

DIAMAGNETISCHE PINZETTE IM ALL

S.Kopf, Carl-Bosch-Gymnasium
67059 Ludwigshafen, Deutschland



Zusammenfassung

Bei der *Diamagnetischen Pinzette* handelt es sich um eine weltraumtaugliche Handhabungsvorrichtung zur berührungslosen Manipulation fester und flüssiger Substanzen. Diamagnetische Stoffe werden in Magnetfeldminima räumlich stabil fixiert. Die einfachste Realisierung der notwendigen Feldgeometrie verwendet Paare sich mit dem gleichen Pol gegenüberstehender Neodymmagnete. Die diamagnetische Materialprobe wird in das sich symmetrisch zwischen den Magnetpolen befindliche Feldminimum hineingedrängt. Die Tiefe der Potentialmulde haben wir experimentell bestimmt. Die kontaktlose Stabilisierung millimetergroßer Gegenstände mit Hilfe dieser Technik erscheint machbar.

1. EINFÜHRUNG

Um Messungen an einer Materialprobe möglichst wenig zu verfälschen bzw. die Interpretation der Messergebnisse deutlich zu vereinfachen, sind berührungslose Manipulationstechniken von Vorteil.

Unter Bedingungen der Schwerelosigkeit ist es prinzipiell einfacher, dieses Ideal zu realisieren. Die hier vorgestellte experimentelle Methode zur berührungsfreien Handhabung von Stoffen im Weltall entwickelte ich mit der Unterstützung meines Physiklehrers, Herrn Dr. Bernd Rohwedder, im Rahmen des „Youtube-Spacelab“-Wettbewerbs¹.

Bei diesem Wettbewerb, benannt nach dem Vorgänger des Columbus-Weltraum-Moduls, sollten sich Teilnehmer aus aller Welt ein Experiment ausdenken, welches an Bord der Internationalen Raumstation (ISS)



Abb. 1: Youtube-Spacelab-Logo

durchgeführt werden könnte, und dieses in einem zweiminütigen Video vorstellen. Eine internationale Jury wählte aus diesen Videos das interessanteste Experiment für jede der beiden Altersgruppen (14- bis 16-Jährige/ 17- bis 18-Jährige) aus und belohnte das jeweilige Siegerteam u.a. mit der Aussicht, das Experiment an Bord der ISS durchzuführen. Unsere Idee, die ich im Folgenden beschreiben werde, erreichte als einziges deutsches Video die Auswahl der 30 Besten weltweit unserer Altersgruppe.

2. DIAMAGNETISMUS

Konventionell bezeichnet man im Alltag mit „Magnetismus“ die Eigenschaft einiger weniger (eigentlich: „ferromagnetischer“) Stoffe, mit großer Kraft zum Maximum eines Magnetfeldes hingezogen zu werden. Ferromagnetisch sind vor allem Eisen, Nickel, Kobalt und manche Seltene Erden.

Der seltene Ferromagnetismus sowie der weiter verbreitete Paramagnetismus, der ebenfalls anziehend wirkt, wenn auch weit schwächer, überdecken oft den in allen

Materialien vorhandenen, stets schwach abstoßend wirkenden Diamagnetismus.

Nähert sich ein Magnet einem diamagnetischen Stoff, so induziert er in diesem einen magnetischen Dipol, welcher dem äußeren Feld entgegengerichtet ist. Das bedeutet, dass das Magnetfeld im Inneren des Stoffes kleiner ist als das äußere: der Stoff ist „diamagnetisch“ und wird von Magneten abgestoßen. Diamagnetische Substanzen orientieren sich folglich immer hin zum Magnetfeldminimum.

Charakter und Größe der Magnetisierbarkeit eines Stoffes in einem externen Magnetfeld werden durch die magnetische Suszeptibilität (lat.: „Übernahmefähigkeit“) χ_m angegeben (Tab.1). Sie ist für diamagnetische Substanzen negativ.

Stoff	Suszeptibilität
Bismut	$-1,57 \cdot 10^{-4}$
Grafit	$-1,60 \cdot 10^{-4}$
Kupfer	$-0,97 \cdot 10^{-5}$
Aceton	$-1,37 \cdot 10^{-5}$
Blei	$-1,60 \cdot 10^{-5}$
Germanium	$-7,10 \cdot 10^{-5}$
Ethanol	$-7,34 \cdot 10^{-6}$
Wasser	$-9,03 \cdot 10^{-6}$

Tab. 1: Magnetische Suszeptibilität wichtiger diamagnetischer Stoffe²

Weil der Körper vieler Tiere vor allem aus Wasser besteht, sind diese im Wesentlichen diamagnetisch. In einem berühmten vor bereits mehr als fünfzehn Jahren durchgeführten Experiment wurde ein kleiner Frosch mit Hilfe diamagnetischer Kräfte stabil und schwerelos im Innern eines starken Elektromagneten festgehalten (Abb.2).

