

**DIN 50994**

ICS 77.040.20

**Messung von Schichten –  
Zerstörungsfreie Leitfähigkeitsmessung metallischer Schichten**

Measurement of coatings –

Non-destructive measurement of the conductivity of metallic coatings

Mesurage des revêtements –

Mesurage non destructif de la conductivité des revêtements métalliques

Gesamtumfang 37 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

# Inhalt

|                                                                                                                                                                    | Seite     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorwort .....</b>                                                                                                                                               | <b>4</b>  |
| <b>1 Anwendungsbereich.....</b>                                                                                                                                    | <b>5</b>  |
| <b>2 Normative Verweisungen .....</b>                                                                                                                              | <b>5</b>  |
| <b>3 Begriffe und Symbole .....</b>                                                                                                                                | <b>5</b>  |
| 3.1 Begriffe .....                                                                                                                                                 | 5         |
| 3.2 Symbole .....                                                                                                                                                  | 6         |
| <b>4 Prinzip der Messung.....</b>                                                                                                                                  | <b>7</b>  |
| <b>5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen .....</b>                                                                                                     | <b>9</b>  |
| 5.1 Einfluss der Leitfähigkeit.....                                                                                                                                | 9         |
| 5.2 Abhebeeffekt (Lift-Off-Effekt) .....                                                                                                                           | 10        |
| 5.3 Temperatureinfluss.....                                                                                                                                        | 10        |
| 5.4 Geometrie — Dicke der Beschichtung oder des Teils (Sättigungsdicke).....                                                                                       | 10        |
| 5.5 Geometrie — Randeinfluss .....                                                                                                                                 | 11        |
| 5.6 Geometrie — Oberflächenkrümmung .....                                                                                                                          | 11        |
| 5.7 Oberflächenrauheit.....                                                                                                                                        | 11        |
| 5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs .....                                                                                                                               | 12        |
| 5.9 Neigung des Prüfkopfs.....                                                                                                                                     | 12        |
| 5.10 Äußere elektromagnetische Felder .....                                                                                                                        | 12        |
| <b>6 Kalibrierung und Justierung des Messgerätes.....</b>                                                                                                          | <b>12</b> |
| 6.1 Allgemeines .....                                                                                                                                              | 12        |
| 6.2 Leitfähigkeitsnormale .....                                                                                                                                    | 13        |
| 6.3 Justierverfahren.....                                                                                                                                          | 13        |
| <b>7 Durchführung der Messung und Auswertung.....</b>                                                                                                              | <b>13</b> |
| 7.1 Allgemeines .....                                                                                                                                              | 13        |
| 7.2 Anzahl der Messungen und Auswertung.....                                                                                                                       | 13        |
| <b>8 Unsicherheit der Ergebnisse .....</b>                                                                                                                         | <b>14</b> |
| 8.1 Allgemeines .....                                                                                                                                              | 14        |
| 8.2 Unsicherheit der Kalibrierung des Messgeräts.....                                                                                                              | 15        |
| 8.3 Stochastische Fehler .....                                                                                                                                     | 16        |
| 8.4 Unsicherheiten, die durch Faktoren verursacht werden, die in Abschnitt 5<br>zusammengefasst sind.....                                                          | 16        |
| 8.5 Kombinierte Unsicherheit, erweiterte Unsicherheit und Endergebnis .....                                                                                        | 17        |
| <b>9 Prüfbericht.....</b>                                                                                                                                          | <b>17</b> |
| <b>Anhang A (informativ) Eindringtiefe des Feldes — Sättigungstiefe .....</b>                                                                                      | <b>18</b> |
| <b>Anhang B (informativ) Abhebeeffekt (Lift-Off) .....</b>                                                                                                         | <b>23</b> |
| <b>Anhang C (informativ) Grundlagen zur Bestimmung der Unsicherheit einer Messung des<br/>angewandten Messverfahrens nach ISO/IEC Guide 98-3.....</b>              | <b>25</b> |
| C.1 Allgemeines .....                                                                                                                                              | 25        |
| C.2 Typ A.....                                                                                                                                                     | 25        |
| C.3 Typ B.....                                                                                                                                                     | 26        |
| <b>Anhang D (informativ) Grundlegende Leistungsanforderungen an Leitfähigkeitsmessgeräte, die<br/>auf dem phasensensitiven Wirbelstromverfahren basieren .....</b> | <b>27</b> |

