

Facharbeit

im Fach Physik

Magnetisches Schweben



Henrik Gebauer, Jahrgangsstufe 12, Schuljahr 2005/2006

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	S. 3
2. Physikalische Grundlagen	S. 4
2.1 Das Earnshaw-Theorem	S. 4
2.2 Magnetische Monopole und Quasi-Monopole	S. 4
2.3 Supraleitung	S. 6
3. Magnetische Schwebetechniken	S. 7
3.1 Schweben mit geregelten Elektromagneten	S. 7
3.2 Elektrodynamisches Schweben	S. 9
3.3 Rotationsstabilisiertes Schweben	S. 10
3.4 Diamagnetisches Schweben	S. 11
3.5 Schweben mit Stabilisierung	S. 12
4. Aussichten	S. 13
Literaturverzeichnis	S. 15
Ausdrucke der Internetquellen	S. 17
Erklärung	S. 22

1. Einleitung

Das Thema dieser Facharbeit ist das magnetische Schweben (magnetische Levitation). Unter diesem Begriff wird das Themenfeld von Theorien und Techniken bezeichnet, die sich mit dem Schweben von Körpern durch abstoßende oder anziehende magnetische Kräfte beschäftigen.

Mein Interesse an diesem Thema wurde bereits vor einigen Jahren durch die „*Levitating Desktop Globes*“ des Internet-Shops *thinkgeek.com* geweckt. Dabei handelt es sich um einen Globus, der durch einen Elektromagneten schwebend in der Luft gehalten wird. Wird die Kugel in Bewegung gesetzt, dreht sie sich auf Grund der geringen Reibung minutenlang. Fasziniert von diesem leider kostspieligen Spielzeug stellte ich mir im Dezember 2005 die Frage, ob nicht ein Nachbau unter Verwendung von Permanentmagneten möglich sei, um nicht auf Elektrizität angewiesen zu sein. Nach dem Experimentieren mit einigen schwachen Pinnwandmagneten und vor der Anschaffung teurer Neodymmagnete¹ recherchierte ich im Internet nach Erfahrungen zu dem Thema. Dabei stieß ich auf einige interessante Fakten, die ich hier nun darlegen möchte.

Obwohl Deutschland im Forschungsbereich der magnetischen Schwebetechnik noch in den 1980er Jahren führend war [4, Vorwort], findet sich erstaunlich wenig gedruckte Literatur, die sich direkt diesem Thema widmet. Im Literaturverzeichnis finden sich daher auch Bücher, die das magnetische Schweben nur am Rande behandeln, sowie einige Internetquellen.

Im Zuge der Darstellung der Arbeit, werde ich zunächst einige physikalische Grundlagen erörtern, die zum Verständnis von Nöten sind. Insbesondere wird das Theorem von Samuel Earnshaw vorgestellt, der bereits am Ende des 19. Jahrhunderts darlegte, dass in einem statischen Aufbau mit Permanentmagneten keine Levitation stattfinden kann. Ein statischer Nachbau des schwebenden Schreibtisch-Globus ist daher nicht möglich.

Im Hauptteil werden verschiedene Ansätze magnetischer Schwebetechnik dargestellt, die der Konsequenz aus Earnshaws Theorem durch veränderte Bedingungen im Aufbau aus dem Wege gehen.

Der letzte Teil dieser Arbeit gibt einen kleinen Ausblick in die Zukunft hinsichtlich der Anwendung magnetischer Schwebetechnik in der Praxis. Ein bekanntes Anwendungsbeispiel sind Magnetschwebebahnen wie der Transrapid. Durch Vermeidung

¹ Neodym-Eisen-Bor-Verbindungen (z.B. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), kurz Neodymmagnete, besitzen sehr starke ferromagnetische Eigenschaften.

mechanischen Kontakts des Fahrzeugs mit den Schienen können so Energie sparend hohe Geschwindigkeiten erreicht werden.

2. Physikalische Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen einige physikalische Grundlagen behandelt werden, die zum Verständnis der Facharbeit notwendig sind. Auf eine Wiederholung sämtlicher Tatsachen der Bereiche Elektrizität und Magnetismus, die bereits aus dem Unterricht bekannt sind, soll hier jedoch verzichtet werden.

2.1 Das Earnshaw-Theorem

Dass Levitation durch die geschickte Anordnung und Ausrichtung der Pole von Dauermagneten in einem statischen Aufbau nicht möglich ist, zeigte der englische Physiker und Geistliche Samuel Earnshaw bereits im Jahre 1839 ([13], andere Quellen nennen 1842) in seiner Veröffentlichung „*On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether*“.

Stabiles Schweben in einem statischen Aufbau würde bedeuten, dass sich der Körper in einem lokalen Energieminimum befände. Alle Kräfte auf den Körper würden sich gegenseitig aufheben, die Summe der wirkenden Kräfte würde also 0 ergeben [13].

Mit den Mitteln der Vektoranalysis kann bewiesen werden, dass dies nicht möglich ist, das lokale Energieminimum also nicht existiert.

Ein solcher Aufbau wäre deshalb instabil. Der schwebende Magnet würde sich umdrehen und dann angezogen werden oder er würde durch die abstoßende Magnetkraft aus dem Magnetfeld heraus gedrängt werden [4, S. 33].

