

Protokoll: Magnetooptischer-Kerr-Effekt: MOKE

Versuchstag: 20.04.2009

Kathrin Ender, Michael Walz

Gruppe 101

Inhaltsverzeichnis

A Grundlagen	3
1 Ziel des Versuches	3
2 Faraday-Effekt	3
3 Kerr-Effekt	4
3.1 Kerr-Geometrien	5
4 magnetische Anisotropie	5
4.1 Bestimmung von K_{eff}	6
5 Ferrimagnetismus von $\text{Fe}_{1-x}\text{Gd}_x$	6
5.1 Temperaturabhängigkeit	6
B Experiment	8
6 Aufbau	8
7 Durchführung	8
7.1 Ferromagnetische Schichtsysteme	8
7.1.1 Pd-Co-Pd Schichtsystem	9
7.1.2 Co-Pd-Co Schichtsystem	9
7.2 Ferrimagnetische Schichten	9

C Auswertung	10
8 Zur Fehlerrechnung	10
9 Ferromagnetische Schichtsysteme	10
9.1 Pd/Co/Pd Schichtsystem	10
9.2 Co/Pd/Co Schichtsystem	12
10 Ferrimagnetische Schichten	12
10.1 Probe 6	13
10.2 Probe 7	14
10.3 Probe 8	15
10.4 Probe 9	16
10.5 Zusammenfassung	18
D Anhang: Schaubilder	19
11 Pd/Co/Pd-Schichtsystem	19
12 Co/Pd/Co-Schichtsystem	24
13 Probe 6	27
14 Probe 7	31
15 Probe 8	37
16 Probe 9	42
E Überarbeitung	50
17 Zu Abschnitt 9.1	50
18 Zu Abschnitt 9.2	50
19 Zu Abschnitt 10	50

Teil A

Grundlagen

1 Ziel des Versuches

In diesem Versuch werden die Magnetisierungskurven von magnetischen Materialien untersucht. Das Messprinzip beruht auf dem magnetooptischen Kerr-Effekt (MOKE). An Hand der Drehung der Polarisationssebene vom reflektierten Licht wird auf die Magnetisierung des Materials zurückgeschlossen. Im Versuch werden Schichtsysteme aus ferro- und nichtferromagnetischen Schichten, sowie ferrimagnetische Schichten untersucht. Der magnetooptische Kerr-Effekt zur Bestimmung der Magnetisierung findet unter anderem bei magnetooptischen Speichermedien („MO disc“) Anwendung.

2 Faraday-Effekt

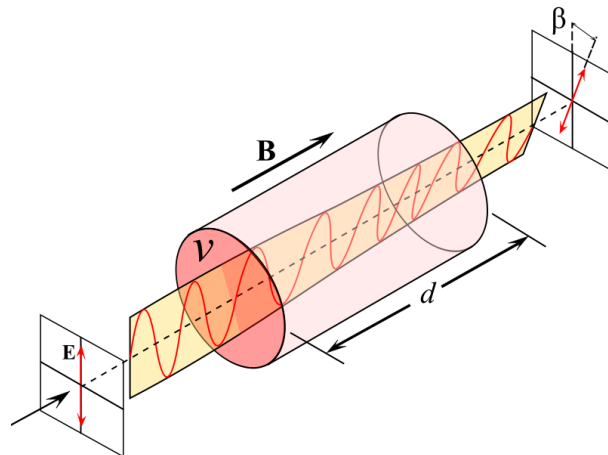
Im Versuch wird der Faraday-Effekt zwar nicht genutzt. Der Vollständigkeit halber wird er hier kurz erläutert, da er ein wichtiger magnetooptischer Effekt ist.

Der Faraday-Effekt beschreibt die Drehung der Polarisationssebene bei der Transmission durch Materialien mit nicht verschwindender Magnetisierung. Eine linear polarisierte Lichtwelle lässt sich als Superposition einer rechtszirkular-polarisierten $\vec{E}^{(-)}$ und einer linkszirkular-polarisierten $\vec{E}^{(+)}$ Welle darstellen. Für die dielektrische Verschiebung \vec{D} gilt:

$$D_i = \varepsilon_{ij} \cdot E_j$$

Die dielektrische Funktion $\varepsilon_{ij}(\vec{M})$ ist dabei ein Tensor. Es ergibt sich für die links- und die rechtszirkular-polarisierte Welle ein unterschiedlicher Brechungsindex $n^{(-)}$ bzw. $n^{(+)}$. Daher kommt es zu einer Phasendifferenz zwischen den beiden transmittierten Wellen. Die Überlagerung der beiden transmittierten Wellen führt wieder zu einer linear polarisierten Welle, deren Polarisation allerdings relativ gesehen zur einfallenden Welle gedreht ist.

$$\Delta\varphi = \frac{d}{\lambda} \cdot (n^{(-)} - n^{(+)}) \cdot \pi$$



Quelle: de.wikipedia.org

Wie stark die Polarisation gedreht wird, ist proportional zur Dicke des durchlaufenden Materials, sowie zum Betrag der Magnetisierung.

Ist das Material nicht vollständig transparent (d.h. der Brechungsindex hat einen imaginären Anteil), so werden die beiden zirkular polarisierten Wellen auch noch unterschiedlich stark absorbiert, was zu einer elliptischen Polarisation führt.

3 Kerr-Effekt

Beim magnetooptischen Kerr-Effekt betrachtete man die Drehung der Polarisation die bei der Reflexion an Grenzschichten auftritt, wenn das Medium, an dem reflektiert wird, eine nicht verschwindende Magnetisierung besitzt.

Als einfachsten Fall betrachten wir den senkrechten Einfall mit senkrechter¹ Polarisationsrichtung. Der Brechungsindex der beiden zirkular polarisierten Wellen lässt sich nähern als:

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

Dabei ist \hat{n}_0 der Einheitsvektor in Ausbreitungsrichtung, \vec{g} ist der sogenannte Gyrationvektor, der parallel zur Magnetisierung steht. Der Betrag des Gyrationvektors $|\vec{g}| = Q$ wird auch Voigt-Konstante genannt. Betrachtet man nur den Spezialfall $\vec{g} \parallel \hat{n}_0$, d.h. $\vec{g} \cdot \hat{n}_0 = Q$, so ergibt sich für den Reflexionskoeffizienten der zirkular polarisierten Wellen bei senkrechtem Einfall:

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

Setzt man eine parallel zur x-Richtung einfallende Welle und eine Magnetisierung in z-Richtung (also Oberfläche in x-y-Ebene) an, so erhält man:

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

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

Wobei die quadratischen Terme in Q vernachlässigt wurden. Durch den Kerr-Effekt erhält man also auch eine y-Komponente für das reflektierte elektrische Feld.

Den komplexen Kerr-Winkel definiert man als den Quotienten der y- und der x-Komponente des reflektierten elektrischen Feldes:

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

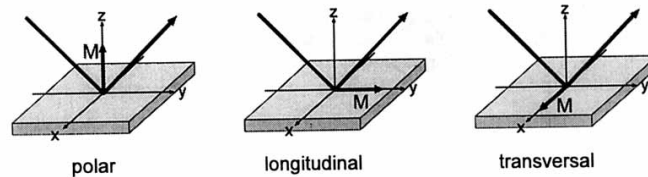
Die reflektierte Welle kann als Überlagerung von zwei linear polarisierten Wellen in x- und in y-Richtung betrachtet werden. Ist n_0 rein reell, so ist Φ_K rein imaginär, d.h. der Kerr-Winkel entspricht der Phasenverschiebung zwischen den beiden linear polarisierten Wellen. Die Überlagerung entspricht einer elliptisch polarisierten Welle, deren Polarisationsebene jedoch nicht gedreht ist. Ist n_0 imaginär, so enthält der Kerr-Winkel einen Realteil. Zusätzlich zur Elliptizität ergibt sich aufgrund der Phasenverschiebung eine Drehung der Polarisationsachse, die im Versuch gemessen werden soll.

¹senkrecht zur Oberfläche des Mediums

3.1 Kerr-Geometrien

Beim Kerr-Effekt unterscheidet man zwischen drei unterschiedlichen Kerr-Geometrien:

- **polar**: Die Magnetisierung steht senkrecht zur Oberfläche.
- **longitudinal**: Die Magnetisierung liegt in der Oberfläche und in optischen Ebene.
- **transversal**: Die Magnetisierung liegt in der Oberfläche, steht aber senkrecht zur optischen Ebene.



Quelle: Vorbereitungsmappe

Im Versuch wird nur der polare Kerr-Effekt genutzt.

4 magnetische Anisotropie

Wenn magnetische Materialien Vorzugsrichtungen für die Magnetisierung aufweisen, so spricht man von magnetischer Anisotropie. Die magnetische Anisotropie hängt also mit der freien Energie zusammen, die für eine bestimmte Magnetisierungsrichtung vorliegt. Es gibt verschiedene Arten von magnetischer Anisotropie:

- **Formanisotropie**: auf Grund der Form des Materials kann es eine Vorzugsrichtung geben.
- **Kristallanisotropie**: verursacht durch Unregelmäßigkeiten im Kristall
- **Oberflächenanisotropie**: verursacht durch gebrochene Translationsinvarianz entlang der Flächennormalen

Mikroskopische Ursachen für die magnetische Anisotropie sind Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Spin-Bahn-Kopplung.

Der Zusammenhang zwischen freier Energie und Magnetisierungsrichtung kann wie folgt dargestellt werden:

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

Dabei ist M_S die Sättigungsmagnetisierung, H der Betrag des äußeren Magnetfeldes, Θ_H der Winkel zwischen der Flächennormalen und dem äußeren Magnetfeld, Θ der Winkel zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Flächennormale und K_{eff} ist die sogenannte effektive Anisotropiekonstante.

Die effektive Anisotropiekonstante setzt sich aus den Beiträgen der Formanisotropie, kristallinen Anisotropie und der Grenzflächenisotropie zusammen.

$$K_{\text{eff}} = -\frac{\mu_0 M_s^2}{2} + K_1 + 2\frac{k_s}{d}$$

4.1 Bestimmung von K_{eff}

Da wie bereits erläutert die Anisotropie mit der freien Energie verknüpft ist, kann K_{eff} bestimmt werden, indem man die Arbeit, die zur Ummagnetisierung nötig ist, bestimmt. K_{eff} entspricht also der Fläche unter der idealisierten Magnetisierungskurve. Im Versuch nehmen wir allerdings nur Hysteresekurven auf, so dass wir zwischen den Kurven für fallendes und steigendes äußeres Feld interpolieren müssen.

Eine weitere Möglichkeit K_{eff} zu bestimmen ist aus den Sättigungsfeldern H_{sat} und M_S . Bei $H = H_{\text{sat}}$ befindet sich das System im Gleichgewicht, d.h. es muss gelten:

$$\frac{dF}{d\Theta} = 0 \quad \Rightarrow \quad H_{\text{sat}} = -\frac{2}{\mu_0 M_S} K_{\text{eff}}$$

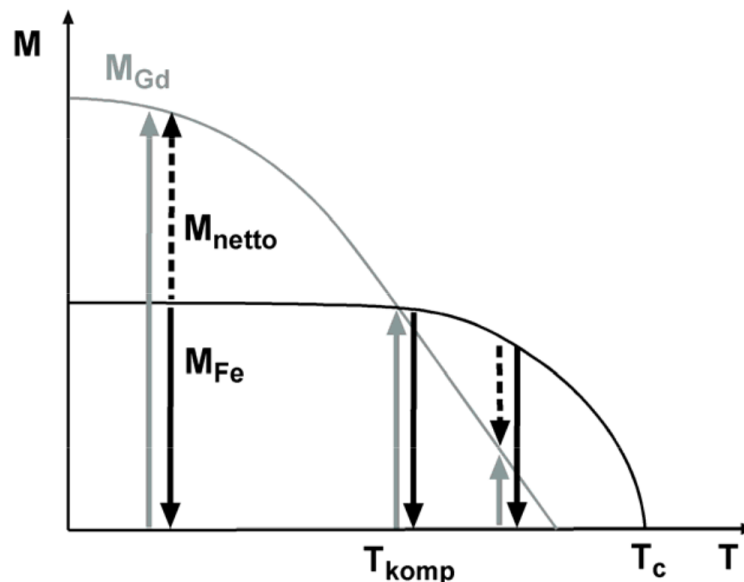
Ist die Magnetisierungskurve eine Hysteresekurve, so muss außerdem noch die Koerzitivkraft H_C bestimmt werden. In diesem Fall berechnet sich K_{eff} aus:

$$K_{\text{eff}} = -\frac{1}{2} \mu_0 M_S \cdot (H_{\text{sat}} - H_C)$$

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

Sowohl Eisen wie auch Gadolinium zeigen ferromagnetisches Verhalten. Gadolinium hat allerdings in Reinform mit 16°C eine vergleichsweise tiefe Curie-Temperatur. Im Versuch werden Legierungen mit $x \approx 0,26-0,27$ benutzt. Hier bilden die Fe- und Gd-Atome je ein eigenes Untergitter, wovon jedes für sich wieder Ferromagnetismus aufweist. Die magnetischen Momente der Untergitter richten sich jedoch antiparallel aus, sodass die Netto-Magnetisierung immer kleiner als die Summe der Magnetisierungen ist. Dieses Verhalten nennt man Ferrimagnetismus.

5.1 Temperaturabhängigkeit



Quelle: Vorbereitungsmappe

Der Ferromagnetismus von Eisen und Gadolinium ist jedoch temperaturabhängig. Bei tiefen Temperaturen überwiegt der Einfluss von Gadolinium. Die Nettomagnetisierung zeigt also

in Richtung M_{Gd} . Bei hohen Temperaturen² überwiegt der Einfluss von Eisen. Die Nettomagnetisierung zeigt dann in Richtung M_{Fe} . Dazwischen gibt es eine Temperatur T_{komp} , bei der sich die beiden magnetischen Momente genau kompensieren.

Aufgrund der Lage der Fermienergien spielen für den Kerr-Effekt jedoch nur die Elektronen des Eisens eine Rolle. Das heißt, dass für tiefe Temperaturen der Kerr-Effekt vom Eisenmoment *antiparallel* vom Nettomoment abhängt. Für hohe Temperaturen dreht sich die Drehrichtung jedoch um und der Kerr-Effekt hängt dann *parallel* vom Nettomoment ab.

Bei T_{komp} verschwindet die Nettomagnetisierung. Sie kann durch kein noch so großes Feld angeregt werden. Die Koerzitivfeldstärke ist also unendlich groß. Der Kerr-Effekt bleibt jedoch bestehen, da dieser vom Eisenmoment abhängt.

²aber unterhalb der Curie-Temperatur von Eisen

Teil B

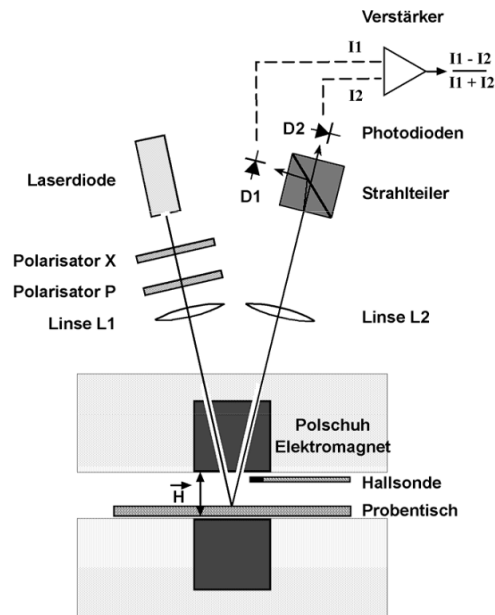
Experiment

6 Aufbau

Rechts ist der Aufbau schematisch dargestellt. Das teilweise polarisierte rote³ Licht der Laserdiode wird durch den Polarisator X linear polarisiert und abgeschwächt. Über den Polarisator P lässt sich die gewünschte Polarisierung einstellen. Zur Feineinstellung besitzt dieser eine Mikrometerschraube.

Das von der Linse L1 gebündelte Licht erreicht dann die Probe im Magnetfeld. Das Magnetfeld wird extern über einen Computer geregelt. Die Messung erfolgt über eine bereits geeichte Hallsonde. Bei der Reflexion an der Probe tritt nun der polare Kerr-Effekt auf, der eine Drehung der Polarisation bewirkt.

Über den Strahlteiler und die gemessenen Intensitäten an den Photodioden D1 und D2 wird diese Drehung registriert. Der Polarisations P muss so eingestellt werden, dass ohne Magnetfeld die Ströme I1 und I2 gleich sind. Der Kerr-Winkel ist dann proportional zum Quotienten aus Differenz und Summe der beiden Ströme.



Quelle: Vorbereitungsmappe

7 Durchführung

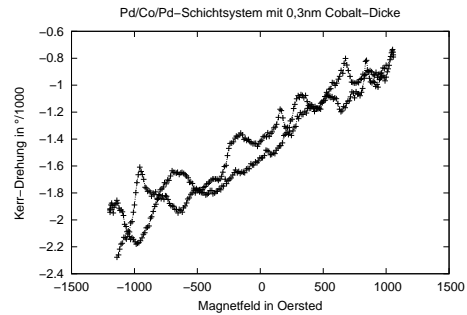
Die Messung erfolgt über ein Messprogramm am Computer. Konkret heißt dies, dass man im Messprogramm einen Bereich für das Magnetfeld und die Anzahl der Messpunkte vorgibt und dass dann die Messung nach Druck von RUN vollautomatisch durchläuft.

Vor jeder Messung stellen wir über den Polarisator P den Differenzstrom I12 so gut wie möglich auf Null. Dies hatte auch zur Folge, dass bei den Schaubildern mit deutlicher Remanenz, diese Remanenz als Nulllinie gewählt wurde. Deshalb beginnen viele Schaubilder der ferrimagnetischen Systeme bei einem Kerrwinkel von Null.

7.1 Ferromagnetische Schichtsysteme

Es werden zwei ferromagnetische Schichtsysteme untersucht. Gemessen wird bei Raumtemperatur die Hysteresekurven für die verschiedenen Schichtdicken. Für das Pd-Co-Pd-Schichtsystem soll noch die Anisotropiekonstante (vgl. 4) bestimmt werden.

Die Messung gestaltete sich recht mühsam, da oft hystereseeähnliche sich aber oft überschneidene Kurvenverläufe gemessen wurden. Eine solche misslungene Messung ist rechts mit dem -Schichtsystem bei 0,3nm Cobalt-Dicke dargestellt. Diese Messungen wurden dann verworfen und die Probe so lange leicht verrückt, bis einigermaßen sinnvolle Bilder entstanden.



7.1.1 Pd-Co-Pd Schichtsystem

Auf einem Silizium-Substrat sind eine ferromagnetische Cobalt zwischen zwei Palladium-Schichten. Die Dicke der Cobaltschicht wächst von 0,3 nm bis 2 nm. Zum Schutz vor Oxidation ist die Probe mit einer dünnen Goldschicht bedeckt.

7.1.2 Co-Pd-Co Schichtsystem

In diesem Schichtsystem sind zwei Cobaltschichten durch eine Palladiumschicht variabler Dicke getrennt. Dieses Schichtsystem wird von zwei weiteren Cobaltschichten umhüllt. Zum Schutz vor Oxidation ist auch diese Probe mit einer dünnen Goldschicht bedeckt. Die Dicke der variablen Palladiumschicht liegt zwischen 0 nm⁴ bis 5 nm.

7.2 Ferrimagnetische Schichten

Es wurden mehrere 100 nm dicke Fe_{1-x}Gd_x-Schichten bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Über das oben beschriebene Programm wurde für jede Temperatur eine Hysteresekurve aufgenommen. Dazu wurde der Probenstisch mit Peltierelement und Thermoelement benutzt. Mit Hilfe von Wärmeleitpaste wurde die Probe thermisch mit dem Probenstisch verbunden.

Das Einstellen der Temperatur war etwas knifflig, da diese sich nur sehr schwer konstant halten ließ. Wir versuchten dies, so gut wie möglich. Die Temperaturangaben bei den Messungen sind der Mittelwert aus der Start- und Endtemperatur der Messung.

⁴Für eine Probe ist die Schichtdicke explizit Null. Die beiden Cobaltschichten verschmelzen also zu einer etwas dickeren Cobaltschicht.

Teil C

Auswertung

Alle Messwerte wurden am Computer mit einem Messprogramm aufgenommen und direkt gespeichert. Diese Werte wurden dem Programm GNUPLOT⁵ zur Graphenerstellung und zur linearen Regression übergeben.

Die meisten Messwerte mussten aufgrund der Ableseskalen (oder aus sonstigen Gründen) noch umgerechnet werden. Aufgrund des massiven Rechenaufwandes erledigten wir dies direkt am Computer entweder mit GNUPLOT oder mit einer Tabellenkalkulation. Unter GNUPLOT geschah dies mittels der Option „using“⁶.

8 Zur Fehlerrechnung

Für die Fehlerfortpflanzung von statistischen Fehlern wird im Allgemeinen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz (Formel 4 im Fehlerrechnungsskript⁷) benutzt. Für systematische Fehler müsste man, da die statistische Unabhängigkeit dieser Messabweichungen nicht gegeben ist, eine Größtfehlerabschätzung nach Formel 5 vornehmen. Da die Ergebnisse des Versuchs aber nur qualitative Aussagekraft besitzen, verzichteten wir auf Bestimmung der systematischen Fehler. Die statistischen Fehler wurden bei den Regressionen angegeben, um ein Gefühl für den Fehler zu erhalten.

9 Ferromagnetische Schichtsysteme

Wir nahmen für die Schichtsysteme mit den unterschiedlichen Schichtdicken jeweils die Magnetisierungskurven auf. Durch das verwendete Messfahren, das den polaren Kerr-Effekt ausnutzt, wird nur der Magnetisierungsbetrag in z-Richtung (also senkrecht zur Probe und in Richtung des äußeren Magnetfeldes) gemessen. Je nach Vorzugsrichtung der Magnetisierung auf Grund der Anisotropie erwarten wir unterschiedliche Magnetisierungskurven.

9.1 Pd/Co/Pd Schichtsystem

Für dieses Schichtsystem sollte man die beiden Spezialfälle von starker Anisotropie in z-Richtung („out of plane“ Magnetisierung) und starker Anisotropie senkrecht zur z-Richtung („in plane“ Magnetisierung) betrachten. Bei der „in plane“ Magnetisierung erhält man eine Magnetisierungskurve die keine Hysterese aufweist. Aufgrund der Anisotropie parallel zur Ebene kann es nämlich ohne äußeres Feld keine Restmagnetisierung in z-Richtung geben (und wird messen schließlich nur den Anteil in z-Richtung). Liegt jedoch eine „out of plane“ Magnetisierung vor, was aufgrund der starken Grenzflächenanisotropie zwischen Co und Pd auftreten kann, so erhält man eine Hysteresekurve, bei der die Koerzitivkraft praktische der dem Sättigungsfeld H_S entspricht. Dies lässt sich so erklären, dass die Magnetisierung wegen der starken Anisotropie in z-Richtung zunächst auch bei entgegengesetzten Feld in z-Richtung stehen bleibt und schließlich praktisch instantan umklappt.

