

VERSUCHSBERICHT ZU

E5 – MAGNETISCHE SUSZEPTIBILITÄT

Gruppe 10 Mi

Alex Oster (E-Mail: a_oste16@uni-muenster.de)
Jonathan Sigrist (E-Mail: j_sigr01@uni-muenster.de)

durchgeführt am 15.11.2017
betreut von
Phillip EICKHOLT

21. November 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	2
2	Arten von Magnetismus	2
2.1	Diamagnetismus	2
2.2	Paramagnetismus	3
3	Versuch 1: Demonstrationsversuch	3
4	Versuch 2: Magnetismuswaage und Volumenssuszeptibilität	6
5	Versuch 3: Fallender Neodymmagnet	9
6	Versuch 4: Aluminium-Kamm und -Platte	11

1 Kurzfassung

In diesem Bericht beschäftigen wir uns mit den magnetischen Eigenschaften von Stoffen. Dazu gehen wir insbesondere auf „schwache“ Arten magnetischer Eigenschaften ein, welche im Alltag unscheinbar wirken, dennoch existieren. Um diese nachzuweisen, betrachten wir hier vier Versuche. Der Erste beschäftigt sich mit den magnetischen Eigenschaften von Wasser bzw. Manganchlorid, welche wir durch das Einschieben eines äußeren Magnetfeldes betrachten können. Um die Größenordnung der dabei entstehenden Auslenkungen zu bestimmen, führen wir eine Fermi-Abschätzung durch.

Bei dem zweiten Versuch bestimmen wir mit Hilfe der Magnetismusswaage die Volumenssuszeptibilität bzw. die Magnetisierbarkeit verschiedener Stoffproben in einem äußeren Magnetfeld.

Zuletzt betrachten wir, welchen Einfluss die Form eines Stoffes (hier Aluminium), welcher sich in einem äußeren Magnetfeld befindet, auf seine magnetischen Eigenschaften hat. In Versuch 3 betrachten wir dazu das Fallen eines starken Magnets durch zwei Typen von Rohren und in Versuch 4 zwei Aluminiumplatten verschiedener Form bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes.

2 Arten von Magnetismus

Alle Stoffe besitzen magnetische Eigenschaften, wobei die beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes auftretenden Effekte bei den meisten Stoffen verschwindend gering sind. Die „Stärke“ dieser Effekte ist abhängig von dem Magnetismustypen des Stoffes¹.

Wir betrachten im Folgenden zwei Typen von Magnetismus, welche für die durchgeführten Versuche relevant sind: Dia- und Paramagnetismus. Hier gehen wir zuerst auf die makroskopische und dann auf die mikroskopische Betrachtung dieser Phänomene ein.

2.1 Diamagnetismus

Ist ein Stoff diamagnetisch, so bedeutet das, dass bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes eine kleine Magnetisierung des Stoffes entgegengesetzt zu Richtung dieses Feldes induziert wird. Dies bedeutet, dass Diamagnete in einem inhomogenen äußeren Magnetfeld aus Bereichen mit stärkerem Feld leicht abgestoßen werden. Ohne ein solches äußeres Magnetfeld verschwinden die diamagnetischen Eigenschaften des Stoffes.

Aufgrund der Struktur von diamagnetischen Stoffen, besitzen diese keine freien Elektronenspins, was bedeutet, dass nur die magnetischen Strommomente μ_{Strom} zum magnetischen Verhalten des Stoffes beitragen.

¹dieser steht in Abhängigkeit von der Temperatur, kann sich demnach ändern

2.2 Paramagnetismus

Paramagnetische Stoffe hingegen werden durch kleine Magnetisierung in Richtung des äußeren Magnetfeldes zu diesem gezogen, da sie hierbei eine Kraft in Richtung höherer Magnetfeldstärke erfahren. Wie auch bei diamagnetischen Stoffen, verschwinden die paramagnetischen Eigenschaften, wenn das äußere Magnetfeld nicht weiter vorhanden ist.

