

Magnetooptischer Kerr-Effekt: MOKE

Marcel Köpke & Axel Müller

Versuchsdurchführung: 13.01.2014

Abgabe: 15.01.2014

2. Abgabe: 06.02.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Versuchsziel	3
1.2	Polarisation	3
1.3	Der Kerr-Effekt	3
1.4	Magnetische Anisotropie	5
1.5	Auftretende Arten des Magnetismus	5
1.5.1	Ferromagnetismus	5
1.5.2	Antiferromagnetismus	6
1.5.3	Ferrimagnetismus	6
1.6	Experimentbezogene Theorie	6
1.6.1	Bestimmung von K_{eff}	6
1.6.2	Ferrimagnetismus von $Fe_{1-x}Gd_x$	7
1.7	Quellen	8
2	Versuchsaufbau und Aufgabenstellung	9
2.1	Aufbau	9
2.2	Aufgabenstellung	9
2.2.1	Ferromagnetische Schichtsysteme	9
2.2.2	Ferrimagnetische Schichten	10
3	Auswertung	11
3.1	Aufgabe 1	11
3.2	Aufgabe 2	13
3.3	Aufgabe 3	14
3.3.1	Probe 7	14
3.3.2	Probe 6	17
3.3.3	Probe 8	19
3.3.4	Probe 9	20

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Versuchsziel

Im Versuch werden für verschiedene magnetische Materialien die Magnetisierungskurven ermittelt und untersucht. Dies geschieht mithilfe des magnetooptischen Kerr-Effekts. Dieser Effekt beschreibt die Drehung der Polarisationssebene des vom magnetisierten Material reflektierten Lichts. Die Drehung ist dabei ein Maß für die Magnetisierung des Materials. Im Versuch werden wir Schichtsysteme aus ferro-, nicht-ferro sowie ferrimagnetischen Komponenten untersuchen.

1.2 Polarisation

Unter Polarisation einer elektromagnetischen Welle versteht man die Schwingungsrichtung der Komponente des E-Felds relativ zur Ausbreitungsrichtung. Eine linear polarisierte Lichtwelle kann man durch eine Superposition einer rechtszirkular-polarisierten \vec{E}^- - und einer linkszirkular-polarisierten \vec{E}^+ -Welle darstellen. Zirkulare Polarisation bedeutet, dass der Betrag von \vec{E} zwar konstant ist, die Richtung sich jedoch mit konstanter Geschwindigkeit innerhalb der Polarisationssebene, und damit senkrecht zum Wellenvektor, ändert.

1.3 Der Kerr-Effekt

Beim magnetooptischen Kerr-Effekt untersucht man die Drehung der Polarisation von Licht, das an einem magnetisierten Schichtsystem reflektiert wird. Im Vergleich dazu beschreibt der Farady-Effekt die Drehung bei Transmission des Lichts. Zunächst betrachten wir den senkrechten Einfall bei senkrechter (zur Oberflächenebene des Mediums) Polarisation (polarer Kerr-Effekt). Für den Brechungsindex der zirkular polarisierten Wellen gilt:

$$\vec{n}^{\pm} \approx \vec{n}_0 \left(1 \pm \frac{1}{2} \cdot \hat{n}_0 \cdot \vec{g} \right)$$

\hat{n}_0 ist dabei der Einheitsvektor in Ausbreitungsrichtung der Welle, \vec{g} ist der Gyrationvektor und steht senkrecht zur Magnetisierungsrichtung und den Betrag von \vec{g} : $|\vec{g}| = Q$ nennt man Voigt-Konstante. Unter Betrachtung des Falls $\vec{g} \parallel \hat{n}_0 (\Rightarrow \vec{g} \cdot \hat{n}_0 = Q)$ gilt für den Reflexionskoeffizienten:

$$r^{\pm} = \frac{n_0 \cdot \left(1 \pm \frac{1}{2} \cdot Q \right) - 1}{n_0 \cdot \left(1 \pm \frac{1}{2} \cdot Q \right) + 1}$$

Nun setzen wir eine zur \vec{x} parallele einfallende elektromagnetische Welle und eine Magnetisierung des Materials in z-Richtung an, d.h. die Oberfläche ist in der x-y-Ebene lokalisiert. Damit folgt:

$$\vec{E}^i = \frac{E_0}{2} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ 0 \end{pmatrix} \right]$$

$$\vec{E}^r = r^+ \vec{E}^{i,+} + r^- \vec{E}^{i,-} = E_0 \left[\frac{n_0 - 1}{n_0 + 1} \cdot \vec{e}_x + \frac{n_0 Q}{(n_0 + 1)^2} \cdot i \vec{e}_y \right]$$

Hierbei wurden die quadratischen Terme in Q vernachlässigt. Die Gleichung zeigt, dass der Kerr-Effekt eine y-Komponente für das reflektierte elektrische Feld erzeugt. Für den komplexen Kerr-Winkel gilt somit:

$$\Phi_K = \frac{E_y^r}{E_x^r} = in_0 Q \frac{1}{n_0^2 - 1}$$

Die reflektierte Welle kann somit als Überlagerung zweier linear in x-, bzw. y-Richtung polarisierter Wellen aufgefasst werden. Im Falle eines rein reellen n_0 ist Φ_K rein imaginär. Somit entspricht der Kerr-Winkel der Phasenverschiebung zwischen den beiden linear polarisierten Wellen. Diese Überlagerung entspricht einer elliptisch polarisierten Welle. Ist n_0 imaginär, enthält Φ_K einen Realteil. Dieser Realteil erzeugt zusätzlich zur elliptischen Polarisation eine Drehung der Polarisationssebene aufgrund der Phasenverschiebung. Diese Drehung der Polarisationssebene soll im Versuch gemessen werden.

