

Elektrische Leitfähigkeit (*ELeit*)

1 Versuchsziel

Kennenlernen des zerstörungsfreien Tastspulen-Wirbelstromverfahrens zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit und daraus ableitbarer Eigenschaften von Metallen.

2 Versuchsgrundlagen zur Leitfähigkeit in Metallen

2.1 Die elektrische Leitfähigkeit in Metallen

In Metallen und deren Legierungen sind aufgrund der metallischen Bindung freie Elektronen (ca. 10^{22}cm^{-3}) vorhanden. Beim Anlegen eines elektrischen Potentials überlagert sich der ungerichteten thermischen Bewegung der Leitungselektronen eine zusätzliche gerichtete Driftbewegung. Die mittlere Driftgeschwindigkeit ist der elektrischen Feldstärke E proportional. Der Quotient aus beiden Größen ist als Elektronenbeweglichkeit μ definiert. Für die elektrische Leitfähigkeit σ gilt:

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu \quad (1)$$

e : Elementarladung; n : Elektronenkonzentration.

Der elektrische Widerstand eines Metalls läßt sich aus der Streuung seiner Leitungselektronen an Störstellen des Kristallgitters und an Gitterschwingungen (Phononen) verstehen. Der spezifische elektrische Widerstand ϱ eines metallischen Leiters setzt sich dabei aus zwei Anteilen zusammen: einem temperaturunabhängigen spezifischen Restwiderstand ϱ_0 (Störstellenanteil) und einem temperaturabhängigen Anteil $\varrho(T)$ (Phononenanteil):

$$\varrho = \varrho_0 + \varrho(T) \quad (2)$$

Der temperaturunabhängige Restwiderstand ϱ_0 ist folglich ein Maß für die Störstellenkonzentration im Metallgitter. Die Störstellen können dabei ganz verschiedener Natur sein: Fremdatome auf Gitter- oder Zwischengitterplätzen (feste Lösungen); physikalische Gitterfehler wie Leerstellen, Versetzungen und Korngrenzen, die Streuzentren bilden. [1]

In einfachen Fällen nimmt ϱ_0 mit der Konzentration an Störstellen zu. Am genauesten prüft man dieses Verhalten durch Messung von ϱ_0 bei tiefen Temperaturen. Es gilt:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \varrho(T) = 0 \quad (3)$$

Für nicht zu große Störstellenkonzentration gilt jedoch die Matthiessche Regel, die besagt, daß $\varrho(T)$ unabhängig vom Störstellengehalt ist. In diesen Fällen kann man den spezifischen elektrischen

Widerstand bei Raumtemperatur messen, denn Änderungen des Widerstandes bei Raumtemperatur sind dann allein auf die Änderungen des Restwiderstandes zurückzuführen. Der Widerstand hängt von der Temperatur T des Körpers wie folgt ab:

$$\varrho_T = \varrho_{20^\circ C} * (1 + \alpha_{20^\circ C} \cdot \Delta T) \quad (4)$$

$\alpha_{20^\circ C}$: Temperaturkoeffizient bei $20^\circ C$; ΔT : Temperaturdifferenz $T - 20^\circ C$

Hierbei gibt der Temperaturkoeffizient $\alpha_{20^\circ C}$ die prozentuale Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes bei einer von $20^\circ C$ abweichenden Temperatur an. Seine Temperaturabhängigkeit macht sich erst bei Temperaturänderungen von mehr als $100^\circ C$ bemerkbar. Wird der Temperaturkoeffizient ohne Indizes angegeben, so ist immer der $\alpha_{20^\circ C}$ - Wert gemeint. Die elektrische Leitfähigkeit σ entspricht dem Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes:

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} \quad (5)$$

Die Dimension von σ ist entweder MS/m oder % IACS (International Annealed Copper Standard), wobei folgende Umrechnung gilt: 100 % IACS = 58 MS/m

Der spezifische elektrische Widerstand ϱ ist mit der Wärmeleitfähigkeit durch das Wiedemann-Franz-Lorenzsche Gesetz verknüpft, das besagt, dass das Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit λ und elektrischer Leitfähigkeit bei einer bestimmten Temperatur T eine Konstante (Wiedemann-Franz-Lorenzsche Zahl $\gamma = 2.44 \cdot 10^{-8} V^2/K^2$) ist:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \gamma \cdot T \quad (6)$$

