

## Magnetwerkstoffe (MagWerk)

### 1 Versuchsziel

Kennenlernen stoffkundlicher Eigenschaften ferromagnetischer und ferrimagnetischer Werkstoffe und geeigneter dynamischer Prüfmethoden.

### 2 Versuchsgrundlagen

#### 2.1 Stoffkundliche Grundlagen

Physikalisch sind alle Stoffe magnetisch. Die elementaren Träger des Magnetismus sind die um den Kern sowie ihre eigene Achse rotierenden Elektronen, die ein magnetisches Moment erzeugen. Der kleinste Wert ist das magnetische Moment eines Elektrons, das Bohrsche Magneton:

$$\mu_B = \frac{he}{4\pi m_0} = 0,9273 \cdot 10^{-23} \text{ Am}^2 \quad (1)$$

Das magnetische Moment eines Atoms setzt sich aus verschiedenen Teilmomenten zusammen: Spinnmomente, Bahnmomente, Kernmomente. Letztere sind häufig von untergeordneter Bedeutung. Ist die Zahl der Elektronen sowie ihre Bewegungsrichtung so aufeinander abgestimmt, dass es zu einer Kompensation der Bahn- und Spinnmomente kommt, z. B. durch Bildung von Elektronenpaaren, so ist das Atom diamagnetisch. In solchen Stoffen entsteht ein magnetisches Moment erst durch ein äußeres magnetisches Feld, das eine Präzisionsbewegung der Bahnebenen verursacht, d. h. eine Drehbewegung der Kreiselachse um die Vertikale. Das entstehende magnetische Moment ist nach der Lenzschen Regel dem äußeren Feld entgegengerichtet.

In paramagnetischen Stoffen kommt es nicht zu einer vollständigen Kompensation der Einzelmomente. Ihre Orientierungen sind, bedingt durch die Temperatur, regellos im Raum verteilt, so dass sie ohne äußeres Feld nach außen hin nicht feststellbar sind. Ein äußeres Magnetfeld richtet alle einzelnen Momente aus (Sättigung). Eine Sättigung ist um so leichter möglich, je niedriger die Temperatur des Stoffes ist.

Ferromagnetismus tritt auf, wenn folgende drei Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

1. Im Atom muß eine unvollständig besetzte innere Elektronenschale vorhanden sein.
2. In dieser inneren unvollständig besetzten Elektronenschale müssen unkompensierte Spins vorliegen.
3. Die Gitterkonstante  $a$  des Kristallgitters muß mindestens dreimal so groß sein wie der Radius  $r$  der unvollständig besetzten Elektronenschale ( $a \geq 3r$ ).

Im Vergleich zu paramagnetischen Werkstoffen zeigen Ferromagnetika eine starke Wechselwirkung zwischen benachbarten Atomen. Durch solche, die Wechselwirkung beschreibenden, quantenmechanischen Austauschkräfte richten sich Atome mit ihren magnetischen Momenten über größere

Kristallbereiche, den Weißschen Bezirken oder Domänen, parallel zu einander aus (Ausrichten der Atommagnete, spontane Magnetisierung). Ihre Größe hängt von den magnetischen Grundkonstanten und vom Magnetisierungszustand des Werkstoffes ab. Sie sind im allgemeinen nicht mit der Kristallitgröße identisch und umfassen durchschnittlich  $10^{11}$  bis  $10^{15}$  Atome. Ferromagnetismus tritt folglich nur bei Festkörpern auf, während Dia- und Paramagnetismus als Atomeigenschaft allen Aggregatzuständen eigen sein kann.

Mit steigender Temperatur wirken die Wärmebewegungen der Ionen den ordnenden Austauschkräften entgegen, so dass oberhalb einer kritischen Temperatur, der Curie-Temperatur, der Ferromagnetismus verschwindet und Paramagnetismus vorliegt. Zwischen den Weißschen Bezirken liegen Atomschichten, in der die Richtungen der magnetischen Momente aus der des einen Bezirkes „allmählich“ in die des benachbarten übergehen (Blochwände).

