

Hausarbeit zur Ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien
aus dem Fach Physik bei
Prof. Dr. Ferdinand Haider

**Aufbau eines Praktikumsversuchs zur
magnetischen Untersuchung
der Aushärtung einer
Kupfer-Kobalt-Legierung**

von
Frank Appelt
aus Günzburg (Bayern)



Institut für Physik
Universität Augsburg

1997

Gliederung

Vorwort.....	4
1. Einleitung.....	5
2. Materialwissenschaftliche Grundlagen.....	6
2.1 Ausscheidungen in Legierungen	6
2.2 Kontinuierliche Entmischung.....	7
2.3 Homogene Keimbildung von Ausscheidungen.....	9
2.4 Keimwachstum.....	10
2.5 Umlösung - Ostwald-Reifung.....	12
3. Magnetische Grundlagen.....	14
3.1 Unterteilung der magnetischen Materialien.....	14
3.1.1 Diamagnetismus : induzierte magnetische Momente.....	14
3.1.2 Paramagnetismus: permanente magnetische Momente.....	14
3.1.3 Ferromagnetismus (kollektiver Magnetismus).....	14
3.1.4 Superparamagnetismus.....	15
3.2 Eigenschaften magnetischer Stoffe.....	17
4. Magnetische Meßmethoden.....	19
4.1 Bedeutung der Koerzitivkraft.....	19
4.2 Zusammenhang zwischen Teilchengröße und Koerzitivkraft - magnetische Härtung.....	21
4.2.1 Superparamagnetische Teilchen.....	21
4.2.2 Einbereichsteilchen.....	22
4.2.3 Mehrbereichsteilchen.....	22
4.2.4 Experimenteller Kurvenverlauf.....	25
5. Versuchsvorbereitungen und -aufbau.....	27
5.1 Probenpräparation	27
5.2 Auslagerungsofen.....	28
5.3 Meßspule und Förstersonde.....	34
5.3.1 Schematischer Grundaufbau.....	34
5.3.2 Funktionsweise des Förster-Magnetometers.....	36
5.3.2.1 Meßprinzip einer Sonde.....	36
5.3.2.2 Anordnung der Sonden im Versuchsaufbau.....	37

5.3.3 Spule und Spulenhalter.....	41
6. Versuchsdurchführung.....	44
6.1 Auslagerung der Proben.....	44
6.2 Aufmagnetisierung.....	44
6.3 Messung der Koerzitivfeldstärke H_c	44
7. Meßergebnisse.....	47
7.1 Bestimmung der geeigneten Probenzusammensetzung und erste Ergebnisse. 47	
7.1.1 Tempern der Versuchsproben Cu-1,0% - 3,0%Co bei 800°C.....	47
7.1.2 Wiederholungsmessung der Proben bei 800°C.....	48
7.1.3 Erste Ergebnisse.....	49
7.2 Tempern der Versuchsproben Cu-2,0% - 3,0%Co bei 850°C.....	51
7.3 Messung der endgültigen Probe.....	53
7.4 Vergleich der Meßergebnisse mit der Theorie - Zusammen-fassung.....	56
8. Didaktische Überlegungen.....	60
8.1 Sinn und Zweck des Praktikumsversuchs.....	60
8.2 Das Meßprotokoll.....	61
8.3 Vorbereitungen der Praktikanten.....	61
8.4 Vorbesprechung mit dem Betreuer.....	62
8.5 Lerninhalte der einzelnen Kapitel und Kontrollfragen.....	63
8.5.1 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 2.....	63
8.5.2 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 3.....	64
8.5.3 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 4.....	64
8.5.4 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 5.....	64
8.5.5 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 6.....	65
Schlußbemerkung.....	66
Literatur.....	67
Erklärung des Verfassers.....	69
Anhang - Zeitlicher Ablauf und Meßprotokoll.....	70

Vorwort

In dieser Zulassungsarbeit wurde eine Versuchsanordnung zur magnetischen Untersuchung der Aushärtung einer Kupfer-Kobalt-Legierung entworfen, mit den theoretischen Grundlagen versehen und didaktisch aufgearbeitet.

Gerade für einen angehenden Pädagogen ist es sehr interessant und lehrreich, auch einmal die experimentelle Seite der Physik bei praktischer Laborarbeit kennenzulernen, als immer nur mit grauer Theorie konfrontiert zu werden.

Außerdem klang die Aufgabe verlockend, mit einer Versuchsanordnung für ein gerade im Aufbau befindliches metallkundliches Praktikum, einen Beitrag zum universitären Leben von vielen, noch folgenden Physikstudentengenerationen zu leisten und mitzuhelfen, komplexe Zusammenhänge anschaulich darzustellen.

In diesem Sinne danke ich Herrn Prof. Dr. Ferdinand Haider aufrichtig für seine wertvollen Anregungen und das Verständnis für meine Fragen, mit dem er mich und meine Arbeit jederzeit gefördert und begleitet hat.

Herrn Prof. Dr. Konrad Samwer bin ich für die Möglichkeit der Durchführung an seinem Lehrstuhl und die Überlassung von Institutsmitteln zu besonderem Dank verpflichtet.

Weiter möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Freundin Daniela für ihr Verständnis und ihre Unterstützung bei der oftmals sehr zeitintensiven Arbeit bedanken.

Ein großes Dankeschön gilt ferner den Laboranten Uta Bete, Gabi Hager und Andreas Spörhase für ihre sachkundige Hilfe, den Mitarbeitern der Feinmechanischen Werkstatt und der Elektrowerkstatt des Instituts für ihre technische Unterstützung und allen meinen Kommilitonen und Freunden am Lehrstuhl für Experimentalphysik I für das hervorragende Arbeitsklima und ihre Hilfe beim Korrekturlesen.

Günzburg, Juni 1997

Frank Appelt

1. Einleitung

Nach Friedrich Förster mißt der Metallkundler die physikalischen Kennwerte seiner Werkstoffe aus verschiedenen Gründen.

„Einmal dient der Meßwert zur Beschreibung oder zur Beurteilung der Verwendungsmöglichkeiten eines Werkstoffes, z.B. die spezifische elektrische Leitfähigkeit bei Werkstoffen für Leitungszwecke oder die Koerzitivkraft bei Werkstoffen für Dauermagnete.

Zum anderen ist - und das stellt den überwiegenden Teil dar - der Meßwert nur ein Mittel, um metallkundliche Vorgänge wie Umwandlungen, Aushärtungseffekte, Ordnungsvorgänge, Alterserscheinungen usw. zu verfolgen.“ [01 FÖR]

Der Prozeß, der uns in dieser Arbeit interessiert, sind die Ausscheidungsvorgänge in einer Kupfer-Kobalt-Legierung, die untersucht werden sollen.

Zu Ausscheidungsvorgängen kommt es, wenn man eine Legierung, die bei hohen Temperaturen einen homogenen Mischkristall bildet, abkühlt und die an der Legierung beteiligten Phasen beginnen, sich zu entmischen. Dabei verändert der Stoff seine physikalischen Eigenschaften, wie z.B. seine Leitfähigkeit, seine Fähigkeit zur Supraleitung, seine mechanische Härte usw.

Die Ausscheidungsvorgänge verursachen allerdings nicht nur eine mechanische Härtung, sondern auch eine Veränderung der magnetischen Eigenschaften der Legierung, wie eine Änderung der Permeabilität oder der Koerzitivfeldstärke. Bei letzterem spricht man von einer Änderung der magnetischen Härte des Stoffes.

Da der Stoff also mit fortschreitenden Ausscheidungsvorgängen seine (die Koerzitivfeldstärke bedingende) Remanenz verändert, ist die Koerzitivkraftmessung eine gute Möglichkeit, um diese zu dokumentieren (Näheres dazu in Kapitel 4).

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode für diese Untersuchungen auszuwählen, die auch für einen Praktikumsversuch geeignet ist. Die Vorgaben hierfür sind, daß die Meßmethode einerseits gute, reproduzierbare und den Sachverhalt gut darstellende Ergebnisse liefert, andererseits aber nicht zu aufwendig und in ca. einem Tag durchzuführen ist.

2. Materialwissenschaftliche Grundlagen

2.1 Ausscheidungen in Legierungen

Eine Legierung, die bei hohen Temperaturen einen homogenen Mischkristall bildet, sich aber bei Abkühlung in eine oder mehrere Phasen entmischt, nennt man aushärtbar.

Bei der verwendeten Legierung Cu-2,5Gew.%Co mit der Paarvertauschungsenergie

$$\varepsilon = \varepsilon_{AB} - \frac{\varepsilon_{AA} + \varepsilon_{BB}}{2} > 0 \quad (\varepsilon_{ij} = \text{Paarwechselwirkungsenergie der Atome } i \text{ und } j)$$

wird der α -Mischkristall instabil, d.h. bei Abkühlung entmischt sich die Legierung in ihre einzelnen Komponenten, und es bilden sich Ausscheidungen. Siehe auch [03 HAA, Seite 70ff., 169ff.].

In Abb. 1 ist das Phasendiagramm der Legierung Kupfer-Kobalt zu sehen, die in diesem Versuch betrachtet werden soll.

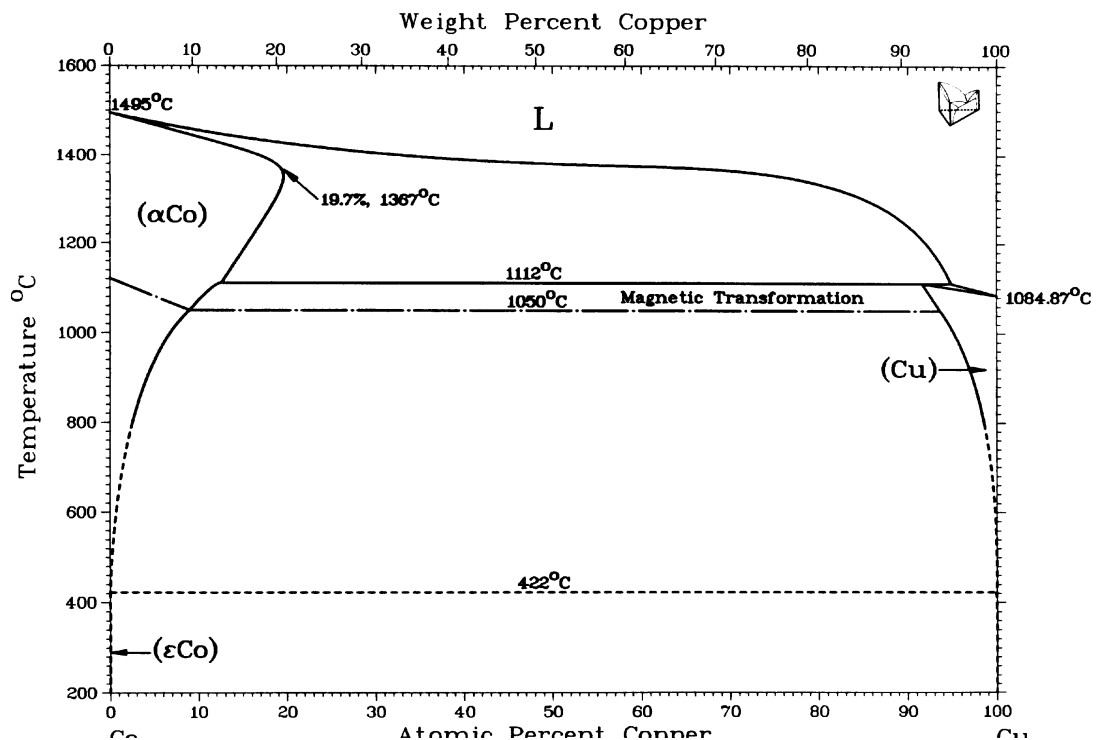


Abb. 1 Phasendiagramm Kupfer-Kobalt [02 MAS, Seite 760]

Man erkennt aus Abb. 1, daß sich bei 1112°C maximal ca.10-Gew% Kobalt in Kupfer löst und sich der homogene Mischkristall bei Abkühlung auf ca. 800°C in seine zwei Phasen, nämlich Kupfer und Kobalt, entmischt; es entstehen somit magnetische Kobaltausscheidungen in einer diamagnetischen Kupfermatrix. Je länger man die Legierung bei 800°C auslagert, desto größer werden die Kobaltausscheidungen in der Kupferphase (Ostwald-Reifung), und entsprechend ändern sich die magnetischen Eigenschaften der Probe.

Die Entmischung kann dabei nach verschiedenen Mechanismen vor sich gehen:

2.2 Kontinuierliche Entmischung

i) Keimbildung und Wachstum:

Durch thermische Schwankungen kommt es an einzelnen Stellen der Probe zur Bildung von Kobalt-Keimen in der Kupfermatrix. Die Zusammensetzung dieser Keime weicht von der Kupfermatrix stark ab, es kommt zu einem Keimwachstum bei Abkühlung. Da in der Nähe der Keime ein Konzentrationsgradient entsteht (in Keimnähe ist eine Verarmung an Fremdatomen eingetreten, da der Keim „fremdatomreich“ ist), diffundieren Fremdatome in Richtung Keim, so daß ein Keimwachstum eintreten kann.[03 HAA, Seite 169f.]

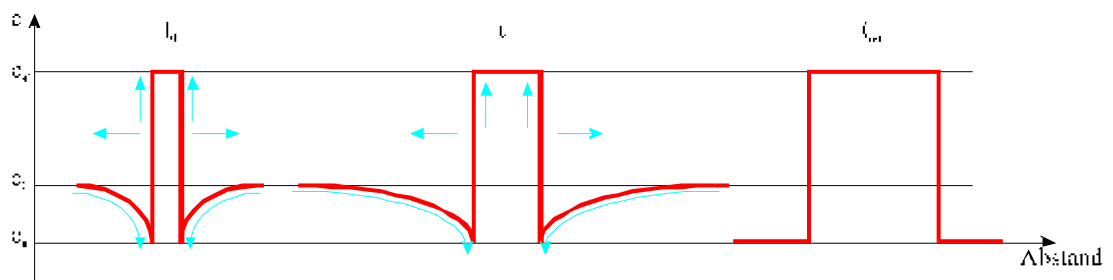


Abb. 2 Entmischung mittels Keimbildung und Wachstum (Bergabdiffusion) [03 HAA, Seite 169].

c_a , c_a' sind die Gleichgewichtskonzentrationen der Endphasen, c_0 ist die Ausgangskonzentration

ii) spinodale Entmischung

Neben der Diffusion und Reifung von Keimen gibt es noch ein weiteres Konzept der Entmischung, die spinodale Entmischung.

Die Spinodale wird durch $\frac{\partial^2 F}{\partial v_B^2} = 0$ (F = freie Energie, v_B = Konzentration der B-Phase) begrenzt.

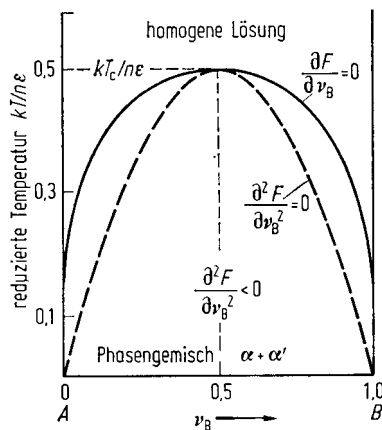


Abb. 3 Löslichkeitskurve und Spinodale nach dem Modell der regulären Lösung [03 HAA, Seite 81]

Das Entscheidende bei dieser Entmischung ist, daß innerhalb der Spinodalen der Komponentendiffusionskoeffizient \tilde{D}_B negativ ist. In der Probe treten überall kleine Konzentrationsschwankungen auf, welche zu spinodaler Entmischung führen, da im Zustandsfeld innerhalb der Spinodalen beliebig kleine Konzentrationsschwankungen ohne Zunahme der freien Energie wachsen können, wenn man sich im Gebiet mit

$$\frac{\partial^2 F}{\partial v_B^2} < 0 \text{ befindet.}$$

Genauer dazu siehe [04 HOR, Seite 40ff., 03 HAA, Seite 183ff.]

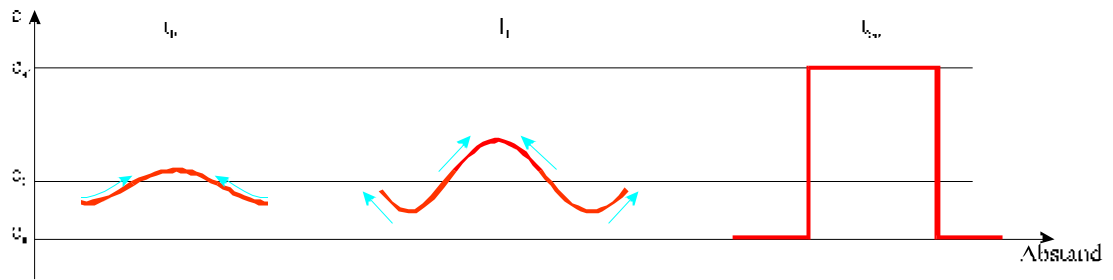


Abb. 4 Spinodale Entmischung (Bergaufdiffusion) [3]

Die Entmischungsvorgänge erzeugen oft ein Spektrum von Ausscheidungsgrößen, wobei die größeren Ausscheidungen auf Kosten der kleineren wachsen.

