

Schwimmende Magnete zur Demonstration von überlagerten Potentialen

Ewald Gerth und Horst Melcher

In dieser Arbeit wird überblicksmäßig eine Auswahl von Versuchen mit schwimmenden Magneten mitgeteilt.

Ausgehend von Betrachtungen der Kraftwirkungen und den Kraftgesetzen zwischen Magneten ist es dabei das Anliegen der Arbeit, solche Magnetkombinationen vorzustellen, mit denen Potentialüberlagerungen demonstriert werden können, die das Verständnis mannigfacher mikrophysikalischer Erscheinungen vorbereiten. Die Verwendung des Potentialbegriffs bewährt sich insbesondere bei der Behandlung atomarer, nuklearer aber auch astromechanischer Bindungskräfte. Der Vorzug des Potentials bei der Beschreibung von Kraftwirkungen zwischen verschiedenen Körpern beruht vor allem auf der Möglichkeit der Summation von skalaren Größen, während bei der Überlagerung von Kräften der vektorielle Charakter berücksichtigt werden muß.

Für die Magnetkombinationen eignen sich besonders gut keramische Magnetkörper, da deren magnetisches Moment durch den Sinterprozeß „eingefroren“ ist und durch äußere Magnetfelder nicht beeinflusst werden kann, so daß in der Umgebung dieser Körper sich die magnetischen Potentiale ungestört überlagern.

Gleichheit von Kräften – Wirkung und Gegenwirkung

In einem Wasserbehälter (Fotoschale, Aquarium, Plastwanne) befinden sich auf zwei schwimmfähigen Unterlagen (Hölzer, Korken, Dosen) beliebige Magnetkörper in stabiler Schwimmlage. Je nach der gegenseitigen Lage der Magnetpole üben die Magnete eine anziehende oder abstoßende Kraft aufeinander aus, so daß sich die Schwimmkörper einander nähern oder voneinander entfernen.

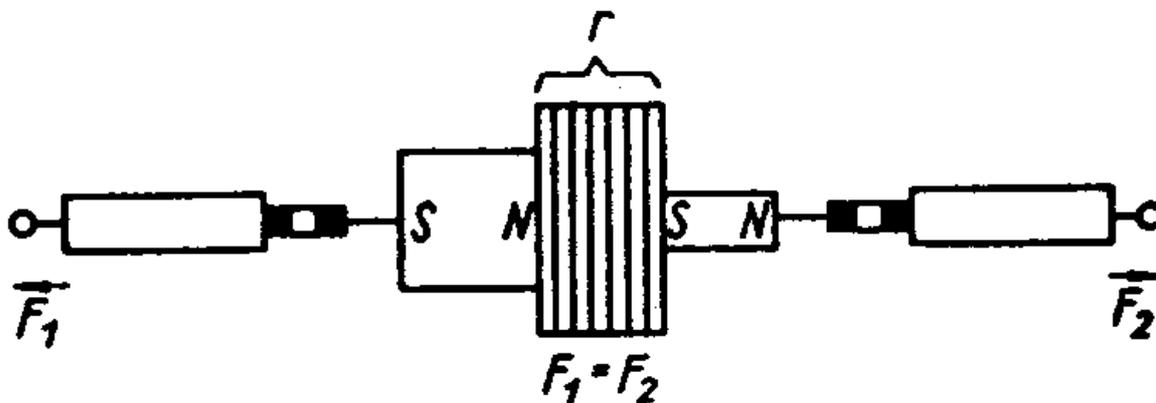


Bild 1 Die Kraft zur Ablösung des kleinen Magneten auf der rechten Seite des Plattensatzes ist gleich der Kraft, die man benötigt, um den größeren Magneten nach links zu bewegen. Die Magnete befinden sich auf Schwimmkörpern in einer Plastwanne.

Das gleichzeitige Vorhandensein von Wirkung und Gegenwirkung demonstriert man am augenfälligsten in der Weise, daß man abwechselnd den einen oder den anderen Magnet-Schwimmkörper in eine unbewegliche Lage bringt, ihn also fixiert. In methodischer Hinsicht ist es zu empfehlen, daß die Demonstrationen mit unterschiedlich großen Magneten durchgeführt werden. Es wird oftmals nicht hinreichend beachtet, daß das dritte Newtonsche Axiom (*actio* gleich *reactio*) natürlich auch für ungleichgroße Wechselwirkungspartner gilt. Deshalb ist es angebracht, beide ungleichgroßen Magnete, die durch einen Plattensatz (Distanzstücke aus Glas, Kunststoff o. ä.) getrennt sind, mit Hilfe von Federkraftmessern nach den entgegengesetzten Seiten wegzuziehen (Bild 1). Die Federkraftmesser zeigen gleiche Kräfte an: *actio* = *reactio*.

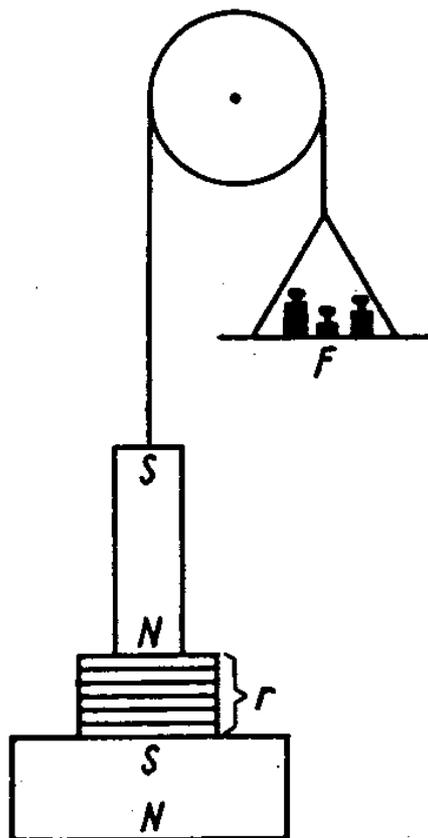


Bild 2 Meßanordnung zur Bestimmung des Kraft-Entfernungsgesetzes bei Magnetkörpern. Man mißt die Gewichtskraft, die erforderlich ist, die Magnetkraft in der Entfernung r , die durch Distanzstücke vorgegeben wird, zu kompensieren.

