenz*, also die übrig bleibende Magnetisierung, ist im perfekten Weicheisen gleich null. Das ist beim Wechselstrombetrieb von Transformatoren und elektrischen Maschinen erwünscht. Die andere Option ist, dass sich das Eisen nach der Magnetisierung daran erinnert. So kann Information gespeichert werden.

Das schafft man mit Legierungen und nutzt es bei der Festplatte und beim Tonband. Erhitzt man einen Stoff, so beginnen die Atome um ihre Gitterplätze mehr und mehr heftig zu schwingen. Auch wenn beim ferromagnetischen Stoff die *chemischen Bindungen* zu den Nachbaratomen noch halten und der Stoff noch fest bleibt, so lösen sich doch ab einer gewissen Temperatur, der *Curietemperatur*  $T_C$  (nach Md. Curie), die magnetischen Nachbarschaftsbeziehungen, welche für den Ferromagnetismus verantwortlich sind. Oberhalb der *Curietemperatur* wird der Ferromagnet deshalb paramagnetisch. Bei Abkühlung unter  $T_C$  wird der Stoff wieder ferromagnetisch.  $T_C$  ist stoffabhängig:  $T_{C,Fe} = 774^\circ C$ ;  $T_{C,Co} = 1131^\circ C$ ;  $T_{C,Ni} = 372^\circ C$ .

c) Diamagnetismus

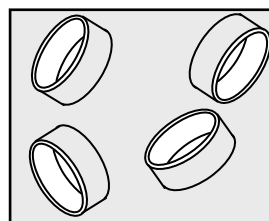
Bei diamagnetischen Stoffen ist das magnetische *Eigenmoment* gleich *null*. Auch wenn sich die Felder der Ringströme bzw. Spindrehungen aufheben, so sind die Drehungen dennoch vorhanden. Schaltet man nun ein äußeres Magnetfeld an, so bringt dieses die Elektronen dazu *neue* Drehbewegungen auszuführen. Diese Drehungen erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld. Aber: Nach der *Lenzschen Regel* ist dieses *induzierte* Magnetfeld dem äußeren Feld *entgegen gerichtet*. Dadurch wird das äußere Magnetfeld 1) *geschwächt* und 2) wird der Diamagnet bei der Annäherung *abgestoßen*. Besonders extrem ist das beim Supraleiter. Hier ist der induzierte Magnetismus vorzeichenumgekehrt *genau so groß* wie der äußere Magnetismus selbst, so dass der Supraleiter das ursprüngliche Feld *auslöscht* und durch die Abstoßung *schwebt*.



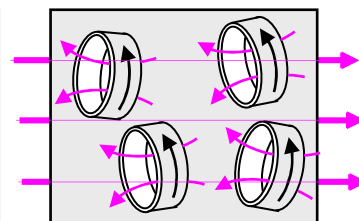
Der Aluminiumring steht für eine abgeschlossene Schale mit  $m = 0$ . Das äußere Magnetfeld wird durch eine stromdurchflossene Spule erzeugt.

Wird ein äußeres Magnetfeld angeschaltet, so wird der Alu-Ring weggestoßen: Die Magnetfeldänderung beim Einschalten induziert einen elektrischen Ringstrom (gestrichelte Linie), welcher ein magnetisches Gegenfeld erzeugt.

Demonstrationsexperiment: Wird ein äußeres Magnetfeld angeschaltet, so wird der Alu-Ring weggestoßen: Die Magnetfeldänderung beim Einschalten induziert einen elektrischen Ringstrom (gestrichelte Linie), welcher ein magnetisches Gegenfeld erzeugt.



Diamagnetische Atome ohne äußeres Feld



Diamagnetische Atome: Orientierung gegen das äußere Feld

d) Warum haben Spule und Stabmagnet so ähnliche Felder?

Betrachtet man die gleichgerichteten atomaren Ringströme, so sieht man, dass die Ströme im Körper stets paarweise gegenläufig sind. Nimmt man diese Paare zusammen, so hebt sich ihre Wirkung auf und es bleibt nur ein „großer“ äußerer Ringstrom übrig, der dem der Spule gleicht.

