

Stabil in der Schwebe

Seit den 1930er Jahren ist eine einfache Methode bekannt, mit der man Gegenstände stabil im Magnetfeld schweben lassen kann – doch erst jetzt finden die Forscher dafür auch praktische Anwendungen.

Von Ronald E. Pelrine

Magneten üben Kräfte aufeinander aus, ohne sich zu berühren – das fasziniert die meisten Kinder und sogar Erwachsene. Vom Staunen über dieses seltsame Phänomen ist es nur ein kleiner Schritt bis zur Frage, ob man vielleicht mit der Kraft eines Magneten einen zweiten schweben lassen könnte. Doch wie man es auch anstellt: Die Schwerkraft gewinnt immer. Zwar lässt sich ein Magnetfeld so arrangieren, dass es an einer bestimmten Stelle das Gewicht eines anderen Magneten gerade kompensiert. Doch die geringste Störung zerstört das delicate Gleichgewicht und bringt den schwebenden Körper zum Absturz.

Dass es grundsätzlich nicht möglich ist, einen Magneten in einem statischen Magnetfeld stabil und frei schweben zu lassen, hat der britische Physiker und Geistliche Samuel Earnshaw bereits 1842 festgestellt. Das heute nach ihm benannte Theorem gilt übrigens auch für eine Ladung in einem statischen elektrischen Feld.

Theoretisch begründen lässt sich Earnshaws Theorem anhand der funda-

mentalen Gleichungen, mit denen der Brite James Clerk Maxwell Mitte des 19. Jahrhunderts die elektromagnetischen Erscheinungen beschrieb. Freilich muss man die Maxwell'schen Gleichungen nicht beherrschen, um Earnshaws Theorem zu verstehen. Man muss lediglich wissen, dass sich das Verhalten eines Magneten mit einer physikalischen Größe namens »magnetisches Potenzial« beschreiben lässt. Dieses Potenzial ähnelt anderen vertrauten Formen der potenziellen (also gespeicherten) Energie.

Potenzial ohne Tal

Betrachten wir beispielsweise eine Kugel auf einer welligen Fläche. Die Kugel rollt in die Richtung, in der die potenzielle Energie am schnellsten abfällt. Sie kommt erst zum Stillstand, wenn sie einen Ort erreicht, an dem das Potenzial ein lokales Minimum aufweist – am flachen Boden einer Mulde. Ganz ähnlich würde ein Magnet nur dann stabil schweben, wenn er sich in einem Minimum des magnetischen Potenzials befände. Doch aus den Maxwell'schen Gleichungen folgt, dass das magnetische Potenzial an jedem Punkt im Raum dem Mittelwert des Potenzials der umgebenden Punkte entspricht. Darum kann die-

se Größe nirgends ein lokales Minimum einnehmen: In direkter Nachbarschaft muss es stets sowohl Punkte mit höherer als auch mit niedrigerer Energie geben (Bild auf S. 40 oben).

Aus diesem Grunde sahen sich die Forscher nach anderen Möglichkeiten um, Gegenstände schweben zu lassen. Meistens greifen sie auf dynamische, also zeitlich variable Magnetfelder zurück, denn für diese gilt das Earnshaw-Theorem nicht. So lässt sich mit einem aktiven Regelkreis über Sensoren die genaue Position des schwebenden Körpers messen und das Magnetfeld beständig nachregulieren, sodass er in der Schwebe bleibt. Diese Methode findet seit Jahrzehnten technische Anwendung in aktiven Magnetlagern und in Magnetschwebbahnen wie dem Transrapid. Obwohl sie funktionieren, haben diese Systeme doch gravierende Nachteile: Sie verbrauchen Energie und sind recht komplex, was sich nachteilig auf Preis und Fehleranfälligkeit auswirkt.

Doch gibt es einen Weg, einen Magneten ohne solche Komplikationen schweben zu lassen. Um diese Methode zu verstehen, ist es wichtig, den Unterschied zwischen den drei verschiedenen Arten von Magnetismus zu kennen. Physiker unterscheiden nämlich ferromagnetische, paramagnetische und diamagnetische Materialien.

Ferromagnetische Substanzen – wie zum Beispiel Eisen – lassen sich häufig dauerhaft magnetisieren. Die in Haushaltswarenläden erhältlichen Permanentmagnete zum Anpinnen von Notizzetteln bestehen aus solchen Ferromagneten. Paramagnetische Materialien wie etwa das Mineral Biotit hingegen sind

IN KÜRZE

- ▶ **Physikalische Gesetzmäßigkeiten** verhindern das freie, stabile Schweben eines magnetischen Körpers in einem statischen Magnetfeld.
- ▶ Bisherige Anwendungen der Schwebetechnik – wie zum Beispiel beim Transrapid – nutzen deshalb **dynamische Systeme** mit teurer und fehleranfälliger Regeltechnik, um Instabilitäten auszugleichen.
- ▶ Mit diamagnetischen Materialien lassen sich hingegen **eigenstabile Schwebezustände** erreichen. Diese ermöglichen kostengünstige und vielfältige Anwendungen.



nur magnetisch, solange sie sich in einem äußeren Magnetfeld befinden. Sie werden von Permanentmagneten angezogen und eignen sich deshalb nicht für einen Gegenstand, den wir stabil schweben lassen wollen. Das geht nur mit diamagnetischen Substanzen; denn diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie Dauermagneten abstoßen.