Für genauere Messungen eignet sich die Anordnung gemäß Bild 2.

Beschränkte Gültigkeit des quadratischen Kraft-Abstands-Gesetzes

Das Kraft-Abstands-Gesetz für ein statisches Magnetfeld (Gilbert, Priestley) hat unter idealisierten Bedingungen dieselbe Form wie das Coulombsche Kraftgesetz für zwei elektrische Ladungen, bei dem die Kraft mit dem Quadrat des Abstandes zwischen den Ladungen abnimmt. Es gibt jedoch keine isolierten magnetischen Pole (Monopole), sondern nur magnetische Dipole, die durch die Polstärken p und das magnetische Dipolmoment $M = p \cdot l$ gekennzeichnet werden; hierin bedeutet l den Polabstand.

Die magnetische Feldstärke H in einem beliebigen Punkt des Raumes in der Umgebung des Stabmagneten nimmt in dem Dipolfeld mit der dritten Potenz des Abstandes r ab:

$$H = \frac{M}{4\pi\mu\mu_0 r^3} \sqrt{3 \cos^2 \varphi + 1}$$

φ ist der Winkel zwischen der magnetischen Achse und der von der Stabmitte nach dem Aufpunkt (Meßpunkt) gezogenen Geraden. Die Länge l des Magneten ist hierbei klein gegenüber dem Abstand r .

Für $\varphi = 0$ (1. Gaußsche Hauptlage) hat die Wurzel den höchsten Wert, nämlich 2.

Für $\varphi = \pi/2$ (2. Gaußsche Hauptlage) hat die Wurzel den Wert 1, d. h., in diesem Fall ist die Feldstärke des Dipolfeldes nur halb so groß wie im ersten Fall.

Das quadratische Abstandsgesetz ist also nach dieser Beziehung im speziellen Fall des Dipolfeldes nicht erfüllt. Daß dieses Gesetz im allgemeinen nicht erfüllt ist, kann überzeugend mit den unterschiedlichsten Formen keramischer Magnete demonstriert werden. So wird anschaulich betont, daß jedes Gesetz nur einen bestimmten Gültigkeitsbereich hat bzw. nur unter bestimmten Voraussetzungen erfüllt ist.

Für die magnetischen Schwimmkörper kann das Kraft-Abstands-Gesetz beispielsweise wie folgt ermittelt werden:

Der eine von den beiden aufeinander wirkenden Magnetkörpern wird unbeweglich befestigt. Im Falle der Messung der Anziehungskraft bringt man zwischen beiden Magnetkörpern Distanzstücke an, z. B. unter Verwendung eines Plattensatzes (Glas, Kunststoff, Nichteisenmetalle), womit definierte Abstände r vorgegeben werden. Mit Hilfe eines Federkraftmessers zieht man an dem schwimmenden Magnetkörper und bestimmt die Kraft, bei der er sich von dem Plattensatz löst.

Die Messung der Abstoßungskraft ist im allgemeinen schwieriger, da man wegen der Einstellung eines labilen Gleichgewichtes eine auf den Schwerpunkt der Magnetkörper gerichtete Zwangsführung benötigt, so daß sich die freie Beweglichkeit von Schwimmkörpern auf der Flüssigkeitsoberfläche hierzu wenig eignet. (Ein in diesem Falle günstigeres Verfahren ist in der Literatur [1] angegeben.) Die graphische Darstellung der Abhängigkeit der Kraft F vom Abstand r als Potenzgesetz

$$F = \text{const} \cdot r^n$$

in doppelt-logarithmischen Koordinaten ermöglicht das unmittelbare Ablesen des Wertes des Exponenten n als Anstieg der Geraden. Im Falle der vollen Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes erhält man bei Eintragung der Wertepaare von r und F in doppelt-logarithmische Koordinaten eine Gerade mit dem Anstieg $n = -2$ (Bild 3).

Man kann aber je nach der Form der Magnete und der geometrischen Lage der Pole unterschiedliche n -Werte (zwischen 0 und -5) beobachten, die im allgemeinen nur innerhalb bestimmter Entfernungintervalle als konstant betrachtet werden können. Es ergeben sich also nur innerhalb begrenzter Bereiche des Abstandes r Geraden konstanter n -Werte. Die erhaltenen Meßkurven sind konkav gegen die Abszisse gekrümmt. Das bedeutet, daß unter Zugrundelegung eines Potenzgesetzes für die Abhängigkeit der Kraft vom Abstand sowohl die „Konstante“ $C(r)$ als auch der Exponent $n(r)$ Funktionen des Abstandes sind.

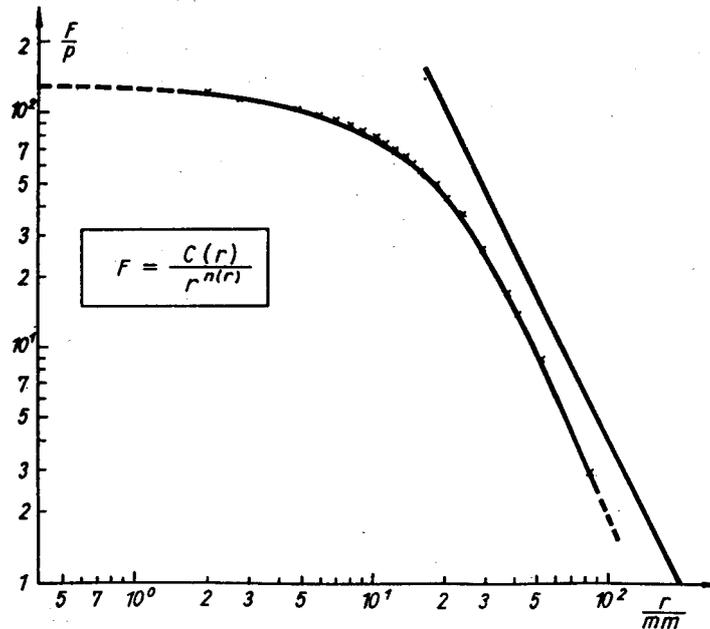


Bild 3 Anziehungskraft F zweier Magnetanordnungen als Funktion des Abstandes r .
 Man erkennt, daß das quadratische Abstandsgesetz nicht gültig ist.
 Zum Vergleich ist die Gerade $n = -2$ für dieses Gesetz eingezeichnet.