2.3 Homogene Keimbildung von Ausscheidungen

Zur Beschreibung der Bildung von Keimen mit Radius r müssen verschiedene Energieterme berücksichtigt werden:

i) die freiwerdende Volumenenergie ΔF_v :

$$\Delta F_v = -\frac{4}{3} \pi r^3 f_v \sim -r^3$$

mit f_v : Freier Energiegewinn bei der Bildung einer Ausscheidung, die eine feste Zahl von Atomen beinhaltet

ii) die aufzubringende Oberflächenenergie ΔF_O :

$$\Delta F_O = \tilde{E}_{\alpha\beta} 4\pi r^2 \sim r^2$$

mit $\tilde{E}_{\alpha\beta}$: zwischen $\tilde{E}_{\alpha\beta}$ und der Paarvertauschungsenergie ε aus 2.1 besteht folgender Zusammenhang: $\tilde{E}_{\alpha\beta} \sim \frac{\varepsilon}{a^2}$ (a ist die Größe der kub. prim. Gitterzelle); „Beckersches Modell“

iii) die aufzubringende Verzerrungsenergie ΔF_{el} :

$$\Delta F_{el} = \frac{4}{3} \pi r^3 f_{el} \sim r^3 \quad (\text{kugelförmige Ausscheidung})$$

mit f_{el} : Verzerrungsenergie pro cm^3 Ausscheidung

$$\Rightarrow \Delta F_{ges} = \frac{4}{3} \pi r^3 (-f_v + f_{el}) + 4\pi r^2 \tilde{E}_{\alpha\beta}$$

Bis zu einem kritischen Keimradius r^* erfordert das Keimwachstum Energie, danach läuft es spontan weiter (siehe Abb. 5, ΔF_{ges}). Den kritischen Keimradius erhält man aus der Bedingung

$$\frac{d(\Delta F_{ges})}{dr} \stackrel{!}{=} 0 \quad \Rightarrow \quad r^* = \frac{2\tilde{E}_{\alpha\beta}}{f_v - f_{el}}$$

(Für eine genauere Beschreibung der Energiebeiträge der Keimbildung siehe [03 HAA, Seite 170].)

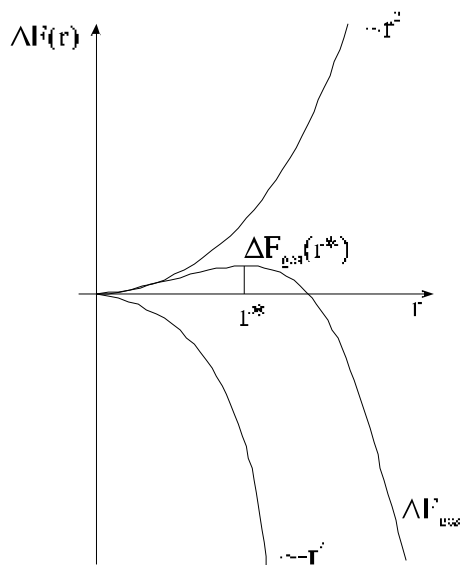


Abb. 5 Energieanteile bei homogener Keimbildung

2.4 Keimwachstum

Wenn man die Umwandlungsvorgänge in zwei Teilprozesse, die Keimbildung und das Keimwachstum unterteilt, so wird bereits deutlich, daß man unter Wachstum nur das von solchen Teilchen versteht, welche die kritische Keimgröße überschritten haben, auch wenn es sich bei der Bildung der Keime schon um Wachstumsvorgänge im weiteren Sinn handelt. Bei den meisten Umwandlungen, mit Ausnahme der martensitischen, handelt es sich um diffusionsgesteuerte Vorgänge, die damit auch das Wachstum der Phasen bestimmen. [10 BÖH, Seite 171ff.]

Zunächst wird ein einzelner Keim der Größe r_0 betrachtet [16 HAI]:

B-Atome strömen im Konzentrationsgradienten auf den Keim zu. Man nimmt an, daß das Profil stationär sei und sich nur die Grenzfläche verschiebt. Die Diffusionsgleichung in Polarkoordinaten lautet

$$\frac{\partial c_B}{\partial t} = \tilde{D}_B \cdot \left(\frac{\partial^2 c_B}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c_B}{\partial r} \right)$$

und hat die stationäre Lösung

$$c_B(r) = c_0 - (c_0 - c'_B) \frac{r_0}{r}.$$

Hieraus folgt der Strom der B-Atome durch

$$j_B(r) = -\tilde{D}_B \frac{\partial c}{\partial r} = -\tilde{D}_B \frac{r_0}{r^2} (c_0 - c'_B).$$

An der Grenzfläche des Teilchens bei r_0 ist also

$$j_B(r_0) = -\tilde{D}_B \frac{(c_0 - c'_B)}{r_0}.$$

Das Volumen V der Ausscheidungen wächst durch die herausströmenden Atome (Ω ist das Atomvolumen)

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} &= -j_B \cdot 4\pi r_0^2 \Omega = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \right) = 4\pi r_0^2 \dot{r}_0 \\ \Rightarrow \dot{r}_0 &= -\Omega j_B = \Omega \tilde{D}_B \frac{c_0 - c'_B}{r_0} \\ \Rightarrow r_0^2(t) - r_0^2 &= \Omega \tilde{D}_B (c_0 - c'_B) \cdot t \end{aligned}$$

Es ergibt sich also für die Wachstumsgeschwindigkeit der Ausscheidungen:

$$r_0 \sim \sqrt{t}$$



Abb. 6 Konzentrationsprofil nahe einer Ausscheidung [03 HAA, Seite 179]; mit c_0 = Ausgangskonzentration, c_k = Konzentration der Ausscheidung, c'_B = Konzentration der Matrix im Gleichgewicht

2.5 Umlösung - Ostwald-Reifung

[03 HAA, 181ff.] Auch wenn die B-Konzentration der Matrix durch die Entmischung den Wert der Löslichkeit erreicht hat, ist das Gefüge noch nicht im Gleichgewicht. In den Grenzflächen steckt nämlich eine erhebliche Energie, die dadurch abgebaut wird, daß sich aus vielen kleinen Ausscheidungen wenige große bilden. Nach einer entsprechenden Herleitung (wie in [03 HAA, Seite 181]) findet man schließlich das Gesetz von Lifshitz-Wagner, mit dem die Umlösung von Ausscheidungsteilchen beschrieben werden kann und das folgende Proportionalität liefert:

$$r_0 \sim t^{1/3}$$

Neben den Ausscheidungsvorgängen werden die magnetischen Grundlagen beschrieben, die für die dann folgende Untersuchungsmethode von Bedeutung sind.

3. Magnetische Grundlagen

3.1 Unterteilung der magnetischen Materialien

3.1.1 Diamagnetismus $\chi_m < 0$: induzierte magnetische Momente

[05 HER, Seite 303f.] Der Diamagnetismus ist eine Eigenschaft aller Körper, der aber durch andere magnetische Erscheinungen überdeckt werden kann. In reiner Form tritt er auf, wenn sich die magnetischen Spinmomente aller Atomelektronen aufheben, wie es bei Elementen mit abgeschlossenen Elektronenschalen der Fall ist (Pauli-Prinzip). Wird ein diamagnetischer Stoff in ein äußeres Magnetfeld gebracht, erzeugt die Wechselwirkung des magnetischen Elektronenbahnmoments mit diesem äußeren Magnetfeld eine Präzession der Elektronenbahn. Durch diese Kopplung der Elektronenbewegung entstehen inneratomare Ringströme, deren Magnetfeld dem äußeren entgegengesetzt ist (Lenzsche Regel). Das gesamte Magnetfeld wird dadurch geschwächt. Aus diesem Grund ist die Permeabilitätszahl $\mu_r < 1$, bzw. die magnetische Suszeptibilität $\chi_m < 0$. Ein typischer diamagnetischer Stoff ist z.B. Kupfer.

3.1.2 Paramagnetismus $\chi_m > 0$: permanente magnetische Momente

Unaufgefüllte Elektronenschalen führen zu nicht vollständig kompensierten magnetischen Spinmomenten, die wiederum regellos verteilt sind. Das äußere Magnetfeld richtet die Elementarmagnete durch seine Wechselwirkung mit dem magnetischen Spinmoment aus. Der vollständigen Ausrichtung steht jedoch die Wärmebewegung der Atome entgegen. Es gilt hier das Curiesche Gesetz:

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (T = \text{Temperatur in K, } C = \text{stoffabhängige Größe})$$

3.1.3 Ferromagnetismus (kollektiver Magnetismus)

Unaufgefüllte **innere** Elektronenschalen (etwa die Elektronen in den d-Schalen), wie sie vor allem bei Übergangsmetallen wie z.B. Eisen vorkommen, führen zu gleichgerichteten Spinnmomenten. Es existieren ganze Kristallbereiche gleicher Magnetisierung in der Größe von etwa 10 µm bis 1mm - sie werden Weißsche Bezirke genannt. Diese sind im unmagnetisierten Zustand regellos verteilt, so daß der Stoff nach außen unmagnetisch ist. Durch Anlegen eines äußeren Feldes werden die Weißschen Bezirke zunehmend in Feldrichtung ausgerichtet.

Die parallele Ausrichtung der magnetischen Spinnmomente wird mit zunehmender Temperatur zerstört bis sie oberhalb der ferromagnetischen Curie-Temperatur T_C völlig aufgehoben ist, und der Stoff paramagnetisches Verhalten aufweist.

Für Temperaturen oberhalb T_C gilt das Curie-Weißsche Gesetz:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$$

3.1.4 Superparamagnetismus

In Proben, deren Durchmesser merklich kleiner als einige 10^2 Å ist, können sich keine Domänenwände ausbilden. Derartige Teilchen, wie z.B. Ausscheidungen in Legierungen, sind einheitlich magnetisiert und durch ihr magnetisches Moment charakterisiert. Ein System aus vielen gleichen derartigen Teilchen verhält sich demnach wie ein paramagnetisches Gas aus Riesenmolekülen. Dieses Verhalten wird als Superparamagnetismus bezeichnet, falls die Teilchen durch thermische Effekte ummagnetisiert werden können. [06 HEL, 280ff.]

Betrachtet man eine Ansammlung von Einbereichsteilchen, jedes mit einer Anisotropie-Energiedichte von $E = K \sin^2\theta$, wobei K die Anisotropiekonstante und θ der Winkel zwischen M_S und der Vorzugsrichtung ist. Sei V das Volumen eines jeden Teilchens, dann ist die Energiebarriere, die überwunden werden muß, um seine Magnetisierung umzukehren, gleich KV . Außerdem gibt es in jedem Material thermische Schwankungen. Schon Néel [15 NEE] machte 1949 darauf aufmerksam, daß, falls Einbereichsteilchen nur klein genug würden, KV so klein wird, daß

thermische Schwankungen die Anisotropiekräfte überwinden können und eine spontane Umkehrung der Magnetisierung stattfindet, sogar wenn kein äußeres Feld anliegt.

Jedes Teilchen hat das magnetische Moment $\mu = M_S V$. Falls ein Feld angelegt wird, so will dieses die Momente der Teilchen ausrichten, was andererseits aber die thermische Energie wieder zunichte macht. Dies entspricht genau dem Verhalten eines normalen Paramagneten, bis auf eine bemerkenswerte Besonderheit:

Das magnetische Moment pro Atom oder Ion in einem normalen Paramagneten beträgt nur einige Bohrsche Magnetonen. Aber ein kugelförmiges Teilchen aus Eisen, ca. 50\AA Durchmesser, beinhaltet 5000 Atome und besitzt so das riesige Moment von $12000 \mu_B$. Um das magnetische Verhalten dieser Teilchen zu beschreiben, verwendet man den Begriff „Superparamagnetismus“. [07 CUL, Seite 410ff.]

3.2 Eigenschaften magnetischer Stoffe

Die Eigenschaften magnetischer Werkstoffe werden durch die Abhängigkeit der magnetischen Induktion B von der Feldstärke H gekennzeichnet. Normalerweise ist $B \parallel H$, und so können beide Größen skalar geschrieben werden. Es gilt (bei isotropen Materialien):

$$B_0 = \mu_0 \mu_r H \quad \left(\begin{array}{l} \mu_0 = \text{Permeabilität im Vakuum} \\ \mu_r = \text{Permeabilität des Stoffes} \end{array} \right)$$

Wirkt ein äußeres Feld auf einen ferromagnetischen Körper ein, so überlagert sich der Feldstärke H die Magnetisierung M des Materials:

$$B = J + \mu_0 H \quad \left(J = \text{magnetische Polarisation} \right)$$

mit $J = \mu_0 M \quad \left(M = \text{Magnetisierung} \right)$

Die Magnetisierung ist also die zweckmäßige Größe, um das induzierte Stoffverhalten ohne den additiven Beitrag des einwirkenden Feldes darzustellen:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H$$

Trägt man die Magnetisierung M eines Stoffes gegen die Feldstärke H auf, so erhält man die sog. Hystereseschleife:

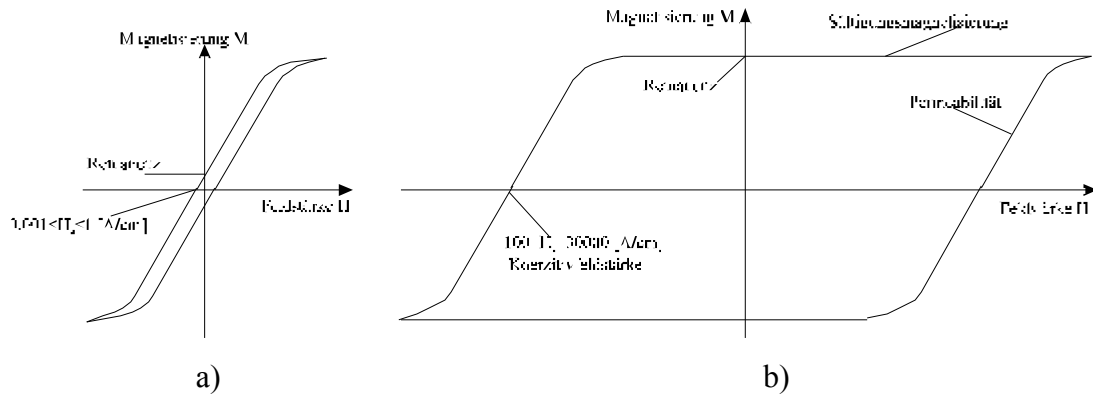


Abb. 7 Hystereseschleifen für (a) weich- und (b) hartmagnetische Stoffe (Maßstabsunterschied!!); abgeändert nach [04 HOR, Seite 283]

Anhand obiger Abbildung können einige fundamentale Begriffe erläutert werden:

- Die **Sättigungsmagnetisierung** gibt an, wie weit man einen Stoff aufmagnetisieren kann. Sie bleibt ab einer gewissen Feldstärke konstant und kann nicht mehr gesteigert werden.
- Die **Remanenz** gibt an, welche Restmagnetisierung ein Stoff ohne äußeres Feld beibehält.
- Die **Permeabilität** ist der Faktor, um den die magnetische Induktion durch Einbringen eines Stoffes in das Feld vergrößert (bzw. verkleinert) wird, also die Steigung der Hysterese.

Die den Unterschied der weich- und hartmagnetischen Stoffe kennzeichnende Größe ist die **Koerzitivfeldstärke** H_c . Sie gibt die Gegenfeldstärke an, die notwendig ist, um den Stoff auf $M=0$ zu entmagnetisieren.

4. Magnetische Meßmethoden

4.1 Bedeutung der Koerzitivkraft

[01 FÖR] Von den mannigfachen physikalischen Größen, die der Messung zugänglich sind, interessieren den Metallkundler besonders die, welche auf die Vorgänge im Werkstoff möglichst empfindlich ansprechen. Zum Beispiel lassen sich Verunreinigungen von Metallen sehr empfindlich durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit ermitteln, wogegen z.B. die Dichte auf Verunreinigungen nicht anspricht.

Es ist im allgemeinen schwierig, die magnetischen Eigenschaften eines einzelnen Ausscheidungsteilchens zu ermitteln. Man hat es immer mit einer Ansammlung von vielen kleinen Teilchen zu tun, die mehr oder weniger gleichmäßig in einer dia- oder paramagnetischen Matrix verteilt sind, in der sie magnetisch voneinander getrennt sind.

[01 FÖR] Bei ferromagnetischen Werkstoffen sind die physikalischen Größen mit der größten Änderungsmöglichkeit die Koerzitivkraft und die Permeabilität. Während die anderen physikalischen Werkstoffgrößen wie Leitfähigkeit, Dichte Ausdehnung usw. sich über den gesamten in der Metallkunde interessierenden Bereich um ein bis höchstens zwei Zehnerpotenzen ändern können, liegt die Variationsmöglichkeit für die Koerzitivkraft und Permeabilität bei fünf Zehnerpotenzen.

Während aber bei der Permeabilitätsmessung die Form des Prüfkörpers in entscheidender Weise in das Meßergebnis eingeht, stellt die Koerzitivkraft eine Größe dar, welche praktisch formunabhängig gemessen werden kann.

(Bei komplizierten Formen tritt, insbesondere bei geringer Entfernung des Meßorgans von der Probe, ein Formeinfluß deshalb auf, weil der Prüfkörper nicht in allen Teilen gleichzeitig die Magnetisierung Null erreicht. Dieser Formeinfluß

verringert sich aber stark, wenn das Meßgerät sich in größerem Abstand von der Probe befindet. Dieser Fall ist bei dem folgenden beschriebenen Meßgerät erfüllt.)

Die Koerzitivkraft ist durch mehrere Eigenschaften als wertvolle und besonders leicht zu messende metallkundliche Größe gekennzeichnet:

1. Wichtiger magnetischer Kennwert
2. Hohe Strukturempfindlichkeit
3. Messung unabhängig von der Prüfkörperform
4. Meßdauer von nur wenigen Sekunden.

4.2 Zusammenhang zwischen Teilchengröße und Koerzitivkraft - magnetische Härtung

[07 CUL, Seite 385ff.] Die Koerzitivkraft von kleinen Teilchen zeigt eine auffällige Abhängigkeit von ihrer Größe. Steigt die Teilchengröße langsam an, so findet man, daß die Koerzitivkraft erst Null ist, dann ansteigt und ein Maximum durchläuft und schließlich wieder abfällt (siehe Abb. 8).

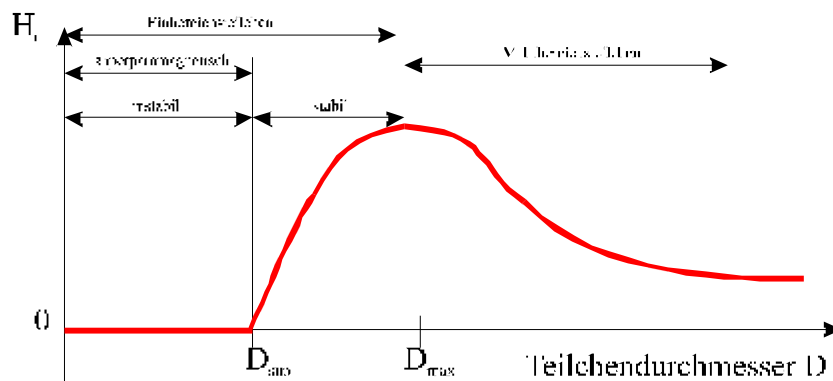


Abb. 8 Schematischer Verlauf der Koerzitivkraft bei kleinen Teilchen [07 CUL, Seite 387]

Dieser Kurvenverlauf ist bis heute durch zahlreiche Experimente bestätigt worden und kann auch teilweise gut erklärt werden. Man kann anmerken, daß das magnetische Verhalten von kleinen Teilchen weitgehend, aber nicht vollkommen, verstanden ist.