2.2 Verfahrenstechnische Grundlagen

Die Bestimmung des Absolutwertes der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt im Labor üblicherweise über eine Strom-Spannungs-Messung. Soll an einem Bauteil vor Ort die Leitfähigkeit ermittelt werden, kommt u.a. das schnell und zerstörungsfrei messende Wirbelstromverfahren zum Einsatz. Bei den Wirbelstromprüfverfahren wird je nach Anordnung der Prüfspulen noch einmal in solche mit Durchlaufspule, mit Gabelspule und mit Tastspule (Bild 1) unterschieden.

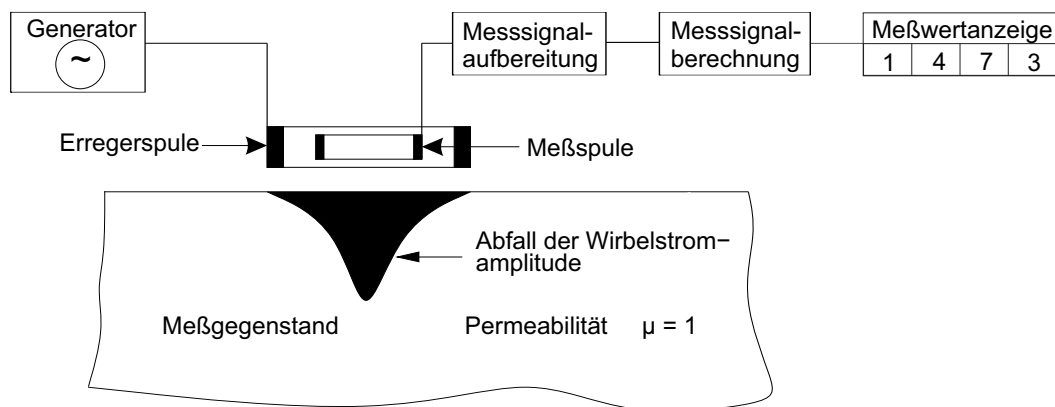


Bild 1: prinzipieller Aufbau eines Wirbelstrom-Leitfähigkeitsmessgerätes mit Tastspule

Es handelt sich immer um eine vergleichende Meßmethode, bei der der am Bauteil erhaltene Meßwert mit dem eines Referenzstandards, dessen Leitfähigkeit bekannt ist, verglichen wird.

Die auf den Meßgegenstand aufzusetzende Sonde wird von einem Generator mit einem Wechselstrom i_1 einer bestimmten Frequenz gespeist. Durch das von der Erregerspule erzeugte magnetische Wechselfeld H_1 werden im Material Wirbelströme i_2 induziert, deren Stärke und Eindringtiefe auch von dessen elektrischer Leitfähigkeit abhängen. Die zur Erzeugung dieser Ströme erforderliche Energie liefert das Magnetfeld, das mit größer werdendem Abstand von der Oberfläche in seiner Intensität abnimmt. Das von den Wirbelströmen i_2 nach der Lenzschen Regel erzeugte Magnetfeld H_2 überlagert sich dem Ursprungsfeld H_1 . Das resultierende Magnetfeld wird über die Änderungen der Messspuleneigenschaften erfasst. Die Spule besitzt ohne Prüfteil als sogenannten Leerwert einen ohmschen oder Wirkwiderstand R , der, vektoriell mit dem Blindwiderstand $2\pi fL = \omega L$ addiert, Bild 2, den Scheinwiderstand \vec{R} ergibt. Befindet sich ein Prüfobjekt im Magnetfeld der Spule, kommt es in ihm zur Wirbelstromausbildung, Bild 3.

Dabei ändern sich die Spuleneigenschaften, speziell der Wirk- und auch der Blindwiderstand. Der Endpunkt P_0 des Vektors \vec{R} für den Leerwert wandert nach dem Punkt P_1 des neuen Vektors \vec{R}_1 entsprechend der Differenz der Spulenparameter. Der Scheinwiderstand wird so von seinem Absolutbetrag her und in seiner Phasenlage nach Φ_1 verschoben, Bild 2.