Auf der Erde ist allerdings der Aufwand zur Überwindung der Schwerkraft für Gegenstände dieser Größenordnung mit Hilfe des Diamagnetismus recht groß. Unter Bedingungen der Mikrogravitation entfällt dagegen die Notwendigkeit der Schwerkraft entgegenzuwirken. Unser Ziel ist es, eine ähnliche Technik zu nutzen, um Objekte im All berührungslos festzuhalten und kontrolliert zu bewegen.



Abb. 2: Levitierter Frosch³

3. DIAMAGNETISCHE PINZETTE

Zwei handelsübliche Permanentmagnete bilden die Grundlage einer berührungslosen Fixierungsmöglichkeit. Sie müssen so gerichtet und befestigt werden, dass sie sich (entgegen ihrer natürlichen Tendenz) mit den gleichen Polen nah gegenüberstehen (Abb.3).

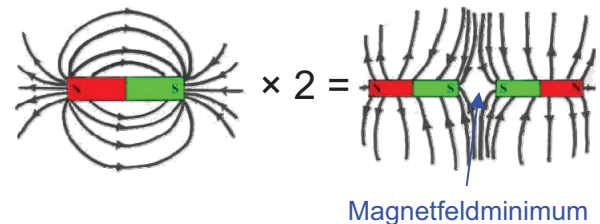
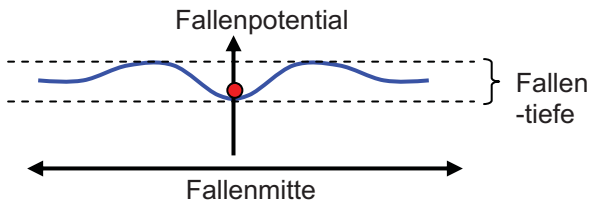


Abb. 3: Magnetfeldlinien mit Magnetfeldminimum

Auf diese Weise entsteht in der Mitte ein Magnetfeldminimum und ein starker Feldgradient. Platziert man nun das Experimentiergut zwischen diesen Magneten, sucht es aufgrund seiner diamagnetischen Eigenschaft das Magnetfeldminimum und wird darin berührungslos festgehalten. Die Mulde im zugehörigen diamagnetischen Fallenpotential ist relativ flach (Abb. 4a). Um ihre Tiefe experimentell zu bestimmen, benötigt man eine berührungslos wirkende Kraft, welche einen Probekörper in kontrollierbarer Weise über den Muldenrand zieht, bis er die Falle verlässt (Abb. 4b).

(a) Stabile Gleichgewichtsposition



(b) Zug der Gravitation im Experiment

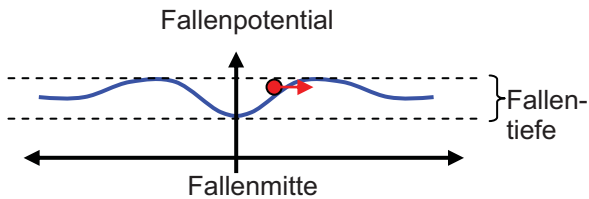


Abb. 4: Skizze der Potentialmulde

4. PROOF OF PRINCIPLE

Um dieses erste experimentelle Ziel zu erreichen, bauten wir eine Apparatur aus zwei unabhängigen Pendeln mit gemeinsamer Achse (s. Abb. 5).



Abb. 5: Pendelmodell mit Zahnraduntersetzung

Das innere Pendel besteht aus einem sehr dünnen Faden, an dem der Probekörper hängt. Wir verwendeten stellvertretend für zukünftige Experimentierobjekte eine flache

Scheibe aus Bismut, da bei diesem Material der diamagnetische Effekt besonders stark hervortritt.

Das äußere, massive Pendel kann mit einer Zahnraduntersetzung langsam und kontinuierlich ausgelenkt werden. An seinem unteren Ende befindet sich die Halterung mit den zwei zylindrischen Neodymmagneten (Durchmesser und Länge jeweils 15mm). Der Abstand der Magnete zueinander kann mit Schrauben stufenlos eingestellt werden (s. Abb. 6).

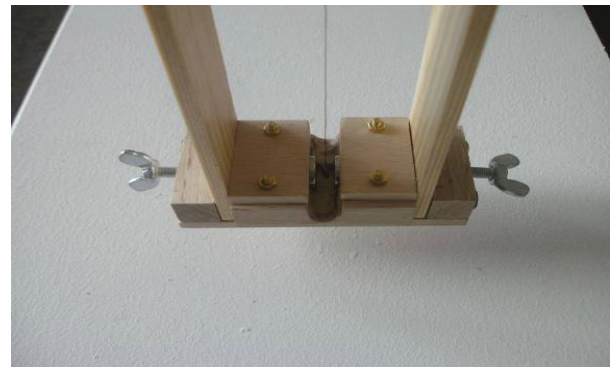


Abb. 6: Magnetbox mit Bismutpendel

Lenkt man allmählich das äußere Pendel aus seiner vertikalen Ruhelage aus, so wird die im Magnetfeldminimum gefangene Bismutscheibe mitgezogen, bis der Winkel und damit die tangentielle Komponente der Schwerkraft zu groß wird und sie aus ihrer „Verankerung“ reißt. Aus der gemessenen maximalen Auslenkung von ca. 2 Grad (Abb. 7) folgt, dass die maximale Rückstellkraft innerhalb der Falle etwa $100\mu\text{N}$ beträgt. Für die Tiefe der Potentialmulde erhält man somit einen Wert der Größenordnung $1\mu\text{J}$.