[07 CUL, Seite 385ff.] In Abb. 8 ist schematisch aufgezeigt, wie die Teilchengröße in drei Bereiche aufgeteilt ist, begründet in der Beziehung zwischen Koerzitivkraft und Teilchendurchmesser. Beginnend mit kleinem Teilchendurchmesser, kann man in folgende Bereiche unterteilen:

4.2.1 Superparamagnetische Teilchen

Ist der Teilchendurchmesser unter einem kritischen Wert D_{sup} , so ist die Koerzitivkraft gleich Null, wegen thermischer Effekte, die groß genug sind, um eine vorher gesättigte Ansammlung von Teilchen zu demagnetisieren. Diese Teilchen sind klein und regellos verteilt und besitzen ein superparamagnetisches Verhalten.

4.2.2 Einbereichsteilchen

Teilchen mit einem Durchmesser von D_{max} und kleiner verändern ihre Magnetisierung durch Spinrotation. Allerdings können auch mehrere Mechanismen an der Rotation beteiligt sein.

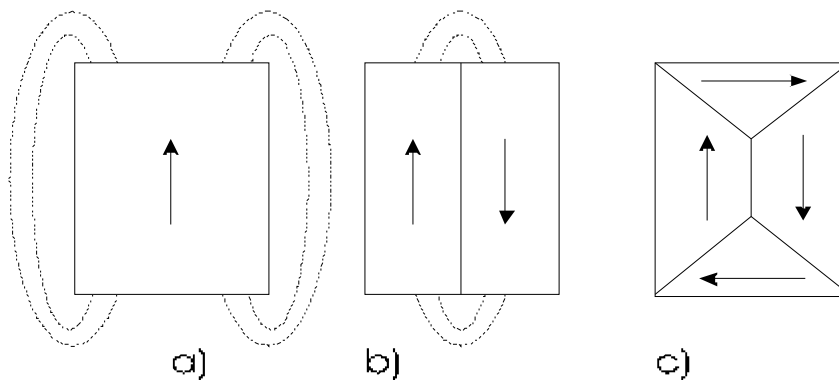
Bis zu einem kritischen Durchmesser D_{max} werden die Teilchen zu sog. Einbereichsteilchen, bei denen die Magnetisierung durch thermische Schwankungen nicht mehr aufgehoben werden kann - es bleibt ein Rest zurück.

Steigt der Teilchendurchmesser bis zu dem kritischen Durchmesser D_{max} , so nimmt auch die Koerzitivkraft zu und erreicht dabei ein Maximum. Dies liegt hauptsächlich daran, daß die thermischen Effekte immer mehr an Bedeutung verlieren, übereinstimmend mit folgender Gleichung:

$$H_c = g - \frac{h}{D^{3/2}} \quad (g, h = \text{Konstanten})$$

Diese Beziehung ist im Gegensatz zu der Beziehung in 4.2.3 gut geklärt (Näheres dazu in [07 CUL, 383ff.]).

4.2.3 Mehrbereichsteilchen



äußeres Feld $H = 0$

Abb. 9 Domänenstruktur bei Mehrbereichsteilchen [04 HOR, Seite 289]

[04 HOR, Seite 289f.] Die Magnetisierung der Einbereichsteilchen entspricht der eines Dauermagneten (Abb. 9a). Seine magnetostatische Selbstenergie ist gegeben durch:

$$u_M = \frac{N}{2\mu_0} J^2 \quad \text{mit} \quad N = \text{Entmagnetisierungsfaktor}$$

$$0 \leq N \leq 1$$

J = magnetische Polarisation

μ_0 = magnetische Feldkonstante

Die Größe von u_M ist im wesentlichen durch das ausgedehnte Streufeld gegeben (Abb. 9a) und kann erniedrigt werden, wenn sich im Kristall zwei Domänen bilden, die in entgegengesetzte Richtungen magnetisiert sind (Abb. 9b), wie es bei Mehrbereichsteilchen möglich ist. Dann ist das Streufeld und damit die magnetostatische Selbstenergie geringer, aber die Domänenwandenergie

$u_B = f_B \cdot \gamma_B$ mit f_B = Domänenwandfläche pro Volumeneinheit

γ_B = Wandenergie

muß aufgebracht werden.

Bei weiterer Unterteilung in parallele Domänen kann schließlich eine metastabile Gleichgewichtsordnung eintreten, wenn die Summe der Streufeldenergie u_M und der Energie aller Blochwände u_B ein Minimum erreicht, also:

$$u_M + u_B \rightarrow \min$$

Weiter kann der magnetische Fluß durch die Einführung von 90° -Blochwänden völlig eingeschlossen werden (Abb. 9c). Anders als bei 180° -Blochwänden hebt sich hierbei die Verzerrung der Bezirke nicht auf, und so muß noch die magnetoelastische Kopplungsenergie u_λ berücksichtigt werden. Die vollständige Bedingung für metastabiles Gleichgewicht der Domänenstruktur ist demnach:

$$u_M + u_B + u_\lambda \rightarrow \min$$

Durch die Entstehung solcher Domänen kann sich die Magnetisierung bei Mehrbereichsteilchen durch sog. Blochwandverschiebungen ändern, was energetisch günstiger ist, als ein Teilchen spontan in eine Richtung umzumagnetisieren (Abb. 10).

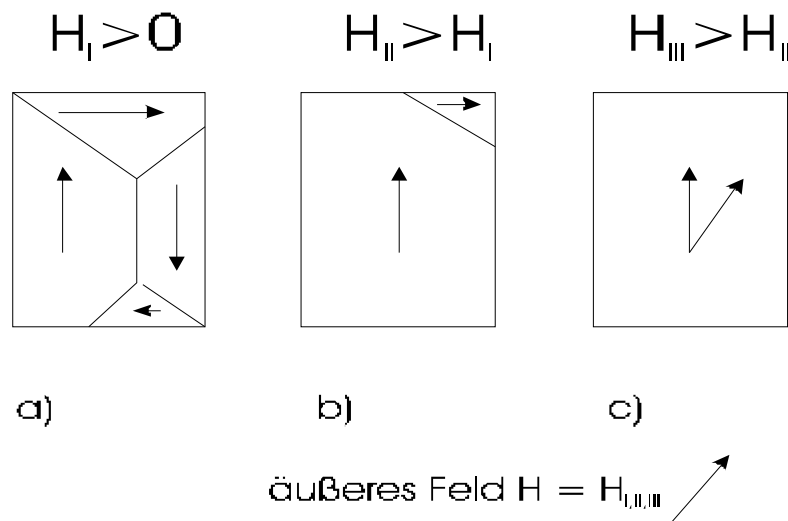


Abb. 10 Blochwandverschiebung durch zunehmendes äußeres Feld H [04 HOR, Seite 289]

Für die meisten Materialien findet man auf experimentellem Weg die folgende Näherung für die Abhängigkeit der Koerzitivkraft vom Teilchendurchmesser D :

$$H_c = a + \frac{b}{D} \quad (a, b = \text{Konstanten})$$

Diese Beziehung ist bis heute noch nicht vollständig theoretisch geklärt.

4.2.4 Experimenteller Kurvenverlauf

Schon Becker [08 BEC] machte Experimente mit einer Cu-2.0%Co Legierung, indem er das Teilchenwachstum der Kobaltausscheidungen mit Hilfe der magnetischen Koerzitivkraftmessung untersuchte. Dazu temperte er die Legierung bei einer Temperatur von 1010°C, bei der 2% Kobalt in Kupfer gut löslich sind und die Legierung somit homogenisiert wurde.

Anschließend, nach ca. 100 min Auslagerung bei 650°C, wuchs das Teilchenvolumen über den kritischen Wert hinaus, und es zeigte sich beginnende Remanenz. Dieser Vorgang kann von 100 min auf 10 min verkürzt werden, wenn man die Auslagerungstemperatur von 650°C auf 700°C erhöht (Abb. 11):

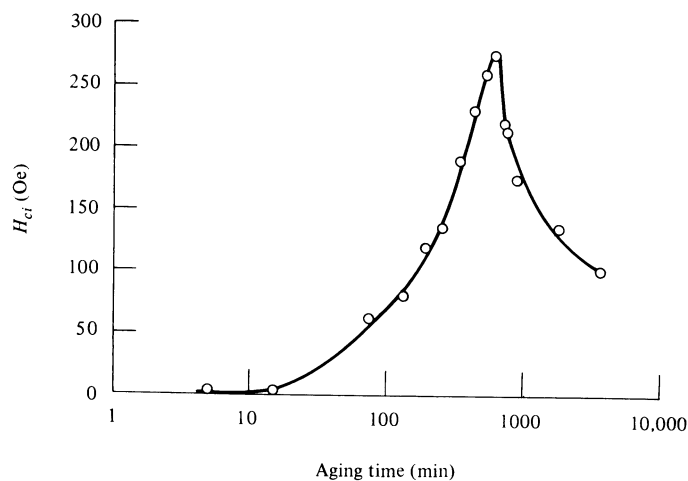


Abb. 11 Koerzitivkraftmessung bei der Auslagerung einer Cu-2,0%Co-Legierung bei 700°C [08 BEC]; Bemerkung: H_{ci} , Abbildung := H_c , sonst

Wie aus Abb. 11 ersichtlich ist, beginnt bei ca. 10 min die Hysterese, bewiesen durch eine endliche Koerzitivkraft der Probe. Weiter kann man in dieser Abbildung an einer Kurve all jene Veränderungen beobachten, die schon bei kleinen Teilchen, wie in Abb. 8, auftraten.

Bis ca. 10 min verhalten sich die Teilchen superparamagnetisch. Bei längerer Auslagerung haben die Teilchen eine Größe erreicht, bei der die thermische Energie die Energiebarriere KV für das Umklappen der magnetischen Momente nicht mehr aufbringt, und so eine endliche Remanenz vorhanden bzw. eine endliche Koerzitivkraft nötig ist. Bei noch weiterem Wachstum steigt die Koerzitivkraft auf ein Maximum bei ca. 800 min und fällt danach wieder ab, da die Teilchen dann zu Mehrbereichsteilchen geworden sind und durch die Bildung von Blochwänden die Streufeldenergie und damit H_c kleiner wird.

5. Versuchsvorbereitungen und -aufbau

5.1 Probenpräparation

Da zu Beginn nicht bekannt war, welche Kobaltkonzentration der Kupfer-Kobalt-Legierung für den Versuch am geeignetsten ist, wurden fünf verschiedene Versuchsproben mit unterschiedlichen Kobalt-Konzentrationen hergestellt:

(Angaben in Gewichtsprozenten!).

Cu-1.0%Co

Cu-1.5%Co

Cu-2.0%Co

Cu-2.5%Co

Cu-3.0%Co

Die Proben von ca. 3g wurden im Lichtbogenofen erschmolzen und dann im Ofen unter Vakuum bei 1000°C homogenisiert.

Nach Testmessungen stellte sich heraus, daß die Cu-2.5%Co-Legierung für den Versuch am geeignetsten ist und die besten Resultate (auch im Hinblick auf die Praktikumsstauglichkeit) erzielt werden können. Deshalb wurden nun stabförmige, ca. 2cm lange Cu-2.5%Co-Proben mit quadratischem Querschnitt von ca. 6mm Kantenlänge hergestellt, die für alle weiteren Messungen und auch für das spätere Praktikum verwendet werden sollen. Proben mit dieser Form passen in die Meßspule mit 9mm Innendurchmesser und haben planparallele Flächen, welche für den mechanischen Härteversuch, bei dem die gleichen Proben verwendet werden, nötig sind.

Für eine genauere Beschreibung der Probenherstellung siehe [17 RIN].

5.2 Auslagerungsofen

Im Verlauf dieser Arbeit wurde ein Ofen konzipiert und in der Feinmechanischen Werkstatt und der Elektrowerkstatt des Instituts gebaut. In ihm werden die Proben während des Versuchs immer wieder unter Schutzgasatmosphäre ausgelagert, um das gewünschte Keimwachstum zu erhalten. Da es sich um einen Vertikalofen handelt, ist er besonders gut dafür geeignet, die Proben nach dem Temper-Vorgang rasch abzuschrecken (wie in 6.1 beschrieben).

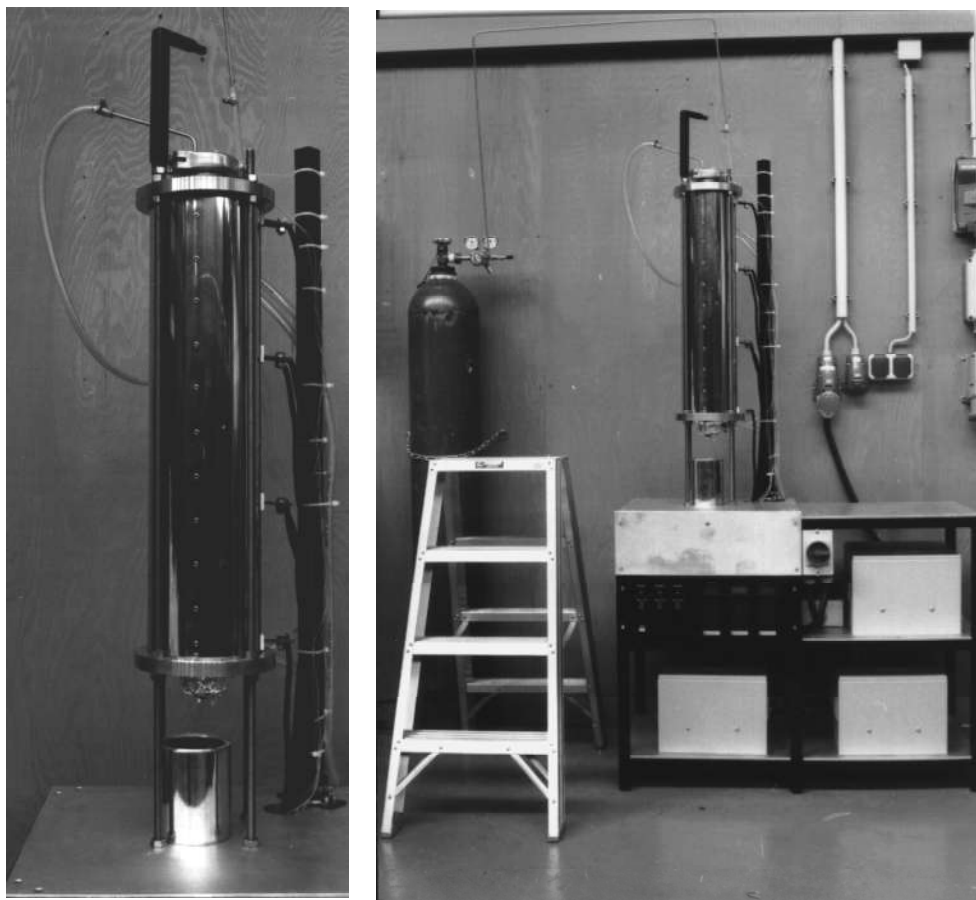


Abb. 12 Gesamtbild Ofen und Detailansicht: 1 Formiergasleitung; 2 Heizsegmente I, II, III; 3 Steuerung der drei Heizsegmente; 4 Transformatoren; 5 Abschreckbecher

Das Herz des Ofens ist ein Quarzglasrohr, das von Heizwendeln umgeben ist, die aus drei getrennt regelbaren Segmenten bestehen. Dadurch ist eine gute Homogenität der

Temperatur in den Heizzonen gewährleistet. Die Proben können somit bei konstanter Auslagerungstemperatur getempert werden. Das Glasrohr wird oben von einer Stahlkappe abgeschlossen, die mehrere Bohrungen für die Thermoelemente (Alumel-Chromel), die Schutzgaseinleitung und für die Probeneinführung hat. Außerdem befindet sich an der Oberseite ein kleiner Galgen, an dem die Proben mit einem Draht aufgehängt werden.



Abb. 13 Detailansicht des Ofenoberteils: 1 Probenhalter (Galgen); 2 Formiergaseinlaß; 3 Kühlschlangen; 4 Thermoelemente für die Steuerung

Als Schutzatmosphäre wird in unserem Versuch Formiergas (92 Vol.% Stickstoff, 8 Vol.% Wasserstoff) verwendet, um die Verunreinigung und die Oxidation der Probenoberfläche zu verhindern.

Unten wird der Ofen von einer Aluminiumfolie abgeschlossen, die möglichst fest an das Rohr gepreßt wird. Somit ist der Ofen von außen gegen Sauerstoff etc. abgeschlossen und eine gute Schutzatmosphäre gegeben.

Um die Bauteile an der Oberseite zu schützen und um zu verhindern, daß die Alufolie zu heiß wird, sind jeweils oben und unten am Glasrohr Wasserkühlschlangen angebracht. (Siehe Abb. 14)

Da obiger Ofen aber erst gebaut wurde und während der Probenherstellung schon Messungen durchgeführt werden mußten, um die „Tauglichkeit“ der Proben zu testen, wurde für diese Zwecke zunächst ein Horizontalofen verwendet, der schon im Labor zur Verfügung stand. Mit einer Hilfsvorrichtung konnte dieser mit Formiergas durchspült werden, um so eine einigermaßen gute Schutzatmosphäre für die Proben herzustellen.