|                                                                                                                               |                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| D.1                                                                                                                           | Technische Spezifikation.....                                                                                                                         | 27 |
| D.2                                                                                                                           | Kontrolle/Verifizierung der Messgeräte und Prüfköpfe nach der Lieferung, nach<br>Reparatur und in regelmäßigen Zeitabständen während der Nutzung..... | 28 |
| D.3                                                                                                                           | Kontrolle/Verifizierung von Messgeräten und Prüfköpfen vor Ort durchgeführt .....                                                                     | 28 |
| Anhang E (informativ) Beispiele für die experimentelle Abschätzung von Faktoren, die die<br>Messgenauigkeit beeinflussen..... |                                                                                                                                                       | 29 |
| E.1                                                                                                                           | Allgemeines .....                                                                                                                                     | 29 |
| E.2                                                                                                                           | Sättigungsdicke .....                                                                                                                                 | 29 |
| E.3                                                                                                                           | Lift-Off-Einfluss .....                                                                                                                               | 30 |
| E.4                                                                                                                           | Randeeinfluss.....                                                                                                                                    | 32 |
| E.5                                                                                                                           | Oberflächenkrümmung.....                                                                                                                              | 32 |
| Anhang F (informativ) Tabelle des Student-Faktors.....                                                                        |                                                                                                                                                       | 34 |
| Anhang G (informativ) Beispiel für die Abschätzung der Unsicherheit (siehe Abschnitt 8) .....                                 |                                                                                                                                                       | 35 |
| G.1                                                                                                                           | Zu messende Probe.....                                                                                                                                | 35 |
| G.2                                                                                                                           | Erforderliche Schritte .....                                                                                                                          | 35 |
| Literaturhinweise.....                                                                                                        |                                                                                                                                                       | 37 |

## **Vorwort**

Diese Norm wurde durch den Arbeitsausschuss NA 062-01-61 AA „Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

## 1 Anwendungsbereich

In der vorliegenden Norm wird ein Verfahren für die zerstörungsfreie Leitfähigkeitsmessung von metallischen Schichten festgelegt.

Es handelt sich um zerstörungsfreie berührende oder berührungsfreie Messungen auf üblichen metallischen Überzügen oder Teilen. Der Prüfkopf oder ein Messgerät mit integrierter Sonde wird auf dem zu messenden Überzug oder Teil aufgesetzt. Das Messgerät gibt die Leitfähigkeit  $\sigma$  des Materials an.

Die Messung kann sowohl zur direkten Bestimmung der Leitfähigkeit bei  $T = 20\text{ °C}$  als Materialeigenschaft, als auch zur Ermittlung anderer Materialeigenschaften, die mit der Leitfähigkeit korrelieren oder zur vergleichenden indirekten Messung verschiedener Materialien bzw. Materialeigenschaften eingesetzt werden. Typische Materialeigenschaften, die mit der Leitfähigkeit korreliert sein können, sind z. B. die Härte, die Gefügesteifigkeit von Legierungen, Schichtspannung u. a.

ANMERKUNG 1 Die Messung der Schichtdicke nach DIN EN ISO 21968 basiert auf demselben Messprinzip, das hier für die Leitfähigkeitsmessung beschrieben wird. Auf Unterschiede und Besonderheiten wird hingewiesen.

ANMERKUNG 2 Die Leitfähigkeit wird in der Einheit S/m angegeben (SI-Einheit, Siemens pro Meter), aufgrund der Größenordnung meist in MS/m. In der praktischen Anwendung wird auch häufig die Einheit % IACS verwendet, wobei die Abkürzung für „International Annealed Copper Standard“ steht [1]. Die Leitfähigkeit vom geglähten Kupfer beträgt konventionsgemäß  $\sigma_{\text{Cu}} = 58\text{ MS/m}$ , dieser Bezugswert entspricht 100 % IACS. D. h., Überzüge oder Teile mit einer höheren Leitfähigkeit als 58 MS/m haben damit Werte größer als 100 % IACS (z. B. Silber  $\sigma_{\text{Ag}} = 62,5\text{ MS/m}$  entspricht 107,76 % IACS). Die Umrechnung erfolgt über die einfache proportionale Beziehung:

$$\sigma[\% \text{ IACS}] = \frac{\sigma[\text{MS/m}]}{58\text{ MS/m}} \cdot 100\% \text{ IACS}$$

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN EN ISO 2064, *Metallische und andere anorganische Schichten — Definitionen und Festlegungen, die die Messung der Schichtdicke betreffen*

DIN EN ISO 4618, *Beschichtungsstoffe — Begriffe*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

## 3 Begriffe und Symbole

### 3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN EN ISO 2064 und DIN EN ISO 4618 und die folgenden Begriffe.

#### 3.1.1

##### Justierung eines Messsystems

Reihe von Tätigkeiten, die an einem Messsystem ausgeführt werden, so dass dieses festgelegte Anzeigen liefert, die Werten einer zu messenden Größe entsprechen

Anmerkung 1 zum Begriff: Zur Justierung eines Messsystems können Nullpunkteinstellung, Abgleich der Nullpunktverschiebung (Offsetjustierung) und Bereichsjustierung (manchmal als Gain-Abgleich bezeichnet) gehören.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Justierung eines Messsystems sollte nicht mit der Kalibrierung verwechselt werden, die eine Grundvoraussetzung für die Justierung ist.