Im Gegensatz zu den diamagnetischen Stoffen besitzen paramagnetische Stoffe magnetische Momente μ_{Spin} , welche sich stärker auswirken als die magnetischen Strommomente μ_{Strom} , die paramagnetische wie auch diamagnetische Stoffe besitzen. Das magnetische Moment μ_{Spin} ergibt sich aus dem Spin- und Bahnmoment ungepaarter Elektronen. Diese richten sich in Richtung des äußeren Magnetfeldes aus. Für vollständig gefüllte Atomschalen ist dieser Effekt nicht möglich.

Das magnetische Strommoment μ_{Strom} führt wie auch bei Diamagneten zu einem entgegen gerichteten Magnetfeld, dieser Effekt wird aber bei paramagnetischen Stoffen durch die magnetischen Momente μ_{Spin} , welche deutlich stärker sind unkenntlich gemacht.

3 Versuch 1: Demonstrationsversuch

Der erste Versuch war ein Demonstrationsversuch. Er wurde von unserem Betreuer durchgeführt und diente dazu die, durch ein äußeres Magnetfeld verursachte, Auslenkung einer Flüssigkeit zu messen.

Methoden

Hierbei wurde ein Laser auf Wasser in einer dünnen Schale gerichtet. Die Reflexion des Lasers von der Wasseroberfläche war an der gegenüberliegenden Wand² zu sehen. Wir schieben einen starken Magneten unter der Schale her und Betrachten die Änderung der Reflexion. In Abbildung 1 ist dies schematisch dargestellt, der Laser vor Auslenkung ist hier in rot zu sehen und danach in orange. Wir betrachten zur Berechnung der Auslenkung des Wassers h die Änderung des Winkels, vor und nach Einschieben, des Magneten, wie es in Abb. 2 genauer dargestellt ist. Dazu betrachten wir folgende Gleichungen:

Aus Abbildung 1 folgt:

$$\tan \alpha = \frac{A_0}{a} \tag{1}$$

$$\tan(\alpha + 2\beta) = \frac{A^+}{a}; \quad A^+ = A_0 + \Delta A \tag{2}$$

²wird im Folgenden als Schirm bezeichnet

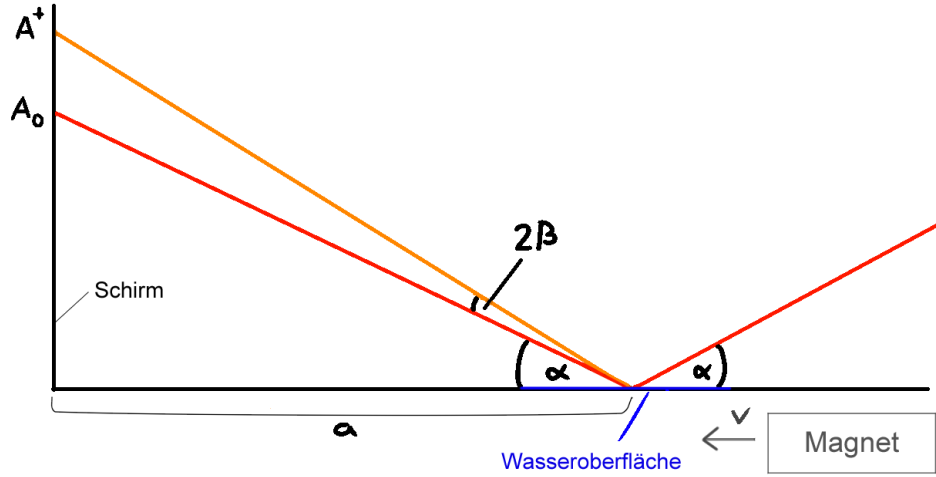


Abbildung 1: Aufbau des Demonstrationsversuchs

und aus Abb. 2:

$$\tan \beta = \frac{2h}{d}. \quad (3)$$

(Hierbei ist zu Beachten, dass das Wasser in Fig. 2 in die entgegengesetzte Richtung ausgelenkt ist) Stellt man nun Gl. (3) nach der gesuchten Größe h um und setzt geeignet Gl. (1) und Gl. (2) ein, so folgt:

$$\tan \beta = \frac{2h}{d} \Leftrightarrow h = \frac{d}{2} \tan \beta \quad (4)$$

$$= \frac{d}{2} \tan \left(\frac{1}{2} \arctan \left(\frac{A^+}{a} \right) - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (5)$$

$$= \frac{d}{2} \tan \left(\frac{\arctan \left(\frac{A^+}{a} \right) - \arctan \left(\frac{A_0}{a} \right)}{2} \right) \quad (6)$$