Frösche schweben, weil sie diamagnetisch sind

Das seltsame Verhalten diamagnetischer Materialien lässt sich mit Hilfe eines stark vereinfachten Atommodells verstehen. Betrachten wir ein Elektron, das den Kern eines Atoms in einer solchen Substanz umkreist (siehe Kasten auf S. 41). Wie jede bewegte elektrische Ladung erzeugt auch dieses Hüllenelektron ein Magnetfeld: Es wirkt wie eine winzige Leiterschleife. Die Elektronen, die andere Atome in dem diamagnetischen Material umkreisen, erzeugen ebenfalls Magnetfelder; da diese aber alle zufällig ausgerichtet sind, löschen sie sich gegenseitig aus. Von außen betrachtet ist die Substanz also nicht magnetisch.

Bringen wir aber den diamagnetischen Körper in ein äußeres Magnetfeld – etwa indem wir einen Permanentmag-

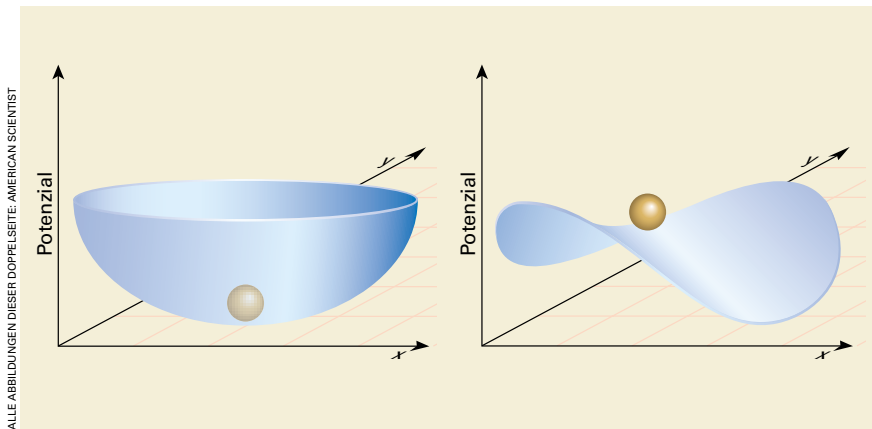
neten heranführen –, dann beschleunigen oder verlangsamen die Hüllenelektronen ihre Bewegung, um so der Änderung des Magnetfelds innerhalb ihrer Umlaufbahn entgegenzuwirken. (Das ist die atomare Version der so genannten Lenz'schen Regel, derzufolge bei der elektromagnetischen Induktion der induzierte Strom immer so gerichtet ist, dass das von ihm ausgehende magnetische Feld der Induktionsursache entgegenwirkt.) Als Nettoeffekt ergibt sich eine induzierte Magnetisierung, die dem äußeren Feld entgegenwirkt und so eine abstoßende Kraft hervorruft.

Diese Kraft lässt sich nutzen, um Permanentmagnete über diamagnetischen Materialien schweben zu lassen – oder umgekehrt. Der deutsche Physiker Werner Braunbeck führte 1939 erstmals eine solche diamagnetische Levitation vor. Dabei ließ er Körper aus den hoch diamagnetischen Materialien Wismut und Graphit über einem Elektromagneten schweben. In den letzten Jahren gehört es auf Physikausstellungen fast schon zum Standardrepertoire, Permanentmagneten über Supraleitern schweben zu lassen. Auch dies ist ein Beispiel für diamagnetische Levitation: Supraleiter sind nicht nur perfekte Stromleiter,

▲ **Kein Zaubertrick:** Der kleine Magnet schwebt frei zwischen Daumen und Zeigefinger des Experimentators. Die eigentliche Hubkraft, die dem Gewicht des Magneten entgegenwirkt, erzeugt ein starker supraleitender Magnet, der sich ein Stockwerk höher befindet. Allerdings wäre damit noch kein stabiler Schwebzustand zu erreichen. Erst der schwache Diamagnetismus, den die Finger des Experimentators aufweisen, sorgt für eine geringe abstoßende Kraft, die ein stabiles Schweben ermöglicht.

sondern auch ideale diamagnetische Substanzen.

Warum nun verletzt diese Form des Schwebens nicht Earnshaws Theorem? Dessen Aussagen gelten nur für statische Felder – bei der diamagnetischen Levitation ist aber das Magnetfeld nicht zeitlich konstant, sondern ändert sich durch die Bewegung des schwebenden Körpers. Drücken wir beispielsweise einen schwebenden Magneten nach unten, so induziert er ein stärkeres abstoßendes Feld in dem unter ihm befindlichen diamagnetischen Material, das ihn wieder nach oben drückt. Steigt der Magnet umge-



ALLE ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: AMERICAN SCIENTIST

◀ Ein magnetisch erzeugter Schwebestand ist nur dann stabil, wenn sich das System in einem lokalen Minimum der potenziellen Energie befindet – verdeutlicht durch eine Kugel, die am Boden einer Mulde liegen bleibt (ganz links). In einem statischen Magnetfeld gibt es jedoch kein solches Minimum. Das Beste, was sich erreichen lässt, ist ein sattelförmiger Verlauf des Potentials (links); die geringste Störung wird die Kugel aus ihrer instabilen Gleichgewichtslage stoßen.