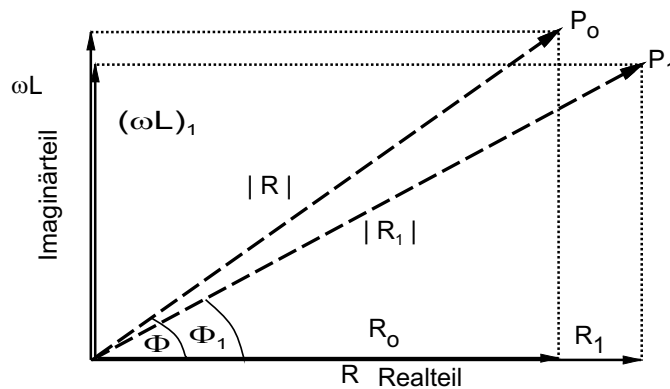


Bild 2: Komplexe Scheinwiderstandsebene einer Selbstinduktivität

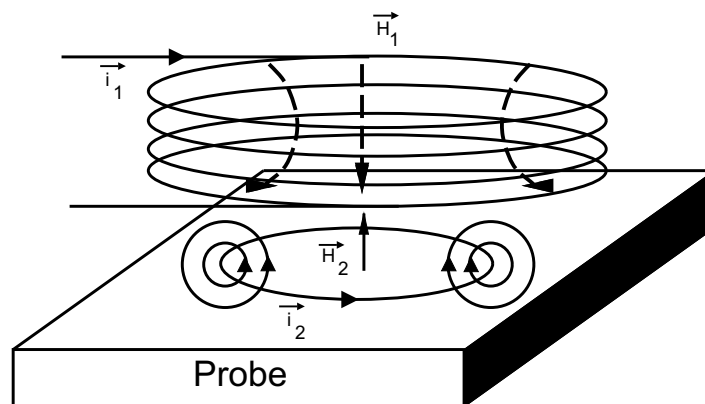


Bild 3: Wirkungsschema des Tastspul-Wirbelstromverfahrens

Die induzierte Spannung und der Übergang der Spulenparameter von P_0 nach P_1 ist damit eine Funktion

- **der elektrischen Leitfähigkeit** σ des Messgegenstandes,
- **der relativen Permeabilität** μ_r (für rein nichtferromagnetische Stoffe ist $\mu_r = 1$),
- **der Probendicke** d (Einfluß nur vorhanden, wenn Eindringtiefe des Magnetfeldes in der Probe größer als Probendicke d),
- **der flächenhaften Ausdehnung** der Probe (bei Unterschreitung einer Mindestfläche),
- **dem Abstand** der Tastspule von der Probe
- **der Messfrequenz** f ,
- **den geometrischen und elektrischen Eigenschaften** der Prüfspule.

Demzufolge wird die Wirbelstrommessmethode überall dort eingesetzt, wo es um die Bestimmung jener Probeneigenschaften geht, die in einem Zusammenhang zu o.g. Einflussgrößen stehen oder für die die elektrische Leitfähigkeit als Indikator für die Eigenschaftsänderungen dient:

- Bestimmen der Härte von kaltaushärtbaren Leichtmetall-Legierungen
- Bestimmen der Wärmeleitfähigkeit eines Metalls
- Erkennen von Hitzeschäden bei Al-Legierungen (bei Flugzeugwartung)
- Verwechslungsprüfung von Legierungen und Metallen
- Reinheitsgradbestimmung an Metallen
- Kontrolle der Homogenität an Metallen
- Bestimmung der Aushärtung an Duraluminium
- Schrottsortierung
- Kontrolle von Festigkeit und Härte
- Überwachung von Ausscheidungsvorgängen z.B. bei Cu-Cr-Legierungen.