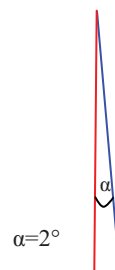
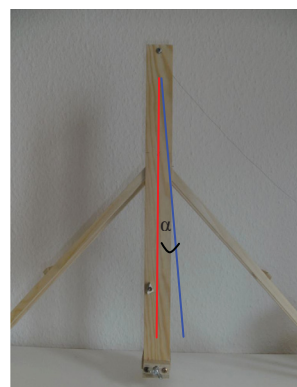


Abb. 7: Pendelauslenkung

5. WEITERE SCHRITTE UND AUSBLICK

Ein Problem bei der Verwendung handelsüblicher Magnete mit planparallelen Polen ist, dass sie keinen guten Zugang zum festgehaltenen Probat ermöglichen und folglich dessen Manipulation erschweren. Eine denkbare Lösung wäre, den Stoff mit Hilfe der Magneten nur im gewünschten Raumpunkt zu platzieren und die Magnete dann adiabatisch in axialer Richtung zu entfernen.

Alternativ und mechanisch weniger aufwändig wäre die Verwendung maßgeschneiderter Magnete mit spitzer geformten Polen. Dies würde gleichzeitig den optischen Zugang verbessern und den Magnetfeldgradienten erhöhen.

Um quantitative Vorhersagen machen zu können, vermessen wir zurzeit das Magnetfeld unserer Magnete mit Hilfe einer Hallsonde. Das diamagnetische Potential entlang der Symmetrieebene wollen wir in einem nächsten Schritt mit einer sehr empfindlichen Balkenwaage ausmessen. Sobald wir einen konsistenten Datensatz haben und die physikalischen Parameter

genau kennen, sollen per numerischer Simulation besser geeignete Geometrien berechnet werden.

Die diamagnetische Festhaltetechnik setzt keinen Stromverbrauch voraus, da sie allein mit Permanentmagneten auskommt. Zum Bewegen der Proben bzw. dem Befreien der Proben aus ihrer diamagnetischen Falle kann die Pinzette kontrolliert beschleunigt werden. Alternativ ist zu diesem Zwecke der Einsatz gepulster Elektromagnete denkbar.

Potentielle Anwendungen im chemischen und biochemischen Bereich⁴ werden dadurch erleichtert, dass wichtige Lösungsmittel diamagnetisch sind. Wegen des starken Diamagnetismus verschiedener Glassorten ist es ebenfalls denkbar, kleine Glaskugeln als Substrate zu verwenden. Mit ihrer Hilfe könnte man diamagnetische Pinzetten auch zur berührungslosen Manipulation sie benetzender, flüssiger Paramagnetika verwenden. Auf diese Weise stünde am Ende eine neue, universal einsetzbare Labortechnik zur kontaminationsfreien Manipulation chemischer Substanzen unter Mikrogravitationsbedingungen zur Verfügung.

Danksagung:

Danken möchte ich dem DGLR, besonders Herrn Dr. Erec Fahlbusch, für die Möglichkeit des Vortrags auf dem DGLR-Nachwuchskongress.

Vielen Dank dem DLR für die finanzielle Unterstützung der Reise nach Berlin.

Danke an Google, besonders Herrn Dr. Ralf Bremer, die über den Wettbewerb und die Einladung zur CeBIT-Eröffnungsveranstaltung mein Video bekannt gemacht haben.

Die Firma „Haines und Maassen“ (www.haines-maassen.de) haben großzügig das Carl-Bosch-Gymnasium mit einer großen Spende hochreinen Bismuts unterstützt. Vielen Dank dafür!

Mein besonderer Dank gilt meinem engagierten Physiklehrer, Herrn Dr. Bernd Rohwedder, für die zahlreichen Tipps, Erklärungen, Korrekturen und Versuchsanordnungen, ohne die ein solches Projekt undenkbar wäre.

Referenzen:

[1] <http://www.youtube.com/watch?v=PokcskZkhCM>

[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Suszeptibilit%C3%A4t

[3] A. Geim, *Everyone's Magnetism*, Phys. Today (9), 36 (1998).

[4] P. Kauffmann et al., Anal. Chem. 83 (11), pp 4126–4131 (2011)