▷ kehrt durch eine Störung ein wenig nach oben, so verringert sich das ihn stützende Feld und er sinkt wieder nach unten. Das diamagnetische Material reagiert also automatisch so wie ein aktives Rückkopplungssystem mit seinen Sensoren und seiner elektronischen Steuerung.

Nun könnte man annehmen, dass diamagnetische Werkstoffe, die solch erstaunliche Eigenschaften zeigen, exotisch und schwer herzustellen seien. Doch weit gefehlt: Diamagnetische Materialien finden sich überall.

Tatsächlich sind eigentlich alle Materialien diamagnetisch. Nur wird in ferromagnetischen und paramagnetischen Stoffen diese Eigenschaft von stärkeren Effekten überlagert. Wasser, die meisten Kunststoffe und Gläser, viele keramischen Stoffe und Metalle – sie alle sind diamagnetisch. Den höchsten bekannten Diamagnetismus bei Raumtemperatur zeigt eine spezielle Form von Kohlenstoff, pyrolytischer Graphit. In diesem schichtweise hergestellten Werkstoff bewegen sich einige der Hüllenelektronen effektiv auf größeren Umlaufbahnen, was ein stärkeres magnetisches Feld zur Folge hat.

Wenngleich stark diamagnetische Stoffe am leichtesten in die Schwebelage zu

bringen sind, ist das im Prinzip mit allen diamagnetischen Materialien möglich, – das verwendete magnetische Feld muss nur stark genug sein. Dem Physiker Andre Geim, nun an der Universität Manchester (England), gelangen 1997 am Hochfeldmagnetlabor in Nijmegen (Holland) einige spektakuläre Vorführungen. Unter anderem ließ er Haselnüsse und sogar einen lebenden Frosch schwerelos in einem Magnetfeld schweben.

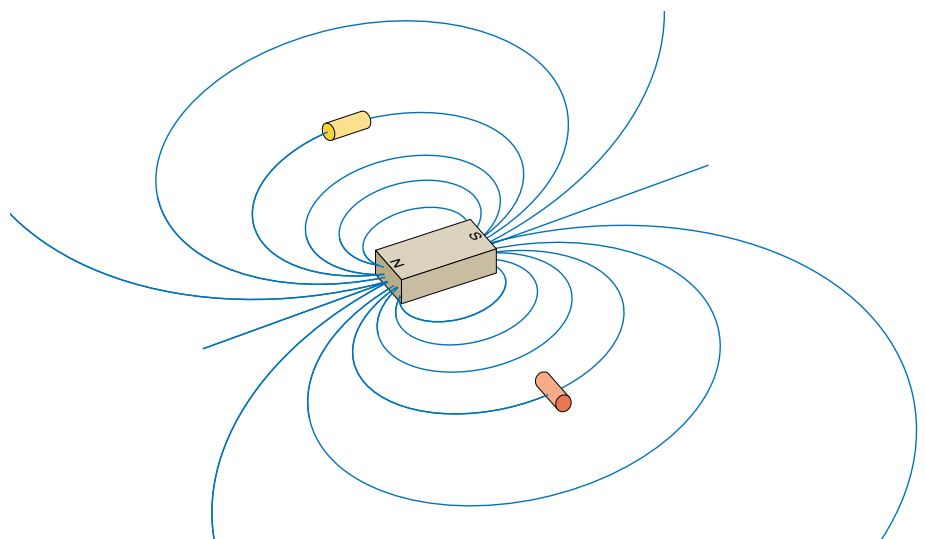
Eine Frage der Balance

Vom Aufbau einer Vorrichtung hängt es ab, ob ein diamagnetischer Körper wirklich stabil in der Schwebelage gehalten werden kann. Richtet man zum Beispiel zwei gleiche magnetische Pole gegeneinander aus, so heben sich die magnetischen Kräfte genau in ihrer Mitte auf. Platziert man ein Stückchen diamagnetischen Materials genau an dieser Stelle, so ist seine magnetische Energie gleich null. Jede Abweichung von dieser Position lässt die magnetische Energie anwachsen, sodass es sich wirklich um ein stabiles Gleichgewicht handelt. Doch so einfach dieses Prinzip klingt – in der Praxis sind erhebliche Schwierigkeiten zu überwinden.

Mit komplizierteren Feldgeometrien lassen sich auch anisotrope diamagnetische Materialien zum Schweben bringen – also solche Substanzen, deren Diamagnetismus von der Richtung des angewendeten Felds abhängt. Eine waagrecht liegende Platte aus pyrolytischem Graphit zum Beispiel wird von vertikalen Feldern stark abgestoßen, von Feldern in der horizontalen Ebene jedoch kaum beeinflusst. Noch aufwändiger wird es, wenn man einen schweren Körper wie einen Permanentmagneten schweben lassen will. Mir gelang das 1992 als Erstem, und zwar mit Hilfe eines Ensembles von kleinen Magneten, durch das ich die Feldstärke pro Masseneinheit erhöhen konnte.