Diese spontane Magnetisierung setzt kein äußeres Feld voraus, ist jedoch dann nach außen nicht nachweisbar, da sich die regellos orientierten Domänen magnetisch kompensieren. Im äußeren Feld nimmt die Magnetisierung stark zu. Bei kleinen Feldstärken treten zunächst nur reversible Wandverschiebungen auf. Nach dem Einwirken des magnetischen Feldes ist folglich noch kein Restmagnetismus zu beobachten.

Steigt die Feldstärke an, dann kommt es zu irreversiblen Wandverschiebungen und zu Drehprozessen ganzer Bezirke. Verschwindet das äußere Feld, so bleiben Veränderungen in der Ordnung der Wände und Bezirke zurück, die nach außen durch den Restmagnetismus nachweisbar sind. Diese Erscheinungen werden mit der Hysteresekurve verdeutlicht (siehe Punkt 2.2., Bild 1).

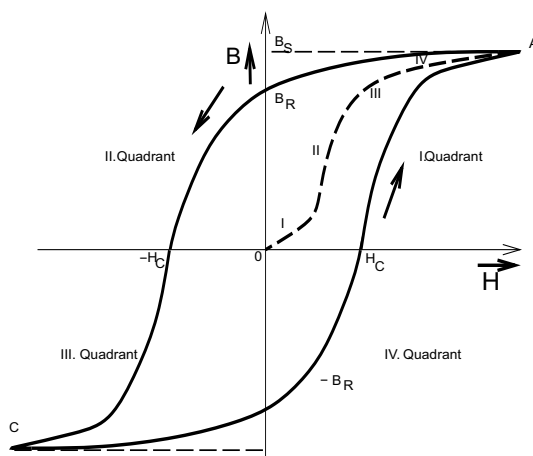


Bild 1: Hystereseschleife mit Neukurve/Kommutierungskurve

Als Ferromagnetika sind die Elemente Fe, Co, Ni, Gd, ihre Legierungen, einige Mn-Verbindungen mit As, Bi, Sb u. a. sowie die Heuslerschen Legierungen ( $Cu_2AlMn$ ,  $Cu_2SnMn$ ) bekannt.

Antiferromagnetika sind durch das Wirken negativer Austauschkräfte gekennzeichnet, die die magnetischen Momente benachbarter Atome paarweise antiparallel ausrichten. Ihre magnetischen Größen sind mit den Paramagnetika vergleichbar bis auf ihr Temperaturverhalten, das ein Maximum zeigt. Zu dieser Stoffgruppe zählen z. B.  $(Mn,Fe,Co,Ni)O$ ,  $MnS$ ,  $MnSe$ ,  $MnF_2$ ,  $FeCl_2$ ,  $Cr$ .

Bei Ferrimagnetika existieren im Kristallgitter benachbarte Atome mit unterschiedlich großen magnetischen Momenten, die durch negative Austauschkräfte antiparallel gestellt sind. Es resultiert daraus ein Gesamtmoment, aus dem wie bei den Ferromagnetika Weißsche Bezirke folgen. Zu diesen Stoffen zählen die Ferrite (Ferrosinelle) und Granate.

## 2.2 Magnetische Größen

Bei ferro- und ferrimagnetischen Stoffen ist die magnetische Induktion  $B$  (auch magnetische Flußdichte genannt) eine Funktion der magnetischen Feldstärke  $H$ :

$$B = f(H) \quad (2)$$

Ihre grafische Darstellung ist die Neukurve bzw. Hysteresekurve (vgl. Bild 1). Die Neukurve entsteht beim ersten Magnetisierungsvorgang. Folgende Mechanismen werden zu ihrer Erklärung genutzt:

1. reversible, kleine Verschiebungen der Blochwände auf Kosten der weißschen Bezirke, deren magnetischen Momente ungünstig, d. h. nicht parallel zur Richtung des Magnetfeldes liegt,
2. irreversible, große Blochwandverschiebungen und reversible Drehprozesse der magnetischen Dipole,
3. irreversible Drehprozesse,
4. eingetretene Sättigung ( $B = B_S$ , Sättigungsinduktion).