Earnshaws Theorem gilt nicht nur für die Magnetkraft, sondern für alle Kräfte, die sich umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands zweier Körper verhalten, z.B. für die Gravitationskraft oder für die elektrische Kraft [13].

2.2 Magnetische Monopole und Quasi-Monopole

In fast allen Bereichen der theoretischen Physik ist die Symmetrie der Welt von besonderer Bedeutung [8, S. 730]. So haben beispielsweise alle Elementarteilchen ihr

Anteilchen. Von der Elektrizität ist diese Symmetrie ebenfalls bekannt: Es gibt positive und negative elektrische Ladungen, die einander anziehen. Gleich geladene Teilchen stoßen sich ab.

Vom Magnetismus ist diese Symmetrie bislang nicht bekannt [6, S. 261]. Ein Teilchen, das nur einen Nord- bzw. nur einen Südpol besitzt, scheint nicht zu existieren. Vielmehr scheinen Nordpol und Südpol immer gemeinsam aufzutreten (Abb. 2.1.1).

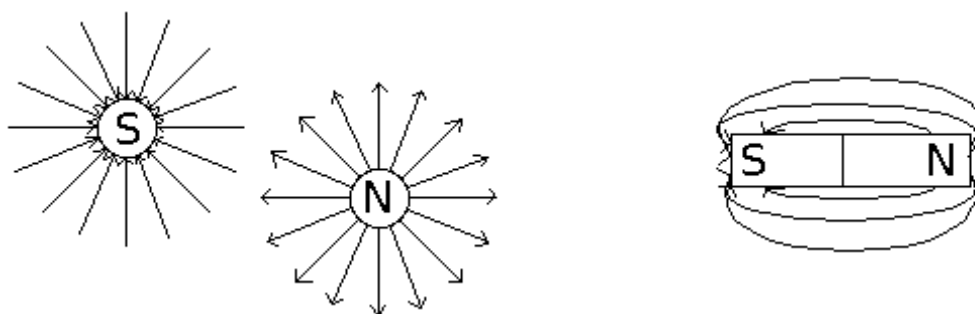


Abb. 2.1.1: magnetische Monopole (links) scheinen nicht zu existieren. Nord- und Südpol treten immer gemeinsam auf (rechts).

Denkbar ist jedoch, dass auch für den Magnetismus monopolare Teilchen existieren. Es gibt Experimente für die Suche nach magnetischen Ladungen. Beispielsweise würde ein monopolares Teilchen in einem statischen Magnetfeld ständig beschleunigt, genau wie ein Elektron im elektrischen Feld beschleunigt wird. Beim Auftreffen und Wechselwirken mit Materie könnte das Teilchen nachgewiesen werden.

Zwei gleichartig geladene magnetische Pole mit der Ladung Q und dem Abstand r würden sich analog zum Coulombschen Gesetz (Kraft zwischen zwei elektrischen Polen) mit der Kraft $F = \frac{Q^2}{r^2 \cdot 4 \pi \mu_0}$ abstoßen [6, S. 261]. Ein bewegter magnetischer Monopol wäre ein magnetischer Strom und von einem elektrischen Feld umgeben, so wie ein elektrischer Strom von einem magnetischen Feld umgeben ist.

Die Existenz magnetischer Monopole ist aus Symmetrieüberlegungen heraus möglich. Nachgewiesen werden konnten sie bislang jedoch nicht. Ihre Entdeckung hätte jedoch keine Auswirkung auf die Gültigkeit der bestehenden Formeln für dipolare Magnetfelder. Nicht möglich ist dagegen die Konstruktion eines magnetisches „Quasi-Monopols“, beispielsweise indem auf einer Kugeloberfläche mehrere Magneten angebracht werden, deren Südpole alle zum Mittelpunkt der Kugel zeigen (Abb. 2.1.3). Der Körper würde dann nicht, wie vielleicht erwartet, in allen Richtungen von einem Südpol angezogen

werden. Vielmehr würden sich die Magneten gegenseitig in ihrer Wirkung schwächen, da Magnetfeldlinien geschlossen sind. Nach außen hin wäre die Konstruktion neutral.

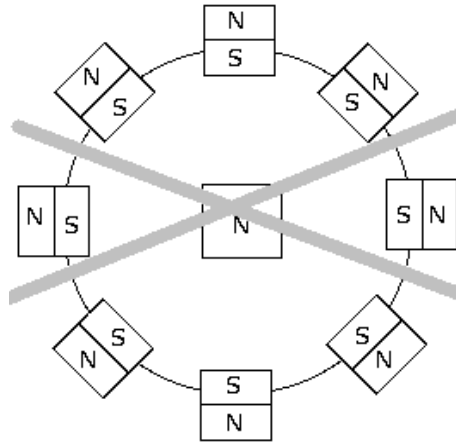


Abb. 2.1.3: Magnetische Quasi-Monopole zur konstruieren ist nicht möglich.

Doch selbst wenn monopolare Magnete gefunden werden würden, wären sie, dem Earnshaw-Theorem entsprechend, nicht für ein magnetisches Schweben geeignet. Selbst wenn das Magnetfeld in allen Richtungen eines magnetischen Monopols gleich stark ist, gäbe es kleine Instabilitäten, wenn es in ein entgegengesetztes Magnetfeld gebracht wird, das am Rand stärker als in der Mitte ist (Abb. 2.1.2). Freie Levitation wäre nicht möglich.