Fermi-Abschätzung

Um herauszufinden in welcher Größenordnung die Auslenkung des Wassers liegt, haben wir eine Fermi-Abschätzung durchgeführt. Dafür nehmen wir folgende Werte an:

$$a = 3.5 \text{ m}; \quad A_0 = 1.2 \text{ m}; \quad \Delta A = 3 \text{ cm}; \quad d = 1 \text{ cm}$$

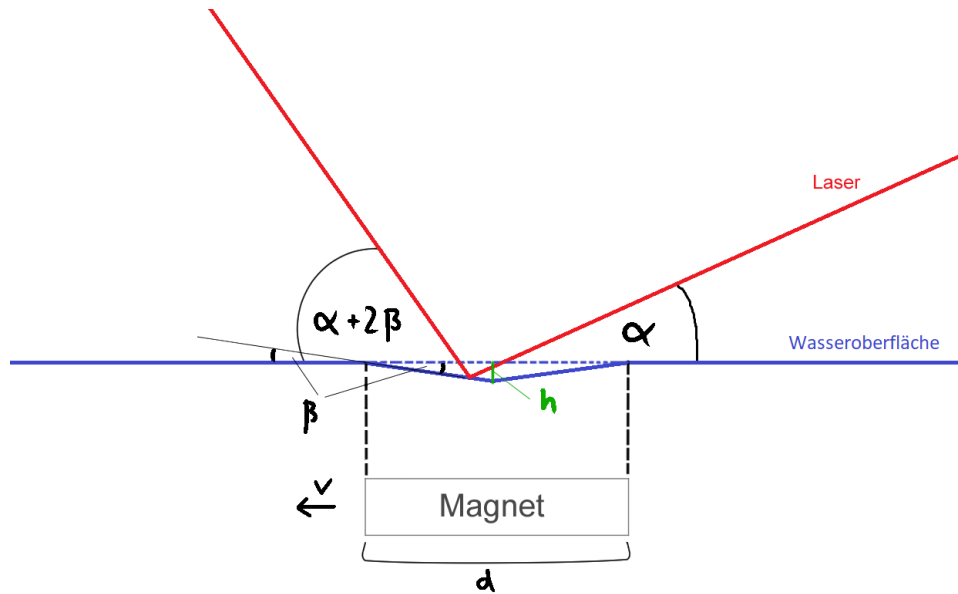


Abbildung 2: Genauere Betrachtung der Winkel

Wir erhalten durch Einsetzen in Gleichung Gl. (6) ein Ergebnis von $h \approx 19 \mu\text{m}$ für die Auslenkung des Wassers, welche in Abb. 3 in Abhängigkeit der Magnetposition³ ungefähr dargestellt wird. Zudem haben wir den Versuch mit einem Manganchlorid-Hydrat anstelle von Wasser wiederholt und eine deutlich größere Auslenkung, diesmal zunächst in entgegengesetzte Richtung, durch die Reflexion des Lasers wahrgenommen und mit $\Delta A = 0.7 \text{ m}$ erhalten wir eine, durch Fermi-Abschätzung der Auslenkung von $h \approx 420 \mu\text{m}$.

Schlussfolgerung

Die von uns ermittelte Größenordnung der Auslenkung für Wasser wirkt realistisch, da es diamagnetisch ist, also nur sehr schwach auf äußere Magnetfelder reagiert sollte, wie von uns ermittelt. Die Betrachtung des Manganchlorids stellt seine paramagnetischen Eigenschaften deutlich in Kontrast zu den Diamagnetischen des Wassers. Diese Kontraste entsprechen den Definitionen von Dia- und Paramagnetismus, da wie wir beobachtet haben (Stärke/Richtung der Auslenkung).

