

Physikalisches A-Praktikum

Versuch 17

Ferromagnetismus

Praktikanten: Nils Kanning
Steffen Klemer
Durchgeführt am: 19.09.2006
Gruppe: 6
Assistent: Boris Landgraf

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theorie	4
2.1	Materie im Magnetfeld	4
2.2	Ferromagnetismus	5
2.3	Anzahl an ausgerichteten Elektronen	6
2.4	Messverfahren	7
3	Durchführung	8
4	Auswertung	8
4.1	Berechnung des Auslenkungswinkels φ	8
4.2	Eichung des Galvanometers	9
4.3	Berechnung der Hysteresekurve	9
4.4	Anzahl der Ausgerichteten Elektronen im Sättigungsfall	10
5	Einordnung der Ergebnisse	10
A	Tabellen und Grafiken	12

1 Einleitung

Das Phänomen des Magnetismus findet heute in vielen Bereichen Anwendung. Angefangen bei magnetischen Schaltern und Ventilen, über Werkstoffuntersuchungen bis hin zur Speicherung von Information auf Festplatten, in FRAM-Zellen oder auf Chipkarten. In einem Großteil der Anwendungen werden *ferromagnetische* Stoffe eingesetzt. Auf diese wollen wir in unserem Protokoll eingehen.

2 Theorie

2.1 Materie im Magnetfeld

Bringt man einen Körper in ein Magnetfeld, so wechselwirkt er mit diesem. Er wird, ganz ähnlich zur Wirkung im elektrischen Feld, polarisiert, mit dem Unterschied, dass sich hierbei die lokalen Elementarmagneten gewöhnlich *mit* dem äußeren Feld ausrichten. Es gilt also, dass sich die *magnetische Flussdichte* zu

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \text{ mit} \\ \vec{M} &= \chi \vec{H}\end{aligned}$$

berechnet. Hierbei ist \vec{H} das äußere Feld, \vec{M} die *Magnetisierung* und χ die *magnetische Suszeptibilität*, eine Stoffkonstante, die ein Maß für die Magnetisierbarkeit ist. Man kann \vec{B} auch schreiben als:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} \text{ wobei} \\ \mu_r &= \chi + 1\end{aligned}$$

ist.

Man unterscheidet grob 3 Arten der Magnetisierung, die sich zum Teil überlagern:

Diamagnetismus Dieser kann mit induzierten Kreisströmen in jedem Atom, hervorgerufen durch das äußere magnetische Moment, erklärt werden. Er ist unabhängig von der Temperatur, tritt bei allen Stoffen auf und ist durch ein kleines, negatives, χ gekennzeichnet:

$$-1 < \chi < 0$$

Diamagnetische Stoffe werden aus Magnetfeldern herausgedrängt, da das Feld im Inneren aufgrund der LENZschen Regel gegen das äußere Feld wirkt.

Paramagnetismus Er ist durch die Tendenz, der, im Stoff vorhandenen, Dipole sich auszurichten, geprägt. Mit dem BOHRschen Atommodell können einige Eigenschaften erklärt werden. Hierzu stellt man sich die Elektronen auf diskret verteilten Kreisbahnen mit dem Radius r und der Bahngeschwindigkeit v um den Kern vor. Ihnen kann somit ein diskreter Drehimpuls $L = m_e v r =: \hbar$ mit einer Frequenz $f = v/2\pi r$ zugeschrieben werden. Betrachtet man dies nun als Kreisstrom $I = ef = ev/2\pi r$, so erhält man ein *magnetisches Moment*

$$\mu_B := p = I \cdot A = e \cdot \frac{vr}{2} = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,2742E - 24 \frac{Jm^2}{Vs},$$

welches auch als *BOHRsches Magneton* bezeichnet wird. Je nach Hauptquantenzahl ergibt sich dann ein $p_m = n\mu_B$. Auch die Spins der Elektronen tragen zum

Paramagnetismus bei. Da sich die einzelnen Beiträge, je nach Richtung des Spins wieder wegheben und der Effekt im Allgemeinen kleiner ist, als der beschriebene, lassen wir diese Betrachtung hier außen vor. Auch die atomaren Kreisströme heben sich im Inneren des Körpers gegenseitig auf. Übrig bleibt ein Kreisstrom entlang der Oberfläche. Daher ist das Feld eines Stabmagneten auch mit dem einer Spule vergleichbar. Einige Materialien besitzen aber hiermit nicht erklärbare Suszeptibilitäten - die Lösung dafür liefert die Quantenmechanik.

$$0 < \chi < 1$$

Paramagnetische Stoffe werden in Bereiche großer Feldstärken hineingezogen. Die Größe der Suszeptibilität ist abhängig von der Temperatur. Das CURIEsche Gesetz besagt, dass

$$\chi = \frac{c}{T}$$

mit einer Stoffkonstanten $c > 0$ ist.