Die Wirkung der abstoßenden Kräfte zwischen zwei schwimmenden Magneten läßt sich qualitativ zeigen, wobei man überrascht ist über die relativ große Reichweite dieser Kräfte: F geht gegen Null, wenn r gegen Unendlich strebt; die beiden Magnete drängen sich gegenseitig stets bis an die gegenüberliegenden äußersten Gefäßränder.

Selbstverständlich muß man darauf achten, daß in der Umgebung des Gefäßes keine störenden Magnetfelder oder Eisenteile vorhanden sind.

Schließlich bemerkt man auch die Beteiligung des magnetischen Erdfeldes, d. h. seiner Horizontalkomponente, indem sich die auseinanderstrebenden Magnete in die Nord-Süd-Richtung einstellen.

Eine indirekte Messung der zwischen zwei schwimmenden Magneten wirkenden Kraft ist auch möglich durch Messung ihrer Geschwindigkeit, indem man in einer Folge von Zeitintervallen ihren gegenseitigen Abstand bestimmt. Bei geringer Geschwindigkeit wird der Schwimmkörper laminar umströmt, so daß sich in gleicher Weise wie beim Stokeschen Gesetz einer in einer Flüssigkeit sinkenden Kugel Proportionalität zwischen der wirkenden Kraft und der Geschwindigkeit ergibt. Eine solche relative Kraftmessung empfiehlt sich besonders für den Bereich größerer Abstände, in denen die Empfindlichkeit direkter Kraftmessungen nicht mehr ausreicht. Durch Überlappung der Meßbereiche ist auch ein Anschluß an eine absolute Kraftmessung möglich. Das Verfahren ist gleichermaßen für Anziehungs- und Abstoßungskräfte geeignet.

Bei dieser Art einer Kraftmessung ist natürlich zu beobachten, daß die von den Magnetkörpern ausgehende Kraft mit der Reibungskraft im Gleichgewicht stehen muß. Die Kraftmessung wird falsch, sobald Beschleunigungen in Verbindung mit der Massenträgheit der Magnetkörper auftreten. Dies begrenzt diese Kraftmessung auf den Bereich der größeren Abstände, bei denen jede Energiezufuhr durch Beschleunigung sogleich durch die Reibung umgesetzt wird. Des weiteren muß man sehr streng darauf achten, daß das Wasser ruhig ist, alle beim Experimentieren entstehenden Strömungen und Wirbel also

abgeklungen sind. Zur Feststellung der Wasserberuhigung eignen sich nichtmagnetische Schwimmkörper.

Die Gestalt des Kraft-Abstands-Gesetzes und die Größe des Exponenten n in dem entsprechenden Potenzgesetz kann man für einige der Magnetkombinationen mathematisch herleiten. Hierzu werden in einem weiteren Beitrag einige Beispiele angegeben.

Ringstrukturen schwimmender Magnete im äußeren Magnetfeld

Die für diesen Versuch benötigten schwimmenden Magnete können auf einfache Weise hergestellt werden, indem man magnetisierte Stecknadeln oder Stahlstifte in Kork- oder Styroporscheiben spießt. Unterhalb der Mitte eines Troges (Wasserbassin) wird ein Magnet (z. B. ein keramischer Ringmagnet) angeordnet. Setzt man die Nadeln bzw. Stifte nacheinander am Rand des Gefäßes auf die Wasseroberfläche, so bewegen sie sich unter dem Einfluß der auf sie wirkenden Kraft zur Mitte hin. Dabei stellt sich eine ringförmige Anordnung ein, z. B. mit 8 schwimmenden Korkscheiben. Vergrößert man die Anzahl der Schwimmkörper, so baut sich in größerem Abstand von der Mitte ein zweiter Ring auf (Bild 4).