³bzw. der Zeit, bei konstanter Geschwindigkeit des Magneten

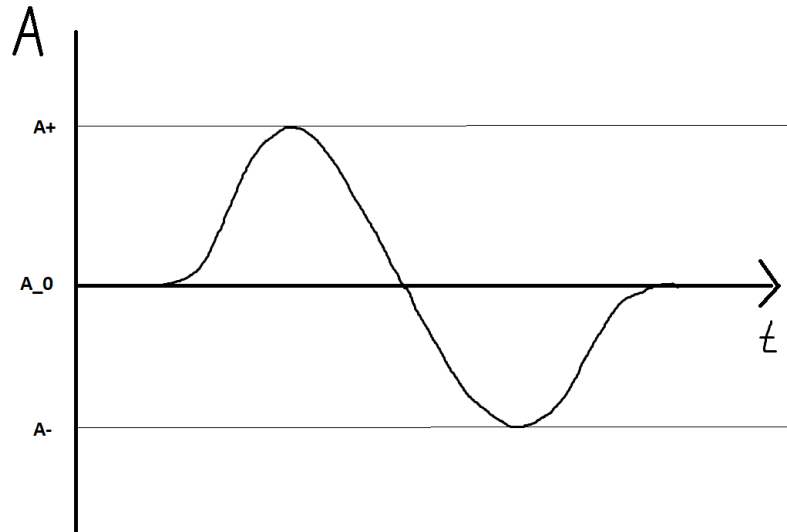


Abbildung 3: Verlauf der Position des Lichtpunktes auf dem Schirm gegen die Zeit

4 Versuch 2: Magnetismuswaage und Volumenssuszeptibilität

In dem zweiten Versuch bestimmen wir mit Hilfe der Magnetismuswaage die Volumenssuszeptibilität χ_V von einigen Stoffen. Diese gibt an, wie stark sich ein Stoff magnetisieren lässt.

Methoden

Die Magnetismuswaage, wie sie in Abb. 4 dargestellt ist, dient zur Messung der Gewichtsänderung eines Stoffes bei anliegendem äußerem Magnetfeld. Dieses stammt von dem, an dem Schwenkkran angebrachten, Magneten. Um eine möglichst genau Messung durchzuführen, bei der die Abstände zwischen Stoffprobe und Magnet gleich sind, verwenden wir eine 1 mm dicke Kunststoffplatte um die Höhe des Schwenkkrans einzustellen.

Damit der Magnet die einfache Messung des Gewichts der Stoffprobe nicht beeinflusst, wird er mit dem Schwenkkran zunächst wegbewegt. Für die Messung selber nullen wir zuerst das Gewicht unserer Stoffprobe und fahren dann den Magneten über die Probe und messen dann den Gewichtsunterschied.

Die Waage besitzt eine Unsicherheit von 0.001 g und es ergibt sich mit der Unsicherheit der Digitalanzeige eine Gesamtunsicherheit der Masse von