2.2 Ferromagnetismus

Diese, zuerst bei Eisen beobachtete, Variante des Paramagnetismus ist durch sehr große χ gekennzeichnet. Diese große Suszeptibilität verschwindet aber bei einer bestimmten, materialspezifischen, Temperatur T_C , der CURIEtemperatur. Darüber gilt das paramagnetische Curiegesetz (hier meist CURIE-WEISS-Gesetz genannt):

$$\chi = \frac{c}{T - T_C}$$

Ferromagnetische Stoffe behalten einen Teil ihrer Magnetisierung („*Remanenz*“), selbst wenn das äußere Feld abgeschaltet wird. Die Magnetisierung einer jungfräulichen Probe verläuft anfangs linear, bis in einen Sättigungsbereich hinein. Man kann eine *Hysteresekurve* aufnehmen, wie zum Beispiel Abb. 1. Um die Magnetisierung komplett aufzuheben, muss ein Gegenfeld mit einer spezifischen *Koerzitivfeldstärke* angelegt werden. Misst man sehr genau, so ist die Kurve nicht glatt sondern Treppenförmig, mit BARKHAUSEN-Sprüngen. Es stellt sich heraus, dass Ferromagnetismus ein kollektives Phänomen ist, an dem jeweils alle Atome einzelner Bereiche, den *Weiss'schen Bezirken*, beteiligt sind. Innerhalb dieser Bereiche existiert eine starke Wechselwirkung zwischen den Teilchen, die sie alle gleich ausrichtet. Legt man nun ein äußeres Feld an, dessen Stärke groß genug ist, um die, für ein Umklappen *aller* Atome, erforderliche Energie zu liefern, so richten diese sich neu aus. Die Energie der einzelnen Bezirke ist sehr unterschiedlich. Diese diskreten Änderungen im Magnetfeld lassen sich mit einer empfindlichen Induktionsspule und einem Lautsprecher hörbar machen - Bei jedem Umklappen ertönt einen Knacken. Die Kopplung beruht auf einer Wechselwirkung der Leitungselektronen mit den magnetischen Spinmomenten der Elektronen in nicht aufgefüllten Schalen, daher sind die Ferromagneten Übergangselemente, wie Eisen, Nickel oder Kobalt.

Bei hohen Temperaturen, ist die thermische Energie höher, als die Kopplung, damit folgt das beobachtete paramagnetische Verhalten über der CURIEtemperatur.

Die Fläche innerhalb der Kurve beschreibt die, für eine Ummagnetisierung notwendige Energie. Man unterscheidet hierbei *Hart-*, mit einer großen Fläche, und

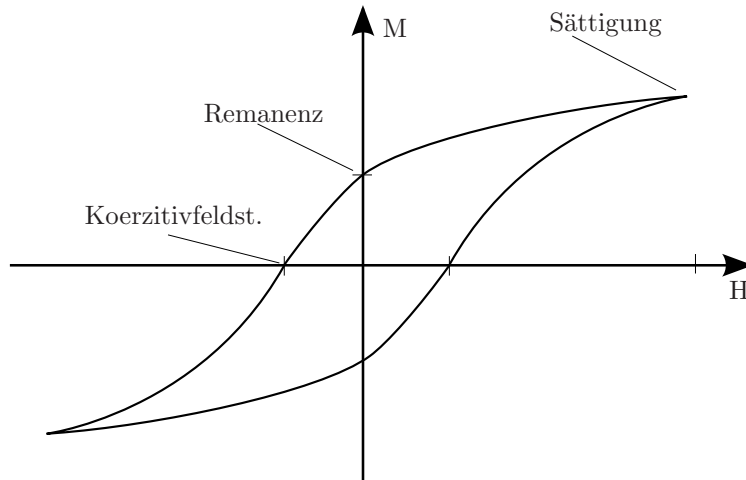


Abbildung 1: Beispiel einer Hysteresekurve

Weichmagnetische Stoffe. Die Fläche berechnet sich durch

$$\begin{aligned} \int M(B)dB &= \chi\mu_r\mu_0 \int HdH \\ &= \frac{1}{2}\chi\mu_r\mu_0 H^2 \\ &= \frac{1}{2}(\mu_r - 1) \cdot H \cdot B \end{aligned}$$

und gibt die zusätzlich notwendige Energie pro Volumen an, um den Stoff zu magnetisieren. Dies ist also gerade die Energie, die in Wärmeenergie des Körpers umgewandelt wird.