Die magnetische Sättigungsinduktion  $B_S$  ist struktur- und temperaturabhängig. Bei 0 Kelvin erreicht sie ihren Maximalwert, bei der Curie-Temperatur  $T_C$  wird sie Null.

Die Hysteresekurve kann statisch oder dynamisch (meist bei einer Frequenz  $f = 50$  Hz) aufgenommen werden. Wird nach Durchlaufen der Neukurve ( $B = B_S$ ) die magnetische Feldstärke auf den Wert 0 gesenkt, so sinkt die Induktion auf den Wert  $B = B_R$  (wird als Remanenz oder Restmagnetismus bezeichnet). Der Restmagnetismus wird durch ein Feld entgegengesetzter Richtung beseitigt. Die dazu erforderliche Feldstärke heißt Koerzitivfeldstärke  $-H_C$ . Durch weiteres Steigern der Feldstärke kommt es wieder zur Sättigung ( $B = -B_S$ ). Sinkt  $H$  wieder auf 0 ab, so befindet sich der Stoff im Zustand der negativen Remanenz ( $B = -B_R$ ) usw.

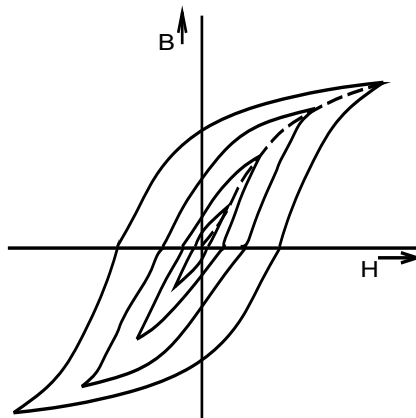


Bild 2: Hystereseschleifenfamilie mit Kommutierungskurve ( $T = \text{const.}$ )

Für die allgemeine Funktion (2) gilt:

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor  $\mu$  als absolute Permeabilität bezeichnet wird.  $\mu_0$  ist die Permeabilität des Vakuums oder die Induktionskonstante ( $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am) und  $\mu_r$  die relative Permeabilität.

Neukurve und Kommutierungskurve zeigen, dass  $\mu$  als Anstieg dieser Kurven selbst eine Funktion von  $H$  ist. Es werden deshalb spezielle Werte definiert:

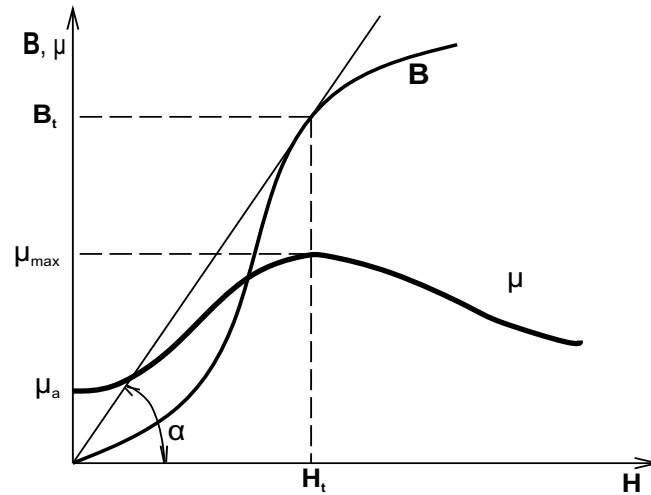


Bild 3: Zur Definition der Permeabilität

Die Anfangspermeabilität  $\mu_a$  ist der Anstieg der Tangente an die Neu bzw. Kommutierungskurve im Ursprungspunkt:

$$\mu_a = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (4)$$

Die maximale Permeabilität  $\mu_{max}$  liegt an der Stelle, an der die Gerade (vgl. Bild 3) durch den Nullpunkt an der Kommutierungskurve tangiert:

$$\mu_{max} = K \tan \alpha \quad (5)$$

wobei  $K$  ein Maßstabsfaktor ist.