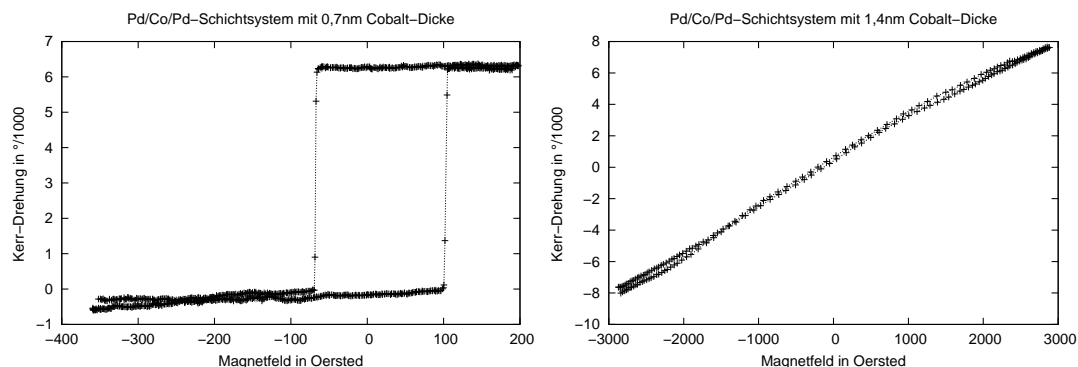
Deutliche Hysteresekurve waren für die Co-Schichtdicken 0,5nm, 0,7nm und 0,9nm zu erkennen. Für diese Schichtdicken scheint die Vorzugsrichtung der Magnetisierung also hauptsächlich senkrecht zur Probenoberfläche zu liegen. Bei den anderen Schichtdicken verlief die

⁵<http://www.gnuplot.info/>

⁶<http://www.gnuplot.info/docs/node133.html>

⁷<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/allgemeines/script-Fehleranalyse.pdf>

Magnetisierungskurve durch den Nullpunkt. Dies lässt für diese Systeme eine Vorzugsrichtung hauptsächlich parallel zur Oberfläche vermuten.
 vorwiegende „out of plane“ Magnetisierung vorwiegende „in plane“ Magnetisierung



Die restlichen aufgenommenen Magnetisierungskurven befinden sich im Anhang.

Aus den Magnetisierungskurven soll nun wie in der Vorbereitung beschrieben, die effektive Anisotropiekonstante K_{eff} bestimmt werden. In der Formel aus der Vorbereitung benötigt man dazu die Sättigungsmagnetisierung M_S . Da wir aber nur den Kerr-Winkel gemessen haben, der proportional zur Magnetisierung ist, kennen wir eigentlich nur deren qualitativen Verlauf. Die aus dem Kerr-Winkel berechnete Anisotropiekonstante entspricht daher nicht der üblicherweise verwendeten.

$$K_{\text{eff}} = -\frac{1}{2}\Phi_S \cdot (H_{\text{sat}} - H_C)$$

Leider lässt sich die Sättigungsfelder nicht für alle Schichtdicken bestimmen. Da wir nur ein begrenztes äußeres Magnetfeld anlegen konnten, wurde nicht für alle Schichtdicken die Sättigung überhaupt erreicht. Ein weiteres Problem ist, dass oft keine „eindeutige Sättigung“ erreicht wird. Gemeint ist damit, dass die Magnetisierungskurve zwar merklich abflacht, jedoch nicht einmal annähernd parallel zur x-Achse verläuft. Die Bestimmung der Sättigungsmagnetisierung wird daher sehr ungenau. Bei den Hysteresekurven erwies es sich als schwierig, die Koerzitivkraft zu bestimmen, da ihr Betrag nur geringfügig kleiner als der Betrag des Sättigungsfeldes H_S ist.

Für drei Schichtdicken könnte die Bestimmung dennoch durchgeführt werden:

- **d=0,5nm:**

$$H_S = 97,5 \text{ Oe}, \quad H_C = 94,5 \text{ Oe}, \quad \Phi_S = 2,2\text{mdeg}$$

$$\Rightarrow K_{\text{eff}} = -3,3 \text{ Oe} \cdot \text{mdeg}$$

- **d=0,7nm:**

$$H_S = 87,0 \text{ Oe}, \quad H_C = 85,3 \text{ Oe}, \quad \Phi_S = 3,2\text{mdeg}$$

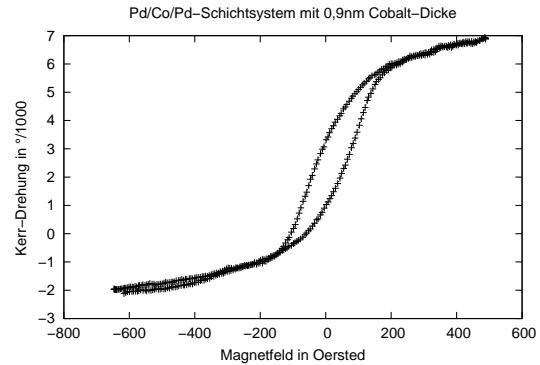
$$\Rightarrow K_{\text{eff}} = -2,9 \text{ Oe} \cdot \text{mdeg}$$

- **d=0,9nm:**

$$H_S = 198 \text{ Oe}, \quad H_C = 45 \text{ Oe}, \quad \Phi_S = 3,4\text{mdeg}$$

$$\Rightarrow K_{\text{eff}} = -260 \text{ Oe} \cdot \text{mdeg}$$

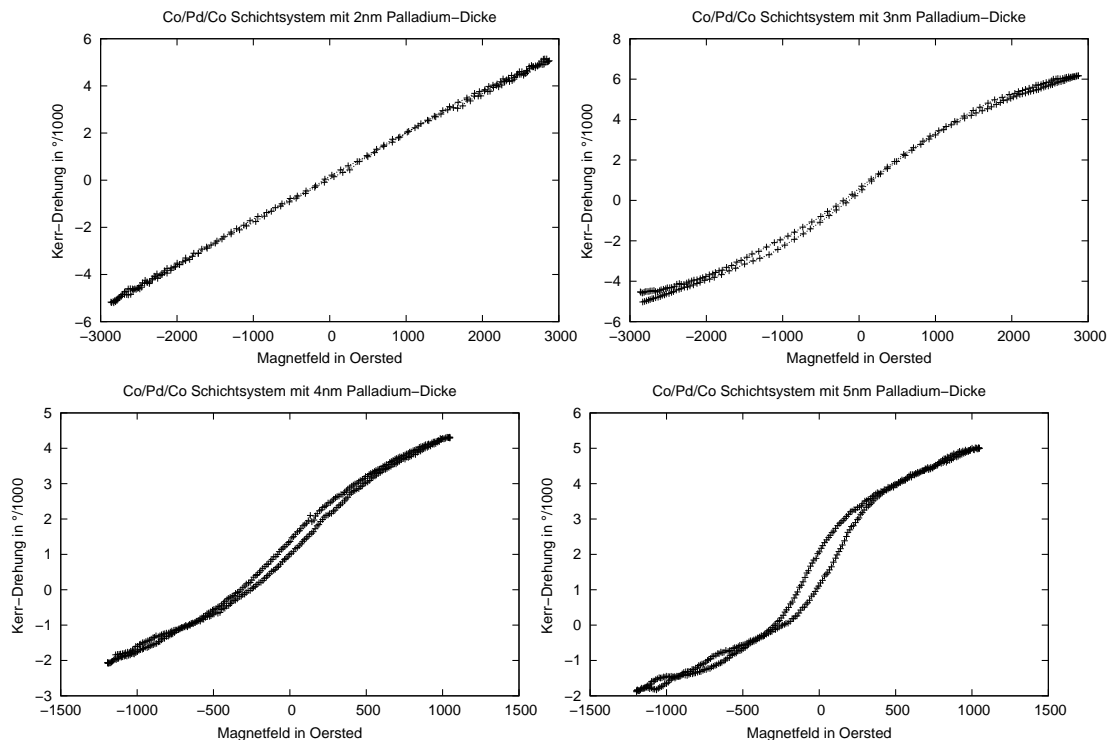
Gerade der letzte Wert für $d = 0,9\text{nm}$ ist vermutlich sehr ungenau, da keine eindeutige Sättigungsmagnetisierung abzulesen war.



9.2 Co/Pd/Co Schichtsystem

In diesem Schichtsystem sind die ferromagnetischen Co-Schichten durch eine antiferromagnetische Pd-Schicht mit variabler Dicke getrennt. Die Pd-Schicht wirkt dabei entkoppelnd. Bei einer Schichtdicke $d = 0\text{nm}$ liegt eine dicke Co-Schicht vor. Untersuchen wir diese mit unserem Messverfahren, so erhält man als Magnetisierungskurve keine Hysteresekurve. Dies liegt daran, dass wir durch den polaren Kerr-Effekt nur die Magnetisierung senkrecht zur Oberfläche messen. Für eine reine Cobalt-Schicht liegt jedoch eine „in plane“ Magnetisierung vor.

Mit zunehmender Schichtdicke des Pd gewinnt die Grenzflächenanisotropie an Bedeutung. Durch sie entsteht eine Vorzugsrichtung der Magnetisierung senkrecht zur Oberfläche. Daher sind ab einer Schichtdicke von $d = 4\text{nm}$ eindeutige Hysteresekurven zu erkennen.

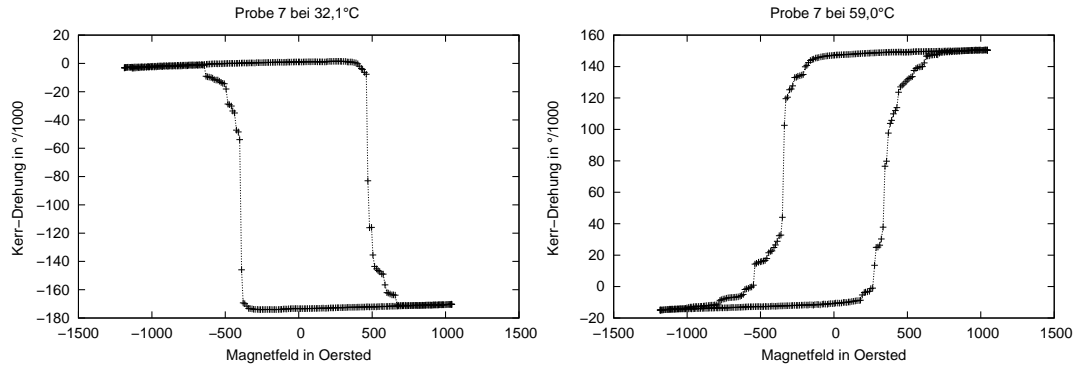


10 Ferrimagnetische Schichten

Im Versuch wurden die Hysteresekurven der Proben für verschiedene Temperaturen aufgenommen. Aus diesen Hysteresekurven wurde jeweils die Koerzitivkraft abgelesen. Um T_{komp}

zu berechnen, macht man sich zu nutze, dass die Koerzitivkraft bei dieser Temperatur unendlich ist. D.h. man trägt den Kehrwert der Koerzitivkraft über der Temperatur auf und bestimmt aus der Nullstelle T_{komp} .

Wegen des unterschiedlichen Temperaturverhaltens von Eisen und Gadolinium (vgl. 5.1), kann man bereits an der Lage der Hysteresekurve erkennen, ob die Temperatur überhalb und unterhalb von T_{komp} liegt. Darüber erhält man eine „normale“ Hysteresekurve, während man unterhalb T_{komp} eine „kopfstehende“ Hysteresekurve erhält⁸. Dies sieht man beispielsweise sehr schön bei Probe 7:



Auf die Gd-Konzentration der $\text{Fe}_{1-x}\text{Gd}_x$ -Legierung kann man über die in der Vorbereitung angegebenen Formel schließen:

$$x = \left(0,01783 \cdot \frac{T_{\text{komp}}}{\text{K}} + 21 \right) \%$$

Gemäß der Angabe der Vorbereitungsmappe, dass x zwischen 0,26 und 0,27 liegt, erwarten wir Kompensationstemperaturen von 7°C bis 64°C.

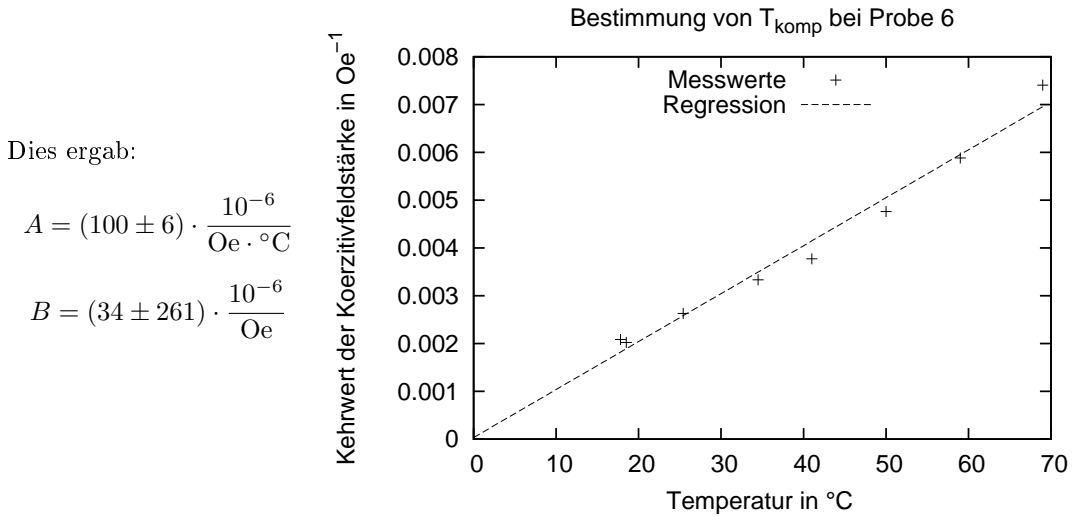
10.1 Probe 6

Für Probe 6 maßen wir nur Werte überhalb von T_{Komp} . Aus den Schaubilder erhält man nebenstehende Koerzitivfeldstärken.

Temperatur in °C	Koerzitivfeldstärke in Oersted
17,8	480
18,5	495
25,4	380
34,5	300
41,0	265
50,0	210
59,0	170
69,0	135

⁸Hier zeigen das angelegte Magnetfeld und die für den Kerr-Effekt wichtige Eisenmagnetisierung in gegensätzliche Richtung.

Zur Bestimmung von T_{Komp} wurden die Kehrwerte der Koerzitivfeldstärken aufgetragen und eine lineare Regression $1/H_C = A \cdot T + B$ durchgeführt.



Die Kompensationstemperatur erhält man aus der Nullstelle über

$$T_{\text{Komp}} = -\frac{B}{A} = (0,3 \pm 2,6) ^\circ\text{C} = (273,5 \pm 2,6) \text{K}$$

Der Fehler ergibt sich über eine Gaußsche Fehlerfortplattung. Nach obiger Formel ergibt sich damit eine Konzentration x von:

$$x = (25,9 \pm 0,05) \%$$

10.2 Probe 7

Für Probe 7 konnten wir sowohl Werte überhalb wie auch unterhalb von T_{Komp} messen. Wie oben beschrieben, kann man dies aus der Orientierung der Hysteresekurve ablesen. Es ergaben sich nebenstehenden nebenstehende Koerzitivfeldstärken.

Temperatur in °C	Koerzitivfeldstärke in Oersted
18,0	240
20,5	265
26,8	345
32,1	435
38,0	615
41,7	900
46,0	1460

unterhalb T_{Komp}

Temperatur in °C	Koerzitivfeldstärke in Oersted
55,0	480
59,5	345
64,5	345
70,0	235

überhalb T_{Komp}

Die lineare Regression $1/H_C = A \cdot T + B$ wurde diesmal getrennt für die Werte überhalb (>) bzw. unterhalb (<) von T_{Komp} durchgeführt.

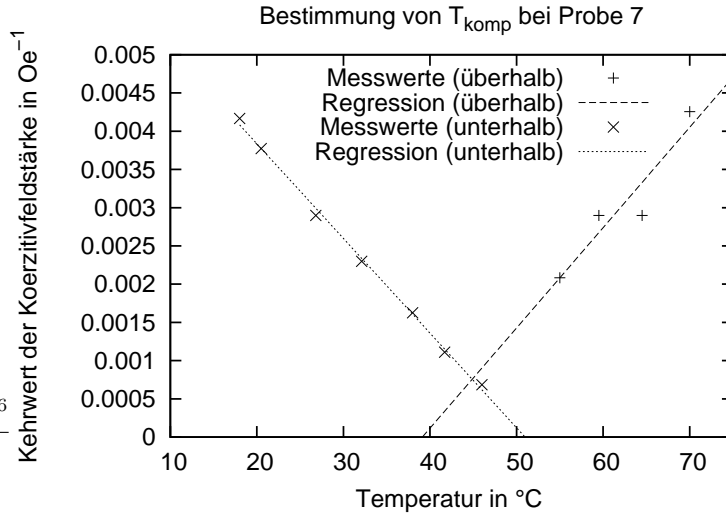
Die beiden Regressionen ergaben:

$$A_{<} = (-123 \pm 3) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{Oe} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$B_{<} = (6310 \pm 89) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{Oe}}$$

$$A_{>} = (131 \pm 33) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{Oe} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$B_{>} = (-5130 \pm 2080) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{Oe}}$$



Aus den beiden Nullstellen erhält man zwei Kompensationstemperaturen:

$$T_{\text{Komp},<} = -\frac{B_{<}}{A_{<}} = (51,3 \pm 1,3) ^\circ\text{C} = (324,5 \pm 1,3) \text{K}$$

$$T_{\text{Komp},>} = -\frac{B_{>}}{A_{>}} = (39,2 \pm 18,8) ^\circ\text{C} = (312,4 \pm 18,8) \text{K}$$

Da die Fehler deutlich voneinander abweichen, macht es keinen Sinn, einen Mittelwert aus beiden Werten zu bilden. Da $T_{\text{Komp},<}$ auch noch in den Fehlergrenzen von $T_{\text{Komp},>}$ liegt, liegt es nahe im folgenden nur noch mit $T_{\text{Komp},<}$ weiterzurechnen. Außerdem kann der Wert von $T_{\text{Komp},>}$ gar nicht richtig sein, da aufgrund der Orientierung der Hysteresekurve T_{Komp} zwischen 46°C und 55°C liegen muss. Als Konzentration ergibt sich dann:

$$x = (26,8 \pm 0,02) \%$$

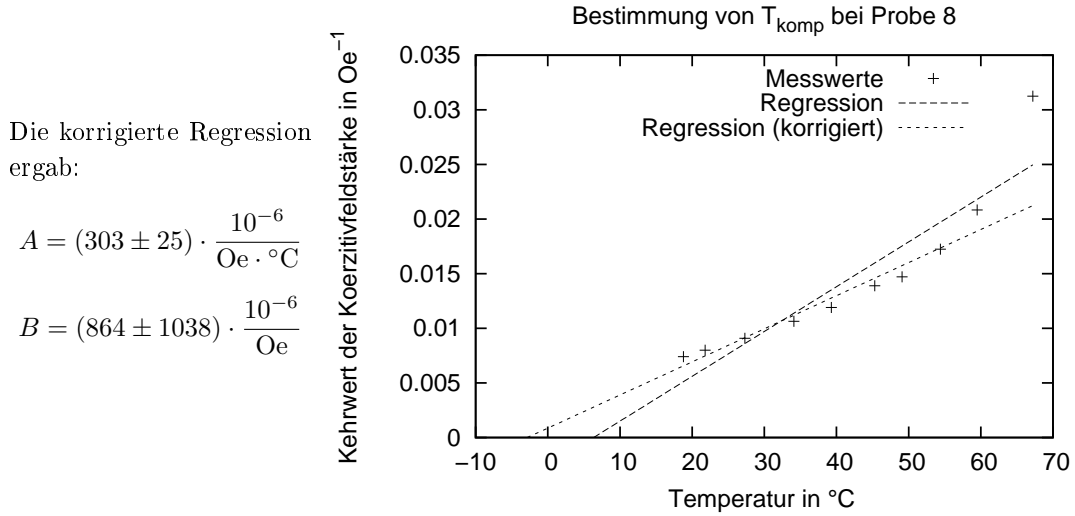
10.3 Probe 8

Für Probe 8 maßen wir (wie auch bei Probe 6) nur Werte überhalb von T_{Komp} . Aus den Schaubilder erhält man nebenstehende Koerzitivfeldstärken.

Temperatur in $^\circ\text{C}$	Koerzitivfeldstärke in Oersted
18,8	135
21,8	125
27,3	110
34,1	94
39,3	84
45,3	72
49,1	68
54,4	58
59,5	48
67,2	32

Zur Bestimmung von T_{Komp} wurden erneut die Kehrwerte der Koerzitivfeldstärken aufgetragen. Wie man aber dem Schaubild entnehmen kann, liegt der Messwert bei $T = 67^\circ\text{C}$ deutlich neben der Regressionsgeraden. Aus diesem Grund wurde eine korrigierte Regression

ohne diesen Wert durchgeführt.



Dies ergibt eine Kompensationstemperatur von:

$$T_{\text{Komp}} = -\frac{B}{A} = (-2,9 \pm 3,4) ^\circ\text{C} = (270,3 \pm 3,4) \text{ K}$$

Hier ergibt sich damit eine Konzentration x von:

$$x = (25,8 \pm 0,06) \%$$

10.4 Probe 9

Ebenso wie für Probe 7 konnten wir Werte überhalb und unterhalb von T_{Komp} messen.

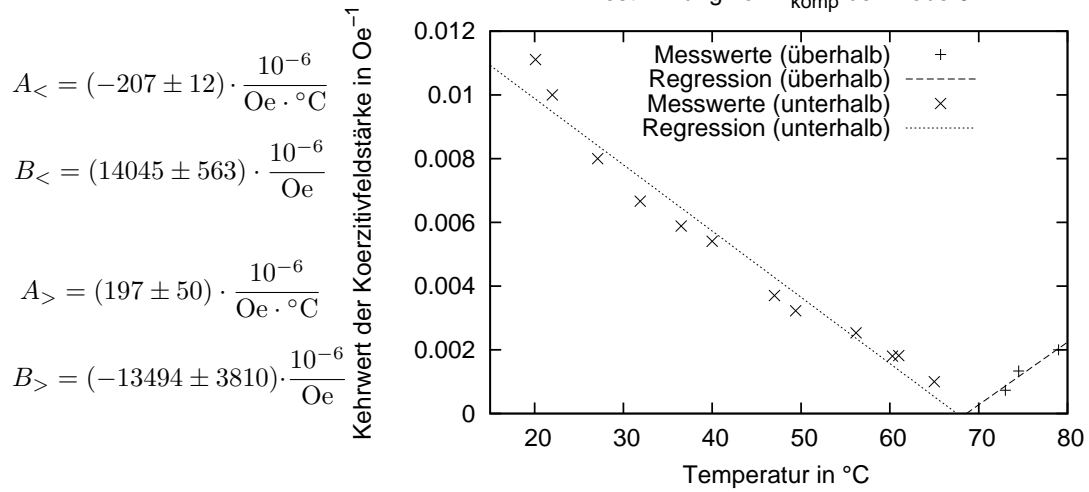
Temperatur in $^\circ\text{C}$	Koerzitivfeldstärke in Oersted
73,0	1365
74,5	750
79,0	500

überhalb T_{Komp}

Temperatur in $^\circ\text{C}$	Koerzitivfeldstärke in Oersted
20,1	90
22,0	100
27,1	125
31,9	150
36,5	170
40,0	185
47,0	270
49,4	310
56,2	395
60,3	555
61,0	550
65,0	1000

unterhalb T_{Komp}

Die beiden obligatorischen Regressionen ergaben:



Aus den beiden Nullstellen erhält man die beiden Kompensationstemperaturen:

$$T_{\text{Komp},<} = -\frac{B_{<}}{A_{<}} = (67,9 \pm 4,9) ^\circ\text{C} = (341,1 \pm 4,9) \text{K}$$

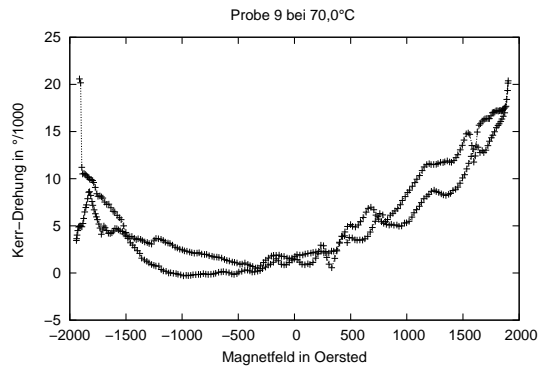
$$T_{\text{Komp},>} = -\frac{B_{>}}{A_{>}} = (68,5 \pm 26,1) ^\circ\text{C} = (341,6 \pm 26,1) \text{K}$$

Wieder bestätigt die Messung überhalb das Ergebnis, das aus den Werten unterhalb berechnet wurde. Da $T_{\text{Komp},>}$ sonst kaum zu gebrauchen ist, wird wieder mit $T_{\text{Komp},<}$ weitergerechnet. Mit dessen Wert ergibt sich eine Konzentration x von:

$$x = (27,1 \pm 0,08) \%$$

10.5 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich sagen, dass eine Messung um den Kompensationspunkt herum extrem schwierig ist, da durch leichte Temperaturveränderung das Verhalten sich stark ändern kann. In diesem Temperaturbereich ist meist gar keine Hystereskurve erkennbar. Als Beispiel diene die rechts stehende Messung von Probe 9 bei 70°C.