Die in der Praxis hauptsächlich verwendete Prüffrequenz liegt bei 60 kHz. In Abhängigkeit von der Prüffrequenz ergibt sich damit eine Mindesteindringtiefe der Wirbelströme und indirekt eine Mindeststärke des Meßgegenstandes (Gleichung 7). Durch eine geeignete Wahl der Meßfrequenz kann die Probendicke variiert werden.

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \sigma}} [mm] \quad (7)$$

- f : Meßfrequenz in Hz;
 σ : elektr. Leitfähigkeit in $m/(\Omega mm^2)$;
 δ : Eindringtiefe in mm

$$\delta_{krit} = 1.7 \cdot \delta \quad (8)$$

δ_{krit} : kritische Eindringtiefe, ab der sich Dicke des Materials auf Messergebnisse auswirkt.

Neben der Dicke des Messgegenstandes können weitere Faktoren zu einer Verfälschung der Messwerte führen:

- der Sondenabstand zur Oberfläche
- die Größe der Meßfläche (Randeffekte)
- die Krümmung der Meßfläche.

Der Sondenabstand von der Messfläche wird bis zu 0.5 mm vom SIGMATEST-Gerät kompensiert, eventuelle Oberflächenkrümmungen und Randeffekte kann man durch Korrekturfaktoren oder entsprechende Kalibrierungen berücksichtigen.

2.3 Anwendungsbeispiele für den Einsatz der Wirbelstromprüfung

Über die elektrische Leitfähigkeit lassen sich in der Praxis u.a. auch Aussagen zu mechanischen Eigenschaften eines Bauteils ableiten. Ein Beispiel dafür wäre die Prüfung von Aluminium Knetlegierungen in der Luftfahrt, speziell in der Flugzeugproduktion und -wartung. Logischerweise bestehen hier mit die schärfsten Vorschriften bei der Messdurchführung.

Bild 4 zeigt am Beispiel den Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit, Härte, und Leitfähigkeit bei einer aushärtbaren Al-Legierung für den Flugzeugbau. Unkorrekte Wärmebehandlung oder Überhitzung im Flugbetrieb kann zu Festigkeitsverlusten führen. Bei der im Beispiel gezeigten Al-Legierung ändert sich die Leitfähigkeit im kritischen Bereich des Festigkeitsabfalls um 3-4 MS/m.

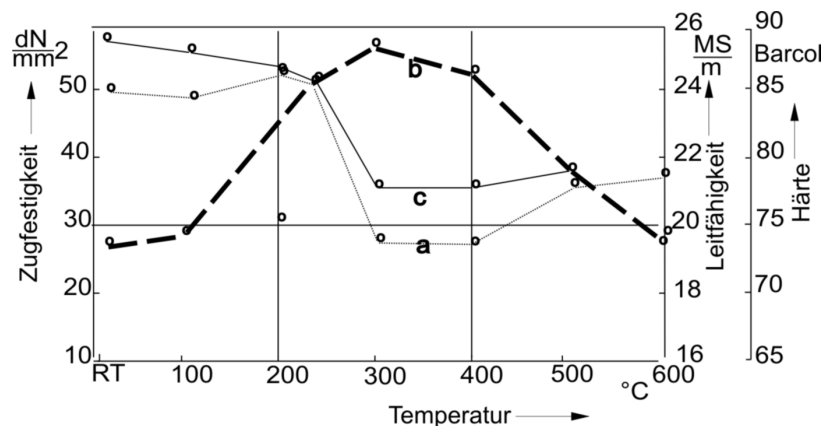


Bild 4: Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit (Kurve a), Härte (b) und Zugfestigkeit (c) bei einer Al-Knetlegierung

Bei Metallen für Stromleitungszwecke wird eine hohe Leitfähigkeit gefordert. Im Herstellungsprozess (z.B. beim Gießen von Kupfer) wird σ jedoch stark von Verunreinigungen der Schmelze bestimmt. So nimmt die Leitfähigkeit bei Kupfer linear mit dem Phosphorgehalt ab.

Besonders empfindlich reagiert die elektrische Leitfähigkeit auf die Gefügeausbildung von Metallen. Bei Gußaluminium werden zur Verfeinerung Sr- oder Ti-Zusätze in die Schmelze gegeben. Die feinere Kornstruktur verursacht Leitfähigkeitsreduzierungen, die unter 1 MS/m liegen und mit einem empfindlichen Messgerät nachgewiesen werden können.