Anmerkung 3 zum Begriff: Nach einer Justierung eines Messsystems ist das Messsystem im Allgemeinen erneut zu kalibrieren.

Anmerkung 4 zum Begriff: Umgangssprachlich wird der Begriff Kalibrierung häufig, jedoch fälschlicherweise, anstelle des Begriffs Justierung verwendet. In gleicher Weise werden die Begriffe Verifizierung oder Kontrolle anstelle des korrekten Begriffs Kalibrierung verwendet.

[QUELLE: VIM, ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11, modifiziert, ergänzt um Anmerkung 4 zum Begriff]

### **3.1.2**

#### **Kalibrierung**

Tätigkeit, die unter festgelegten Bedingungen in einem ersten Schritt eine Beziehung zwischen den durch Normale zur Verfügung gestellten Größenwerten mit ihren Messunsicherheiten und den entsprechenden Anzeigen mit ihren beigeordneten Messunsicherheiten herstellt und in einem zweiten Schritt diese Informationen verwendet, um eine Beziehung herzustellen, mit deren Hilfe ein Messergebnis aus einer Anzeige erhalten wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Ergebnis einer Kalibrierung kann in Form einer Angabe, einer Kalibrierfunktion, eines Kalibrierdiagramms, einer Kalibrierkurve oder einer Kalibriertabelle angegeben werden. In einigen Fällen kann sie aus einer additiven oder multiplikativen Korrektur der Anzeige mit der beigeordneten Messunsicherheit bestehen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Kalibrierung sollte nicht mit Justierung eines Messsystems verwechselt werden, die oft fälschlicherweise „Selbst-Kalibrierung“ genannt wird, und auch nicht mit Verifizierung der Kalibrierung.

Anmerkung 3 zum Begriff: Oft wird nur der erste Schritt in der obigen Definition als Kalibrierung angesehen.

[QUELLE: VIM, ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39]

## **3.2 Symbole**

|          |                                                                                                                                                    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E$      | Testparameter für den Vergleich von Mittelwerten                                                                                                   |
| $H_i$    | Einflussgrößen                                                                                                                                     |
| $H_{LO}$ | Lift-Off-Höhe, Abstand des Sensors von der Oberfläche der zu messenden Schicht, in $\mu\text{m}$ ;                                                 |
| $J(z)$   | Wirbelstromdichte in der Tiefe $z$ ;                                                                                                               |
| $J(0)$   | Wirbelstromdichte an der Oberfläche, d. h. $z=0$ ;                                                                                                 |
| $K$      | sondenspezifischer Korrekturfaktor ( $K \leq 1$ ), berücksichtigt die Abweichung des tatsächlichen Sensorfeldes vom idealen homogenen Feldverlauf; |
| $T$      | Temperatur des Messgegenstandes, d. h. der Schicht, in $^{\circ}\text{C}$ ;                                                                        |
| $U$      | kombinierte Unsicherheit;                                                                                                                          |
| $X$      | Realteil (X-Achse der Impedanzebene);                                                                                                              |
| $Y$      | Imaginärteil (Y-Achse der Impedanzebene);                                                                                                          |
| $c_i$    | Empfindlichkeitsfaktor der Standardunsicherheit;                                                                                                   |

