

## Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung.....	2
2. Problematik des Schwebens .....	2
3. Diamagnetische Levitation .....	3
3.1 Die drei Arten von Magnetismus.....	4
3.2 Funktionsweise der diamagnetischen Levitation.....	5
3.2.1 Erklärung der diamagnetischen Wirkung.....	5
3.2.2 Arten von diamagnetischen Stoffen .....	6
3.2.3 Supraleitende Levitation.....	7
3.2.4 Verschiedene Arten des Aufbaus .....	8
3.2.5 Berechnung der Kräfte bei der diamagnetischen Levitation.....	10
3.3 Versuche zum diamagnetischen Schwebens .....	11
3.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsvorbereitungen .....	11
3.3.2 Versuche mit der Apparatur .....	11
3.3.3 Erklärung .....	12
4. Das Levitron .....	14
4.1 Aufbau des Levitrons.....	14
4.2 Funktionsweise des Levitrons .....	15
4.2.1 Vertikale Stabilität des Levitrons .....	15
4.2.2 Horizontale Stabilität des Levitrons .....	16
4.2.3 Einfluss der Umdrehungsgeschwindigkeit des Kreisels .....	17
4.2.4 Einfluss der Masse des Kreisels .....	17
4.2.5 Flugzeit des Kreisels.....	18
5. Anwendungsbereich.....	19

## **1. Einleitung:**

Schon immer haben Magnete vor allem bei Kindern, aber auch bei Erwachsenen Faszination hervorgerufen. So werden diese in vielerlei Spielzeugen verwendet, aber auch praktische Anwendungen gibt es in häufiger Anzahl. Beispielsweise werden Magnete zur Befestigung von Informationszetteln an Kühlschränken, zum Verschließen von Schränken, zur Stromgewinnung beim Fahrraddynamo oder auch in Lautsprechern eingesetzt. Doch jüngste Forschungen eröffnen ein neues Anwendungsgebiet des Magnetismus. Bei diesem Gebiet handelt es sich um die magnetische Levitation. Dort wird versucht einen Körper oder auch Magnete selbst zum Schweben zu bringen. Da dieses Gebiet nicht nur spielerischen Wert hat, sondern vor allem auch viele sehr nützliche Anwendungsbereiche besitzt und die Physik dahinter sehr interessant ist, wird ein Einblick in die magnetische Levitation gegeben. Aus diesem Grund sollen zwei verschiedene Beispiele der Levitation aufgeführt, ihr Aufbau geklärt und auf ihre Funktionsweise näher eingegangen werden. Bei den beiden Gebieten handelt es sich zum einen um die diamagnetische Levitation und zum anderen um das Levitron. Wobei die folgende Arbeit zunächst auf das erst genannte eingeht.

## **2. Problematik des Schwebens:**

Dass es grundsätzlich nicht machbar ist, einen Magneten in einem statischen Magnetfeld stabil und frei schweben zu lassen, wurde vom Physiker Earnshaw schon im Jahre 1842 festgestellt. Jedoch wären zwei mögliche Ansätze zu erwägen, einen Magneten schweben zu lassen [2].

Die eine Art bestünde darin, einen Magneten an der Decke zu befestigen und zu versuchen einen anderen stabil in der Luft zu halten. Dabei müssten aber die anziehenden Kräfte der ungleichnamigen Pole exakt genauso groß sein wie die Gewichtskraft des Magneten und die abstoßenden Kräfte der gleichnamigen Pole. Schon die aller kleinste Bewegung des sich in der Luft befindlichen Magneten würde bewirken, dass der Magnet auf den Boden fällt oder von den oben befestigten Magneten angezogen wird. In diesem Fall ist die Anordnung zwar horizontal stabil, aber nicht vertikal. Demzufolge gelingt es nicht den Magneten stabil in der Schwebe zu halten.

Die andere Möglichkeit bestünde darin, durch die abstoßende Kraft eines sich am Boden befindlichen Magneten einen anderen Magneten so auszubalancieren, dass er in der

Luft stabil schwebt. Jedoch ist die Anordnung dann nicht horizontal stabil, d.h. er würde seitlich wegkippen, sich schließlich umdrehen und dann vom unteren Magneten angezogen werden. In diesem Falle würde man den Magnet zum einen leicht zum Runterfallen bringen, weil er sich auf der Spitze des Magnetfelds befindet und seitlich leicht abrutschen kann. Zum anderen liegt es daran, dass die ungleichnamigen Pole sich anziehen und so den Magneten in der Luft zum Umdrehen bringen [11].

Die einzige Möglichkeit, die Stabilität eines magnetischen Dipols in der Luft zu gewährleisten bestünde darin, dass die magnetischen Äquipotentiallinien ein Tal bilden. In diesem Tal könnte der Magnet stabil schweben, da dieser durch höheres Potential an den Rändern davon abgehalten würde umzukippen. Ein Minimum des Potentials zu schaffen, ist jedoch nicht möglich, wie sich durch die Gleichungen von Maxwell beweisen lässt. Jene Gleichungen besagen nämlich, dass

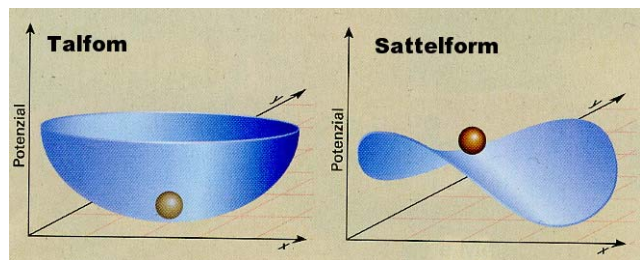


Abb.1 Magnetischer Potentialverlauf

das magnetische Potential an jedem Punkt im Raum dem Mittelwert des Potentials der umgebenden Punkte entspricht. Aus diesem Grund ist es nicht möglich ein Minimum des Potentials zu erreichen. In direkter Umgebung muss es stets sowohl Punkte mit höherer als auch mit niedrigerer Energie geben. Die beste Möglichkeit des Potentialverlaufs, welche sich erzeugen lässt, ist ein sattelförmiger Verlauf. Dies würde aber auch nicht reichen, um einen Magneten stabil in der Luft schweben zu lassen, da er immer noch in zwei Richtungen hinunter fallen kann [2].

### **3. Diamagnetische Levitation:**

Zunächst hat es den Anschein, dass es nicht möglich ist, einen Körper stabil schweben zu lassen. Trotz der oben genannten Gründe, welche dagegen sprechen, dass man stabiles Schweben durch Magnete schaffen kann, ist es dennoch gelungen. Zwei verschiedene Prinzipien ermöglichen ein stabiles und freies Schweben. Die eine Möglichkeit ist die diamagnetische Levitation.