2.3 Anzahl an ausgerichteten Elektronen

Kommt man in den Bereich der Sättigungsmagnetisierung, so sind alle Weiss'schen Bezirke umgeklappt und somit alle Elektronen im Material ausgerichtet. Die Magnetisierung entspricht der Summe der magnetischen Momente pro Volumen, also

$$M = \frac{\Sigma p}{V}.$$

Betrachtet man nun n Mol eines Stoffes, so ergibt sich für v ausgerichtete Elektronen pro Atom:

$$\begin{aligned} M &= \frac{p n N_A}{V} v \text{ oder mit der Molmasse und Dichte} \\ &= \frac{\rho N_A p}{m_{mol}} v \\ \Rightarrow v &= \frac{M m_{mol}}{\rho N_A p}. \end{aligned} \quad (1)$$

v ist gleichzeitig ein Maß für das atomare magnetische Moment, da

$$M_{Atom} = v\mu_B$$

ist.

2.4 Messverfahren

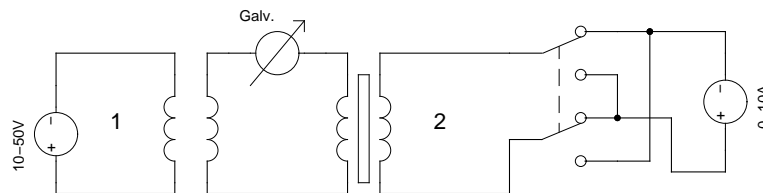


Abbildung 2: Vereinfachter Versuchsaufbau

Eine Möglichkeit die Hysteresekurve quantitativ aufzunehmen, stellt der Aufbau in Abb. 2 dar. Hierbei wird ein Galvanometer verwendet, um die Induktion einer Spule zu messen. Zuerst muss es geeicht werden, dazu bedienen wir uns dem Hilfsstromkreis 1. Wie bereits in *Protokoll 11* gezeigt wurde, gilt für die Auslenkung φ :

$$\begin{aligned}\varphi &= k'Q = k' \int Idt \\ &= \frac{k'}{R} \int U_{ind} dt = -k n_G \int \dot{\Phi} dt = -k n_G \Phi\end{aligned}$$

Dabei ist I der Strom und R der Widerstand im Galvanometerkreis. Weiter ist n_G die Windungszahl der, in der Abbildung linken, Spule im Galvanometerkreis. Außerdem gilt für das, durch die Spule im Kreis 1 erzeugte Magnetfeld, wie in *Protokoll 14* zu lesen ist:

$$B_1 = \mu_0 I_1 \frac{n_1}{l_1}$$

Hier ist I_1 der Strom im Kreis 1 und n_1 bzw. l_1 die Windungszahl und die Spulenlänge in diesem Kreis. Der magnetische Fluss der die Spule im Galvanometerkreis durchsetzt ist somit:

$$\Phi = A_G B_1 = A_G \mu_0 I_1 \frac{n_1}{l_1}$$

Zusammen erhalten wir so:

$$\varphi = -k n_G A_G \mu_0 I_1 \frac{n_1}{l_1} = m I_1 \quad (2)$$

Wir können also aus der Messung des Anstiegs m die galvanometerspezifische Konstante k bestimmen:

$$k = \frac{-m l_1}{n_G n_1 A_G \mu_0} \quad (3)$$

Nun kann im Stromkreis 2 gemessen werden. Hierbei gilt wie eben

$$\frac{\varphi}{kR} = Q = \int Idt = \frac{1}{R} \int U_{ind} dt = -\frac{n_I}{R} \Phi$$

In diesem Fall ist nun Φ der Fluss durch die Induktionsspule des Galvanometerkreises mit n_I Windungen. In dieser befindet sich die zu magnetisierende Probe. Der Fluss ergibt sich zu:

$$\Phi = A_P B$$

Die Fläche A_P ist der Querschnitt der Eisenprobe. Aus diesen Größen können wir die magnetische Flussdichte B in der Probe bestimmen:

$$B = -\frac{\varphi}{kn_I A_P} \quad (4)$$

Die Feldstärke H erhalten wir schließlich aus den Werten der Spule in Kreis 2:

$$H = I_2 \frac{n_2}{l_2} \quad (5)$$

Wir können jetzt auch die Magnetisierung berechnen:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H = -\frac{\varphi}{kn_I A_P} - H \quad (6)$$

Mit einigen Messwerten kann nun die Hysteresekurve gezeichnet werden, indem M gegen H aufgetragen wird.

