

DIN EN ISO 21968

ICS 25.220.40

Ersatz für
DIN EN ISO 21968:2005-10

**Nichtmagnetische metallische Überzüge auf metallischen und
nichtmetallischen Grundwerkstoffen –
Messung der Schichtdicke –
Phasensensitives Wirbelstromverfahren (ISO 21968:2019);
Deutsche Fassung EN ISO 21968:2019**

Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials –
Measurement of coating thickness –
Phase-sensitive eddy-current method (ISO 21968:2019);
German version EN ISO 21968:2019

Revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base métalliques et non
métalliques –
Mesurage de l'épaisseur de revêtement –
Méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase (ISO 21968:2019);
Version allemande EN ISO 21968:2019

Gesamtumfang 51 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 21968:2019) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 107 „Metallic and other inorganic coatings“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 262 „Metallische und andere anorganische Überzüge, einschließlich des Korrosionsschutzes und der Korrosionsprüfung von Metallen und Legierungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-01-61 AA „Mess- und Prüfverfahren für Schichten und Schichtsysteme“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 2064	siehe	DIN EN ISO 2064
ISO 2178	siehe	DIN EN ISO 2178
ISO 2360	siehe	DIN EN ISO 2360
ISO 4618	siehe	DIN EN ISO 4618
ISO 5725-1:1994	siehe	DIN ISO 5725-1:1997-11
ISO 5725-2	siehe	DIN ISO 5725-2
ISO/TR 22971	siehe	DIN ISO/TR 22971

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 21968:2005-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anpassung dieses Dokuments an die aktuellen Anforderungen des ISO/IEC Guide 98-3 (GUM:1995);
- b) Aufnahme von Hinweisen, praktischen Beispielen und einfachen Abschätzungen der Messunsicherheit für die wichtigsten Faktoren;
- c) Aufnahme von Wiederholpräzision und Vergleichpräzision für typische Anwendungen dieses Verfahrens;
- d) Erweiterung des Anhangs um weitere Anwendungen, experimentelle Abschätzungen von Faktoren, die die Genauigkeit beeinflussen.

Frühere Ausgaben

DIN EN ISO 21968: 2005-10

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

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

DIN EN ISO 2178, *Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen — Messen der Schichtdicke — Magnetverfahren*

DIN EN ISO 2360, *Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen metallischen Grundwerkstoffen — Messen der Schichtdicke — Wirbelstromverfahren*

DIN EN ISO 4618, *Beschichtungsstoffe — Begriffe*

DIN ISO 5725-1:1997-11, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen — Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1:1994)*

DIN ISO 5725-2, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen — Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens*

DIN ISO/TR 22971, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen — Leitfaden zur Verwendung von ISO 5725-2:1994 bei der Entwicklung, Einführung und statistischen Analyse von Ringversuchsergebnissen zur Wiederhol- und Vergleichpräzision*

— Leerseite —

Deutsche Fassung

Nichtmagnetische metallische Überzüge auf metallischen und
nichtmetallischen Grundwerkstoffen —
Messung der Schichtdicke —
Phasensensitives Wirbelstromverfahren (ISO 21968:2019)

Non-magnetic metallic coatings on metallic and
non-metallic basis materials —
Measurement of coating thickness —
Phase-sensitive eddy-current method
(ISO 21968:2019)