|                |                                                                                                                                                                            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $d_{sat}$      | Sättigungsdicke, ist die Minstdicke der Schicht für eine von der Schichtdicke unbeeinflussten Leitfähigkeitsmessung, in $\mu\text{m}$ ;                                    |
| $f$            | Frequenz, in Hz;                                                                                                                                                           |
| $k$            | Erweiterungsfaktor der Unsicherheit U (berücksichtigtes Vertrauensniveau);                                                                                                 |
| $s(\sigma)$    | Streuung der Leitfähigkeit, bestimmt aus n Einzelwerten von $\sigma$ , in $\text{MSm}^{-1}$ bzw. % IACS;                                                                   |
| $t(f, p)$      | Student-Faktor für den Freiheitsgrad f und das Vertrauensniveau p;                                                                                                         |
| $u$            | Standardunsicherheit;                                                                                                                                                      |
| $v(\sigma)$    | Variationskoeffizient der Leitfähigkeit, bestimmt aus dem Mittelwert der Leitfähigkeit $\bar{\sigma}$ und der dazugehörigen Streuung $s(\sigma)$ aus n Einzelwerten, in %; |
| $z$            | Tiefe von der Oberfläche senkrecht in die Schicht, in $\mu\text{m}$ ;                                                                                                      |
| $\alpha$       | Temperaturkoeffizient der elektrischen Leitfähigkeit, in $\text{K}^{-1}$ ;                                                                                                 |
| $\delta_0$     | Standardeindringtiefe, in $\mu\text{m}$ ;                                                                                                                                  |
| $\mu_r$        | relative Permeabilität (Materialeigenschaft, einheitslos);                                                                                                                 |
| $\mu_0$        | Vakuumpermeabilität bzw. magnetische Feldkonstante mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N/A}^2$ ;                                                                         |
| $\sigma$       | elektrische Leitfähigkeit der Schicht bzw. des Materials, in $\text{MSm}^{-1}$ bzw. % IACS;                                                                                |
| $\bar{\sigma}$ | Mittelwert der Leitfähigkeit, bestimmt aus n Einzelwerten von $\sigma$ , in $\text{MSm}^{-1}$ bzw. % IACS;                                                                 |
| $\varphi$      | Phasenwinkel (Winkel des Impedanzvektors in der Impedanzebene), in $^\circ$ .                                                                                              |

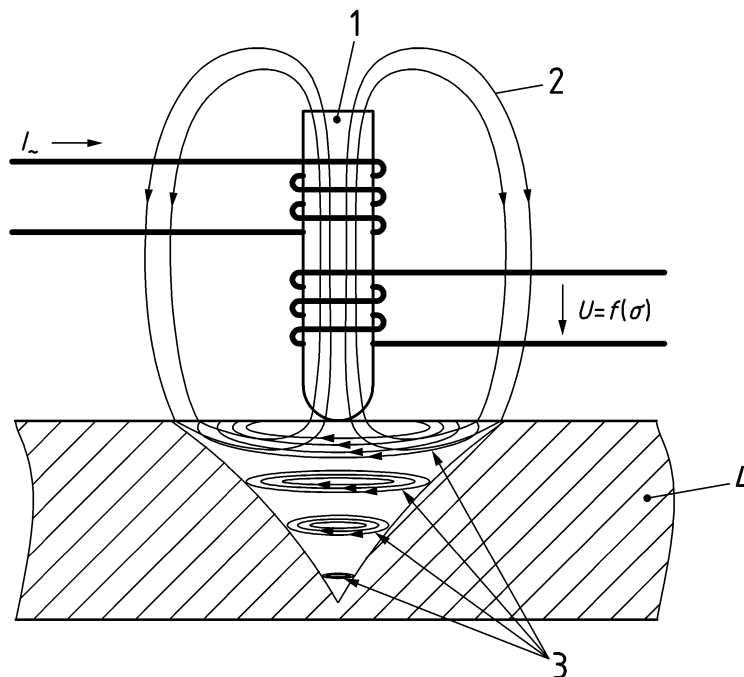
## 4 Prinzip der Messung

Die Leitfähigkeit ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes eines Materials. Sie kann als Gleichstromgröße per Definition über die Messung der Länge und der Querschnittsfläche, z. B. eines Zylinders aus dem interessierenden Material, des eingespeisten Stromes und des resultierenden Spannungsabfalls bestimmt werden.

Die in dieser Norm beschriebene Messmethode der Leitfähigkeit beruht dagegen auf der phasensensitiven Wirbelstrommethode, d. h. einer Wechselfeldmessung. Bei diesem Messprinzip wird mit Hilfe einer Spule ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt, das den zu untersuchenden leitfähigen Werkstoff durchdringt (siehe Bild 1). Dabei werden im Werkstoff Wirbelströme induziert, die wiederum ein elektromagnetisches Feld erzeugen, das sich dem ursprünglichen Anregungsfeld der Spule überlagert und zu einer messbaren Rückkopplung in der Messspule führt. Da die induzierte Wirbelstromdichte bei der vorgegebenen Anregungsfrequenz von der Leitfähigkeit des Materials abhängt, ist die resultierende Rückkopplung ein direktes Maß für die Leitfähigkeit.