Auch ein einzelner, fest installierter Magnet kann den nötigen Hub erzeugen, um einen anderen Magneten schweben zu lassen. Allerdings neigt diese Konstruktion gemäß Earnshaws Theorem dazu, instabil zu werden. Doch schon seit langem ist bekannt, dass stark diamagnetische Materialien wie Wismut oder Graphit die Levitation stabilisieren, wenn sie nahe dem schwebenden Magneten platziert sind. Balanciert man die Anordnung sorgfältig aus, so genügen dafür bereits schwach diamagnetische

▶ Die Bezeichnungen diamagnetisch und paramagnetisch sind vom Verhalten unterschiedlicher Substanzen in einem Magnetfeld abgeleitet. Ein Stäbchen aus paramagnetischem Material (gelb), das sich frei drehen kann, richtet sich parallel zum umgebenden Feld aus, während ein anderes aus diamagnetischem Material (rot) sich senkrecht zum Feld ausrichtet.



Materialien wie Kunststoffe oder Silizium. Geim und seinen Koautoren gelang es sogar unlängst, einen Permanentmagneten unterhalb eines starken supraleitenden Magneten stabil schweben zu lassen, indem sie ihre Finger zu Hilfe nahmen: Menschliches Gewebe ist wegen seines Wassergehalts schwach diamagnetisch, sodass Daumen und Zeigefinger ausreichen, in vertikaler Richtung ein stabiles Gleichgewicht zu gewährleisten (siehe Bild auf S. 39).

Anfangen von solch einfachen Anordnungen reicht das Spektrum möglicher Versuchsaufbauten bis hin zu ausgefeilten Designs, bei denen Computermodelle eingesetzt werden, um die Stabilität gegen äußere Störungen wie Vibrationen und Stöße zu berechnen. Ingenieure wie ich versuchen solche Einflüsse in den Griff zu bekommen, damit sich nicht durch Resonanzen uner-

wünschte Schwingungen aufschaukeln, die den Schwebestand schließlich zerstören würden.

Da das schwebende Objekt die übrigen Teile der Anordnung nicht berührt, lassen sich keine der üblichen Dämpfungstechniken wie etwa Stoßdämpfer einsetzen. Glücklicherweise liefern uns die starken Magnetfelder selbst eine Lösung für dieses Problem: die so genannte Wirbelstromdämpfung, die beispielsweise auftritt, wenn sich ein Permanentmagnet in der Nähe eines elektrischen Leiters bewegt. Die sich ändernden Magnetfelder induzieren einen Strom in dem Leiter, der sich dadurch erhitzt. Der Prozess dämpft also unerwünschte Bewegungen, indem er Bewegungsenergie in Wärme umwandelt.

Solange keine absichtliche Störung erfolgt, bleibt die Bewegung des schwebenden Objekts für lange Zeit erhalten.

Das ist in einigen Fällen eine überaus wünschenswerte Eigenschaft, zum Beispiel bei einem Schwungrad. Bereits 1966 zeigte Robert D. Waldron, damals für die Garret Corporation in Phoenix tätig, was möglich ist: Er brachte einen vier Zentimeter großen Graphitring zum Schweben und ließ ihn mit 100 Umdrehungen pro Minute im Vakuum rotieren. Die Reibungsverluste betragen weniger als vier Nanowatt.

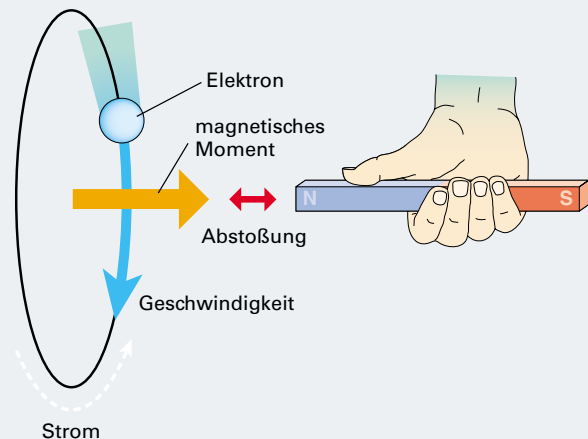
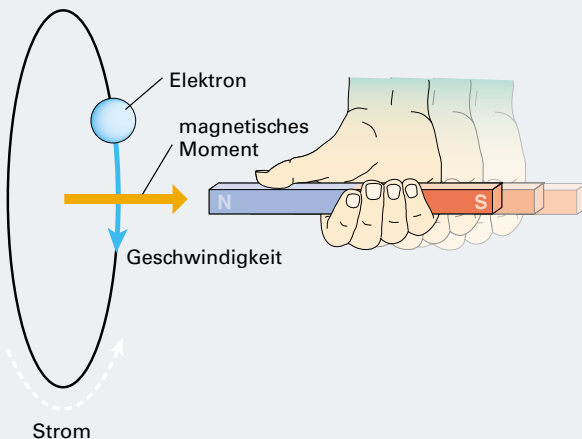
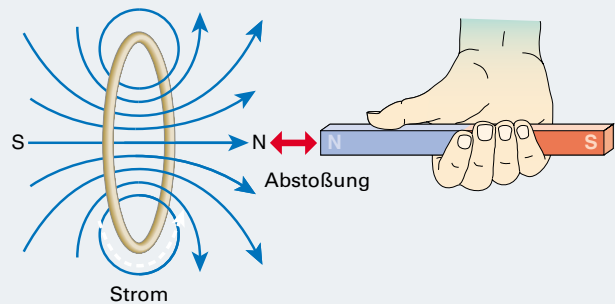
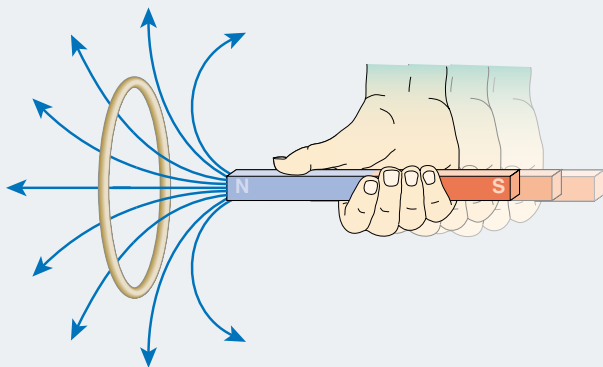
Die Magie der Levitation