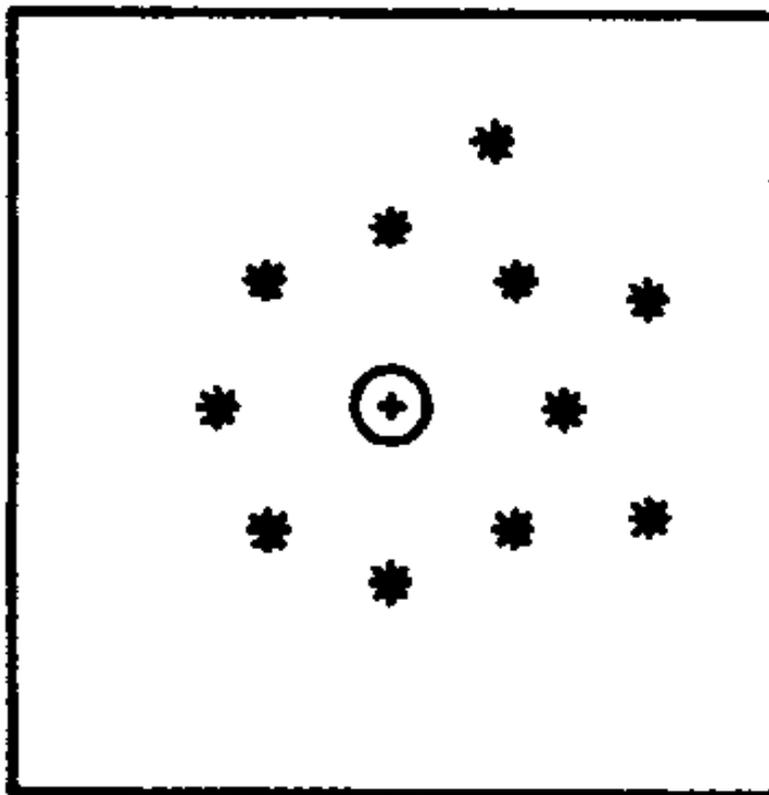


Bild 4 Skizze des Projektionsbildes einer ringförmigen Anordnung von magnetischen Schwimmkörpern. Das äußere Feld wird durch einen Ringmagneten unterhalb des Wassertroges erzeugt.

Bei einer bestimmten Anzahl der schwimmenden Objekte tritt keine Eingruppierung innerhalb des gleichen Kreises mehr auf. Man erkennt, daß eine definierte Sättigung (maximale Besetzungszahl) erreicht ist. Der sich ausbildende neue Kreis wird auch wieder nur eine maximale Anzahl dieser magnetischen Schwimmkörper aufnehmen.

Außer der interessanten Erscheinung der Existenz einer maximalen Besetzungszahl sind noch folgende Sachverhalte bemerkenswert:

- Es erfolgt eine Verkleinerung des Ringradius bei zunehmender Teilchenanzahl (Analogie zum Abnehmen des Atomvolumens und des Atomradius mit wachsender Kernladungszahl, wenn die Hauptquantenzahl konstant bleibt).
- Nimmt man aus dem inneren Ring einen Schwimmkörper heraus, so wandert aus dem äußeren Ring ein Teilchen auf den im inneren Ring freigewordenen Platz (Analogie zur Energiezustandsänderung in einer Elektronenschale des Atoms).

Die maximale Besetzungszahl einer ringförmigen Anordnung hängt vom äußeren Magnetfeld ab, kann also durch den Abstand des Magneten unterhalb oder oberhalb des Troges von der Wasseroberfläche beeinflusst werden. Bei dieser Versuchsanordnung – im Unterschied zu jener, die Schwimmkörper mit Magnetkombinationen verwendet – nimmt stets ein Teilchen den Platz in dem Zentrum des gesamten Teilchenensembles ein. Man kann dieses Zentralteilchen (Analogie: Kern) durch eine größere Korkscheibe, die auch einen stärkeren Magnetstift trägt, besonders kennzeichnen.

Bei solchen Analogie-Demonstrationen muß stets deutlich genug vor voreiligen Schlüssen und den Anschauungsgrenzen gewarnt werden; es ist unbedingt auf die grundsätzlichen Unterschiede zwischen der Makro- und der Mikrophysik hinzuweisen. Man kann darin sogar einen besonderen Wert solcher Analogie-Demonstrationen sehen.

Zur Demonstration dieser ringförmigen Strukturen und ihrer Änderungen vor einem größeren Auditorium verfährt man beispielsweise wie folgt: Als Wasserbehälter verwendet man einen Bilderrahmen mit einer optisch einwandfreien Glasscheibe, die darin wasserdicht eingekittet ist. Man kann nun eine Projektionsleuchte unterhalb dieses Behälters aufstellen und die Bilder gegen die Decke projizieren, oder man stellt den Behälter mit der (schlierenfreien!) Glasscheibe auf den Polylux-Projektor. Bei diesen Projektionen erweist es sich als zweckmäßig, die Korkscheibchen mit den magnetisierten Stahlstiften vorher insgesamt zu benetzen. Es ergeben sich dann in der Projektion nicht dunkle, ungestalte Flecke, sondern helle, sternförmige Bilder.

Das Zustandekommen der Konfigurationen beruht auf der Überlagerung der Potentiale und der Kopplung durch Felder [2].

Demonstrationen von Bindungskräften durch Potentialüberlagerungen

Bei den folgenden Versuchen geht es um die anschauliche Demonstration von Potentialmulden und -wällen, um deren Zustandekommen durch Überlagerung von Potentialen und ihre Wirksamkeit bei der Bindung zwischen verschiedenartigen (heteropolare Bindung) und auch gleichartigen (homöopolare Bindung) Teilchen. Solche Versuche zur Demonstration von Potentialverläufen haben gegenüber jenen, die Potentialreliefs („Gebirge“ auf bzw. aus Kunststoffplatten oder aus Gummi mit Eindellungen) verwenden, den Vorteil, daß man unmittelbar die Wirkung des Potentialminimums, z. B. bei zwei Teilchen, beobachten kann, die sich auf einen konstanten gegenseitigen Abstand einpendeln. Die Überlagerung von Potentialen ist bei einem Potentialgebirge mit darin bewegten Kugeln

nicht unmittelbar zu erkennen. Dieser methodisch-didaktische Vorteil, Potentialverläufe, die durch Überlagerung hervorgerufen werden, unmittelbar anschaulich zu machen, kann ein rascheres physikalisches Verständnis des abstrakten Potentialbegriffs bewirken.

Für die Demonstrationsversuche verwendet man am einfachsten in jedem Schwimmkörper einen zylindrischen keramischen Stabmagneten, den man durch einen keramischen Hohlzylinder-Magneten steckt. Dabei können nun je nach Verwendungszweck jeweils die gleichnamigen oder die ungleichnamigen Pole des Stab- und des Hohlzylinder-Magneten auf einer Seite liegen. Diese Magnetanordnungen werden an einem Schwimmkörper (Kork, Styropor, Tischtennisball u. ä.) befestigt. Die Magnetkombination kann auch in einer Kunststoffhülse angebracht werden, die gleichzeitig als Schwimmkörper dient.