Revêtements métalliques non magnétiques sur des
matériaux de base métalliques et non métalliques —
Mesurage de l'épaisseur de revêtement —
Méthode par courants de Foucault sensible aux
variations de phase (ISO 21968:2019)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 15. September 2019 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Prinzip der Messung	7
5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen	10
5.1 Grundlegender Einfluss auf die Schichtdicke	10
5.2 Elektrische Eigenschaften des Überzugs	10
5.3 Geometrie — Dicke des Grundwerkstoffs	10
5.4 Geometrie — Kanteneffekte	11
5.5 Geometrie — Oberflächenkrümmung	11
5.6 Rauheit der Oberfläche	11
5.7 Abhebeeffekt	12
5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs	13
5.9 Neigung des Prüfkopfs	13
5.10 Temperatureffekte	13
5.11 Zwischenschichten	13
5.12 Äußere elektromagnetische Felder	13
6 Kalibrierung und Justierung des Messgeräts	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Schichtdickennormale	14
6.3 Justierverfahren	14
7 Durchführung der Messung und Auswertung	16
7.1 Allgemeines	16
7.2 Anzahl der Messungen und Auswertung	16
8 Unsicherheit der Ergebnisse	16
8.1 Allgemeine Anmerkungen	16
8.2 Unsicherheit der Kalibrierung des Messgeräts	17
8.3 Stochastische Fehler	18
8.4 Unsicherheiten, die durch Faktoren verursacht werden, die in Abschnitt 5 zusammengefasst sind	19
8.5 Kombinierte Unsicherheit, erweiterte Unsicherheit und Endergebnis	19
9 Präzision	20
9.1 Allgemeines	20
9.2 Wiederholpräzision (r)	20
9.3 Vergleichgrenze (R)	21
10 Prüfbericht	23
Anhang A (informativ) Wirbelstromerzeugung in einem metallischen Leiter	24
A.1 Allgemeines	24
A.2 Beispiel 1: leitender Überzug auf einem nichtleitenden Grundwerkstoff	25
A.3 Beispiel 2: leitender Überzug auf einem leitenden und/oder magnetischen Grundmetall	26

A.4	Beispiel 3: nichtleitende Beschichtung auf einem leitenden und/oder magnetischen Grundmetall	28
Anhang B (informativ) Grundlagen zur Bestimmung der Unsicherheit einer Messung des angewandten Messverfahrens nach ISO/IEC Guide 98-3.....		
B.1	Allgemeines	30
B.2	Typ A	31
B.3	Typ B	31
Anhang C (informativ) Grundlegende Leistungsanforderungen an Schichtdickenmessgeräte, basierend auf dem phasensensitiven Wirbelstromverfahren, wie in diesem Dokument beschrieben		
C.1	Technische Spezifikation.....	33
C.2	Kontrolle/Prüfung von Messgeräten und Prüfköpfen.....	34
C.2.1	Vor Lieferungen, nach Reparatur und in regelmäßigen Zeitabständen nach der Nutzung	34
C.2.2	Durchführung vor Ort.....	34
Anhang D (informativ) Beispiele für die experimentelle Abschätzung von Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen.....		
D.1	Allgemeines	35
D.2	Kanteneffekt.....	35
D.3	Dicke des Grundmetalls	36
D.4	Krümmung der Oberfläche	37
D.5	Leitfähigkeit und Permeabilität des Grundmetalls	38
D.6	Abhebehöhe.....	39
Anhang E (informativ) Tabelle des Student-Faktors.....		
Anhang F (informativ) Beispiel für die Abschätzung der Unsicherheit		
F.1	Informationen zur Probe	42
F.2	Schritte	42
Anhang G (informativ) Einzelheiten zur Genauigkeit.....		
G.1	Allgemeine Anmerkungen zum Ringversuch.....	45
G.2	Proben	45
G.3	Schichtdickenmessgeräte.....	45
G.4	Kalibrierung	45
G.5	Anzahl der Messungen.....	45
G.6	Bewertung.....	46
Literaturhinweise.....		
		47

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 21968:2019) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 107 „Metallic and other inorganic coatings“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 262 „Metallische und andere anorganische Überzüge, einschließlich des Korrosionsschutzes und der Korrosionsprüfung von Metallen und Legierungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 2020, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis April 2020 zurückgezogen werden.