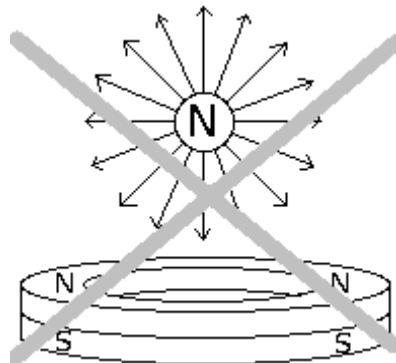


Abb. 2.1.2: Ein magnetischer Monopol würde nicht über einem Ringmagneten schweben.

2.3 Supraleitung

Wenn elektrischer Strom durch ein leitendes Material fließt, wird er durch den Ohmschen Widerstand gebremst. Sobald (eigentlich: kurz nachdem) keine Spannung mehr angelegt ist, fließt deshalb kein Strom mehr.

Einige Materialien besitzen die Eigenschaft, dass ihr Ohmscher Widerstand bei

Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunkts ($0\text{K} = -273,15^\circ\text{C}$) verschwindet [8, S. 823f.]. Beim Abkühlen unter den Sprungpunkt T_c fällt der Widerstand plötzlich abrupt auf Null [9, S. 144]. Ein einmal induzierter Strom fließt daher ungebremst weiter. Auf Grund dieser Eigenschaft werden sie von Magneten abgestoßen (siehe dazu Kapitel 3.2). Die Supraleitung wurde 1911 durch den niederländischen Wissenschaftler Kamerlingh Onnes entdeckt. Allerdings wird erst seit den 1960er Jahren in größerem Maße Forschung in diesem Bereich betrieben [9, S. 142].

Der Sprungpunkt liegt im Allgemeinen bei sehr niedrigen Temperaturen (z.B. Aluminium: $T_c = 4,183\text{K}$). Bei der Suche nach „heißen“ Supraleitern wurde mit Yttriumbariumkupferoxid ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, kurz YBCO) aber auch schon ein Material mit einem Sprungpunkt über 100K gefunden [8, S. 828]. Eine Entdeckung eines Materials, das bereits bei Zimmertemperatur supraleitend ist, ist bislang noch nicht in Aussicht.

Aufgrund der niedrigen Temperaturen, die erforderlich sind, und der deshalb notwendigen ständigen Kühlung, kann Supraleitung industriell noch nicht in großem Maße eingesetzt werden. In dem geplanten Kernfusionsreaktor ITER² werden jedoch YBCO-Drähte zur Stromversorgung der starken Elektromagnete verbaut. In Manhattan wird eine Stromleitung aus supraleitendem Material verlegt [15].

3. Magnetische Schwebetechniken

Im Folgenden sollen verschiedene Arten von magnetischen Schwebetechniken vorgestellt werden. Dabei handelt es sich jedoch nicht um Widersprüche zum Earnshaw-Theorem, da sich das Theorem lediglich mit frei schwebenden Permanentmagneten in einem statischen Aufbau beschäftigt. Die vorgestellten Techniken sind entweder nicht frei schwebend, nicht statisch, oder nicht (ausschließlich) mit Permanentmagneten aufgebaut.

3.1 Schweben mit geregelten Elektromagneten

Bei dieser Technik wird der Schwebekörper von einem Elektromagneten gehalten. Ein Computerchip beobachtet die Lage des Körpers, z.B. mit einem Hall-Sensor oder einer Kamera, und ändert die Polung des Magneten entsprechend.

² Im ITER (Internationaler Thermonuklearer Experimenteller Reaktor), der sich derzeit noch in der Planungsphase befindet, soll voraussichtlich ab 2015 die kontrollierte Fusion von Wasserstoff- zu Heliumatomkernen zur Energiegewinnung erforscht werden.

Diese Technik wird auch in den bereits in der Einleitung angesprochenen „*Levitating Desktop Globes*“ eingesetzt. Ein Chip steuert den Elektromagneten in der Halterung mit 16 000 Steuervorgängen pro Sekunde. Das Schweben der Kugel ist daher ruhig und stabil. Abb. 3.1.1 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise des Globus. An der Oberseite der Kugel ist ein Permanentmagnet (A) angebracht. Darüber befindet sich in der Halterung ein geregelter Elektromagnet (B), der den Magneten A anzieht bzw. abstößt. An der Unterseite der Kugel ist ebenfalls ein Permanentmagnet (C) angebracht. Mit einem Hall-Sensor (D) in der Bodenplatte der Halterung wird die Stärke des magnetischen Feldes gemessen. Da diese Stärke mit größerem Abstand zu C abnimmt, kann so an Hand einer Abweichung vom Sollwert festgestellt werden, ob der Globus zu hoch bzw. zu tief schwebt. Der Chip verarbeitet die Information des Sensors und polt den Elektromagneten B entsprechend: Wenn der Globus zu tief schwebt, das heißt, wenn der Hall-Sensor eine magnetische Flussdichte über dem programmierten Sollwert misst, wird der Elektromagnet B so gepolt, dass der Magnet A auf dem Globus angezogen wird. Schwebt er zu hoch (der Hall-Sensor misst ein zu schwaches Magnetfeld), wird der Elektromagnet anders herum gepolt, sodass der Magnet auf dem Globus abgestoßen wird.