Entscheidend für das Gelingen der Experimente ist, daß die flachen Scheibenmagnete dieselbe Eintauchtiefe haben, was man durch Austarieren erreichen kann. Bei der Verwendung von Filmdosen als Schwimmkörper kann man zum Austarieren Wasser oder ein anderes Material einfüllen. Als Schwimmkörper haben sich Dosen für Kleinbildfilme bewährt, in die kreisscheibenförmige Keramikmagnete passen und in deren zentrale Öffnung der zylindrische Stabmagnet gut eingepaßt werden kann (Bild5a).

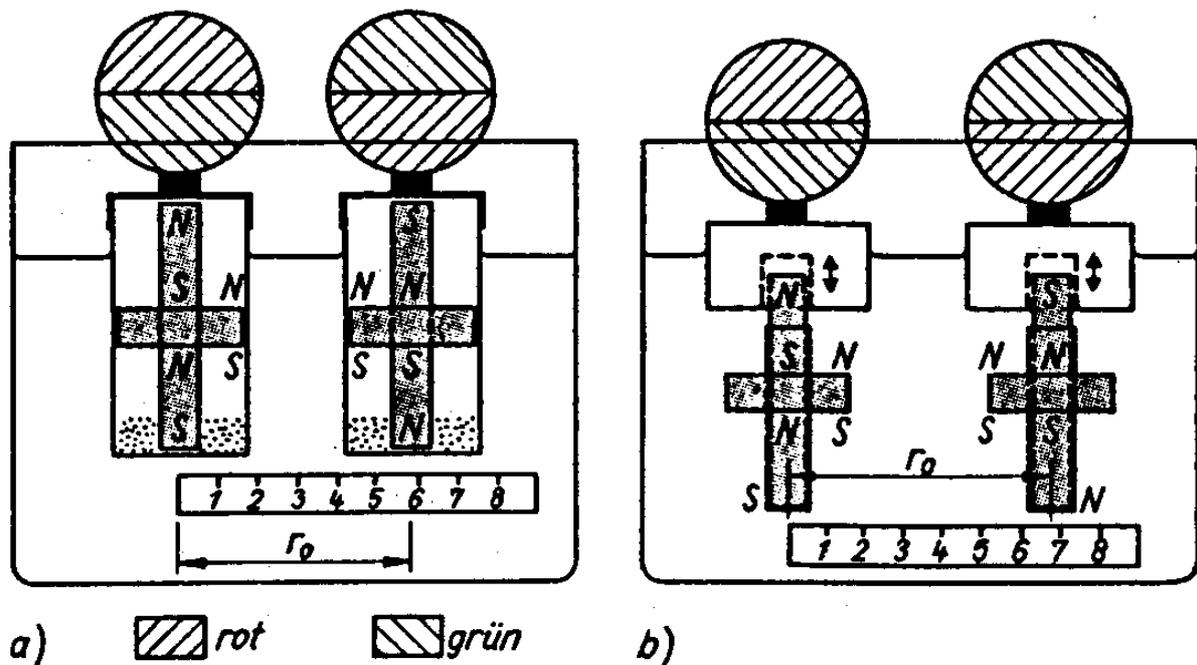


Bild 5a) Zwei magnetische Schwimmkörper in einem Aquarium, die sich in einem konstanten Abstand r_0 einpendeln (Potentialmulde).

Bild 5b) Zweckmäßige Variante einer schwimmenden Magnetkombination zur Demonstration einer Potentialmulde. Nach Umstecken einer Magnetanordnung, so daß jeweils zwei gleichnamige Pole gegenüberliegen, kann man einen Potentialwall demonstrieren.

Im Bild 5a ist weiterhin dargestellt, wie man durch farbige Gestaltung in Art von Schwimmbojen (z. B. Tischtennisbälle) die Versuchskörper einem größeren Zuschauerkreis wirkungsvoll demonstrieren kann. Das Einpendeln des stabilen gegenseitigen Abstände» r_0 kann man mit Hilfe eines transparenten Maßstabes sichtbar machen.

Im Bild 5b ist eine weitere Variante der Schwimmkörper mit Magnetkombinationen dargestellt. Die zylindrischen Magnete sind in die Bohrungen von Korken straff eingepreßt. Die zweckmäßige Eintauchtiefe zur Einstellung der geeigneten relativen Höhenlage der flachen Ringmagnete kann man durch Verschieben in den Korkbohrungen erreichen.

Wegen des tief liegenden Schwerpunktes erweisen sich diese Schwimmkörper, die ebenfalls durch aufgesetzte farbige Bojen attraktiv gestaltet werden können, als sehr zweckmäßig. Man kann leicht die Stabmagnete durch Anfügen weiterer Magnete verlängern. Dadurch erreicht man, daß die Anziehungskräfte dieser zylindrischen Stäbe eine große Reichweite haben, während die abstoßende Wirkung der in der Mitte der langen Stabmagnete befindlichen Ringmagnete von relativ kurzer Reichweite ist. Die zylindrischen Magnete werden mit einem Kunststoffschlauch überzogen. Das vergrößert die Stabilität der Anordnung und schützt die Sintermagnete bei Stößen.

Modelle für den heteropolaren Bindungstyp

Beispiele für diese Bindungsart sind die Ionenbindung (NaCl), Proton-Elektron-Bindung (Wasserstoffatom), aber in der Makrophysik auch die Bindung zwischen kosmischen Körpern (Zentralgestirn – Planet, Doppelstern). Man verwendet zwei äußerlich gleiche Schwimmkörper, die je einen stabförmigen und einen hohlzylindrischen Magneten enthalten (Bild 5a, b). Hierbei soll durch die Stabmagnete die Anziehungskraft und durch die Hohlzylindermagnete die Abstoßungskraft ausgeübt werden. Der Potentialverlauf der Abstoßungskraft sowie jener der Anziehungskraft sind in Bild 6 dargestellt.