Und sogar diese geringen Verluste ließen sich eventuell vermeiden. Ihre Ursache waren vermutlich parasitäre Wirbelströme in dem elektrisch leitenden Graphitring. Die Reibung ließe sich also drastisch reduzieren, wenn man den Ring aus einzelnen, voneinander isolierten Graphitteilchen herstellen würde – oder aus einem nichtleitenden diamagneti-

Warum diamagnetische Materialien Magnete abstoßen

Diamagnetismus entsteht durch eine atomare Version der Lenz'schen Regel. Diese besagt, dass die Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife (oben links) einen elektrischen Strom induziert, der seinerseits ein Magnetfeld erzeugt, das der ursprünglichen Änderung entgegenwirkt (oben rechts). In einem diamagnetischen Material agiert ein

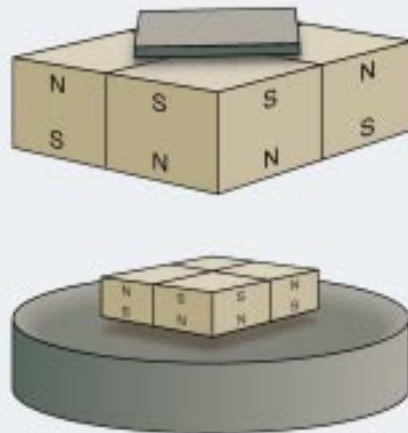
den Atomkern umkreisendes Elektron sozusagen wie eine Mini-Leiterschleife: Es beschleunigt oder verlangsamt seine Bewegung und wirkt so Veränderungen des äußeren Magnetfelds entgegen (unten). Die in einem diamagnetischen Objekt induzierte Magnetisierung führt deshalb stets zu einer abstoßenden Kraft.



Eigenstabil schwebende Magneten

Das Schweben von pyrolytischem Graphit

(grau) erfordert üblicherweise eine geeignete Anordnung von Neodym-Eisen-Magneten (braun), die seit den 1990er Jahren zur Verfügung stehen (oben und S. 44). Die Anordnung der Levitation umzukehren ist schwierig, weil die Neodym-Eisen-Legierung erheblich dichter ist als Graphit. Der Autor fand 1992 eine Lösung für das Problem: Er verwendete eine Komposition aus vier Neodym-Eisen-Magneten über einer schwach konkaven Basis aus Graphit. Dadurch werden die schwebenden Magneten an ihrer Position in der Mitte gehalten (unten).



AMERICAN SCIENTIST

▷ schen Material. Ein auf diese Weise optimierter Ring könnte in einem Vakuum für Monate oder gar Jahre rotieren.

Mittlerweile wird das eigenstabile freie Schweben mit Hilfe diamagnetischer Materialien seit über sechzig Jahren untersucht. Gleichwohl sind erstaunlich wenige Menschen mit dem verblüffenden Phänomen vertraut – das gilt selbst für viele Wissenschaftler und Ingenieure. Ein Grund dafür ist, dass der Effekt bislang nur spielerische, aber noch keine kommerzielle Anwendung gefunden hat. Dabei haben sich die Forscher in akademischen und industriellen Labors durchaus Gedanken über verschiedene Anwendungen gemacht.

Ein Hindernis für eine technische Realisierung war lange Zeit das Fehlen geeigneter Magnete. Die effizienten Neodym-Eisen-Magneten, mit denen die diamagnetische Levitation heute recht einfach zu bewerkstelligen ist, wurden erst in den 1980er Jahren entdeckt und sind erst seit den 1990er Jahren leicht erhältlich. Im Grunde hat der Physiker Werner Braunbeck die diamagnetische Levitation entdeckt, lange bevor die Zeit dafür reif war.

Ich machte mich Mitte der 1980er Jahre während meiner Doktorarbeit mit dem Phänomen vertraut. Damals entwickelte ich winzige robotische Manipulatoren. Könnte man sie in diesem kleinen Maßstab genauso präzise steuern wie ihre großen Vorbilder in der Fahrzeugproduktion, dann – so die damalige Idee – könnten sich Mikrofabriken realisieren lassen, deren Komplexität und Genauigkeit mit modernen Produktionseinrich-

tungen vergleichbar wäre. Beispielsweise wäre damit die Massenproduktion von kleinen Apparaturen möglich, um chemische Stoffe zu analysieren oder um Substanzen in großer Menge auf mögliche medizinisch wertvolle Reaktionen zu untersuchen.