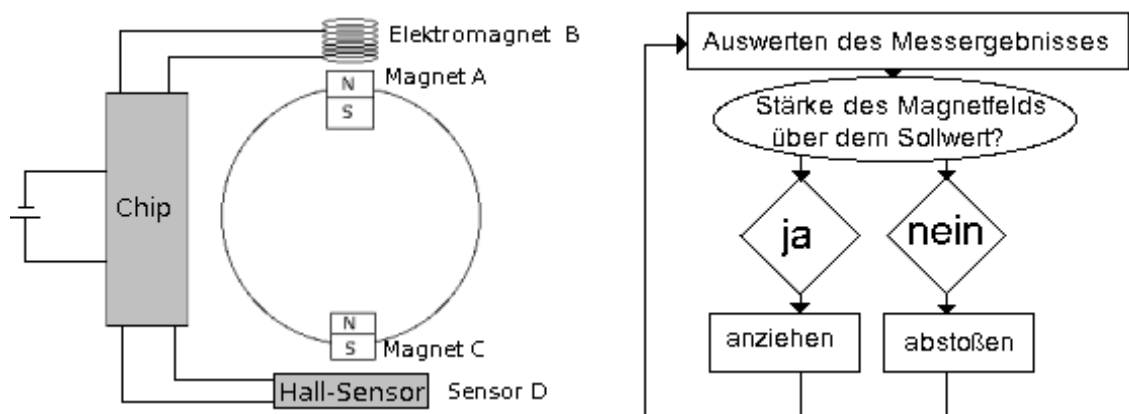


Abb. 3.1.1: Funktionsweise der „*Levitating Desktop Globes*“ (Schema)

Eine ähnliche Technik kommt auch im Transrapid zum Einsatz, der Magnetschwebbahn der ThyssenKrupp AG und der Siemens AG [2, S. 26f.]. Das Fahrzeug schwebt durch die abstoßende Kraft von Elektromagneten über der Trasse. Geregelter Elektromagneten an den Seiten dienen darüber hinaus der berührungslosen Führung entlang der Schiene.

3.2 Elektrodynamisches Schweben

In einem elektrischen Leiter, der sich in einem magnetischen Feld bewegt, wird ein elektrischer Strom induziert, da die Elektronen im Leiter durch die Lorentz-Kraft in Bewegung versetzt werden. Bewegte elektrische Ladungen wiederum sind von einem Magnetfeld umgeben. Im Falle des Leiters, der sich durch das Magnetfeld bewegt, ist das induzierte Magnetfeld nach der Lenzschen Regel ersterem entgegengepolt, sodass ein abstoßender Effekt eintritt. Da es nur eine Frage des Bezugssystems und des Standpunktes ist, ob sich der Leiter im Magnetfeld oder das Magnetfeld um den Leiter bewegt, tritt auch ein Abstoßungseffekt auf, wenn ein Magnet über einen elektrischen Leiter bewegt wird. Der Leiter darf dabei natürlich nicht aus einem ferromagnetischen Material bestehen, da sonst die anziehende die abstoßende Kraft übersteigen würde.

Das induzierte Magnetfeld besteht nur für einen kurzen Moment, da die Elektronen durch den Ohmschen Widerstand des Materials gebremst werden. Elektrodynamisches Schweben (auch „*induktives Schweben*“ [4, S. 63]) erfordert daher in der Regel eine Bewegung eines Magnetfelds bzw. über einem Magnetfeld oder aber eine ständige Änderung des Magnetfeldes, z.B. durch Wechselstrom, da auch durch eine Änderung des Magnetfeldes ein Strom induziert wird.

Abb. 3.2.1 zeigt einen Aufbau, bei der eine Schale aus Metall über drei Wechselstromspulen schwebt.

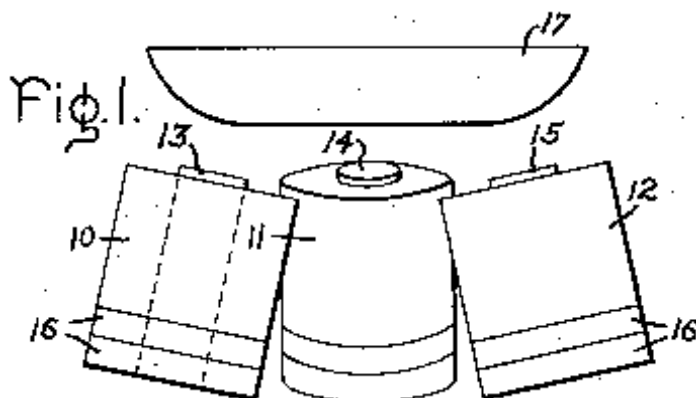


Abb. 3.2.1: US-Patent Nr. 2377175: Die Schale schwebt über den Spulen mit Wechselstrom [17]

Einen Sonderfall stellen supraleitende Materialien dar. Ein einmal induziertes Magnetfeld bleibt auf Grund eines fehlenden Ohmschen Widerstandes bestehen. Nach der Lenzschen

Regel verändert sich nun bei jeder kleinsten Bewegung des Magneten das induzierte Magnetfeld so, dass der Magnet stabilisiert wird und frei schwebt. Da das Magnetfeld sich ständig ändert, handelt es sich um keinen statischen Aufbau mit Permanentmagneten. Earnshaws Theorem wird daher nicht widersprochen.

Da noch kein warmer Supraleiter bekannt ist, muss ein Aufbau dieser Art ständig gekühlt werden. Für den Einsatz in Schwebefahrzeugen eignet sich die Technik mit Supraleitern daher noch nicht [4, S. 74].