Die Permeabilität ist nur dann eine echte Werkstoffgröße, wenn sie an ringförmigen Proben gemessen wird, bei denen sich die Magnetflußlinien im ferro- bzw. ferrimagnetischen Material schließen. Für andere Probenformen werden in der Technik „wirksame“ Permeabilitäten festgelegt, die aber nicht mehr stoffspezifisch sind, sondern u. a. von der Probengeometrie abhängen.

Darüberhinaus sei vermerkt, dass vorstehende Erscheinungen den vielkristallinen ferro- bzw. ferrimagnetischen Werkstoff kennzeichnen. Bei Einkristallen ist zusätzlich die Anisotropie der magnetischen Eigenschaften zu berücksichtigen (vgl. Bild 4).

Beim Einsatz magnetischer Werkstoffe treten Verluste  $V$  auf, die durch die Induktion von Wirbelströmen (Wirbelstromverluste  $V_W$ ), durch das periodische Ummagnetisieren des Werkstoffes (Hystereseverluste  $V_h$ ) und durch Relaxationserscheinungen (Nachwirkungsverluste  $V_n$ ) bedingt sind:

$$V = V_W + V_h + V_n \quad (6)$$

Die Hystereseverluste kann man aus der von der Hysteresekurve umschlossenen Fläche ermitteln, die unmittelbar ein Maß für die Ummagnetisierungsarbeit je Volumenelement und je Zyklus ist.

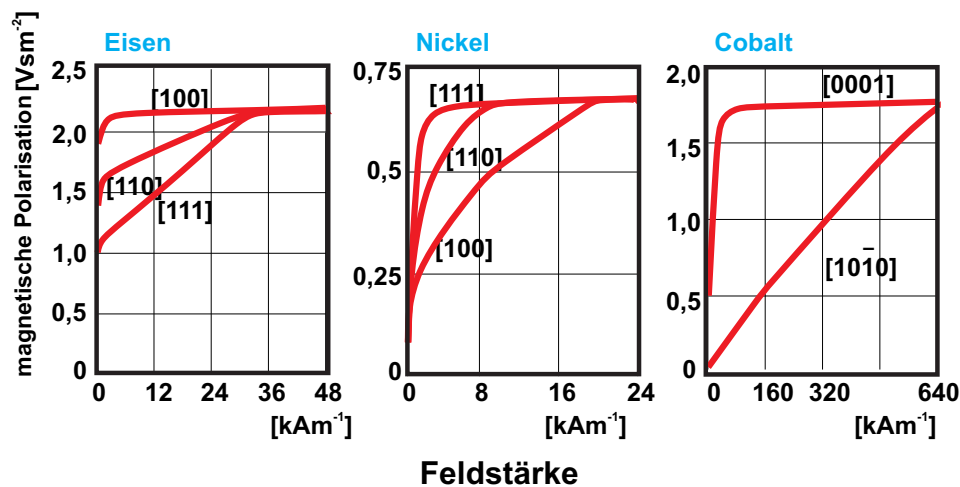


Bild 4: Magnetisierungskurven von Eisen, Nickel und Cobalt Einkristallen mit verschiedenen Orientierungen zum äusseren magnetischen Feld

In der Technik wird diese Energie jedoch meist auf eine Masse von einem Kilogramm bezogen und als Wattverluste bezeichnet.