3 Durchführung

Bevor mit der Untersuchung der Hysteresekurve eines Eisenstückes begonnen werden kann, muss zunächst das dazu benötigte Galvanometer ballistisch geeicht werden. Dazu verwenden wir die in Abb. 2 dargestellte Schaltung. Zunächst ist nur der Stromkreis 1 und der Kreis in den das Galvanometer geschaltet ist von Interesse. Im Stromkreis 1 werden verschiedene Stromstärken eingestellt und notiert. Für jeden Strom wird ebenfalls der Ausschlag des Galvanometers notiert. Aus diesen Daten können wir die später in der Auswertung benötigte Eichkonstante des Galvanometers berechnen.

Jetzt muss vor der eigentlichen Messung der Hysteresekurve diese einige Male durchlaufen werden um die magnetische Vorgeschichte des verwendeten Eisens zu definieren. Hierzu wird der Strom im Kreis 2 einige Male langsam vom positiven Maximalwert zum negativen und zurück geregelt. Durch die Spule im Stromkreis wird hierbei ein magnetisches Feld im Eisenkern dieser Spule erzeugt und dessen Magnetisierung somit beeinflusst.

Zur eigentlichen Messung wird jetzt der Strom im Kreis 2 von 0 A ausgehend schrittweise hochgeregelt. Für jede Stromstärke wird der Ausschlag des Galvanometers bestimmt. Ist die maximale Stromstärke erreicht, so wird kurzzeitig eine weitere Spule in den Kreis 2 geschaltet und auch hier der Galvanometerausgang erfasst. Nachdem diese Spule entfernt ist, wird der Strom stufenweise heruntergeregelt. Auch hierbei wird jeweils der Ausschlag bestimmt. Anschließend wird die Spannungsquelle in Kreis 2 umgepolt und die gesamte Messung wird mit Strömen und damit Magnetfeldern anderen Vorzeichens wiederholt.

Abschließend werden noch die Windungszahlen und Längen der verwendeten Spulen sowie der Querschnitt der Eisenprobe bestimmt. Außerdem wird der Abstand der Drehachse des Galvanometers zur Skala notiert.

4 Auswertung

4.1 Berechnung des Auslenkungswinkels φ

Da der Auslenkungswinkel des Galvanometers nicht direkt abgelesen werden kann, müssen die auf der Skala abgelesenen Längen in Winkel umgerechnet werden. Mit

einem Abstand e der Galvanometerdrehachse von der Skala und einer abgelesenen Auslenkung a erhalten wir für den Winkel φ :

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{a}{e}$$

Dabei verwenden wir den Abstand $e = 0,70(2) \text{ m}$. In den Fehler von φ geht der von a und e ein.

4.2 Eichung des Galvanometers

Die Auslenkungen der Eichmessungen rechnen wir gemäß der oben angegebenen Formel in die entsprechenden Winkel um. Diese haben wir dann in Abb. 3 gegen den Eichstrom I_1 aufgetragen. Die Werte sind auch in Tab. 1 zu finden. Nach Gl. 2 erwarten wir eine Gerade mit der Steigung m . Diese Steigung bestimmen wir durch lineare Regression unter Berücksichtigung der Fehler von ϕ . Wir erhalten den Wert:

$$m = 0.43(2) \text{ A}^{-1}$$

Daraus berechnen wir gemäß Gl. 3 die spezifische Konstante des Galvanometers:

$$k = -6,67(4) \text{ } \Omega^{-1} \text{ C}^{-1}$$

Dabei verwenden wir die Werte:

$$\begin{aligned} l_1 &= 0,070(2) \text{ m} \\ n_G &= 2820 \\ n_1 &= 600 \\ A_G &= 2\pi \frac{d_G^2}{4} = 0.0021(1) \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.3 Berechnung der Hysteresekurve

Nun beginnt die Auswertung der eigentlichen Messergebnisse. Für jedes gemessene Wertepaar, bestehend aus I_2 und a , berechnen wir die magnetische Feldstärke H und die Magnetisierung M .

