

# **Kraftmessung an Supermagneten**

Praktikumsbericht zum Laborpraktikum  
von Patrick Ulrich

an der Humboldt-Universität zu Berlin  
in der Arbeitsgruppe Didaktik der Physik

April 2007

# **1 Vorwort**

Im Rahmen des Lehramtstudiums muss im Fach Physik, sofern es das erste Fach ist, ein Laborpraktikum absolviert werden. Das von mir durchgeführte Praktikum hatte Supermagneten zum Thema. Dabei galt es zum einen augenscheinliche Phänomene, wie die Abrisskraft von einer Stahlplatte zu untersuchen, wie auch die Frage zu beantworten was einen Magneten zu einem Supermagneten macht.

## 2 Inhalt

1	Vorwort	2
2	Inhalt	3
3	Was sind Supermagnete?	4
3.1	Ferromagnetismus	4
3.2	Dauermagnete	7
4	Wie werden Kräfte gemessen?	7
4.1	Messen durch Vergleichen	7
4.2	Der Federkraftmesser	8
4.3	Weitere Messgeräte für Kräfte	12
5	Aufbau und Funktionsweise eines Kraftmessers mit Piezo-Kristallen?	13
5.1	Der piezoelektrische Effekt	13
5.2	Konstruktion eines Kraftmessers	16
5.3	Datenaufnahme mit CASSY	19
5.4	Kalibrierung	25
6	Welche Eigenschaften von Supermagneten sollen bestimmt werden?	26
7	Messreihen und deren graphische Darstellung	28
7.1	Haftkraft in Abhängigkeit von der Magnetdicke	29
7.2	Haftkraft in Abhängigkeit von der Plattendicke	31
7.3	Feldlinienbilder aus Eisenspänen Supermagneten	34
7.4	Haftkraft in Abhängigkeit von der Gewichtskraft des Magneten	35
8	Ergebnisse und Ausblicke	36
8.1	Warum ist ein „Supermagnet“ super?	36
8.2	Anwendungsgebiete für Supermagnete	38
9	Quellen	39

### 3 Was sind Supermagnete?

Supermagnete sind in erster Linie, wie es der Name schon sagt, Magnete, genauer gesagt Permanentmagnete oder auch Dauermagnete genannt. In wiefern die Bezeichnung „Super“ zutreffend ist wird in einem der folgenden Kapitel erläutert.

#### 3.1 Ferromagnetismus

Unter Einfluss eines äußeren magnetischen Feldes  $\vec{B}$  verhalten sich verschiedene Stoffe unterschiedlich. Dabei werden die Stoffe unterteilt in diamagnetisch und paramagnetisch. Zwischen der Feldstärke des Magnetfeldes  $\vec{H}$  und der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  gilt die Beziehung

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}, \quad (1)$$

mit der magnetischen Feldkonstanten  $\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6} \text{Vs} / \text{Am}$  und der stoffabhängigen Permeabilitätszahl  $\mu_r$ . [vgl. TW S. 86, S. 11]

Diamagnetische Stoffe haben die Eigenschaft ein äußeres magnetisches Feld, in das sie eingebracht werden, abzuschwächen. Modellhaft kann die Vorstellung verwendet werden, dass in jedem Atom bzw. Molekül ein Kreisstrom induziert wird, der nach der lenzschen Regel seiner Ursache entgegen wirkt und damit die Abschwächung verursacht. Ein starker diamagnetischer Stoff ist Wismut. [vgl. Wiki1]

Paramagnetische Stoffe haben die Eigenschaft ein äußeres magnetisches Feld zu verstärken. Die Spinmomente der Elektronen, die als Elementarmagnete aufgefasst werden können, richten sich parallel zum äußeren Magnetfeld aus und bewirken dadurch eine Verstärkung des Magnetfeldes. Dieser Vorgang wird als Magnetisierung  $\vec{M}$  bezeichnet. Für die meisten Stoffe gilt der Zusammenhang

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}. \quad (2)$$

Dabei ist  $\chi$  die magnetische Suszeptibilität, eine ebenfalls materialabhängige, skalare Größe. Zwischen der Permeabilitätszahl und der Suszeptibilität gilt die Beziehung

$$\mu_r = 1 + \chi. \quad (3)$$

Paramagnetisches Verhalten ist bei Substanzen mit ungepaarten Elektronen zu finden. In Substanzen mit gepaarten Elektronen heben sich die einzelnen Spinmomente gegenseitig auf, da die Elektronen nach dem Pauli-Prinzip jeweils zu einem Spin-Up-Zustand und einem Spin-Down-Zustand gepaart sind.

[vgl. INet1, Wiki2, PP3 S. 24]

Durch die parallele Ausrichtung der magnetischen Momente von Atomen in bestimmten Stoffen entstehen magnetisierte Domänen, die weißsche Bezirke genannt werden, bis zur Sättigung magnetisiert sind und eine Längenausdehnung von  $10^{-6}$  m bis  $10^{-8}$  m haben. Nach Außen ist die Magnetisierung im Allgemeinen nicht sichtbar, da die Bezirke ohne äußeres Magnetfeld ungeordnet sind und sich die einzelnen Magnetisierungen im Mittel kompensieren. Wirkt ein äußeres Feld auf ein magnetisierbares Material, so verschieben sich die Trennwände zwischen den weißschen Bezirken (Blochwände). Bezirke, deren magnetische Momente eine geringere potentielle Energie in diesem Feld gegenüber anderen Bezirken haben, wachsen während die anderen Bezirke kleiner werden. Der Vorgang der Magnetisierung ist für kleine magnetische Feldstärken reversibel und bei größeren Feldstärken irreversibel. Für die Feldstärke des magnetischen Feldes in einem Medium gegenüber dem Vakuum gilt

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}). \quad (4)$$

[vgl. PP3 S.24 f.]

Die Verschiebung der Blochwände und die damit verbundene Magnetisierung bewirkt eine Verstärkung des äußeren magnetischen Feldes. Wird die Feldstärke eines Magnetfeldes stetig erhöht, so erreicht die Magnetisierung eines im Magnetfeld befindlichen ferromagnetischen Materials ein Maximum. Alle Spins sind vollständig in Feldrichtung gedreht, die Sättigungsmagnetisierung ist erreicht. Die magnetische Flussdichte, die notwendig ist um einen Stoff bis zur Sättigung zu magnetisieren wird Sättigungsfeldstärke  $\vec{B}_s$  genannt. [vgl. PP3 S. 25]

Bei hohen Temperaturen wird die Ordnung, sprich parallele Ausrichtung der Magnetischen Momente aufgebrochen. Der Stoff verliert seine ferromagnetischen Eigenschaften, behält jedoch paramagnetische Eigenschaften. Die Temperatur, bei der die ferromagnetischen Eigenschaften verloren gehen wird Curie-Temperatur  $T_c$  genannt.

Bei Zimmertemperatur sind die Stoffe Eisen, Nickel und Kobalt ferromagnetisch. Bei tiefen Temperaturen weisen einige weitere Stoffe ferromagnetische Eigenschaften auf. Ferromagnetische Stoffe haben die Eigenschaft eine Magnetisierung auch über die Dauer der Ursache hinweg beizubehalten, das heißt selbst Quelle eines magnetischen Feldes zu sein, wenn sie magnetisiert wurden. Die magnetische Flussdichte dieses Magnetfeldes wird *Remanenz* bzw. Remanenzfeldstärke  $\vec{B}_R$  genannt. Diese umgangssprachliche Speicherung des magnetischen Feldes wird *magnetische Hysterese* genannt. [vgl. Wiki3]

## 3.2 Dauermagnete

Dauermagnete sind natürlich vorkommende oder künstlich hergestellte Stücken eines magnetisierbaren Materials. Vor allem in der künstlichen Herstellung werden oftmals Legierungen statt reinen ferromagnetischen Stoffen verwendet. Die im Laborpraktikum verwendeten Neodym-Magneten sind eine Legierung bestehend aus Eisen, Neodym und Bor (NdFeB). [vgl. INet3]

Das Herstellungsprinzip sieht vor, dass das zu magnetisierende Material erwärmt wird, damit die weißschen Bezirke sich möglichst beweglich, sprich gut magnetisierbar sind. Anschließend wird das Material in ein starkes elektromagnetisches Feld eingebracht und abgekühlt, damit die Magnetisierung der weißschen Bezirke erhalten bleibt. Aus dem Herstellungsprinzip ergibt sich, dass starkes Erwärmen eines Dauermagneten zu einer Entmagnetisierung führt. Ebenfalls ein, dem Feld des Dauermagneten entgegen gerichtetes, starkes äußeres magnetisches Feld führt zu einer Entmagnetisierung. Die Feldstärke, die notwendig ist um einen magnetisierten Stoff vollständig zu entmagnetisieren wird Koerzitivfeldstärke  $H_c$  genannt. [vgl. INet2]

## 4 Wie werden Kräfte gemessen?

### 4.1 Messen durch Vergleichen

Die erste Ableitung der Erhaltungsgröße Impuls  $\vec{p}$  nach der Zeit  $t$  wird Kraft  $\vec{F}$  genannt. Sie ist eine vektorielle Größe, die proportional zur Beschleunigung  $\vec{a}$  eines Körpers mit der konstanten Masse  $m$  ist.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \cdot \vec{a} \quad (5)$$

Im Messprozess ist es das Ziel den Betrag einer Kraft, gemessen in der Einheit Newton, zu bestimmen.

Die Messung durchläuft einen Vergleichsprozess. Dabei wird die zu bestimmende Kraft mit Hilfe eines Messgerätes „gemessen“. Zuvor muss dieses Messgerät mit Hilfe einer bekannten Kraft kalibriert werden oder die zu bestimmende Kraft wird direkt mit einer bekannten Kraft kalibriert. Der direkte Vergleich erfolgt beispielsweise bei der Balkenwaage. Die Gewichtskraft geeichter Massestücken wird mit der Gewichtskraft des zu wiegenden Objekts verglichen.