Betrachtet man die Sättigungsmagnetisierung der vier Proben, so lässt sich keine offensichtliche Korrelation zwischen Konzentration und Sättigung feststellen. In der folgenden Tabelle sind die Sättigungsmagnetisierungen zusammengefasst und zwar sowohl bei einer festen Temperatur $\approx 20^\circ\text{C}$, wie auch abhängig von der Probe $\approx 15^\circ\text{C}$ überhalb der jeweiligen Kompensationstemperatur.

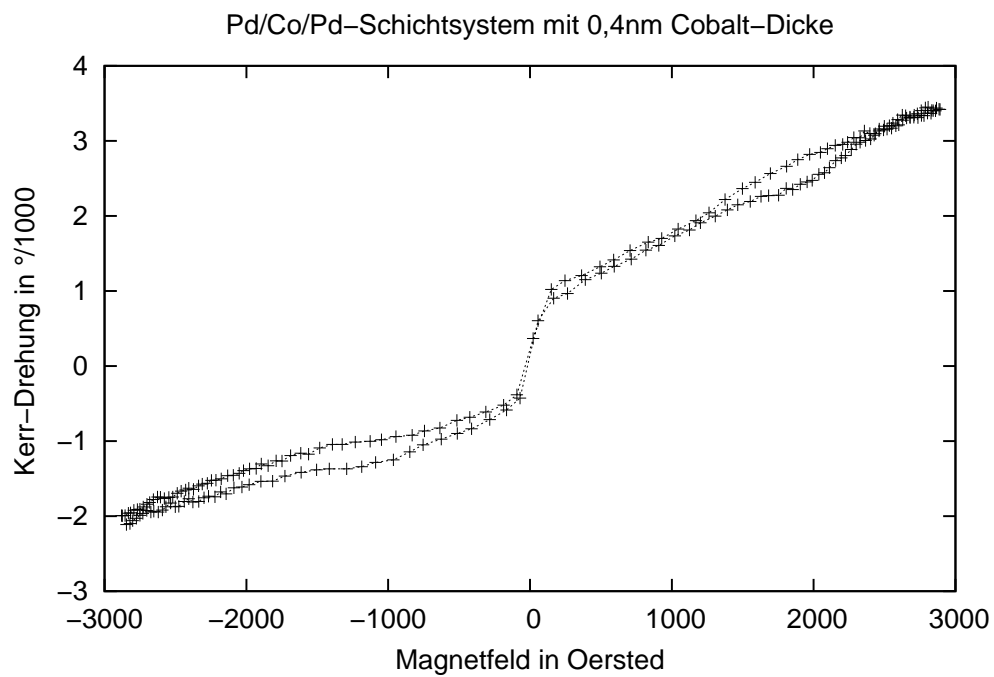
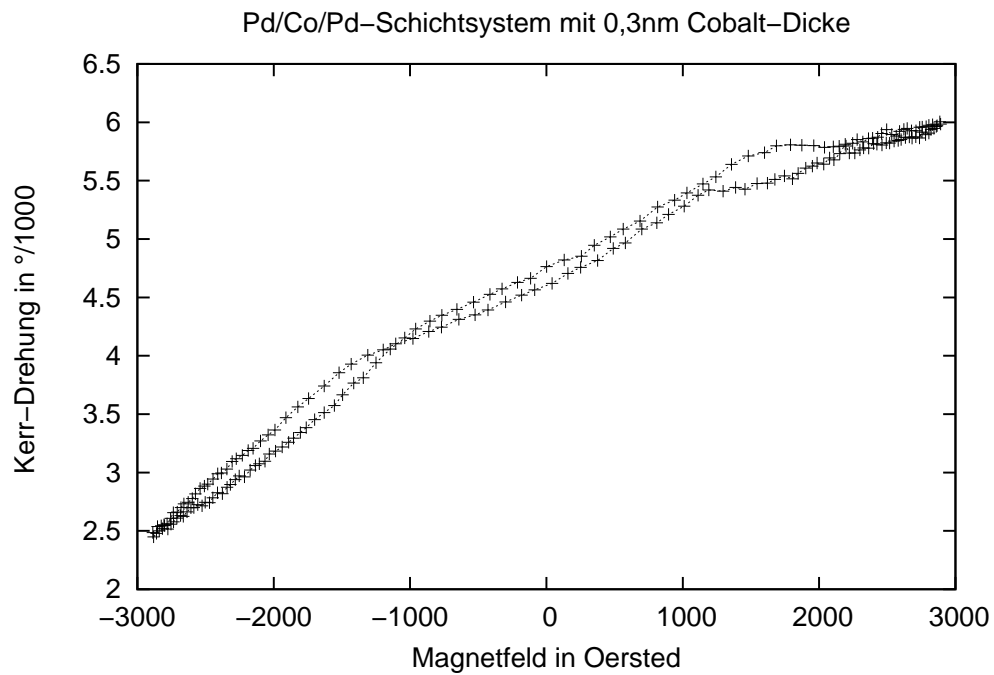
	T_{Komp} in $^\circ\text{C}$	Gd-Konzentration in %	Sättigung ⁹ in $^\circ/1000$	Sättigung in $^\circ/1000$
Probe 6	0,3	25,9	176 (bei 17,8°C)	176 (bei 17,8°C)
Probe 7	51,3	26,8	166 (bei 70°C)	179 (bei 18°C)
Probe 8	-2,9	25,8	170 (bei 18,8°C)	170 (bei 18,8°C)
Probe 9	67,9	27,1	147 (bei 79,0°C)	155 (bei 20,1°C)

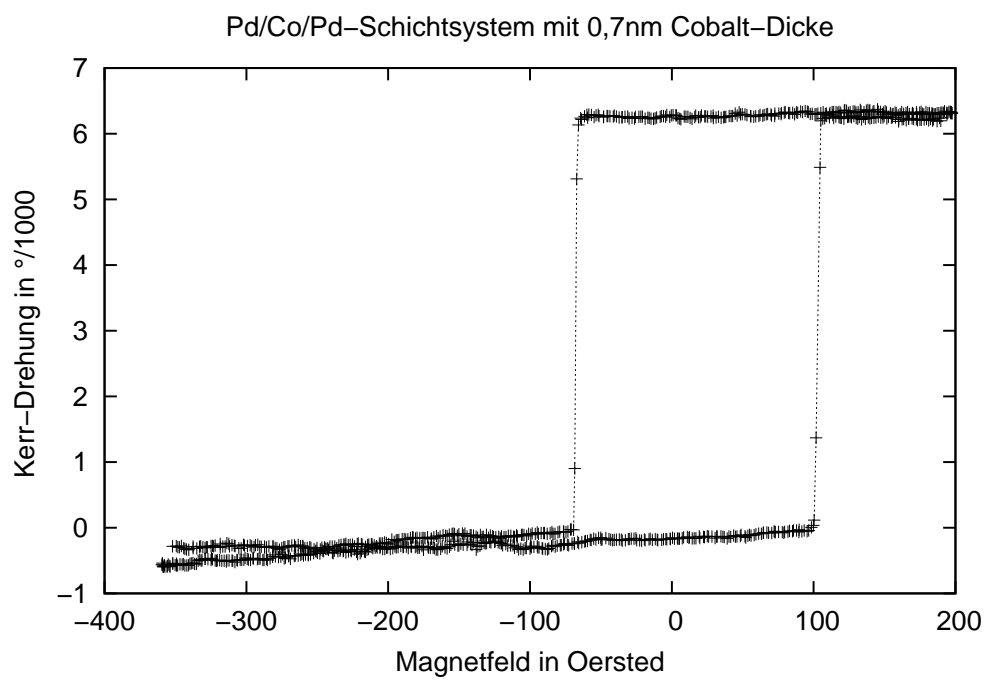
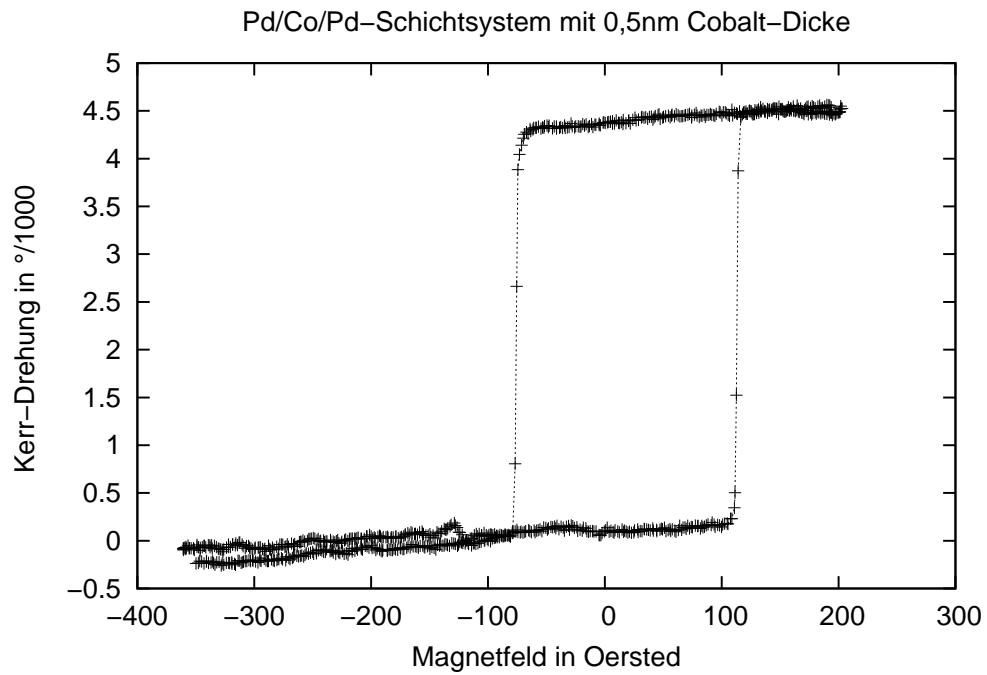
⁹Gemessen wurde Spitze zu Spitze; Es handelt sich also um die doppelte Sättigung.

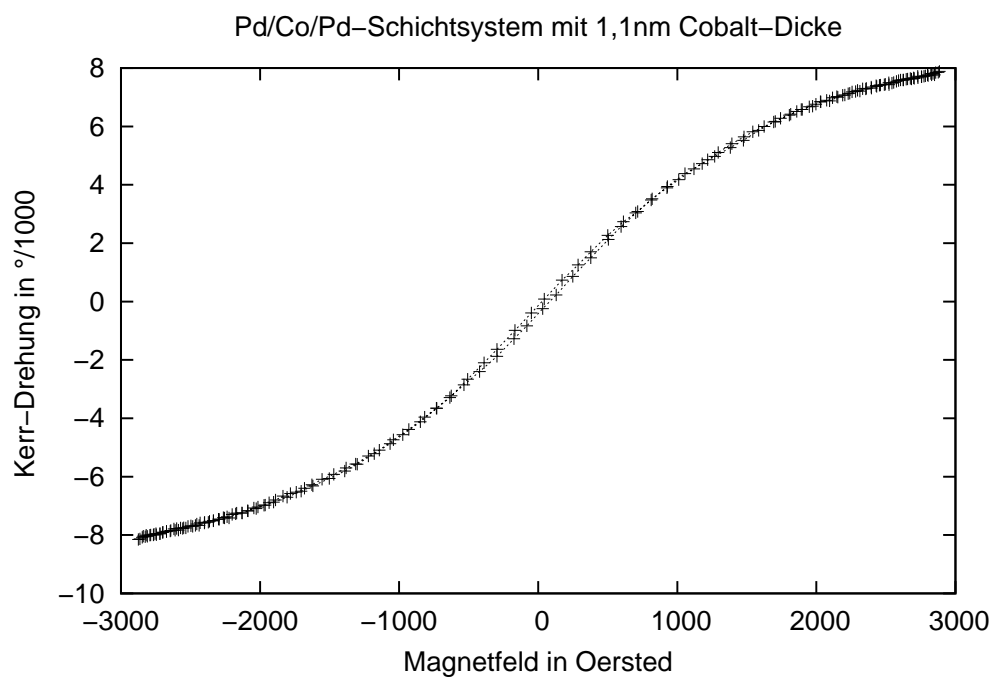
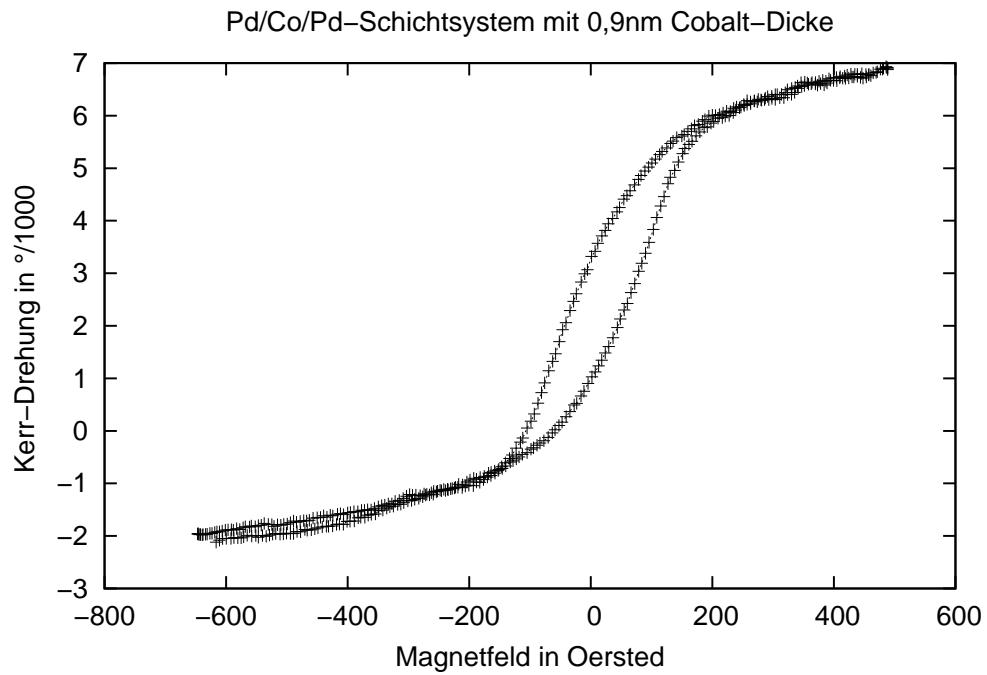
Teil D

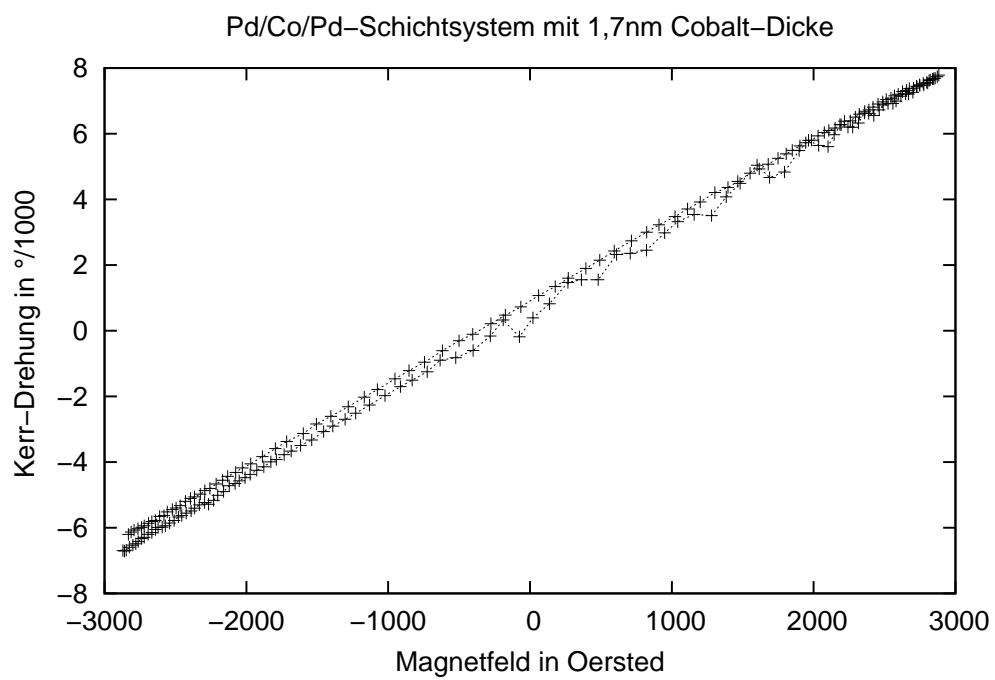
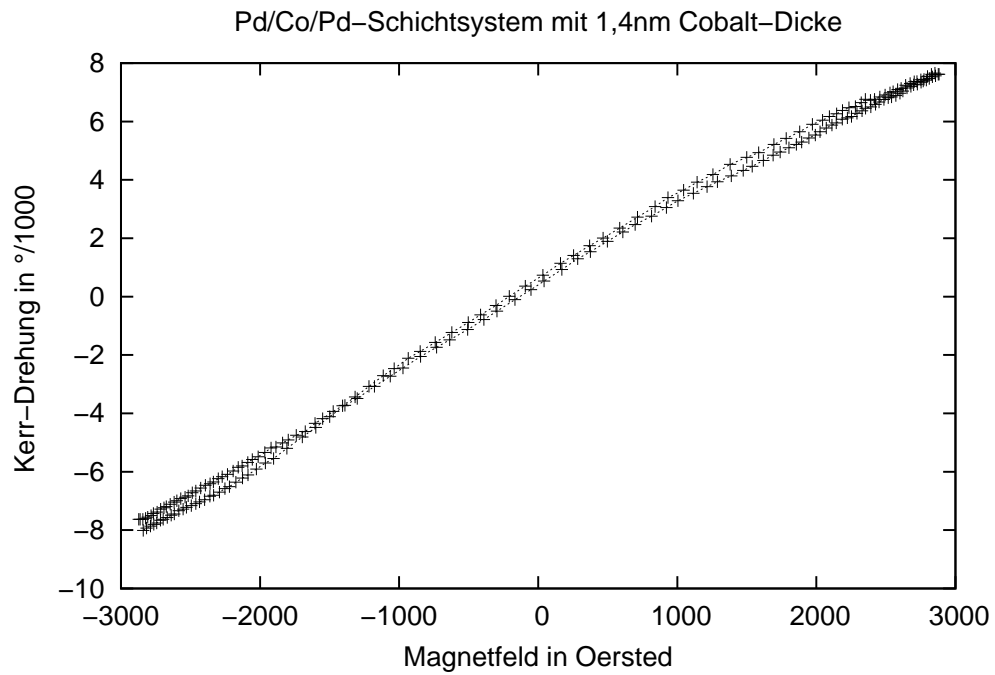
Anhang: Schaubilder

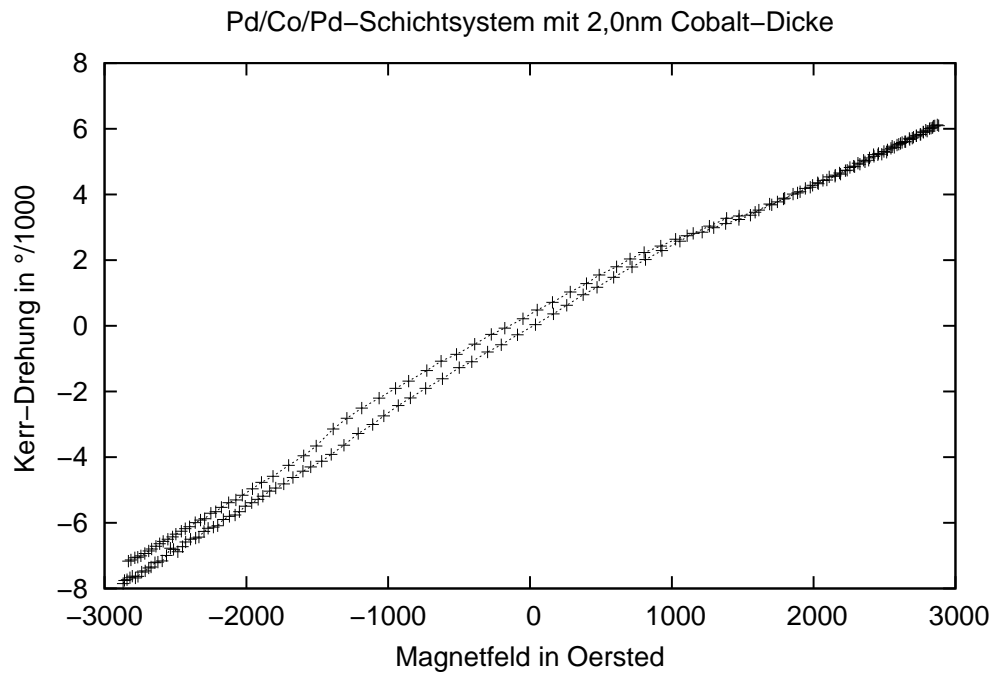
11 Pd/Co/Pd-Schichtsystem



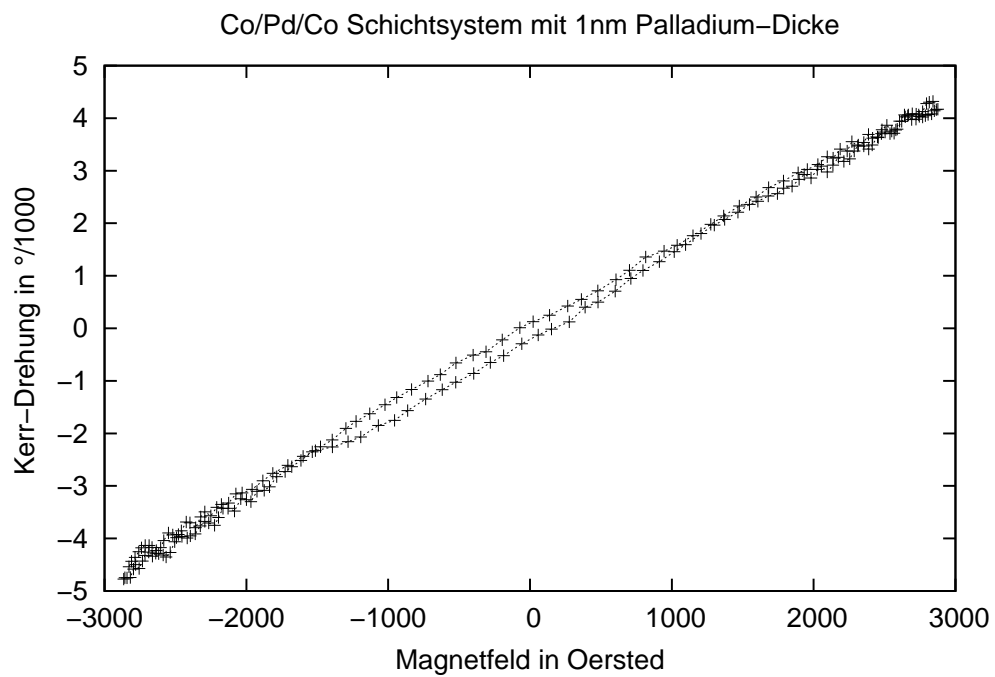
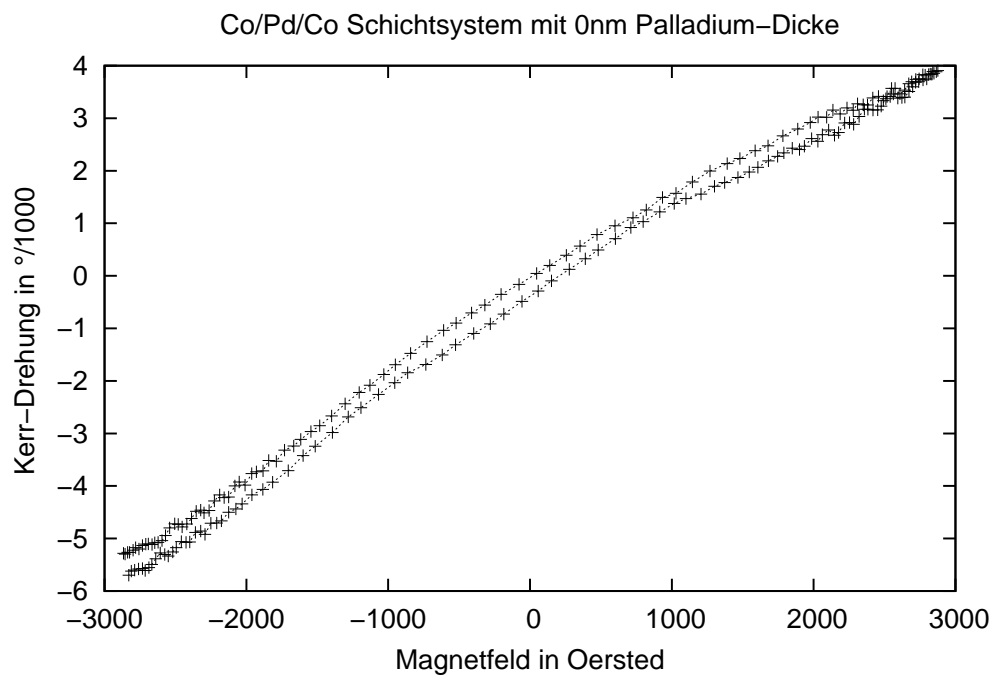