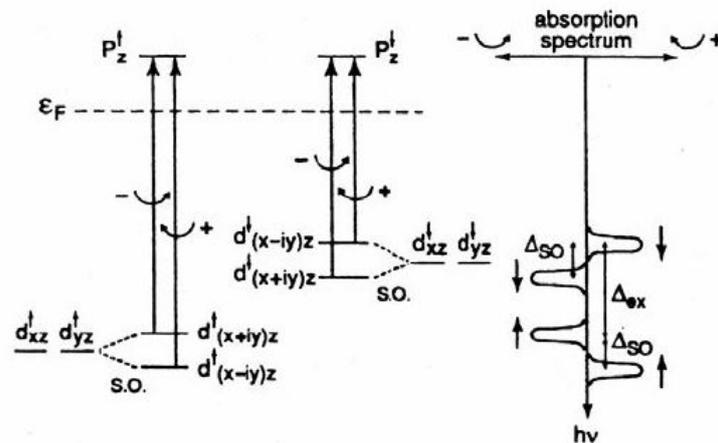


Abbildung 1.1: Darstellung der erlaubten Übergänge und des resultierenden Spektrums für den magnetischen Dichroismus im Ferromagneten. Quelle: Vorbereitungsmappe

1.4 Magnetische Anisotropie

Im Falle einer Vorzugsrichtung der Magnetisierung bei magnetischen Materialien spricht man von magnetischer Anisotropie. Sie hängt mit der freien Energie zusammen, die für eine bestimmte Magnetisierungsrichtung verfügbar ist. Für die Anisotropie treten verschiedene Arten auf:

- Formanisotropie: die grundlegende Form des untersuchten Mediums kann zu einer Vorzugsrichtung führen.
- Oberflächenanisotropie: gebrochene Translationsinvarianz entlang der Flächennormalen verursacht Anisotropien
- Kristallanisotropie: verursacht durch Fehlstellen im Kristall

Die mikroskopischen Ursachen für die magnetische Anisotropie sind Dipol-Dipol-Wechselwirkungen sowie Spin-Bahn-Kopplung. Für den Zusammenhang zwischen freier Energie und Magnetisierungsrichtung gilt:

$$F = -\mu_0 M_S H \cos(\Theta - \Theta_H) + K_{eff} \sin^2(\Theta)$$

Hierbei sind

- M_S : die Sättigungsmagnetisierung
- H : der Betrag des angelegten Magnetfelds
- Θ_H : der Winkel zwischen der Flächennormalen
- Θ : der Winkel zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Flächennormale
- K_{eff} : die effektive Anisotropiekonstante

Diese Konstante setzt sich aus den oben genannten Anisotropien wie folgt zusammen:

$$K_{eff} = -\frac{\mu_0 M_S^2}{2} + K_1 + 2\frac{k_S}{d}$$

K_1 ist hierbei die Konstante, die sich auf das Kristallgitter bezieht und k_S die, die sich auf die Oberflächenanisotropie bezieht.

1.5 Auftretende Arten des Magnetismus

1.5.1 Ferromagnetismus

Materialien, die in einem externen Magnetfeld eine spontane, unabhängige Magnetisierung aufweisen nennt man ferromagnetisch. Im Vergleich zum Paramagnetismus wird das innere Feld jedoch nicht durch ein äußeres Feld induziert sondern lediglich entsprechend ausgerichtet.

des Materials, so befindet es sich im Gleichgewicht und es gilt:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d\Theta} &= 0 \\ \Rightarrow H_S &= -\frac{2}{\mu_0 M_S} K_{eff} \end{aligned}$$

Da es sich hauptsächlich um Hysteresekurven bei den Aufnahmen handeln wird, muss noch die Koerzitivfeldstärke H_C bestimmt und von der Sättigungsfeldstärke abgezogen werden. Die Koerzitivfeldstärke beschreibt die Stärke des angelegten Magnetfelds, bei dem die Magnetisierung gerade null wird. Da im Versuch nur der Ker-Winkel und nicht die Sättigung der Magnetisierung gemessen werden kann, diese aber proportional zueinander sind, ergibt sich für K_{eff} :

$$K_{eff} = -\frac{1}{2} \Phi_K \cdot (H_S - H_C)$$

1.6.2 Ferrimagnetismus von $Fe_{1-x}Gd_x$

Eisen sowie Gadolinium weisen ferromagnetisches Verhalten auf, jedoch besitzt Gd eine Curie-Temperatur von 16°C . Die Curie-Temperatur gibt die Temperatur an, oberhalb der das Material seine ferromagnetischen Eigenschaften verliert. Im Versuch werden Legierungen mit $x \approx 0,26 - 0,27$ benutzt. Wie oben beschrieben erzeugen die beiden Elemente jeweils ein Untergitter mit entgegengesetzten magnetischen Momenten und bilden somit einen Ferrimagneten. Aufgrund der unterschiedlichen Curie-Temperaturen ist der Magnetismus jedoch temperaturabhängig. Bei tiefen Temperaturen überwiegt der Einfluss von Gd . Oberhalb der Curie-Temperatur dominiert der Einfluss von Fe . Dazwischen gibt es eine Temperatur T_{komp} bei der sich die magnetischen Momente kompensieren.

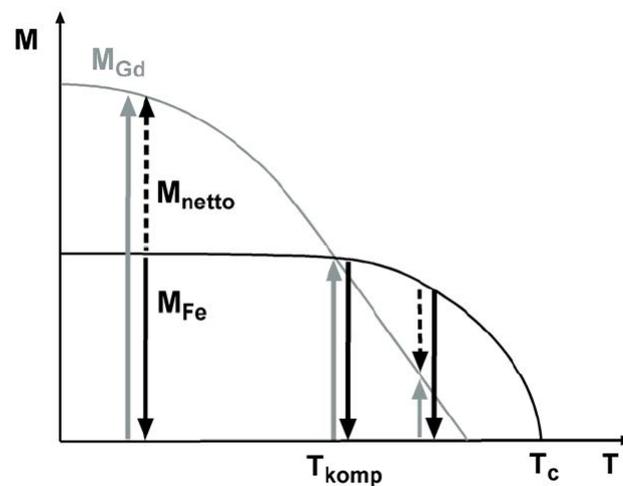


Abbildung 1.3: Magnetisierung in Abhängigkeit von Temperatur. Quelle: Vorbereitungsmappe

Aufgrund der Lage der Fermienergien und der Photonenenergie des verwendeten Lasers, sind für den Kerr-Effekt jedoch nur die magnetischen Momente der Fe -Atome von Bedeutung. Damit hängt der Kerr-Effekt für niedrige Temperaturen vom "Eisenmoment" antiparallel zum Nettomoment ab. Für hohe Temperaturen dreht sich die Drehrichtung und der Kerr-Effekt hängt parallel mit dem Nettomoment zusammen.