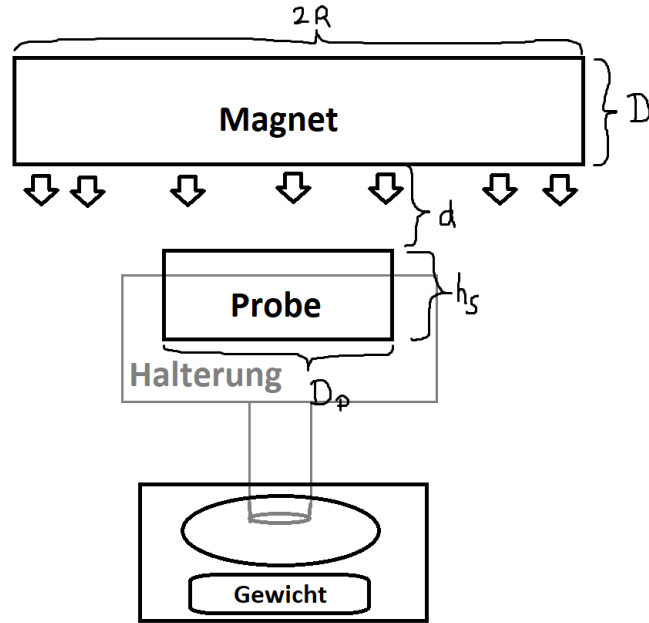


Abbildung 4: Aufbau der Magnetismuswaage

Unsere Stoffproben für diesen Versuch sind Aluminium, pyrolitisches Graphit, Glashalterung (mit und ohne Glas) und eine leere Kunststoffhalterung.

Um nun aus dem Gewichtsunterschied die Volumenssuszeptibilität χ_V zu erhalten, gehen wir auf folgende Gleichungen ein:

$$\chi_V = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta m \cdot g}{V_S \cdot \frac{\partial B_z^2}{\partial z}}, \quad (7)$$

wobei näherungsweise gilt:

$$\frac{\partial B_z^2}{\partial z} \approx \frac{B_z^2(d) - B_z^2(d + h_s)}{h_s} \quad (8)$$

Hierbei ist h_s die Höhe der Probe und d der Abstand der Probe zum Magneten ($d = 1 \text{ mm}$).

Für das Magnetfeld gilt

$$B(z) = \frac{B_r}{2} \left(\frac{D + z}{\sqrt{R^2 + (D + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (9)$$

mit spezifisch $B_r = 1.87(10) \text{ T}$, sowie Radius $R = 30 \text{ mm}$ und Dicke $D = 15 \text{ mm}$.

Die Unsicherheit von $u(B_r) = 0.1 \text{ T}$ pflanzt sich in folgender Weise fort:

$$u(B(z)) = \frac{\partial B(z)}{\partial B_r} \cdot u(B_r) = \frac{u(B_r)}{2} \left(\frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (10)$$

$$u \left(\frac{\partial B_z^2}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial B} \left[\frac{B_z^2(d) - B_z^2(d+h_s)}{h_s} \right] \cdot u(B(z)) \quad (11)$$

$$= \frac{\partial}{\partial B} \left[\frac{B_z^2(d)}{h_s} \right] \cdot u(B(d)) - \frac{\partial}{\partial B} \left[\frac{B_z^2(d+h_s)}{h_s} \right] \cdot u(B(d+h_s)) \quad (12)$$

$$= \frac{2B_z(d)}{h_s} \cdot u(B(d)) - \frac{2B_z(d+h_s)}{h_s} \cdot u(B(d+h_s)) \quad (13)$$

$$u(\chi_V) = \frac{\partial}{\partial \frac{\partial B_z^2}{\partial z}} \left[\frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta m \cdot g}{V_S \cdot \frac{\partial B_z^2}{\partial z}} \right] \cdot u \left(\frac{\partial B_z^2}{\partial z} \right) \quad (14)$$

$$= - \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta m \cdot g}{V_S \cdot \left(\frac{\partial B_z^2}{\partial z} \right)^2} \cdot u \left(\frac{\partial B_z^2}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Damit ergeben sich die Endformeln:

$$\chi_V = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta m \cdot g}{\pi r^2 \cdot \left[\frac{B_r^2}{4} \left(\frac{D+d}{\sqrt{R^2 + (D+d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right)^2 - \frac{B_r^2}{4} \left(\frac{D+d+h_s}{\sqrt{R^2 + (D+d+h_s)^2}} - \frac{d+h_s}{\sqrt{R^2 + (d+h_s)^2}} \right)^2 \right]}, \quad (16)$$