Reibungs- und verschleißfreie Lager

Die Entwicklung eines solchen Systems ist natürlich mit zahlreichen technischen Hürden gespickt. Die Hauptschwierigkeit ist, einen zentimetergroßen Roboter autonom zu machen, denn er muss über eigene Energieversorgung, Steuereinrichtungen, Navigationssystem und so weiter verfügen. Ich erkannte bald, dass es sinnvoll ist, Energieversorgung und Steuerung nach außen zu verlegen und magnetische oder elektrische Kräfte von externen Vorrichtungen aus auf die robotischen Manipulatoren einwirken zu lassen. Trotzdem musste ich noch nach Lagern suchen, die eine Bewegung des Mikroroboters zuließen. Konventionelle Methoden versagen hier: Übereinander gleitende Flächen verursachen Probleme durch Reibung und Abnutzung; und winzige Räder sind schwierig herzustellen und zu montieren.

Levitation schien die ideale Lösung des Problems zu sein. Aber wie soll man tausend Mikroroboter gleichzeitig schweben lassen, die auch noch miteinander interagieren? Das Versagen nur eines einzigen Sensors oder Regelkreises würde sofort ein verheerendes Chaos auslösen. Ich begann daher, mich der diamagnetischen Levitation zuzuwenden, deren Eigenstabilität ein System von interagie-

renden Mikrorobotern möglich machen könnte.

Obwohl ich niemals eine Mikrofabrik gebaut habe, führte mich das Nachdenken über die winzigen Roboter dazu, mich mit dem grundlegenden Problem geeigneter Lager für Mikromaschinen auseinander zu setzen. Mikromotoren beispielsweise verfügen häufig über eine rotierende Achse, die sich wegen der Gleitreibung abnutzt und schwierig zu regeln ist. Einige Ingenieure haben versucht, aktive Levitation in solchen Motoren einzusetzen – mit unterschiedlichem Erfolg. Um die Effektivität diamagnetischer Lagerung zu untersuchen, habe ich vor einigen Jahren einen ein Millimeter großen Mikromotor gebaut, der aus einer sich selbst stabilisierenden schwebenden Anordnung von Magneten bestand, die elektromagnetisch angetrieben wurde. Der Motor brachte es in Luft auf 21 000 Umdrehungen pro Minute.

Solche Erfolge zeigen, dass sich mit der diamagnetischen Levitation vermutlich viele Probleme lösen lassen, die bei dem Lager einer Mikromaschine auftreten können. Mögliche Anwendungen gibt es reichlich. Zum Beispiel messen mechanische Kreisel Drehungen mittels einer beweglich gelagerten rotierenden oder schwingenden Masse. Ganz ähnlich nutzen Beschleunigungsmesser Testmassen, die mit einer Feder oder einem biegsamen Arm gelagert sind. Gravimeter benutzen eine an einer Feder befestigte Testmasse zur Messung der Schwerkraft; Neigungsmesser und Strömungsmessgeräte für Turbinen verwenden eine drehbar gelagerte Masse. In allen diesen Fällen ist die Lagerung der Testmasse kritisch für Empfindlichkeit und Genauigkeit, für den Messbereich, die Robustheit und die Kosten des Geräts.

Im Bereich hochpräziser wissenschaftlicher Sensoren hat die diamagnetische Levitation bereits ihren Wert bewiesen. So bauten Ivan Simon und seine Kollegen von dem Beratungsunternehmen Arthur D. Little in Cambridge (Massachusetts) einen Neigungsmesser mit einem schwebenden Graphitstab als Sensor. Das Gerät konnte Neigungswinkel von weniger als einem Mikroradian – also weniger als einem sechshunderttausendstel Grad – anzeigen. Die Gruppe meldete auch einen hochpräzisen Beschleunigungsmesser zum Patent an. Und W. M. Ponisowski von der Staatsuniversität Perm (Russland) baute Ma-

nometer, die noch Gasdrücke von 10^{-10} Torr nachweisen können, wie sie in Ultrahoch-Vakuumsystemen vorkommen. Als Sensoren dienen dabei rotierende Flügel, die diamagnetisch schweben. Meine Kollegen am SRI und ich haben mit ähnlich konstruierten Strömungsmessgeräten experimentiert, um die Reibungsprobleme konventioneller turbinenartiger Geräte zu vermeiden. Die Reibung in den Lagern führt auch zu einem beträchtlichen Widerstand bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und beschränkt so die Fähigkeit konventioneller Instrumente, hohe Strömungsraten zu messen. Diamagnetische Lager vermeiden beide Probleme und erlauben so einem Messgerät, über eine enorme Spanne von Strömungsraten genau zu arbeiten.

Hohe Messgenauigkeit von Sensoren

Obwohl diese Geräte höchst unterschiedliche Größen messen, nutzen sie alle die Fähigkeit der Levitation, eine Lagerung mit sehr geringer Steifigkeit in einer Richtung (oder um eine Achse) zu ermöglichen. Dadurch erreichen sie ihre hohe Messgenauigkeit. Die geringe Steifigkeit erlaubt es den Testmassen, bereits auf sehr kleine Kräfte und Drehmomente zu reagieren. In herkömmlichen Sensoren dienen so genannte Flexures – mechanische Elemente, die sich unter Kräfteinfluss verbiegen oder verdrillen – der Lagerung von Testmassen. Diese Elemente werden oft mit den gleichen Methoden hergestellt, wie sie bei der Massenproduktion von Mikrochips eingesetzt werden. Solche Mikroflexures arbeiten bei Frequenzen oberhalb von 100 Hertz sehr effektiv.