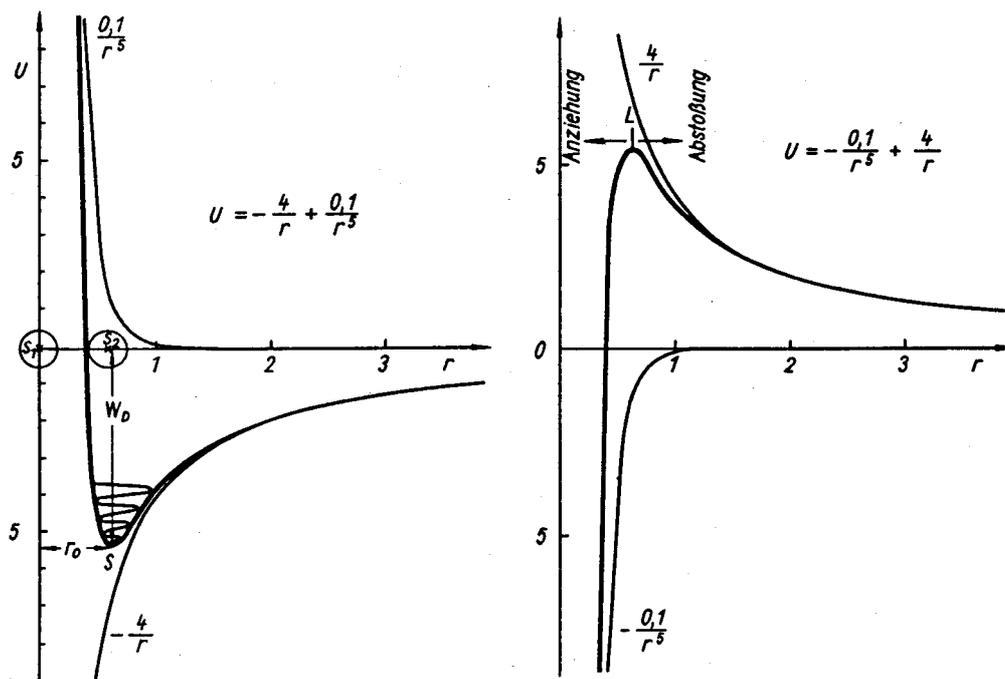


Bild 6 Zustandekommen einer Potentialmulde durch Überlagerung eines anziehenden Potentials $-4/r$ und eines abstoßenden Potentials $0,1/r^5$

S stabiles Gleichgewicht in der Potentialmulde, gedämpfter Einschwingvorgang bis zur Ruhelage r_0 , W_D Dissoziationsenergie, Bindungsenergie

Bild 7 Zustandekommen eines Potentialwalls, analog zu Bild 6

L labiles Gleichgewicht auf dem Potentialwall

Bei der Superposition der Potentiale beider Kräfte ergibt sich eine Kurve mit einem Potentialminimum, das nur zustande kommt, wenn sich die einzelnen Potentiale nicht nur durch das Vorzeichen, sondern vor allem auch durch die unterschiedlichen Exponenten n der beiden Kraftgesetze voneinander unterscheiden. Ein solches Minimum würde sich im

Fälle gleichen Kraftgesetzes – etwa des als üblich angesehenen quadratischen Kraft-Abstands-Gesetzes mit $n = -2$ – nicht ergeben.

Man beobachtet, daß sich die Schwimmkörper auf einen bestimmten gegenseitigen Abstand r_0 einstellen. Nähert man nun einen Schwimmkörper dem anderen, so weicht dieser vor ihm zurück. Zieht man andererseits den einen Körper vom anderen zurück, so folgt dieser dem davontretenden. Hält man den einen Körper fest und versucht, den anderen aus der Abstandslage herauszubringen, indem man ihn zum fixierten Körper hin- oder von ihm fortstößt, so kehrt der bewegte Körper stets in seine Ausgangslage zurück. Damit ist die Existenz einer Potentialmulde, die in Bild 6 graphisch dargestellt ist, experimentell evident demonstriert. Infolge des Vorhandenseins einer solchen Potentialmulde wird ein Körper, wenn man ihn aus dieser Position herausbringt, immer wieder in das Potentialminimum zurückkehren. Der gegenseitige Abstand r_0 erweist sich als stabil.

Nimmt man bei einem der beiden Schwimmkörper eine Vertauschung der Magnetkombinationen vor, so erreicht man, daß sich anstatt der Potentialmulde ein Potentialwall ausbildet. Das erreicht man am bequemsten, wenn man bei einem Schwimmkörper (Bild 5b) die Magnetkombinationen aus dem Korken löst und sie dann so einfügt, daß sich die zylindrischen Stabmagneten mit den gleichnamigen Polen gegenüberstehen. Der Potentialwall für diesen Fall ist im Bild 7 dargestellt. Daß auf dem Gipfel des Walles ein labiles Gleichgewicht herrscht, zeigt man in der Weise, daß man den einen Schwimmkörper dem anderen (feststehenden) langsam nähert und damit gewissermaßen immer wieder einen neuen Standpunkt wählt. Vor Erreichen des Maximums aus größerer Entfernung her stellt man leicht die Abstoßungskraft fest. Bei Überschreiten des Gipfelpunktes zu kleineren Abständen hin wird der Körper in den Potentialtopf hineinfallen, also angezogen werden.

Die Existenz eines solchen Potentialwalles spielt beim Beschuß der Atomkerne mit positiv geladenen Teilchen (p , d , α) eine große Rolle. Bis zu einem bestimmten Abstand vom Kern machen sich stets abstoßende (Coulomb-) Kräfte bemerkbar. Bei sehr geringen Kernabständen dominiert dann die spezifische Kernkraft; die eine kurze Reichweite hat; diese Kraft nimmt mit einem Exponenten $n \ll -2$ im Kraft-Entfernungs-Gesetz ab. Es ist leicht einzusehen, daß der Potentialwall von der jeweiligen Wechselwirkung mit den betreffenden Teilchen abhängt.