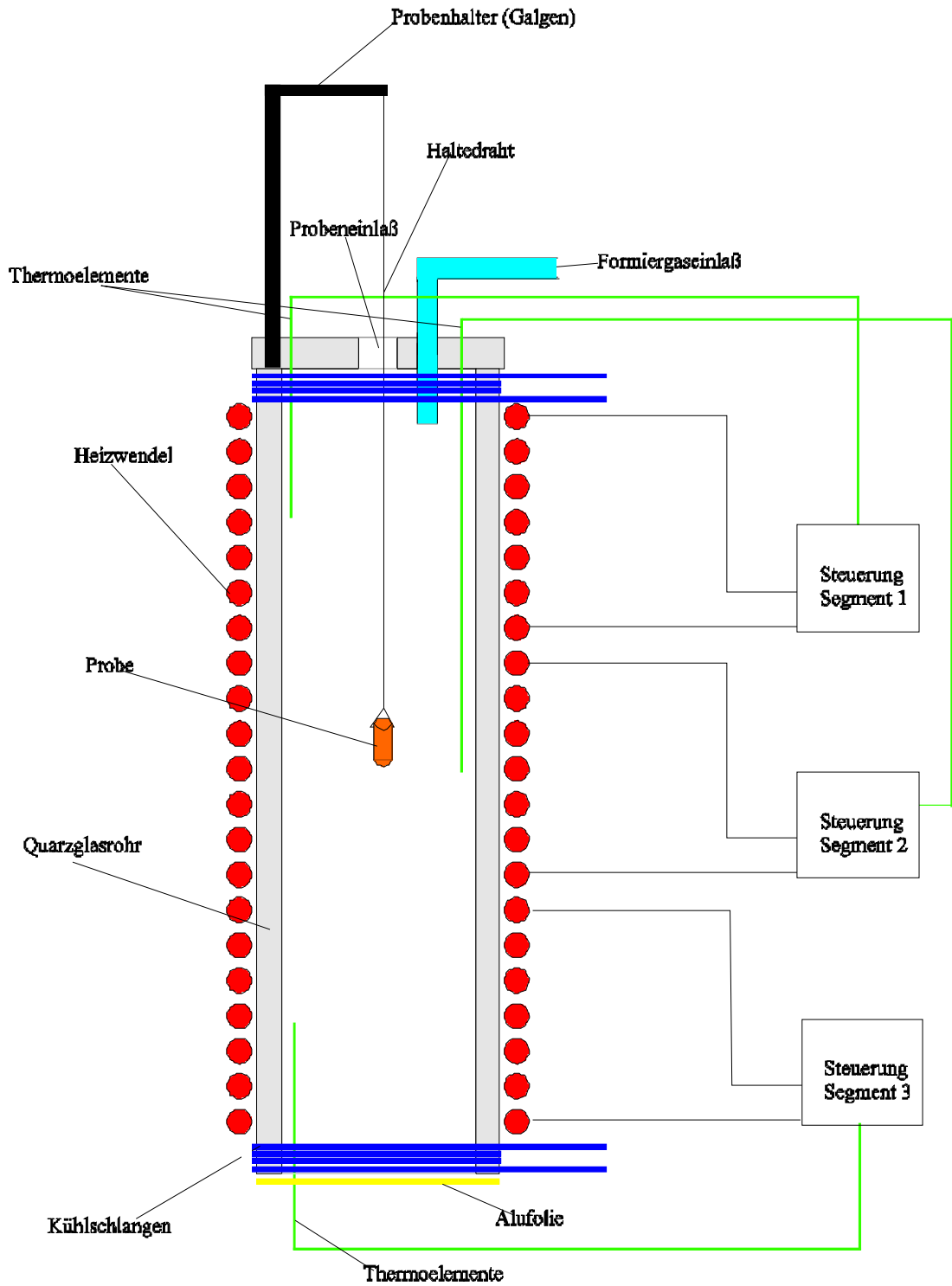


Abb. 14 Skizze des Vertikalofens (nicht maßstabsgetreu! Höhe des gesamten Ofens: 1.90m; Länge des Quarzrohres: 0.80m, Durchmesser: 45mm)

5.3 Meßspule und Förstersonde

5.3.1 Schematischer Grundaufbau

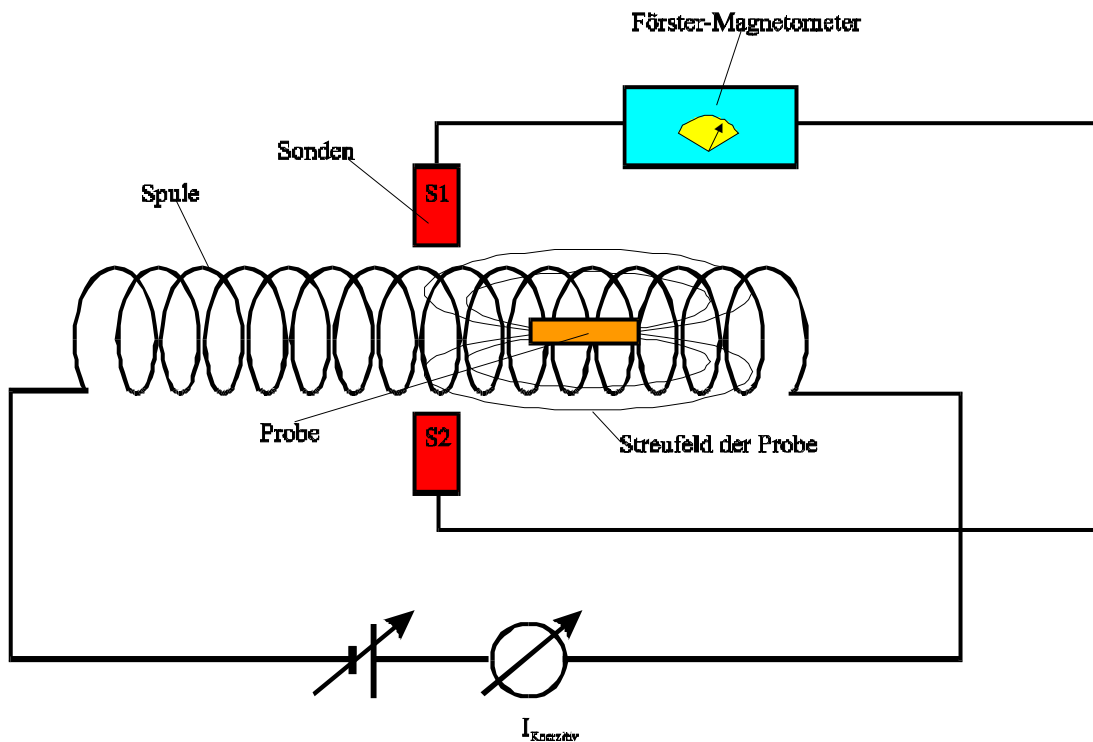


Abb. 15 Versuchsaufbau: Spule, Sonden, Förster-Magnetometer

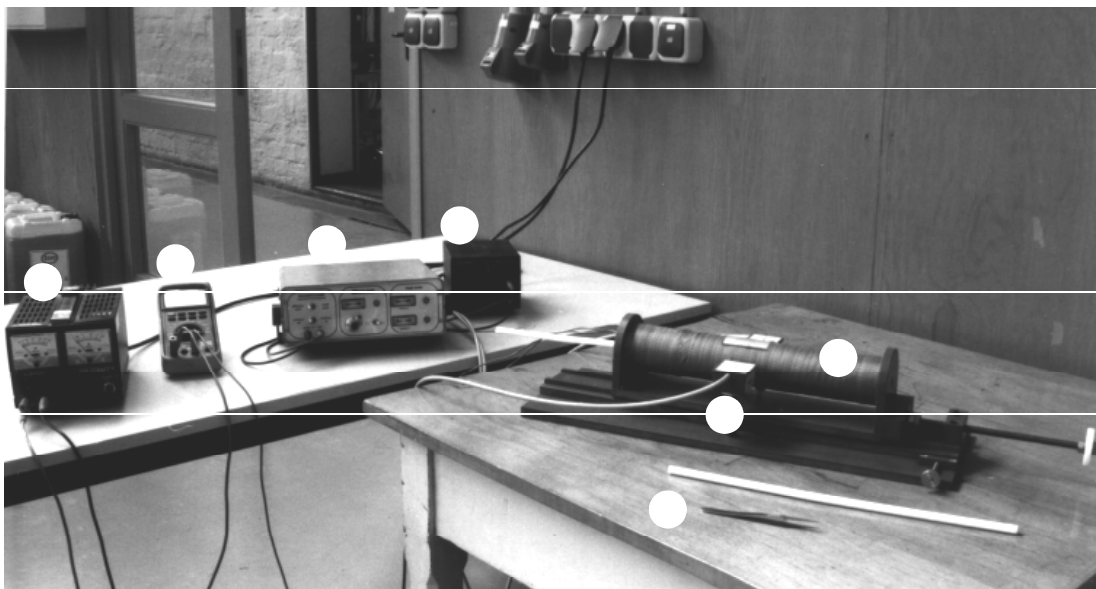


Abb. 16 Versuchsaufbau: 1 Meßspule; 2 Sonden; 3 Förster-Magnetometer; 4 Stromversorgung d. Magnetometers; 5 Strommeßgerät; 6 Trafo für Spulenstrom; 7 unmagnetische Pinzette

Der in Abb. 15, 16 gezeigte Versuchsaufbau dient zur Bestimmung der Koerzitivfeldstärke H_c der Proben.

Die im Vibrating Sample Magnetometer (VSM; max. ca. 1.2 Tesla) aufmagnetisierte Probe wird in die Spule hineingeschoben, so daß mit den in Differenz geschalteten Förstersonden das Streufeld der Probe gemessen und mit Hilfe des Förster-Magnetometers angezeigt werden kann. Beim Einschalten des Spulenstromes wird ein Magnetfeld erzeugt, das so gerichtet ist, daß seine Feldlinien entgegengesetzt zum Streufeld der Probe laufen.

Ist der Spulenstrom so groß, daß das Feld der Meßspule das der Probe gerade kompensiert, kann die Koerzitivfeldstärke bestimmt werden.

5.3.2 Funktionsweise des Förster-Magnetometers

5.3.2.1 Meßprinzip einer Sonde

Ein komfortables Instrument zur Messung von Magnetfeldern ist die Förstersonde. Die beiden Sonden des Förster-Magnetometers bestehen aus einem Trafo mit einem hochpermeablen Kern; dies bedeutet, daß die Flußdichte B in einem schmalen Bereich um $H = 0$ zu dem aufgeprägten Feld H proportional ist und für größeres H in die Sättigung B_{const} übergeht. Zu unserem Zweck werden die Komponenten so gewählt, daß sich die Trafos bei den Magnetfeldern in einem großen Teil der Halbwelle in Sättigung befinden.

Ein primärer Wechselstrom erzeugt ein periodisches Wechselfeld, dem sich ein äußeres Magnetfeld überlagern kann (siehe Abb. 17).

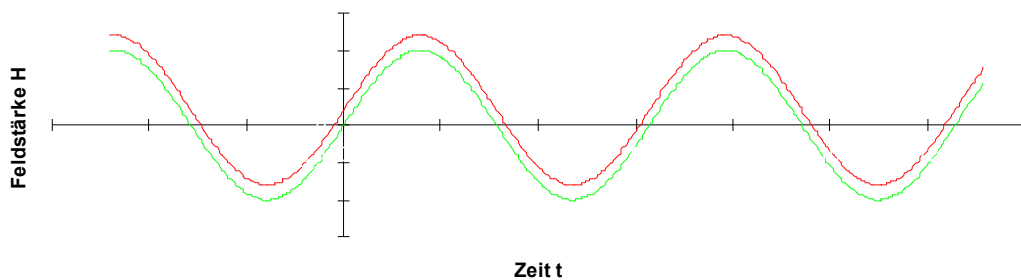


Abb. 17. Primäres Wechselfeld (hell) mit überlagertem Außenfeld (dunkel)

Die resultierende Flußdichte, die sich ergibt, wenn die Trafos in Sättigung betrieben werden, zeigt Abb. 18:

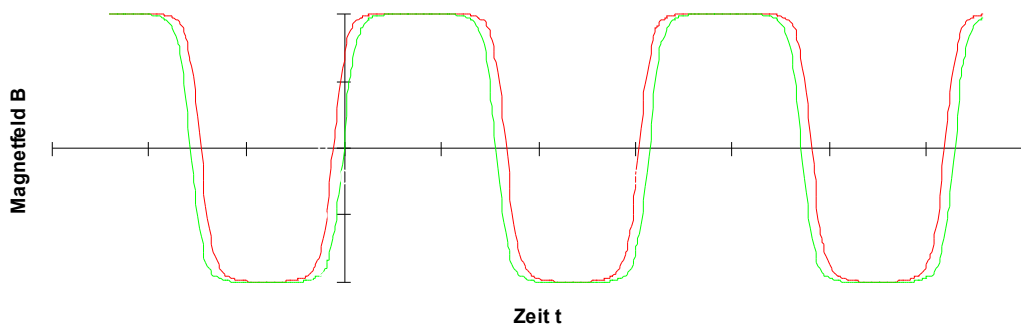


Abb. 18 Resultierende Flußdichte, die sich aufgrund der Magnetfelder in Abb. 17 ergeben

In der Sekundärwicklung wird nach dem Induktionsgesetz $U_{ind} = -\frac{dB}{dt}$ eine Spannung induziert. Durch das aufgeprägte äußere Magnetfeld H wird eine zu H proportionale Verschiebung der Spannungsimpulse in der Sonde bewirkt (Abb. 19).

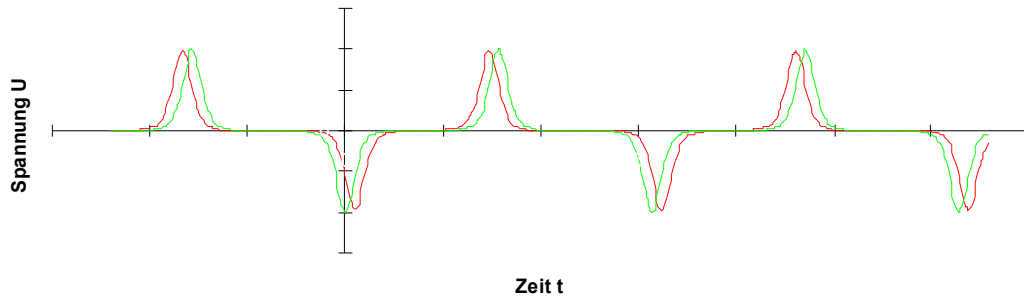


Abb. 19 Durch das aufgeprägte Magnetfeld bewirkte Verschiebung der Spannungsimpulse

5.3.2.2 Anordnung der Sonden im Versuchsaufbau

Das nach seinem Entwickler F. Förster [01 FÖR] benannte hochempfindliche Meßverfahren für magnetische Gleichfelder, basiert auf dem Prinzip eines „Fluxgate Magnetometers“. Es hat unter der Bezeichnung „Förster-Sonde“ für geophysikalische Zwecke, magnetische Untersuchungen, militärische Anwendungen, sowie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eine weite Verbreitung gefunden und wird bei diesem Versuch verwendet.

Dieses Verfahren weist einige bemerkenswerte Eigenschaften auf, die es gerade für magnetometrische Messungen besonders geeignet erscheinen lassen.

Die Empfindlichkeit des Verfahrens liegt einige Zehnerpotenzen höher als bei den bisher für ähnliche Zwecke benutzten Verfahren (10^{-5} - 10^{-6} Oe pro Skalenteil). Dazu kommt, daß die Meßanordnung zur Koerzitivkraftmessung außerordentlich einfach, erd- und störfeldunabhängig (astatisch) aufgebaut werden kann.

Werden die Sonden antiparallel gegeneinander ausgerichtet, erhält man eine hochempfindliche Meßanordnung, die nur noch auf Felddifferenzen zwischen den beiden Orten anspricht. Dabei kommt von allen vorhandenen Felddifferenzen wieder nur die Komponente in der Längsachse der Sonden zur Anzeige.

Werden die beiden Spulensonden in axialer Richtung in gewisser Entfernung voneinander angebracht, so ergibt sich eine Anordnung, die sehr empfindlich auf das Feld der Probe anspricht, dagegen völlig unempfindlich gegen Erd- oder Störfeldwirkungen aus einer Richtung senkrecht zur Sondenachse keine Anzeige ergibt, zum anderen hebt sich die Feldkomponente von Erd- und Störfeldern in Richtung der Sondenachse wegen der Differenzbildung (Sonden antiparallel) heraus.

Nur das Feld der Probe, das ja in bezug auf das Sondenpaar eine Felddifferenz darstellt, wird angezeigt.

Die Sondenanordnung nach Abb. 20 stellt daher ein vollastatisches magnetometrisches Meßsystem dar, dessen Unempfindlichkeit gegen Stör- und Erdfelder weit über die der bekannten astatischen Magnetometer hinausgeht.