## **4.2 Der Federkraftmesser**

Mit Hilfe der direkten Vergleichsmethode an einer Balkenwaage können nur Kräfte bestimmt werden, die senkrecht zur Erdoberfläche gerichtet sind. Andernfalls muss ein geeigneter Umlenkmechanismus konstruiert werden oder ein weiteres „Messgerät“ als Referenz verwendet werden. Vielseitige Einsatzmöglichkeiten, einfache Handhabung und die kompakte Konstruktion haben den Federkraftmesser zum Standardmessgerät für Kräfte gemacht. Im Zeitalter von Personalcomputer und Mobiltelefon ist der Federkraftmesser ein Messgerät, das gänzlich ohne elektrische Energie funktioniert. Wie der Name es impliziert kommt im Federkraftmesser eine Feder zum Einsatz. Proportional zur Kraft  $F$ , mit der man den Federkraftmesser längs der Ausdehnungsrichtung der Feder spannt, dehnt sich die Feder um das Wegstück  $s$  aus. Die Proportionalitätskonstante  $D$  wird Federkonstante oder auch Federhärte genannt.

$$F = D \cdot s \quad (6)$$

So kann eine kalibrierte lineare Skalierung längs der Ausdehnungsrichtung der Feder angebracht werden, die zum Ablesen der Kraft verwendet wird. Die Federkonstante  $D$  bestimmt dabei sowohl die maximal messbare Kraft, als auch die Genauigkeit des Federkraftmessers, wenn man eine endliche reversible Ausdehnung der Feder zu Grunde legt. Im Allgemeinen ist ein



Federkraftmesser so konstruiert, dass die Kraftmessung nicht auf die Senkrechte zur Erdoberfläche beschränkt ist, bei kleinen Kräften empfiehlt sich jedoch auch hier diese Einschränkung, da Reibung die Messung sonst verfälscht.

Ein entscheidender Nachteil des Federkraftmessers, vor allem vor dem Kontext dieser Arbeit wird deutlich, wenn die zu messende Kraft nicht konstant ist. Angenommen der Federkraftmesser ist fest montiert und es wirkt eine konstante Kraft eines Probekörpers mit dem Betrag  $F$  längs der Feder, die diese um die Länge  $s$  ausdehnt. Die wirkende Kraft und die Gegenkraft, der Feder kompensieren sich (siehe Gl. 7). Die Position an der sich die beiden wirkenden kompensieren sei die Ruhelage.

$$0 = F_{\text{Ges.}} = F - D \cdot s \quad (7)$$

Wird nun die Ausdehnung der Feder durch einen beliebigen Einfluss um ein infinitesimales Stück  $ds > 0$  verändert, so ist die Gesamtkraft ungleich Null.

$$0 \neq F_{\text{Ges.}} = F - D \cdot (s + ds) = \underbrace{F - D \cdot s}_{=0} - D \cdot ds = -D \cdot ds \quad (8)$$

Das Resultat ist eine resultierende Kraft, die genau entgegen der Auslenkung um  $ds$  wirkt. Das Resultat ist eine Beschleunigung und eine Bewegung des Probekörpers entgegen der Auslenkungsrichtung. Idealerweise, also im reibungsfreien System, würde der Probekörper unendlich lange um die Ruhelage schwingen, da bei einer Auslenkung um  $ds < 0$  die resultierende Kraft positiv ist und damit wieder entgegen der Auslenkung wirkt. Durch Reibung wird die Schwingung jedoch gedämpft. Wird mit dem Federkraftmesser eine konstante Kraft gemessen, so ist die Messung bezüglich einer äußeren Störung unempfindlich, da sich das der Federkraftmesser von sich aus wieder in der Ruhelage einpendelt.

Wird beispielsweise eine Kraft, die indirekt proportional (mit Proportionalitätskonstante C) zum Quadrat des Abstandes ist gemessen – in den Folgenden Abschnitten wird deutlich, dass die magnetische Kraft, wie auch die Coulomb-Kraft genau dieser Proportionalität genügen – so tritt bei der Messung der folgende Effekt auf. Für eine bestimmte Ausdehnung s der Feder und einem Abstand r von einem Bezugspunkt kompensieren sich wieder die Kräfte des Magneten und des Federkraftmessers. Die Richtungen von r und s sind gleich, sprich parallel.

$$0 = F_{\text{Ges.}} = \frac{C}{r^2} - D \cdot s \quad (8)$$

Erfolgt nun eine Störung von r und s um ein infinitesimales  $dr > 0$ , so wird die Kräftebalance gestört. Dabei ist zu beachten, dass r und s entgegengesetzt sind und daher eine positive Störung von s eine negative Störung von r verursacht.

$$0 \neq F_{\text{Ges.}} = \frac{C}{(r - dr)^2} - D \cdot (s + dr) \quad (9)$$

Um zu verdeutlichen unter welchen Voraussetzungen die resultierende Kraft positiv, also in Richtung der Störung ist und diese damit noch zusätzlich verstärkt wird angenommen, dass  $dr = 0,1r$  gilt. Es ergibt sich

$$F_{\text{Ges.}} = \frac{C}{\left(r - \frac{1}{10}r\right)^2} - D \cdot s - D \cdot \frac{r}{10}. \quad (10)$$

Unter Verwendung von (8) erhält man weiter

$$F_{\text{Ges.}} = \frac{C}{\left(r - \frac{1}{10}r\right)^2} - \frac{C}{r^2} - D \cdot \frac{r}{10} = \frac{19C}{81r^2} - \frac{D \cdot r}{10}. \quad (11)$$

Setzt man die aus (8) folgende Relation für D

$$\frac{C}{s \cdot r^2} = D \quad (12)$$

in (11) ein, so erhält man weiter

$$F_{\text{Ges.}} = \frac{190C - 81C \cdot \frac{r}{s}}{810r^2}. \quad (13)$$

Daraus ergibt sich unter der Bedingung, dass das Verhältnis vom Abstand (des Magneten zur Stahlplatte beispielsweise) und Längenausdehnung des Federkraftmessers aufgrund der wirkenden Kraft kleiner als 190/81 ist eine Kraft in Richtung der infinitesimalen Störung  $dr$ , also eine Verstärkung. Die Bedingung, dass  $r$  aus dem genannten Verhältnis folgend das Zweifache von  $s$  nicht wesentlich übersteigen sollte ist praktischerweise immer erfüllt. Die Längenausdehnungen  $s$  eines Federkraftmessers liegen in der Größenordnung von rund zehn Zentimetern, während der für Kraftmessungen interessante Bereich bei etwa 5 Zentimeter aufhört, also eher darunter liegt.

Praktisch veranschaulicht bedeutet das obige Ergebnis, dass ein Federkraftmesser ruckartig bis zum Maximum oder einem vorhandenen Anschlag gestreckt wird. Ein Einpendeln in einer Ruhelage findet nicht statt.

Für eine infinitesimal kleine negative Störung erhält man das Ergebnis

$$F_{\text{Ges.}} = \frac{-210C + 121C \cdot \frac{r}{s}}{1210r^2}. \quad (14)$$

Das bedeutet die Kraft ist negativ und damit in Richtung der Störung, so lange das Verhältnis von Abstand und Ausdehnung des Federkraftmessers kleiner als  $210/121$  ist. Wie bereits erläutert ist diese Bedingung praktisch immer erfüllt.

Die Veranschaulichung dieses Ergebnisses sagt vorher, dass bei einer negativen Störung, also weg von einem Haftobjekt, beispielsweise einer Stahlplatte, der Federkraftmesser sich ruckartig vollständig zusammenzieht.

Ob die angesprochene Störung nun negativ oder positiv ist hängt davon ab, ob die Kraft, mit der der Federkraftmesser gespannt wird etwas größer oder etwas kleiner als die Kraft zu messende Kraft ist. Eine Messung der maximalen Haftkraft eines Magneten an einer Stahlplatte beispielsweise ist mit einem Federkraftmesser nicht oder nur sehr ungenau möglich.

### **4.3 Weitere Messgeräte für Kräfte**

Neben dem klassischen Federkraftmesser sind weitere Abwandlungen von Federkraftmessern mit runder Zeigerskala beispielsweise gebräuchlich. Hier ist die Ausdehnung des Kraftmessers beim Messen von Kräften in einem deutlich kleineren Bereich, der im Kapitel 4.2 beschriebene Nachteil der Messmethode mit einer Feder bleibt jedoch erhalten.

Im elektronischen Bereich sind weitere Möglichkeiten Kräfte zu messen vorhanden. Dehnungsmessstreifen (DMS) stellen eine Möglichkeit dar. Dabei wird das Gitter eines elektrisch leitfähigen Materials gestaucht oder gestreckt. Die daraus resultierende Änderung des elektrischen Widerstands ist sehr gering, jedoch mit einer speziellen elektrischen Schaltung messbar. Das Verfahren wurde bereits 1856 von William Thomson beschrieben, jedoch erst 1942 von Edward E. Simmons zum Patent angemeldet. Die maximale Belastbarkeit des Kraftmessers wird

durch die verwendeten Materialien bestimmt. Es sind verschiedene Messbereiche und Messgenauigkeiten realisierbar. [Wiki4]

Eine weitere Messmethode, die im häuslichen Bereich in elektrischen Personenwaagen oder elektrischen Küchenwaagen Verwendung findet ist die Kraftmessung auf Basis des piezoelektrischen Effekts. Dazu werden ein oder mehrere Piezokristalle belastet und die entstehende Piezospannung in eine Gewichtskraft umgerechnet. Auf diesem Prinzip beruht auch die im Praktikum angewendete Messmethode, weshalb im folgenden Kapitel näher darauf eingegangen wird.

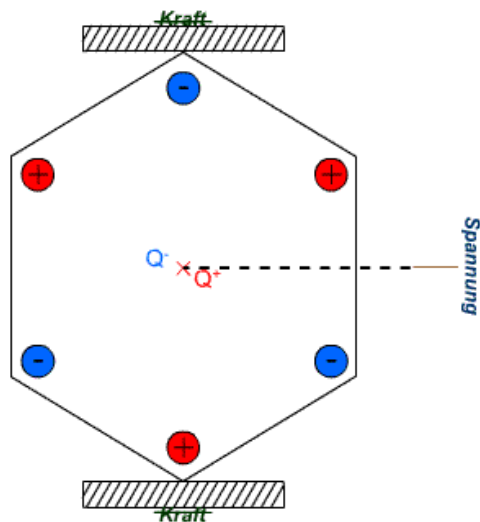
Weitere denkbare Messmethoden sind mit Hilfe von elektrischen oder magnetischen Kräften einen Vergleich durchzuführen. Im praktischen Bereich finden diese Methoden jedoch, möglicherweise aufgrund vieler Schwierigkeiten bei der praktischen Umsetzung, keine Anwendung.