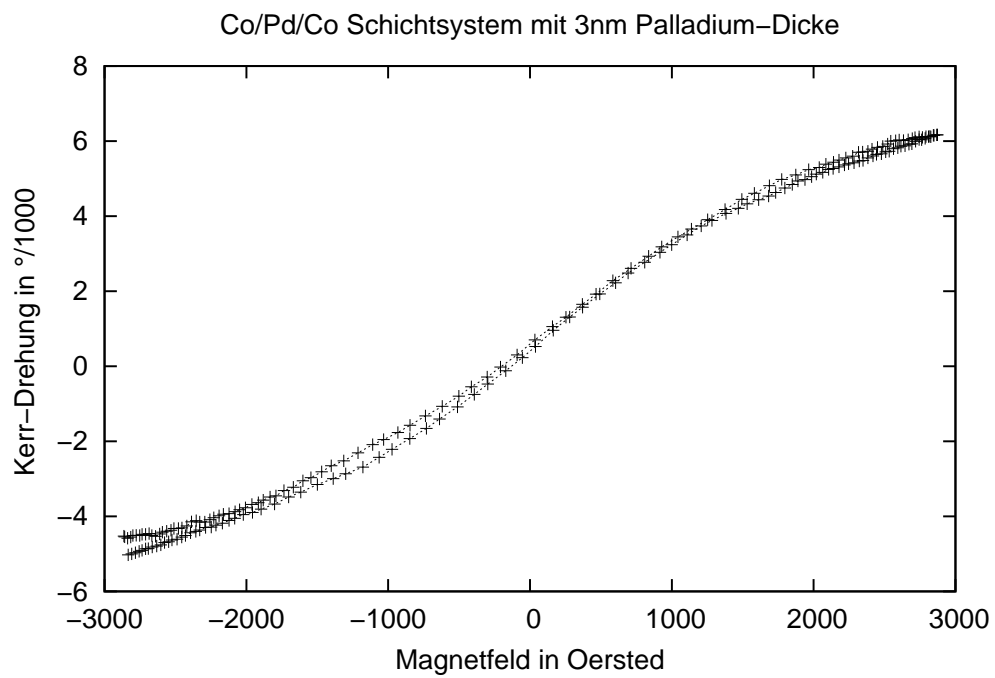
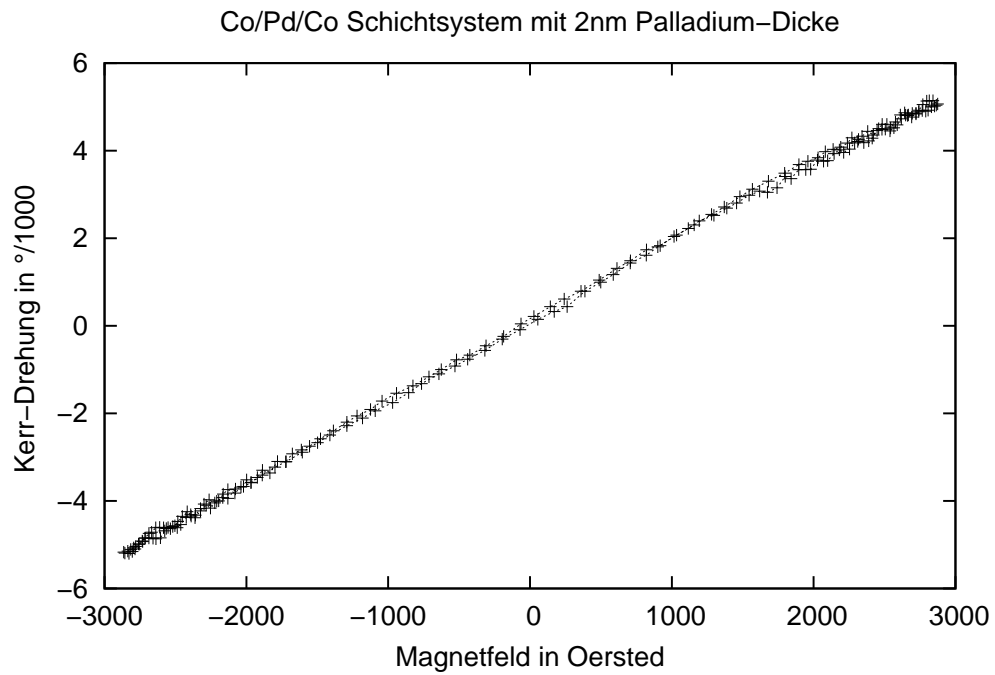


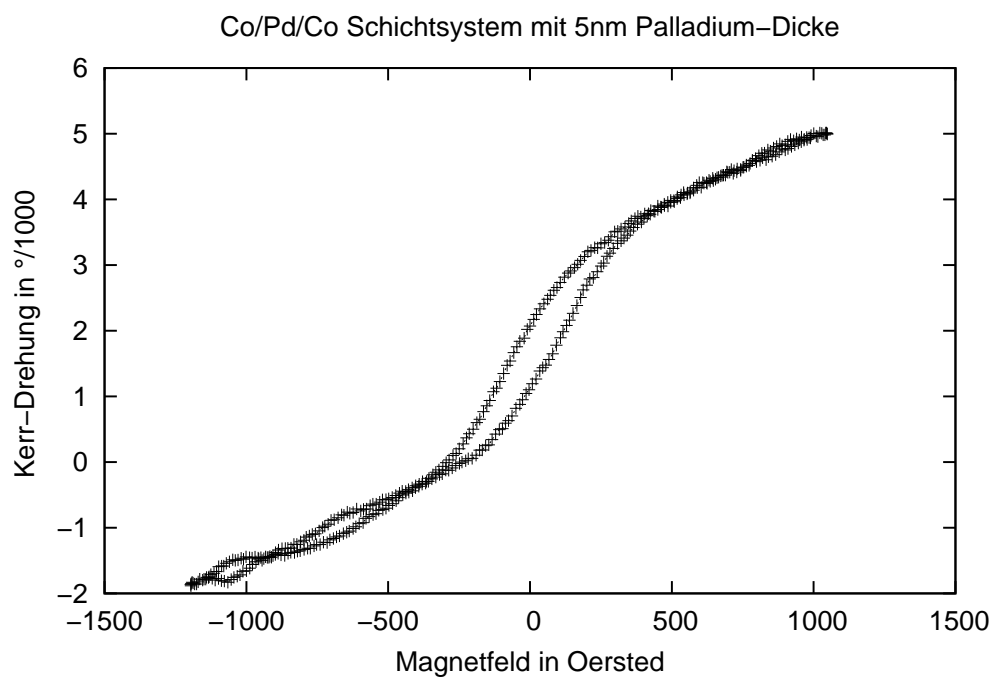
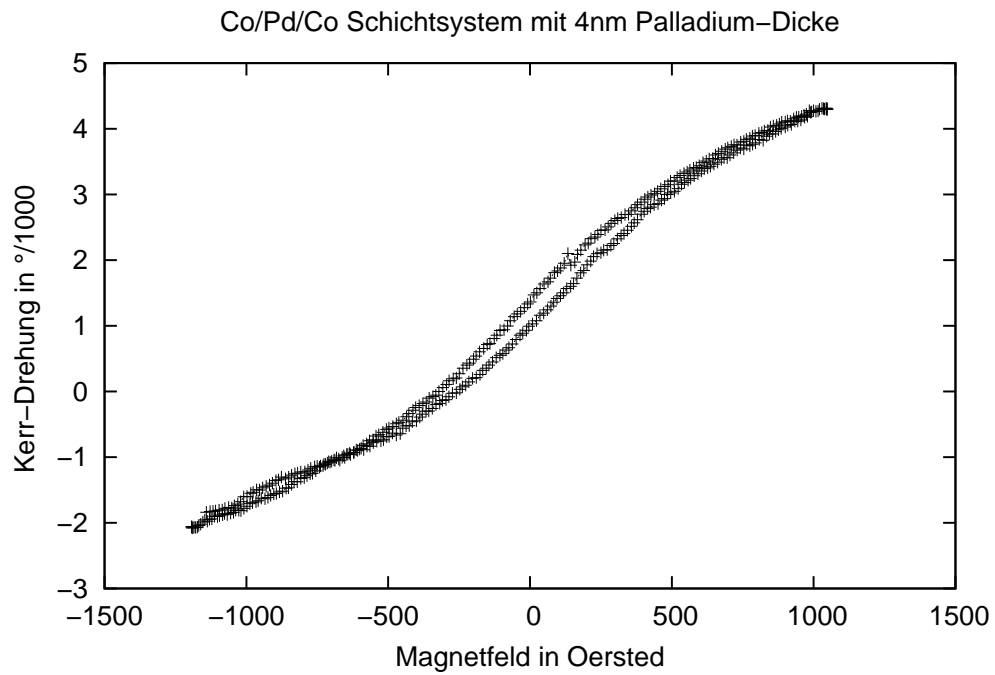




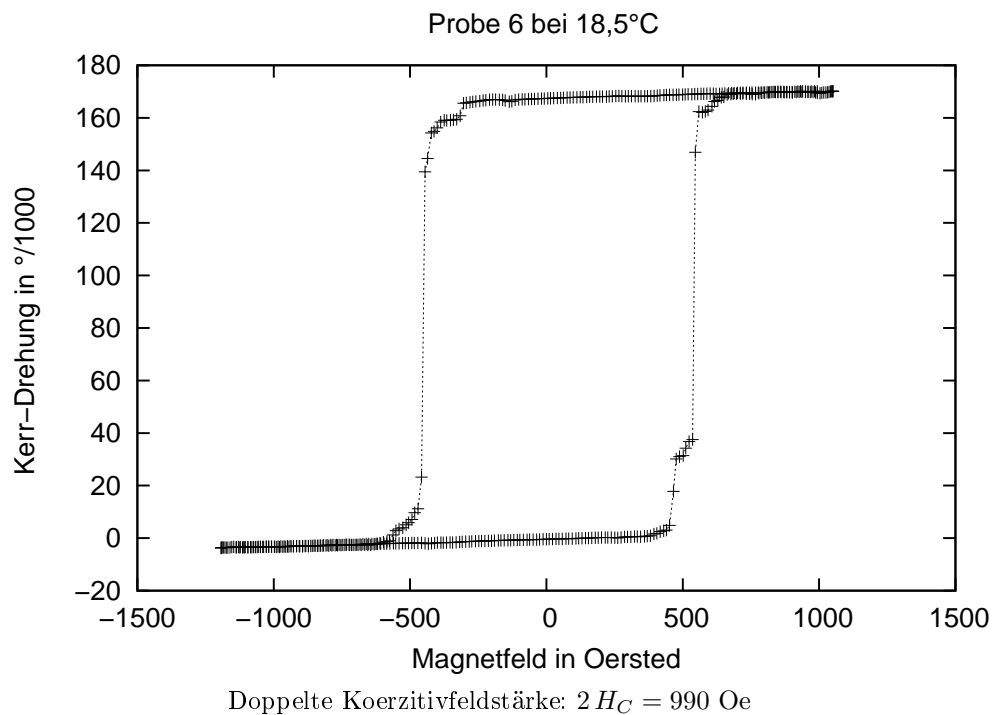
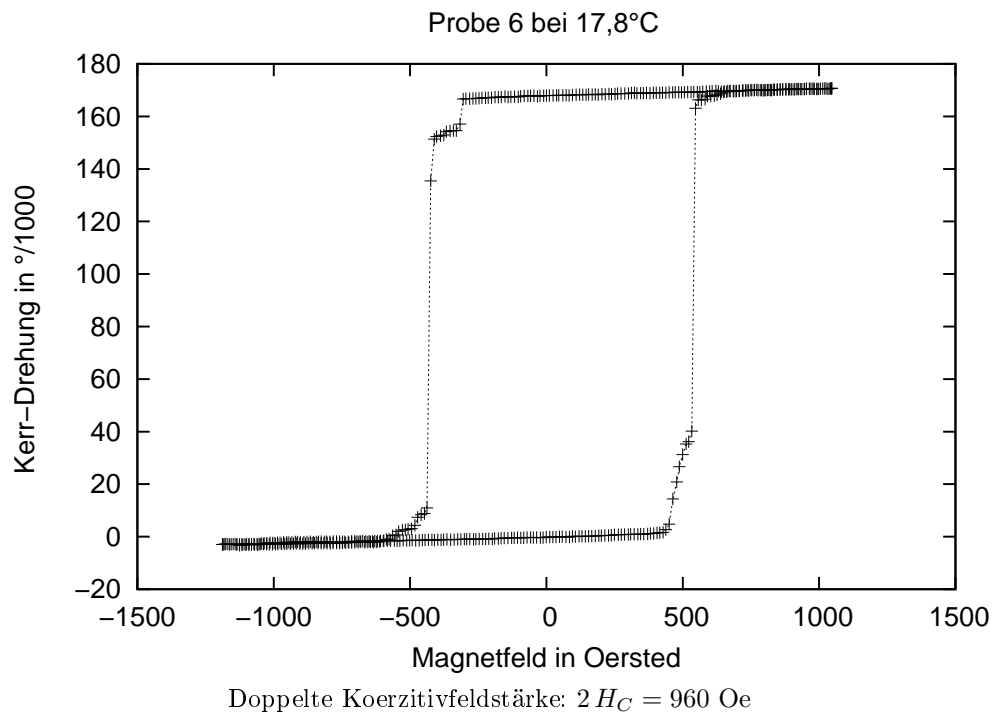
12 Co/Pd/Co-Schichtsystem

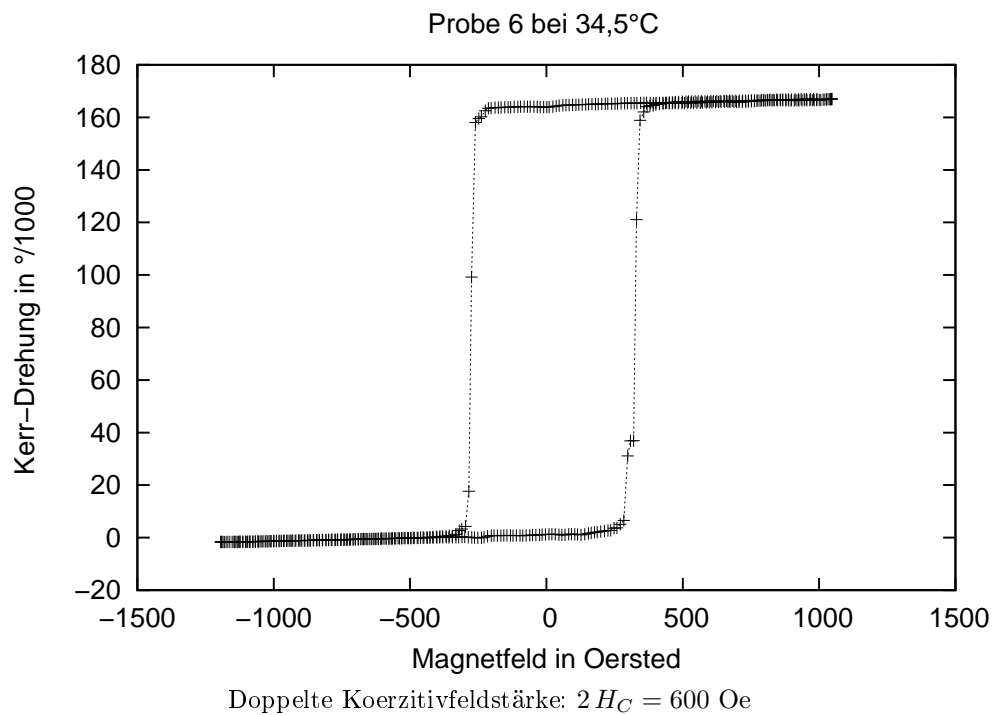
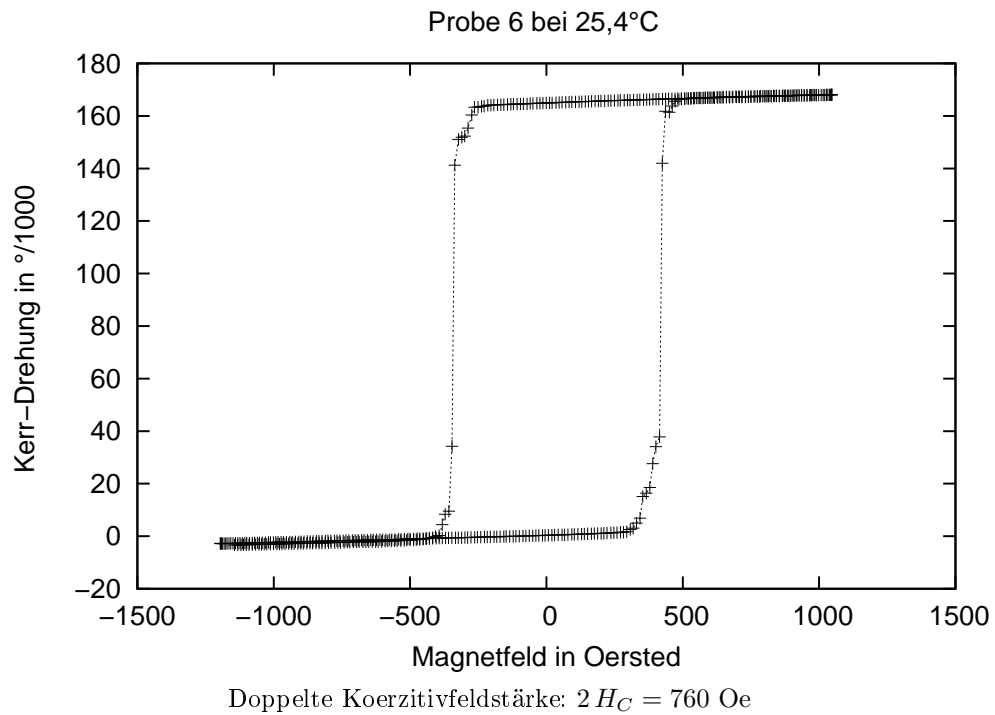


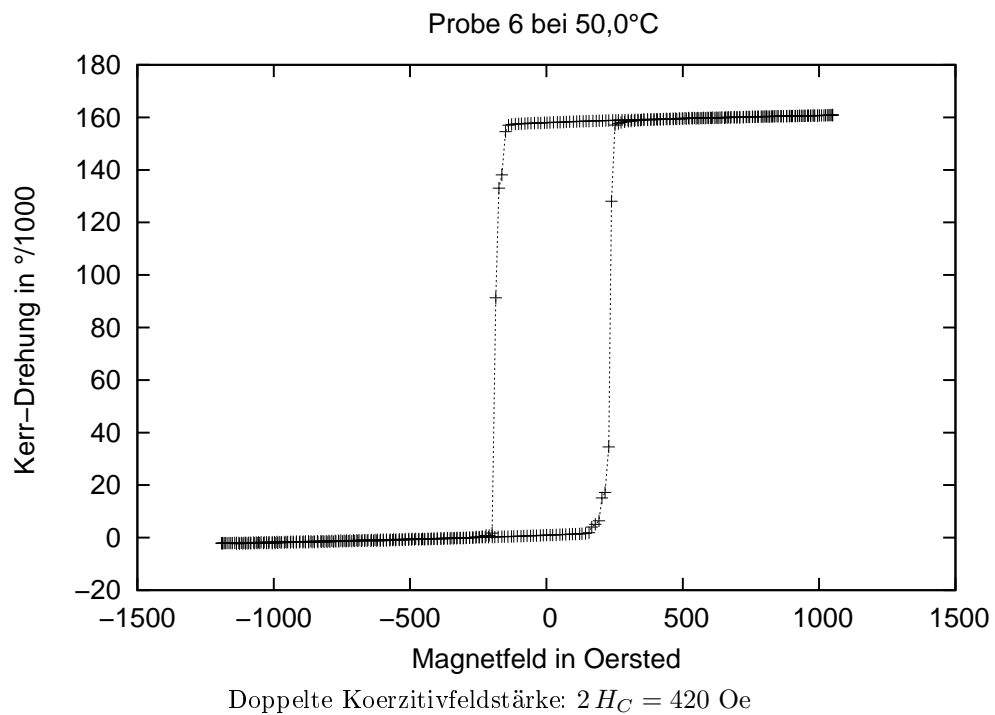
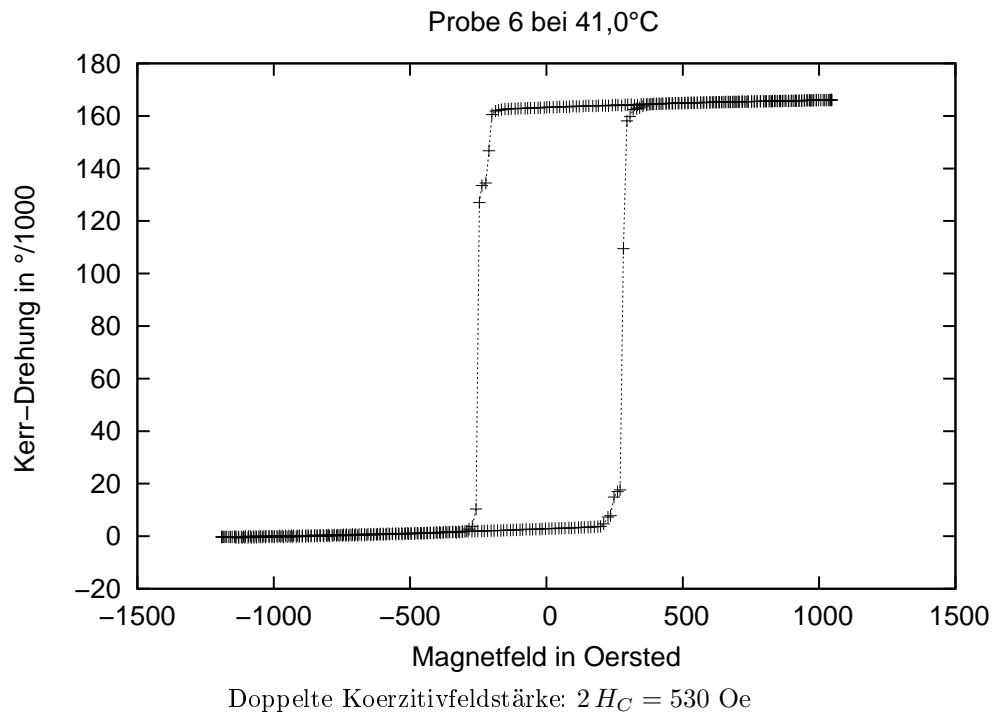