## 2.3 Beeinflussung magnetischer Eigenschaften

Das Verhalten der Magnetwerkstoffe und damit der magnetischen Kenngrößen wird hauptsächlich von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Magnetische Anisotropien (Kristallanisotropie (Bild 4), Spannungsanisotropie und Form- bzw. Gestaltsanisotropie) erschweren einerseits die Drehprozesse und indirekt damit die Beweglichkeit der Blochwände (Magnetisierbarkeit) andererseits kann durch technische Ausnutzung von Anisotropieeffekten eine gezielte Verbesserung der Magneteigenschaften erreicht werden (z. B. bestimmte Formen der Hystereseschleife).
- Gefügeinhomogenitäten wie Fremdeinschlüsse und Ausscheidungen (z. B. eingelagerte Beimengungen oder Verunreinigungen während des Herstellungsprozesses), Poren und Gitterstörungen (Versetzungen oder Leerstellencluster) behindern entsprechend ihrem Anteil am Gefüge, besonders aber auf Grund ihrer Partikelgröße, -form und -verteilung die Blochwandverschiebungen.
- Gezielte Beimengungen metallischer und nichtmetallischer Stoffe führen zu gewünschten magnetischen Eigenschaften z. B.
  - **Kohlenstoff** → Erhöhung der Koerzitivfeldstärke
  - **Silizium** → Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes, Verringerung der Wirbelstromverluste
  - **Nickel/Chrom** → Hohe Permeabilitätskonstanz
  - **Mangan** → Erhöhung der Permeabilität
  - **Kobalt** → Erhöhung der Curietemperatur
  - **Molybdän** → Erhöhung der Anfangspermeabilität
  - **Aluminium** → Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes, Verringerung der Wirbelstromverluste

Allgemein erhöhen Zusätze nichtmagnetischer Elemente in erster Linie den spezifischen elektrischen Widerstand → Verringerung der Wirbelstromverluste

- Verunreinigungen haben geringen Einfluß, wenn sie sich im Mischkristall lösen. Bilden die im Kristall ausgeschiedenen Verunreinigungen Phasen oder Verbindungen (Sulfite, Oxide) werden die magnetischen Eigenschaften der Legierungen wesentlich beeinflusst.
- Kornorientierung. Um die günstigen magnetischen Eigenschaften von Einkristallen in bestimmten Kristallrichtungen auf polykristalline Magnetwerkstoffe zu übertragen, werden werkstoffwissenschaftlich begründete Methoden zu einer mehr oder weniger starken gleichsinnigen Ausrichtung der Kristallite (Texturbildung) genutzt, z. B.:
  - Rekristallisationstexturen durch Kaltverformung mit Zwischen- und Abschlußglühen (GOSS-Textur, Würfelfigur, kaltgewalzte Texturbleche, kornorientierte Bleche)
  - Erstarren der Schmelze in einem Temperaturgefälle (gerichtete Kristallisation, Stengelkristallisation, Formanisotropie)
- Zunehmende Temperatur erhöht die Wärmebewegung der Atome des Werkstoffes, die im Bereich der Curie-Temperatur die ausrichtenden Austauschkräfte übersteigen, so dass Domänen zerfallen und die spontane Magnetisierung verschwindet: Sättigungsinduktion 0, Absinken der Anfangs- und Maximalpermeabilität (Bild 5). Durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung kann der Curiepunkt um 35 ... 85 K variiert werden.