## **5 Aufbau und Funktionsweise eines Kraftmessers mit Piezo-Kristallen?**

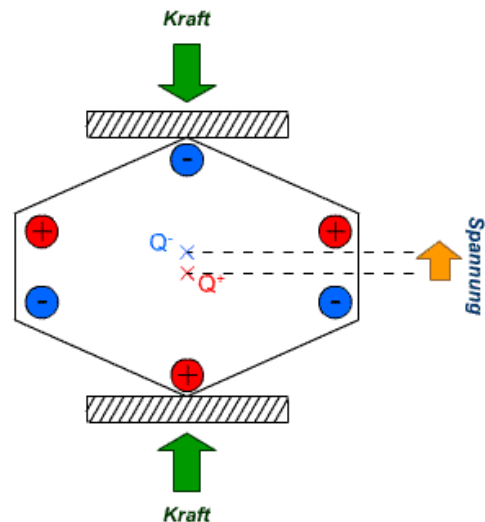
Der im Praktikum entwickelte und konstruierte Kraftmesser beruht auf der Messung einer Spannung die entsteht, wenn man einen Piezokristall durch Belastung verformt. In den folgenden Unterkapiteln wird die Konstruktion und Kalibrierung eines Kraftmessers mit Hilfe von Piezokristallen aus einem handelsüblichen Feuerzeug beschrieben.

### **5.1 Der piezoelektrische Effekt**

Piezoelektrizität ist ein Phänomen, das bei einigen Kristallen auftritt, wenn die Gitterstruktur des Kristalls durch mechanische Beanspruchung verändert wird.



(Abb. 1: Piezokristall unbelastet  
[Wiki8])



(Abb. 2: Piezokristall belastet  
[Wiki8])

Im Jahr 1880 entdeckten die Brüder Jacques und Pierre Curie dass auf der Oberfläche von Turmalinkristallen bei mechanischer Beanspruchung Ladungen entstehen. Am Modell einer zweidimensionalen sechseckigen Elementarzelle des Kristalles lässt sich der beobachtete Effekt verdeutlichen. Voraussetzung für den Piezoeffekt sind nicht elektrisch neutralen Kristallbausteine (Ionen und Atome), ein elektrisch nicht leitfähiges Material (bestehend aus diesen Kristallbausteinen) und eine bestimmte vorhandene Kristallsymmetrie. Ohne äußere Einflüsse ist das Modell der Elementarzelle elektrisch neutral, die einzelnen Ladungen sind mit gleichem Abstand zueinander positioniert und liegen auf einer gedachten Kreisperipherie. Nicht alle piezoelektrischen Materialien bestehen aus elektrisch neutralen Elementarzellen. Geometrisch kann man sich den Ladungsschwerpunkt der positiven Ladungen und der negativen Ladungen jeweils als den Schwerpunkt eines gleichseitigen Dreiecks vorstellen. Die Dreiecke liegen überlappend in dem Sechseck. Die Schwerpunkte der positiven und Negativen Ladungen fallen auf einen Punkt, den Mittelpunkt des Kreises. Das Dipolmoment  $\vec{p}$  der zwei Ladungsschwerpunkte mit den Ladungen  $Q$  und  $-Q$  und Abstand  $\vec{l}$

$$\vec{p} = Q \cdot \vec{l} . \quad (15)$$

im Mittelpunkt des Kreises ist Null, da der Abstand der beiden Ladungsschwerpunkte Null ist. [vgl. Wiki5, Wiki6]

Wird die Elementarzellen nun gerichtet, das in einer Richtung, belastet, so verschieben sich die Ladungsschwerpunkte und der Abstand  $\vec{l}$  ist ungleich Null. Ein elektrisches Dipolmoment prägt sich in Richtung der Belastung aus und eine elektrische Spannung  $U$

$$U = \frac{\vec{p} \cdot \vec{l}}{4\pi\epsilon_0 |\vec{l}|^3} \quad (16)$$

ist an den belasteten Enden des Kristalls die Folge. [vgl. MG S. 308]

Mehrere Elementarzellen bilden den Kristall. Wird der gesamte Kristall gerichtet belastet, so verteilt sich die Belastung auf die einzelnen Elementarzellen. Die Summe der einzelnen mikroskopischen Spannungen der Elementarzellen führt zu einer makroskopischen Spannung, die an den Enden des Kristalls messbar ist. Die makroskopische Verformung des Piezokristalls liegt im  $\mu\text{m}$ -Bereich und ist praktisch nicht messbar. Der Effekt wird als direkter Piezoeffekt bezeichnet. Die Umkehrung, also eine Verformung eines Piezokristalls aufgrund einer angelegten Spannung wird als inverser Piezoeffekt bezeichnet und findet beispielsweise in Tintenstrahldruckern der Marke Epson Verwendung. Der Piezoeffekt tritt bei Verbindungen wie Quarz ( $\text{SiO}_2$ ), Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ ), Blei-Zirkonat-Titanat, Berlinit und Lithiumniobat auf. [vgl. Wiki5]

Die Piezospaltung ist bei den verwendeten Piezokristallen nur von kurz messbar. Dieses Phänomen kann damit erklärt werden, dass bei einer konstanten Verformung des Kristalls die einzelnen Gitterpunkte sich neu ausrichten um den elektrisch neutralen Zustand um damit den Zustand

niedrigster Energie wieder herzustellen. Bei der Entlastung des Kristalls ist erneut eine Spannung messbar, jedoch der vorangegangenen Spannung entgegengerichtet.

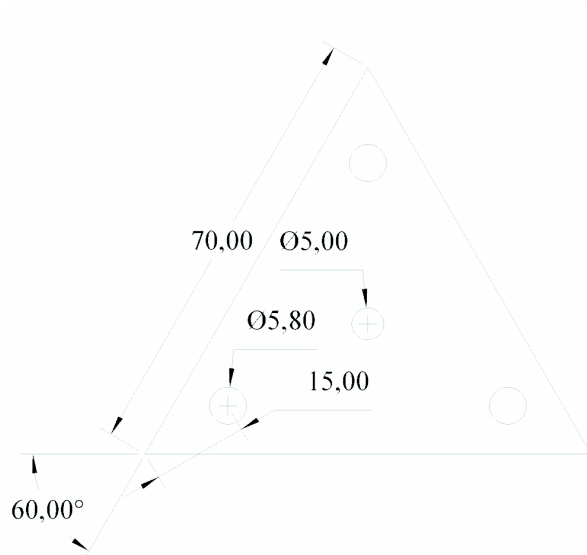
## **5.2 Konstruktion eines Kraftmessers**

Aufgrund der geringen, praktisch nicht vorhandenen Stauchung eines Piezokristalls eignen sich diese, um dynamische, vor allem Abstandsabhängige Kräfte zu messen. Hierzu muss ein geeigneter Versuchsaufbau konstruiert und kalibriert werden.

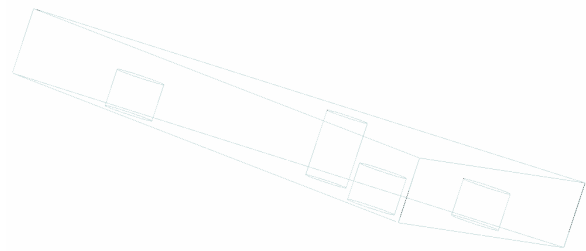
Die Piezoelemente aus handelsüblichen Feuerzeugen haben eine kleine massive Spitze und einen Metallzylinder als Basis. Da jedes Objekt auf der Spitze kippeln würde und so eine reproduzierbare Messung unmöglich machen würde, wurde folgendermaßen Verfahren. Drei solcher Piezoelemente wurde in einem Dreieck angeordnet. Eine solche Konstruktion würde bei Belastung innerhalb der Verbindungslinien der Elemente sicherstellen, dass alle Piezoelemente belastet werden und damit eine, wenn auch nicht gleiche, Piezospannung haben. Schaltet man nun alle Piezoelemente in Reihe, so addieren sich die Einzelspannungen der Elemente zu einer Gesamtspannung. Die gesamte senkrecht ausgeübte Kraft auf die Konstruktion setzt sich aus den Einzelkräften auf die einzelnen Piezoelementen additiv zusammen. So steht die messbare Gesamtspannung im direkten Verhältnis zur ausgeübten Gesamtbelastung.

In der mechanischen Werkstatt des Physik Instituts wurden entsprechende Dreiecke (siehe Abb. 3, 4) mit passenden Bohrungen aus Kunststoff (PVC) angefertigt. Für Testzwecke wurde ebenfalls ein Dreieck aus Aluminium angefertigt, jedoch lässt ein elektrisch leitfähiges Material eine Reihenschaltung der Piezoelemente nicht zu, weshalb letztendlich PVC-Dreiecke Verwendung fanden.



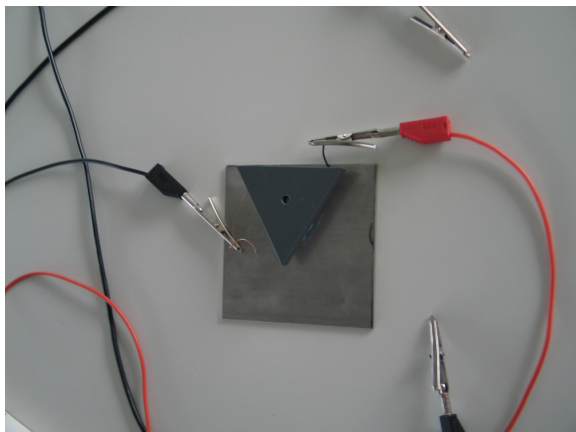


(Abb. 3: Grundriss)



(Abb. 4: perspektivische Ansicht)

Von den PVC-Dreiecken wurden zwei verschiedene angefertigt. Erst im Verlauf des Praktikums erwies es sich als sinnvoll, dass ein das mittlere Loch mit einem M5-Gewinde versehen ist. Dieses Dreieck bildete auch die Basis für alle Messungen und wurde mit vier verschiedenen Massestücken (0,5 kg, 1 kg, 2 kg, 10 kg) kalibriert.