$$u(\chi_V) = - \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta m \cdot g}{\pi r^2 \cdot \left[\frac{B_r^2}{4} \left(\frac{D+d}{\sqrt{R^2 + (D+d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right)^2 - \frac{B_r^2}{4} \left(\frac{D+d+h_s}{\sqrt{R^2 + (D+d+h_s)^2}} - \frac{d+h_s}{\sqrt{R^2 + (d+h_s)^2}} \right)^2 \right]^2} \quad (17)$$

$$\cdot \left[B_r \left(\frac{D+d}{\sqrt{R^2 + (D+d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right) \cdot \frac{u(B_r)}{2} \left(\frac{D+d}{\sqrt{R^2 + (D+d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right) \right] \quad (18)$$

$$- B_r \left(\frac{D+d+h_s}{\sqrt{R^2 + (D+d+h_s)^2}} - \frac{d+h_s}{\sqrt{R^2 + (d+h_s)^2}} \right) \cdot \frac{u(B_r)}{2} \left(\frac{D+d+h_s}{\sqrt{R^2 + (D+d+h_s)^2}} - \frac{d+h_s}{\sqrt{R^2 + (d+h_s)^2}} \right) \quad (19)$$

Messung

Unsere Messung ergab die, durch Anwendung auf die Gl. (7) erhaltenen, in Tab.1 dargestellten Ergebnisse. Die folgenden Werte wurden für die Berech-

nung der Volumenssuszeptibilität χ_V verwendet:

$$D = 15 \text{ mm}; \quad R = 30 \text{ mm}; \quad B_r = 1.87 \text{ T}; \quad u(B_r) = 0.1 \text{ T}$$

$$d = 1 \text{ mm}; \quad r = ?? (\text{Wert fehlt!!! Radius der Probe})$$

$$V_s = h_s \cdot \pi r^2$$

	Kunststoffhalterung	Al	pyr. Graphit	Halterung (Glas)	(ohne)
χ_V	0	0	0	0	0

Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen

Schlussfolgerung

Die von uns erhaltenen Wert für die Volumenssuszeptibilitäten korrelieren weitgehend mit den Literaturwerten. Die einzige Ausnahme bildet die Volumenssuszeptibilität der Aluminiumprobe.

Zudem können wir unserer Messung entnehmen, welche magnetischen Eigenschaften den Proben zugewiesen werden können.

5 Versuch 3: Fallender Neodymmagnet

Bei diesem Versuch lassen wir einen Neodymmagnet durch zwei Röhren aus Aluminium fallen. Eine der beiden Röhren besitzt einen Schlitz, der sich über die ganze Länge zieht. Der Aufbau ist in Abb. 5 dargestellt.

Beobachtung

Wir beobachten, dass der Magnet in den beiden Röhren langsamer fällt als wenn man ihn außerhalb dieser fallen lassen würde. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Magnet bei der Röhre mit Schlitz schneller fällt als bei der Anderen.

Schlussfolgerung

Das bewegte B-Feld des Magneten induziert einen Kreisstrom in der Aluminiumröhre. Dieser erzeugt dann ein neues B-Feld, welches dem des Magneten entgegenwirkt. Dies führt zu unseren Beobachtungen, dass der Magnet langsamer fällt.

Für die Röhre mit Schlitz wird ebenfalls ein Kreisstrom induziert. Da dieser sich aufgrund der Öffnung jedoch nicht gleichmäßig ausbreiten kann, führt zu einem schwächerem Gegenfeld. Hier fällt der Magnet deswegen ein wenig schneller.