Zur Berechnung der Feldstärke H verwenden wir Gl. 5. Auf eine Fehlerbetrachtung wird bei dieser Größe verzichtet. Die benötigten Größen sind:

$$\begin{aligned} l_2 &= 2\pi \frac{0,138 \text{ m}}{2} = 0,434 \text{ m} \\ n_2 &= 107 \quad \text{bzw. für zwei Messungen} \quad 1000 + 107 \end{aligned}$$

Bevor die magnetische Flussdichte bestimmt werden kann, rechnen wir die Auslenkungen auf der Skala a erneut in Winkel φ um. Da die Ausschläge sehr viel kleiner waren als zuvor, wurde auch der Abstand e des Schirms vergrößert. Trotzdem waren viele Ausschläge nur sehr ungenau zu bestimmen, lagen sie doch fast alle sehr dicht bei Null.

Damit konnte dann ΔB über Gl. 4 bestimmt werden. Diese haben wir ausgehend von 0 A bis $I = 10 \text{ A}$ aufaddiert.

Die Magnetisierung M erhalten wir dann mit Hilfe von Gl. 6. Hier werden die Fehler von φ berücksichtigt. Es wurden die folgenden Werte verwendet:

$$\begin{aligned} A_P &= 3,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \\ n_I &= 3 \\ e &= 1.36m \end{aligned}$$

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Tab. 2 zusammengetragen. In Abb. 4 ist die sich daraus ergebende Hysteresekurve zu sehen. Es ist zu beachten, dass die Werte für die Messung mit der zusätzlichen Spule völlig herauschlagen und demzufolge nicht verwendet wurden. Um die Kurve zu Normalisieren, wurden die beiden berechneten Werte für M bei $10A$ gemittelt, zum Wert bei $-10A$ addiert und anschließend die Hälfte der Ergebnisses von allen Werten abgezogen. Damit erhalten wir aus den Tabellen direkt die größten M -Werte als Sättigungsmagnetisierung und die Werte bei $H = 0$ als Koerzitivfeldstärke. Die Remanenz kann aus dem Graphen ermittelt werden.

Damit können wir nun an den Mittelwerten grob die Sättigungsmagnetisierung M_S , die Koerzitivfeldstärke H_C sowie die Remanenz M_R des Eisenkerns ablesen:

$$\begin{aligned} M_S &\approx 9\,300\,000 \text{ A m}^{-1} \\ H_C &\approx 176 \text{ A m}^{-1} \\ M_R &\approx 5\,200\,000 \text{ A m}^{-1} \end{aligned}$$

4.4 Anzahl der Ausgerichteten Elektronen im Sättigungsfall

Aus der Sättigungsmagnetisierung können wir unter Verwendung von Gl. 1 direkt die gesuchte Anzahl der ausgerichteten Elektronen ermitteln:

$$v \approx 11,8$$

Auf eine genaue Fehlerbetrachtung wird an dieser Stelle auf Grund des aus der Hysteresekurve abgelesenen Wertes M_S verzichtet. Für das BOHRsche Magneton verwenden wir den im Theorieteil vorgestellten Wert:

$$p = \mu_B = 9,2742 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Jm}^2}{\text{Vs}},$$

Die molare Masse und die Dichte der Eisenprobe entnehmen wir dem Praktikums-skript:

$$\begin{aligned} m_{\text{mol,Fe}} &= 55,85 \text{ g} \\ \rho_{\text{Fe}} &= 7,85 \text{ g cm}^{-3} \end{aligned}$$

5 Einordnung der Ergebnisse

Der endgültige Graph der Hysteresekurve ist uns qualitativ recht gut gelungen und spiegelt die Theorie sehr gut wieder. Fraglich bleibt aber, warum die Messwerte mit der Extraspule so dermaßen aus der Reihe getanzt sind, dass wir sie nicht weiter beachten konnten. So ist auch die Sättigungsmagnetisierung mit Vorsicht zu betrachten. Der Anstieg ist dort zwar bereits sehr flach, der reale Sättigungsbereich könnte aber bei durchaus höheren Werten liegen.