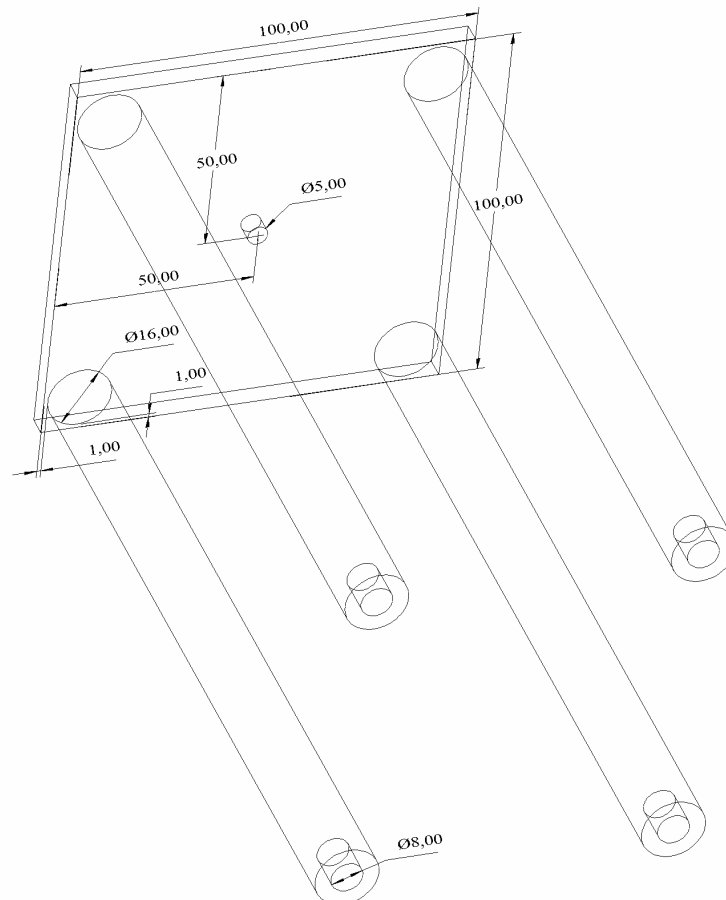
(Abb. 5: Messplatte)



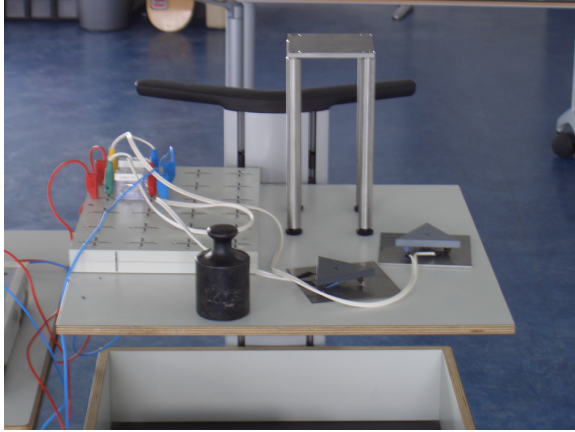
(Abb. 6: Massestücken)

Um Kräfte der Magneten bestimmen zu können, speziell Haftkräfte an Stahlplatten, wurde eine Konstruktion entwickelt, die es gestattet verschiedene Stahlplatten zu befestigen und einen Magneten langsam von diesen Platten zu entfernen. Dazu wurde ein Abstandhalter (s. Abb. 7)

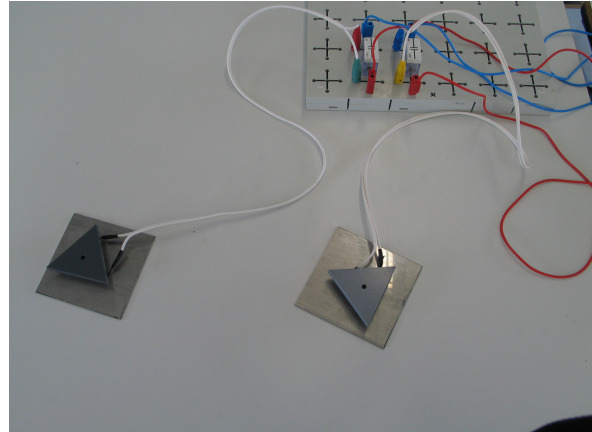
konstruiert und der Magnet an einer M5-Gewindestange befestigt. Die Gewindestange wird durch das Loch in der Platte des Abstandhalters geführt und in das Gewinde der Messplatte gedreht. Die Spitzen der Piezoelemente drücken bei Belastung auf die Platte des Abstandhalters. Die gesamte Konstruktion ist aus V2A Edelstahl gefertigt und damit nicht magnetisch. Es hat sich als praktikabel erwiesen zusätzlich unter die Spitzen der Piezoelemente eine V4A Edelstahlplatte zu legen. Es handelt sich dabei um einen härteren Stahl als V2A. Wird die Gewindestange gedreht, so wird ein daran befestigter Magnet langsam von einer Stahlplatte, an der er haftet, entfernt und die Messplatte auf die V4A-Platte gedrückt. Damit der Magnet sich nicht mitdreht, wenn die Gewindestange gedreht wird, wurde zusätzlich aus zwei Kugellagern und einigen Kupferfittings, wie sie im Sanitärbereich Anwendung finden, eine Rotationsentkopplung verwendet.



(Abb. 7: Abstandhalter)



(Abb. 9: Versuchsaufbau)



(Abb. 10: Messplatten)

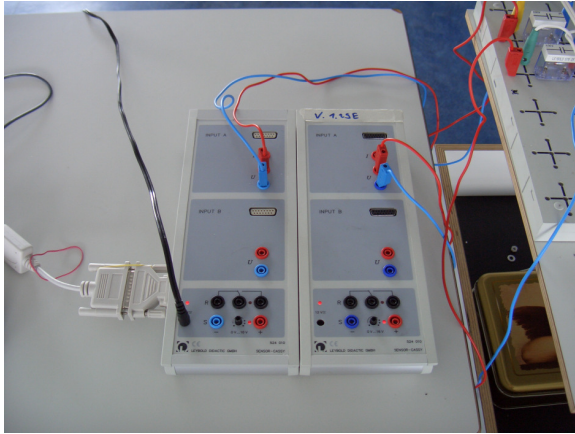
Abbildung 9 zeigt den beschriebenen Versuchsaufbau ohne Gewindestange und mit Messplatte neben dem Abstandhalter. Abbildung 10 zeigt die zwei Messplatten (hell mit Gewinde, dunkel ohne Gewinde).

### **5.3 Datenaufnahme mit CASSY**

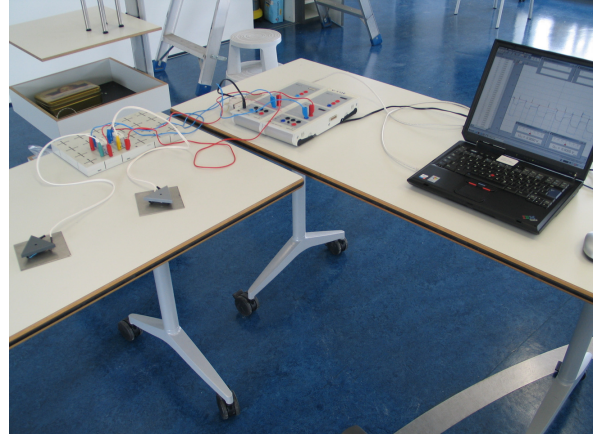
Für die Messungen wurde das „Computer Assisted Science SYstem“ [INet4] der Firma Leybold Didactic GmbH verwendet.

Sensor-CASSY stellt die Hardwareschnittstelle für die Messung von elektrischen Spannungen und Stromstärken zur Verfügung, CASSY-Lab stellt die Softwareschnittstelle für die Datenaufnahme, -darstellung und -speicherung bereit. Da beide Systeme stets zusammen Verwendung fanden wird im Folgenden für beide Teile der Wortlaut CASSY verwendet.

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen das Sensor-CASSY und eine vollständigen Messplatz mit Sensor-CASSY, Laptop und den angeschlossenen Messplatten.



(Abb. 11: Zwei Sensor-CASSY)



(Abb. 12: Messplatz mit CASSY)

Wie im Kapitel 5.1 bereits erläutert ist die zu messende Spannung bei der Belastung eines Piezoelements nicht von langer Dauer. Zusätzlich ist die Spannung um so höher, je schneller eine Belastung stattfindet. Anschaulich verdeutlicht wird diese Tatsache im Feuerzeug, der Quelle der Piezoelemente. Eine Feder wird beim zusammendrücken des Piezozünders gespannt. Beim vollständigen Zusammendrücken wird ein Sperrstift gelöst und die Feder schlägt einen kleinen Metallstößel auf die Spitze des Piezoelements. Es entstehen Spannungen bis zu 15 KV, die beim Spannungsüberschlag an einer angebrachten Metallspitze einen Zündfunken verursachen. [vgl. Wiki7]

Eine reine Spannungsmessung kann nach diesen Erkenntnissen keinen reproduzierbaren Messwert liefern, der eine Aussage über die auf die Piezoelemente wirkende Kraft gestattet. Stattdessen muss das zeitliche Integral über die Spannung zur Messwertanalyse herangezogen werden. Die folgende Betrachtung soll diese Behauptung bestätigen.

Werden die Piezoelemente belastet und eine elektrische Spannung ist messbar, so verrichtet das Piezoelement elektrische Arbeit  $W$ .