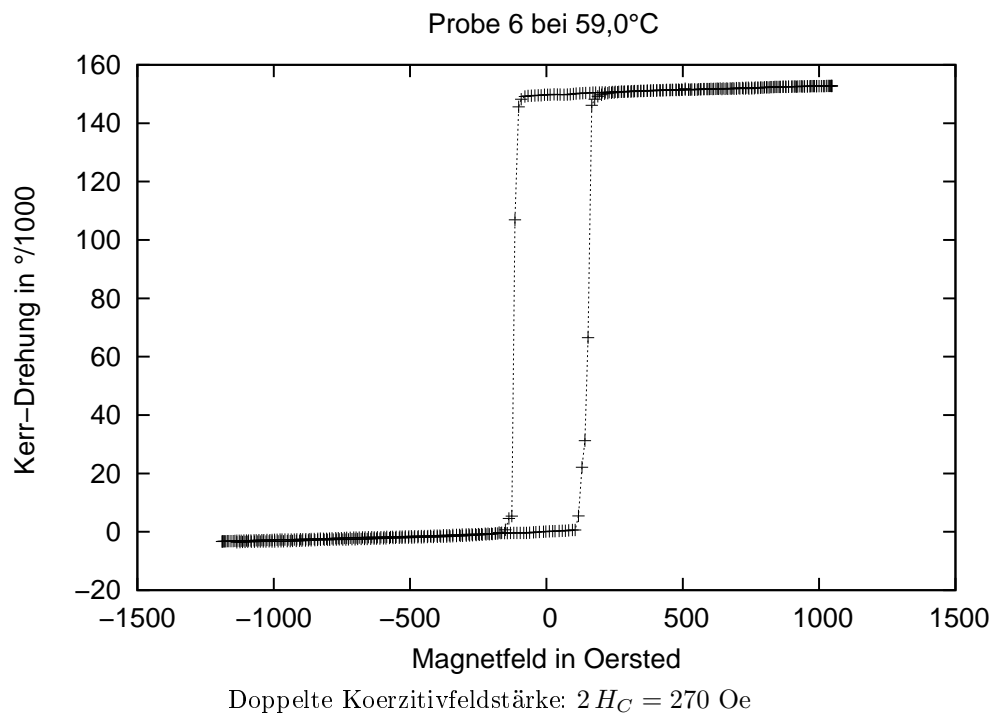
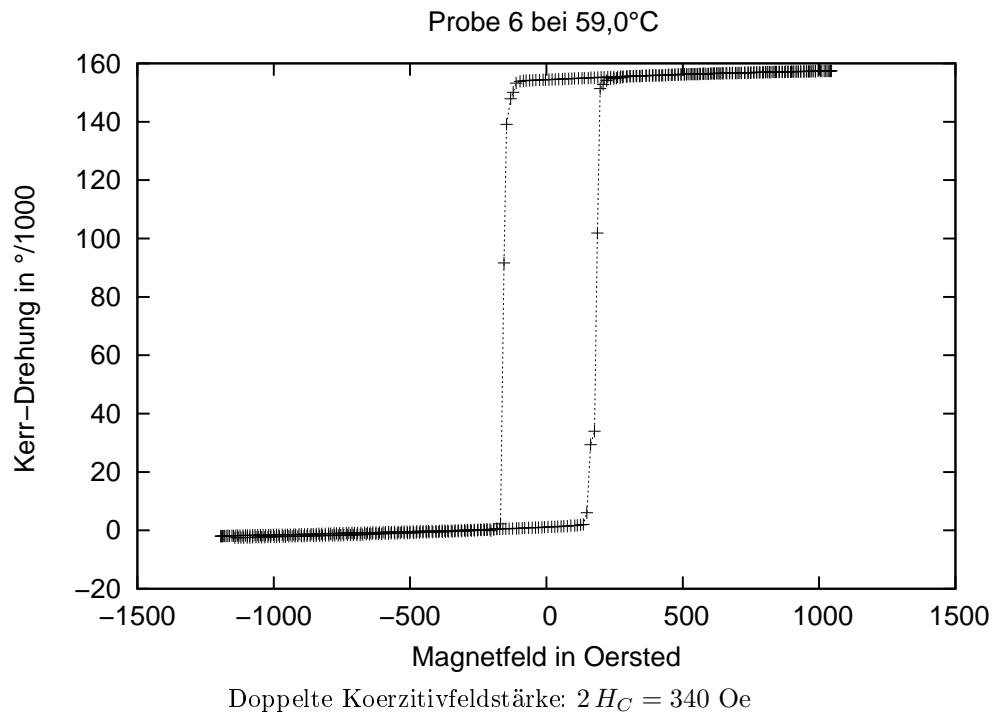


13 Probe 6

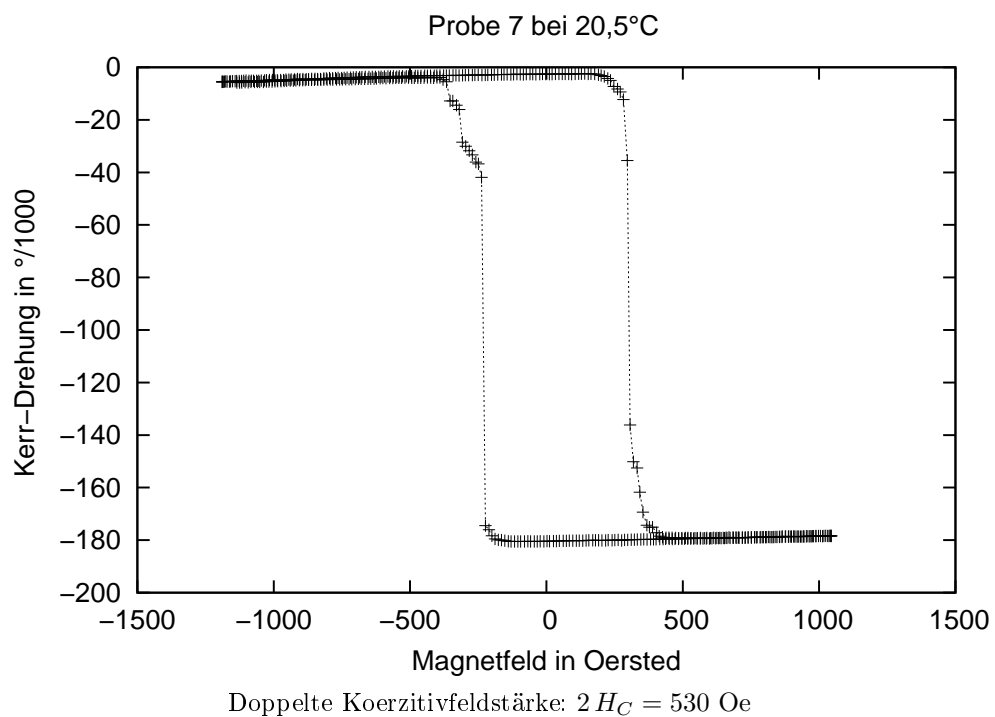
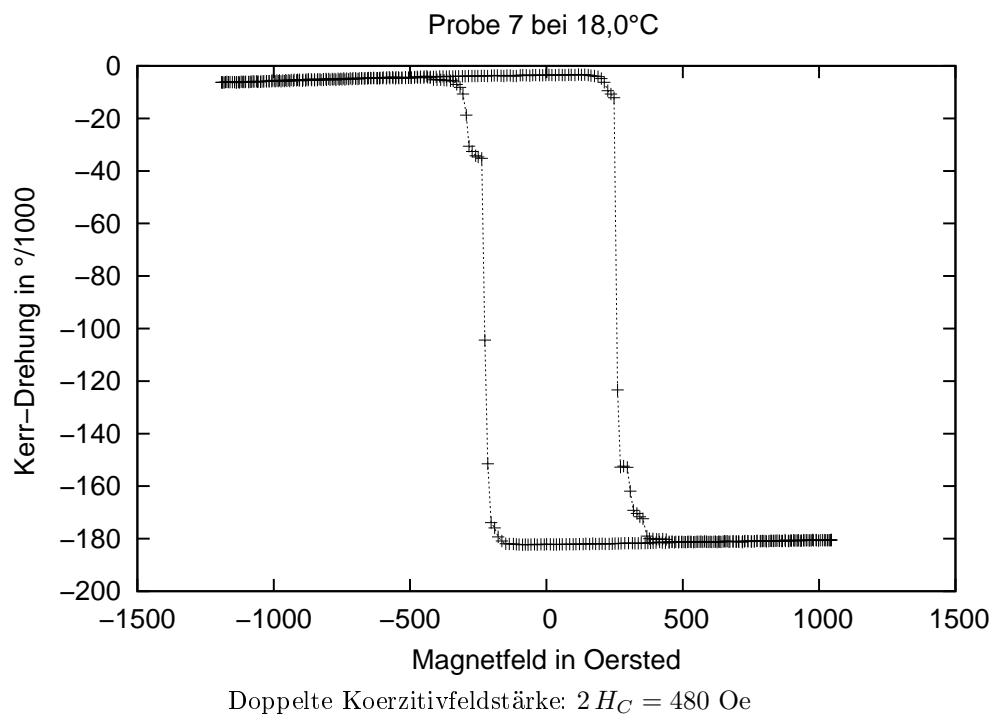


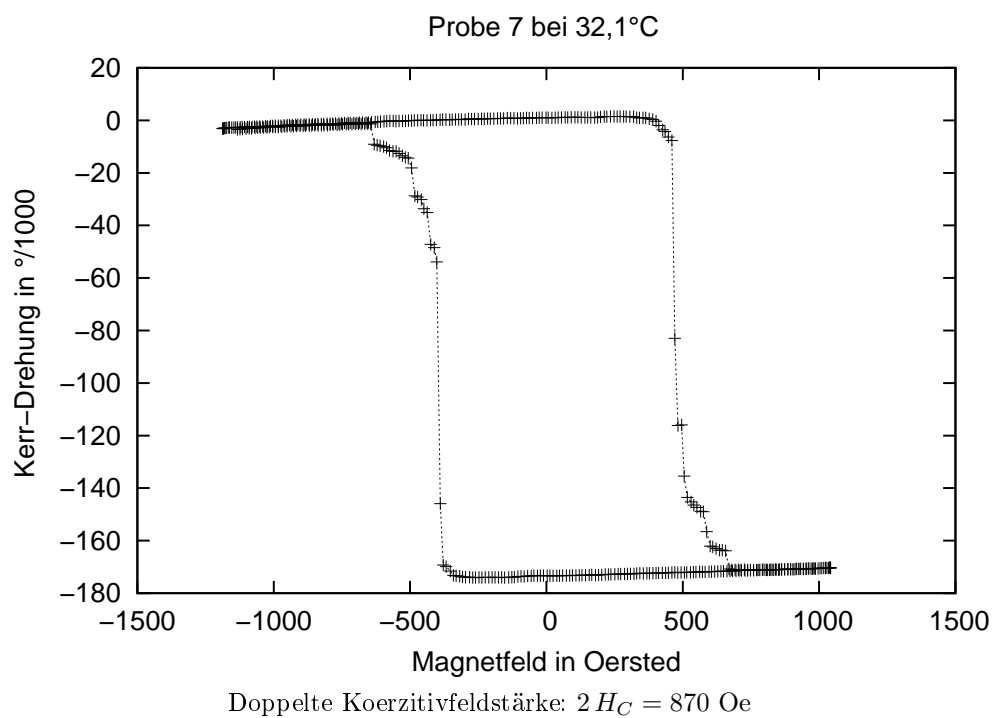
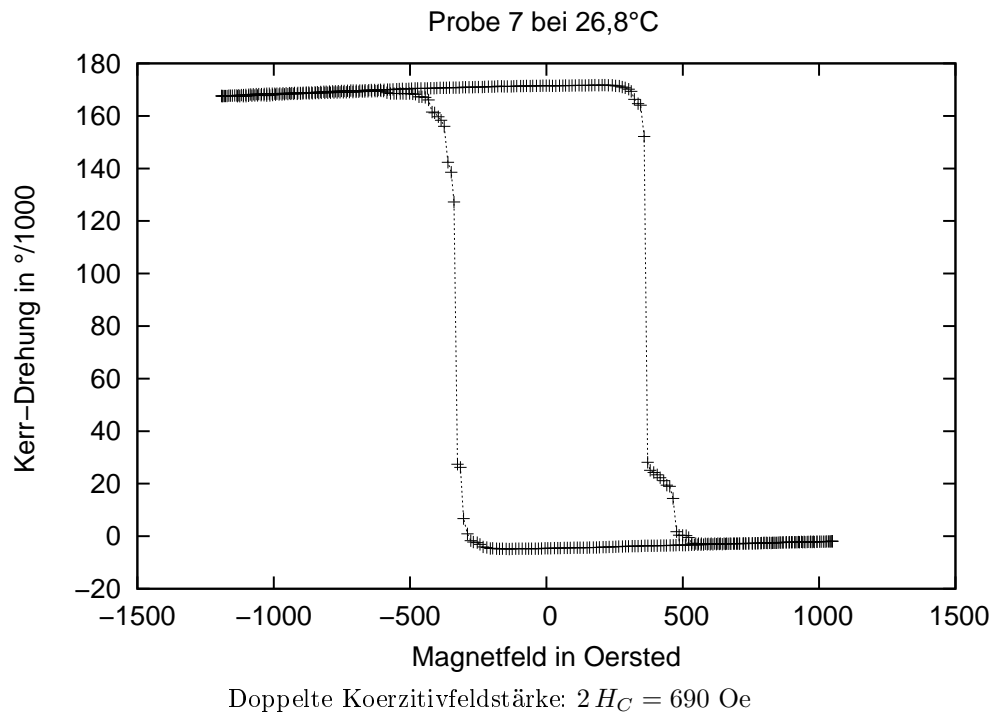


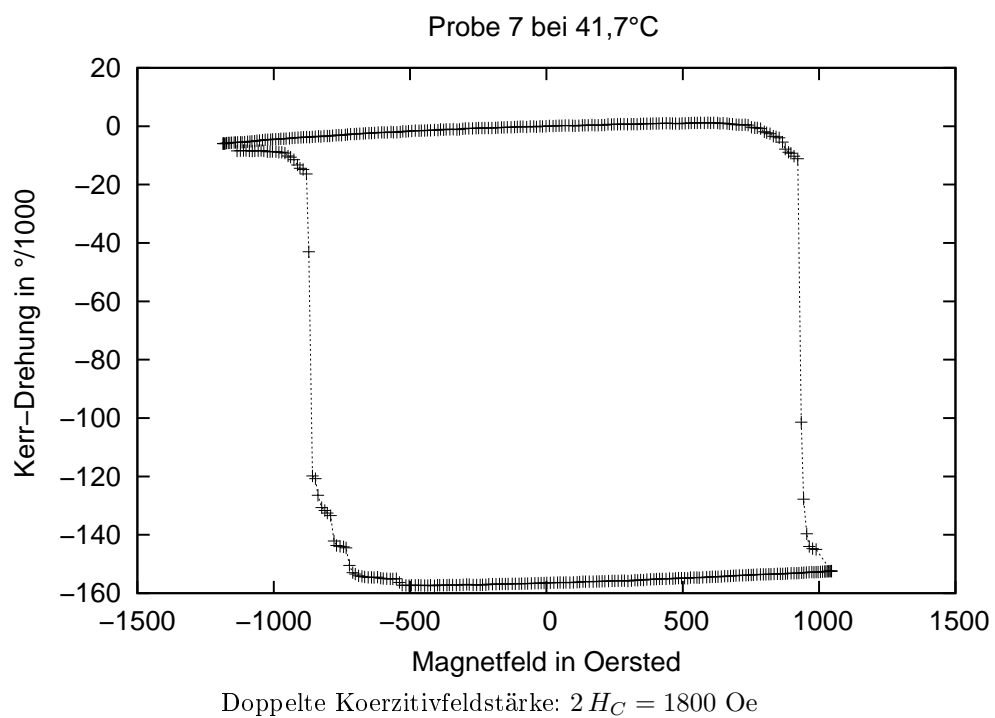
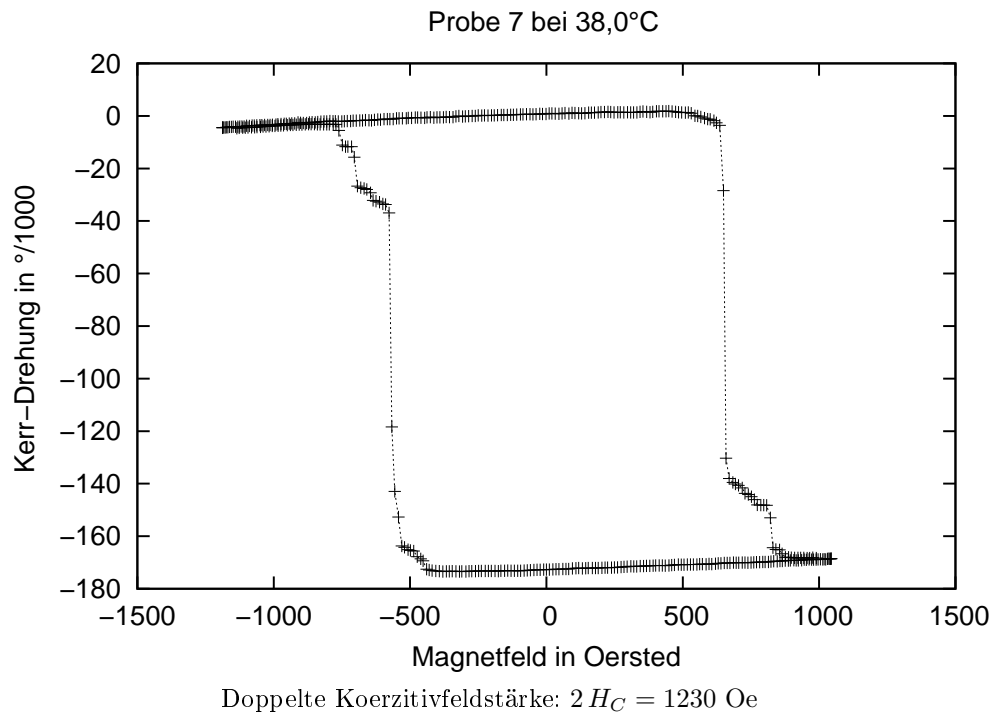


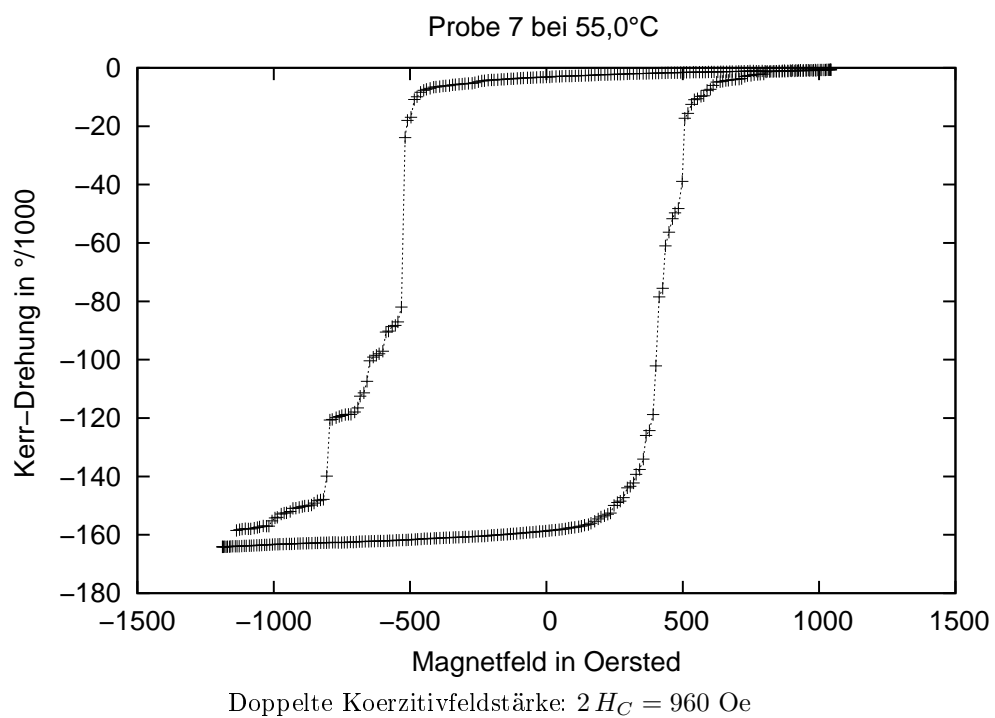
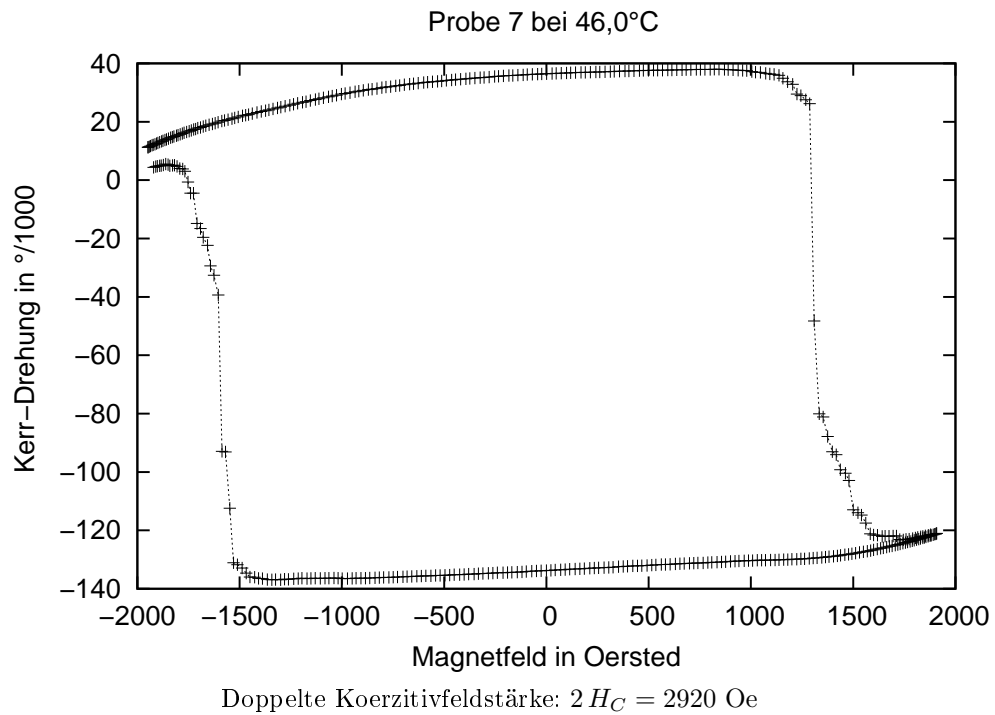