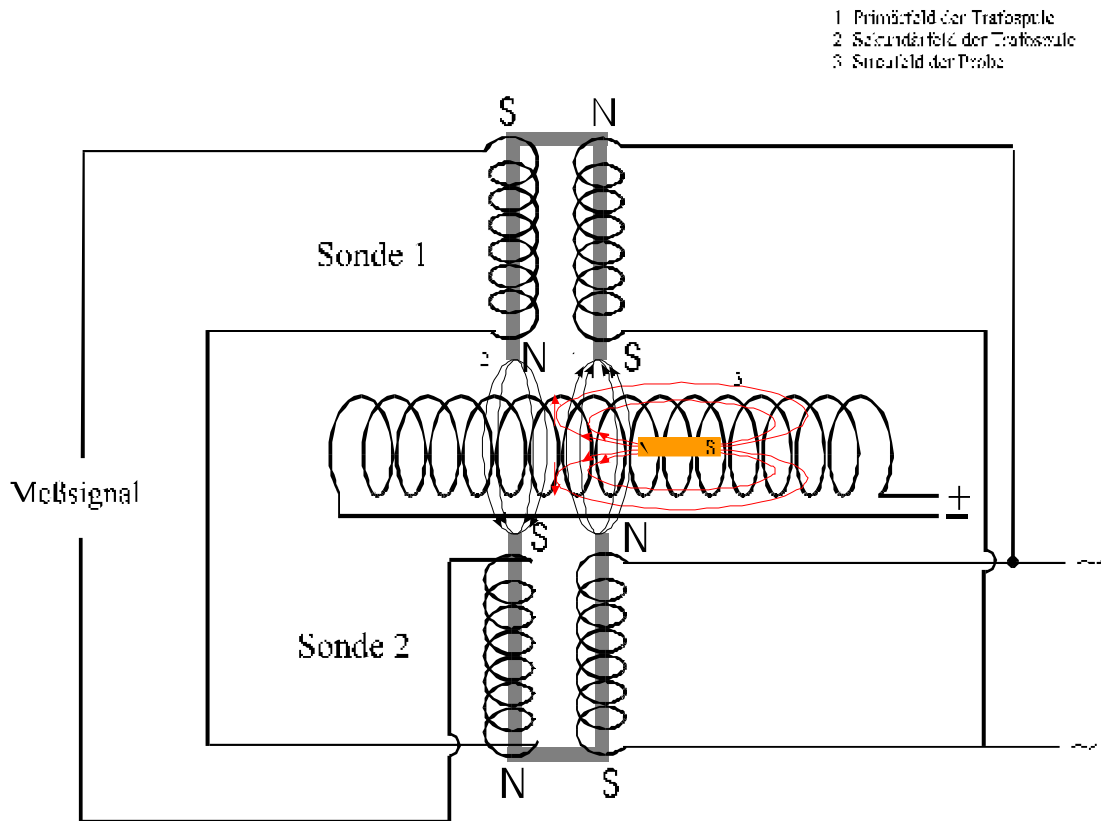
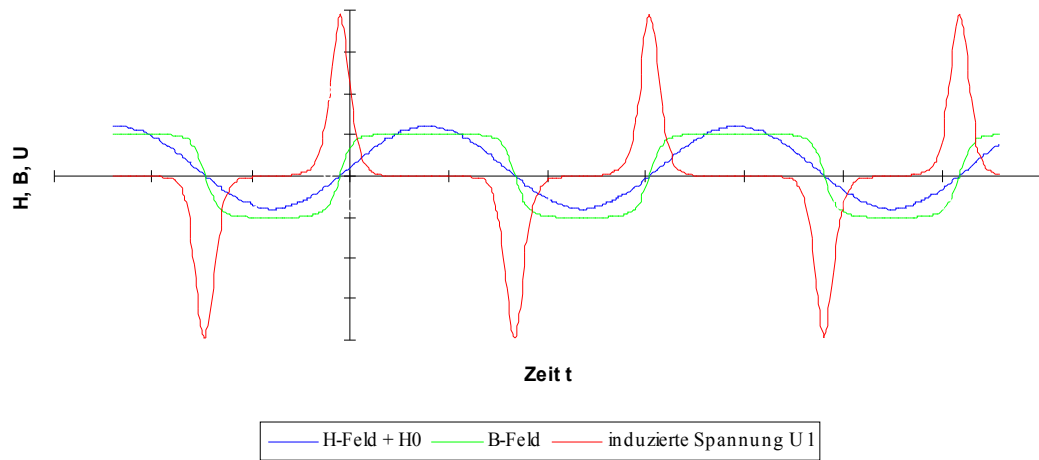


Abb. 20 Sondenschaltung (nicht maßstabsgetreu) [14 WUR, Seite 212]

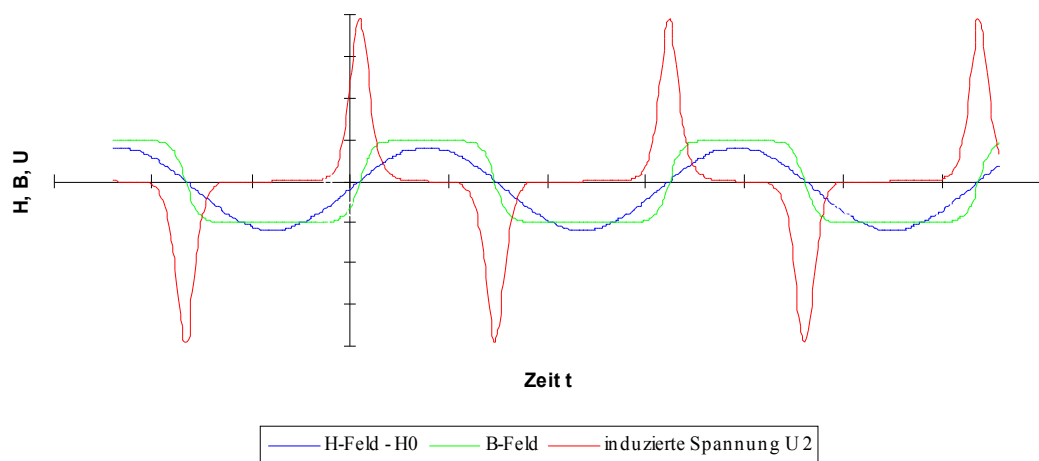
In Abb. 21a und 21b sieht man die Meßsignale der einzelnen Sonden 1 und 2, sowie das Gesamtsignal. Man erkennt, daß das Streufeld der Probe in der einen Sonde eine Verschiebung des Ursprungssignals nach links und in der zweiten Sonde nach rechts bedingt. Bildet man daraufhin die Differenz der beiden Signale (Abb. 21c), so erhält man das eigentliche Meßsignal der in Differenz geschalteten Sonden, das nun die doppelte Frequenz in bezug auf die Einzelsignale hat.

(Ein Schaltplan des Förster-Magnetometers liegt dieser Arbeit bei.)

Sonde 1



Sonde 2



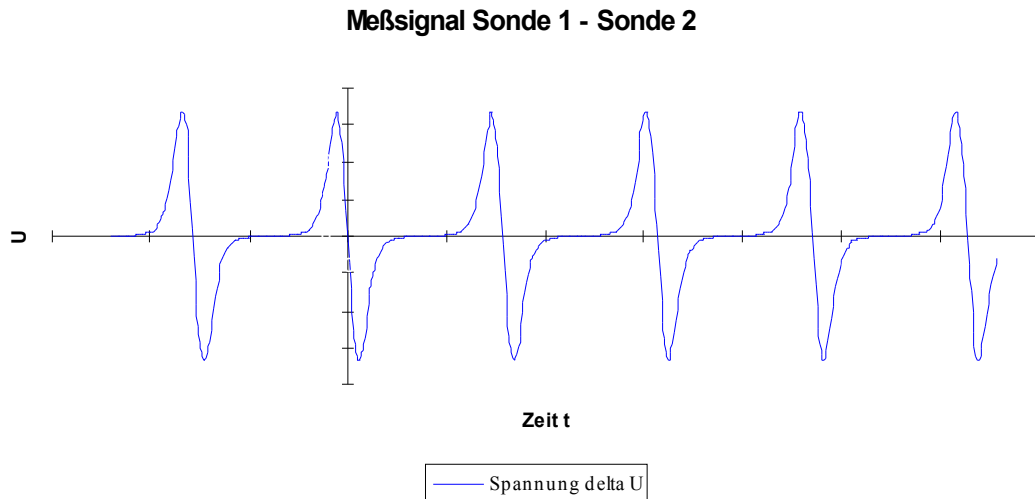


Abb. 21a Meßsignal Sonde 1; **21b** Meßsignal Sonde 2; **21c** Meßsignal Sonde 1 - Sonde 2

5.3.3 Spule und Spulenhalter

Die Meßspule besteht aus einem Spulenkörper aus PVC, aufgebaut aus einem dünnen Rohr in der Mitte (9mm Innendurchmesser, 30 cm lang) und zwei Abschlußscheiben, auf den 6000 Windungen Kupferdraht von 1 mm Durchmesser aufgewickelt sind.

Damit die Wicklungen der Spule möglichst gleichmäßig angeordnet sind und dadurch ein homogenes Feld erreicht wird, wurde diese Arbeit von der Fa. Birling, Augsburg, übernommen. Nach Angaben der Firma ist die so erhaltene Meßspule für eine Belastung von ca. 2A ausgelegt. Daraus errechnet sich nach der Formel für

langgestreckte Spulen $H = \frac{n}{l} \cdot I$ ein maximales Feld von 40000 A/m (= 503 Oe).

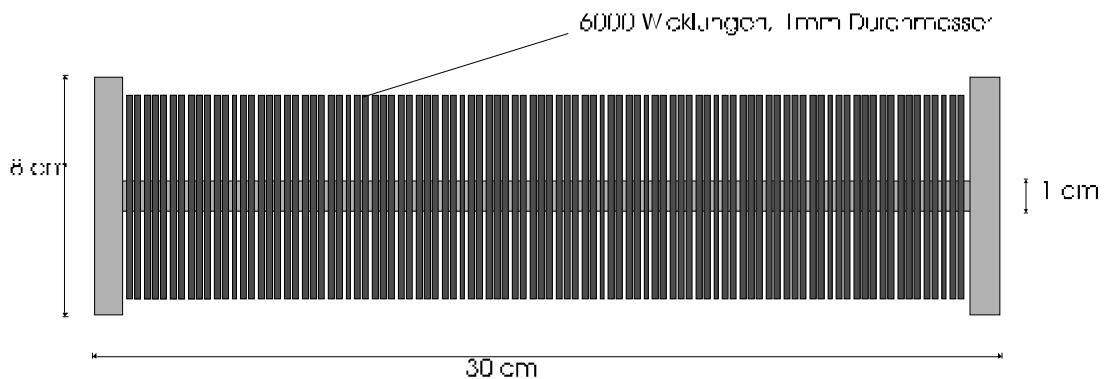


Abb. 22 Spulenskizze

Die Spule ist auf einer PVC-Halterung gelagert, auf der auch die Förstersonden befestigt sind und die es gestattet, die Spule durch entsprechende Stellschrauben genau auf die Sonden einzustellen.

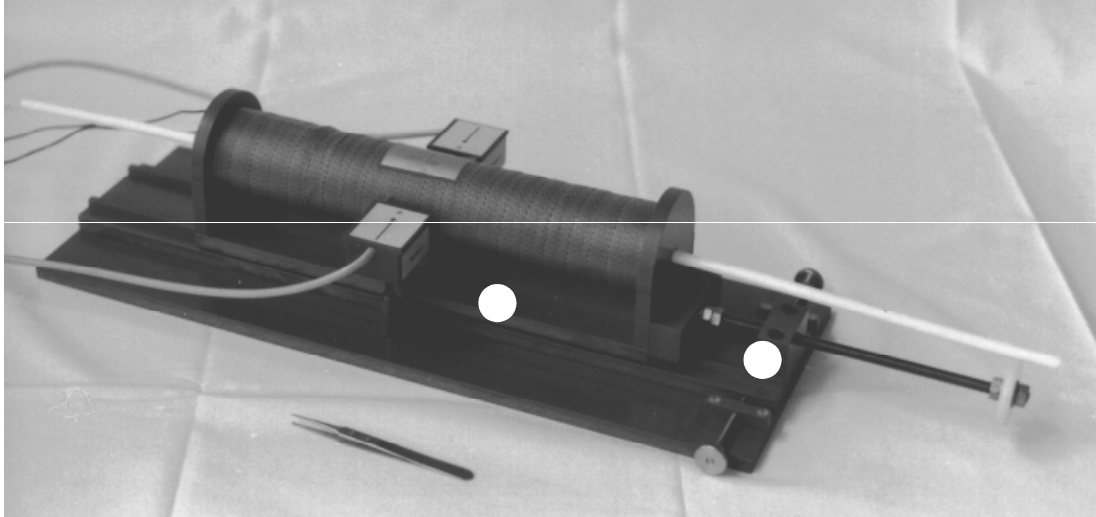


Abb. 23 Spule mit 1 Spulenhaltung und 2 Justiereinheit

Als erstes muß die Versuchsanordnung genau justiert werden, um die Beeinflussung der Sonden durch Störfelder der Erde, der Meßspule, etc. so gering wie möglich zu halten.

Dazu geht man folgendermaßen vor:

1. Die Förstersonden werden exakt im 90° Winkel zu der Spule ausgerichtet.



Abb. 24 Ausrichtung der Sonden senkrecht zur Spule

2. Der gesamte Meßaufbau wird so auf dem Tisch positioniert, daß permanente Magnetfelder der Umgebung (Erdfeld, ...) keinen Ausschlag der Sonden bewirken.
3. Nun wird die Spule mit Hilfe der längs und quer angebrachten Feinstellschrauben so justiert, daß die Streufelder der Spule keinen Einfluß auf die Sonden haben. Dazu werden unterschiedlich starke Ströme (0A, 0.5A, 1A, 2A) durch die Spule „geschickt“ und solange nachjustiert, bis der Stromfluß keinen Einfluß mehr auf die Sonden hat.

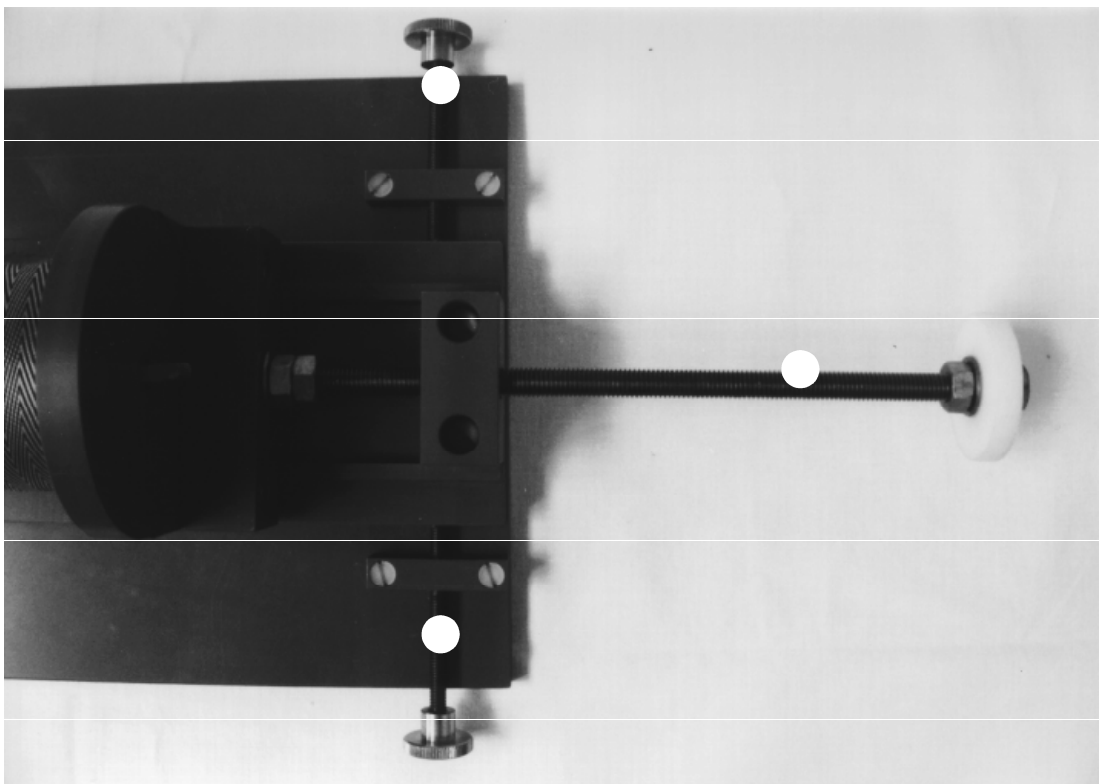


Abb. 25 Justierschrauben

6. Versuchsdurchführung

6.1 Auslagerung der Proben

Die bei 1000°C homogenisierten Proben werden für verschieden lange Zeiten (siehe dazu auch den Ablaufplan im Anhang) bei $800^{\circ}\text{C} < T < 850^{\circ}\text{C}$ ausgelagert. Es werden Temperaturen $T > 800^{\circ}\text{C}$ gewählt, um damit die jeweiligen Auslagerungszeiten im Ofen zu verkürzen, so daß sich das Maximum der Koerzitivfeldstärke schon bei $t = 40\text{min}$ befindet, und der Praktikumsversuch in einer vernünftigen Zeitspanne durchgeführt werden kann.

Dazu werden die Proben mit Hilfe eines Drahtstückchens unter Schutzgasatmosphäre in den Vertikalofen gehängt und nach Ablauf der jeweiligen Auslagerungszeit in dem unter dem Ofen stehenden Wasserbecher abgeschreckt, indem der Draht an der Oberseite des Ofens gelöst wird, die Probe auf ihrem Weg nach unten die Alufolie durchschlägt und in den Becher fällt. Da Kupfer ein sehr guter Wärmeleiter ist, kann man davon ausgehen, daß die Proben hinreichend schnell und gleichmäßig abgeschreckt werden ($t_{\text{abkühlen}} \ll t_{\text{auslagern}}$).

6.2 Aufmagnetisierung

Nach jedem Auslagerungsschritt wird die Probe im homogenen Magnetfeld eines Elektromagneten aufmagnetisiert. Da für den Versuch kein eigener Elektromagnet zur Verfügung stand, wird zum Aufmagnetisieren der Magnet der VSM-Meßapparatur, der ein sehr homogenes Feld bis zu einer Stärke von ca. 1.2 Tesla liefert, benutzt. Für unsere Zwecke reichten aber Felder von ca. 700-800 mT vollkommen aus, um die Proben in 5 sec vollständig zu magnetisieren.

6.3 Messung der Koerzitivfeldstärke H_c

Ist die Versuchsanordnung richtig ausgerichtet, wird die Probe mit Hilfe eines Plastikstabes in die Spule geschoben, bis das Magnetometer einen maximalen Ausschlag zeigt.