### **3.1 Die drei Arten von Magnetismus:**

Um dieses Prinzip zu verstehen ist es zunächst wichtig, den Unterschied zwischen den drei verschiedenen Arten von Magnetismus, nämlich Paramagnetismus, Ferromagnetismus und Diamagnetismus, zu zeigen. Paramagnetische Materialien haben die Eigenschaft, in ein Magnetfeld hineinzuwandern. Dies liegt daran, dass diese Substanzen die Feldlinien von einem äußeren Magnetfeld in sich verdichten und dadurch angezogen werden. Um die genaue Funktionsweise zu zeigen, sollte kurz auf die atomare Struktur eingegangen werden. Die Elektronen in den Atomen haben zwei verschiedene magnetische Momente. Das eine Moment ist das Spinnmoment. Unter dem Spin des Elektrons versteht man die Richtung in der es sich um die eigene Achse dreht. Bei der Besetzung von Elektronenschalen kommt es oft vor, dass mehr Elektronen sich in die eine Richtung drehen, als in die andere Richtung. Dadurch entsteht ein magnetisches Moment, nämlich das Spinnmoment. Dies ist nur bei Atomen mit ungepaarten Elektronen der Fall, wie sie es bei paramagnetischen Stoffen immer sind. Das andere Moment ist das Bahnmoment. Die Elektronen drehen sich nicht nur um sich selbst, sondern befinden sich auch auf bestimmten Bahnen. Durch diese Bahnbewegung kommt ein weiteres magnetisches Moment hinzu. Aus diesen beiden magnetischen Momenten, entsteht ein Gesamtdrehimpuls. Dieser orientiert sich an den äußeren Feldlinien und ist deshalb für die anziehenden Kraft des paramagnetischen Materials verantwortlich. Beispiele für Paramagnetismus sind elementarer Sauerstoff, Stickstoff oder das Mineral Biotit. Weiterhin haben paramagnetische Stoffe die Eigenschaft, dass sie nur in einem Magnetfeld wirken, da sich nur dort der Gesamtdrehimpuls ausrichten kann [4].

Dies unterscheidet sie von den Ferromagneten. Diese können auch ohne magnetisches Feld eine magnetische Wirkung zeigen. Bei Ferromagnetismus ist nicht mehr die magnetische Wechselwirkung ausschlaggebend, welche durch ein äußeres Magnetfeld entsteht, sondern die Austauschwechselwirkungen. Diese Austauschwechselwirkung ist ein quantenphysikalischer Effekt, welcher für die parallele Anordnung der Spinnmomente entscheidend ist. Diese Spinnmomente erzeugen dann auch, wie beim Paramagnetismus, die magnetische Wirkung. Weiterhin ist Ferromagnetismus nur bei Festkörpern vorzufinden. Eine andere Eigenschaft von ferromagnetischen Substanzen liegt darin, dass sie ab einer bestimmten Temperatur, welche als Curie-Temperatur bezeichnet wird, ihre ferromagnetische Wirkung verlieren. Jedoch bleibt der Paramagnetismus vorhanden. Beispiele für ferromagnetische Materialien sind z.B. Elemente wie Eisen,

Nickel und Kobalt oder Legierungen wie NiMo („Permalloy“) und NiCuCo („Mumetall“) [4;8].

Die letzte Grundart des Magnetismus ist der Diamagnetismus. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er Permanentmagneten abstößt. Aus diesem Grund ist als einziges der Diamagnetismus für eine magnetische Levitation geeignet.

### **3.2 Funktionsweise der diamagnetischen Levitation:**

#### **3.2.1 Erklärung der diamagnetischen Wirkung:**

Den Grund für die abstoßende Wirkung von diamagnetischen Materialien lässt sich an deren atomaren Aufbau klären. Der Diamagnetismus funktioniert nur bei Elektronenpaaren. Bei jenen entsteht kein magnetisches Moment, weil der Spinnmoment sich von jeweils zwei Elektronen auslöscht. Dadurch gibt es keinen Spinnmoment, welcher sich an einem äußeren Magnetfeld orientieren kann. Dies unterscheidet den Diamagnetismus vom Paramagnetismus. Da gepaarte Elektronen in beinahe jedem Material zu finden sind, haben auch fast alle Substanzen eine diamagnetische Wirkung. Jedoch überwiegt die paramagnetische oder ferromagnetische Wirkung bei weitem, falls die Substanz diese besitzt. In diesem Falle ist nur noch eine anziehende Wirkung festzustellen. Für die diamagnetische Wirkung ist allein der Bahndrehimpulseffekt entscheidend. Wenn ein Magnet auf das

diamagnetische Material hin bewegt wird, dann beschleunigen oder verlangsamen sich die Elektronen auf der Umlaufbahn. Wie jede bewegte elektrische Ladung, erzeugen dann auch

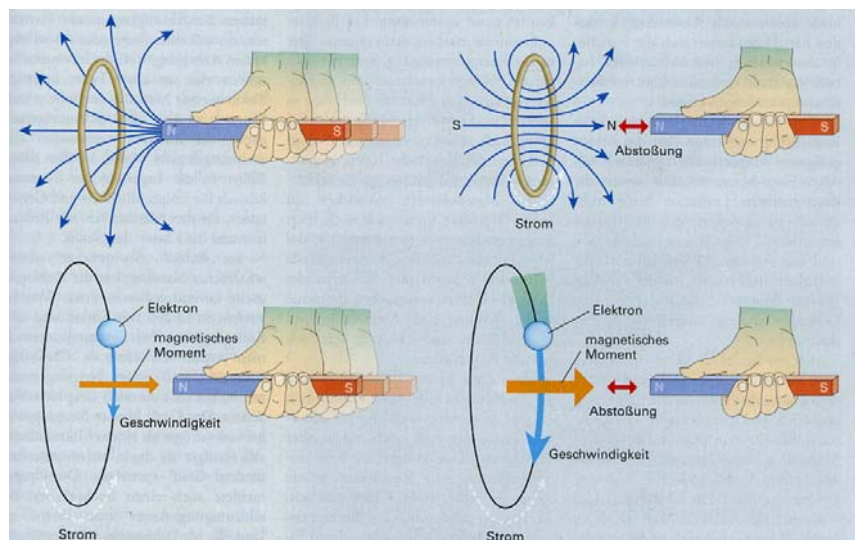


Abb. 2: Funktionsweise des Diamagnetismus

diese Elektronen ein Magnetfeld, welches dem äußeren Magnetfeld entgegen wirkt. Dies lässt sich gut mit einem anderen Versuch aus der Physik vergleichen. Wenn man ein magnetischen Dipol in eine Leiterschleife hinein bewegt, wird dort ein elektrischer Strom induziert, der auch

ein Magnetfeld erzeugt, welches der ursprünglichen Änderung entgegenwirkt. Genauso wie die Leiterschleife wirkt auch das Elektron auf der Umlaufbahn. Die Umlaufbahn lässt sich einfach mit einer kleinen Leiterschleife vergleichen. Das Prinzip ist bei beiden genau das gleiche. Die diamagnetische Levitation widerspricht nicht der Theorie von Earnshaw, wie es vielleicht zunächst den Anschein hat. Bei dieser Theorie wird nur gesagt, dass es mit einem statischen Magnetfeld kein stabiles Schweben gibt. Jedoch handelt es sich bei der diamagnetischen Levitation um kein statisches Feld, da sich das Magnetfeld durch die Bewegung des Körpers ändert. Wenn der diamagnetische Körper auf den Magneten zukommt, wird ein Magnetfeld gegeninduziert und stößt den Körper wieder leicht nach oben. Dadurch wird die Kraft wieder geringer und er fliegt wieder leicht nach unten. Dies wiederholt sich ständig und deshalb handelt es sich nicht um ein statisches Magnetfeld. Im Prinzip reagiert das diamagnetische Material wie ein aktives Rückkopplungssystem mit Sensoren und elektronischer Steuerung, welches den Schwebezustand stabilisiert. Dass der Körper sich nicht bewegt, lässt sich ganz einfach ausschließen: Falls sich dieser Körper in Ruhe befinden würde, würde auch durch die Elektronen kein magnetisches Feld induziert werden. Dadurch gäbe es keine Kraft, welche den Körper in der Schwebelage hält. Aus diesem Grund muss sich der Körper immer in Bewegung befinden [2].