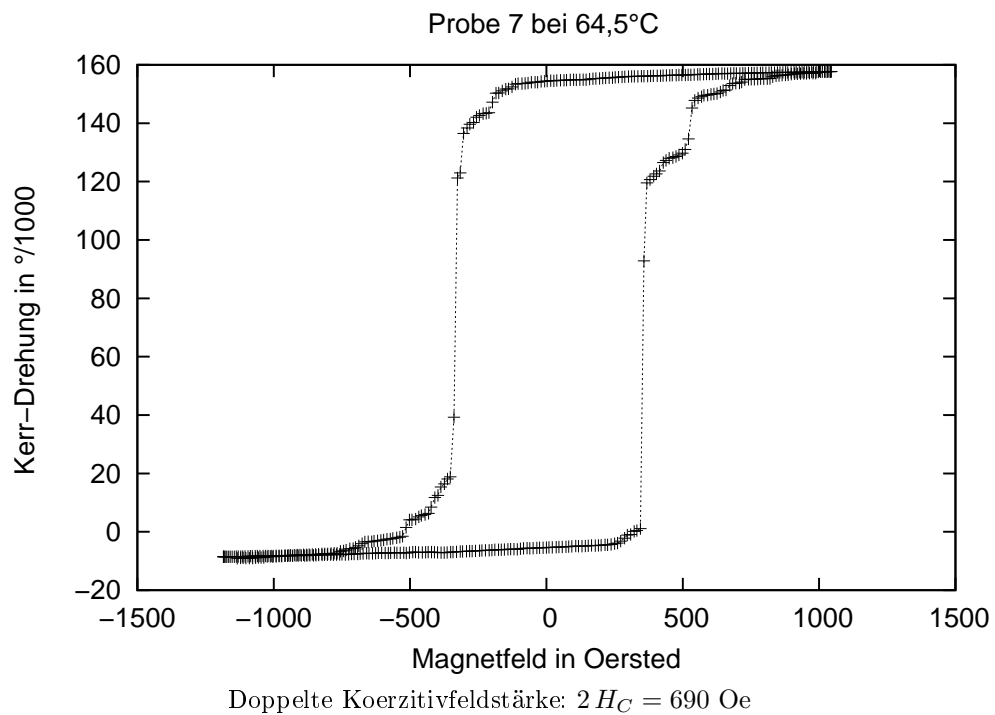
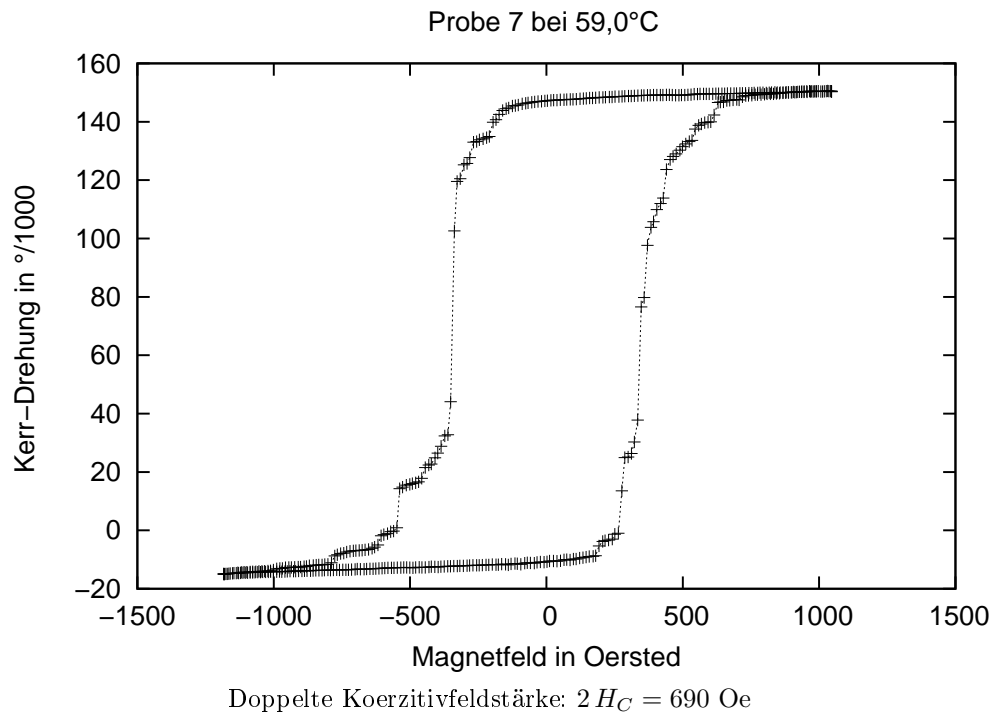
14 Probe 7

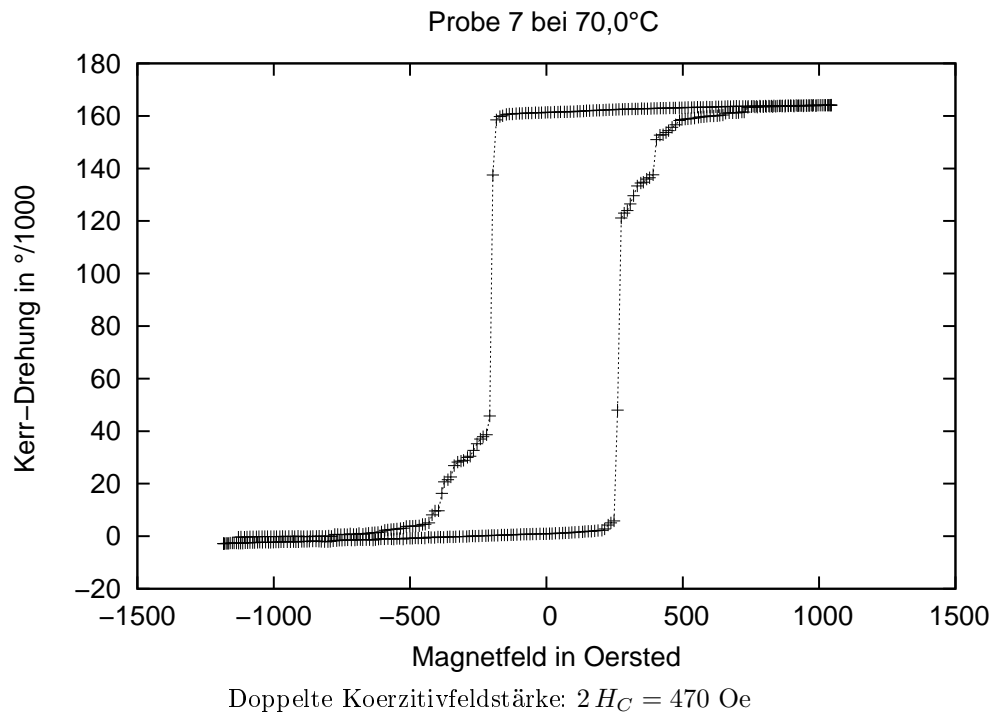




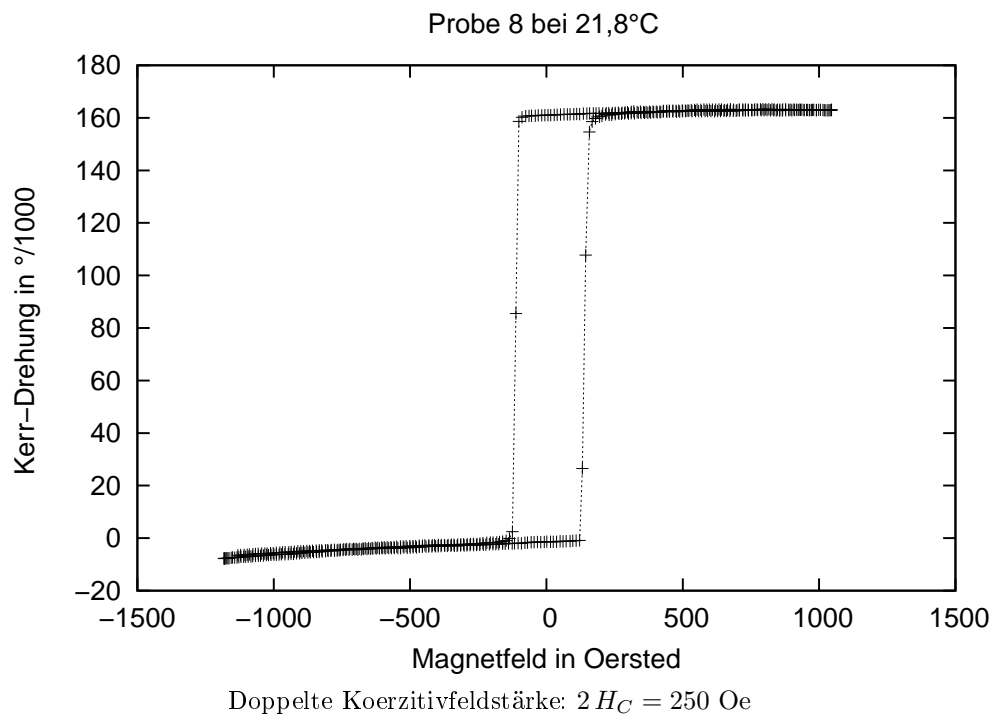
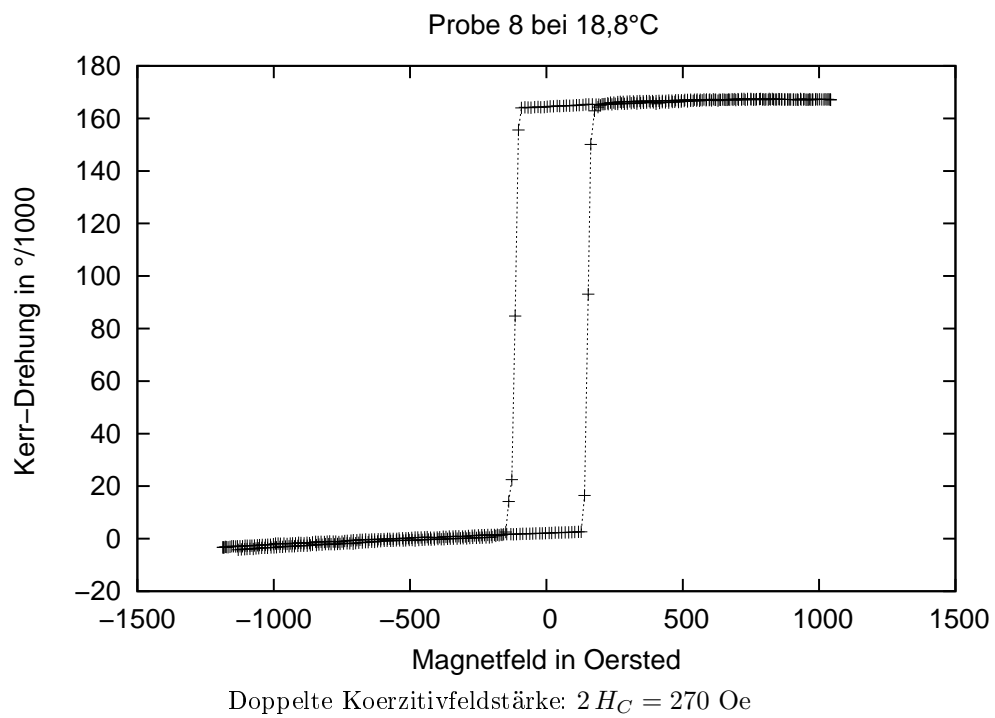


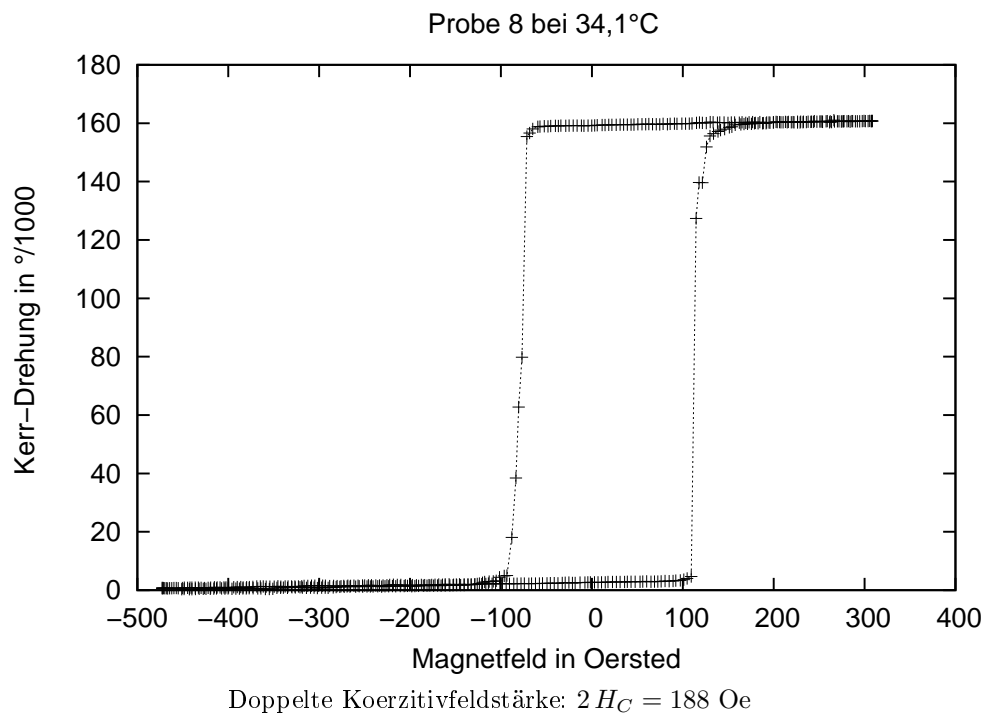
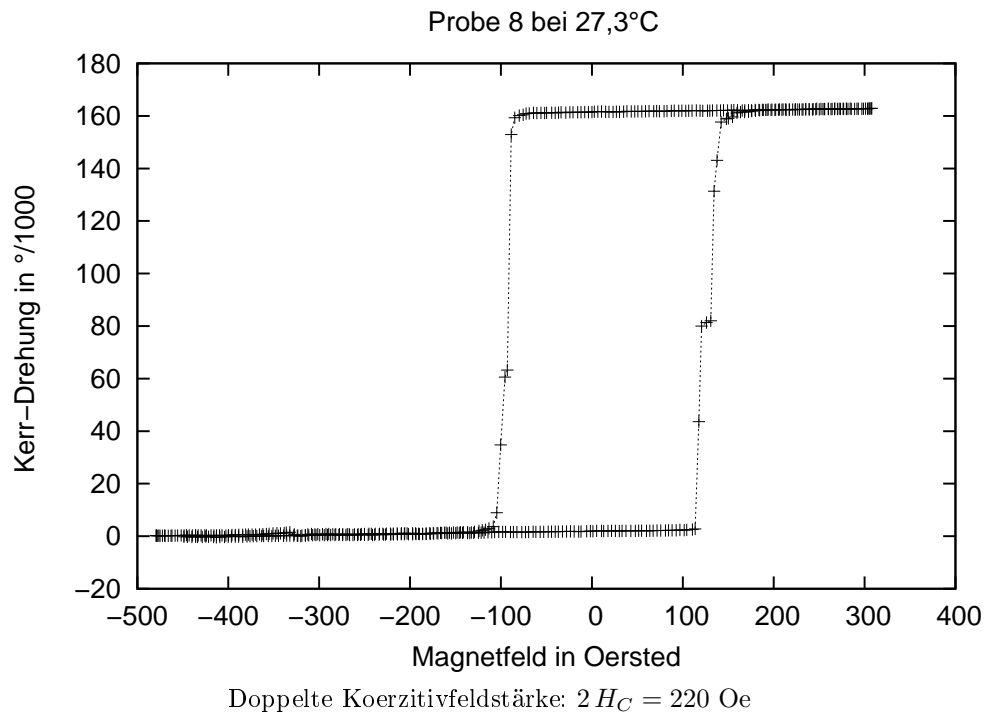


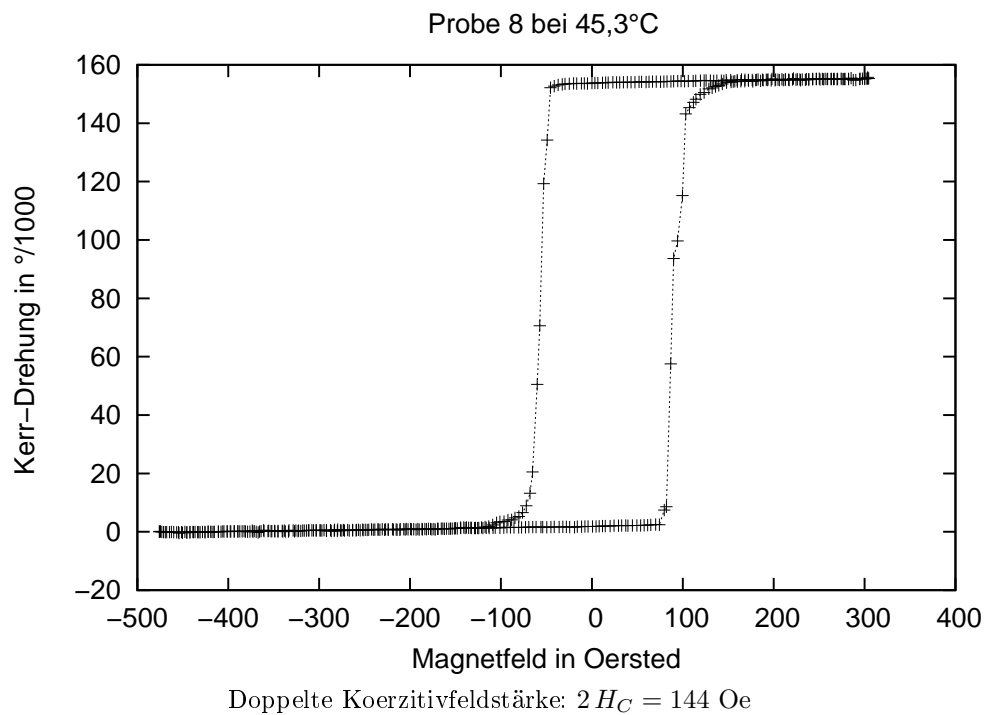
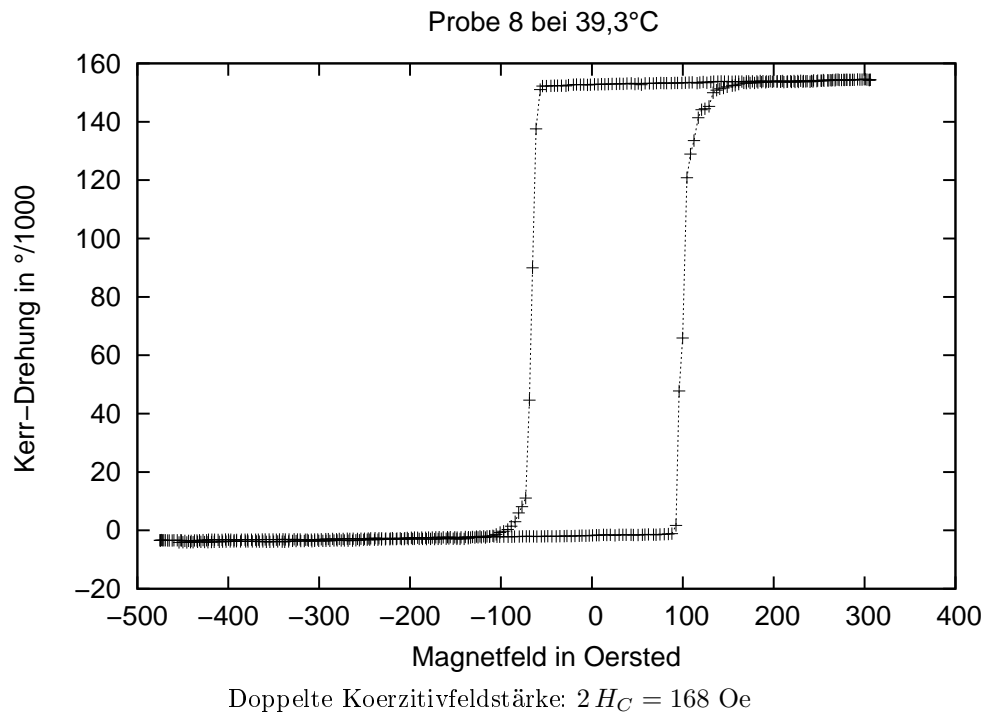