Auch bei Aluminium, das beim Anodisieren Verwendung findet, spielt die Leitfähigkeit eine große Rolle. Befindet sich z.B. in einem Anodisierbad ein Teil aus einer falschen Legierung mit abweichender Leitfähigkeit, so läuft der Anodisierprozess wegen ungleicher Stromaufteilung nicht korrekt ab. Vorausgehende Leitfähigkeitsuntersuchungen helfen dabei, Schaden zu verhindern.

3 Vorbereitungsaufgaben

1. Erklären Sie den Begriff „Eindringtiefe“!
Geben Sie den funktionellen Zusammenhang zwischen Eindringtiefe, Frequenz, elektrischer Leitfähigkeit und relativer Permeabilität an!
2. Berechnen Sie die kritische Eindringtiefe für Aluminium und Zinn für die Frequenzen 60 kHz, 120 kHz, 240 kHz und 480 kHz! Die Leitfähigkeitswerte der reinen Elemente sind der Literatur zu entnehmen!

3. Wie beeinflussen Luftspalte in der Probe senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Magnetfeldes das Messergebnis des Sigmatest-Gerätes?
4. Erklären Sie über die Kornstruktur, warum die elektrische Leitfähigkeit so empfindlich auf die Gefügeausbildung von Metallen reagiert!
5. Zeigen Sie anhand von Skizzen, wie sich die elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung a) bei Mischkristallegierungen bzw. b) bei Kristallgemischen ändert! Erklären Sie eventuelle Abweichungen vom Idealverlauf der Kurven!

4 Praktikumsaufgaben

1. Inbetriebnahme des SIGMATEST D2.068 gemäß ausliegender Bedienungsanleitung!
2. Bestimmen Sie experimentell die Frequenzabhängigkeit der kritischen Eindringtiefe d_{krit} der Wirbelströme für verschiedene Materialien und vergleichen Sie die Werte mit den theoretisch errechneten aus Vorbereitungsaufgabe 2.
3. Weisen Sie experimentell den Zusammenhang zwischen dem spez. elektr. Leitfähigkeit und dem linearen Kaltverformungsgrad anhand der ausliegenden Proben nach!
4. Es ist experimentell die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ϱ von der prozentualen Zusammensetzung einer Nichteisen-Metall-Legierung (Zweistoffsystem) nachzuweisen und zu begründen.
5. Ermitteln Sie für die vorliegenden Proben die Wärmeleitfähigkeit λ und vergleichen Sie die erhaltenen Werte mit den in der Literatur angegebenen Werten.
6. Für das in der Aufgabe 4 gegebene Legierungssystem ist die Änderung der Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der einzelnen Komponenten bei Raumtemperatur nachzuweisen!

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.309 aus!**

Literaturliste

- [1] SCHATT, W. ; POMPE, W. ; WORCH, H.: *Werkstoffwissenschaft*. 10. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2011. – 578 S. – ISBN 978-3527323234
- [2] NEUMAIER, P. ; MATERIALPRÜFUNG, Sonderdruck (Hrsg.): *Hochpräzise Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Nichteisen-Metallen nach dem Wirbelstromverfahren*. Carl Hanser Verlag, liegt am Praktikumsplatz aus, 1990
- [3] BLUMENAUER, H.: *Werkstoffprüfung*. 6. korr. Auflage. Weinheim : VCH-Verlagsgesellschaft, 1994. – 426 S. – ISBN 978-3342005476
- [4] NITZSCHE, K.: *Schichtmeßtechnik*. 1. Auflage. Würzburg : Vogel Buch -Verlag, 1996. – 502 S. – ISBN 3-8083-1530-8
- [5] *Sigmatest D2.068 - Bedienungsanleitung, Firmenschrift Institut Dr. Förster*. Reutlingen, liegt am Praktikumsplatz aus
- [6] MACHERAUCH, E. ; ZOCH, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. 11. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 602 S. – ISBN 978-3-8348-0343-6