Diese Arbeit ist das Produkt aus elektrischer Leistung  $P$  und der Zeit  $t$  die diese Leistung zur Verfügung steht.

$$W = P \cdot t \quad (17)$$

Aufgrund der Tatsache, dass die Leistung  $P$  für die gesamte Dauer des Belastungsvorgangs nicht konstant ist wird zu infinitesimal kleinen Zeiteinheiten  $\delta t$  übergegangen, so dass für dieses Zeitintervall ein konstantes  $P$  angenommen werden kann. Es folgt aus Gleichung 17

$$W = P \cdot \delta t . \quad (18)$$

Die Leistung  $P$  ist definiert als Produkt aus elektrischer Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$ .

$$W = U \cdot I \cdot \delta t . \quad (19)$$

Für einen konstanten elektrischen Widerstand  $R$  folgt nach dem Ohmschen Gesetz für die Stromstärke  $I$

$$I = \frac{U}{R} . \quad (20)$$

Mit Gleichung 19 folgt daraus

$$W = U^2 \cdot \frac{1}{R} \cdot \delta t . \quad (21)$$

Nun muss die Quelle der elektrischen Arbeit gefunden werden, denn die Energieerhaltung impliziert, dass Energie – und Arbeit ist nichts anderes als eine Energieänderung am System - nicht aus dem Nichts entsteht. Plausibel erscheint die mechanische Belastung als Energiequelle herauszuziehen. Für die mechanische Arbeit gilt

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} d\vec{s} \quad (22)$$

Wird nun angenommen, dass die Kraft nicht explizit wegabhängig ist und die Kraft  $F$  längs des Weges  $s$  wirkt, so lässt sich Gleichung 19 lösen zu

$$W = F \cdot (s_2 - s_1) = F \cdot \Delta s \quad (23)$$

Da jedoch auch in diesem Fall nicht von einer konstant wirkenden Kraft auszugehen ist, wird zu infinitesimal kleinen Wegstücken  $\delta s$  übergegangen, so dass für diese Stücke eine konstant wirkende Kraft angenommen werden kann.

$$W = F \cdot \delta s \quad (24)$$

Setzt man nun die elektrische Arbeit aus Gleichung 21 und die mechanische Arbeit aus Gleichung 24 gleich, so erhält man die folgende Proportionalität

$$F \cdot \delta s \sim U^2 \cdot \delta t. \quad (25)$$

Die gesamte Arbeit des Belastungsvorgangs liefert im elektrischen Fall die Summe über alle Zeitintervalle  $\delta t$ , also ein zeitliches Integral, im mechanischen Fall die Summe über alle Wegstücken  $\delta s$ . Geht man jedoch von der begründeten Annahme aus, dass alle Wegstücken zusammen ein konstantes, sehr kleines Wegstück  $s$  ergeben, um dass die Piezokristalle gestaucht werden, so reduziert sich die Wegabhängigkeit zu einem konstanten Faktor, der in der Proportionalitätsbetrachtung vernachlässigt wird. Die Betrachtung führen zu dem vermuteten Ergebnis

$$F \sim \int U^2 \cdot \delta t. \quad (25)$$

Die Kraft ist proportional zum Zeitintegral über dem Quadrat der Spannung.

Für die Messungen mit CASSY wurde die Möglichkeit der Software genutzt ein zeitliches Integral über die Spannung zu berechnen. Im Gegensatz zu den obigen Betrachtungen wurden nicht über das Quadrat der Spannung integriert. Es zeigte sich jedoch, dass die theoretisch vermutete Proportionalität auch für das Integral über die Spannung zutrifft.

An die Messwerte wurden zwei grundlegende Anforderungen gestellt. Zum einen sollten die Messwerte reproduzierbar sein, zum anderen sollte die Plausibilität der Messwerte gewahrt sein. Das bedeutet konkret: Wird ein Massestück der Masse  $m$  auf eine Messplatte gestellt, so muss der Betrag des zeitlichen Integrals über die Spannung einen konstanten Wert annehmen und nach dem Entfernen des Massestücks wieder auf Null zurück gehen.

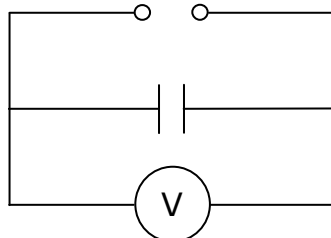
Die Software erlaubt eine Vielzahl von Einstellungen. Neben dem Messintervall können vor allem die Messwerte für die Spannungen derart beeinflusst werden, dass ständig auftretende Schwankungen durch einen Mittelwert über eine bestimmte Zeit korrigiert werden. Für das Zeitintegral ist es zwingend erforderlich dass die gemessenen Spannungen so geringe Schwankungen wie möglich aufweisen. Zusätzlich muss auch ein eventuell vorhandenes Offset, also eine Verschiebung des Messwertes von der Null, in CASSY korrigiert werden. Mehrere Versuchsreihen haben gezeigt, dass ein Mittelwert über 100ms und ein entsprechendes Messintervall reproduzierbare und plausible Ergebnisse liefern. Um zusätzlich kleine Spannungsschwankungen auszugleichen und sicherzustellen, dass auch Ereignisse zwischen den Messintervallen berücksichtigt werden können, hat es sich als sinnvoll erwiesen nicht die Kurzschlussspannung sondern jeweils die Spannung an einem Kondensator mit einer Kapazität von 1nF zu messen, der parallel zum Piezoelement geschaltet ist.

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Piezoelemente gegenüber Erschütterungen musste eine Kompensation von solch ungewollten Einflüssen oder ein Indikator für eine nicht zu verwendende Messung geschaffen werden. Hierzu wurde eine zweite Messplatte neben den Versuchsaufbau gelegt. Kleine Erschütterungen konnten direkt kompensiert werden, indem die Differenz der beiden Zeitintegrale über die Spannungen gebildet wurde. Größere Erschütterungen waren nicht zu kompensieren und so mussten diese Messungen dann verworfen werden.

Für die Kalibrierung und sämtliche andere im weiteren Verlauf beschriebenen Messungen wurde stets die Differenz der beiden Zeitintegrale verwendet.

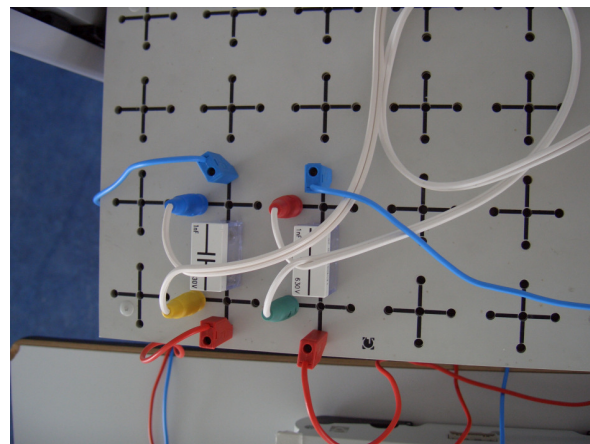
In Abbildung 13 ist die beschriebene Schaltung einer Messplatte als Schaltskizze dargestellt, Abbildung 14 zeigt die zwei Kondensatoren (je einer pro Messplatte).

Spannungsquelle: Piezoelement



Messgerät: CASSY

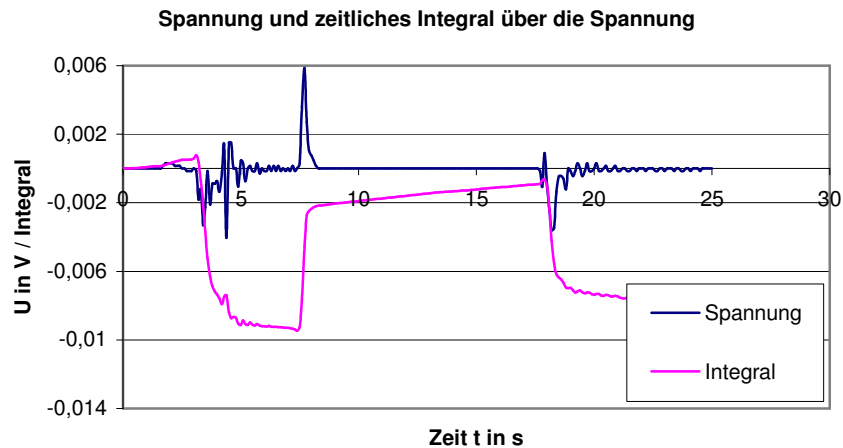
(Abb. 13: Schaltskizze)



(Abb. 14: Schaltung)

Abbildung 15 zeigt an einer Beispielmessung den zeitlichen Verlauf der Spannung und des zeitlichen Integrals über die Spannung.





(Abb. 15: Beispielmessung)

## 5.4 Kalibrierung

Abbildung 16 zeigt die Kalibrierungskurve der für die späteren Messungen verwendeten Platte. Hierzu wurden die verschiedenen Massestücken jeweils sechsmal auf die Messplatte gestellt und wieder herunter genommen. Dargestellt sind die Mittelwerte der gemessenen Differenzen der Integrale über die Spannungen berechnet nach

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

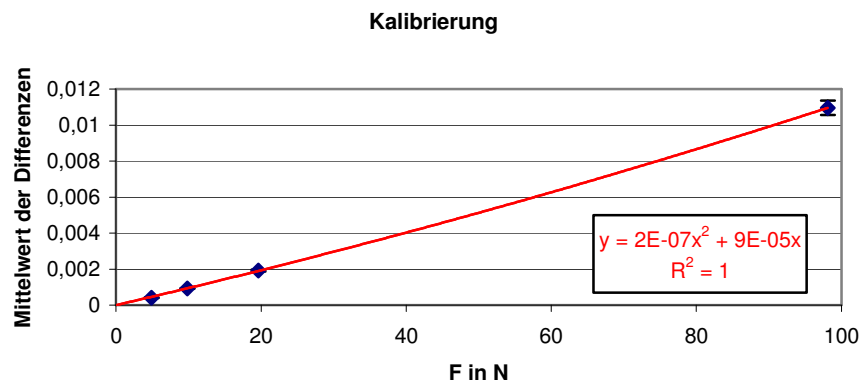
und der zufällige Fehler, ermittelt mit Hilfe der Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (27)$$

nach der Gleichung

$$e_z = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (28)$$

[vgl. PPE S. 21 ff.]