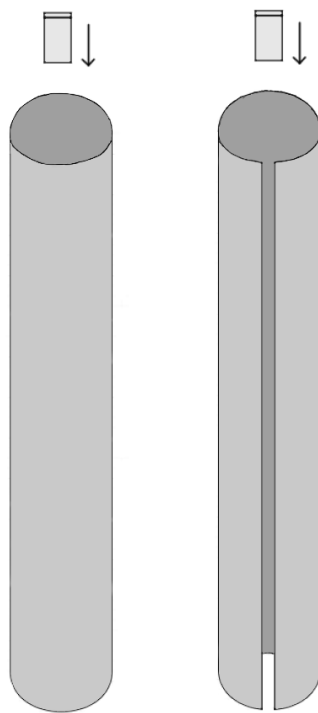


Abbildung 5: Darstellung des fallenden Neodymmagnets

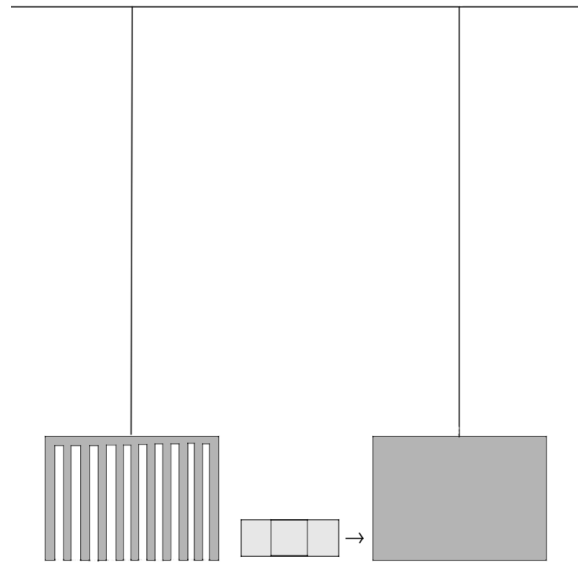


Abbildung 6: Eine Aluminiumplatte und -Kamm an einer Aufhängung

6 Versuch 4: Aluminium-Kamm und -Platte

Hier haben wir eine Aluminiumplatte und einen -kamm, welche an einer Aufhängung befestigt sind, siehe Abbildung 6. An diesen beiden Objekten bewegen wir nun drei starke aneinander gebundene Magneten von verschiedenen Richtungen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Dazu vergleichen wir unsere Beobachtungen für beide Objekte.

Beobachtung

Als wir den Magneten schnell und frontal zur Aluminium bewegten, hat diese eine ruckartige Bewegung durchgeführt, sich dann dem Magneten genähert und haftete dann leicht an diesem. Bei dem schnellen Wegziehen des Magneten ließ sich die Aluminiumplatte mitziehen, wobei diese Verbindung ab einem gewissen Abstand abbrach und die Platte noch ein wenig pendelte.

Bewegte man den Magneten jedoch langsam an die Aluminiumplatte heran, so wurde sie, sobald der Abstand zwischen den beiden Objekten nicht mehr groß war (ein paar Zentimeter), an den Magneten gezogen. Auch hier ließ sich die Platte bei dem Wegziehen des Magneten ein wenig mitziehen, jedoch nicht so weit, wie bei der schnellen Bewegung.

Ein seitliches Heranführen des Magneten führte dazu, dass die Platte diesem folgte, was zu einer wackeligen Bewegung der Aluminiumplatte führte.

Für den Aluminiumkamm verliefen alle Beobachten analog, jedoch deut-

lich schwächer.

Schlussfolgerung

Die beobachteten Effekte sind schwach, aber sichtbar, was die paramagnetischen Eigenschaften des Aluminiums reflektiert.

Wie auch bei dem dritten Versuch wird hier bei dem Anlegen eines äußeren Magnetfeldes ein Strom induziert. Im Fall einer Platte wird ein Wirbelstrom induziert. Auch dieser bildet ein Magnetfeld, welches hier in Richtung des äußeren Feldes zeigt und dazu führt, dass die Platte sich in Richtung des Magneten bewegt. Dass die Geschwindigkeit des Magneten dazu führt, dass die Reaktion der Aluminiumplatte stärker bzw. schwächer ist, liegt daran, dass die Fläche der Platte, die vom Magnetfeld umschlossen ist sich schneller ändert, was zu einem stärkeren Kreisstrom und letztendlich einem stärkeren Magnetfeld der Aluminiumplatte führt.

Bei dem Aluminiumkamm sind diese Effekte schwächer, da sich aufgrund seiner Form keine großen Kreisströme bilden können und das daraus entstehende Magnetfeld somit schwächer ist.