Die berechnete Anzahl der ausgerichteten Elektronen liegt mit etwa 11,8 deutlich über dem laut Praktikumsskript zu erwartenden Wert von 2,2 Elektronen. Für die Berechnung dieser Anzahl wurde nur die Sättigungsmagnetisierung M_S von uns bestimmt. Alle anderen eingehenden Größen sind gegebene Konstanten. Diese Tatsache spricht tendenziell eher für eine niedrigere reale Sättigungsmagnetisierung.

Trotzdem betrachten wir den Versuch zumindest qualitativ als gelungen, vor allem unter dem Eindruck der zum Teil sehr schwer und ungenau zu bestimmenden Auslenkungen des Lichtzeigers.

A Tabellen und Grafiken

$I_1 [A]$	$a [m]$	$\varphi [rad]$	$\sigma_\varphi [rad]$
0.24	0.14	0.0987	0.0034
0.26	0.16	0.1124	0.0034
0.28	0.18	0.1258	0.0033
0.30	0.19	0.1325	0.0033
0.32	0.20	0.1391	0.0033
0.34	0.21	0.1457	0.0033
0.36	0.22	0.1523	0.0033
0.38	0.24	0.1651	0.0032
0.40	0.25	0.1715	0.0032
0.42	0.27	0.1841	0.0031
0.44	0.28	0.1903	0.0031
0.46	0.29	0.1964	0.0030

Tabelle 1: Eichung des Galvanometers

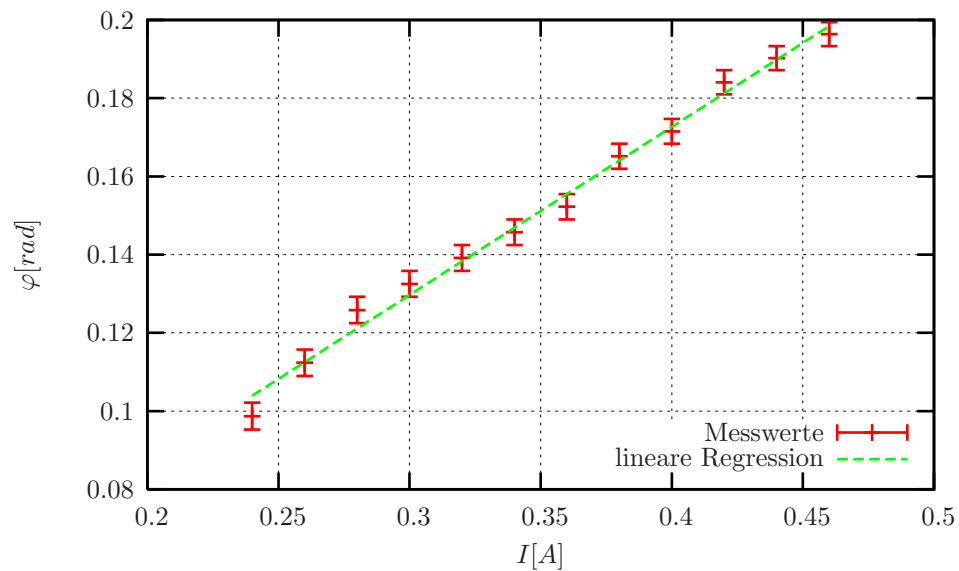


Abbildung 3: Der Ausschlag des Galvanometers bei der Eichmessung gegen die Stromstärke