*(Abb. 16: Kalibrierungskurve)*

Ein linearer Trend der Messwerte ist zu erkennen. Versuchsweise wurde eine Polynom-Regression zweiten Grades durchgeführt. Diese Regression liegt noch näher an den einzelnen Messwerten und wurde daher als Kalibrierungsfunktion verwendet. Dabei kann der zusätzliche quadratische Term im Sinne einer Taylorentwicklung als Korrekturterm aufgefasst werden. Eine Umstellung der Funktion ergibt den folgenden funktionalen Zusammenhang zwischen Messwert D und Kraft F in Newton

$$F / [\text{N}] = -\frac{900}{4} + \sqrt{\frac{81 \cdot 10^4}{16} + \frac{D \cdot 10^7}{2}}. \quad (29)$$

Der maximale relative Fehler, der sich aus der Regression ergibt, beträgt 3,6%.

## **6 Welche Eigenschaften von Supermagneten sollen bestimmt werden?**

Magneten haften an vielen Metallteilen – so viel ist auch Kindern der Grundschule bereits bekannt. Dass die Metallteile ferromagnetisch sein müssen, damit ein Magnet daran haften kann wurde im Kapitel 3.1 erläutert. Im Folgenden soll nun untersucht werden, was einen Magneten

zum Supermagneten macht. Dabei wird das Augenmerk vor allem auf die Haftkraft an Stahlplatten gelegt. Ein Zusammenhang zwischen Haftkraft und Dicke der Stahlplatte, sowie zwischen Haftkraft und dicke des Magneten wird experimentell untersucht. Zusätzlich wurde mit einer Hall-Sonde eine Messung der magnetischen Flussdichte durchgeführt. Vergleiche mit den Angaben des Herstellers ergaben jedoch signifikante Abweichungen nach unten.

Die folgende Tabelle listet die für die Versuche verwendeten Magnete mit ihnen Abmessungen und Remanenzen laut Händlerangaben [INet5] auf.

<b>Händler-bezeichnung</b>	<b>Form</b>	<b>Länge/Breite/Durchmesser in mm</b>	<b>Höhe in mm</b>	<b>Remanenz lt. Händler in T</b>
S-05-08-N	Zylinder	-/-/5	8,47	1,32 – 1,37
S-10-05-N	Zylinder	-/-/10	5	1,29 – 1,32
S-20-05-N	Zylinder	-/-/20	5	1,29 – 1,32
Q-20-20-03-N	Quader	20/20/-	3	1,32 – 1,37
Q-20-20-05-N	Quader	20/20/-	5	1,29 – 1,32
Q-20-20-10-N	Quader	20/20/-	10	1,29 – 1,32

*(Tabelle 1: Geometrie und Magnetisierung der verwendeten Magnete)*

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, gibt es drei Quader, die bei gleichen Abmaßen der Grundfläche verschiedene Dicken besitzen. Diese drei Magneten wurden für den größten Teil der durchgeführten Messungen verwendet, da vergleichbare Ergebnissen zu erwarten waren.

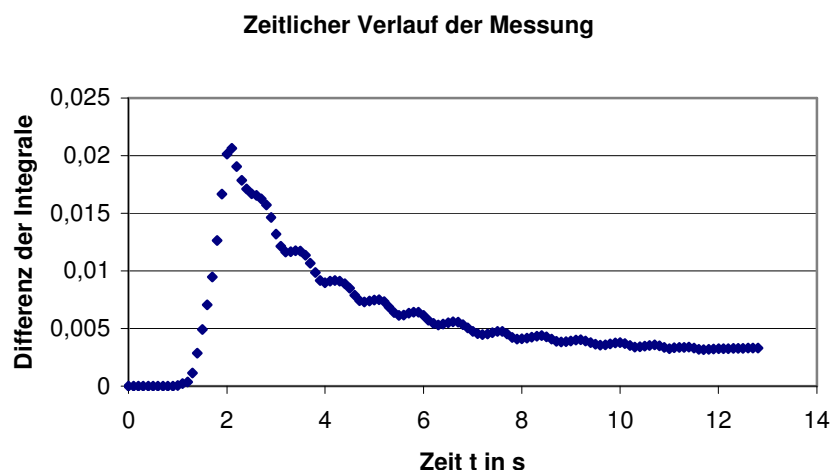
Für die Bestimmung der Haftkraft wurden auf die Magnete geeignete Kunststoffschrauben mit einem Zweikomponentenkleber (Uhu 300 plus endfest) geklebt. Laut Hersteller hat dieser Kleber ein Haftvermögen von 300 kg/cm<sup>2</sup>. Es wurden extra M5 Kunststoffschrauben verwendet, um kein magnetisierbares Material in die Nähe der Magneten zu bringen. Die Schrauben waren so gewählt, dass sie mit einer Verbindungsmutter mit der Gewindestange verbunden werden konnten.

Zusätzlich zu den Magneten standen Platten (10 cm x 10 cm) passen für den Abstandhalter (s. Kap 5.2) aus unbehandeltem Stahl (ugs. schwarzer Stahl) in den Dicken 0,75 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm zur Verfügung.

## 7 Messreihen und deren graphische Darstellung

Zur Bestimmung der Haftkraft wurden ein Magnet und eine Stahlplatte in der Experimentiereinrichtung befestigt. Mit der Gewindestange wurde eine Zugkraft auf den Magneten ausgeübt. Um keine seitlichen Scherkräfte berücksichtigen zu müssen wurde der Versuch in senkrechter Lage durchgeführt. Der Magnet wurde nach oben von der Stahlplatte gezogen.

Mit CASSY wurde der zeitliche Verlauf der für die Messung benötigten Differenz der Integrale über die Spannungen aufgezeichnet. Abbildung 17 zeigt einen solchen Verlauf.



(Abb. 17: Zeitlicher Verlauf einer Messung)

Nur das Maximum dieser Differenz, also ein einziger Punkt einer solchen Messreihe, wurde für die Bestimmung der Haftkraft herangezogen. Dieses

Maximum wird mit Gleichung 29 in die entsprechende Kraft umgerechnet und stellt die maximale Kraft dar, die der Magnet halten kann, bevor er sich von der Stahlplatte löst.

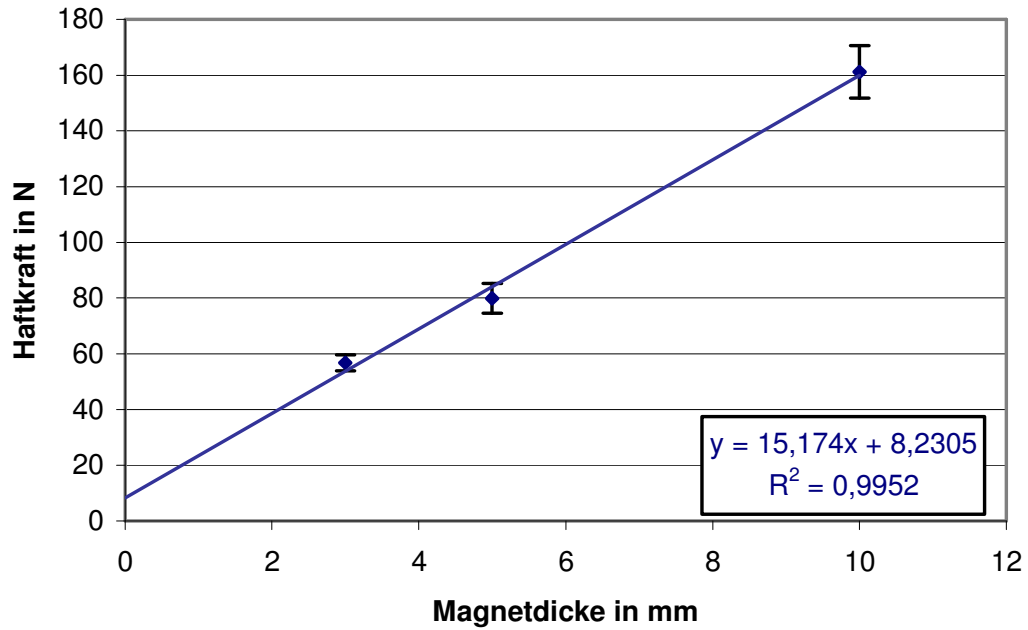
Den zeitlichen Verlauf kann entnommen werden, dass die Kraft nach dem Lösen geringer wird. Den in Kapitel 4.2 erläuterten Nachteil des Federkraftmessers hat diese Messmethode offensichtlich nicht. Auch nahe an den Stahlplatten können Kraftmessungen durchgeführt werden.

Für jede Messung wurde die eigentliche Haftkraft bestimmt, indem die Gewichtskraft des Magneten und der sonstigen Versuchsaufbauten, die von oben auf die Piezoelemente drücken, abgezogen wurde.

### **7.1 Haftkraft in Abhängigkeit von der Magnetdicke**

Wie schon in Kapitel 5.4 zur Kalibrierung wurden auch für sämtliche Messwerte jeweils sechs Messungen durchgeführt und der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Differenz des zeitlichen Integrals über die Spannungen bestimmt. Für die drei verschieden dicken Quader auf 7 mm Stahl, zusammengesetzt aus den zwei dicksten verfügbaren Stahlplatten, ergibt sich der folgende grafische Zusammenhang zwischen Magnetdicke und Haftkraft.