1.7 Quellen

Sämtliche Abbildungen und die meisten Informationen wurden der zur Verfügung gestellten Literaturliste entnommen. Des Weiteren wurde folgende Literatur konsultiert:

1. Ibach/Lüth, "Festkörperphysik", Springer, Berlin, 2009
2. E. Hecht, "Optik", 3. Auflage, Oldenbourg, München, 2001

2 Versuchsaufbau und Aufgabenstellung

2.1 Aufbau

Unten ist ein schematischer Aufbau des Experiments dargestellt. Das größtenteils polarisierte Laserlicht wird im Polarisator X linear ausgerichtet und abgeschwächt. Über den Polarisator P lässt sich die erforderliche Polarisation einstellen. Das Licht wird durch die Linse L1 gebündelt und erreicht die Probe, die sich im Magnetfeld befindet. Die Magnetfeldstärke wird über eine kalibrierte Hall-Sonde ermittelt. Bei der Reflexion an der Probe tritt nun der zu untersuchende Kerr-Effekt auf, der eine Drehung der Polarisation verursacht. Über die Intensitäten an den Photodioden D1 und D2 wird diese Drehung dann gemessen. Der Polarisator P muss so eingestellt werden, dass die gemessenen Intensitäten an den Dioden bei abgeschaltetem Magnetfeld gleich groß sind. Der Kerr-Winkel ist dann proportional zu $\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$. Die Messung erfolgt mithilfe eines Computers der in einem Schaubild die Kerr-Drehung in Abhängigkeit vom angelegten Magnetfeld angibt.

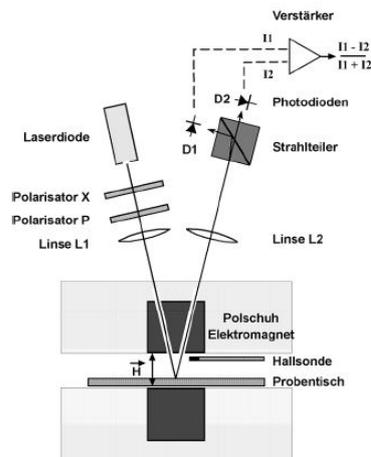


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Quelle: Vorbereitungsmappe

2.2 Aufgabenstellung

2.2.1 Ferromagnetische Schichtsysteme

Hier sollen jeweils die Hysteresekurven $\Phi(H)$ für verschiedene Schichtdicken aufgenommen und K_{eff} bestimmt werden. Zudem soll jeweils der Einfluss der Schichtdicke von C_0

bzw. Pd ermittelt werden. Zusätzlich soll beim $Co/Pd/Co$ Schichtsystem eine Aussage bezüglich der Kopplung bzw. Entkopplung der Co -Schichten über die Pd -Schicht hinweg getroffen werden.

2.2.2 Ferrimagnetische Schichten

In diesem Versuchsteil soll die Temperaturabhängigkeit der Hysteresekurven für verschiedene Proben ermittelt werden. Daraus soll man die Koerzitivfeldstärken sowie die Kompensationstemperatur der Schichten bestimmen. Damit lässt sich dann die Gd -Konzentration ermitteln:

$$x \text{ (in \%)} = 0,01783 \cdot T_{comp} + 21$$

Abschließend soll noch eine Aussage über den Verlauf des Kerr-Winkels in Sättigung mit der Konzentration x getroffen werden.

3 Auswertung

In den folgenden Abbildungen wurde der Verlauf der Hysterese durch eine rote Linie verdeutlicht. Hierbei handelt es sich um eine Interpolation (smooth bezier), die mit Gnuplot durchgeführt wurde.

3.1 Aufgabe 1

Für diese Aufgabe nahmen wir die Polarisationsänderung und damit den Kerrwinkel für die verschiedenen Schichtdicken d (von Co) der ersten Probe auf. Diese war ein Pd/Co/Pd-Schichtsystem. Durch Änderung des äußeren H -Felds erhielten wir Hysteresekurven:

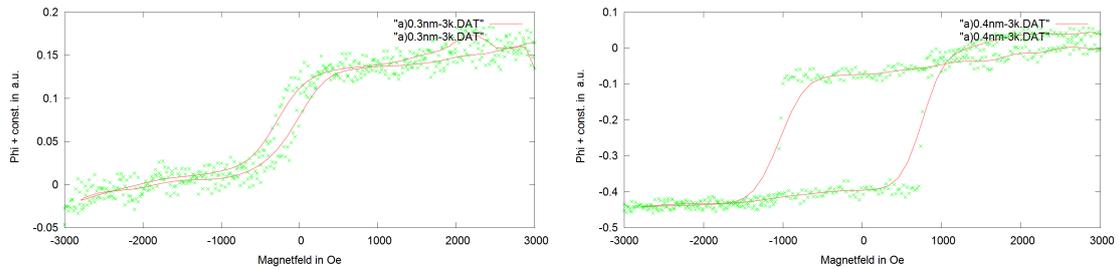


Abbildung 3.1: $d = 0.3/0.4$ nm

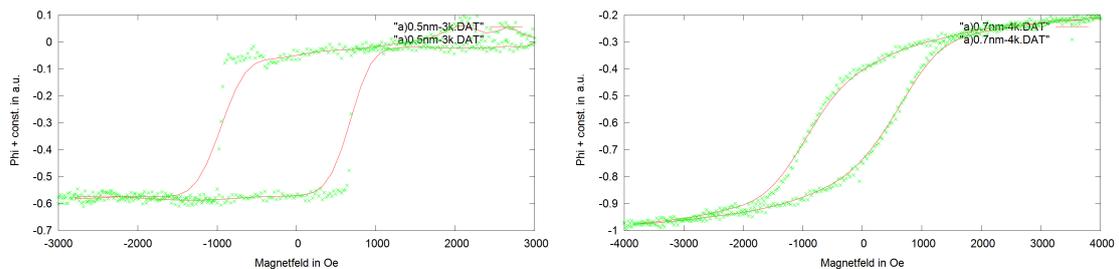


Abbildung 3.2: $d = 0.5/0.7$ nm

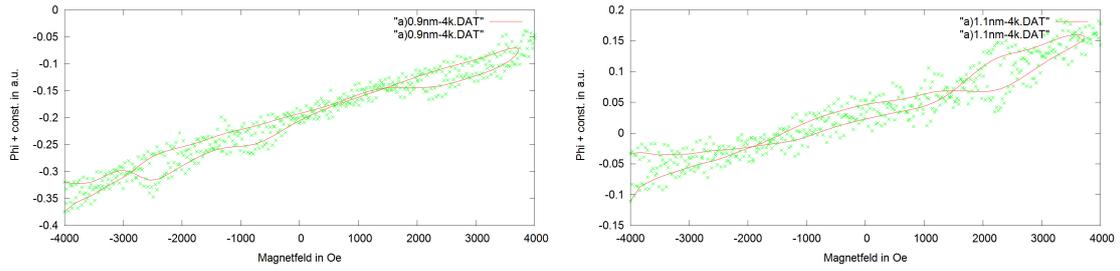


Abbildung 3.3: $d = 0.9/1.1$ nm

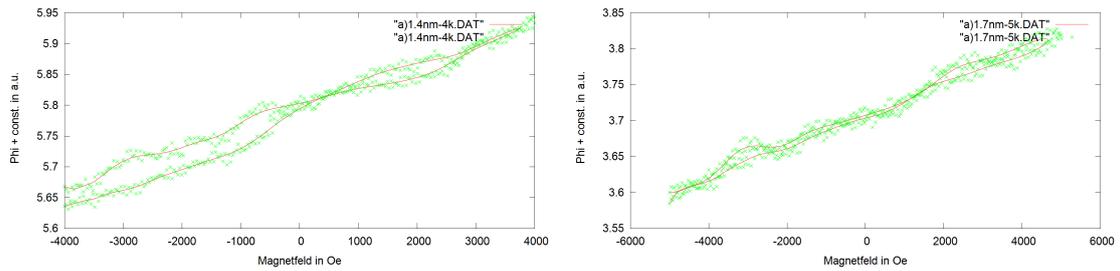


Abbildung 3.4: $d = 1.4/1.7$ nm

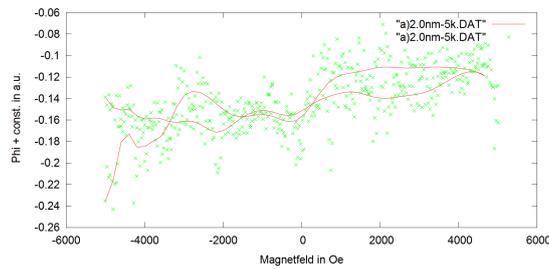


Abbildung 3.5: $d = 2.0$ nm

Wie man sieht ist ab 0.9 nm keine Hysterese mehr zu erkennen. Dies liegt an der steigenden Schichtdicke des Materials. Je dicker die magnetooptische Schicht ist, desto mehr richtet sich die Magnetisierung parallel zur Fläche aus. Der im Versuch verwendete Aufbau ist jedoch nur in der Lage senkrechte Komponenten der Magnetisierung zu messen. Damit entfällt die quantitative Auswertung für diesen Teil der Probe. Für die restlichen Schichtdicken sind Sättigungsfeld und Kerrwinkel schlecht zu erkennen, da die Probe im gewählten Magnetfeldbereich die Sättigung nie erreichte. Wir nähern somit H_S und Φ_K durch die Schnittpunkte der beiden Hysteresearme an. Wir erhalten somit folgende Messwerte:

d in nm	H_C in Oe	H_S in Oe	Φ_K in m°	K_{eff} in Oe m°	ΔK_{eff} in Oe m°
0.3	111.209	926.743	0.066	26.9	4.2
0.4	891.399	1256.302	0.193	35.2	3.9
0.5	766.290	1292.786	0.289	76.1	5.7
0.7	632.493	2794.095	0.340	367.5	12.4

Tabelle 3.1: Messwerte

Dabei wurden die Fehler mit $\Delta H_C = \Delta H_S = 25\text{Oe}$ und $\Delta \Phi_K = 0.01\text{m}^\circ$ großzügig abgeschätzt und fortgepflanzt:

$$\Delta K_{eff} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{eff}}{\partial \Phi_K}\right)^2 \cdot \Delta^2 \Phi_K + \left(\frac{\partial K_{eff}}{\partial H_C}\right)^2 \cdot \Delta^2 H_C + \left(\frac{\partial K_{eff}}{\partial H_S}\right)^2 \cdot \Delta^2 H_S}$$

Die erhaltenen Werte sind relativ, da die Kalibrierungsdaten während der Messung nicht bekannt waren.

3.2 Aufgabe 2

In diesem Versuch bestand die Probe aus einem Co/Pd/Co-Schichtsystem mit einer variablen Dicke d der Pd-Schicht. Wie oben erhielten wir verschiedene Hysteresekurven:

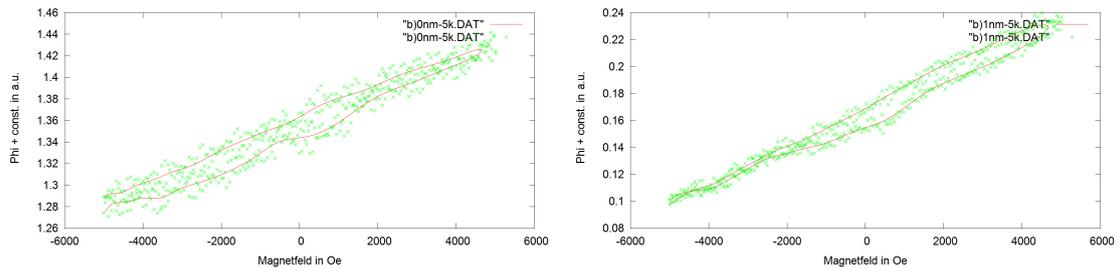


Abbildung 3.6: $d = 0/1$ nm

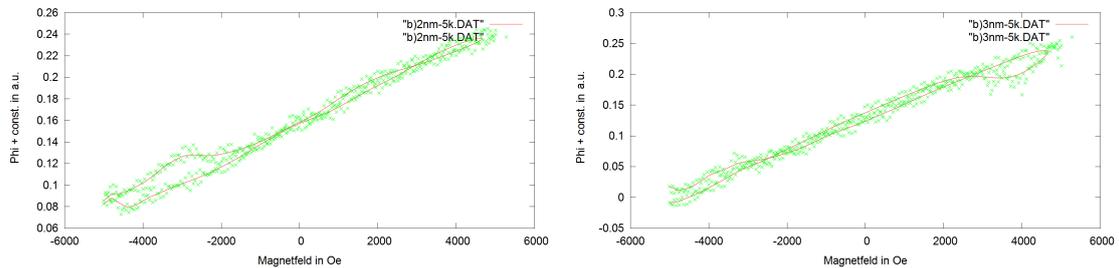


Abbildung 3.7: $d = 2/3$ nm

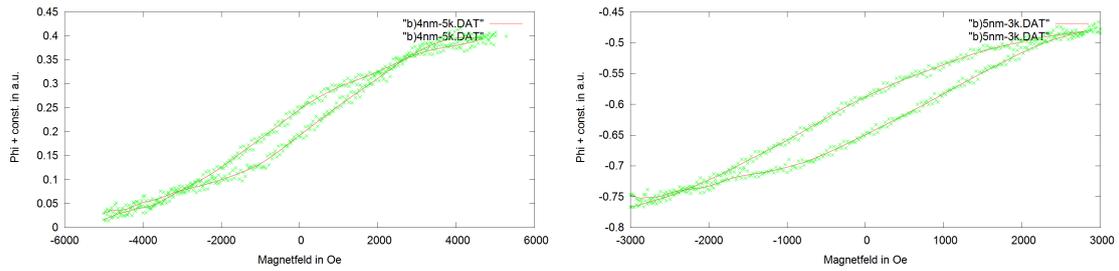


Abbildung 3.8: $d = 4/5$ nm

Wie man sieht ist von 0 bis 3 nm noch kein Hystereseeffekt, und damit keine Magnetisierung senkrecht zur Oberfläche, erkennbar. Dies liegt daran, dass die Magnetisierung der dünnen Co-Schicht noch an die Magnetisierung der dicken Co-Schicht koppelt und somit in eine Richtung parallel zur Oberfläche gezwungen wird. Mit wachsender Pd-Schichtdicke d wird diese Koppelung jedoch schwächer und es überwiegen die Oberflächeneffekte der dünnen Co-Schicht, sodass sich eine effektive Magnetisierung senkrecht zur Oberfläche ergibt. Dies erklärt das Auftreten der Hysteresekurven für Sichtdicken größer als 3 nm.