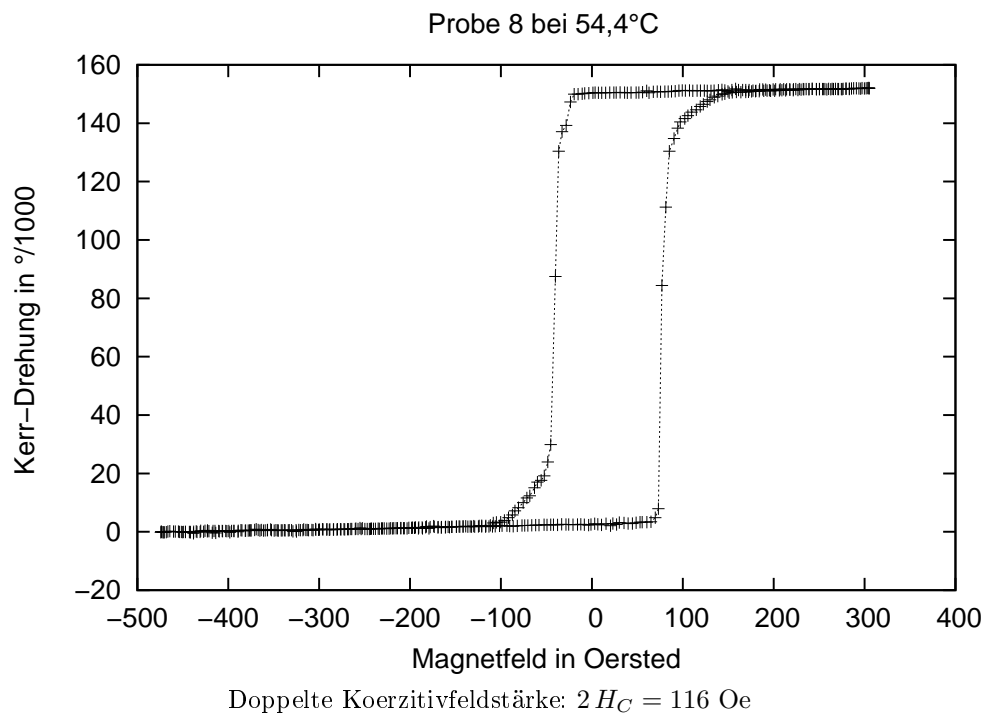
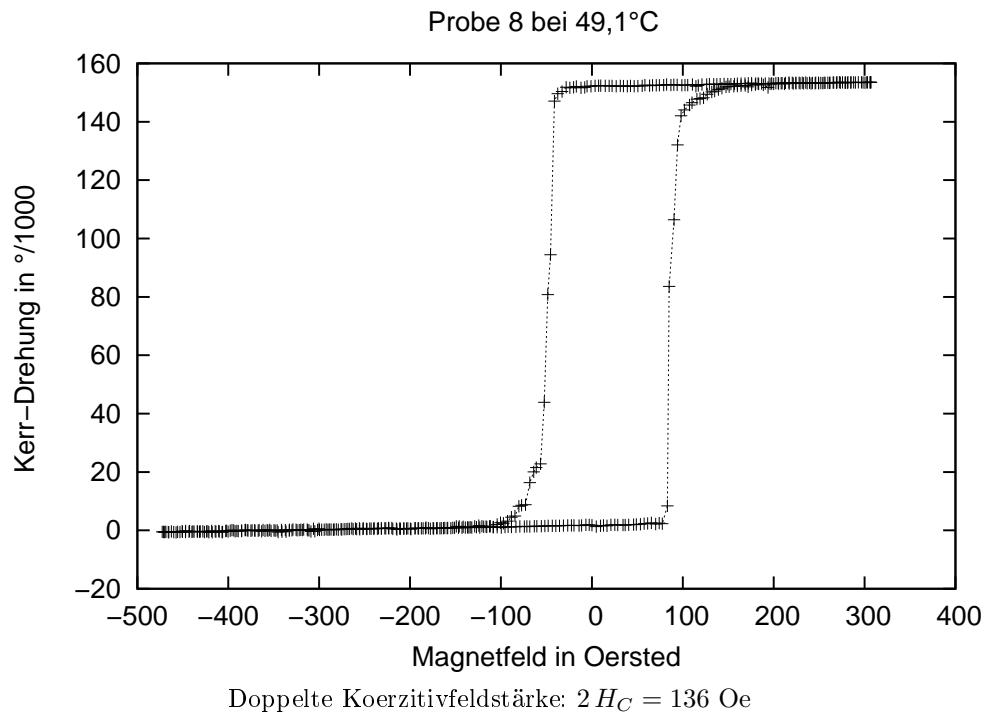


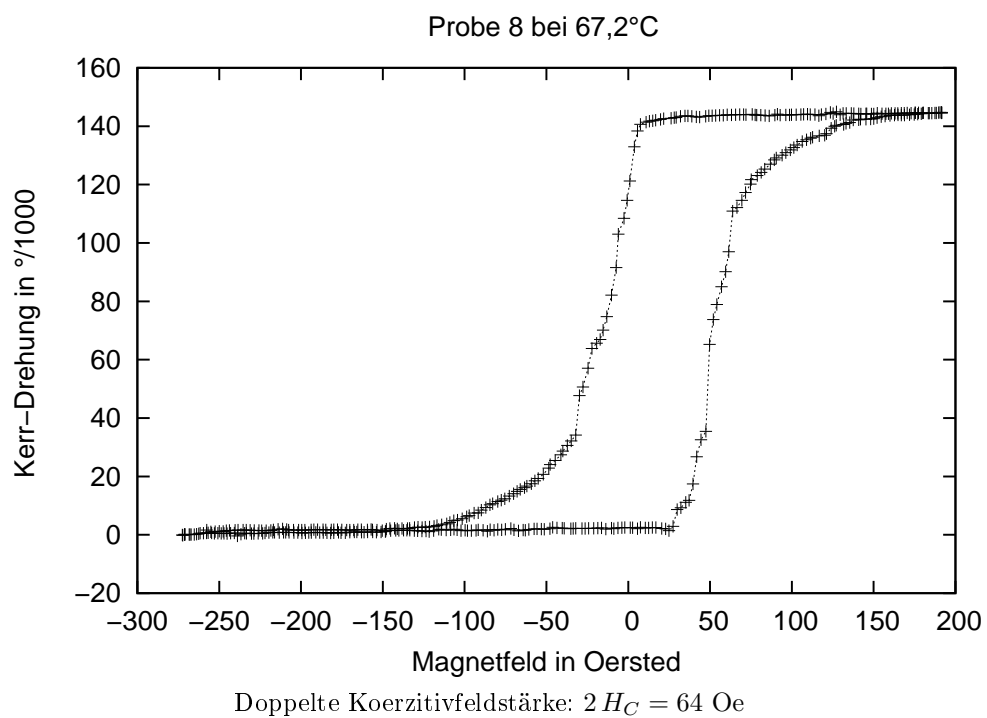
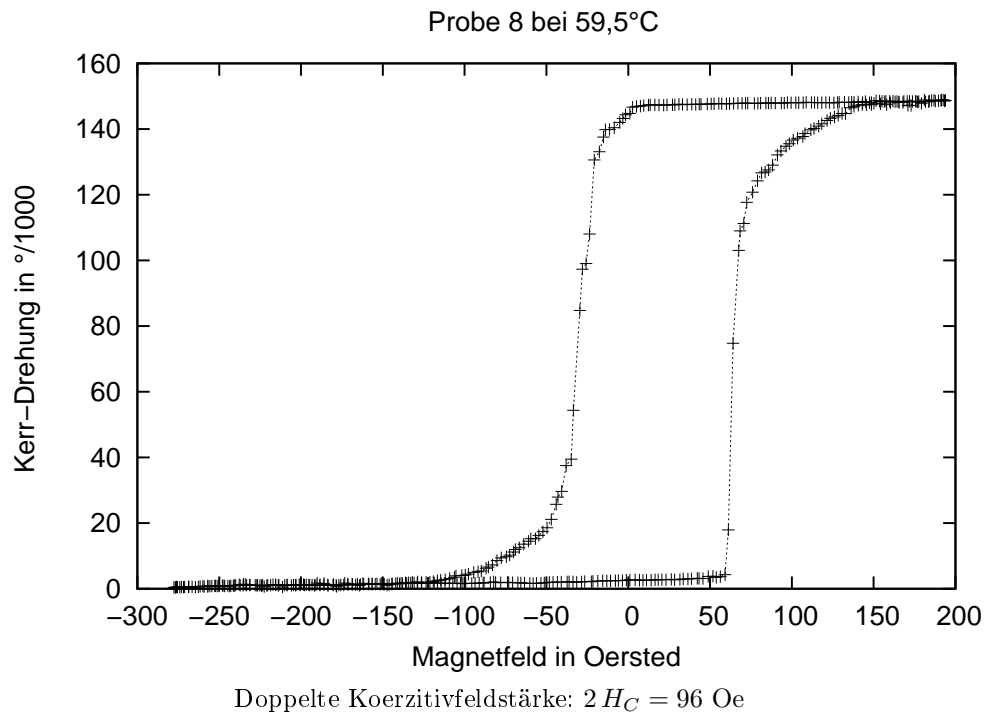
15 Probe 8



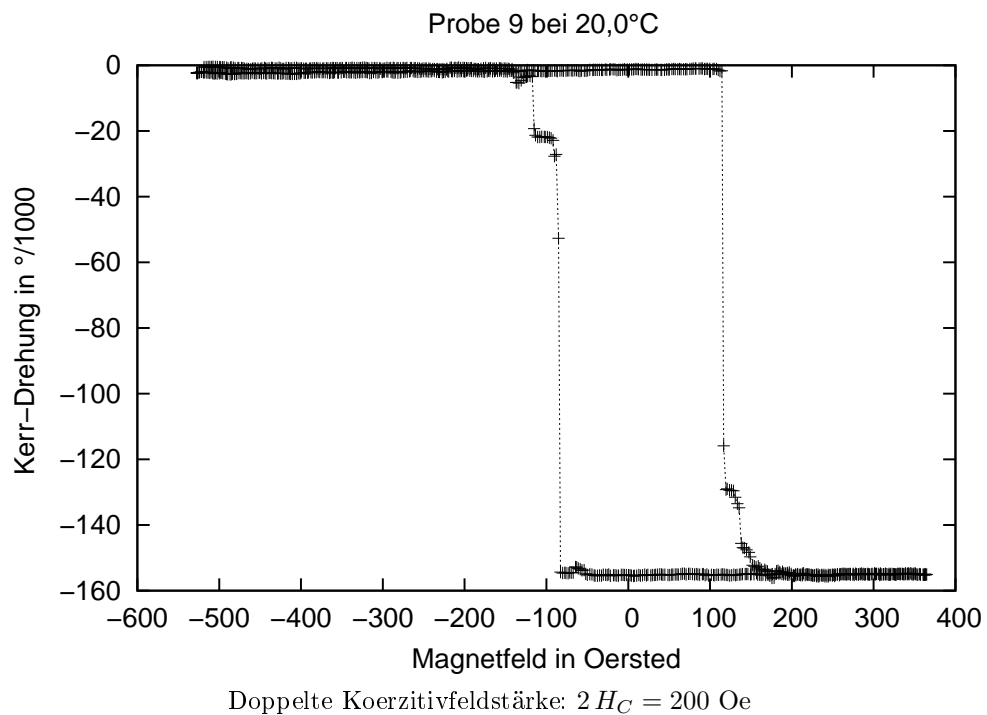
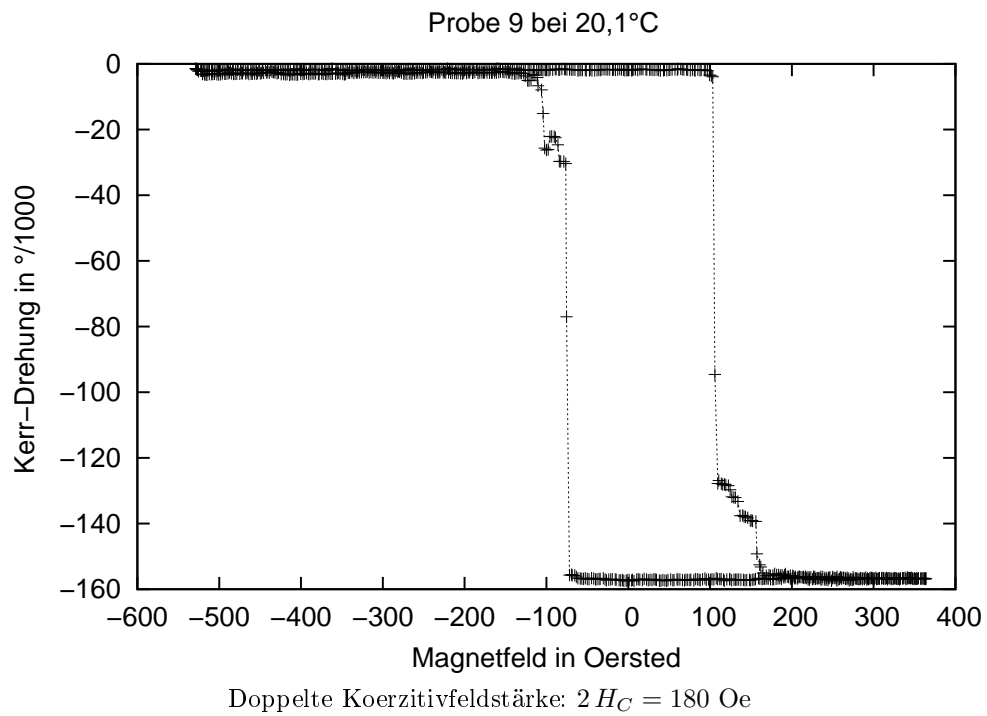


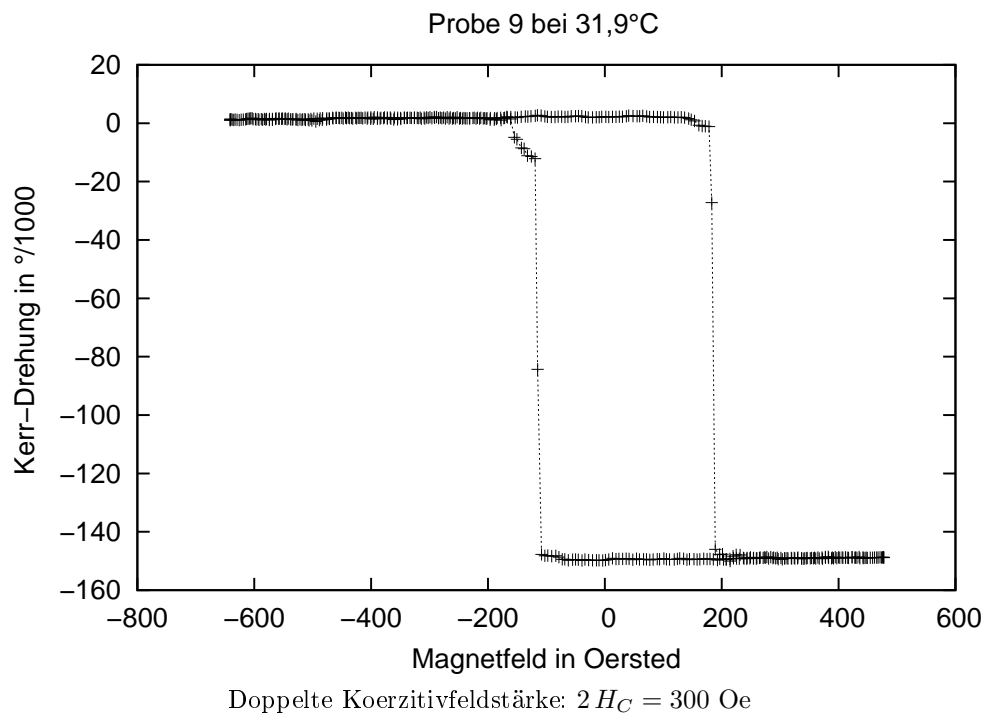
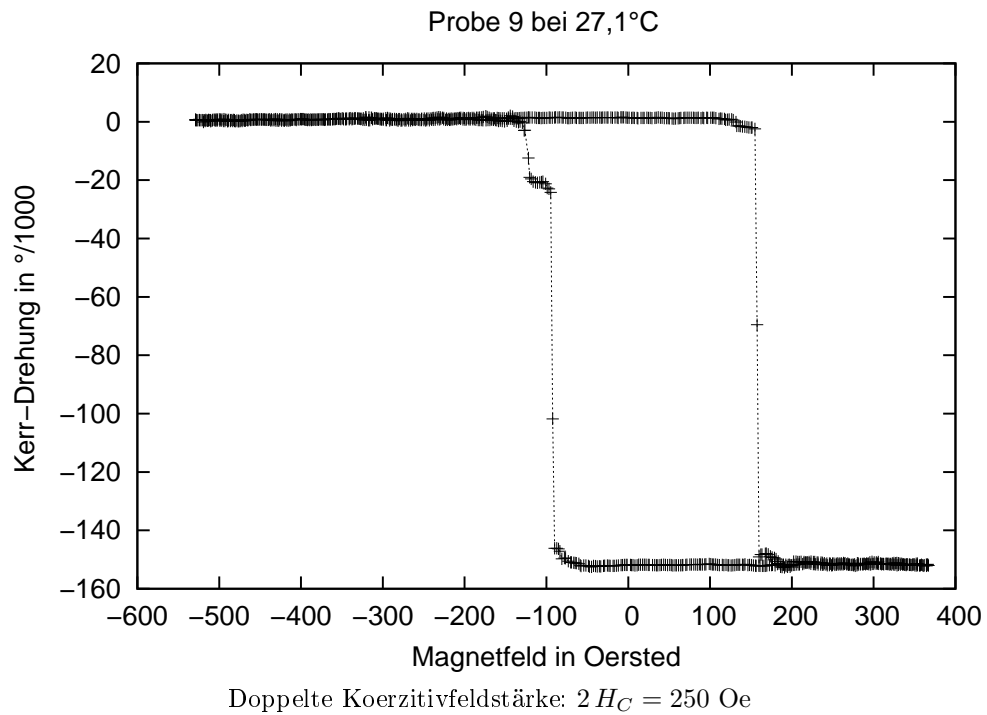


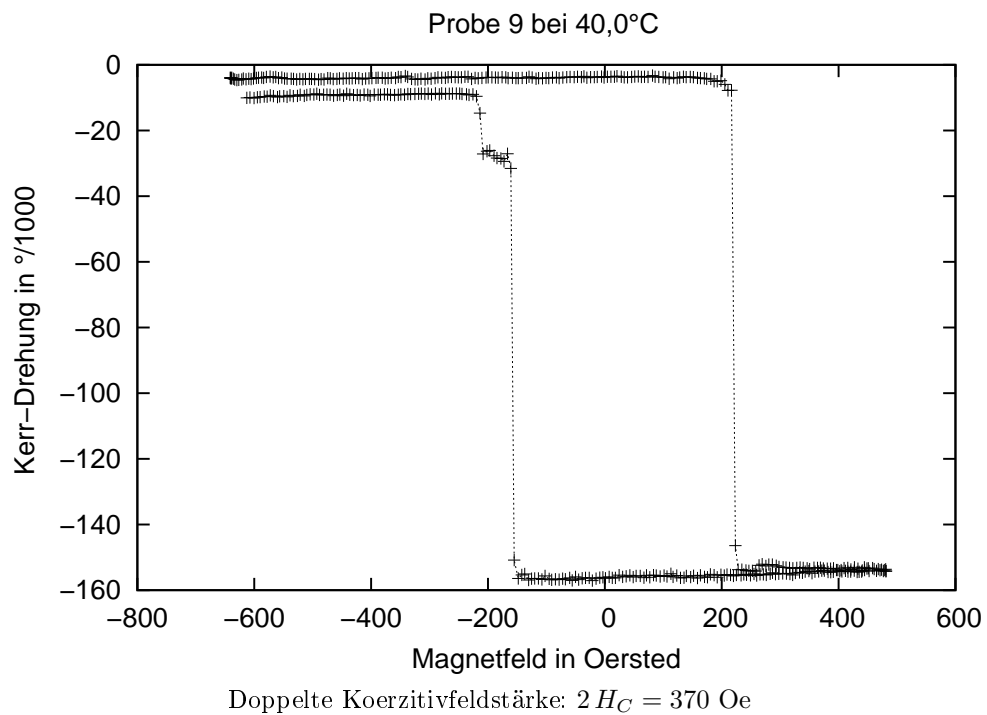
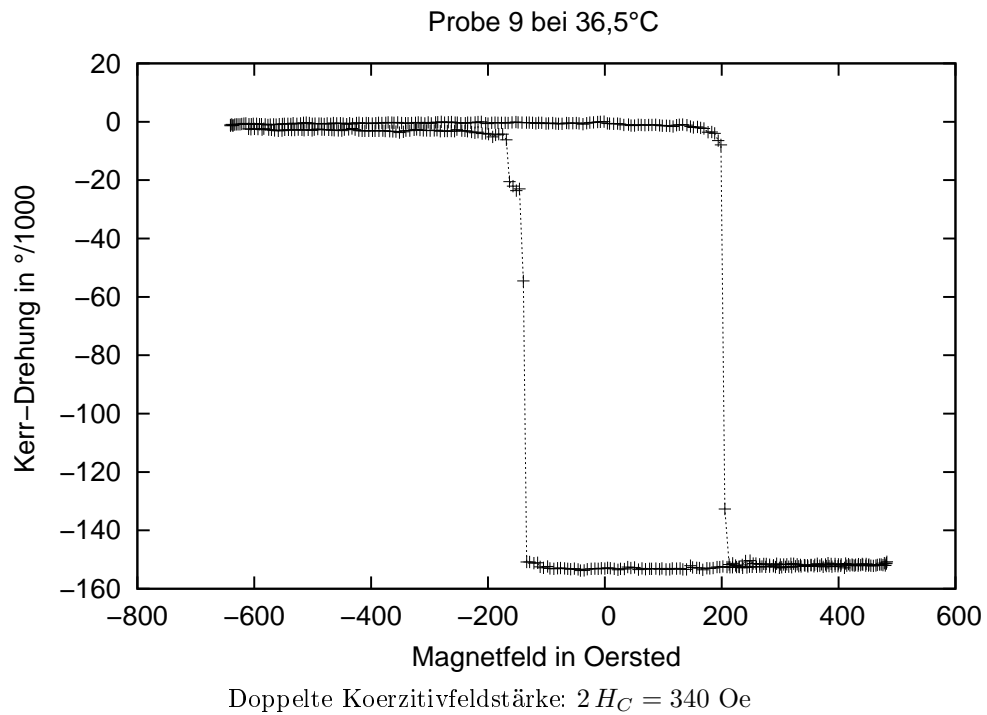


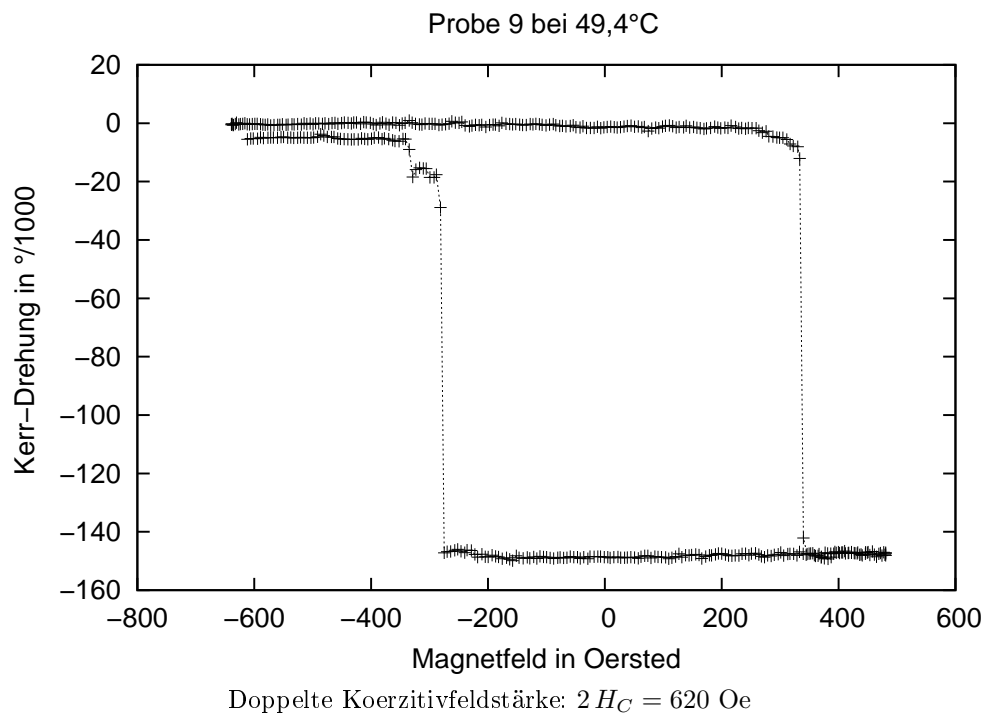
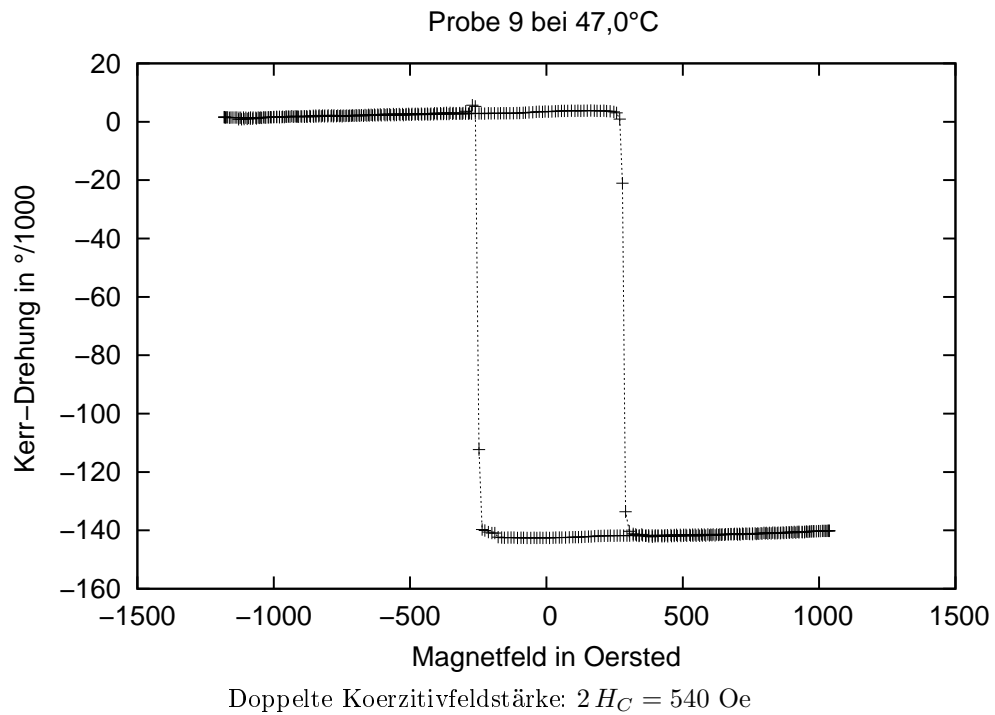