$I_2 [A]$	$H [\frac{A}{m}]$	$d [m]$	$\varphi [rad]$	$\Delta B [T]$	$M [\frac{A}{m}]$	$M_{Norm} [\frac{A}{m}]$	$\sigma_M [\frac{A}{m}]$
10.0	2465.44	0E-00	0.0000	0.00E-00	0.00E-00	9.27E+06	27.05E-03
8.0	1972.35	-6E-3	-0.0022	-366.24E-3	-293.42E+3	8.98E+06	27.05E-03
6.0	1479.26	-8E-3	-0.0029	-488.32E-3	-681.51E+3	8.59E+06	28.27E-03
4.0	986.18	-6E-3	-0.0022	-366.24E-3	-972.47E+3	8.30E+06	29.26E-03
3.0	739.63	-4E-3	-0.0015	-244.16E-3	-1.17E+6	8.11E+06	29.96E-03
2.0	493.09	-4E-3	-0.0015	-244.16E-3	-1.36E+6	7.91E+06	30.70E-03
1.0	246.54	-14E-3	-0.0051	-854.54E-3	-2.04E+6	7.23E+06	33.58E-03
0.6	147.93	-10E-3	-0.0037	-610.39E-3	-2.53E+6	6.75E+06	36.00E-03
0.4	98.62	-6E-3	-0.0022	-366.24E-3	-2.82E+6	6.45E+06	37.63E-03
0.2	49.31	-8E-3	-0.0029	-488.32E-3	-3.21E+6	6.07E+06	40.04E-03
0.1	24.65	-5E-3	-0.0018	-305.20E-3	-3.45E+6	5.82E+06	41.71E-03
0.0	0.00	-5E-3	-0.0018	-305.20E-3	-3.69E+6	5.58E+06	43.52E-03
-0.1	-24.65	-7E-3	-0.0026	-427.28E-3	-4.03E+6	5.24E+06	46.35E-03
-0.2	-49.31	-9E-3	-0.0033	-549.36E-3	-4.47E+6	4.80E+06	50.56E-03
-0.4	-98.62	-22E-3	-0.0081	-1.34E+0	-5.54E+6	3.73E+06	65.02E-03
-0.6	-147.93	-44E-3	-0.0162	-2.68E+0	-7.67E+6	1.60E+06	151.82E-03
-1.0	-246.54	-75E-3	-0.0275	-4.57E+0	-11.31E+6	-2.04E+6	118.62E-03
-2.0	-493.09	-70E-3	-0.0257	-4.27E+0	-14.71E+6	-5.44E+6	44.54E-03
-3.0	-739.63	-25E-3	-0.0092	-1.53E+0	-15.92E+6	-6.65E+6	36.50E-03
-4.0	-986.18	-15E-3	-0.0055	-915.57E-3	-16.65E+6	-7.38E+6	32.90E-03
-6.0	-1479.26	-14E-3	-0.0051	-854.54E-3	-17.33E+6	-8.06E+6	30.13E-03
-8.0	-1972.35	-10E-3	-0.0037	-610.39E-3	-17.82E+6	-8.55E+6	28.42E-03
-10.0	-2465.44	-5E-3	-0.0018	-305.20E-3	-18.06E+6	-8.79E+6	27.64E-03
-8.0	-1972.35	6E-03	0.0022	366.24E-03	-17.77E+6	-8.50E+6	28.58E-03
-6.0	-1479.26	6E-03	0.0022	366.24E-03	-17.48E+6	-8.21E+6	29.60E-03
-4.0	-986.18	7E-03	0.0026	427.28E-03	-17.14E+6	-7.87E+6	30.87E-03
-3.0	-739.63	6E-03	0.0022	366.24E-03	-16.85E+6	-7.58E+6	32.06E-03
-2.0	-493.09	8E-03	0.0029	488.32E-03	-16.46E+6	-7.19E+6	33.79E-03
-1.0	-246.54	15E-03	0.0055	915.57E-03	-15.73E+6	-6.46E+6	37.60E-03
-0.6	-147.93	8E-03	0.0029	488.32E-03	-15.34E+6	-6.07E+6	40.01E-03
-0.4	-98.62	7E-03	0.0026	427.28E-03	-15.00E+6	-5.73E+6	42.39E-03
-0.2	-49.31	7E-03	0.0026	427.28E-03	-14.66E+6	-5.39E+6	45.06E-03
-0.1	-24.65	5E-03	0.0018	305.20E-03	-14.42E+6	-5.15E+6	47.19E-03
0.0	0.00	5E-03	0.0018	305.20E-03	-14.18E+6	-4.90E+6	49.52E-03
0.1	24.65	7E-03	0.0026	427.28E-03	-13.84E+6	-4.56E+6	53.21E-03
0.2	49.31	10E-03	0.0037	610.39E-03	-13.35E+6	-4.08E+6	59.55E-03
0.4	98.62	28E-03	0.0103	1.71E+00	-11.99E+6	-2.72E+6	89.30E-03
0.6	147.93	45E-03	0.0165	2.75E+00	-9.81E+6	-533.65E+3	454.62E-03
1.0	246.54	78E-03	0.0286	4.76E+00	-6.02E+6	3.25E+06	74.46E-03
2.0	493.09	70E-03	0.0257	4.27E+00	-2.62E+6	6.65E+06	36.44E-03
3.0	739.63	28E-03	0.0103	1.71E+00	-1.26E+6	8.01E+06	30.32E-03
4.0	986.18	13E-03	0.0048	793.50E-03	-633.08E+3	8.64E+06	28.11E-03
6.0	1479.26	15E-03	0.0055	915.57E-03	95.01E+03	9.37E+06	25.93E-03
8.0	1972.35	10E-03	0.0037	610.39E-03	580.25E+03	9.85E+06	24.65E-03
10.0	2465.44	8E-03	0.0029	488.32E-03	968.35E+03	10.24E+06	23.72E-03