Diese Rückkopplung kann durch die resultierende Impedanz-Änderung der Messspule bzw. des Messspulensystems erfasst werden. Bild 2 zeigt den typischen Verlauf der Ortskurve der Leitfähigkeit für zwei verschiedenen Frequenzen in der normierten Impedanzebene, d. h. den Funktionsverlauf der Impedanz bei Änderung der Leitfähigkeit (Variation des Materials). Die eigentliche Messgröße der phasensensitiven Wirbelstrommethode ist dabei der Phasenwinkel der Impedanz, also die Phasenwinkeländerung hervorgerufen durch das geänderte Feld (siehe Bild 2, beispielhafte Darstellung des Phasenwinkels  $\varphi_{pb}$  für das Material Blei bei der Frequenz  $f_2$  und des dazugehörigen Impedanzvektors). Diese kann über eine Kalibrierung direkt mit der Leitfähigkeit korreliert werden.

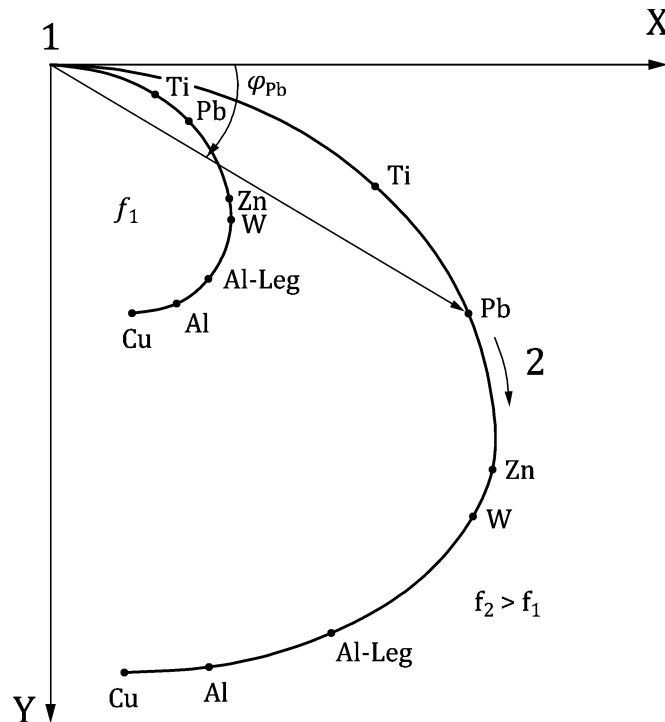
Das gilt allerdings nur für nicht-magnetisierbare Materialien (relative Permeabilität  $\mu_r = 1$ ), weil anderenfalls auch die Permeabilität des Materials ( $\mu_r > 1$ ) die Wirbelstromdichte beeinflusst und damit zwei unbekannte Parameter das Ergebnis bestimmen. Deshalb gilt das in dieser Norm beschriebene Verfahren ausschließlich für die Messung nicht-magnetisierbarer Metalle.



### Legende

- 1 Ferritkern der Sonde
- 2 hochfrequentes magnetisches Wechselfeld
- 3 induzierte Wirbelströme
- 4 Nichteisenmetall
- $I_{\sim}$  Erregerstrom
- $U$  Messsignal

**Bild 1 — Phasensensitives Wirbelstromverfahren – Messprinzip**



### Legende

- 1 Impedanz des unbeeinflussten Sensors (Spule in Luft)
- 2 Ortskurve der Leitfähigkeit (zunehmende Leitfähigkeit in Pfeilrichtung)
- X Realteil
- Y Imaginärteil

**Bild 2 — Impedanzebene – Ortskurven der Leitfähigkeit bei zwei Frequenzen  $f_1 < f_2$**

Weiterhin muss die Dicke der zu vermessenden Überzüge bzw. Teile größer als die Sättigungsdicke  $d_{\text{sat}}(f)$  bei der jeweiligen Frequenz sein, d.h. das anregende Feld muss vollständig innerhalb des Materials „abklingen“. Anderenfalls würde die generierte Wirbelstromdichte auch durch die Materialdicke begrenzt und ebenfalls als zusätzlicher Parameter das Ergebnis beeinflussen. Die dafür erforderliche Eindringtiefe wird über die Wahl der Frequenz eingestellt (siehe 5.4 und Anhang A).

ANMERKUNG 1 Typische Frequenzen liegen im Bereich von 100 Hz bis zu 10 MHz.

ANMERKUNG 2 Ist die Dicke des Überzuges kleiner als die Sättigungsdicke, aber die Leitfähigkeit des Überzugs gleich der Leitfähigkeit der zugrunde gelegten Kalibrierung, kann mit dem gleichen Messverfahren die Schichtdicke bestimmt werden (siehe DIN EN ISO 21968). In diesem Fall begrenzt ausschließlich die Schichtdicke die induzierte Wirbelstromdichte als variabler Parameter.