3.3 Aufgabe 3

In diesem Teil nahmen wir Hysteresekurven für 4 verschiedene Proben (6,7,8 und 9) bei verschiedenen Temperaturen auf. Dadurch soll die Kompensationstemperatur der jeweiligen Legierungen, sowie deren Gd -Anteil ermittelt werden.

3.3.1 Probe 7

Wir stellten folgende Hysteresekurven fest:

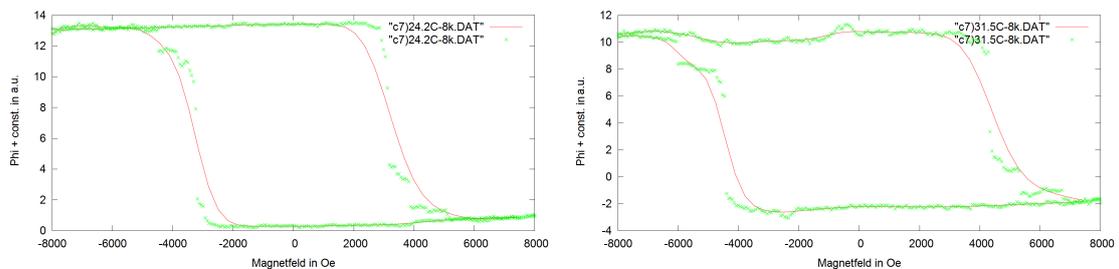


Abbildung 3.9: $T = 279.35/304.65$ K

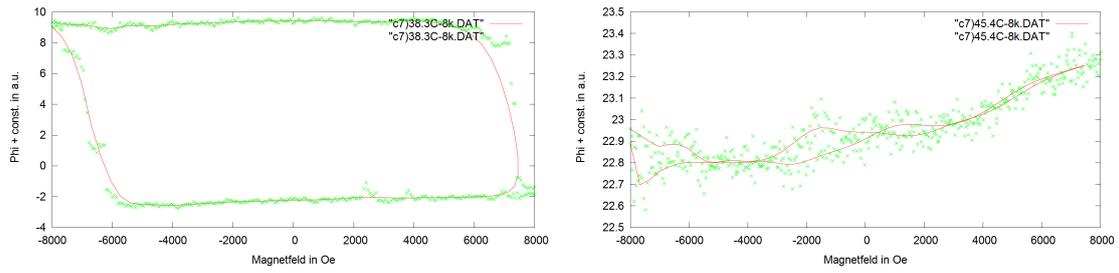


Abbildung 3.10: $T = 311.45/318.55$ K

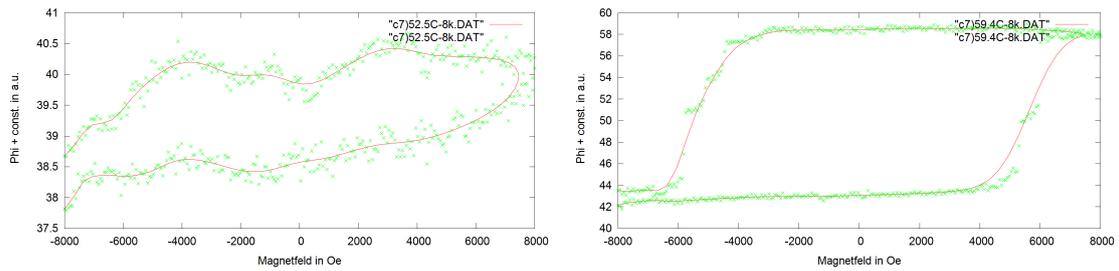


Abbildung 3.11: $T = 325.65/332.55$ K

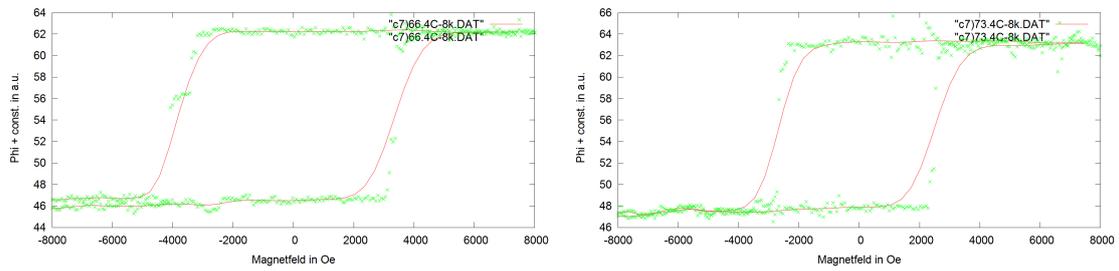


Abbildung 3.12: $T = 339.55/346.55$ K

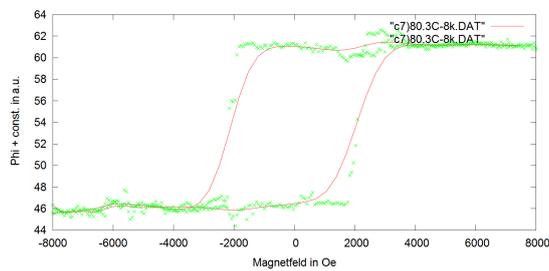


Abbildung 3.13: $T = 353.45$ K

Wie man sieht richtet sich die Magnetisierung gegen das äußere Feld aus, die magnetischen Momente der *Fe*-Atome sind also umgeklappt. Mit steigender Temperatur wird die Koerzitivfeldstärke immer größer, bis das zur Verfügung stehende Magnetfeld nicht mehr ausreicht eine Hystereseform aufzulösen. Die Kurven für $T=318.55$ und $T=325.65$ zeigen keine Hysteresestruktur. Währenddessen überschreitet die Probe die Kompensationstemperatur und der ferromagnetische Anteil der Legierung überwiegt. Damit erhalten wir folgend Messwerte:

T in K	H_C in Oe
279.35	3213.627
304.65	4451.388
311.45	7074.520
332.55	5359.825
339.55	3418.027
346.55	2623.673
353.45	2066.190

Tabelle 3.2: Messwerte

Ein Fit der Betragsfunktion an $\frac{1}{H_C(T)}$ ergibt:

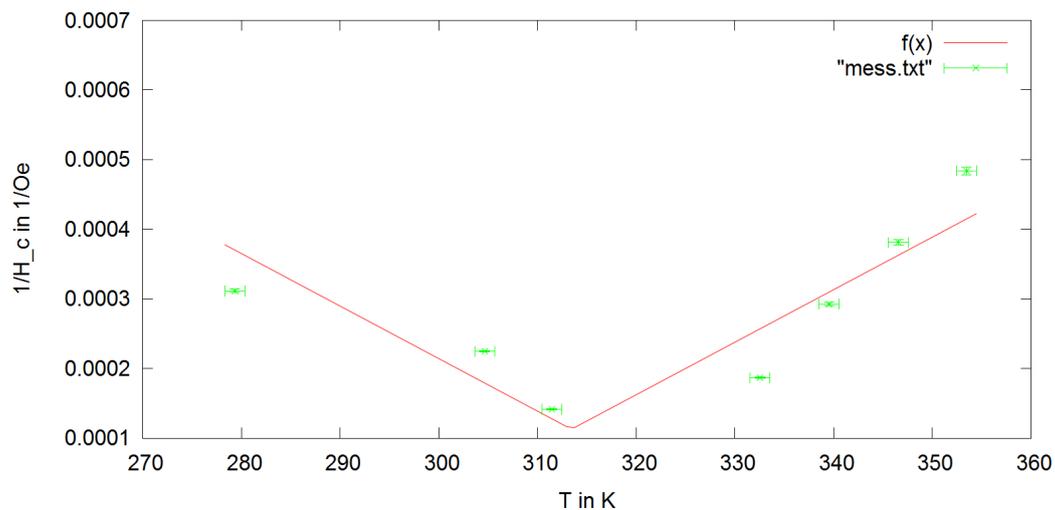


Abbildung 3.14: Fit

Daraus lässt sich nun die Kompensationstemperatur am Minimum der Fitfunktion ablesen:

$$T_{komp} = (313,4 \pm 3,9)\text{K}$$

wobei die Fehler $\Delta H_C = 25\text{Oe}$ und $\Delta T = 1\text{K}$ angenommen wurden. Damit ergibt sich

nun auch

$$x(at\%) = 0.01783 \frac{\%}{K} \cdot T_{komp} + 21\% = (26.59 \pm 0.07)\%$$

3.3.2 Probe 6

Analoges vorgehen wie in (3.3.1) ergibt:

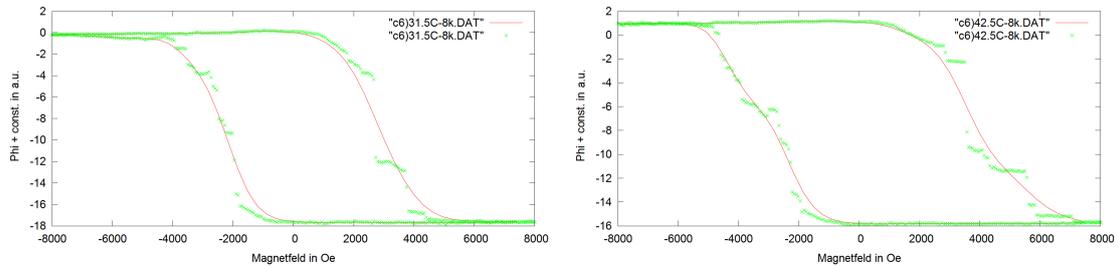


Abbildung 3.15: T = 304.65/315.65 K

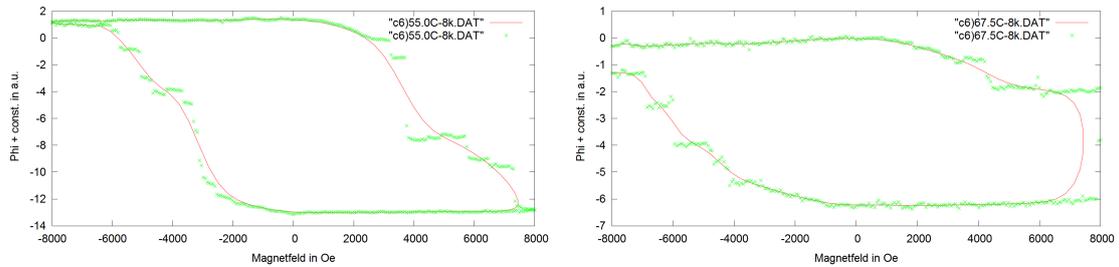


Abbildung 3.16: T = 328.15/340.65 K

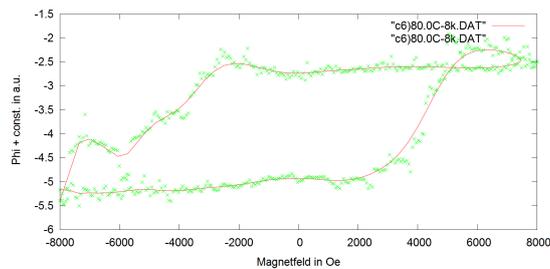


Abbildung 3.17: T = 353.15 K

Auch hier erkennt man das Umspringen der Magnetisierung im Verhältnis zum angelegten Feld. Die Kurve für T=340.65 K liegt im Übergangsbereich und wird für die Messwerte nicht berücksichtigt.