### **3.2.2 Arten von diamagnetischen Stoffen:**

Für die diamagnetische Levitation werden Substanzen gebraucht, die ausschließlich diamagnetisch sind. Falls sie paramagnetische oder auch ferromagnetische Wirkung besitzen, kann man kein Schweben wegen der anziehenden Kraft erreichen.

Für Versuche über Neodym-Magneten benötigt man sehr starke diamagnetische Stoffe. Bei schwach diamagnetischen Materialien reicht das magnetische Feld nicht aus, um den Körper zum Schweben zu bringen. In diesem Fall überwiegt die Gewichtskraft der abstoßenden Kraft bei weitem. Stark diamagnetische Stoffe sind beispielsweise Wismut oder auch pyrolytisches Grafit, welche sich für ein stabiles Schweben über Neodym-Magneten eignen. Wismut ist das stärkste diamagnetische Metall, das es gibt. Das pyrolytische Grafit hat die Eigenschaft, dass sich einige Hüllenelektronen effektiv auf größeren Umlaufbahnen bewegen. Dadurch wird durch die Induktion ein stärkeres Magnetfeld erzeugt. Weiterhin funktioniert diamagnetisches Schweben auch schon mit Grafit, welches aus feinem Grafitpulver gepresst ist. Jedoch ist die diamagnetische Wirkung nicht so stark, wie bei dem pyrolytischen Grafit.

Um noch stärkere Magnetfelder zu erzeugen als man mit Neodym-Magneten erreicht, können Elektronmagnete verwendet werden. Mit einigen dieser Elektromagnete gelingt es auch schwach diamagnetische Stoffe zum Schweben zu bringen, wie z.B. Wasser. Bei Gegenständen die einen relativ hohen Wasseranteil haben, gelingt deshalb dann auch eine diamagnetische Levitation. So kann man beispielsweise einen Wassertropfen, eine Erdbeere oder sogar einen Frosch durch einen starken Elektromagneten zum Schweben bringen [2;11].

### **3.2.3 Supraleitende Levitation:**

Die perfektsten Diamagneten sind Supraleiter. Gekennzeichnet sind diese Materialien durch die Eigenschaft, dass bei diesen unter einer bestimmten Temperatur – der sog. Sprungtemperatur – Supraleitung einsetzt. Bei Supraleitung verschwindet der elektrische Widerstand und es entstehen perfekte elektrische Leiter. Durch den Verlust des elektrischen Widerstands, können sich die Elektronen sehr frei bewegen. Wenn jetzt ein Magnetfeld auftritt, wird sofort das gleiche magnetische Feld gegeninduziert. Deshalb verdrängen Supraleiter, welche unter die Sprungtemperatur gekühlt sind, die magnetischen Feldlinien komplett aus ihrem Inneren. Dadurch entsteht eine sehr stark abstoßende Kraft. Die Sprungtemperatur der meisten Supraleiter, liegt sehr nahe am absoluten Nullpunkt und ist somit relativ schwer zu erreichen. Inzwischen wurden aber Hochtemperatursupraleiter entwickelt, welche schon bei viel höheren Temperaturen supraleitend wirken. Ein Beispiel dafür ist das keramische Material Yttriumbariumkupferoxid. Dieses zeigt schon unter 95K Supraleitung und lässt sich mit flüssigen Stickstoff sehr leicht unter diese Sprungtemperatur abkühlen. Zur weiteren Erläuterung der supraleitenden Levitation muss zunächst zwischen Supraleitern vom Typ I und II unterschieden werden. Typ I besitzt die Eigenschaft, dass seine Supraleitung über einer gewissen Stärke des äußeren magnetischen Feldes  $H_{c2}$  zusammenbricht. Zu Typ I gehören alle elementaren Supraleiter außer Niob und Vanadium. Auch bei Typ II bricht die Supraleitung ab einer Stärke  $H_{c2}$  zusammen. Jedoch gibt es noch ein Intervall zwischen den Stärken  $H_{c1}$  und  $H_{c2}$  ( $H_{c1} < H < H_{c2}$ ), in dem ein weiterer Effekt auftritt. Bei dieser Feldstärke  $H$  wird das äußere Magnetfeld nur teilweise verdrängt und ein magnetischer Fluss durchdringt den Supraleiter in Form von Stromwirbeln, welche als Flusslinien oder –wirbel bezeichnet werden. Diese Flusswirbel sind von großer Bedeutung für die supraleitende Levitation, da durch diese erst die Stabilität entsteht. Wenn ein Permanentmagnet über einen gekühlten Supraleiter gebracht wird, entsteht

durch diese Wirbel eine Verankerung zum Magneten. Vergleichen lässt sich dieses Phänomen mit einem Körper der in allen Richtung mit Schraubenfedern befestigt ist. Wird der Körper bewegt, wirken die Schraubenfedern so, dass er wieder in die Ursprungslage zurückkommt. Der gleiche Effekt entsteht eben auch durch diese Flussdichtenverankerung. Da dieser Effekt für eine stabile Levitation benötigt wird, eignen sich nur Supraleiter des Typus II für eine stabile supraleitende Levitation [1].

### 3.2.4 Verschiedene Arten des Aufbaus:

Es gibt viele verschiedene Arten für den Aufbau einer diamagnetischen Levitation. Häufig Verwendete sollen im nächsten Abschnitt gezeigt werden.

Bei Verwendung von Supraleitern wird hauptsächlich der folgende Aufbau verwendet: Unten befindet sich das supraleitende Material, dass z.B. durch flüssigen Stickstoff gekühlt wird. Über diesem Supraleiter kann man dann einen Permanentmagneten zum Schweben bringen. Stabilisiert wird dieser eben durch die Flussdichtenverankerung und durch die abstoßende Kraft des Diamagnetismus. Andere Versuchsaufbauarten lassen sich aus dem Grund der Kühlung relativ schwierig herstellen. So ist

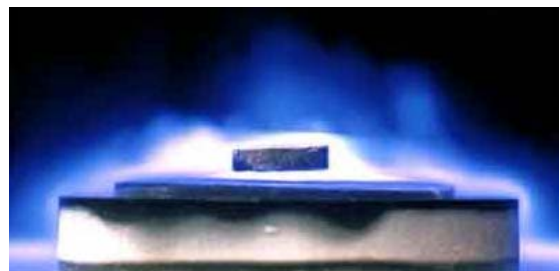


Abb. 3 Levitation: Magnet über Supraleiter

z.B. schwer einen Supraleiter über Permanentmagneten schweben zu lassen, da der Supraleiter unter die Sprungtemperatur gekühlt werden muss. Dies ist mit Schwierigkeiten verbunden, wenn der Supraleiter in der Luft schwebt.