## 5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen

### 5.1 Einfluss der Leitfähigkeit

Üblicherweise kann die Leitfähigkeit im gesamten interessierenden Bereich metallischer Schichten bzw. Teile von ca. 0,5 MS/m bis ca. 60 MS/m gemessen werden. Die Empfindlichkeit eines Prüfkopfs (einer Sonde), d.h. der Messeffekt, hängt von der verwendeten Messfrequenz und der Leitfähigkeit des zu messenden Materials ab. Die entsprechenden Herstellerangaben sind zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Für die Richtigkeit der Leitfähigkeitsmessung können mit den verfügbaren Messsystemen, z. B. bei der Frequenz  $f = 60$  kHz, Werte deutlich unter 1 % vom jeweiligem Messwert realisiert werden, mit einer Wiederholpräzision unter 0,1 % IACS.

## 5.2 Abhebeeffekt (Lift-Off-Effekt)

Als eine Besonderheit des phasensensitiven Wirbelstromverfahrens kann der Prüfkopf in bestimmten Bereichen von der Oberfläche der Beschichtung oder des Teils abgehoben werden, ohne dass der Leitfähigkeitsmesswert wesentlich verfälscht wird (siehe Anhang B). Das ermöglicht die berührungsfreie Messung von bewegten Teilen, sehr weichen Beschichtungen oder die Messung von leitfähigen Beschichtungen unter einer nichtleitenden Schicht (z. B. Lackschutzschicht), ohne diese zu entfernen.

Der nutzbare Abhebebereich hängt vom jeweiligen Prüfkopfdesign ab und kann im Bereich von ca. 100 µm bis zu 1 mm liegen. Oft werden vom Hersteller die verbleibenden Abhebefehler durch spezielle Algorithmen weiter reduziert bzw. der Abhebebereich vergrößert (Lift-Off-Kompensation). Die jeweiligen Herstellerangaben sind zu berücksichtigen.

**ANMERKUNG** In E.3 sind ein einfacher Versuch zur Abschätzung des nutzbaren Abhebebereichs und in Anhang B die Grundlagen zum Verständnis des Abhebeeffektes beschrieben.

## 5.3 Temperatureinfluss

Die Leitfähigkeit  $\sigma$  eines Materials ist eine Funktion der Temperatur  $T$ . Deshalb wird per Konvention die Leitfähigkeit bei der Bezugstemperatur  $T = 20\text{ °C}$  angegeben. Weicht die Temperatur  $T$  des Überzuges bzw. des Teils von der Bezugstemperatur ab, muss die Leitfähigkeit nach Gleichung (1) auf den Wert bei  $T = 20\text{ °C}$  umgerechnet werden. Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  des Materials muss dafür bekannt sein.

$$\sigma(20\text{ °C}) = \sigma(T) \cdot \{1 + \alpha \cdot (T - 20\text{ °C})\} \quad (1)$$

Weicht bei der Kalibrierung die Temperatur  $T$  der Leitfähigkeitsnormale (siehe 6.2) vom Bezugswert  $T = 20\text{ °C}$  ab, müssen die angegebenen Nennwerte der Leitfähigkeitsnormale auf die aktuelle Temperatur  $T$  umgerechnet werden, um Kalibrierfehler zu vermeiden.

Meist sind die Messgeräte mit Temperatursensoren ausgestattet, so dass eine automatische Umrechnung der gemessenen Leitfähigkeit auf die Bezugstemperatur möglich ist. Zu beachten ist, dass stets die Temperatur des Überzuges bzw. des Teils gemessen wird (Materialtemperatur) und nicht die Umgebungstemperatur. Die Genauigkeit der Temperaturmessung ist entscheidend für die Richtigkeit des Leitfähigkeitswertes (siehe auch Anhang D für die grundlegenden Leistungsanforderungen an die Leitfähigkeitsmessgeräte).

**ANMERKUNG 1** Die erforderlichen Temperaturkoeffizienten verschiedener typischer Materialien sind oft in der Software der Messgeräte hinterlegt, so dass eine einfache Temperaturkorrektur der Leitfähigkeit bereits mit dem Messgerät möglich ist. Die jeweiligen Herstellerangaben sind zu berücksichtigen.