3.3 Rotationsstabilisiertes Schweben

Ein Brummkreisler wird durch Rotation am Umkippen gehindert. Unterschreitet die Winkelgeschwindigkeit eine bestimmte Grenze, die durch die Bauweise des Kreisels bestimmt ist, kippt er jedoch um. Genauso ist es möglich, freies Schweben zu ermöglichen, indem ein Magnet in Rotation versetzt wird. Liegt die Rotationsgeschwindigkeit in einem bestimmten Bereich, erhält er dadurch die benötigte Stabilität.

Diese Form des Schwebens widerspricht nicht dem Earnshaw-Theorem, da sich das Magnetfeld in diesem Fall dynamisch verändert.

Ein rotierender Magnet, dessen Südpol (Nordpol) zum Boden zeigt, kann über einem ringförmigen Magnetfeld, dessen Südpol (Nordpol) nach oben zeigt, frei schweben (Abb. 3.3.1).

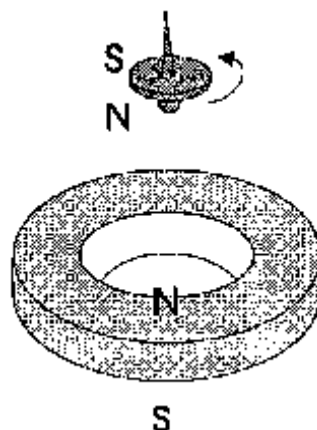


Abb. 3.3.1: Durch Rotation wird der schwebende Magnet am Umkippen gehindert [16]

Ein Spielzeug, das rotationsstabilisiertes Schweben einsetzt, ist unter dem Namen „Levitron“ im Handel erhältlich. Dabei handelt es sich um einen Kreisel, der über einem

ringförmigen Magnetfeld schwebt. Er wurde 1983 von Roy Harrigan erdacht und wird seit den 1990er Jahren kommerziell vertrieben [16]. Bei der passenden Geschwindigkeit schwebt der Kreisel mehrere Minuten lang in einer Höhe von ca. 3cm über der Basis, einem ringförmigen Permanentmagneten. Da er jedoch durch die Luftreibung gebremst wird, unterschreitet er nach einiger Zeit die nötige Drehgeschwindigkeit, verliert somit die nötige Stabilität und fällt herunter.

3.4 Diamagnetisches Schweben

Stoffe, die in ein Magnetfeld gebracht werden, können dieses auf drei verschiedene Arten ändern. Sie unterscheiden sich durch ihre relative Permeabilität μ_r . Stoffe mit einer besonders hohen Permeabilität (z.B. Eisen mit μ_r bis 5000) sind ferromagnetisch. Sie werden in einem Magnetfeld selbst zum Magneten und stärken dieses. Daher werden in Elektromagneten oft Eisenkerne eingesetzt. Stoffe mit μ_r knapp über 1 (z.B. Luft mit $\mu_r = 1 + 4 \cdot 10^{-7}$) heißen paramagnetisch und stärken ein Magnetfeld nur kaum. Stoffe mit $\mu_r < 1$ (z.B. Wismut mit $\mu_r = 0,999831$) schwächen Magnetfelder [5, S. 409]. Sie heißen diamagnetisch.

Magnetismus ist eine Folge bewegter elektrischer Ladungen. Die negativ geladenen Elektronen, die um Atomkerne kreisen, sind also von einem magnetischen Feld umgeben. In ferromagnetischen Stoffen können diese „Elementarmagneten“ so ausgerichtet werden, dass sie sich gegenseitig stark verstärken und der Stoff dadurch zum Magneten wird.

Bei diamagnetischen Materialien heben sich die magnetischen Momente aller Elektronen eines Atoms gegenseitig auf [3, S. 283]. Wird ein diamagnetischer Stoff in ein Magnetfeld gebracht, werden die Elektronen durch Induktion abgelenkt. Die magnetischen Momente heben sich nun nicht mehr gegenseitig auf, sodass ein Magnetfeld erzeugt wird. Nach der Lenzschen Regel muss dieses dem Magnetfeld, durch das es erzeugt wurde, entgegengesetzt sein. Diamagnetische Materialien werden also von Magneten abgestoßen. Diese Art des Schwebens stellt somit einen Sonderfall des elektrodynamischen Schwebens dar. Wie bereits dargelegt wurde, sind Supraleiter perfekte Diamagneten.

3.5 Schweben mit Stabilisierung

Die naheliegendste Möglichkeit, den Instabilitäten des Earnshaw-Theorems aus dem Wege zu gehen, ist, eine zusätzliche Stabilisierung in den Aufbau hineinzubringen. Allerdings handelt es sich dann nicht mehr um ein freies Schweben.

Gewünschte Effekte des magnetischen Schwebens, zum Beispiel Reibungsfreiheit, sind mit einer mechanischen Stabilisierung zwar nicht vollständig, jedoch immer noch in einem großen Maße realisierbar.