Ohne den Einsatz von Supraleitern gibt es weitere Methoden eine diamagnetische Levitation zu erreichen, die ebenfalls des öfteren Einsatz finden. Die eine Möglichkeit

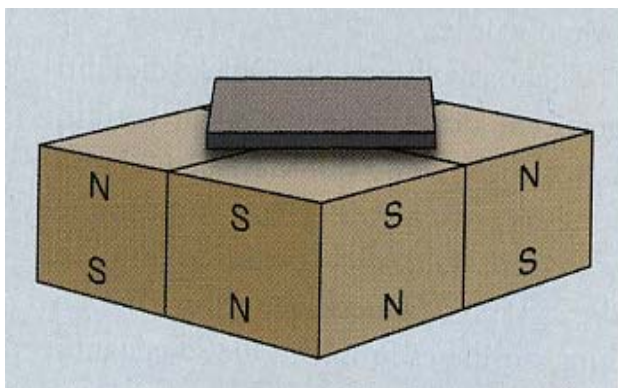


Abb. 4: Diamagnet über Permanentmagneten

besteht darin, einen diamagnetischen Körper über mindestens vier Permanentmagneten schweben zu lassen. Mit wenigeren Magneten würde es nicht funktionieren, da es dann keinen Ort gibt, an dem ein geringes Potential ist. Bei vier Magneten z.B. ist das geringste Potential in der Mitte der vier Magneten und dort wird auch das

diamagnetische Material schweben. Bei einer geringeren Anzahl von Magneten würde

der Körper oberhalb von den Magneten zur Seite runterfallen. Um ein stabiles Schweben zu schaffen, muss zum einen die Kraft welche das diamagnetische Material zu schweben bringt groß genug sein. Nur wenn die Gewichtskraft überwunden werden kann, hebt der Körper vom Magneten ab. Um dies zu erreichen, werden zum einen sehr starke Permanentmagnete gebraucht. Dies wird derzeit nur mit den Neodym-Magneten geschafft. Zum anderen sollte das Gewicht des diamagnetischen Körpers durch eine möglichst geringe Höhe klein gehalten werden. Die Grundflächengröße des Körpers hat dabei beinahe keinen Einfluss. Denn je größer die Grundfläche ist, desto mehr Elektronen sind nahe am Magneten und dadurch kommt auch mehr Auftriebskraft zu Stande. Wenn die Kraft der Magnete groß genug ist, schwebt der Körper dann stabil über den Magneten. Er orientiert sich so, dass er an einem Ort von möglichst geringem magnetisches Potential ist.

Ein anderer Versuchsaufbau für die diamagnetische Levitation sieht folgendermaßen aus: Diesmal wird nicht ein diamagnetischer Stoff zum Schweben gebracht, sondern ein kleiner Permanentmagnet. Der Versuch ist so aufgebaut, dass sich ein kleiner Permanentmagnet zwischen zwei großen diamagnetischen Platten

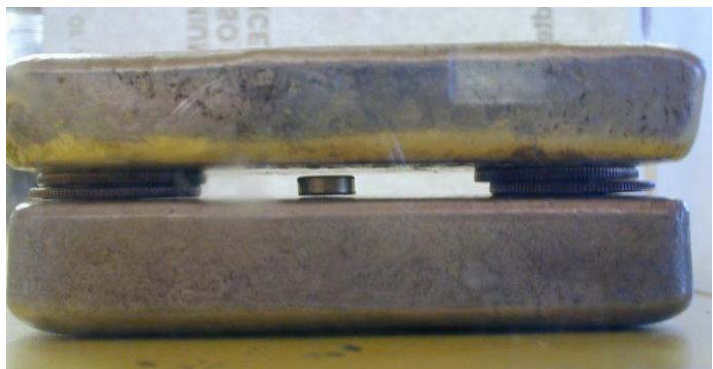


Abb. 5: Schwebender Magnet zwischen diamagnetischen Platten

befindet. Damit der Versuch funktioniert, muss die Masse des Magneten sehr klein sein und die diamagnetischen Substanzen sehr stark. Andernfalls reicht die abstoßende Kraft

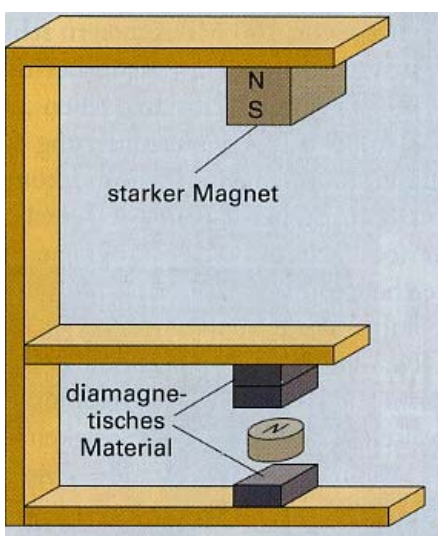


Abb. 6: Abgeänderter Aufbau

der unteren Platte nicht aus, um den Magneten darüber schweben zu lassen.

Dieser Versuch lässt sich noch geringfügig verändern, um auch etwas schwerere Magneten zwischen den diamagnetischen Platten zum Schweben zu bringen. Um dies zu ermöglichen, wird ein starker Magnet hinzugefügt, welcher in gewisser Höhe oberhalb der Apparatur befestigt wird. Dieser Magnet schafft es dann die Gewichtskraft des kleinen Permanentmagneten zu überwinden. Die beiden diamagnetischen Platten wirken nun stabilisierend. Wan-

dert der Permanentmagnet nach oben, so wird er von der oberen Platte abgestoßen. Bewegt er sich nach unten, so wird er von der unteren Platte abgestoßen. So bleibt er stabil zwischen beiden Platten in der Schwebelage [2;9].

### 3.2.5 Berechnung der Kräfte bei der diamagnetischen Levitation:

Für ein Rechenbeispiel soll ein diamagnetischer Körper über einem Magnetfeld schweben. Dabei entsteht ein Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskraft  $F_g$  und der magnetischen Kraft  $F_m$ :  $|F_g| = |F_m|$ . Für die Gewichtskraft gilt:  $F_g = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$ .

Für die abstoßende Kraft gilt:  $F_m = \mu_0 \cdot V \cdot M \cdot \nabla H$ , wobei  $\nabla H$  der Gradient der magnetischen Feldstärke am Ort des schwebenden Körpers und  $M$  die Partikelmagnetisierung ist. Für  $M$  gilt:  $M = \chi \cdot H$ . Daraus ergibt sich:  $F_m = \mu_0 \cdot V \cdot \chi \cdot H \cdot \nabla H$ . Darüber hinaus

gilt:  $H \cdot \mu_0 \cdot \mu_r = B$ . In die Gleichung eingesetzt:  $F_m = \frac{(V \cdot \chi \cdot B \cdot \nabla B)}{(\mu_0 \cdot \mu_r^2)}$  Für den Fall des

Kräftegleichgewichtes ( $-F_g = F_m$ ) ergibt sich:  $-\rho \cdot g = \frac{\chi \cdot B \cdot \nabla B}{(\mu_0 \cdot \mu_r^2)}$ . Durch die Gleichung lässt sich jetzt beispielsweise abschätzen, ob ein Körper nun schwebt oder nicht.

Weiterhin kann man auch berechnen wie stark die Magnete sein müssen, um ein Schweben zu erreichen. Für Diamagneten gilt bezüglich ihrer Suszeptibilität:  $-1 \leq \chi < 0$ . Die Suszeptibilität ist eine Größe für die Stärke des Magnetismus und sie zeigt an, ob der Körper diamagnetischen oder paramagnetischen ist. Für Paramagnetismus gilt:  $\chi > 0$ .