Niedrigere Frequenzen erfordern eine geringere Steifigkeit und sind deshalb schwieriger herzustellen; zudem sind sie oft schwach und bruchanfällig. Im Gegensatz dazu sind selbst extrem kleine diamagnetische Lager mit geringer Steifigkeit außergewöhnlich unempfindlich gegen Stöße, da sie keine leicht zerbrechlichen Teile enthalten. Wir können deshalb erwarten, dass die diamagnetische Levitation schon bald ihre kommerzielle Anwendung in einer neuen Klasse von hochpräzisen und doch unter rauen Bedingungen einsetzbaren Mikrosensoren findet.

Es gibt natürlich auch Sensoren, deren Empfindlichkeit nicht von einer geringen Steifigkeit und niedrigen Reso-

nanzfrequenzen abhängt. So nutzen einige Konstruktionen Testmassen, die mit hoher Resonanzfrequenz vibrieren. Der Sensor reagiert auf seinen spezifischen Stimulus (sei es eine Beschleunigung, Anziehungskraft, Rotation oder etwas anderes) mit einer Änderung der Resonanzfrequenz. In diesen Geräten darf die Vibration praktisch nicht gedämpft werden, damit die Resonanzfrequenz scharf definiert ist und sich mit hoher Genauigkeit messen lässt. Auch hier könnte die diamagnetische Levitation Vorteile bieten, da sie erlaubt, die Dämpfungsverluste zu vermeiden, die in konventionellen Lagern und festen Flexures auftreten.

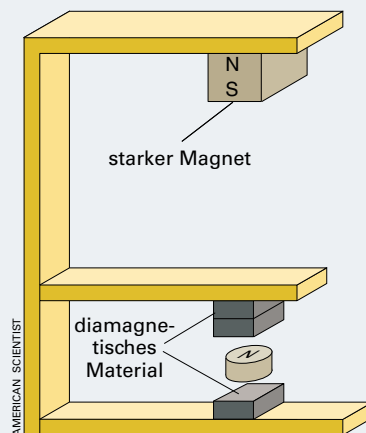
Wieder andere Sensoren basieren auf der Isolierung einer Testmasse, sei es die thermische Isolierung in einem Bolometer (Strahlungsmesser) oder die mechanische Isolierung gegen unerwünschte Vibrationen. Auch für diese Art von Sensoren bietet sich der Einsatz der diamagnetischen Levitation an, da sich mit ihr

Massen ohne physischen Kontakt lagern lassen.

Schon bevor sie in kommerziellen Sensoren eingesetzt wird, könnte diamagnetische Levitation eine Anwendung in industriellen Reinräumen finden. Der Vorteil diamagnetischer Lager in diesem Bereich ist es, dass sie keinen Abrieb aufweisen und kein Schmiermittel benötigen – und deshalb keine frei umherschwebenden Partikel erzeugen, die empfindliche Prozesse stören könnten wie zum Beispiel die Produktion elektronischer Bauteile oder pharmazeutischer Produkte.

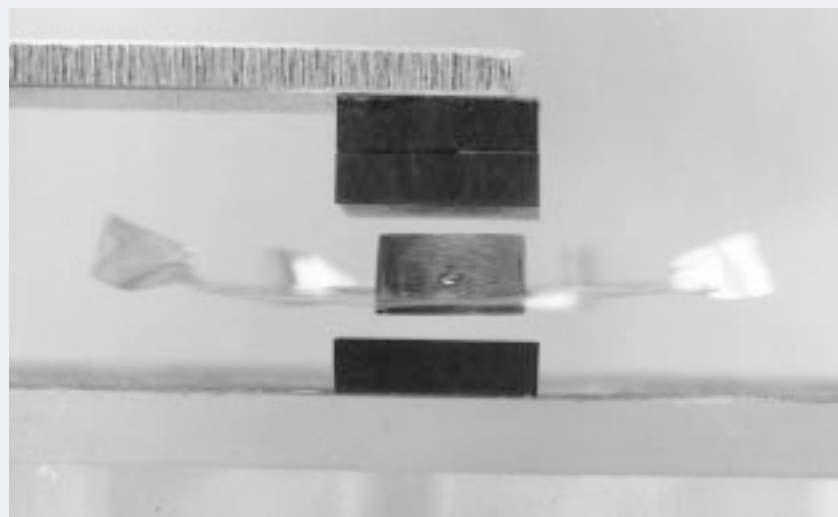
Gegenwärtig werden in Reinräumen Gasdrucklager und magnetische Lager mit aktiver Rückkopplung eingesetzt, doch diese Systeme haben eine Reihe von Nachteilen. Versagt bei einem aktiv geregelten Levitationssystem ein Sensor oder fällt die Stromversorgung aus, kann die bewegliche Plattform auf ihre Führungsschienen stürzen und dabei Partikel ▶

Reibungsfreier Rotor



Um einen schweren Körper schweben zu lassen, braucht es zunächst einen starken Magneten, der ihn gegen die Schwerkraft anhebt. Diamagnetische Materialien ober- und unterhalb des Körpers sind nötig, um den Schwebезustand zu stabilisieren (links).

Mit einer solchen Konstruktion realisierten der Autor und seine Kollegen den Prototyp eines Strömungsmessgeräts, indem sie Flügel an dem schwebenden Magneten anbrachten (Foto unten). Solche magnetisch gelagerten Rotoren drehen sich reibungsfrei.