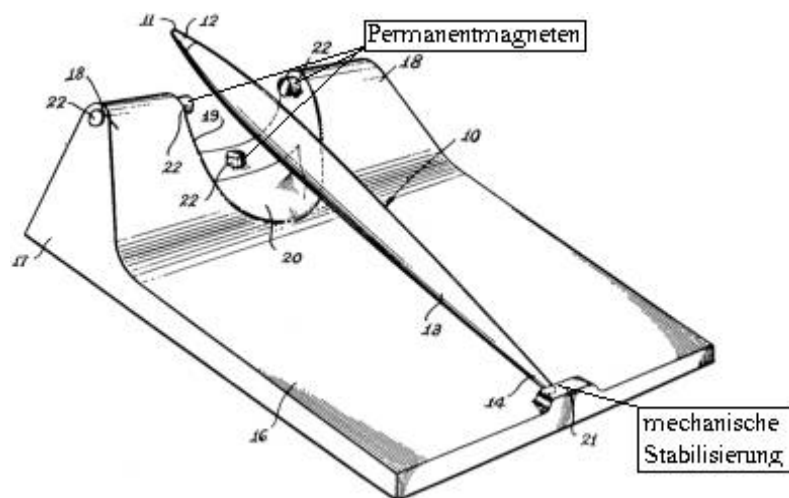


Abb. 3.5.1: US-Patent Nr. 02693788: Ein Kugelschreiberhalter [12, Beschriftungen hinzugefügt]

Denkbar ist jedoch auch eine Stabilisierung durch Techniken, die bereits vorgestellt wurden, wie geregelte Elektromagnete oder die Nutzung des Diamagnetismus. Solch ein Aufbau ermöglicht beispielsweise Bewegungen entlang einer Schiene mit vollständiger Reibungsfreiheit (von Luftreibung abgesehen). Eine horizontale Stabilisierung mit geregelten Elektromagneten wurde Ende der 1980er Jahre in der Berliner M-Bahn eingesetzt, einer Magnetschwebebahn zu Vorführzwecken, die jedoch bereits 1990 wieder demontiert wurde, da der Platz nach der Wiedervereinigung für den Ausbau des U-Bahn-Netzes benötigt wurde [2, S. 60 f.; 4, S. 38f.] (Abb. 3.5.2). Der Vorteil dieser Technik gegenüber einem System, das ausschließlich auf geregelten Elektromagneten basiert, ist, dass nur für die horizontale Stabilisierung Energie aufgewendet werden muss. Das vertikale Schweben wird durch passive Permanentmagneten ohne die Zufuhr von zusätzlicher Energie ermöglicht. Durch die reibungsfreie Bewegung kommt es nicht zu hohem Energieverbrauch und dem Verschleiß von Fahrzeugteilen.

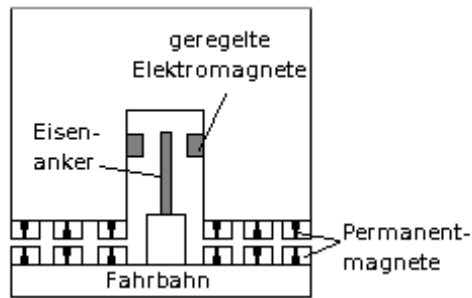


Abb. 3.5.2: Bei der M-Bahn wurde auf Dauermagnete mit einer Stabilisierung durch geregelte Elektromagnete gesetzt (schematische Darstellung [nach 4, S. 39]).

4. Aussichten

Ein Anwendungsgebiet für magnetisches Schweben ist der Einsatz in Spielgeräten oder Spielereien. Einige Beispiele wie der Kugelschreiberhalter oder das *Levitron* wurden bereits genannt. Erhältlich sind auch magnetische Teelichthalter oder Fotorahmen.

Industriell können magnetische Schwebetechniken insbesondere zur Reibungsvermeidung beitragen. Dadurch wird Materialverschleiß, hohem Energieverbrauch und Betriebslärm entgegengewirkt. Als Anwendung sind Gelenke in Maschinen wie Robotern denkbar, in denen ein direkter Kontakt der zueinander beweglichen Elemente durch entgegengesetzte Dauermagneten vermieden wird. Zur mechanischen Stabilisierung der Konstruktion reicht schon der Kontakt der Verkleidung des Gelenks aus.

Ein besonders wichtiges Anwendungsgebiet ist der Güter- und Personentransport. Magnetschwebbahnen wie der Transrapid ermöglichen das Erreichen von sehr hohen Geschwindigkeiten (Betriebsgeschwindigkeit bis 400km/h). Große Strecken können so schnell zurückgelegt werden. Daher stellt der Transrapid eine Alternative zum Transport von zeitkritischen Gütern mit dem Flugzeug dar.

Die Technik ist weitaus weniger als herkömmliche Transportmittel, wie Bahn und Lkw, für wetterbedingte Störungen anfällig, da kein mechanischer Kontakt zwischen der (beispielsweise vereisten) Schiene und dem Fahrzeug besteht. Die Umklammerung der Schiene und die Führung durch Magneten machen ein Entgleisen so gut wie unmöglich [2, S. 86]. Dadurch, dass es keine Reibung mit der Fahrspur gibt, sind Magnetschwebbahnen trotz hoher Geschwindigkeiten sehr leise, denn außer dem Rauschen des Fahrwindes entstehen keine wesentlichen Geräusche.

Zusätzlich ist das Fehlen von Reibung Kraftstoff sparend. Beim Transrapid kommt hinzu,

dass die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsen wieder in elektrische Energie gewandelt und ins Netz zurück gespeist werden kann. Somit können Magnetschwebbahnen zum Umweltschutz und zur nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen beitragen.