Abgeleitet ist die Suszeptibilität aus der Permeabilitätszahl  $\mu_r$ :  $\chi = \mu_r - 1$ . Supraleiter sind die stärksten diamagnetischen Stoffe mit einer Suszeptibilität von  $-1$ . Die meisten Diamagneten haben eine Suszeptibilität von etwa  $-10^{(-6)}$ . Aus der Gleichung lässt sich zeigen, dass bei konstanter Kraft und konstantem Volumen die Suszeptibilität zu dem Produkt aus magnetischer Flussdichte und dem Gradienten der magnetischen Flussdichte indirekt proportional ist:  $\frac{1}{\chi} \sim B \cdot \nabla B$ . Deswegen braucht man eine viel größere

Feldstärke, um auf einen normalen Diamagneten die gleiche Kraft wie auf einen Supraleiter auszuüben - unter der Voraussetzung, dass das Volumen annähernd gleich ist -. Beispielsweise benötigt man für einen normalen Diamagneten ( $\chi \approx -10^{(-6)}$ ) etwa die tausendfache magnetische Flussdichte, um die gleiche Kraft wie auf einen Supraleiter ( $\chi \approx -1$ ) zu erzielen [3].

### 3.3 Versuche zum diamagnetischen Schwebens:

#### 3.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsvorbereitungen

Aufgebaut ist der Versuch aus 4 Neodym Magneten, einem pyrolytischen Grafitplättchen und verschiedenen Plättchen aus gepresstem Grafit. Bei den 4 Magneten handelt es sich um würfelförmige Magneten mit einer Kantenlänge von 12mm. Nach Angaben des Herstellers besitzt jeder dieser Magnete eine Energie-



Abb.7: Versuchsaapparatur mit pyrolytischen Grafit

dichte ( $w_m$ ) von  $48 \text{ kJ/m}^3$ . Daraus ergibt sich nach der Formel für die Energiedichte

$w_m = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H$  eine magnetische Flussdichte ( $B$ ) von ungefähr  $350 \text{ mT}$ . Diese 4 Magnete

sind nun zu einem Viereck angeordnet. Dabei sind die Pole der Nachbarmagneten versetzt gelagert, damit die 4 Magnete sich nicht abstoßen, sondern zusammenhalten (vgl. Abb. 4 Diamagnet über Permanentmagneten). Das pyrolytische Grafitplättchen besteht aus einer quadratischen Grundfläche mit der Seitenlänge  $12 \text{ mm}$  und einer Höhe von  $0,25 \text{ mm}$ . Das gepresste Grafit ist zunächst in Form von quadratischen Platten mit einer Höhe von  $2 \text{ mm}$  und einer Kantenlänge von  $42 \text{ mm}$  vorhanden. Da diese Platten viel zu groß und zu schwer für die Versuche sind, werden sie auf unterschiedliche Höhen gefeilt, welche im Bereich von  $0,2 \text{ mm}$  bis  $1 \text{ mm}$  liegen. Mit einer Säge werden die einzelnen Plättchen dann noch zurechtgesägt. Schließlich erhält man quadratische Grafitplättchen, welche sich durch verschiedene Höhen und Kantenlängen unterscheiden.

#### 3.3.2 Versuche mit der Apparatur

Zunächst wird mit einer Hallsonde die magnetische Flussdichte nochmals überprüft. Es ergibt sich ein Maximalwert von  $500 \text{ mT}$ , welcher im Mittelpunkt der quadratischen Oberseite eines der Magneten gemessen wurde. Dieser Wert stimmt auch in etwa mit den Herstellerangaben überein, da noch berücksichtigt werden muss, dass die magnetische Flussdichte durch die anderen Magneten verstärkt wird. Nachdem das pyro-

lytische Grafitplättchen auf die vier Magneten gelegt wird, bewegt es sich in die Mitte und schwebt dort stabil. Auch bei leichten Stößen auf dieses Plättchen, wandert es wieder in die Mitte zurück. Es schwebt in einem Abstand von 1,5mm über den Magneten. Dabei ist es so orientiert, dass die Spitzen des Plättchens, jeweils auf die Kontaktstellen der Magnete zeigen. Das gepresste Grafitplättchen, welches in etwa die gleichen Maße wie das Pyrolytische aufweist, schwebt nur in einem Abstand von 1mm über den Magneten. Außerdem orientiert dieses sich anders als das pyrolytische Grafit. Die Kanten des gepressten Grafitplättchens ordnen sich nämlich parallel zu den Kanten der Magneten an. Bei Verwendung von schwächeren Neodym-Magneten, zeigt sich keine Schwebewirkung mehr. Durch Veränderung der Kantenlänge der Plättchen entsteht kein Unterschied in der Distanz zwischen dem Magnet und diesem Plättchen. Bei Vergrößerung der Höhe minimiert sich der Abstand zu den Magneten. Nun wird sowohl das pyrolytische, als auch das gepresste Grafitplättchen mit kleinen Gewichten belastet. Das pyrolytische Grafit berührt den Magneten etwa ab einer Belastung von 0,32g, also einer Gewichtskraft von 3,2mN. Bei dem gepressten Grafit wird dieses schon bei etwa 0.21g Belastung, also einer Gewichtskraft von 2.1mN, auf die Magneten gedrückt. Zuletzt wird der elektrische Widerstand von dem gepressten und dem pyrolytischen Grafitplättchen - mit jeweils gleicher Höhe und Kantenlänge - gemessen. Von der Mitte einer Seitenkante zur anderen Seitenkante gemessen, ergibt sich ein Widerstand von 10Ω bei dem pyrolytischen Grafit und einen Widerstand von 50 Ω bei dem gepressten Grafit.

Ein weiterer Versuch lässt sich mit Grafitpulver durchführen. Zunächst wird dabei ein Blatt Papier auf die Magneten gelegt und auf diesen wird dann etwas Grafitpulver gegeben. Durch sehr leichtes hin- und herbewegen, ordnet sich das Pulver außerhalb der Ränder der Magnete und in der Mitte dieser vier Magneten an. Ohne Bewegung des Papierblattes kommt es nicht zu so einer Anordnung des Grafitpulvers.

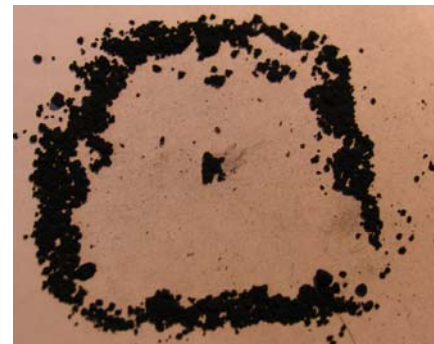


Abb. 8: Anordnung des Grafitpulvers

### 3.3.3 Erklärung:

Bei den beiden Grafitarten handelt es sich um rein diamagnetische Stoffe. Diese weichen dem Magnetfeld aus und schweben so in der Luft über den Magneten. Sie ordnen sich genau über der Mitte der vier Magneten an, da an dieser Stelle das Magnetfeld am