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

Dieses Dokument ersetzt EN ISO 21968:2005.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 21968:2019 wurde von CEN als EN ISO 21968:2019 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/107, *Metallic and other inorganic coatings*.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 21968:2005), welche technisch überarbeitet wurde. Die wichtigsten Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind wie folgt:

- Dieses Dokument wurde an die gegenwärtigen Anforderungen nach ISO/IEC Guide 98-3 (auch als „GUM:1995“ bekannt) angepasst;
- Aufnahme von Hinweisen, Praxisbeispielen und einfachen Schätzungen der Messunsicherheit für die wichtigsten Faktoren;
- Aufnahme von Werten der Wiederholpräzision und Vergleichpräzision für übliche Anwendungen dieses Verfahrens;
- Erweiterung des Anhangs mit weiteren Anwendungen, experimentellen Schätzungen von Faktoren, die die Genauigkeit beeinflussen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren unter Anwendung phasensensitiver Wirbelstromgeräte zur zerstörungsfreien Messung der Dicke nichtmagnetischer metallischer Überzüge auf metallischen und nichtmetallischen Grundwerkstoffen fest, wie beispielsweise:

- a) Zink, Cadmium, Kupfer, Zinn oder Chrom auf Stahl;
- b) Kupfer oder Silber auf Verbundwerkstoffen.

Das phasensensitive Verfahren kann ohne Schichtdickenfehler auf kleinere Oberflächen und stärkere Oberflächenkrümmungen angewendet werden als das nach ISO 2360 festgelegte amplitudensensitive Wirbelstromverfahren und wird weniger stark durch die magnetischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs beeinflusst. Dagegen wird das phasensensitive Verfahren stärker durch die elektrischen Eigenschaften des Schichtwerkstoffs beeinflusst.

In diesem Dokument wird der Begriff „Beschichtung“ bzw. „Überzug“ verwendet für z. B. Lacke und Anstrichstoffe, galvanische Überzüge, Email, Kunststoffschichten, Umhüllungen und Pulverlacke.

Dieses Verfahren ist besonders für Messungen der Dicke metallischer Überzüge geeignet. Diese Überzüge können nichtmagnetische metallische Überzüge auf nichtleitenden, leitenden oder magnetischen Grundwerkstoffen sein, aber auch magnetische Überzüge auf nichtleitenden oder leitenden Grundwerkstoffen.

Die Messung von metallischen Überzügen auf metallischem Grundwerkstoff funktioniert nur, wenn das Produkt der Leitfähigkeit und der Permeabilität (σ, μ) eines der Werkstoffe mindestens das Zweifache des Produktes der Leitfähigkeit und der Permeabilität des anderen Werkstoffs beträgt. Nichtferromagnetische Werkstoffe haben eine relative Permeabilität von 1.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

ISO 2064, *Metallic and other inorganic coatings — Definitions and conventions concerning the measurement of thickness*

ISO 4618, *Paints and varnishes — Terms and definitions*

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

3 Begriffe

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

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

Justierung eines Messsystems

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Zur Art der Justierung eines Messsystems können Nullpunkteinstellung eines Messsystems, 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* (3.2) 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“ und „Kontrolle“ anstelle des korrekten Begriffs „Kalibrierung“ verwendet.

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11 (auch bekannt als „VIM“), modifiziert – Anmerkung 4 zum Begriff wurde hinzugefügt.]

3.2

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 weder mit der *Justierung eines Messsystems* (3.1), die oft fälschlicherweise „Selbst-Kalibrierung“ genannt wird, noch mit der Verifizierung der Kalibrierung verwechselt werden.

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

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39 (auch bekannt als „VIM“)]