**ANMERKUNG 2** Zur einfachen Abschätzung des Leitfähigkeitsfehlers bedingt durch Temperaturabweichungen zur Bezugstemperatur gilt bei einem Temperaturkoeffizienten  $\alpha = 0,04\text{ K}^{-1}$  (entspricht ungefähr dem Temperaturkoeffizienten von Cu und Al) eine Temperaturabweichung von  $\Delta T = 10\text{ K}$ , dies resultiert in einer relativen Leitfähigkeitsabweichung von  $\Delta\sigma/\sigma = 4\text{ %}$ .

## 5.4 Geometrie — Dicke der Beschichtung oder des Teils (Sättigungsdicke)

Wenn die Dicke der Beschichtung oder des Teils zu gering ist, dringt das Magnetfeld nicht vollständig in das Material ein. In dieser Situation wird die induzierte Wirbelstromdichte neben der Leitfähigkeit auch durch die Schichtdicke begrenzt. Dieser Einfluss kann nur oberhalb einer bestimmten kritischen Mindestdicke des Überzuges vernachlässigt werden. Diese Mindestdicke wird meist als Sättigungsdicke  $d_{\text{sat}}(f)$  bezeichnet. Daher sollte die Dicke der Beschichtung oder des Teils immer größer als diese Sättigungsdicke sein.

Die kritische Mindestdicke der Beschichtung bzw. des Teils hängt von der gewählten Frequenz  $f$ , der Leitfähigkeit  $\sigma$  des Materials und dem Design des Sondensystems (sondentypspezifischer Korrekturfaktor  $K$ ) ab. Ihr Wert kann durch Gleichung (2) mit Gleichung (3) abgeschätzt werden (siehe Anhang A), oder ist vom Hersteller vorgegeben.

$$d_{\text{sat}} = 3 \cdot \delta_0 \quad (2)$$

Mit Gleichung (3)

$$\delta_0 = K \cdot \frac{503 \cdot 10^3}{\sqrt{f \cdot \sigma}} \quad (3)$$

ANMERKUNG In E.2 ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung der kritischen Minstdicke der Beschichtung beschrieben.

## 5.5 Geometrie — Randeinfluss

Die Ausdehnung des magnetischen Felds wird durch geometrische Einschränkungen der Beschichtung bzw. des Teils (z. B. Kanten, Bohrungen usw.) behindert. Daher können Messungen, die zu nahe an einer Kante durchgeführt werden, ungültig sein, es sei denn, das Messgerät ist speziell für derartige Messungen justiert. Der Abstand, der erforderlich ist, um die Auswirkung durch den Rand zu verhindern, ist vom Sondensystem abhängig (Feldverteilung). Die Angaben des Herstellers sind zu beachten.

ANMERKUNG In E.4 ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung des Randeinflusses beschrieben.

## 5.6 Geometrie — Oberflächenkrümmung

Die Ausbreitung des magnetischen Felds wird durch die Oberflächenkrümmung der Beschichtung bzw. des Teils beeinflusst. Dieser Einfluss ist mit abnehmendem Radius der Krümmung deutlicher ausgeprägt. Um diesen Einfluss zu minimieren, sollte eine Justierung auf einem Teil mit der gleichen Geometrie durchgeführt werden.

Der Einfluss der Oberflächenkrümmung ist stark abhängig von der Prüfkopfgeometrie und kann durch Reduzierung der empfindlichen Fläche des Prüfkopfs verringert werden.

ANMERKUNG 1 Von Herstellern werden Leitfähigkeitssonden angeboten, die eine Kompensation des Krümmungseinflusses durch Eingabe des bekannten Krümmungsradius ermöglichen.

ANMERKUNG 2 In E.5 ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung des Effekts der Oberflächenkrümmung beschrieben.

ANMERKUNG 3 Messungen, die an Teilen mit zu kleinem Krümmungsradius durchgeführt wurden, können zu unzuverlässigen Ergebnissen führen, selbst nach Kalibrierungen. Die resultierende Unsicherheit sollte berücksichtigt werden, um zu bestimmen, ob eine derartige Messung zulässig ist (siehe auch Anhang C).

## 5.7 Oberflächenrauheit

Die Leitfähigkeitsmessung wird durch die Oberflächentopografie des Überzuges bzw. des Teils beeinflusst. Raue Oberflächen können systematische und zufällige Fehler verursachen, da die induzierte Wirbelstromdichte durch die Rauheit beeinflusst wird. Zufällige Fehler können durch Mehrfachmessungen reduziert werden, wobei jede Messung an einer anderen Stelle durchgeführt wird; anschließend wird der Mittelwert dieser Messreihe bestimmt.