Tabelle 2: Vermessung der Hysteresekurve

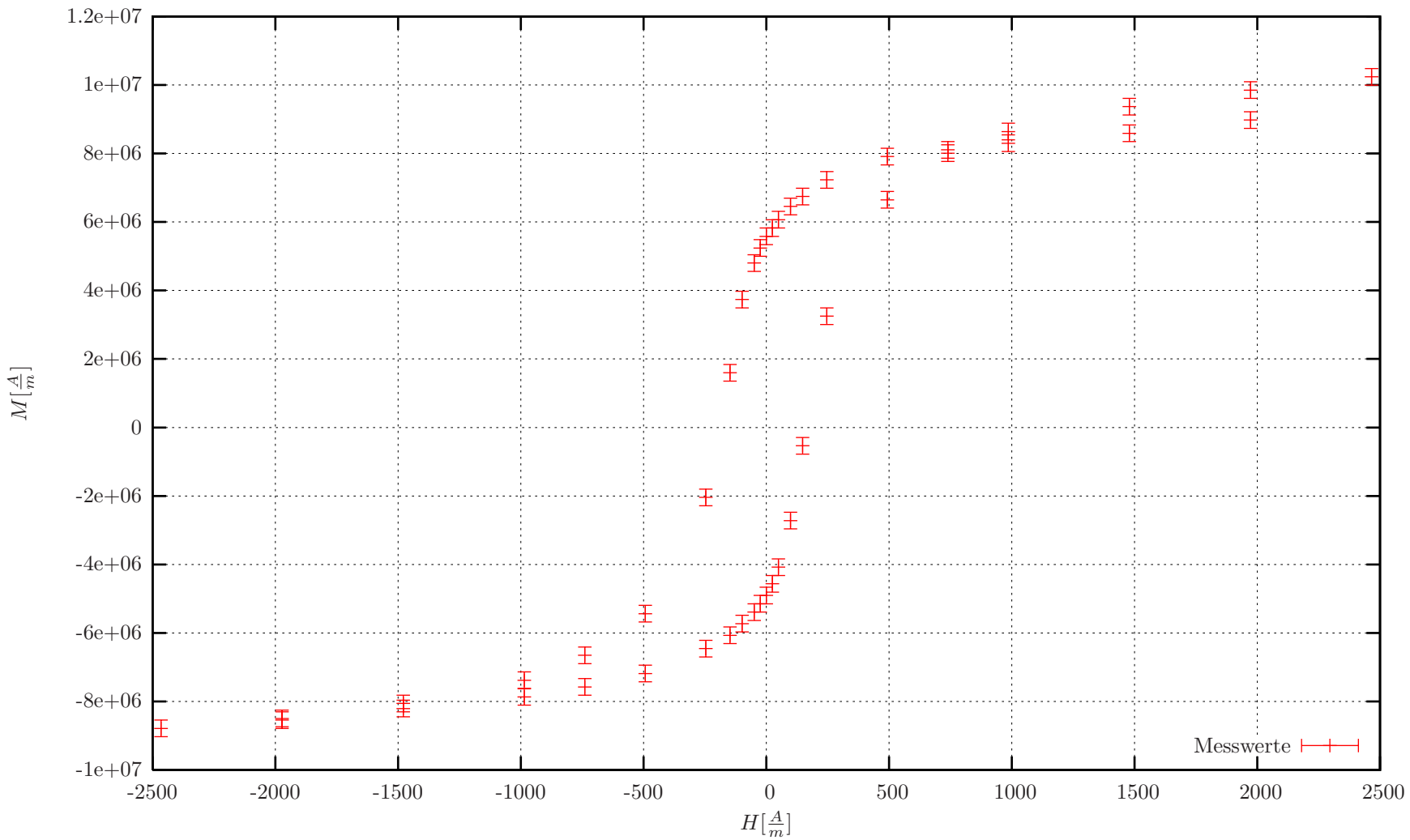


Abbildung 4: Die aufgenommene Hysteresekurve