4 Prinzip der Messung

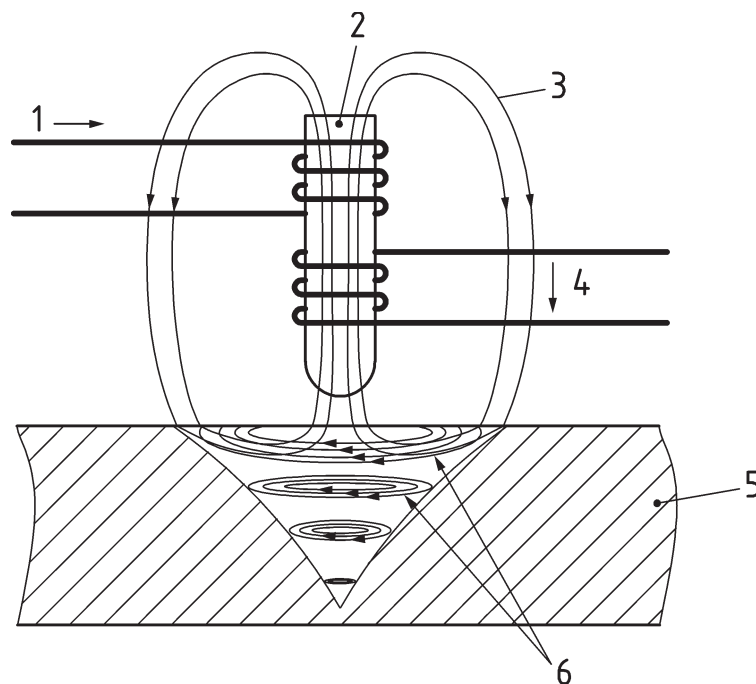
Phasensensitive Wirbelstromgeräte arbeiten nach dem Prinzip, dass ein im Prüfkopfsystem des Gerätes generiertes, hochfrequentes, elektromagnetisches Feld Wirbelströme in dem Überzug, auf den der Prüfkopf gesetzt wird, sowie im Grundwerkstoff unter dem Überzug, sofern dieser Grundwerkstoff leitfähig ist (siehe Bild 1), erzeugt. Diese induzierten Ströme führen zu einer Änderung des elektromagnetischen Feldes, das das Prüfspulensystem umgibt, und ergeben daher eine Änderung der Amplitude und des Phasenwinkels der Impedanz der Prüfspule. Die induzierte Wirbelstromdichte ist eine Funktion der Schichtdicke, der Leitfähigkeit des Überzugs, der verwendeten Frequenz des Prüfkopfsystems und der Leitfähigkeit des Grundmetalls. Wenn die Dicke eines Überzugs mit konstanter Leitfähigkeit erhöht wird, beschreibt der Impedanzvektor bei einer gegebenen Frequenz eine sogenannte Ortsfunktion der Dicke in der Impedanzebene (siehe Bild 2). Jeder Punkt dieser Ortskurve verbindet einen Phasenwinkel des Impedanzvektors mit der entsprechenden Schichtdicke. Demzufolge kann dieser Winkel der Impedanz (Phasenverschiebung) als ein Maß für die Dicke des Überzugs auf dem Leiter durch eine Kalibrierung mit Bezugsnormen genutzt werden (siehe auch Anhang A).

Um eine Änderung des Phasenwinkels der Spulenimpedanz zu messen, ist die Prüfspule üblicherweise Teil eines Spulensystems und mit der Erregerspule auf einem Ferritkern wie in einem Transformator (siehe Bild 1) gekoppelt. Die Änderungen des Phasenwinkels und der Amplitude aufgrund der Auswirkung der induzierten Wirbelströme kann, z. B. mit einem Lock-in-Verstärker, gemessen werden. Diese Werte werden üblicherweise mit digitalen Mitteln vorverarbeitet und die resultierende Dicke wird dann berechnet und ausgegeben.

Der Prüfkopf und das Messsystem/die Messanzeige können in ein einziges Messgerät integriert sein.

ANMERKUNG 1 Anhang C beschreibt die grundlegenden Leistungsanforderungen für das Gerät.