◀ Unterschiedlich geformte Teile aus pyrolytischem Graphit – bei diesem Experiment insgesamt rund 120 Stück – schweben auf faszinierende Weise über einer Unterlage aus Permanentmagneten. Eine Apparatur, die über einen Regelkreis eine vergleichbare Anzahl unterschiedlicher Gegenstände stabil schweben lassen könnte, wäre eine große technische Herausforderung. Dieses passive System diamagnetischer Levitation ist hingegen äußerst einfach aufzubauen.

übertreffen würden. Wenn sich solche Werkstoffe finden und entwickeln ließen, würde das bislang wenig bekannte Kuriosum der diamagnetischen Levitation sofort zu einer bedeutenden Technologie werden. Verkehrsingenieure zum Beispiel könnten mit dieser Technik neue Magnetschwebbahnen entwickeln.

Aber in dem Maße, in dem sich Magnete, Werkstoffe und Verfahren schrittweise verbessern lassen, findet die Schwebetechnik mittels diamagnetischer Materialien sicherlich auch ohne einen solchen technologischen Durchbruch immer neue praktische Anwendungen. Und immerhin ist die diamagnetische Levitation als faszinierendes physikalisches Phänomen weiterhin Thema der Grundlagenforschung. Ich bin überzeugt davon, dass die künftige Arbeit auf diesem Gebiet weitere faszinierende Überraschungen bereithält. ◀

▷ freisetzen, welche die Anlage kontaminieren. Und Gasdrucklager können natürlich nicht bei Prozessen eingesetzt werden, die ein Vakuum erfordern. Die diamagnetische Levitation löst all diese Probleme.

Vor mehreren Jahren baute ich mit meinen Kollegen am SRI im Auftrag eines Kunden den Prototyp eines Systems, das unter Reinraumbedingungen im Vakuum eingesetzt wird. Die schwebende Struktur, die sowohl Permanentmagneten zum Anheben als auch diamagnetisches Material zur Stabilisierung enthält, trägt eine Palette mit vielen Metallscheiben, auf die eine spezielle Beschichtung aufgetragen werden soll. Die schwebende Masse ist etwa einen Meter lang und hoch sowie zehn Zentimeter breit. Mit einem Gewicht von etwa 13 Kilogramm – abhängig von der Anzahl der Scheiben – ist sie die größte Masse, die jemals per diamagnetischer Levitation (ohne den Einsatz von Supraleitung) angehoben wurde.

Alternative zu Weltraummissionen

Diamagnetische Levitation lässt sich auch noch für andere spezielle Anwendungen einsetzen – zum Beispiel, um den Einfluss der Schwerelosigkeit auf lebende Organismen, Werkstoffe und Apparaturen zu untersuchen. Solche Anwendungen erfordern zumeist den Einsatz sehr starker Felder, die von supraleitenden Magneten erzeugt werden. Obwohl eine solche Ausrüstung teuer ist, sind diese Kosten doch viel geringer als für eine echte Weltraummission.

Solange das schwebende Objekt nur klein genug ist, lassen sich solche Experimente auch ohne supraleitende Magnete ausführen. Nach meiner Schätzung müssten moderne Permanentmagneten in der Lage sein, Wassertropfen bis zu einer Größe von 160 Mikrometern schweben lassen zu können. Solche Levitationen im kleinen Maßstab stellen zwar eine technische Herausforderung dar, aber sie sind nicht utopisch und können kostengünstig permanente Schwerelosigkeit (oder zumindest Mikrogravitation) erreichen, ohne tatsächlich in die Erdumlaufbahn fliegen zu müssen.

Diamagnetische Kräfte könnten sich auch in der Raumfahrt als sehr nützlich erweisen. In der Schwerelosigkeit des Alls wären größere Abstände zwischen dem schwebenden Gegenstand und dem Rest der Apparatur möglich. So ließen sich beispielsweise empfindliche Experimente von störenden Vibrationen isolieren oder die Drallräder lagern, die in Raumfahrzeugen zur Stabilisierung eingesetzt werden. Diamagnetische Kräfte könnten es Astronauten auch ermöglichen, Objekte zu handhaben, ohne sie körperlich zu berühren.

Im Weltall ließe sich sogar der Hauptnachteil der diamagnetischen Levitation überwinden: Der bislang erreichbare Lagerdruck ist zu niedrig für die meisten mechanischen Anwendungen. Allerdings gibt es keinen fundamentalen Grund, der gegen spezielle, maßgeschneiderte Materialien spräche, deren Diamagnetismus die heute erreichbaren Werte um das Zehn- oder gar Hundertfache

Ronald E. Pelrine studierte Physik am Massachusetts Institute of Technology und an der Universität von Washington in Seattle. Nach seiner Promotion 1989 im Fach Maschinenbau an der Universität von Texas in Austin ging er zur Firma SRI International, wo er jetzt als leitender Forschungsingenieur tätig ist.

© American Scientist Magazine (www.americanscientist.org)

Abgehoben. Schweben in elektromagnetischen Feldern. Von Felix Voigt und Klaus Hinsch in: Physik in unserer Zeit, Bd. 34, Heft 5, S. 232 (2003)

Freely suspended bodies in electric and magnetic fields. Von Werner Braunbeck in: Zeitschrift für Physik, Bd. 112, S. 753 (1939)

On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. Von Samuel Earnshaw in: Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Bd. 7, S. 97 (1842)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.