geringsten ist. Der Ruhestand wird genau an dem Ort erreicht, an dem die Gewichtskraft des Plättchens und die abstoßende Kraft der Magnete im Gleichgewicht sind. Je näher das Plättchen an den Magneten ist, desto größer ist die Stärke des Magnetfelds. Der Betrag der abstoßenden Kraft hängt von dem elektrischen Widerstand des Materials ab. Je niedriger der elektrische Widerstand ist, desto größer ist die Kraft, welche der Gewichtskraft entgegen wirkt. Aus diesem Grund schwebt erstens das pyrolytische Grafit in einem größeren Abstand zu den Magneten, als das aus gepressten Grafit bestehende Plättchen. Zweitens lässt sich das pyrolytische Grafit auch mit einer höheren Kraft belasten, als das aus gepressten Grafit. Erklären lässt sich die Abhängigkeit der Kraft von dem elektrischen Widerstand am Atombau. Je niedriger der elektrische Widerstand ist, desto besser können sich die freien Elektronen bewegen. Durch eine schnellere Bewegung ist die Kraft höher, da eine stärkere Induktion entsteht. Von den Seitelängen der Plättchen ist die Höhe des Schwebens über den Magneten weitestgehend unabhängig. Dies liegt daran, dass zwar die Gewichtskraft durch größere Kantenlängen zunimmt, aber genauso nimmt auch die abstoßende Kraft zu, weil mehr Fläche zur Induktion zur Verfügung steht. Die Höhe hat aber einen großen Einfluss auf den Abstand. Je dicker das Plättchen ist, desto weniger hoch schwebt das Grafitplättchen. Dies lässt sich damit begründen, dass das Magnetfeld immer stärker abnimmt je weiter man von den Magneten weggeht. Die Kraft die bei der Oberseite des Plättchens wirkt, ist viel geringer als die Kraft die an der Unterseite wirkt. Da aber die Gewichtskraft durch wachsende Höhe stetig zunimmt, aber die abstoßende Kraft in nicht so großem Maße zunimmt, schwebt das Plättchen nicht mehr so hoch. Zuletzt ist die Stärke der Magnete noch ein Einflussfaktor auf die Höhe des Schwebens. Je stärker die Magnete sind, also je größer ihre magnetische Flussdichte ist, desto höher schwebt das Plättchen über den Magneten, da die abstoßende Kraft größer ist. Zusammenfassend gesagt, steigt die Höhe des Schwebens durch geringeren elektrischen Widerstand, durch Verkleinerung der Höhe des Plättchens und durch Magneten mit größerer magnetischer Flussdichte. Die Seitelängen des Plättchens haben weitestgehend keine Einfluss auf die Schwebhöhe. Die Anordnung des Grafitpulvers lässt sich auch leicht erklären. Ohne leichte Bewegung des Papierblattes passiert nichts, weil eben erst durch die Bewegung des diamagnetischen Materials eine Kraft entsteht. Das Pulver ordnet sich dann in der Mitte und außerhalb der Ränder der Magnete an, da an diesen Orten die Stärke des Magnetfelds am geringsten ist. Demzufolge wird durch die diamagnetische Wirkung das Pulver auch dorthin gestoßen.

## **4. Das Levitron:**

Neben der Möglichkeit durch diamagnetische Levitation einen Körper zum Schweben zu bringen, gibt es noch eine andere Art. Dazu sollte man sich zunächst einmal die Feststellung von dem Physikers Samuel Earnshaw vor Augen führen. Dieser hat nämlich festgestellt, dass grundsätzlich ein freies und stabiles Schweben eines Magneten in einem statischen Magnetfeld nicht möglich sei. Dieses Problem kann aber gelöst werden, indem man kein statisches Magnetfeld verwendet, sondern ein Bewegtes. Diese Prinzip hat man sich beim Aufbau des Levitron zu Nutze gemacht, indem dieses einen bewegten Magnetkreisel über einer magnetischen Basis schweben lässt. Dabei handelt es sich eben nicht mehr um ein statisches, sondern um ein dynamisches System. Damit behält die Feststellung von Samuel Earnshaw immer noch Gültigkeit und ein weiterer Weg wurde gefunden um einen Körper, in diesem Fall einen Magnetkreisel, zum Schweben zu bringen [5].

### **4.1 Aufbau des Levitrons:**

Das Levitron besteht aus 3 verschiedenen Komponenten, nämlich der Basis, dem Kreisel und einer Antriebsplatte.

Die Basis setzt sich meist aus einem Ringmagneten zusammen, welcher mit einem Pol nach oben und dem anderem Pol nach unten zeigt. Verstärken kann man die Wirkung des Magneten durch weitere Ringmagneten, welche darunter bzw. darüber gelegt werden. Zur Regulierung der Feldstärke ist es noch sinnvoll zwischen die verschiedenen Ringmagnete unmagnetische Metallplatten wie beispielsweise Aluminiumplatten zu legen.

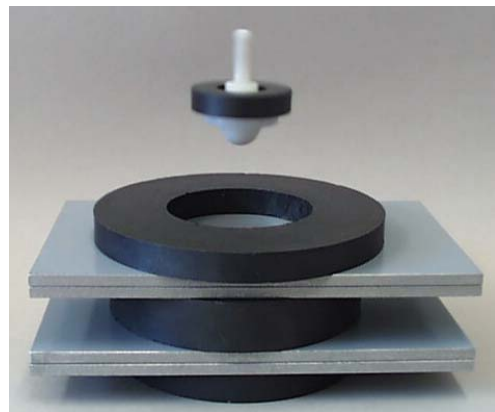


Abb. 9: Aufbau des Levitrons

Der nächste Bestandteil ist der Kreisel. In dessen Mitte befindet sich ein Kunststoffstift und an diesen sind Keramikmagneten befestigt. Metallische Magneten können nicht verwendet werden, weil bei der Drehung des Kreisels sonst im Metall Wirbelströme entstehen und diese den Kreisel dämpfen und schließlich komplett zum Stillstand bringen. Die Magnete sind so angeordnet, dass sie genau der Basis entgegen wirken.

Wenn also der Nordpol bei der Basis oben ist, dann ist bei dem Kreisel der Nordpol unten und umgekehrt.

Zum Antrieb des Levitrons wird noch eine Platte verwendet, um den Kreisel in die richtige Höhe zu bringen. Sehr gut lässt sich z.B. eine Plexiglasplatte dafür hernehmen. Die Platte sollte aber nicht aus Metall bestehen, da sie sonst die Magnetfelder stört und somit das Schweben erschwert oder kein Schweben mehr möglich ist [7].

## 4.2 Funktionsweise des Levitrons:

### 4.2.1 Vertikale Stabilität des Levitrons:

Die Kraft, welche den Kreisel in der Luft hält, ist die Magnetkraft. Insgesamt treten im Levitron vier magnetische Kräfte auf. Dies sind zum einen die abstoßenden Kräfte, welche der Nordpol der Basis und der des Kreisels aufeinander ausüben. Zum anderen eben die zwei Südpole von diesen beiden. Gleichzeitig aber gibt es auch anziehende Kräfte, welche jeweils durch die Anziehung der unterschiedlichen Pole entstehen. D.h. der Nordpol der Basis wirkt anziehend auf den Südpol des Kreisels und der Südpol der Basis auf den Nordpol des Kreisels. Da die Kraft je stärker ist, desto näher die jeweiligen Pole aneinander sind,