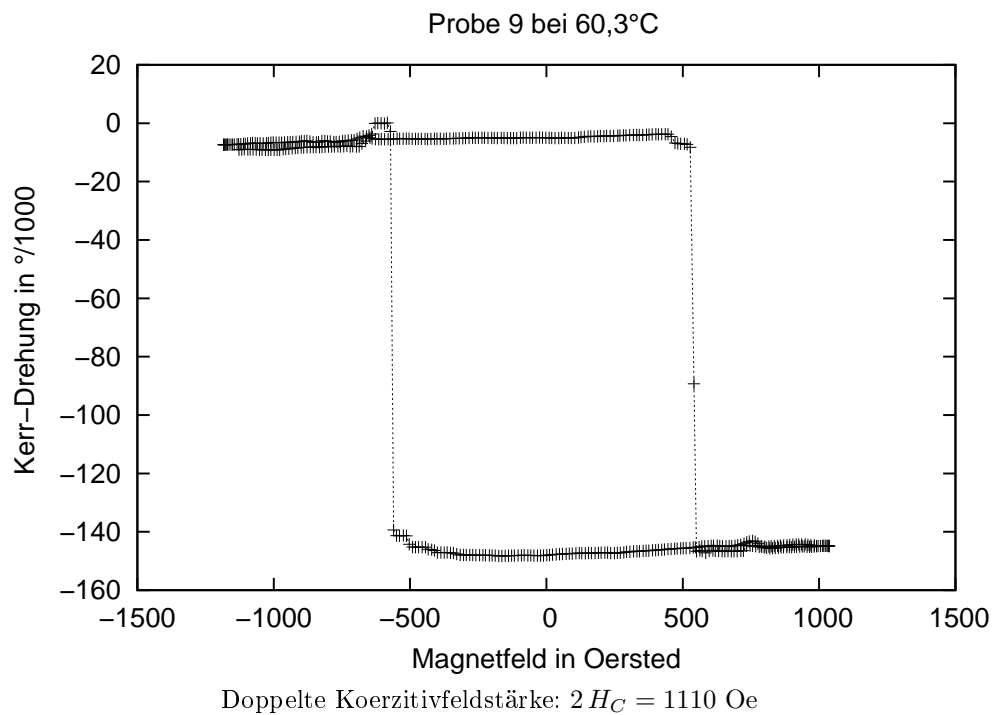
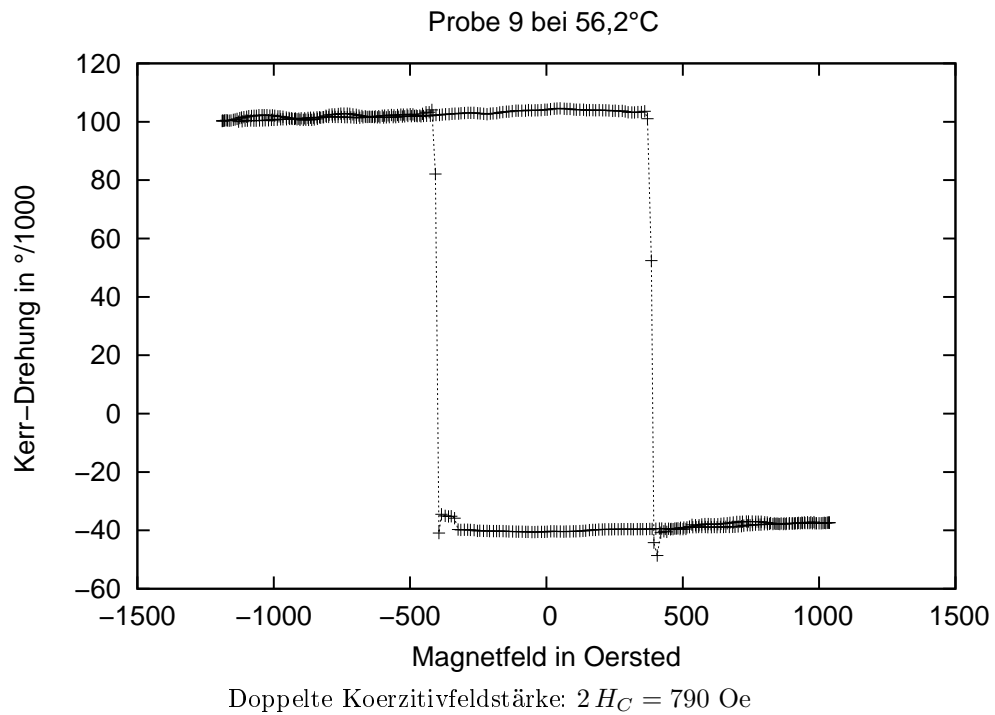
16 Probe 9

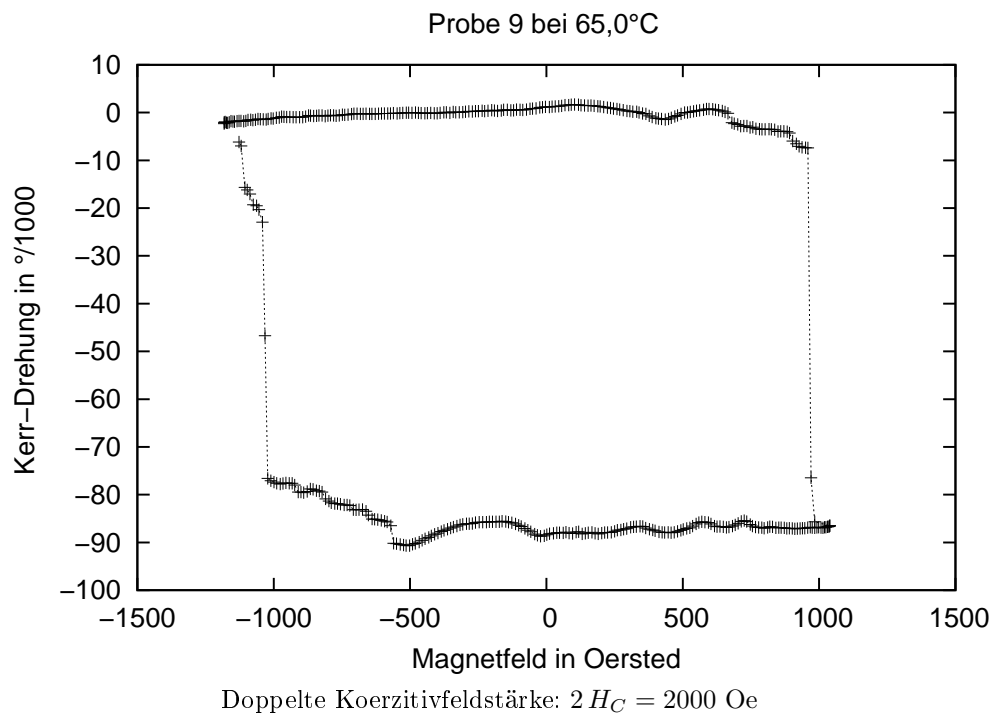
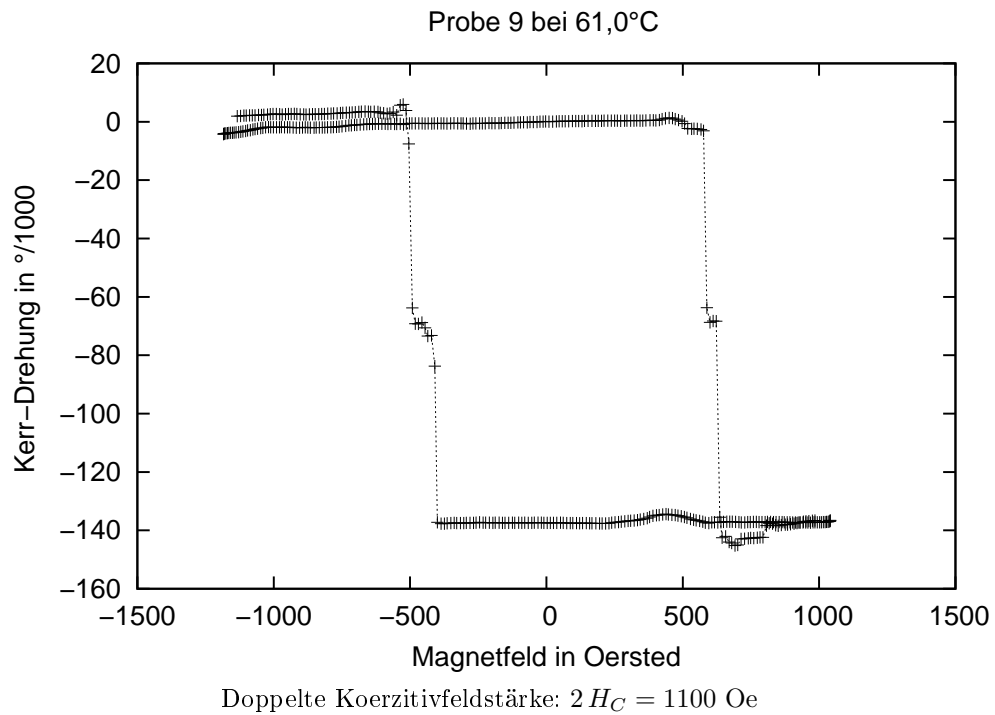


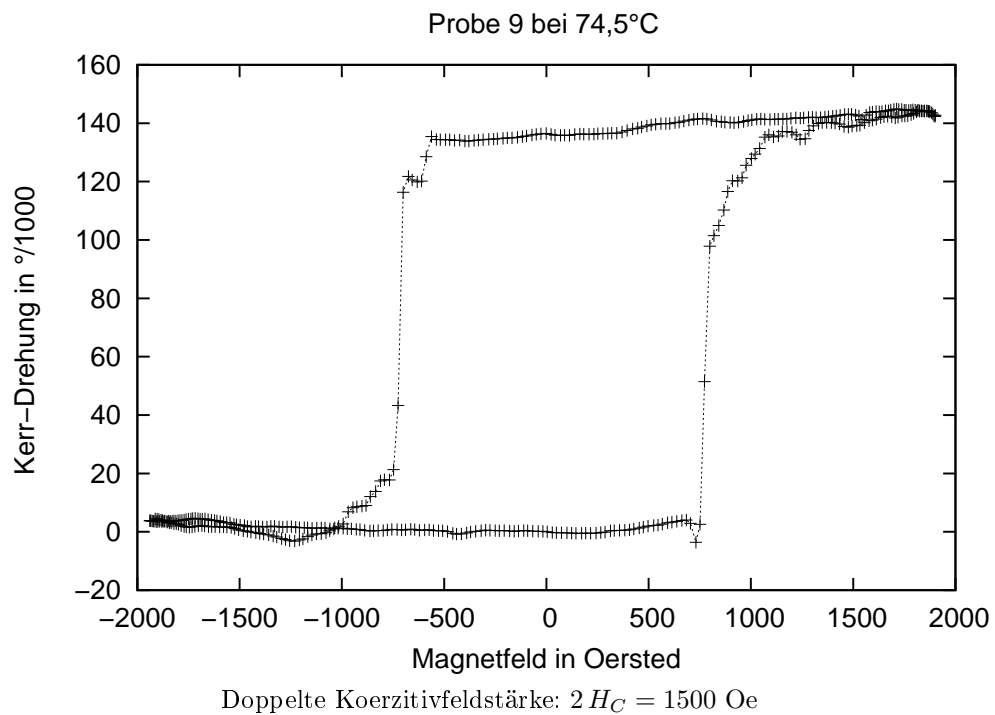
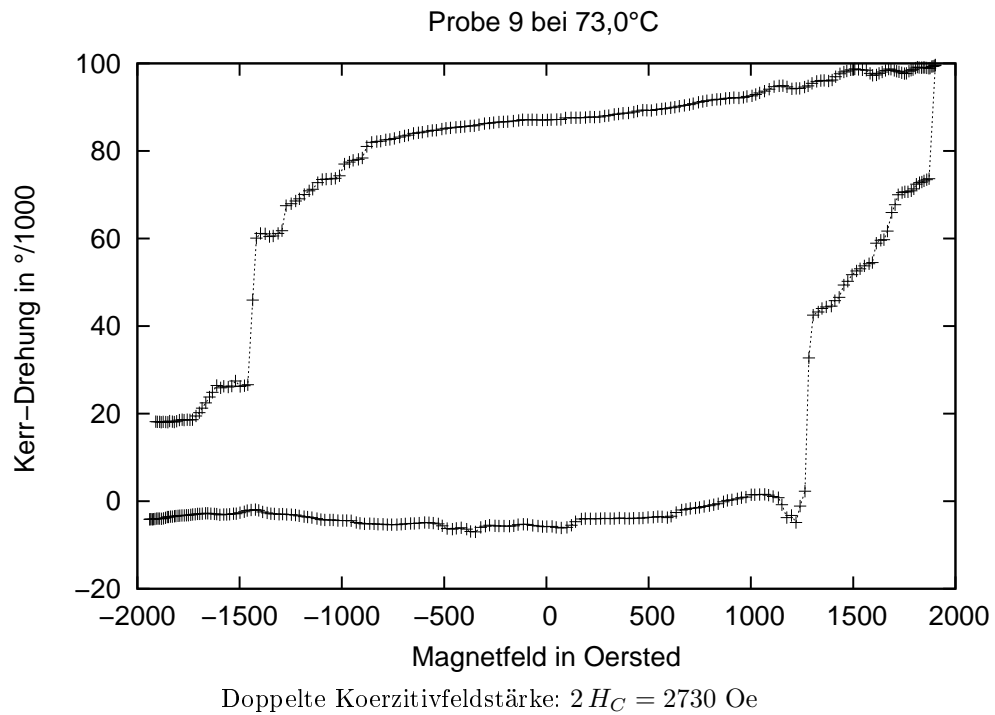


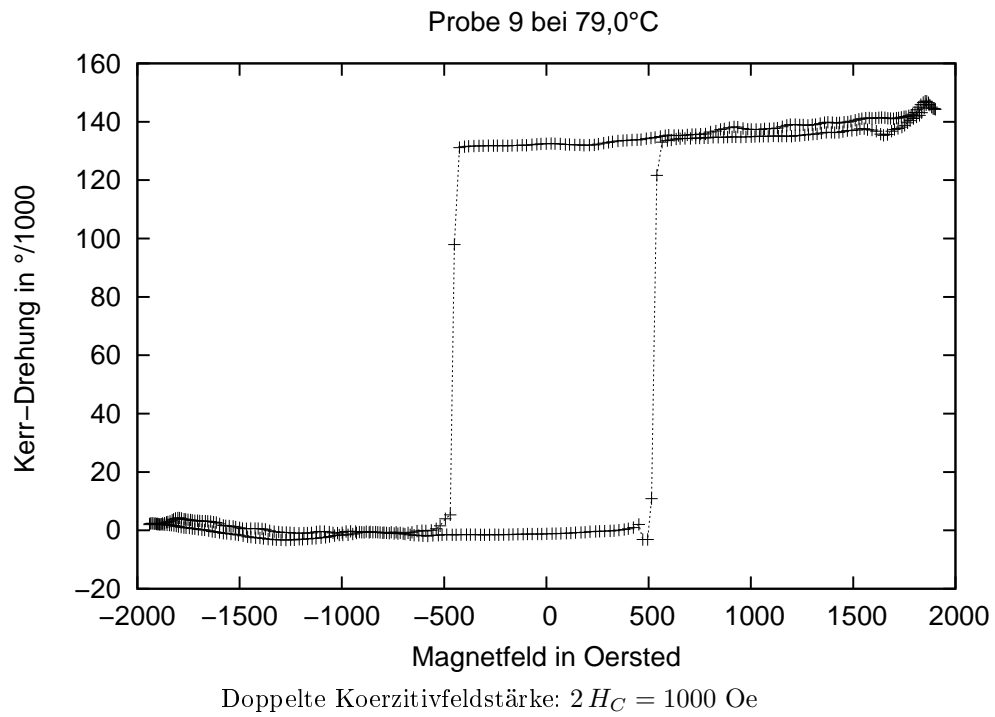










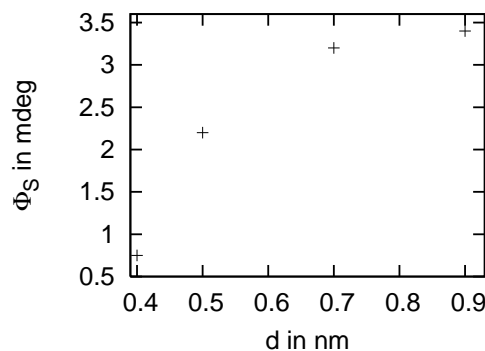


Teil E

Überarbeitung

17 Zu Abschnitt 9.1

Beim Pd/Co/Pd-Schichtsystem lässt sich außerdem eine Abhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung von der Co-Schichtdicke erkennen. Mit steigender Schichtdicke nimmt auch die Sättigungsmagnetisierung (bzw. der Kerrwinkel) zu. Ab einer Schichtdicke von $d=1,1\text{nm}$ ist sie sogar so groß, dass unser äußeres Magnetfeld nicht ausreicht um sie zu erreichen. Für die Schichtdicken, bei denen wir eine Sättigungsmagnetisierung bestimmen konnten haben wir diese in folgendem Graphen dargestellt.



d in nm	0,4	0,5	0,7	0,9
Φ _S in mdeg	0,75	2,2	3,2	3,4

18 Zu Abschnitt 9.2

Beim Co/Pd/Co-Schichtsystem wirkt die antiferromagnetische Pd-Schicht entkoppelnd zwischen den beiden ferromagnetischen Co-Schichten. Durch die Entkopplung ist es überhaupt erst möglich Hysteresekurven zu erhalten, da durch sie eine Magnetisierung senkrecht zur Oberfläche erzeugt wird und wir nur diese Komponente der Magnetisierung mit dem polaren Kerr-Effekt messen. Da dickere Pd-Schichten eine stärkere Entkopplung zur Folge haben ist es verständlich, dass die Hysteresekurven mit steigender Pd-Dicke ausgeprägter werden.

19 Zu Abschnitt 10

Zur Bestimmung der Kompensationspunktes wurden je zwei unabhängige Regressionen für die Werte überhalb und die Werte unterhalb des Kompensationspunktes verwendet. Im folgenden soll eine verbesserte Auswertmethode vorgestellt werden. Bei Probe 6 und 8 ergibt sich das Problem natürlich nicht, da nur überhalb des Kompensationspunktes gemessen wurde. Da bei Probe 9 wird beiden unabhängigen Regressionen fast in einem Punkt schneiden, wird hier auf eine erneute Auswertung verzichtet. Es bleibt also die Überarbeitung von Probe 7.

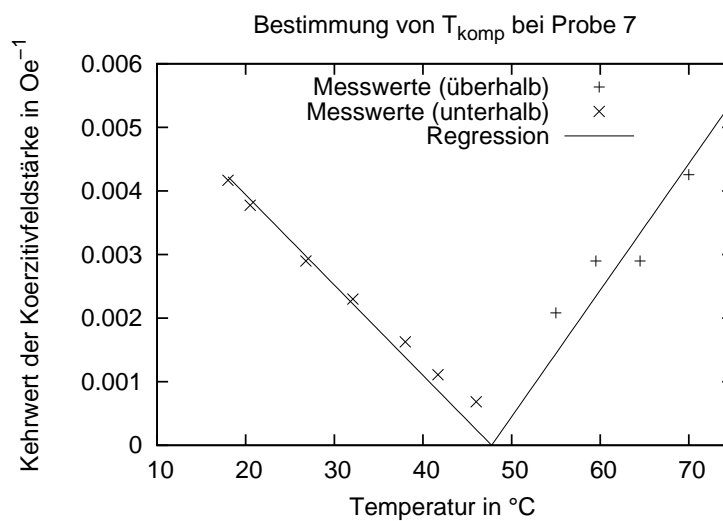
Wir betrachten hier nur die beiden Regressionen

$$\frac{1}{H_{C,<}} = A \cdot (T - T_C) \quad \frac{1}{H_{C,>}} = B \cdot (T - T_C)$$

die über den vorgegebenen Parameter T_C gekoppelt sind. In der folgenden Tabelle sind die Fehlerquadrate verschiedener Regressionen (also verschiedener T_C) angegeben. Die Regressionen wurden jeweils direkt mit GNU PLOT durchgeführt.

Der Wert $T_C = 51,3^\circ\text{C}$ aus der ersten Regression wurde als Startwert verwendet:

T_C in °C	Summe der Fehlerquadrate in $\frac{1}{\text{Oe}^2}$		
	unterhalb T_C	überhalb T_C	gesamt
51,3	$2,63 \cdot 10^{-8}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$	$2,42 \cdot 10^{-6}$
50	$4,78 \cdot 10^{-8}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$1,74 \cdot 10^{-6}$
49	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$
48,5	$1,96 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-6}$
48	$2,84 \cdot 10^{-7}$	$1,004 \cdot 10^{-6}$	$1,288 \cdot 10^{-6}$
47,75	$3,37 \cdot 10^{-7}$	$9,43 \cdot 10^{-7}$	$1,280 \cdot 10^{-6}$
47,5	$3,95 \cdot 10^{-7}$	$8,87 \cdot 10^{-7}$	$1,282 \cdot 10^{-6}$
47	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$7,86 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$
46	$8,97 \cdot 10^{-7}$	$9,24 \cdot 10^{-7}$	$1,82 \cdot 10^{-6}$



Die Minimierung der Fehlerquadrate ergibt also oben stehende Regression und damit einen Kompensationspunkt von $T_C = 47,75^\circ\text{C}$.

Durch die Veränderung der Kompensationstemperatur ergibt sich auch eine leicht abgewandelte Konzentration:

$$x = (26,72 \pm 0,02) \%$$