Mit schwimmenden Magnetkörpern läßt sich auch eine Elementarzelle eines Modell-Ionenkristallgitters demonstrieren und plausibel machen. Zur Darstellung eines solchen (zweidimensionalen) Ionenkristallgitters benötigt man vier Schwimmkörper mit den in Bild 5b angegebenen Magnetkombinationen. Das gleiche Modell kann auch zur Demonstration der nuklearen Bindungskräfte zwischen den Protonen und Neutronen eines Alpha-Teilchens dienen.

Eine heteropolare Bindung besteht auch in einem Atom zwischen dem Kern und der Elektronenhülle. Ein Modell-Atom läßt sich mit schwimmenden Magneten in ähnlicher Weise wie bei einem Modell-Ion realisieren. Dabei kann man aber bei dem einen Schwimmkörper auf den abstoßenden Hohlzylinder-Magneten (Bild 8) verzichten, da – bei gegenseitiger Anziehung der Stabmagnete – zwischen dem einen Stabmagneten und dem Hohlzylinder-Magneten des anderen Schwimmkörpers sich ebenfalls eine Abstosungskraft mit einem Exponenten $n \ll -2$ einstellt, während die Stabmagneten allein bei relativ geringem Abstand ein Kraftgesetz mit $n \approx -2$ befolgen. Der Modell-Kern besteht

danach aus einem Stabmagneten und einem Hohlzylinder-Magneten bei entgegengesetzter Polung und das Modell-Elektron nur aus einem Stabmagneten, der gegenüber dem anderen Stabmagneten entgegengesetzt gepolt ist (Bild 8a). Hierbei wird die Coulomb-Kraft durch die Anziehungskraft und die Zentrifugalkraft durch die Abstoßungskraft analogisiert. Es sei aber noch bemerkt, daß das Modell-Elektron nicht notwendigerweise aus einem Stabmagneten zu bestehen braucht; man kann den Stabmagneten des Modell-Elektrons auch durch einen Hohlzylinder-Magneten ersetzen (Bild 8b) und erhält hiermit eine gut funktionierende Kombination der Magnet-Schwimmkörper.

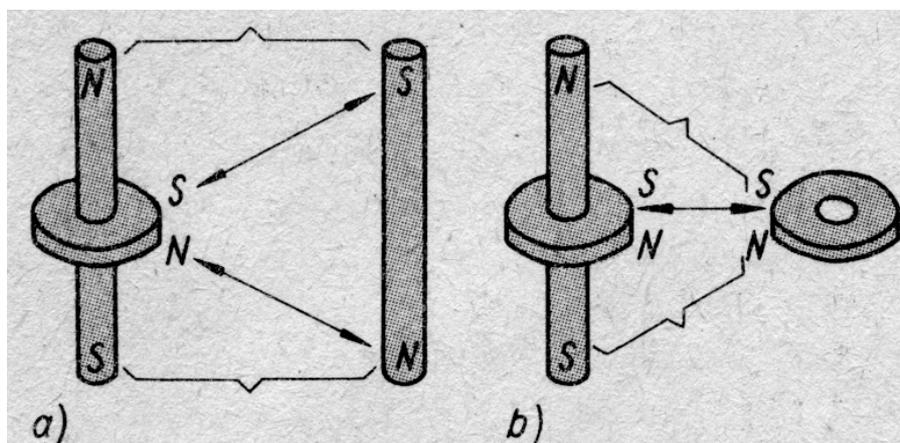


Bild 8 Magnetanordnungen, die ebenfalls die Existenz einer Potentialmulde demonstrieren. Die Anordnung a) liefert eine flachere Mulde als die Anordnung b).

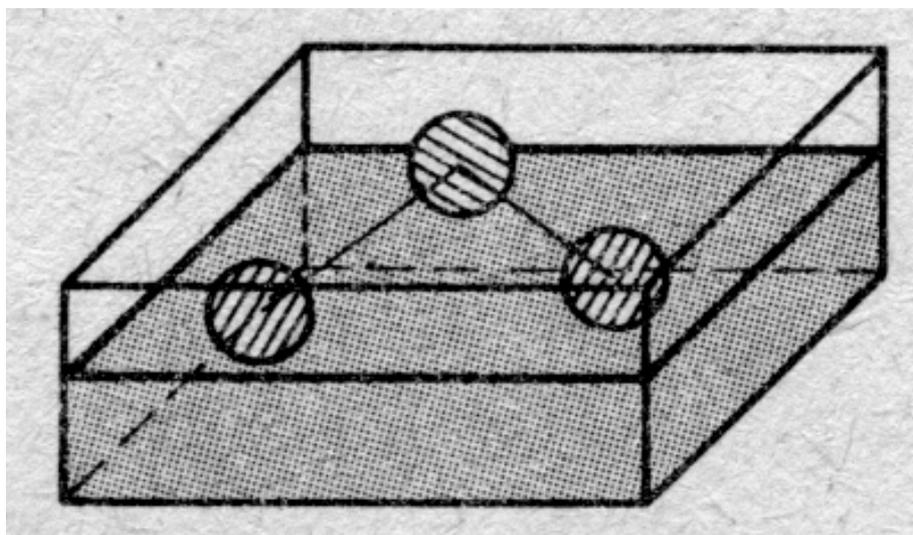


Bild 9 Aquarium mit drei magnetischen Schwimmkörpern, die sich im allgemeinen in einem bestimmten Winkel (verschieden von 180°) in einer Potentialmulde einstellen.

Das Modell-Atom kann auch zur Demonstration der astromechanischer Bindung von Zentralgestirn und Planet dienen.