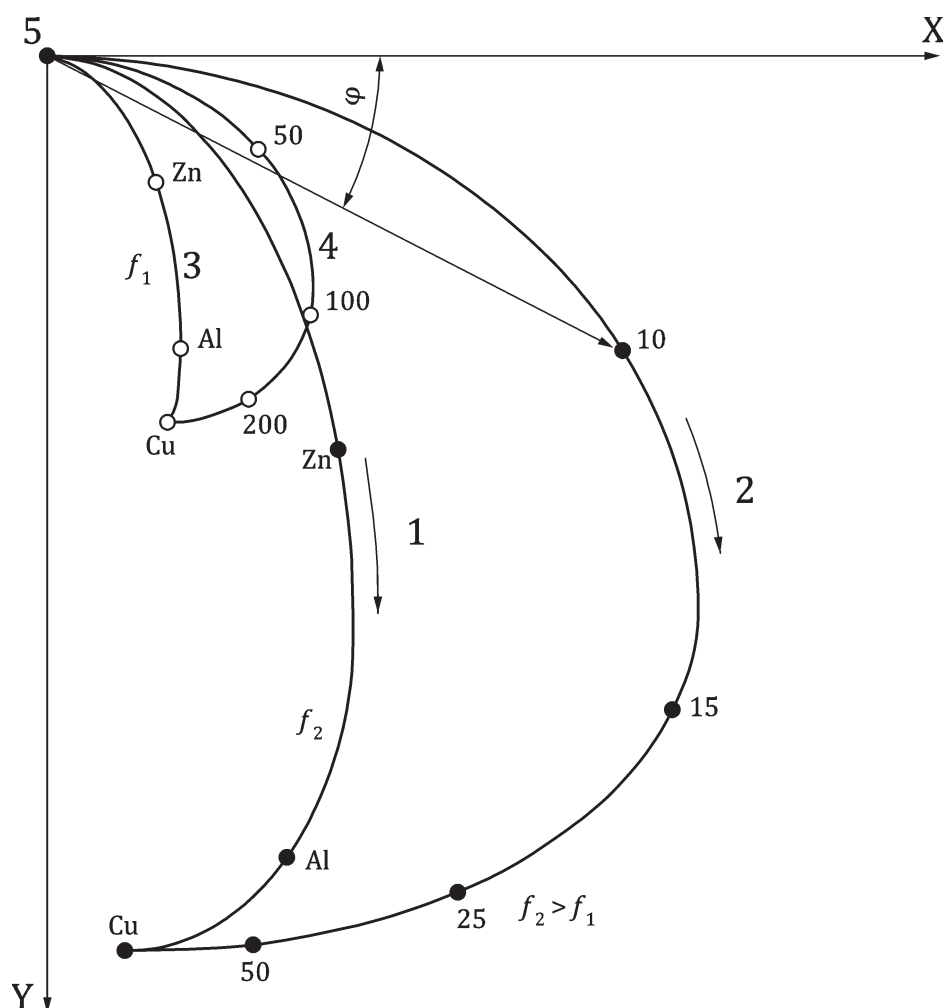
ANMERKUNG 2 Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen, werden in Abschnitt 5 behandelt.



Legende

- 1 Erregerstrom
- 2 Ferritkern des Prüfkopfs
- 3 hochfrequentes magnetisches Wechselfeld
- 4 Messsignal $U = f(t(\varphi))$
- 5 Grundwerkstoff (leitfähig)
- 6 induzierte Wirbelströme

Bild 1 — Phasenempfindliches Wirbelstromverfahren



1	Ortskurve der Leitfähigkeit bei der Frequenz f_2
2	Ortskurve der Dicke von Cu bei der Frequenz f_2
3	Ortskurve der Leitfähigkeit bei der Frequenz f_1
4	Ortskurve der Dicke von Cu bei der Frequenz f_1
5	Spule in Luft (unbeeinflusst)
X	Realteil
Y	Imaginärteil

Bild 2 — Ortskurven der Dicke von Cu in der normalisierten Impedanzebene für zwei Frequenzen f_1 und f_2

Da dieser mögliche Schichtdickenbereich sowohl von der Frequenz der Wirbelstromerzeugung im Prüfkopf-system als auch von der elektrischen Leitfähigkeit des Überzugs abhängig ist, sollte die maximal messbare Schichtdicke dafür experimentell bestimmt werden, sofern vom Hersteller nichts anderes angegeben wurde.

Eine Erläuterung zur Wirbelstromerzeugung und die Berechnung der maximal messbaren Schichtdicke $t_{\max}$ sind in Anhang A angegeben.