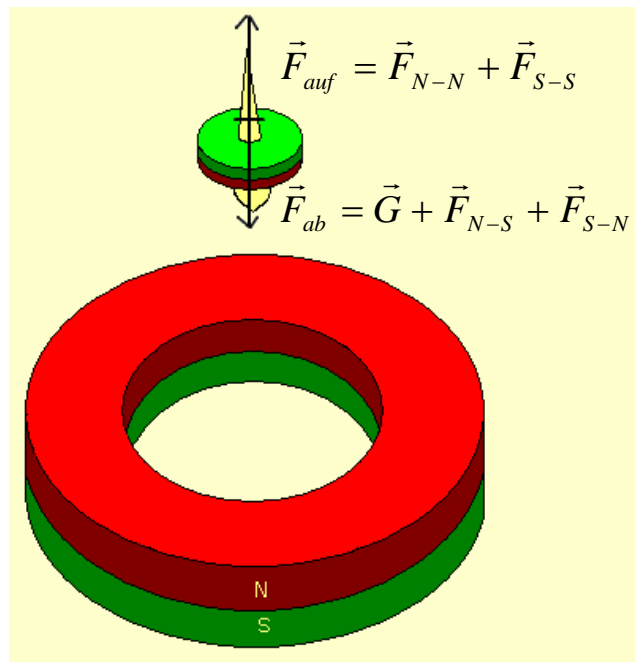


Abb. 10: Magnetischen Kräfte beim Levitron

überwiegt die abstoßende Kraft und hält somit den Kreisel in der Luft. Der Kreisel rotiert dann genau an der Stelle in der Luft, an der eine Kräftegleichgewicht herrscht. In diesem Fall sind die abstoßenden Kräfte der gleichen Pole genauso groß, wie die Kräfte der anziehenden Pole und der Gewichtskraft, die auf den Kreisel wirkt. Um den Kreisel höher oder überhaupt erst schweben zu lassen, muss man die Masse des Kreisels sehr gering halten. Bei zu hoher Masse ist die Gewichtskraft zu hoch und dadurch sind die abstoßenden Kräfte geringer als die Kräfte, welche den Kreisel nach unten drücken. In

diesem Fall ist kein Schweben mehr möglich. Wenn sich der Kreisel einfach über den Magneten befindet ohne sich zu bewegen, wendet dieser sich aber auf den Kopf, da der obere Pol des Kreiselmagneten von dem entgegengesetzt gepolten Oberteil des Basismagneten angezogen wird. So würde sich einfach der Kreisel umdrehen und runterfallen, da die Kräfte den Körper nach unten ziehen. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, muss sich der Kreisel drehen. Durch die Drehung des Kreisels wird dieser am Umkippen gehindert. Erst ab einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen pro Sekunde kann man erreichen, dass der Kreisel sich nicht umdreht und runterfällt. Aus diesem Grund muss der Kreisel immer eine Mindestumdrehungsfrequenz besitzen, um nicht umzufallen. Da aber immer eine Kraft, die auf das Oberteil des Kreiselmagneten wirkt, vorhanden ist, sieht man beim drehenden Levitron-Kreisel ein leichtes „zittern“. Dieses „Zittern“ wird als Precession bezeichnet [5;6;7].

#### 4.2.2 Horizontale Stabilität des Levitrons:

Durch die vertikale Stabilität wird zwar gesichert, dass der Kreisel nicht einfach nach unten fällt, aber trotzdem könnte dieser sich zur Seite weg bewegen und anschließend herunterfallen. Aus diesem Grund muss es auch in dieser Richtung eine Kraft geben, die ihn stabil in der Luft hält. Die Stabilität in der Horizontalen entsteht, indem der Kreisel

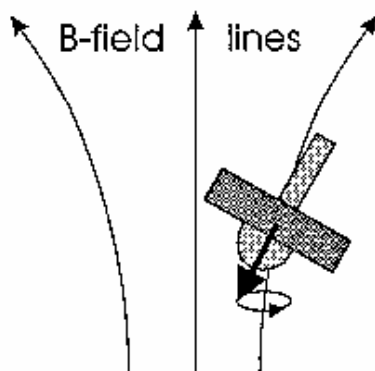


Abb. 11: Orientierung am Magnetfeld

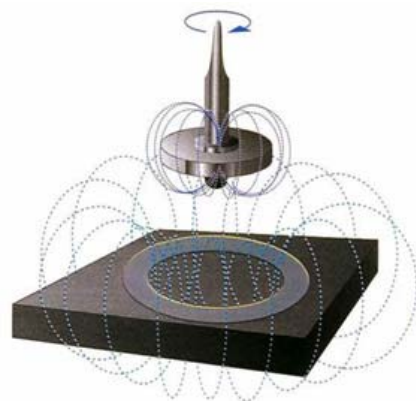


Abb. 12: Horizontale Stabilität des Levitron

sich an den Feldlinien des Ringmagneten ausrichtet. Das Ausrichten an den Feldlinien gelingt, wenn der Kreisel sich unter einer bestimmten Geschwindigkeit dreht. Falls er eine zu hohe Umdrehungsfrequenz besitzt, wird der Effekt der Precession zu klein, er bewegt sich praktisch auf der Senkrechten zur Basis und kann sich dadurch nicht mehr

ausrichten. Ein weiterer Effekt muss für die horizontale Stabilität beachtet werden. Damit der Kreisel stabil schweben kann, muss die Feldstärke nach außen hin um den Kreisel anwachsen. Ohne eine anwachsende Feldstärke, würde dieser einfach zur Seite abwandern und runterfallen. Diese nach außen hin anwachsende Feldstärke gibt es nur unter einer bestimmten Schwebhöhe, der kritischen Höhe. Aus diesem Grund ist es für die horizontale Stabilität wichtig, dass das Gewicht des Kreisels so groß wie möglich ist, damit dieser sich unter der kritischen Höhe befindet [5;6;7].

#### **4.2.3 Einfluss der Umdrehungsgeschwindigkeit des Kreisels:**

Weil für die vertikale Stabilität eine möglichst hohe und für die horizontale Stabilität eine möglichst geringe Umdrehungsfrequenz benötigt wird, schwebt der Kreisel nur in einem gewissen Intervall für die Umdrehungsfrequenz. Bei zu hoher Umdrehungszahl des Kreisels fällt er herab, weil der Kreisel sich nicht mehr an den Feldlinien ausrichten kann. Bei zu wenigen Umdrehungen pro Minute fällt der Kreisel runter, weil der Kreisel sich umdreht. Aus diesem Grund wird der Kreisel erst auf eine sehr hohe Umdrehungszahl gebracht und dann mit der Antriebsplatte auf die richtige Höhe gehoben. Durch die Reibung kommt er dann zunächst in den Umdrehungsgeschwindigkeitsbereich, in welchem ein Schweben möglich ist. Nach einer gewissen Zeit wird die Geschwindigkeit durch die Reibung so gebremst, dass er unter die Mindestumdrehungsfrequenz für die vertikale Stabilität kommt und folglich umkippt. Die Umdrehungsfrequenz ist zwar etwas abhängig von dem jeweiligen Levitron, aber die obere Grenze liegt meist bei etwa 30Hz und die Untere bei 18Hz [6;7].

#### **4.2.4 Einfluss der Masse des Kreisels:**

Bei der Masse entsteht ein ähnlicher Effekt, wie bei der Umdrehungsgeschwindigkeit. Da für die vertikale Stabilität eine möglichst kleine Masse und für die horizontale Stabilität eine möglichst große Masse gebraucht wird, entsteht auch hier ein Intervall für die Masse des Kreisels und damit verbunden auch für die Schwebhöhe. Falls die Masse des Kreisels zu hoch ist, entsteht kein Schwebzustand. In diesem Fall ist die Gewichtskraft zu hoch und der Kreisel kann nicht mehr durch die abstoßenden Kräfte in der Luft gehalten werden. Das Kräftegleichgewicht in diesem Fall nicht hergestellt. Bei einer zu geringen Masse des Kreisels, ist er in der horizontalen Ebene nicht stabil und

wird zur Seite runterfallen. Aus diesem Grund muss die Masse des Kreisels genau so bestimmt werden, damit der Kiesel sich unter der kritischen Höhe befindet und zugleich noch so hoch schwebt, damit dieser die Mindesthöhe für die vertikale Stabilität erreicht. Da das Höhenintervall in dem der Kiesel stabil schweben kann sehr klein ist, ist auch das Intervall für die Masse sehr klein. Aus diesem Grund muss die Masse des Kreisels oft neu justiert werden. Sogar ein Temperatur unterschied kann dazu führen, dass die Masse sich nicht mehr im Intervall befindet. Je tiefer die Temperatur ist, desto stärker ist die magnetische Kraft. Aus dem Grund muss das Gewicht des Kreisels leicht erhöht werden, wenn die Umgebungstemperatur niedriger ist. Zum Feinjustieren der Masse des Kreisels empfiehlt sich die Verwendung von kleinen Kunststoffscheiben oder Gummiringen [5;7].