Auf Grund der hohen Kosten einer neuen Magnetbahn existiert in Deutschland bisher nur eine Teststrecke im Emsland. Auf dem Gebiet wird aber weiterhin geforscht. China entwickelt derzeit eine eigene Magnetschwebbahn.

Der Einsatz magnetischer Schwebetechniken wird also in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

Literaturverzeichnis

Bei der Erstellung dieser Facharbeit habe ich ausschließlich die nachfolgenden Quellen verwendet. Die Abbildungen 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 3.1.1 und 3.5.2 habe ich selbst gezeichnet. Ausdrücke verwendeter Internetquellen folgen nach diesem Literaturverzeichnis.

- [1] Dzieyk, B., Angewandte Magnettechnik: Mit Magneten messen, regeln, automatisieren, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg 1975
- [2] Götzke, H., Transrapid: Technik und Einsatz von Magnetschwebebahnen, transpress Verlag, o.O. 2002
- [3] Hofmann, H., Das elektromagnetische Feld: Theorie und grundlegende Anwendungen, Springer-Verlag, Wien/New-York 1986³
- [4] Jung, V., Magnetisches Schweben, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokio 1988
- [5] Lindner, H., Physik für Ingenieure, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1989¹²
- [6] Purcell, E., Elektrizität und Magnetismus, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 4. Auflage
- [7] Schwab, A. J., Begriffswelt der Feldtheorie: Crash-Kurs Elektromagnetische Felder, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokio 1985
- [8] Vogel, H., Gerthsen Physik, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1997¹⁹
- [9] Watson, J. K., Applications of magnetism, John Wiley & Sons, New York/Chichester/Brisbane/Toronto 1980
- [10] Weyh, U., Die Grundlagen der Lehre vom elektrischen und magnetischen Feld, R. Oldenbourg Verlag, München/Wien 1975
- [11] Bild auf dem Deckblatt: ThinkGeek Inc., Levitating Desktop Globes, URL: <http://www.thinkgeek.com/images/products/additional/large/globe-alt4.jpg>, 23.02.2005, 22:24 Uhr
- [12] United States Patent and Trademark Office, Magnetic Desk Pen Set, URL: <http://patft.uspto.gov/netahtml/srchnum.htm>, Suche nach „2693788“, 20. Suchtreffer, 27.02.2005, 19:02 Uhr
- [13] levitron.html, URL: <http://www.chem.yale.edu/%7echem125/levitron/levitron.html>, 2.3.2006, 23:14 Uhr

- [14] ferromagnetische Stoffe, URL: http://www.ulfkonrad.de/physik/groessen/mag_stoffe.htm#diamag, 2.3.2006, 23:29 Uhr
- [15] heise online – Supraleiter vor industrieller Anwendung, URL:
<http://www.heise.de/newsticker/meldung/67943>, 5.3.2006, 20:44 Uhr
- [16] Wundersames, Magnetisches, Rotation, URL:
http://www.wundersamessammelsurium.de/Magnetisches/5_Rotation/index.html,
5.3.2006, 21:23 Uhr
- [17] United States Patent and Trademark Office, Display Apparatus, URL:
<http://patft.uspto.gov/netahtml/srchnum.htm>, Suche nach „2377175“, 1.
Suchtreffer, 8.3.2006, 23:01 Uhr

Ausdrucke der Internetquellen

Die folgenden Seiten sind Ausdrucke der relevanten Auszüge der Internet-Dokumente, die ich als Quellen dieser Facharbeit benutzt habe. Da sich die Inhalte der Internet-Seiten möglicherweise ändern können, sind sie jeweils mit dem Zeitpunkt des Aufrufs versehen.

[13] levitron.html, URL: <http://www.chem.yale.edu/%7echem125/levitron/levitron.html>,
2.3.2006, 23:14 Uhr (Auszug)

1. Earnshaw's Theorem

On March 18, **1839** at the Cambridge Philosophical Society **Samuel Earnshaw** of St. John's College read his paper:

***On the Nature of the Molecular Forces which regulate
the Constitution of the Luminiferous Ether***

Earnshaw questions whether the restoring force that allows particles of the ether to vibrate, as they propagate a light wave, might obey an **inverse square law**, like gravity. He decides no, based on a proof that depends on the divergence of such a force being zero:

$$\mathbf{Del} \cdot \mathbf{F} = dF / dx + dF / dy + dF / dz = 0$$

Since they sum to zero, the restoring forces in three orthogonal directions cannot all have the same sign. **There can be no local minimum (or maximum) of energy for an inverse square force law.** So vibration about a point of stable equilibrium is impossible with such a force. Q.E.D.

[14] ferromagnetische Stoffe, URL:

http://www.ulfkonrad.de/physik/groessen/mag_stoffe.htm#diamag, 2.3.2006,
23:29 Uhr (Auszug)

diamagnetische Stoffe

Diamagnetische Stoffe sind z.B. Wasser, Kupfer, Schwefel, Gold, Wismut. Diese Stoffe haben die Eigenschaft ein Magnetfeld leicht zu schwächen. Das bedeutet, dass die Dichte der magnetischen Feldlinien abnimmt.