Liegen keine weiteren Informationen vor, kann die maximal messbare Schichtdicke $t_{\max}$ nach Gleichung (1) abgeschätzt werden:

$$t_{\max} \approx 0,8 \cdot \delta_0 \quad (1)$$

Dabei ist

δ_0 die Standardeindringtiefe des Schichtwerkstoffs (siehe Anhang A).

5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen

5.1 Grundlegender Einfluss auf die Schichtdicke

Die Empfindlichkeit eines Prüfkopfs, d. h. der Messeffekt, ist abhängig von der verwendeten Frequenz, der Leitfähigkeit des Überzugs und des Grundwerkstoffs und den Eigenschaften des Prüfkopfsystems. Neben den Eigenschaften des Prüfkopfsystems hängt die resultierende Unsicherheit der Dicke auch vom Probenwerkstoff ab, z. B. der Homogenität des Überzugs und der Leitfähigkeit und Rauheit des Grundmetalls.

5.2 Elektrische Eigenschaften des Überzugs

Die Leitfähigkeit des Überzugs und die des Grundwerkstoffs bestimmen die induzierte Wirbelstromdichte für ein gegebenes Prüfkopfsystem und eine gegebene Frequenz. Demnach wird der Messeffekt dieses Verfahrens durch die Leitfähigkeit des Überzugs und des Grundmetalls bedingt. Der Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Messwert ist stark abhängig von der Leitfähigkeit von Überzug und Grundwerkstoff. Folglich müssen die Kalibrierverfahren und die Messungen am gleichen Werkstoff erfolgen. Verschiedene Werkstoffe mit unterschiedlicher Leitfähigkeit sowie auch örtliche Veränderungen der Leitfähigkeit oder Unterschiede zwischen verschiedenen Proben können (mehr oder weniger) Fehler bei der Schichtdickenbestimmung verursachen.

5.3 Geometrie — Dicke des Grundwerkstoffs

Im Fall eines leitfähigen Grundwerkstoffs (Grundmetall) wird die Erzeugung von Wirbelströmen durch das Magnetfeld der Spule in der Tiefe des Grundmetalls begrenzt, wenn die Dicke des Grundmetalls zu gering ist. Dieser Einfluss kann nur oberhalb einer bestimmten kritischen Mindestdicke des Grundmetalls vernachlässigt werden.

Daher sollte die Dicke des Grundmetalls immer größer als diese kritische Mindestdicke des Grundmetalls sein. Durch Justierung des Messgeräts können Fehler kompensiert werden, welche durch geringe Grundmetallstärken verursacht werden. Allerdings kann jede Änderung der Dicke des Grundmetalls erhöhte Unsicherheit und Fehler verursachen.

Die kritische Mindestdicke des Grundmetalls hängt vom Prüfkopfsystem (Frequenz, Geometrie) und der Leitfähigkeit des Überzugs und des Grundmetalls ab. Ihr Wert sollte, sofern vom Hersteller nicht anders festgelegt, experimentell bestimmt werden.

ANMERKUNG In Anhang D ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung der kritischen Mindestdicke des Grundmetalls beschrieben.

Sind allerdings keine anderen Informationen vorhanden, kann die geforderte Mindestdicke des Grundmetalls, $t_{\min}$, anhand der Gleichung (2) abgeschätzt werden.

$$t_{\min} = 3 \cdot \delta_0 \quad (2)$$

Dabei ist

δ_0 die Standardeindringtiefe des Grundmetalls (siehe Anhang A).

Im Fall eines nichtleitenden und nichtmagnetischen Grundwerkstoffs beeinflusst die Dicke des Grundwerkstoffs nicht die Messergebnisse und demzufolge darf sie nicht als Einflussfaktor berücksichtigt zu werden.

5.4 Geometrie — Kanteneffekte

Die Induktion von Wirbelströmen wird durch geometrische Begrenzungen des Überzugs (z. B. Kanten, Bohrungen usw.) beeinflusst. Daher können Messungen, die zu nahe an einer Kante oder Ecke durchgeführt werden, ungültig sein, es sei denn, das Messgerät ist speziell für derartige Messungen justiert worden. Der Abstand, der erforderlich ist, um die Auswirkung durch Kanteneffekte zu vermeiden, ist vom Sondensystem abhängig (Feldverteilung).