Damit erhalten wir folgend Messwerte:

T in K	H_C in Oe
304.65	2543.653
315.65	3100.076
328.15	3565.654
353.15	4508.984

Tabelle 3.3: Messwerte

Ein Fit der Betragsfunktion an $\frac{1}{H_C(T)}$ ergibt:

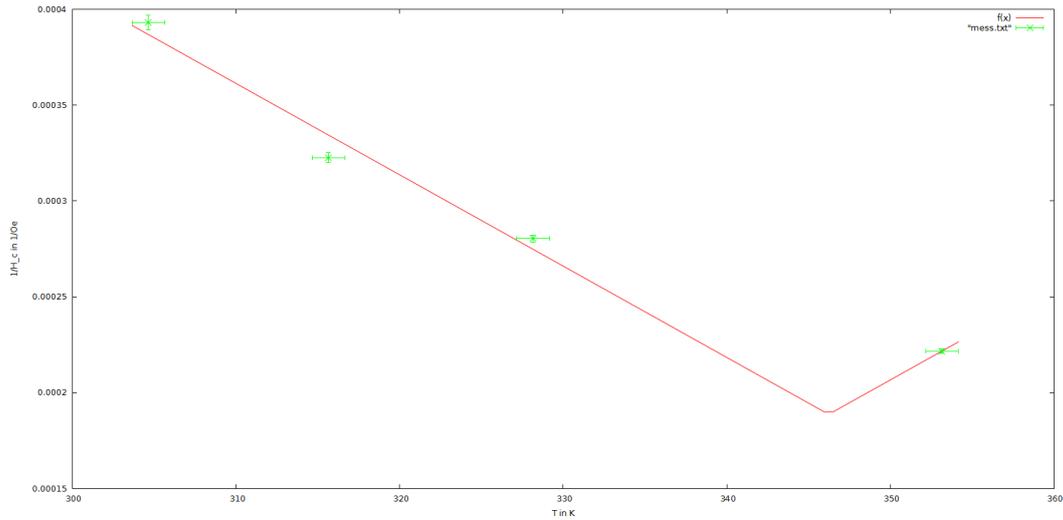


Abbildung 3.18: Fit

Daraus lässt sich nun die Kompensationstemperatur am Minimum der Fitfunktion ablesen:

$$T_{komp} = (346, 2 \pm 2, 8)\text{K}$$

wobei die Fehler $\Delta H_C = 25\text{Oe}$ und $\Delta T = 1\text{K}$ angenommen wurden. Damit ergibt sich nun auch

$$x(\text{at}\%) = 0.01783 \frac{\%}{\text{K}} \cdot T_{komp} + 21\% = (27.17 \pm 0.05)\%$$

3.3.3 Probe 8

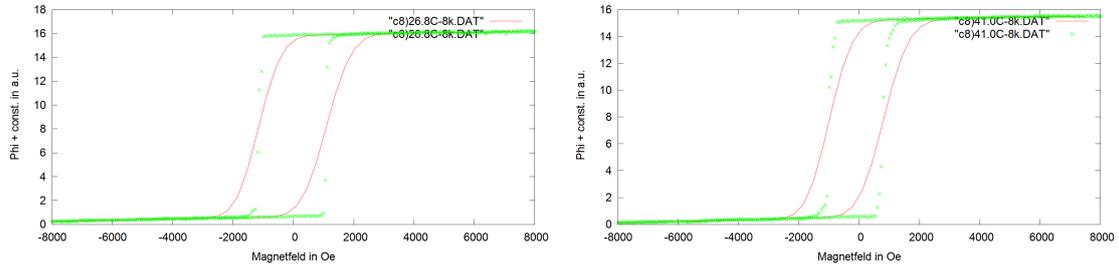


Abbildung 3.19: $T = 299.15/314.15$ K

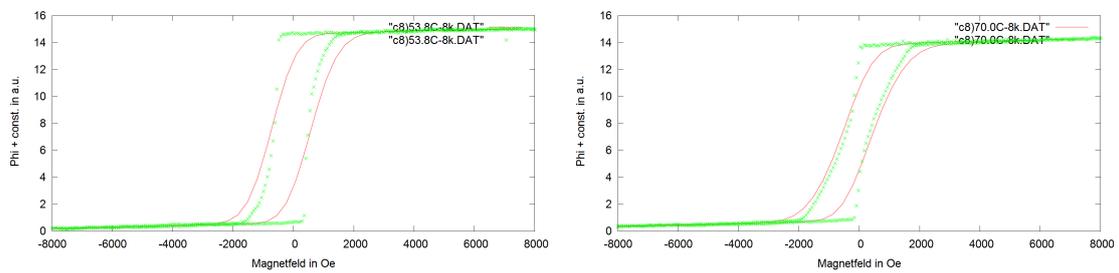


Abbildung 3.20: $T = 326.95/343.15$ K

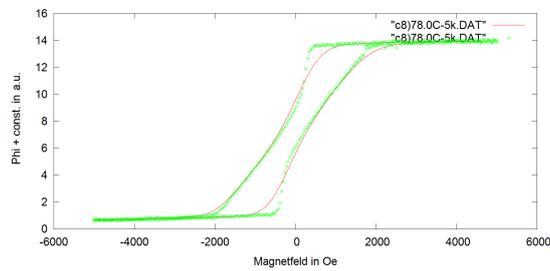


Abbildung 3.21: $T = 351.15$ K

Die Probe ist ferrimagnetisch und dieses Verhalten verstärkt sich mit steigender Temperatur. Es gibt kein Umspringen wie bei den Proben 7 und 6. Daher wählen wir auch im Folgenden einen linearen Fit um den Schittpunkt der Fitfunktion mit der Temperatur-Achse zu bestimmen, welcher uns die Kompensationstemperatur liefert.

T in K	H_C in Oe
299.15	999.26
314.15	874.379
326.95	601.845
343.15	476.925
351.15	383.25

Tabelle 3.4: Messwerte

Der Fit an $\frac{1}{H_C(T)}$ ergibt:

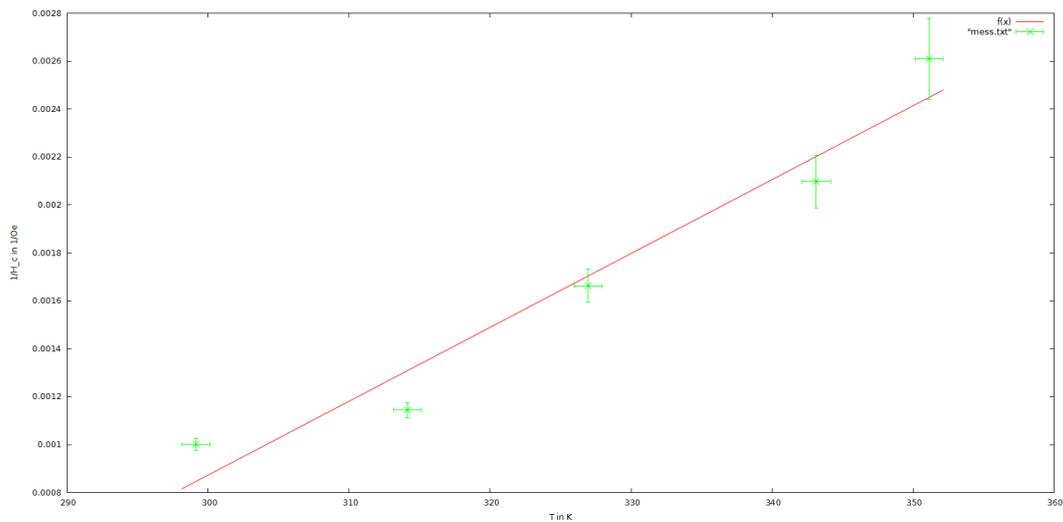


Abbildung 3.22: Fit

Daraus lässt sich nun die Kompensationstemperatur an der Fitfunktion ablesen:

$$T_{komp} = -\frac{(-8.3 \pm 1.3) \cdot 10^{-3} \text{1/Oe}}{(3.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-5} \text{1/K} \cdot \text{Oe}} = (271.7 \pm 54.3) \text{K}$$

wobei die Fehler $\Delta H_C = 25 \text{Oe}$ und $\Delta T = 1 \text{K}$ angenommen wurden. Damit ergibt sich nun auch

$$x(\text{at}\%) = 0.01783 \frac{\%}{\text{K}} \cdot T_{komp} + 21\% = (26.0 \pm 1.0)\%$$

3.3.4 Probe 9

Analog zu Probe 7 und 6 erhält man:

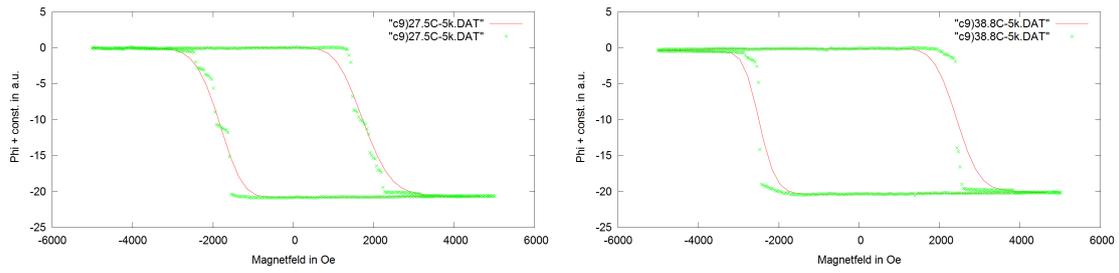


Abbildung 3.23: $T = 300.65/311.95$ K

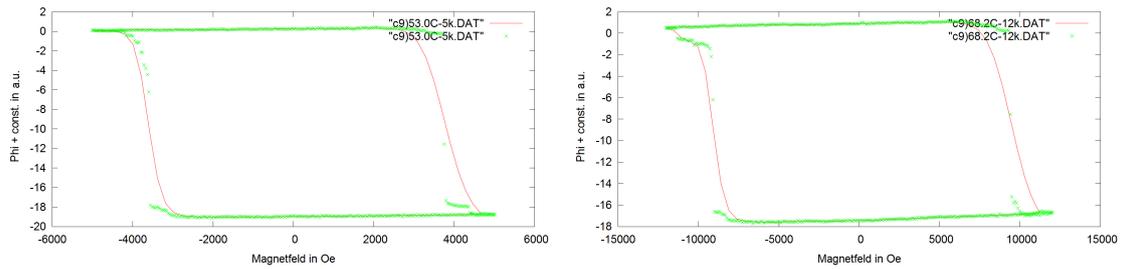


Abbildung 3.24: $T = 326.15/341.35$ K

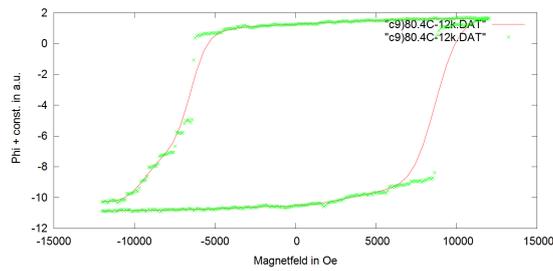


Abbildung 3.25: $T = 353.55$ K

Auch hier ist wieder der Übergang der Magnetisierungsrichtung eindeutig erkennbar. Damit erhalten wir folgende Messwerte:

T in K	H_C in Oe
300.65	1728.882
311.95	2325.065
326.15	3551.459
341.35	9006.791
353.55	7750.173

Tabelle 3.5: Messwerte

Ein Fit der Betragsfunktion an $\frac{1}{H_C(T)}$ ergibt:

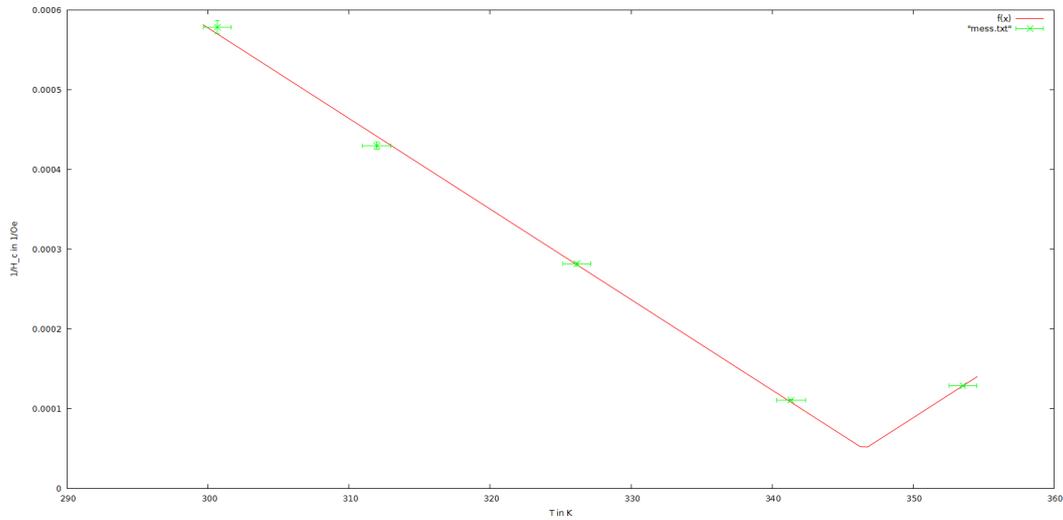


Abbildung 3.26: Fit

Daraus lässt sich nun die Kompensationstemperatur am Minimum der Fitfunktion ablesen:

$$T_{komp} = (346,5 \pm 8,6)\text{K}$$

wobei die Fehler $\Delta H_C = 25\text{Oe}$ und $\Delta T = 1\text{K}$ angenommen wurden. Damit ergibt sich nun auch

$$x(\text{at}\%) = 0.01783 \frac{\%}{\text{K}} \cdot T_{komp} + 21\% = (27.2 \pm 0.2)\%$$