Der Einfluss der Oberflächenrauheit wird auch durch die gewählte Frequenz beeinflusst. Hohe Frequenzen (geringe Eindringtiefe des Feldes, d. h. hohe Wirbelstromdichte direkt im Oberflächenbereich) resultieren in einem größeren Rauheitseinfluss. Die Messfrequenz sollte deshalb stets soweit reduziert werden, dass die Überzugs- bzw. Teiledicke noch verlässlich größer als die Sättigungsdicke  $d_{\text{sat}}(f)$  ist und gleichzeitig so viel Material wie möglich in die Messung einbezogen wird, um den Oberflächeneinfluss zu minimieren (siehe Anhang A).

## 5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs

Der Druck, mit dem der Prüfkopf auf die Probe gedrückt wird, beeinflusst die Messung nicht. Berührungsfreie Messungen sind mit dem Messprinzip möglich (siehe 5.2). Es sind deshalb im Allgemeinen keine speziellen Maßnahmen zum Aufsetzen der Sonde mit gleichem Druck erforderlich (Federlagerung o. ä.).

## 5.9 Neigung des Prüfkopfs

Sofern vom Hersteller nicht anders vorgeschrieben, sollte der Prüfkopf senkrecht zur beschichteten Oberfläche aufgesetzt werden, da eine Neigung des Prüfkopfs zu Messfehlern führen kann.

Die Gefahr einer unbeabsichtigten Neigung kann durch die Prüfkopfgestaltung oder durch Verwendung einer Prüfkopfhalterung verringert werden.

**ANMERKUNG** Die meisten handelsüblichen Messgeräte sind mit Prüfköpfen ausgestattet, die eine ebene Aufsetzfläche aufweisen und ein senkrecht Aufsetzen des Prüfkopfs auf der Probenoberfläche sicherstellen.

## 5.10 Äußere elektromagnetische Felder

Die Messergebnisse können durch starke elektromagnetisch interferierende Felder beeinflusst sein. Bei unerwarteten Ergebnissen oder starken Schwankungen der Ergebnisse, die nicht durch andere Faktoren erklärt werden können, sollte diese Ursache in Betracht gezogen werden. In diesem Fall sollte an einem Ort ohne interferierende Felder eine Vergleichsmessung durchgeführt werden.

# 6 Kalibrierung und Justierung des Messgerätes

## 6.1 Allgemeines

Jedes Messgerät ist vor der Benutzung entsprechend den Herstelleranweisungen mit geeigneten Leitfähigkeitsnormalen (siehe 6.2) zu kalibrieren oder zu justieren (siehe auch D.1 und D.2). Geometrie und Oberflächeneigenschaften des bei der Kalibrierung oder Justierung verwendeten Leitfähigkeitsnormals sollten mit den Proben übereinstimmen, um Abweichungen zu verhindern, die durch die in Abschnitt 5 beschriebenen Faktoren verursacht werden. Andernfalls sind diese Einflüsse bei der Abschätzung der Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Während der Kalibrierung oder Justierung der Messgeräte sollten die Leitfähigkeitsnormale die gleiche Temperatur haben wie die Proben, um temperaturinduzierte Unterschiede zu minimieren. Anderenfalls muss die Temperatur des Probenmaterials gemessen und berücksichtigt werden.

Weicht bei der Kalibrierung die Temperatur  $T$  der Leitfähigkeitsnormale vom Bezugswert  $T = 20\text{ °C}$  ab, müssen die angegebenen Nennwerte der Leitfähigkeitsnormale auf die aktuelle Temperatur  $T$  umgerechnet werden, um Kalibrierfehler zu vermeiden (siehe 5.3). Die auf die aktuelle Temperatur bezogenen Nennwerte  $\sigma(T)$  der Leitfähigkeitsnormale werden durch Umrechnung nach Gleichung (4) aus den angegebenen Nennwerten  $\sigma(20\text{ °C})$  ermittelt:

$$\sigma(T) = \frac{\sigma(20\text{ °C})}{1 + \alpha \cdot (T - 20\text{ °C})} \quad (4)$$

Um den Einfluss von Messgerätedriften zu verhindern, werden regelmäßige Kontrollmessungen mit Bezugsnormalen oder Referenzproben empfohlen. Erforderlichenfalls ist das Messgerät erneut zu justieren.

**ANMERKUNG 1** Die Umrechnung der Leitfähigkeit der Kalibriernormale in Bezug auf die aktuelle Temperatur bei der Kalibrierung wird von einigen Messsystemen automatisch realisiert. Die jeweiligen Herstellerangaben sind zu berücksichtigen.

**ANMERKUNG 2** Die meisten Messgeräte justieren sich selbständig bei Realisierung einer Funktion, die als „Kalibrierung“ bezeichnet wird; diese ist für den Bediener häufig nicht offensichtlich.