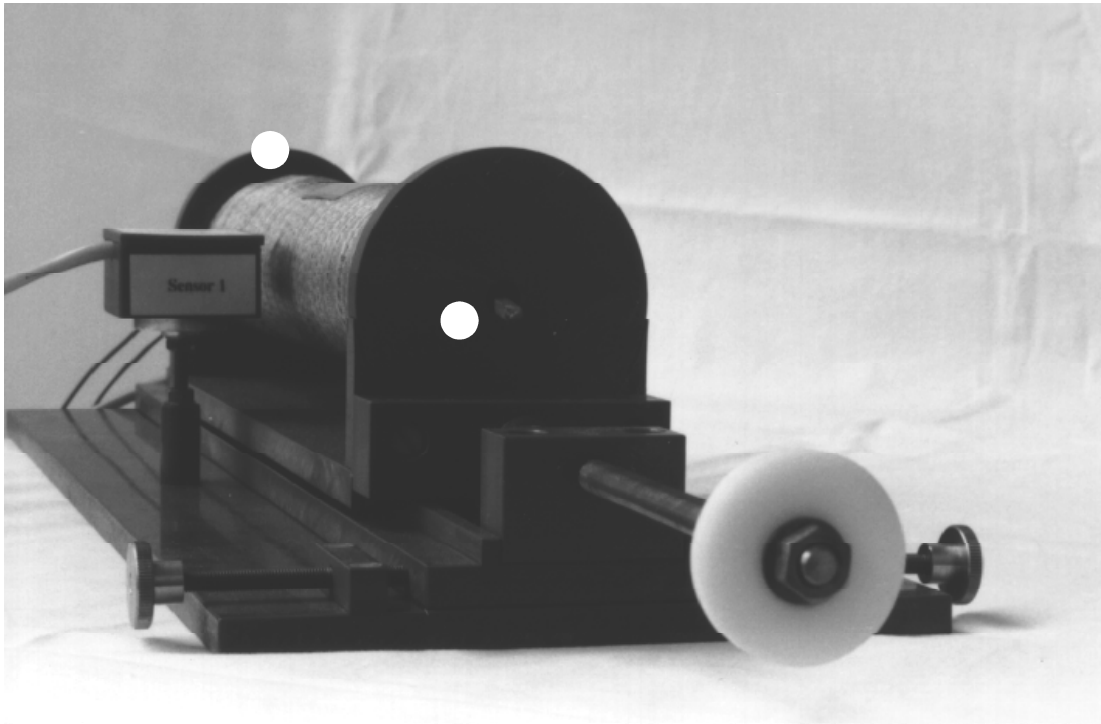


Abb. 26 Meßspule (1) mit Öffnung (2) für die Probe

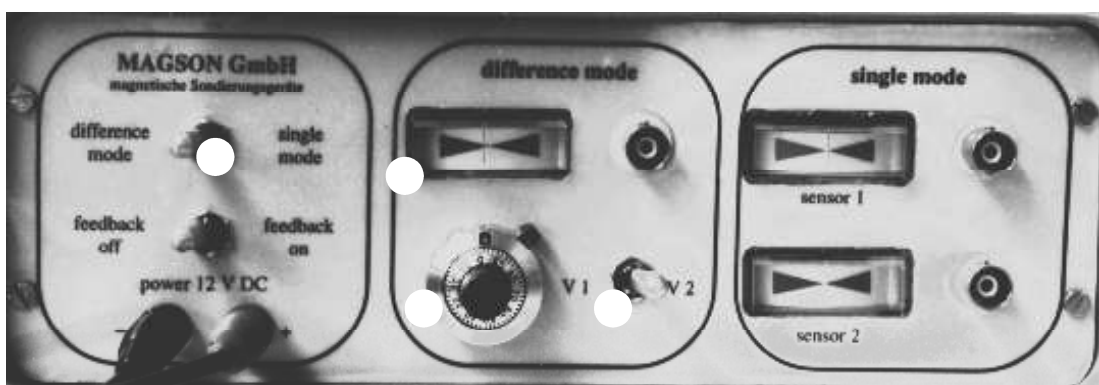


Abb. 27 Anzeige des Magnetometers mit (1) Modusschalter, (2) Differenz-Modus-Anzeige, (3) Empfindlichkeitsschalter, (4) Nachjustierskala

Jetzt erhöht man langsam den Spulenstrom, bis der Ausschlag des Magnetometers auf Null zurückgegangen ist. Dies muß sehr behutsam geschehen, da ein zu großer Spulenstrom die Probe nachteilig beeinflussen könnte und so das Meßergebnis verfälschen würde.

Mit Hilfe des für die Kompensation benötigten Stromes $I_{\text{koerzitiv}}$ kann man mit der Formel für langgestreckte Spulen

$$H = \frac{n}{l} \cdot I$$

(n = Wicklungszahl der Spule (hier: 6000) , l = Länge der Spule (hier: 30 cm))

die Koerzitivfeldstärke berechnen, die nötig ist, um die Probe zu entmagnetisieren.

Achtung: Während der Justierarbeiten und des eigentlichen Meßvorganges dürfen in der Nähe der Meßapparatur keine Gegenstände bewegt werden, auf die das Magnetometer anspricht. Dazu gehören Armbanduhren(!), Metallstühle, Schlüssel etc.

7. Meßergebnisse

7.1 Bestimmung der geeigneten Probenzusammensetzung und erste Ergebnisse

7.1.1 Tempern der Versuchsproben Cu-1,0% - 3,0%Co bei 800°C

Wie oben schon erwähnt, wurden die ersten Messungen mit fünf Proben unterschiedlicher Kobalt-Konzentrationen durchgeführt, um herauszufinden, welche Konzentration für die Messungen am geeignetsten ist. Da die Koerzitivkraft direkt proportional zum Spulenstrom ist, wird bei den folgenden Diagrammen auf eine Umrechnung verzichtet, da es hierbei nur auf das qualitative Ergebnis ankommt.

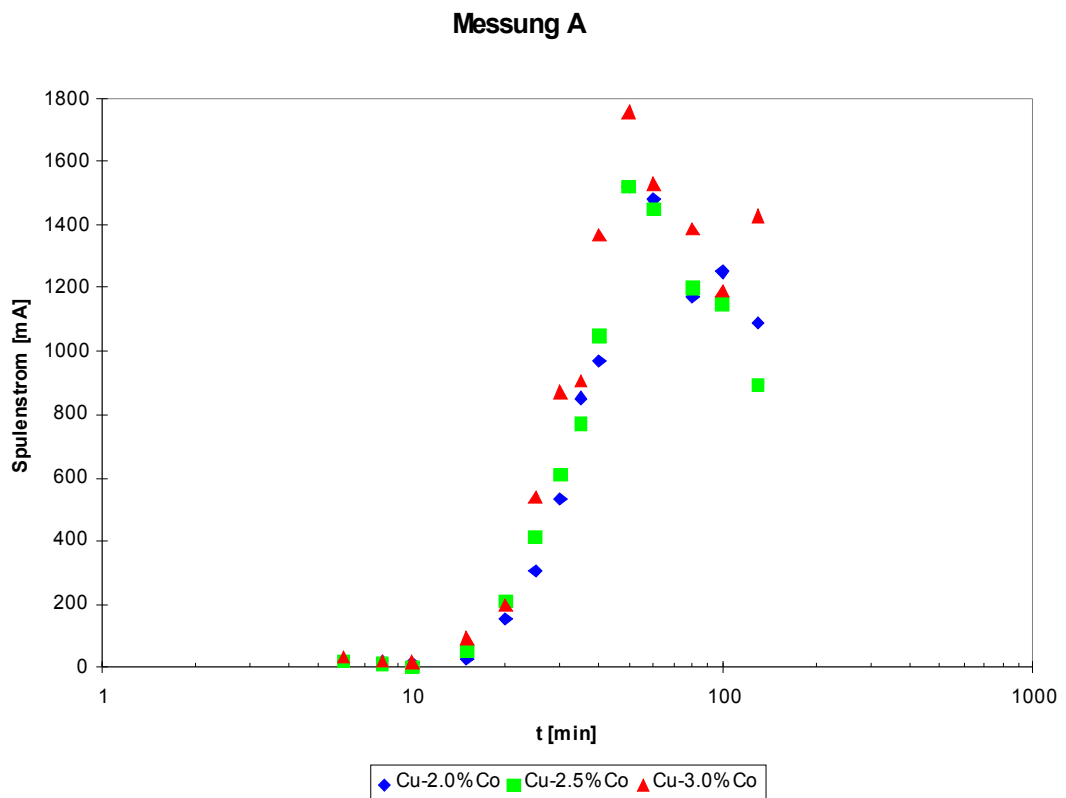


Abb. 28 Messung der Proben bei 800°C Auslagerungstemperatur

Aufgrund der Messungen stellte sich heraus, daß die Proben mit 1,0% und 1,5% Kobalt für die Koerzitivkraftmessung nicht geeignet sind, da für diese Proben keine

Koerzitivkräfte gemessen werden konnten. Sieht man sich das Phasendiagramm von Kupfer und Kobalt in Abschnitt 2.1 genau an, so wird deutlich, daß sich das System bei diesen Konzentrationen und einer Temperatur von 800°C immer noch in dem Gebiet befindet, in dem sich die beiden Komponenten mischen lassen und sich somit keine Ausscheidungen bilden können. Hierzu müßte man die Proben bei einer Temperatur tempern, die tiefer als 800°C ist, um in das Zweiphasengebiet zu gelangen, bei dem sich die Legierung dann entmischen würde. Allerdings würde die Versuchsdauer dann deutlich zunehmen, da die Vorgänge hauptsächlich diffusionsgesteuert ablaufen. Darauf wurde schon in Abschnitt 4.2.4 hingewiesen. Es wurden deshalb nur die übrigen Proben in obiges Diagramm eingezeichnet!

7.1.2 Wiederholungsmessung der Proben bei 800°C

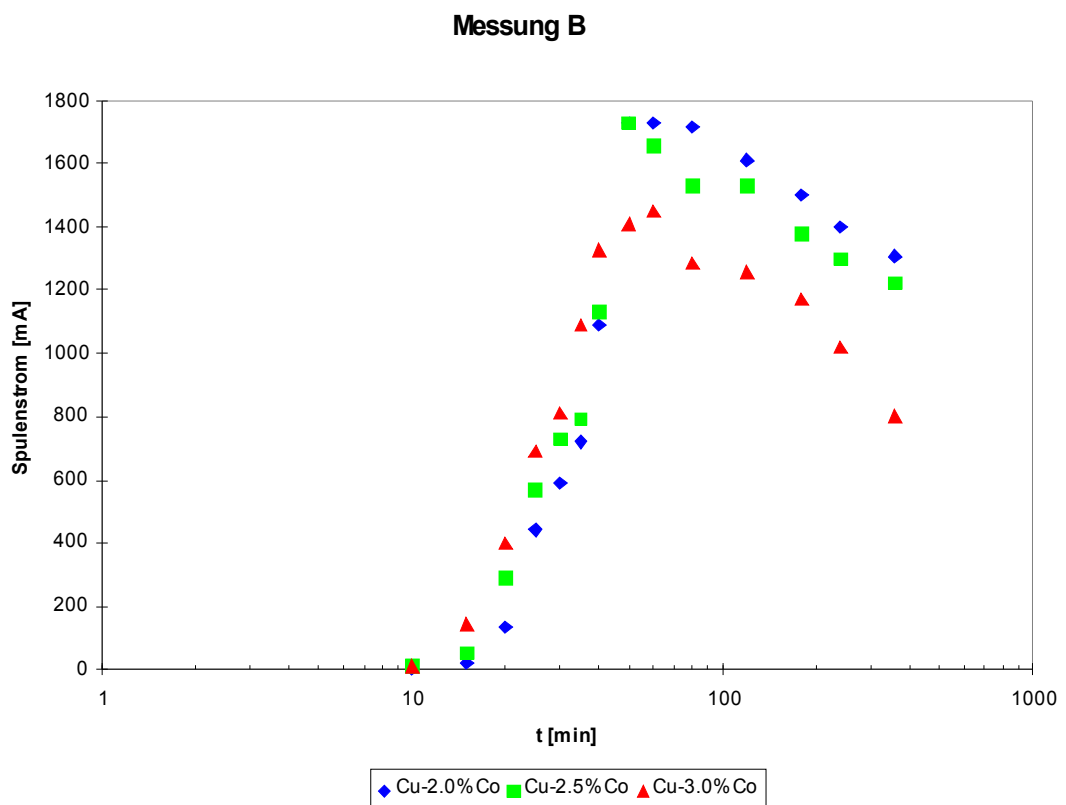


Abb. 29 Wiederholungsmessung bei 800°C Auslagerungstemperatur

Auch bei der Wiederholungsmessung stellten sich die 1,0% und 1,5% Kobalt Proben als ungeeignet heraus. Die restlichen Kurven zeigten aber wieder gute

Meßergebnisse und ein Vergleich der beiden Messungen liefert folgende (erste) Resultate:

7.1.3 Erste Ergebnisse

Vergleich Messung A und B

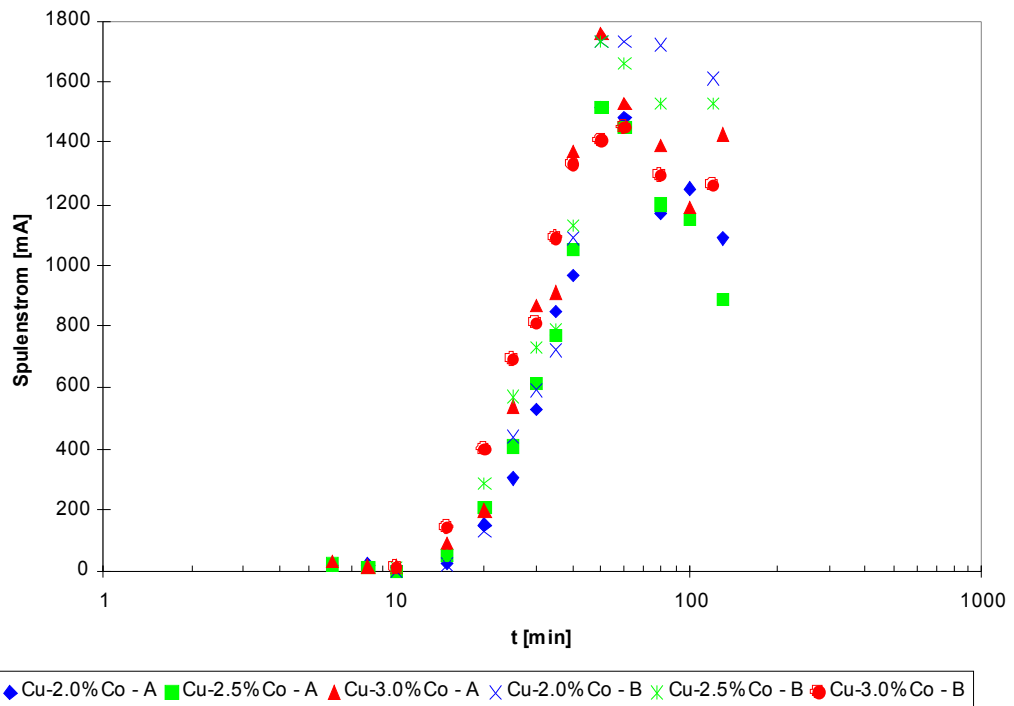


Abb. 30 Vergleich der Messungen A und B bei 800°C Auslagerungstemperatur

1. Bei beiden Messungen steigen die Kurven erst nach ca. 10 min an und sind bis dahin gleich Null.
2. Beide Messungen zeigen bei ca. 40 min ein Maximum der Kurven, wobei jedoch die jeweiligen Maximalwerte der Kurven gleicher Proben unterschiedlich hoch sind.
3. Der Abfall der Kurven, nach Erreichen des Maximums, ist bei der zweiten Messung deutlich geringer.

Zusammenfassend kann man festhalten:

In erster Näherung liefern beide Messungen ein reproduzierbares Ergebnis, zumindest was die Lage der Maxima und den qualitativen Verlauf der Kurven betrifft. Die Kurven verlaufen zuerst auf der Nulllinie, steigen dann relativ steil an, durchlaufen ein Maximum und fallen dann wieder ab. Daß die beiden Messungen keine identischen Ergebnisse liefern, kann an verschiedenen Faktoren liegen:

1. Die Messungen wurden noch mit dem Horizontalofen durchgeführt, und somit war eine exakte Einhaltung der Temperzeiten und die rasche Durchführung des anschließenden Abschreckvorgangs nicht gewährleistet.
2. Durch die mehrmalige Auslagerung der Proben im Ofen kann eine Verunreinigung nicht ausgeschlossen werden (Bildung einer Oxid-Schicht trotz Formiergas).
3. Beim Abschreckvorgang haben sich kleine Teile der Proben abgelöst, was eine geringfügige Konzentrationsveränderung bewirkt.

7.2 Tempern der Versuchsproben Cu-2,0% - 3,0%Co bei 850°C

Nach [07 CUL, Seite 421] kann das Teilchenwachstum beschleunigt werden, indem man die Auslagerungstemperatur erhöht. Um dies zu überprüfen, wurde eine weitere Messung bei 850°C durchgeführt.

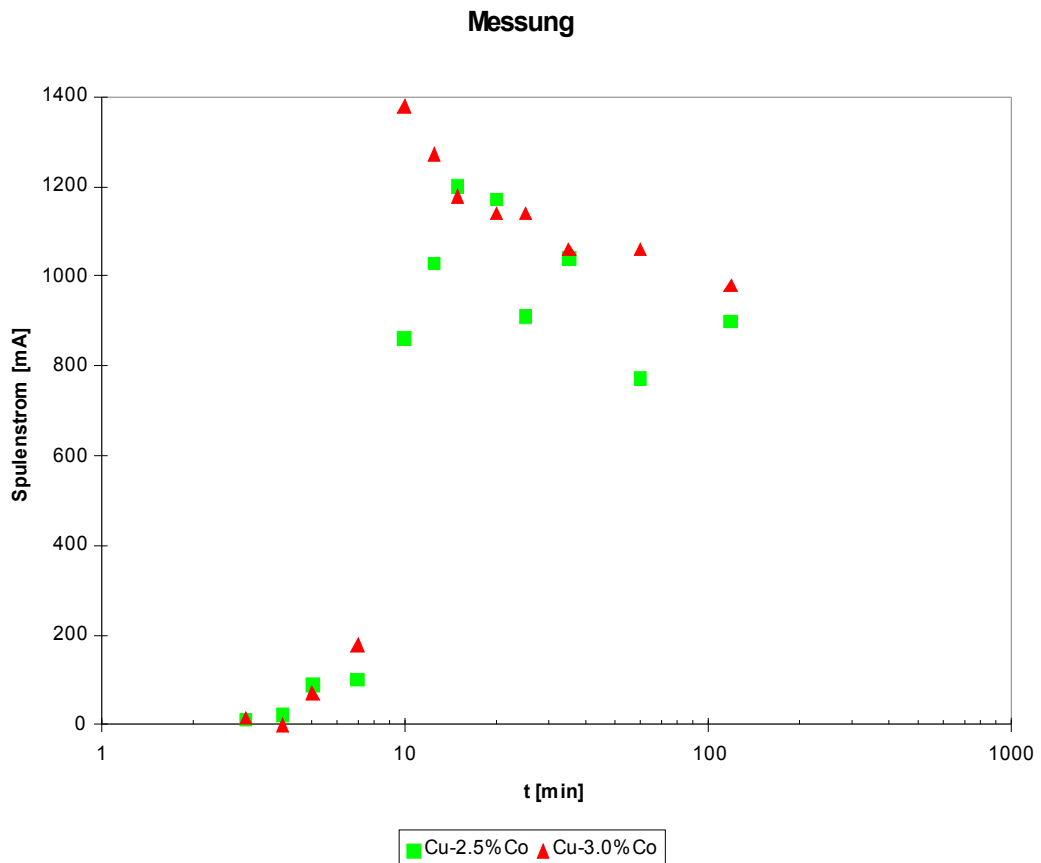


Abb. 31 Messung bei 850°C Auslagerungstemperatur

Man stellt fest, daß die Koerzitivkraft viel schneller ansteigt und der Paramagnetismus kaum feststellbar ist (bei kleinen Auslagerungszeiten), aber es war sehr schwierig, bei diesem schnellen Keimwachstum genaue Auslagerungszeiten einzuhalten, da sich die Intervalle stark verkürzten. Ebenso litt die Genauigkeit der Meßergebnisse unter dieser raschen Wachstumsgeschwindigkeit, so daß man eine große Streuung erhielt.