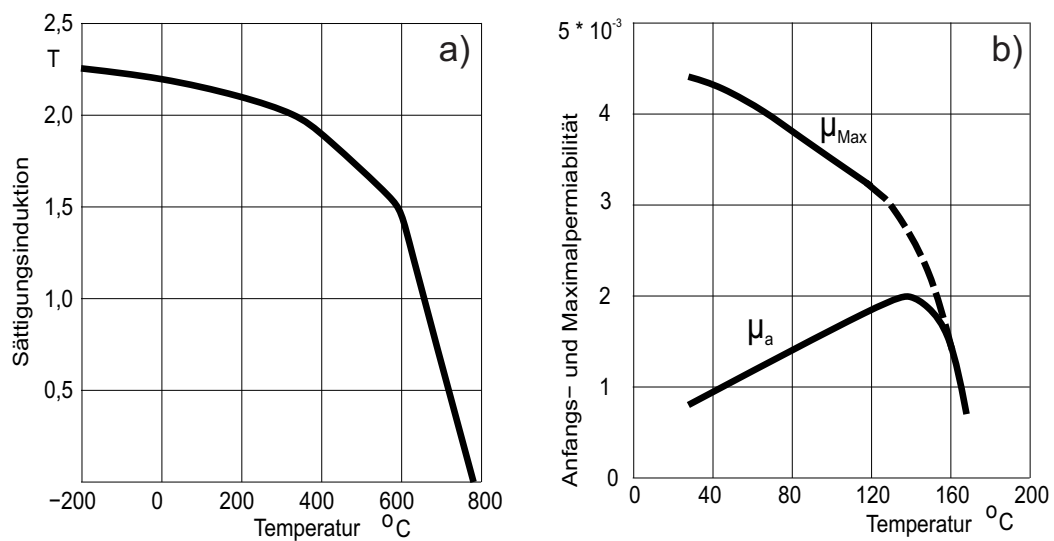


Bild 5: a) Temperaturabhängigkeit der Sättigungsinduktion von Fe,  
 b) Abhängigkeit der Anfangs- und Maximalpermeabilität von der Temperatur (NiFeCu-Ferrit)

- Der Einfluß der Frequenz auf die magnetischen Verluste und die Permeabilität ist besonders beim praktischen Einsatz von Interesse (Gleichfeldmagnetisierung oder Wechselfeldmagnetisierung).
- Temperprozesse während der Herstellung führen einerseits zu gewünschten Verarbeitungseigenschaften (z. B. Erhöhung der Dehnung beim Walzen durch Zwischenglühen) und andererseits zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften (z. B. Permeabilität) sowie Textur und Oberflächengüte durch Schlußglühen.

## 2.4 Meßverfahren zur Ermittlung magnetischer Kenngrößen

Magnetisierungskurven von magnetischen Werkstoffen werden über große Feldstärken entweder statisch (Gleichfeldmagnetisierung) oder mittels dynamischer Messungen (Wechselfeldmagnetisierung) ermittelt. Mit dem Ferrograph (Ferrometer) werden häufig Magnetisierungskurven bei sinusförmiger Netzfrequenz (50 Hz) aufgenommen.

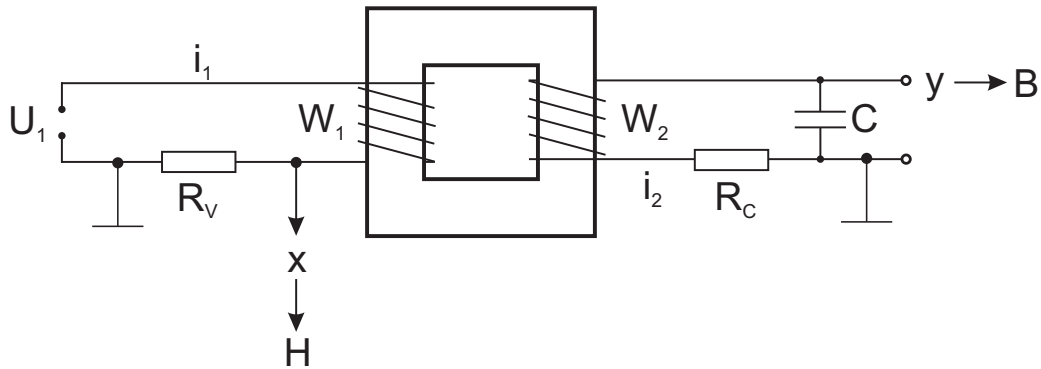


Bild 6: Spulenverschaltung zur Ermittlung magnetischer Kennwerte

Dabei wird die Probe als Transformator geschaltet (Bild 6). Das Auftragen zeitabhängiger zusammengehöriger Induktions- und Feldstärkewerte erlaubt die Aufnahme der Hystereseschleife und die Ermittlung der sich aus ihr ergebenden magnetischen Kenngrößen.