ANMERKUNG 1 In Anhang D ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung des Kanteneffekts beschrieben.

ANMERKUNG 2 Amplitudensensitive Wirbelstrommessgeräte nach ISO 2360 können erheblich stärker durch Kanteneffekte beeinflusst werden.

5.5 Geometrie — Oberflächenkrümmung

Die Ausbreitung des Magnetfelds und damit die Induktion der Wirbelströme werden durch die Oberflächenkrümmung des Überzugs und des Grundwerkstoffs beeinflusst. Dieser Einfluss ist mit abnehmendem Radius der Krümmung und mit abnehmender Schichtdicke deutlicher ausgeprägt. Um diesen Einfluss zu minimieren, sollte eine Justierung an einer Probe 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. Prüfköpfe mit sehr kleinen empfindlichen Flächen werden häufig als Mikrosonden bezeichnet.

ANMERKUNG 1 Es sind Messgeräte und Prüfköpfe verfügbar, die in der Lage sind, den Einfluss der Oberflächenkrümmung der Probe automatisch zu kompensieren, wenn der Durchmesser der Krümmung bekannt ist. Sie können den resultierenden Schichtdickenfehler verhindern.

ANMERKUNG 2 In Anhang D ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung des Effekts der Oberflächenkrümmung beschrieben.

5.6 Rauheit der Oberfläche

Messungen werden durch die Oberflächentopographie des Überzugs beeinflusst und können ebenfalls durch die Oberflächentopographie des leitenden Grundmetalls beeinflusst werden. Raue Oberflächen können sowohl systematische als auch zufällige Fehler verursachen. Zufällige Fehler können durch Mehrfachmessungen reduziert werden, wobei jede Messung an einer anderen Stelle durchgeführt und anschließend der Mittelwert dieser Messreihe berechnet wird.

Um den Einfluss der Rauheit zu verringern, sollte eine Kalibrierung mit Referenzteilen mit der gleichen Rauheit wie die beschichtete Probe durchgeführt werden.