### Haftkraft in Abhängigkeit von der Magnetdicke

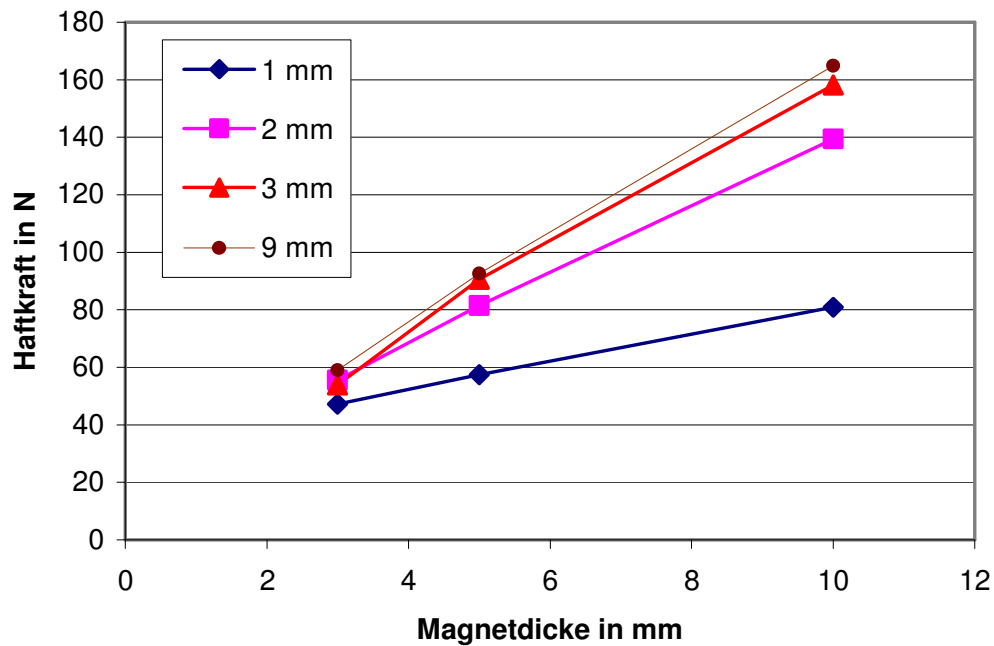


(Abb. 18: Haftkraft an 7 mm Stahl)

Ein linearer Zusammenhang zwischen Magnetdicke und Haftkraft wird erkannt. Je dicker der verwendete Magnet ist, je höher war die Haftkraft.

Abbildung 18 zeigt die Haftkraft in Abhängigkeit der Magnetdicke und der Plattenstärke.

## Haftkraft in Abhängigkeit von der Magnetdicke und der Plattenstärke

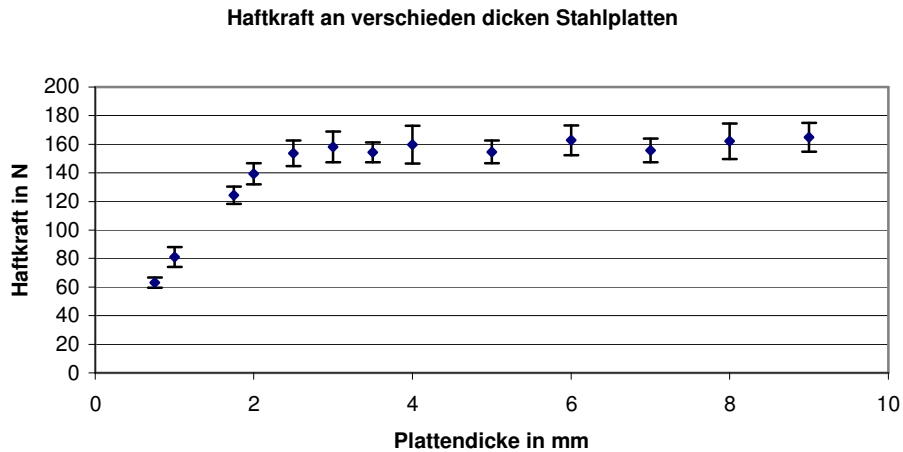


(Abb. 19: Haftkraft über Magnetdicke)

Der Darstellung wird folgender Zusammenhang entnommen:  
Für alle Stahlplatten nimmt die Haftkraft mit steigender Magnetdicke zu.  
Der Trend ist linear. Die Dicke der Stahlplatte ist offensichtlich ein  
Parameter, der sich im Anstieg der linearen Trends widerspiegelt.

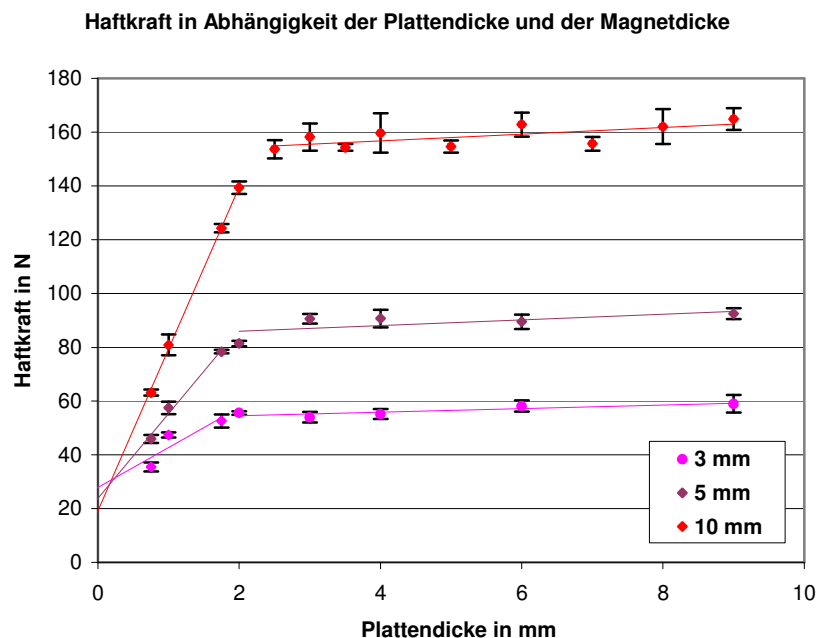
### 7.2 Haftkraft in Abhängigkeit von der Plattendicke

Mit dem Magneten Q-20-20-10-N wurde die Haftkraft an Stahlplatten  
verschiedener Dicken bestimmt.



(Abb. 20: Haftkraft an diversen Stahlplatten)

Der Zusammenhang zwischen Haftkraft und dicke der Stahlplatte ist eindeutig nicht linear. Im Bereich bis 2 mm Plattendicke wird ein linearer Trend erkannt, oberhalb von 2 mm Plattendicke tritt eine Sättigung ein. Ein weiteres Erhöhen der Plattendicke führt nur noch zu einer geringfügigen Erhöhung der Haftkraft.



(Abb. 21: Verlauf der Haftkraft für verschiedene Magneten)



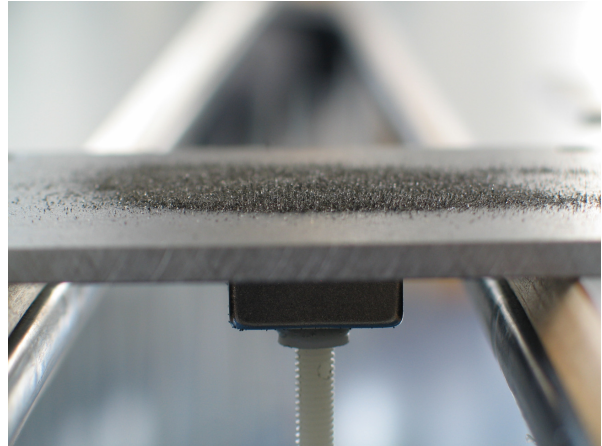
Auch für verschieden dicke Magneten wird ein linearer Zusammenhang zwischen Haftkraft und Plattendicke bis zu einer Plattenstärke von ca. 2 mm festgestellt. Bei allen Magneten setzt oberhalb dieser Plattendicke eine Sättigung ein. Der Sättigungswert der Haftkraft steigt mit zunehmender Magnetdicke.

Die Trendlinien aller drei Magnete durchlaufen einen engen Bereich. Der grafischen Abbildung kann ein Schnittpunkt in dem sich alle drei Trendlinien schneiden entnommen werden. Genaue Berechnungen ergeben jedoch drei Schnittpunkte. Der Mittelwert über die x- und y-Koordinaten ergibt einen mittleren Schnittpunkt S bei (0,2 / 30).

### 7.3 Feldlinienbilder aus Eisenspänen Supermagneten



(Abb. 22: Eisenspäne auf einer 2mm Stahlplatte mit Magnet drunter)



(Abb. 23: Eisenspäne auf einer 4mm Stahlplatte mit Magnet drunter)



(Abb. 24: Eisenspäne auf einer Kunststoffplatte mit Ringmagnet)



(Abb. 25: Ringmagnet gehalten von Eisenspänen an Kunststoffplatte)



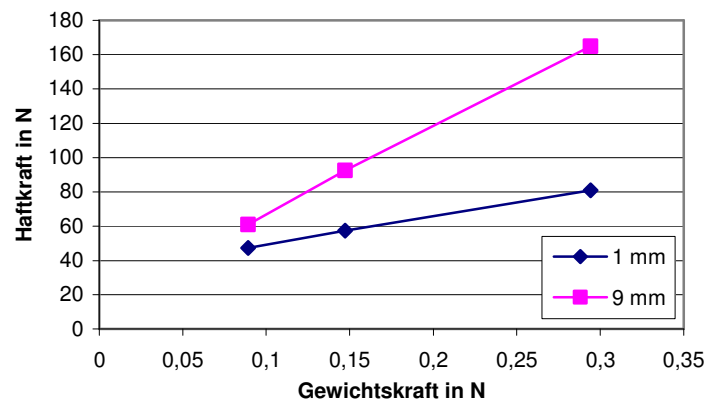
(Abb. 26: Eisenspäne auf einer Kunststoffplatte mit Quadermagnet)