#### **4.2.5 Flugzeit des Kreisels:**

Weiterhin lässt sich auch die Flugzeit des Kreisels durch ein paar Veränderungen am Versuchsaufbau verändern. Im nicht evakuierten Raum bleibt der Kiesel etwa ein paar Minuten in der Luft. Deutlich verlängern lässt sich die Zeit, indem man das Levitron in ein Vakuum bringt. Ohne die Luftreibung gelingt es den Kiesel bis zu einer halben Stunde schweben zu lassen. Schließlich gibt es auch zwei Möglichkeiten den Kiesel sogar noch viel länger zum Schweben zu bringen. Bei der einen werden an dem Kiesel einige Zacken befestigt, damit durch Windzufuhr der Kiesel immer in Bewegung gebracht wird. Mit dieser Änderung des Versuchs erreicht man sogar eine Schwebzeit von mehreren Tagen. Die andere Möglichkeit besteht darin, den Kiesel durch elektromagnetische Impulse zum weiterdrehen zu bringen. Dies wird mit dem sog. Levitron-Perpetuator erzielt. Zunächst muss man auf dem Kiesel ein kleines weißes Papier befestigen und neben der Basis ein Spulenpaar aufbauen. Durch das weiße Papier am Kiesel, durch einen Photosensor und eine Lichtquelle kann die Umdrehungsfrequenz ermittelt werden. Die Spulen werden jetzt durch eine Elektronik gesteuert, um die Precession zu verstärken. Durch die Ermittlung der Umdrehungsfrequenz wird verhindert, dass der Kiesel zu schnell wird und dass die Ansteuerung der Spulen richtig funktioniert [5;6;7;10].

## **5. Anwendungsbereich:**

Natürlich lässt sich das diamagnetische Schweben und das Prinzip des Levitron nicht nur für spielerische Zwecke nutzen, sondern es gibt viele Anwendungsgebiete, in denen diese Technologie von sehr großem Nutzen sein kann. Beispielsweise könnte diamagnetisches Schweben in Lagern verwendet werden. Durch eine schwebende Achse wird die Reibung und der Verschleiß beseitigt, im Gegensatz z.B. zu Kugellagern. Ein weiterer Anwendungsbereich liegt im Gebiet der Sensoren. Durch diamagnetisches Schweben können hochpräzise Messgeräte entworfen werden. So gelang es einen Neigungsmesser zu entwickeln, der auf  $1/600000$  Grad genau den Winkel messen kann. Auch im Bereich von Beschleunigungs- und Gasdruckmessungen konnten Geräte durch diamagnetisches Schweben gebaut werden, welche extrem präzise messen können. Weiterhin zeigt sich auch im Bereich des Weltraums großer Nutzen an dieser Technologie. So kann man durch diamagnetisches Schweben den Einfluss der Schwerelosigkeit auf lebende Organismen, Werkstoffe und Apparaturen untersuchen. Dies würde immense Kosten ersparen, da Tests im Weltraum viel teurer sind. Doch sogar im Weltraum selbst gibt es einige Anwendungsgebiete. So ermöglicht diamagnetisches Schweben beispielsweise, dass Astronauten Objekte behandeln können ohne sie direkt zu berühren, oder dass größere Abstände zwischen dem schwebenden Gegenstand und dem Rest von Apparatur möglich wären.

Nicht nur diamagnetisches Schweben, sondern auch das Prinzip des Levitrons lässt andere Anwendungsbereiche zu. Schon einige Jahre lang hat man mit magnetischen und elektrischen Feldern mikroskopische Partikel zu untersuchen versucht. Beispielsweise gelingt es Neutronen mit magnetischen Feldern zu erfassen, da sie auch eine dem Levitronkreisel ähnliche drehende Bewegung besitzen [2;5].

## **Literaturverzeichnis:**

### **Bücher:**

1: Reiner Großer: Elastische und dissipative Kräfte in der supraleitenden Levitation.  
Regensburg: Roderer 1998.

### **Zeitschriften:**

2: Ronald E. Pelrine: Stabil in der Schweben. In: Spektrum der Wissenschaft (2005).  
S. 38 - 44

### **Internetquellen: (getestet: 24.01.06)**

3: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/fzk/6916/6916.pdf>

4: <http://moops.anphy.uni-duesseldorf.de/veroff/Diplome/Volker.Solinus/node3.phtml>

5: <http://www.levitron.de/physics.htm>

6: [http://www.wundersamessammelsurium.de/Magnetisches/5\\_Rotation/](http://www.wundersamessammelsurium.de/Magnetisches/5_Rotation/)

7: <http://users.aol.com/gykophys/levitron/levitron.htm>

8: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ferromagnetismus>

9: <http://www.physics.ucla.edu/marty/diamag/>

10: <http://www.hcrs.at/LEVITRON.HTM>

11: <http://www.hcrs.at/DIAMAG.HTM>

### **Mündliche Quellen:**

Jürgen Kessel (SGL CARBON GmbH; Bonn Deutschland)

### **Praktische Arbeit:**

- Grafitplättchen (R6650): SGL CARBON GmbH; Bonn Deutschland
- Versuchsausrüstung: [http://www.klangspiel.ch/quadro\\_14/](http://www.klangspiel.ch/quadro_14/)

### Bilderverzeichnis:

Bild	Quelle
Abb. 1	Ronald E. Pelrine: Stabil in der Schwebel. In: Spektrum der Wissenschaft (2005). S.40
Abb. 2	Ronald E. Pelrine: Stabil in der Schwebel. In: Spektrum der Wissenschaft (2005). S.41
Abb. 3	<a href="http://www.stangl-taller.at/STANGL/BENJAMIN/SCHULE/PHYSIK/SUPRALEITUNG/supraleitung1.jpg">http://www.stangl-taller.at/STANGL/BENJAMIN/SCHULE/PHYSIK/SUPRALEITUNG/supraleitung1.jpg</a>
Abb. 4	Ronald E. Pelrine: Stabil in der Schwebel. In: Spektrum der Wissenschaft (2005). S.42
Abb. 5	<a href="http://davidfiedler.com/images/levitate.jpg">http://davidfiedler.com/images/levitate.jpg</a>
Abb. 6	Ronald E. Pelrine: Stabil in der Schwebel. In: Spektrum der Wissenschaft (2005). S.43
Abb. 7	Eigengemachtes Bild
Abb. 8	Eigengemachtes Bild
Abb. 9	<a href="http://www.ctglabs.com/Pics/LEVI1.jpg">http://www.ctglabs.com/Pics/LEVI1.jpg</a>
Abb. 10	Eigengemachtes Bild
Abb. 11	<a href="http://www.physics.ucla.edu/marty/levitron/levfig2.gif">http://www.physics.ucla.edu/marty/levitron/levfig2.gif</a>
Abb. 12	<a href="http://perso.wanadoo.fr/hubert.roussel/levitationimages/principelevitron.jpg">http://perso.wanadoo.fr/hubert.roussel/levitationimages/principelevitron.jpg</a>

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

\_\_\_\_\_  
Ort

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des Schülers