Bei dieser Messung stellte sich die 2.0%-Kobalt Probe als ungeeignet heraus, da an ihr während des gesamten Auslagerungsprozesses keine endliche Koerzitivkraft gemessen werden konnte. Verantwortlich dafür sind wieder die gleichen Gründe wie in Abschnitt 7.1.1. Denn bei 850°C befindet sich die Probe mit 2.0%-Kobaltgehalt nicht mehr im Zweiphasengebiet und entmischt sich somit nicht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich höhere Temperaturen als 800°C nicht für einen Praktikumsversuch eignen, da hierbei nicht die geforderte Präzision gegeben ist, und die Messungen auch bei ungenauerem Arbeiten gute, reproduzierbare Ergebnisse liefern sollen.

7.3 Messung der endgültigen Probe

Als Ergebnis aus den Vorversuchen zeigte sich die Probenzusammensetzung Cu-2.5%Co als am geeignetsten, da die Proben mit dieser Konzentration die besten und gleichmäßigsten Ergebnisse lieferten.

Mit der Fertigstellung und unter Benutzung des Vertikalofens konnten exaktere Auslagerungszeiten und kürzere Abschreckzeiten eingehalten werden. Außerdem liefert dieser Ofen einen sehr homogenen und stabilen Temperaturverlauf innerhalb der Heizröhre, was sich positiv auf die Messung ausgewirkt hat.

Es zeigt sich folgendes Verhalten:

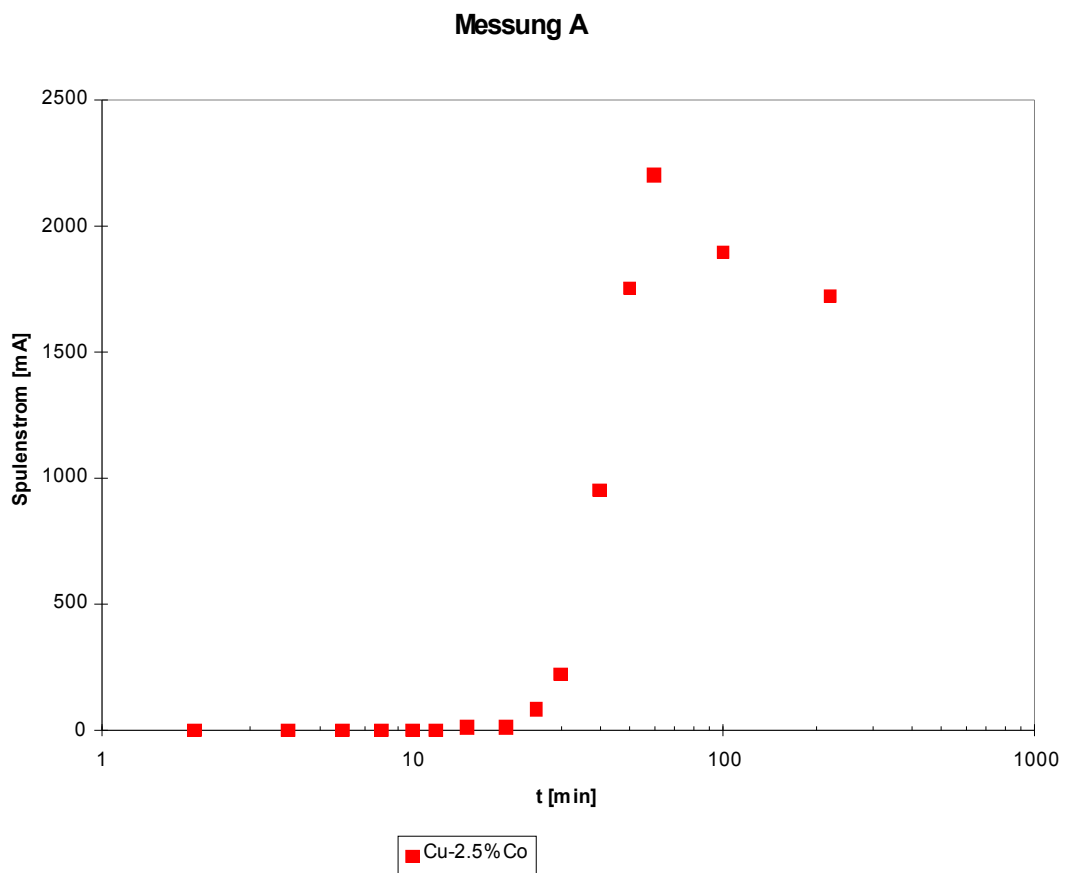


Abb. 32 Messung der Probe Cu-2.5%Co bei 800°C Auslagerungstemperatur

Auch mit dieser Probe wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen und um zu sehen, ob mit dem

Vertikalofen und den dadurch bedingten exakteren Auslagerungszeiten bessere Ergebnisse erzielt werden.

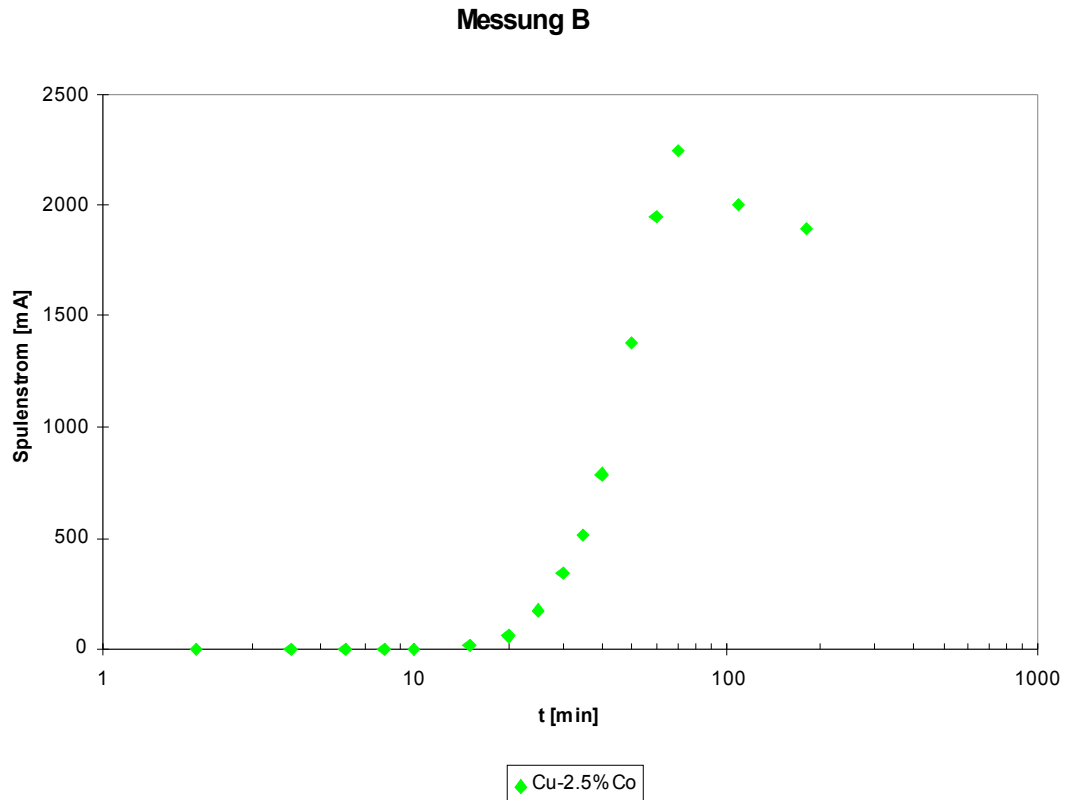


Abb. 33 Wiederholungsmessung der Probe Cu-2.5%Co bei 800°C Auslagerungstemperatur

Damit die beiden Messungen miteinander verglichen werden können, sind sie im folgenden Diagramm gemeinsam eingezeichnet. Außerdem wurde die Probe nach der letzten Messung noch für einen längeren Zeitraum von 49 Stunden ausgelagert, um zu erkennen, ob und bei welchem Wert sich die Probe „einpendelt“ und ihre Sättigungskoerzitivfeldstärke erreicht. Dabei erhielt man die „dreieckigen“ Meßwerte:

Messung A - B und Langzeitmessung

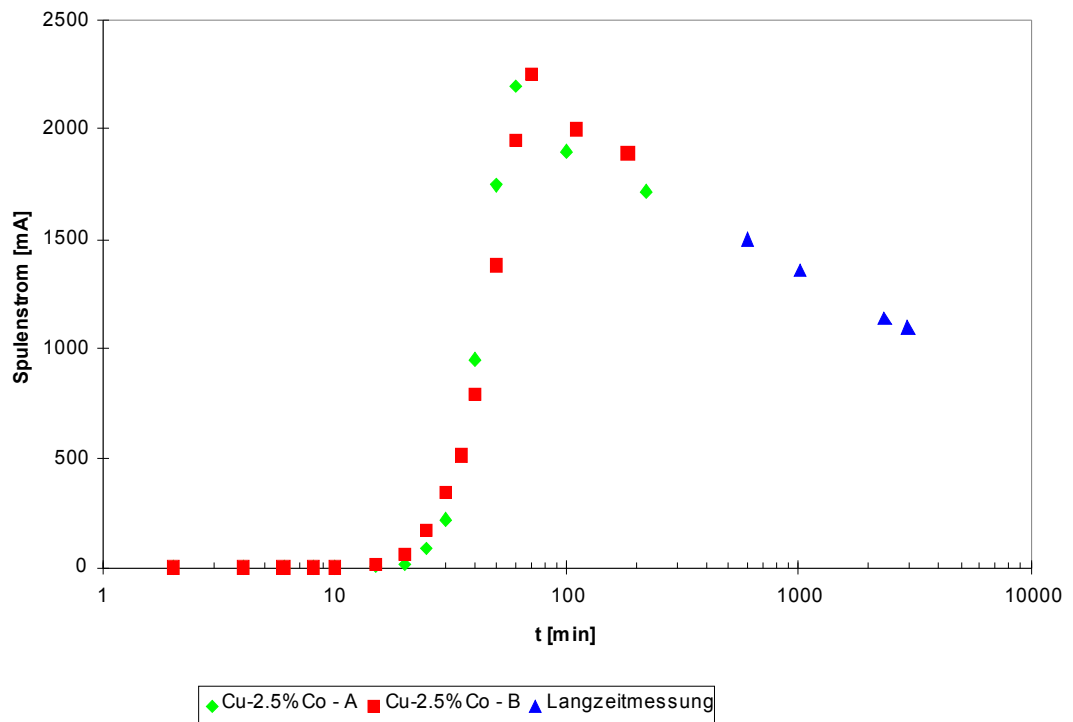


Abb. 34 Vergleich der Messungen A und B bei 800°C Auslagerungstemperatur und Langzeitmessung

7.4 Vergleich der Meßergebnisse mit der Theorie - Zusammenfassung

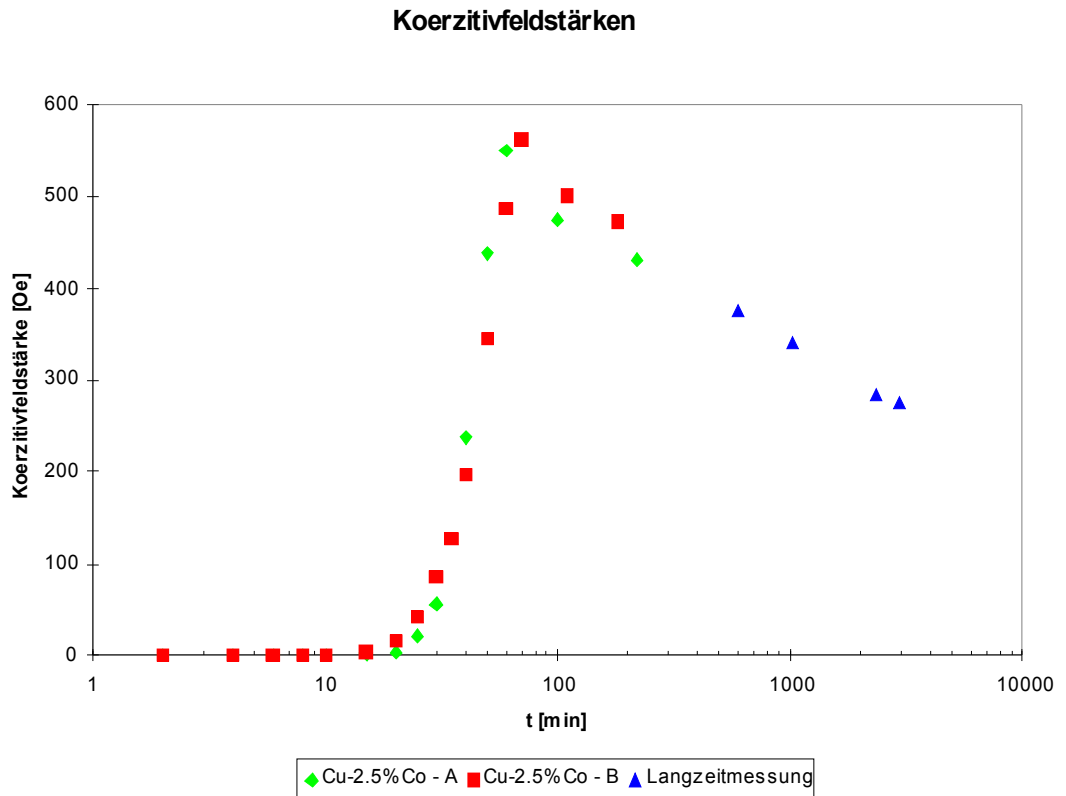


Abb. 35 Die Meßergebnisse mit den umgerechneten Koerzitivfeldstärken

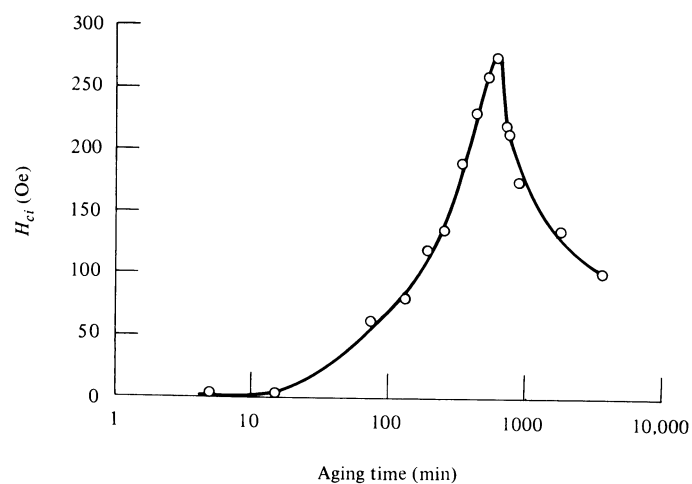


Abb. 36 Die Meßergebnisse von Becker [08 BEC]

Zur endgültigen Betrachtung wurden die jeweiligen Stromstärken, mit Hilfe der aus Abschnitt 6.3 bekannten Formel für langgestreckte Spulen, in die entsprechenden Feldstärken umgerechnet und in Abb. 35 eingezeichnet. (Es wurde hierbei die Einheit Oersted gewählt, um einen direkten Vergleich mit den Messungen von Becker zu gewährleisten.)

Vergleicht man Abb. 35 mit den Ergebnissen von Becker in Abb. 36 (siehe auch Abschnitt 4.2.4) so erkennt man, daß sich die jeweiligen Meßergebnisse qualitativ bestätigen und den prinzipiell gleichen Kurvenverlauf zeigen:

Die Teilchen verhalten sich bis zu einem kritischen Wert paramagnetisch, wobei sie keine Remanenz aufweisen und damit keine Koerzitivkraft bedingen. Weiter steigen die Kurven dann relativ steil an, hervorgerufen durch eine endliche Remanenz der Teilchen, die den kritischen Radius überschritten haben und zu Einbereichsteilchen geworden sind. Werden die Teilchen noch größer, durchläuft die Koerzitivfeldstärke ein Maximum, fällt danach wieder ab und pendelt sich bei einem Wert ein, da jetzt Mehrbereichsteilchen vorliegen, die nach den bekannten Mechanismen leichter ummagnetisiert werden können und somit eine geringere Koerzitivfeldstärke verursachen.

Die Unterschiede in den Messungen hier und von Becker, welche den Zeitpunkt der beginnenden Remanenz und die Lage des Maximums betreffen, decken sich mit den Prognosen aus dem Theorieteil. So erreichen die bei 800°C getemperten Proben den Zeitpunkt der beginnenden Remanenz und des Maximums viel früher, als die Proben, die bei 700°C getempert wurden, da die Diffusion bei höheren Temperaturen viel schneller abläuft.