Mit mehreren solchen Schwimmkörpern (auch wie im Bild 5 dargestellt) lassen sich weitere Erscheinungen aus dem Bereich der Atome und Moleküle veranschaulichen.

Bringt man z. B. drei der in Bild 5b dargestellten Schwimmkörper auf die Wasseroberfläche, so resultiert eine Einstellung gemäß Bild 9. Es ergibt sich im allgemeinen ein Winkel (etwas größer als $\pi/2$) bei diesen drei Wechselwirkungspartnern, so daß man geneigt ist, z. B. an die Bindung im H_2O -Molekül zu denken.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Bindungsformen in Atomen und Molekülen stößt man auch auf die etwas problematische homöopolare Bindung, die zwischen zwei gleichartigen Teilchen besteht, z. B. bei der Verbindung zweier Wasserstoffatome zu einem H_2 -Molekül. Eine Demonstration der wirkenden Austauschkräfte wird im Analogmodell kaum möglich sein. Es gibt zwar einen Vorschlag von W. Kossel [3], die Austauschkräfte mit Hilfe von Kraftwirkungen zwischen gekoppelten Pendeln verständlich zu machen, aber man muß doch stets feststellen und betonen, daß sich generell quantenphysikalische Phänomene nicht makrophysikalisch darstellen lassen.

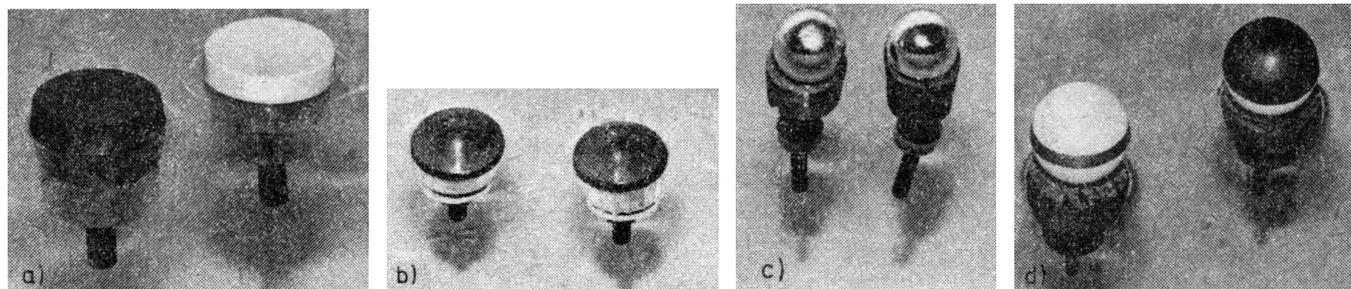


Bild 10 Schwimmende Magnetkörper mit Potentialminimum

- a) Film Dosen mit Magnetkombinationen und farbigen Verschlusskappen
- b) Plaste-Salzstreuer (mit farbigen Kappen) für Magnetkombinationen
- c) Korke mit Magnetkombinationen und versilberten Hohlkugeln
- d) Korke mit Magnetkombinationen und farbig markierten Tischtennisbällen

Ein Grundelement der homöopolaren Bindung läßt sich jedoch auch mit schwimmenden Magneten zeigen: Zwischen gleichartigen Teilsystemen können Anziehungskräfte wirken, und es besteht die Tendenz der Vereinigung dieser Systeme zu größeren Komplexen.

Läßt man zwei Modell-Wasserstoffatome, die nach der Beschreibung im vorigen Abschnitt jeweils aus einem Modell-Kern und einem Modell-Elektron bestehen, in einem gewissen Abstand auf der Wasseroberfläche schwimmen, so beobachtet man, daß sich die paarigen Kombinationen der Schwimmkörper zunächst aufeinander ausrichten (Polarisation!), dann aufeinander zustreben und in rhombischer Form aneinander lagern. Die gleichartigen Teilsysteme verhalten sich also nicht neutral zueinander oder werden sogar voneinander abgestoßen. Es gibt eine günstigste Konstellation, bei der die Anziehungskraft sich dadurch vergrößert, daß jeweils ein Pol der Stabmagneten zwei ungleichnamigen Stabmagnetpolen gegenübergestellt ist und eine größere Fernwirkung hat als die von Hohlzylindern ausgehende, rasch abklingende Abstoßungskraft.

Man hat es hierbei mit Kraftgesetzen zwischen zwei dynamisch veränderlichen Teilsystemen zu tun, wobei das Bild der Überlagerung von Potentialen verwickelter wird als zwischen zwei in sich starren Magnetkombinationen. Die hierbei auftretenden Potentialmulden sind einer Ebene – der Wasseroberfläche – zweidimensional zugeordnet.

Die Zweidimensionalität der Wasseroberfläche stellt somit auch eine grundsätzliche Begrenzung der hier vorgestellten Analogieexperimente dar. Im Erkenntnisprozeß muß in jedem Falle auch der Schritt zurück zur Realität getan werden.

Eine Auswahl der verwendeten Schwimmkörper mit aufgesetzten Bojen sind photographisch in den Bildern 10a bis d wiedergegeben. Selbstverständlich kann bei Potentialüberlagerungen mit Hilfe von Magnetkörpern auch ein Luftkissentisch eingesetzt werden.

Dr. sc. Ewald Gerth
Prof. Dr. habil. Horst Melcher

Literatur

- [1] Melcher, H., E. Gerth, H.-J. Wilke: Das magnetische Kraftgesetz unter Berücksichtigung der Geometrie der Pole. *Praxis der Naturwissenschaften* **11** (1962) 6.
- [2] Gerth, E., H. Melcher: Pendelkopplung durch Felder. *Experimentelle Technik der Physik* **12** (1964) 2.
- [3] Kossel, W., zitiert nach W. Finkelburg: Einführung in die Atomphysik. 4. Auflage, S. 212. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer Verlag, 1956.