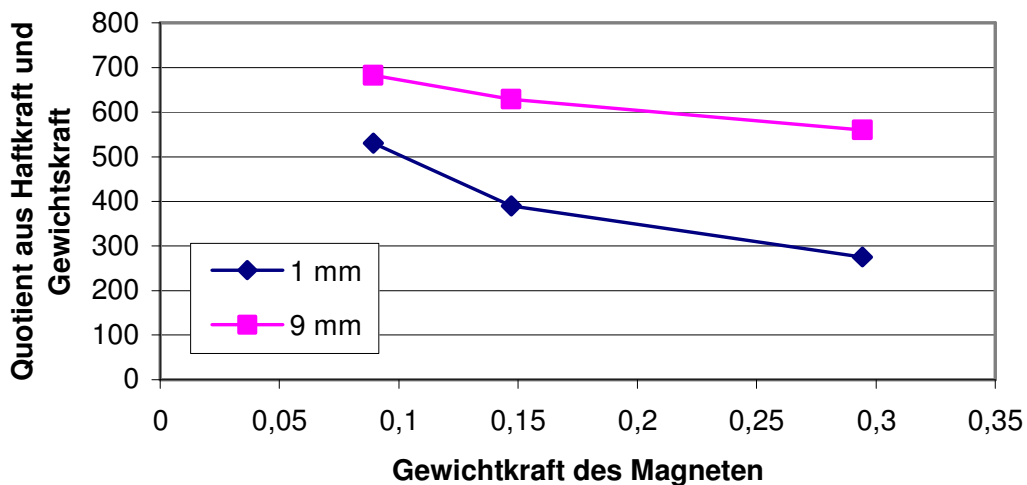
(Abb. 27: Eisenspäne auf einer Kunststoffplatte mit Quadermagnet)

## 7.4 Haftkraft in Abhängigkeit von der Gewichtskraft des Magneten

Die Experimente zu den Feldlinienbildern zeigten, dass wenige Eisenspäne genügen, um einen der „Supermagnete“ von unten an einer Kunststoffplatte haften zu lassen. Dieses Haftvermögen gibt Anlass dazu die Haftkraft in Abhängigkeit von der Eigenmasse des Magneten zu bestimmen. Dazu wurden die Werte für die Haftkraft an einer 1 mm dicken Stahlplatte verwendet. Die Eigenmasse des Magneten wurde der Internetseite des Händlers ([INet6], [INet7]) entnommen.



(Abb. 27: Haftkraft über Eigengewicht)



(Abb. 28: Quotient aus Haftkraft und eigener Gewichtskraft)

Abbildung 27 wird entnommen, dass die eigene Gewichtskraft eines Magneten und die Haftkraft an einer 1 mm dicken Stahlplatte einen linearen Trend aufweisen. Dieser Trend wird dadurch erklärt, dass bei gleicher Magnetgrundfläche und einer homogenen Masseverteilung die Masse und damit auch Gewichtskraft des Magneten und die Magnetdicke proportional zueinander sind. Somit wird der lineare Trend auf den linearen Zusammenhang zwischen Haftkraft und Magnetdicke zurückgeführt.

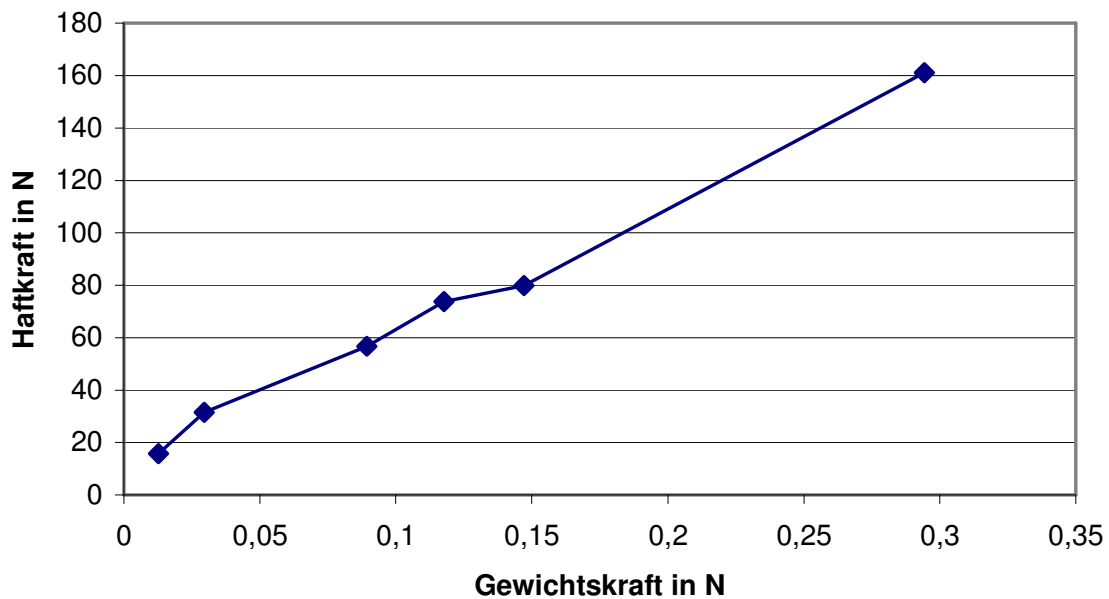
Bezogen auf die Gewichtskraft des Magneten kann ein Maß für die eigentliche Stärke des Magneten festgelegt werden. Der Quotient aus eigener Gewichtskraft und der Haftkraft sagt aus, das welches Vielfache seines Eigengewichts der Magnet in der Lage ist zu tragen.

## **8 Ergebnisse und Ausblicke**

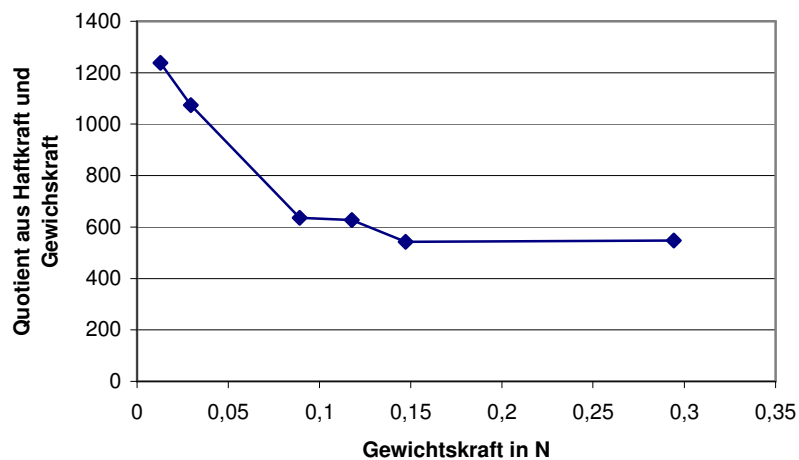
### **8.1 Warum ist ein „Supermagnet“ super?**

Abbildung 28 zeigt, dass einige der im Laborpraktikum verwendeten Magneten in der Lage sind mehr als das 600-fache ihres eigenen Gewichts zu tragen. Auch an einer 1 mm starken Stahlplatte haben die Magneten das Vermögen ihr 250-faches Eigengewicht zu tragen.

Abbildung 29 zeigt die Haftkraft in Abhängigkeit der eigenen Gewichtskraft, für alle sechs Magneten. In Abbildung 30 ist der Quotient aus Haftkraft und Gewichtskraft über der Haftkraft aufgetragen dargestellt.



(Abb. 29: Haftkraft)



(Abb. 30: Quotient aus Haftkraft und Gewichtskraft)

Es wird erkannt, dass der für die drei quaderförmigen Magneten erkannte Trend sich auf die zylinderförmigen Magneten übertragen lässt. Der kleinste Magnet, mit einer Eigenmasse von 1,3 g ist in der Lage das 1200-fache seines Eigengewichts zu tragen, sprich an Haftkraft aufzubringen.

So lässt sich ein Supermagnet durch eine Untergrenze des Quotienten aus Haftkraft und eigener Gewichtskraft definieren.

**Ein Dauermagnet, der mindestens das 250-fache seines Eigengewichts an einer 1 mm dicken Stahlplatte halten kann ist ein Supermagnet.**

## **8.2 Anwendungsgebiete für Supermagnete**

Die hohe Haftkraft der Supermagnete lässt sich auf die hohe Remanenz des Materials zurückführen. Versuche, bei denen starke Magnetfelder benötigt sind ein ideales Einsatzgebiet für die Supermagnete.

Einige Beispiele sind:

- Experimente zur Induktion
- Experimente zur Wirbelströmen
- Experimente zum magnetischen Potential

## 9 Quellen

[Wiki 1]

<http://de.wikipedia.org/wiki/Diamagnetismus>

[Wiki2]

<http://de.wikipedia.org/wiki/Paramagnetismus>

[Wiki3]

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

[Wiki4]

<http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen#DMS-Werkstoffe>

[Wiki5]

<http://de.wikipedia.org/wiki/Piezo>

[Wiki6]

[http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches\\_Dipolmoment](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches_Dipolmoment)

[Wiki7]

<http://de.wikipedia.org/wiki/Piezofeuerzeug>

[Wiki8]

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/b/be/Piezoeffekt350px.gif>

[INet1]

<http://paramagnetismus.know-library.net/>

[INet2]

[http://www.supermagnete.de/faq.php?&show\\_group=magnetism&highlight\\_question=coercivity#coercivity](http://www.supermagnete.de/faq.php?&show_group=magnetism&highlight_question=coercivity#coercivity)

[INet3]

[http://www.magnet-shop.net/?gclid=CLC\\_oeSi44sCFR1TZwodjS9gTQ](http://www.magnet-shop.net/?gclid=CLC_oeSi44sCFR1TZwodjS9gTQ)

[INet4]

<http://www.leybold-didactic.de/software/index.html?cassy-s.html>

[INet5]

[http://www.supermagnete.de/data\\_table.php](http://www.supermagnete.de/data_table.php)

[INet6]

[http://www.supermagnete.de/magnets.php?group=blocks\\_big](http://www.supermagnete.de/magnets.php?group=blocks_big)

[INet7]

[http://www.supermagnete.de/magnets.php?group=blocks\\_medium](http://www.supermagnete.de/magnets.php?group=blocks_medium)

[PPE]

R. Manns, Skript zum Physikalischen Praktikum Einführung,  
Humboldt-Universität zu Berlin, 2001

[PP3]

R. Manns, Skript zum Physikalischen Praktikum Teil 3,  
Humboldt-Universität zu Berlin, 2002

[TW]

Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II,  
5. überarbeitete Auflage, paetec 1995

[MG]

Dieter Meschede, Gerthsen Physik, 21. Auflage, Springer 2002