Ausgehend von den theoretischen Gleichungen aus Abschnitt 4.2.2 und 4.2.3

$$H_c = g - \frac{h}{D^{3/2}} \quad \text{für den ansteigenden Ast der Kurve}$$

(Einbereichsteilchen) und

$$H_c = a + \frac{b}{D} \quad \text{für den abfallenden Ast der Kurve}$$

(Mehrbereichsteilchen)

und mit der in Abschnitt 2.1.4. und 2.1.5 gewonnenen Abhängigkeit der Wachstumsgeschwindigkeit von der Zeit t

$$D \sim t^{1/2} \quad \text{für kleine Zeiten}$$

und

$$D \sim t^{1/3} \quad \text{für große Zeiten}$$

ergeben sich folgende Zeitgesetze für die Koerzitivkraft:

$$2) H_c = g - \frac{h}{t^{3/4}} \quad \text{für den ansteigenden Ast der Kurve}$$

(Einbereichsteilchen)

und

$$1) H_c = a + \frac{b}{t^{1/3}} \quad \text{für den abfallenden Ast der Kurve}$$

(Mehrbereichsteilchen).

Vergleich Meßreihe und Theorie

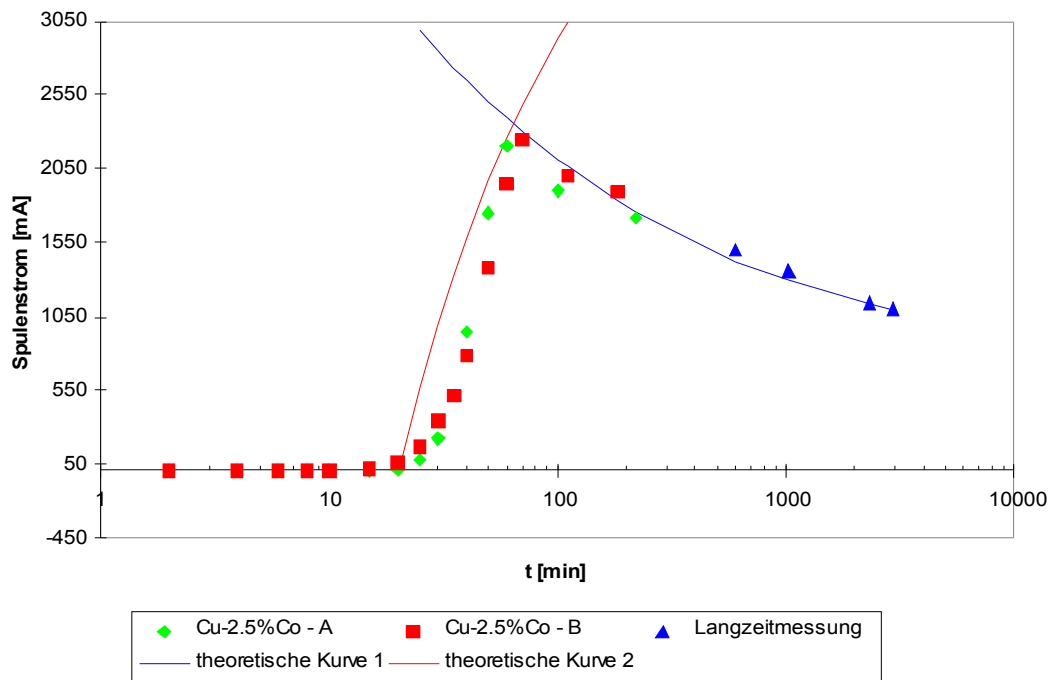


Abb. 37 Vergleich der Meßergebnisse mit der Theorie bei geeigneter Parameterwahl

Durch geeignete Wahl der Parameter a , b , g und h kann man feststellen, ob die Meßergebnisse mit den theoretischen Kurven übereinstimmen.

Die Resultate mit den Parameterwerten $a = 800$, $b = 6000$, $g = 5000$ und $h = -26000$ sind in Abb. 37 zu sehen.

Zusammenfassung:

Ein Vergleich der hier vorliegenden Meßergebnisse mit den theoretischen Vorgaben ergibt sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Es zeigt sich, daß die Meßanordnung sowohl reproduzierbare, als auch mit der Theorie konsistente Resultate liefert und somit für einen Praktikumsversuch geeignet ist.

8. Didaktische Überlegungen

8.1 Sinn und Zweck des Praktikumsversuchs

Sowohl der Physik-Diplomstudiengang, als auch der Lehramtsstudiengang besteht zum überwiegenden Teil aus trockener Theorie und bietet dem Studenten wenig Motivationsansatz. Dies führt oft dazu, daß sich der Student fragt, wozu er „das Ganze“ überhaupt lernen soll, und was in der Praxis damit anzufangen ist. Aus diesem Grund, und um den Lerneffekt zu verbessern, gibt es an der Universität zum Teil zwingend vorgeschriebene, aber auch freiwillige Praktika. Diese sollen helfen, den Lernstoff zu vertiefen, Zusammenhänge besser zu verstehen und sollen so das Rückgrat des Physikstudiums bilden, weil die durch eigene Versuche erworbenen Kenntnisse wertvoller sind, als das in der Vorlesung angeeignete theoretische Wissen, und weil die **Arbeit am Stoff** wichtiger ist als die reine Stoffvermittlung. Außerdem sind Praktika von besonderem Wert, da sie

- a) an den Umgang und die Beherrschung von Meßgeräten heranzuführen,
- b) die Möglichkeit bieten, einmal in das Laborleben einen Einblick zu erhalten,
- c) das Bindeglied zwischen Vorlesung (Theorie) und Praxis bilden,
- d) zeigen sollen, daß ein theoretisch geklärt Sachverhalt in der Praxis einige Schwierigkeiten in Durchführung, Nachprüfbarkeit, Umsetzung, etc. bereiten kann,
- e) den eigentlichen Arbeitsplatz eines Experimentalphysikers, nämlich das Labor, in den Mittelpunkt stellen,
- f) auf das wissenschaftliche Arbeiten für eine Zulassungsarbeit, die Diplom- bzw. die Doktorarbeit vorbereiten,
- g) eine gute Möglichkeit bieten, die Mitarbeiter an den Lehrstühlen und ihre Arbeitsinhalte kennenzulernen und
- h) den **Spaß an der Physik** vermitteln.

Der Wert praktischer Übungen ist allerdings nur dann unbestritten, wenn dabei ernsthafte Arbeit geleistet wird. Vom Studenten wird überlegtes Handeln nach gegebenen Anweisungen, scharfes Beobachten und weitgehend selbständiges Auswerten der Erscheinungen oder der Meßergebnisse verlangt.

8.2 Das Meßprotokoll

Dazu ist das Führen von Meßprotokollen, welche die Grundlage für die Auswertung sein werden, während der experimentellen Arbeit unerlässlich. Das Protokoll umfaßt in der Regel folgende Punkte:

1. Datum und Thema des Versuchs
2. Verwendete Geräte und Substanzen
3. Beschreibung der Meßapparatur (Skizze)
4. Notizen zum Arbeitsablauf
5. Genaue Notiz aller Beobachtungen und Meßwerte

(Zur Erleichterung und besseren Planung ist im Anhang ein zeitlicher Ablaufplan und ein mit den wichtigsten Angaben versehenes Meßprotokoll vorgegeben.)

8.3 Vorbereitungen der Praktikanten

Bevor die Praktikanten den Versuch durchführen können, ist es unerlässlich, daß sie sich mit den für den Versuch erforderlichen theoretischen Kenntnissen vertraut gemacht haben. Nur so kann die für die Durchführung des Versuchs zur Verfügung stehende Zeit sinnvoll genutzt und sichergestellt werden, daß die Praktikanten optimalen Nutzen aus der Versuchsdurchführung ziehen. Für die Vorbereitung steht eine Anleitung mit Sekundärliteratur zur Verfügung. Außerdem kann vom Betreuer genauer auf die technischen und

versuchsspezifischen Schwierigkeiten eingegangen werden, wenn nicht zuviel Zeit mit theoretischen Erklärungen „verschwendet“ werden muß.

8.4 Vorbereitung mit dem Betreuer

Obwohl in der Regel davon ausgegangen werden kann, daß die Praktikanten gut vorbereitet sind, müssen sie sich vor der Durchführung noch einer Besprechung mit dem Betreuer unterziehen, in der überprüft wird, ob die erforderlichen Grundlagen auch vorhanden sind und somit ein gutes Gelingen gewährleistet ist. Denn schließlich ist die Versuchsdurchführung nur sinnvoll, wenn die erforderlichen Grundkenntnisse über die Theorie und vor allem der Bedienung der z.T. sehr empfindlichen Geräte gegeben sind, da die Meßapparatur möglichst nicht beschädigt werden sollte.

Allerdings, und das halte ich persönlich für wichtig, ist es nicht Sinn und Zweck dieses „Verhörs“, daß der Praktikant bis ins Detail nach Nebensächlichkeiten gefragt wird, die vom eigentlichen Thema nur ablenken, wie es mir selbst von einigen Praktikumsversuchen in leidlicher Erinnerung geblieben ist.

Viel wichtiger ist es, daß der Praktikant vom Betreuer Zusammenhänge erläutert bekommt und nicht erst nach dem Versuch weiß, worin der eigentliche Sinn und Zweck des Versuches besteht, sondern möglichst gleich zu Beginn einen Überblick über die Meßmethode, die Versuchsdurchführung und die eigentliche Messung erhält.

8.5 Lerninhalte der einzelnen Kapitel und Kontrollfragen

Der Umfang der jeweiligen theoretischen Kapitel und die Versuchsbeschreibung sollte genügen, um einen über Grundkenntnisse der Materialwissenschaften verfügenden Studenten auf den Praktikumsversuch vorzubereiten und ihn dahingehend zu entlasten, daß er nicht noch unnötige Zeit mit dem Literaturstudium in der Bibliothek verbringen muß. Das soll natürlich keinesfalls den interessierten Praktikanten davon abhalten, unter den entsprechenden Literaturhinweisen noch genauere Details und weiterführende Aspekte zu gewinnen.

Um sich selbst noch einmal die wichtigsten Inhalte zu verdeutlichen, habe ich im folgenden einen Fragenkatalog für die vorhergehenden Kapitel zusammengestellt, anhand dessen ich eine Zusammenfassung der Lerninhalte geben möchte. Ferner sollen die folgenden Fragen und Denkanstöße einen Leitfaden für die Vorbesprechung darstellen:

8.5.1 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 2

- Was ist ein homogener Mischkristall?
- Was ist die Paarvertauschungsenergie? Was beeinflusst sie?
- Was ist und wie liest man ein Phasendiagramm?
- Was sind Ausscheidungen?
- Welche Arten von Entmischungsreaktionen gibt es? Wie funktionieren sie?
- Was ist eine Spinodale?
- Welche Energiebeiträge sind bei der Keimbildung wichtig?
- Was ist der „kritische Radius“?
- Wie läuft das Keimwachstum ab? Welches Zeitgesetz liegt hierbei vor?
- Was bedeutet Umlösung (Ostwald-Reifung)? Welches Zeitgesetz liegt vor?

8.5.2 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 3

- Was ist Dia-, Para-, Ferromagnetismus?
- Wie lautet das Curie-Weißsche Gesetz?
- Was ist Superparamagnetismus? Wie entsteht er, wodurch wird er bedingt?
- Was beschreibt die Magnetisierung eines Stoffes?
- Wie sieht eine Hystereseschleife aus?
- Was ist die Sättigungsmagnetisierung, die Remanenz, die Permeabilität?
- Was ist die Koerzitivfeldstärke, was die Koerzitivkraft?

8.5.3 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 4

- Warum ist die Koerzitivkraft eine so wichtige Meßgröße? Was sind ihre Vorteile bei der Messung (z.B. gegenüber der Permeabilität)?
- Wie hängt die Koerzitivkraft mit der Teilchengröße der Ausscheidungen zusammen?
- Unterteilung in „Superparamagnetische Teilchen“, „Einbereichsteilchen“ und „Mehrbereichsteilchen“?
- Warum haben Teilchen unterschiedlichen Durchmessers verschiedene magnetische Eigenschaften?
- Was bedeutet Domänenstruktur, Blochwand, Blochwandverschiebung? Welche Energien spielen hierbei eine Rolle?
- Wie sieht der experimentelle Kurvenverlauf aus, wenn man die Koerzitivkraft gegen die Zeit (bzw. den Teilchendurchmesser) aufträgt?

8.5.4 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 5

- Warum haben die Proben gerade die angegebenen Konzentrationen?
- Warum sind einige Konzentrationen besser/ schlechter für den Versuch geeignet? (Vorteile/ Nachteile einer hohen / niedrigen Kobaltkonzentration)
- Was ist der Vorteil eines Vertikalofens?
- Warum sind drei Heizsegmente von Vorteil?
- Wie sieht der schematische Grundaufbau des Versuchs aus? Grundfunktionsprinzip der Messung?
- Warum ist eine langgestreckte Spule nötig?
- Wie und warum muß die Spule erst genau justiert werden?
- Wie funktioniert eine Förstersonde?
- Wie müssen die Sonden verschaltet sein?
- Wie verlaufen die Ströme und Magnetfeldlinien?
- Wie erhält man das endgültige Meßsignal?

8.5.5 Lerninhalte und Fragenkatalog zu Kapitel 6

- Wie und bei welcher Temperatur werden die Proben ausgelagert?
- Warum ist eine relativ hohe Feldstärke (bis zu 800mT) nötig, um die Proben aufzumagnetisieren?
- Wie funktioniert die eigentliche Messung? Was wird gemessen?

Schlußbemerkung

Nachdem ich mich jetzt ein gutes halbes Jahr mit dem Aufbau dieses Praktikumsversuchs samt Messungen beschäftigt habe, konnte ich einen sehr informativen und vor allem interessanten Eindruck vom Arbeitsbereich eines Physikers gewinnen.

Ferner habe ich selbst eine Menge über das System Kupfer-Kobalt, Ausscheidungsreaktionen, magnetische Meßmethoden, Meßgeräte, Laboröfen, u.v.a.m. gelernt und meine Erfahrungen, die überwiegend positiv waren, in diese Arbeit eingebracht.

Neben den vielen fachlichen Aspekten hat mich das sehr gute Arbeitsklima und die allgegenwärtige Hilfsbereitschaft aller immer wieder beeindruckt und einen neuen Motivationsschub bewirkt, wenn mal etwas nicht so lief, wie es eigentlich sollte.

An dieser Stelle möchte ich noch darauf hinweisen, daß die Grundidee für diesen Versuchsaufbau von einem Praktikum stammt, das an der Universität Göttingen [09 GÖT] schon seit Jahren zum festen Bestandteil des Physikstudiums gehört und möchte mich hiermit für die freundliche Unterstützung, vor allem in der Anfangsphase, bedanken.

Ich wünsche allen, die diesen Versuch durchführen werden, viel Erfolg bei den Messungen, gute Resultate und vor allem viel Spaß an der Physik.

Literatur

[01 FÖR] Förster, Friedrich, Ein Betriebsgerät zur schnellen und genauen Messung der Koerzitivkraft sowie ihrer Temperaturabhängigkeit, Zeitschrift für Metallkunde, Band 46, S. 297-302, 1955

[02 MAS] Massalski, Thaddeus, B., Binary Alloy Phase Diagrams, 2. Auflage, American Society For Metals, USA 1987

[03 HAA] Haasen, Peter, Physikalische Metallkunde, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1984

[04 HOR] Hornbogen, Erhard und Warlimont, Hans, Metallkunde, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1991

[05 HER] Herin, Ekbert, Martin, Rolf und Stohrer, Martin, Physik für Ingenieure, 4. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf 1992

[06 HEL] Hellwege, Karl-Heinz, Einführung in die Festkörperphysik, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1988

[07 CUL] Cullity, B. D., Introduction to magnetic materials, 1. Auflage, Addison-Wesley Publishing Company, USA 1972

[08 BEC] Becker, J. J., Magnetic Method for the Measurement Of Precipitate Particle Sizes in a Cu-Co Alloy, Transactions AIME, Band 209, S. 59-63, 1957

[09 GÖT] Versuchsanleitung aus Göttingen

[10 BÖH] Böhm, Horst, Einführung in die Metallkunde, 1. Auflage, B.I. Wissenschaftsverlag, B.I. Hochschultaschenbuch, Band 196, Mannheim 1968

- [11 FAS] Fassbinder, Hans-Georg, Magnetische Untersuchung der Ausscheidung im System Kupfer-Kobalt, Dissertation an der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 1962
- [12 KNE] Kneller, E. F., Luborsky, F. E., Particle Size Dependence of Coercivity and Remanence of Single-Domain Particles, Journal of Applied Physics, Band 34, S. 656-658, 1963
- [13 NEU] Neumann, Hans, Die Koerzitivkraft H_c , Definitionen und physikalische Meßgrundlagen I und II, Archiv für Elektrotechnik, S. 534-543, 578-600, 1949
- [14 WUR] Wurm, Max, Beiträge zur Theorie und Praxis des Feldstärkedifferenzmessers für magnetische Felder nach Förster, Zeitschrift für angewandte Physik, Band 2, Heft 5, S. 210-219, 1950
- [15 NEE] Néel, Louis, Influence des fluctuations therminiques sur l'aimantation de grains ferromagnétiques très fins, Comptes Rendus, Band 228, S. 664-666, 1949
- [16 HAI] Haider, Ferdinand, Unveröffentlichtes Skript zur Vorlesung Materialwissenschaften I im Wintersemester 1996/ 97, Universität Augsburg, 1997
- [17 RIN] Rink, Florian, noch nicht veröffentlichte Zulassungsarbeit bei Prof. Dr. F. Haider, Universität Augsburg, 1997

Erklärung des Verfassers

Hiermit versichere ich, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen Hilfsmittel, als die im Literaturverzeichnis angegebenen, verwendet habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, wurden durch Fußnoten und entsprechende Quellenangaben als Entlehnung kenntlich gemacht.

Günzburg, den 10. Juni 1997

Frank Appelt

Anhang - Zeitlicher Ablauf und Meßprotokoll

Thema: Magnetische Härtung einer Kupfer-Kobalt-Legierung

Datum des Versuchs: _____

Durchführende: _____

Auslagerungs- zeit [min]	Messung 1 Koerzitivstrom [mA]	Messung 2 Koerzitivstrom [mA]	Mittelwert (Messung1, Messung2) [mA]
0			
2			
4			
6			
8			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			
50			
60			
100			
150			