Tabelle μ_r

Stoff	Permeabilitätszahl μ_r
Wasser	0,999991
Kupfer	0,99999
Schwefel	0,99999
Gold	0,999971
Wismut	0,999831

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, liegen alle Permeabilitätszahlen "nahe" bei 1, d.h. dass nur eine geringe Schwächung des Magnetfeldes erfolgt.

paramagnetische Stoffe

Paramagnetische Stoffe sind z.B. Luft, Aluminium und Platin. Diese Stoffe haben die Eigenschaft ein Magnetfeld leicht zu verstärken.. Das bedeutet, dass die Dichte der magnetischen Feldlinien zunimmt.

Tabelle μ_r

Stoff	Permeabilitätszahl μ_r
Luft	1,0000004
Aluminium	1,00002
Platin	1,00027

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, liegen alle Permeabilitätszahlen "nahe" bei 1, d.h. dass nur eine geringe Verstärkung des Magnetfeldes erfolgt.

[15] heise online – Supraleiter vor industrieller Anwendung, URL:

<http://www.heise.de/newsticker/meldung/67943>, 5.3.2006, 20:44 Uhr (Auszug)

news 04.01.2006 09:32

Supraleiter vor industrieller Anwendung

Physiker vom Forschungszentrum Karlsruhe haben ein Kabel aus so genannten Hochtemperatur-Supraleitern gebaut, das 75.000 Ampere Strom verlustfrei transportieren kann. Das aus Bändern bestehende Kabel soll die Riesenmagneten des künftigen Fusionsreaktors **Iter** mit Strom versorgen.

Seit fast zwei Jahrzehnten schwärmen Forscher vom phantastischen Potenzial solcher Materialien. Doch zunächst täuschte die Hoffnung: Die Produktion der wundersamen Oxidkeramiken erwies sich als schwierig, ihr Werkstoffverhalten als widerspenstig. Erst jetzt – fast 20 Jahre nach ihrer Entdeckung – stehen die Keramikkrystalle an der Schwelle zur Markteinführung.

Technology Review berichtet in der aktuellen Ausgabe von vielversprechenden Projekten: So befindet sich seit August vorigen Jahres bei Siemens ein vier Megawatt starker Generator mit supraleitenden Wicklungen im Test. Er ist nur halb so groß und schwer wie ein gewöhnlicher Elektromotor und könnte künftig auf einem Schiff für den Bordstrom sorgen.

American Superconductor steht nach eigenen Angaben zudem kurz davor, YBCO-Drähte mit einer Länge von immerhin 100 Metern zu fertigen, die nur ein Fünftel des der heutigen Wismut-Supraleiter kosten sollen. Auf dem Markt soll der Low-Cost-Supraleiter 2007 erscheinen.

Auch das erste Stromkabelprojekt läuft an – und zwar mitten in Manhattan: Das 30 Millionen Dollar teure Keramik Kabel misst rund 660 Meter, verbindet in einem unterirdischen Kabelkanal Long Island mit den Elektrizitätswerken von New Jersey und überbrückt einen derzeitigen Engpass im Leitungssystem.

Der Marktreife nähern sich auch die "Squids" – hoche sensible Magnetsensoren bestehend aus einer winzigen, supraleitenden Drahtschleife. Erprobt werden die Magnetschnüffler derzeit von einigen Kliniken für die Magnetokardiografie (MKG), die präzise, berührungslose Diagnose von Hirn- und Herzströmen. Andere Experten wollen die Squids in Flugzeuge einbauen, um mit ihnen über Land zu fliegen, winzigsten Abweichungen des Erdmagnetfelds nachzuspüren – und damit Hinweise auf unentdeckte Bodenschätze zu bekommen.

Mehr in Technology Review 01/2006:

- Der Strom, der aus der Kälte kam

(wst/Technology Review)

[16] Wundersames, Magnetisches, Rotation, URL:

http://www.wundersamessammelsurium.de/Magnetisches/5_Rotation/index.html,

5.3.2006, 21:23 Uhr (Auszug)

Ein magnetischer Kreisel, der für einige Minuten frei über einer magnetischen Basis schweben kann, ist unter der Bezeichnung "Levitron" im Handel. Der Kreisel wird auf einer Platte, die auf der Basis liegt, in Drehung versetzt. Hebt man nun die Platte langsam hoch, wird sich der Kreisel in ca. 3 cm Höhe über der Basis von der Platte lösen und schwebt dann bis zu 3 Minuten völlig frei über der Basis.

Roy M. Harrigan

Ein amerikanischer Tüftler aus Vermont namens Roy Harrigan hat 1983 einen magnetischen Schwebekreisel gebaut. 10 Jahre später begann er zusammen mit dem Spielzeugproduzenten Hones diese Erfindung kommerziell zu verwerten. Die Zusammenarbeit dauerte nur kurz: Hones meldete den Schwebekreisel als Patent an und der Erfinder Harrigan ging leer aus.

Edward W. Hones

Die Basis bildet ein großer ringförmiger Permanentmagnet, der Kreisel besteht im Wesentlichen ebenfalls aus einem Permanentmagneten. Die gegenüberstehenden Pole der beiden sind gleichnamig und stoßen sich gegenseitig ab, so dass ein Schweben möglich ist.

Normalerweise würde sich der kleine Kreisel herumdrehen und dann von der Basis angezogen werden, aber die wirkenden Kreiselkräfte verhindern dies. Er präzessiert schwebend, solange er sich schnell genug dreht.

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlich und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Quellen als solche kenntlich gemacht habe.

_____, den _____ (Unterschrift)