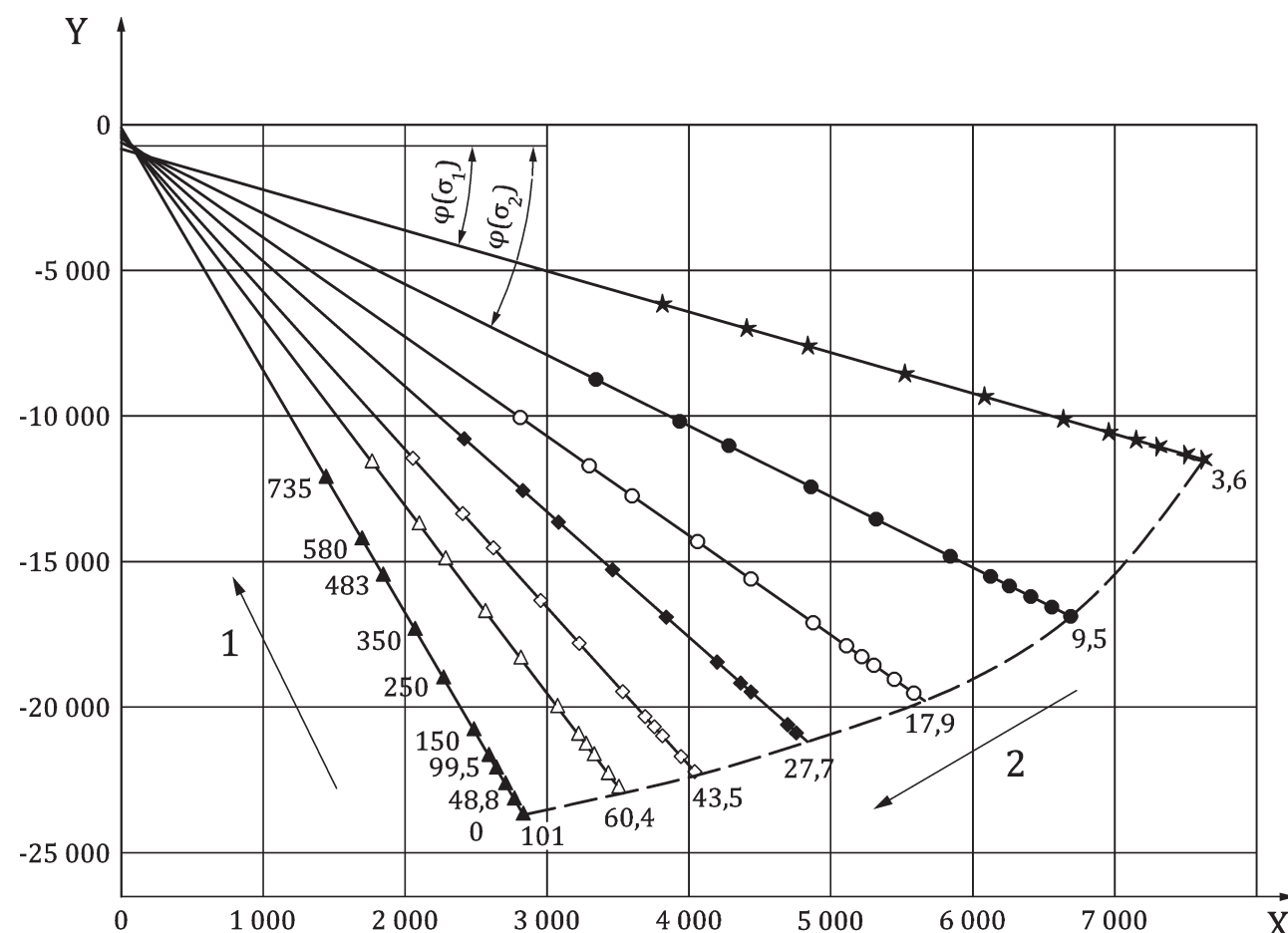
Falls erforderlich, sollte die Definition der verwendeten mittleren Schichtdicken zwischen Anbieter und Kunde festgelegt werden.

ANMERKUNG Amplitudensensitive Wirbelstrommessungen nach ISO 2360 können stärker durch die Rauheit des Grundmetalls beeinflusst werden.

5.7 Abhebeeffekt

Falls der Prüfkopf keinen unmittelbaren Kontakt zum Überzug hat, beeinflusst der Spalt zwischen Prüfkopf und Überzug (Abhebeeffekt) die Messung der Dicke des Metallüberzugs. Die Stärke des Abhebeeffekts ist abhängig von der Konstruktion des Prüfkopfes und der daraus folgenden Feldgeometrie. Durch Anwendung eines geeigneten elektronischen Schaltkreises und/oder eines mathematischen Algorithmus im Messgerät kann der Abhebeeffekt für Höhen bis zu 1 mm kompensiert werden.

Die Stärke des Abhebeeffekts kann bei einigen Prüfkopfgeometrien gering sein. In diesem Fall führt eine Zunahme der Abhebehöhe hauptsächlich zu einer Verringerung der Impedanzamplitude, der Phasenwinkel als Maß für die Schichtdicke wird aber nur geringfügig beeinflusst (siehe Bild 3). Der verbleibende Einfluss kann durch einen geeigneten mathematischen Algorithmus unter Anwendung der gemessenen Amplitude und der Phasenwinkelangabe kompensiert werden.



Legende

- ▲ Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 101,088$ % IACS
- △ Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 60,407$ % IACS
- ◇ Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 43,48$ % IACS
- ◆ Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 27,688$ % IACS
- Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 17,85$ % IACS
- Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 9,534$ % IACS
- ★ Leitfähigkeit der Probe $\sigma = 3,551$ % IACS

- 1 ansteigende Abhebehöhe, in μm
- 2 ansteigende σ in % IACS
- X Realteil
- Y Imaginärteil

Bild 3 — Abhebeeffekt