## 3 Vorbereitungsaufgaben

1. Durch welchen Parameter lassen sich Werkstoffe hinsichtlich Ihres Verhaltens im Magnetfeld unterscheiden (Parameter und Größenordnung entsprechend des Verhaltens)?
2. Zeichnen Sie schematisch für eine Ringspule mit den Kernmaterialien a) Luft, b) Aluminium und c) Kupfer die magnetische Induktion  $B$  in Abhängigkeit von der Stromstärke  $I$  und begründen Sie die Unterschiede!
3. Wie kann man die magnetischen Verluste verringern?
4. Welche Materialien, d.h. chemische Verbindungen, außer den reinen Metallen Fe, Co, Ni, sind noch bei Raumtemperatur ferromagnetisch?
5. Welcher Parameter einer Hysteresekurve ist maßgebend für die Unterscheidung *hartmagnetisch* bzw. *weichmagnetisch*? Ab etwa welchem Wert dieser Größe spricht man von *hartmagnetisch*?
6. Was ist ein idealer Diamagnet (Definition, Eigenschaften)? Nennen Sie zwei Beispielwerkstoffe!

## 4 Praktikumsaufgaben

1. Nehmen Sie den Meßplatz (PC und Ofen) gemäß ausliegender Anleitung in Betrieb!
2. Nehmen Sie bei Raumtemperatur ( $T_1$ ) für alle 4 Magnetspulen die Hysteresekurven  $B(H)$  und die  $\mu(H)$ -Kurven auf, sowie notieren Sie sich die Werte für die Sättigungsinduktion  $B_S$ , die Hystereseverluste in der Sättigung und  $\mu_{max}$ !

3. Ermitteln Sie für die Spulen 1 und 2 in Temperaturschritten von 50 K die Kommutierungskurven sowie die Hysterese und notieren Sie sich die Werte für  $B_S$ ,  $\mu_{max}$  und die Hystereseverluste in der Sättigung bis zum Erreichen der Curietemperatur. Bestimmen Sie die Curietemperatur!
4. Stellen Sie die magnetische Sättigungsinduktion  $B_S$ , die maximale Permeabilität  $\mu_{max}$  und die Hystereseverluste in der Sättigung als Funktion der Temperatur für die Spulen 1 und 2 grafisch dar und erläutern Sie den Verlauf der Kurven!
5. Bestimmen Sie aus den Kommutierungskurven die maximale Permeabilität  $\mu_{max}$  entsprechend der Definition in Bild 3 aus dem maximalen Anstieg einer durch den Nullpunkt des Koordinatensystems verlaufenden Tangente an die aufgenommene Neukurve. Diskutieren Sie mögliche Abweichungen zu den während des Praktikums aufgenommenen Werten.
6. Ordnen Sie die Spulen 1 bis 4 in relativ hart- bis weichmagnetisch ein!
7. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch!

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im  
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.307 aus!**

*Hinweis: Bringen Sie zwecks Mitnahme der Messdaten einen USB-Stick zur Praktikumsdurchführung mit!*

## Literaturliste

- [1] BOLL, R.: *Weichmagnetische Werkstoffe*. 4. Auflage. Publicis Corporate Publishing, 1990. – 481 S. – ISBN 978-3800915460
- [2] KAMPCZYK, W. ; RÖSS, E.: *Ferritkerne*. 3. Auflage. Publicis Corporate Publishing, 1978. – 516 S. – ISBN 978-3800912544
- [3] NITZSCHE, K. ; ULLRICH, H.-J.: *Funktionswerkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik*. 2. Auflage. Leipzig. Stuttgart : Hüthig Verlag, 1998. – 448 S. – ISBN 978-3778512647
- [4] MACHERAUCH, E. ; ZOCH, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. 11. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 602 S. – ISBN 978-3-8348-0343-6
- [5] SCHATT, W. ; POMPE, W. ; WORCH, H.: *Werkstoffwissenschaft*. 10. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2011. – 578 S. – ISBN 978-3527323234
- [6] FASCHING, G.: *Werkstoffe für die Elektrotechnik*. 3. Auflage. Springer, Wien, 2005. – ISBN 978-3211826102
- [7] HAHN, F.: *Werkstofftechnik - Praktikum: Werkstoffe prüfen und verstehen*. Hanser Fachbuchverlag, 2015
- [8] MICHALOWSKI, L. ; SCHNEIDER, J.: *Magnettechnik - Grundlage, Werkstoffe, Anwendungen*. 3. Auflage. Vulkan Verlag, 2005