

DIN EN ISO 21968



ICS 25.220.40

Einsprüche bis 2018-12-05
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 21968:2005-10

Entwurf

**Nichtmagnetische metallische Überzüge auf metallischen und
nichtmetallischen Grundwerkstoffen –
Messung der Schichtdicke –
Phasensensitives Wirbelstromverfahren (ISO/DIS 21968:2018);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 21968:2018**

Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials –
Measurement of coating thickness –

Phase-sensitive eddy-current method (ISO/DIS 21968:2018);
German and English version prEN ISO 21968:2018

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/DIS 21968:2018);
Version allemande et anglaise prEN ISO 21968:2018

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-10-05 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-
Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de,
sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im
Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-
Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6,
10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 99 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 21968:2018) 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).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

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 2361	siehe	DIN EN ISO 2361
ISO 2808	siehe	DIN EN ISO 2808
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 Wiederholbarkeits- und Vergleichswerten für typische Anwendungen dieses Verfahrens;
- d) Erweiterung des Anhangs um weitere Anwendungen, experimentelle Abschätzungen von Faktoren, die die Genauigkeit beeinflussen;
- e) redaktionelle Änderungen nach den aktuellen ISO-Richtlinien Teil 2.

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 2361, *Elektrolytisch erzeugte Nickelschichten auf magnetischen und nichtmagnetischen Grundmetallen — Messen der Schichtdicke — Magnetverfahren*

DIN EN ISO 2808, *Beschichtungsstoffe — Bestimmung der Schichtdicke*

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*

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 —

Nichtmagnetische metallische Überzüge auf metallischen und nichtmetallischen Grundwerkstoffen — Messung der Schichtdicke — Phasensensitives Wirbelstromverfahren (ISO/DIS 21968:2018)

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/DIS 21968:2018)

Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials — Measurement of coating thickness — Phase-sensitive eddy-current method (ISO/DIS 21968:2018)

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: parallele Umfrage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.9d

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Prinzip der Messung	8
5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen	11
5.1 Grundlegender Einfluss auf die Schichtdicke	11
5.2 Elektrische Eigenschaften der Beschichtung	11
5.3 Geometrie: Dicke des Grundwerkstoffs	11
5.4 Geometrie: Kanteneffekte	12
5.5 Geometrie: Oberflächenkrümmung	12
5.6 Rauheit der Oberfläche	12
5.7 Abhebeeffect	13
5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs	15
5.9 Neigung des Prüfkopfs	15
5.10 Temperatureffekte	15
5.11 Zwischenschichten	15
5.12 Äußere elektromagnetische Felder	15
6 Kalibrierung und Justierung des Messgeräts	16
6.1 Allgemeines	16
6.2 Schichtdickennormale	16
6.3 Justierverfahren	16
7 Durchführung der Messung und Auswertung	18
7.1 Allgemeines	18
7.2 Anzahl der Messungen und Auswertung	18
8 Unsicherheit der Ergebnisse	19
8.1 Allgemeine Anmerkungen	19
8.2 Unsicherheit der Kalibrierung des Messgeräts	19
8.3 Stochastische Fehler	20
8.4 Unsicherheiten, die durch Faktoren verursacht werden, die in Abschnitt 5 zusammengefasst sind;	21
8.5 Kombinierte Unsicherheit, erweiterte Unsicherheit und Endergebnis	21
9 Präzision	22
9.1 Allgemeines	22
9.2 Wiederholpräzision (r)	22
9.3 Vergleichsgrenze (R)	23
10 Prüfbericht	25
Anhang A (informativ) Wirbelstromerzeugung in einem metallischen Leiter	26
A.1 Allgemeines	26
A.2 Beispiel 1: leitende Beschichtung auf einem nichtleitenden Grundwerkstoff	27

A.3	Beispiel 2: leitende Beschichtung auf einem leitenden und/oder magnetischen Grundmetall	28
A.4	Beispiel 3: nichtleitende Beschichtung auf einem leitenden und/oder magnetischen Grundmetall	30
Anhang B (informativ) Grundlagen zur Bestimmung der Unsicherheit einer Messung des angewandten Messverfahrens nach ISO/IEC Guide 98-3.....		32
B.1	Allgemeines	32
B.2	Typ A	33
B.3	Typ B	33
Anhang C (informativ) Grundlegende Leistungsanforderungen an Schichtdickenmessgeräte, die auf dem phasensensitiven Wirbelstromverfahren basieren, wie in diesem Dokument beschrieben		35
C.1	Technische Spezifikation.....	35
C.2	Kontrolle/Prüfung von Messgeräten und Prüfköpfen.....	36
C.2.1	Vor Lieferungen, nach Reparatur und in regelmäßigen Zeitabständen nach der Nutzung	36
C.2.2	Durchführung vor Ort.....	36
Anhang D (informativ) Beispiele für die experimentelle Abschätzung von Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen.....		37
D.1	Allgemeines	37
D.2	Kanteneffekt.....	37
D.3	Dicke des Grundmetalls	38
D.4	Krümmung der Oberfläche	39
D.5	Leitfähigkeit und Permeabilität des Grundmetalls	40
D.6	Abhebehöhe.....	42
Anhang E (informativ) Tabelle des Student-Faktors.....		44
Anhang F (informativ) Beispiel für die Abschätzung der Unsicherheit (siehe Abschnitt 8)		45
F.1	Informationen zur Probe	45
F.2	Schritte	45
Anhang G (informativ) Einzelheiten zur Messunsicherheit.....		48
G.1	Allgemeine Anmerkungen zum Ringversuch.....	48
G.2	Proben	48
G.3	Schichtdickenmessgeräte.....	48
G.4	Kalibrierung.....	48
G.5	Anzahl der Messungen.....	48
G.6	Bewertung.....	49
Literaturhinweise.....		50

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 21968:2018) 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.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 21968:2005 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 21968:2018 wurde von CEN als prEN ISO 21968:2018 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.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

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

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 21968:2005), welche mit den folgenden Änderungen technisch überarbeitet wurde:

- Anpassung dieses Dokuments an die gegenwärtigen Anforderungen nach ISO/IEC Guide 98-3 (GUM:1995);
- 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 Messunsicherheit beeinflussen;
- redaktionelle Änderungen nach der geltenden ISO-Direktive, Teil 2.

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

In diesem Dokument wird ein Verfahren zur zerstörungsfreien Messung der Dicke nichtmagnetischer metallischer Überzüge auf metallischen und nichtmetallischen Grundwerkstoffen unter Anwendung phasensensitiver Wirbelstromgeräte festgelegt; Beispiele für solche Überzüge sind:

- 1) Zink, Cadmium, Kupfer, Zinn oder Chrom auf Stahl;
- 2) Kupfer oder Silber auf Verbundwerkstoffen.

Das phasensensitive Verfahren kann auf kleinere Oberflächen und stärkere Oberflächenkrümmungen ohne Schichtdickenfehler 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 gilt besonders für Messungen der Dicke metallischer Überzüge. Diese Überzüge können nichtmagnetische metallische Überzüge auf nichtleitenden, leitenden oder magnetischen Grundwerkstoffen sein, aber auch magnetische Überzüge auf nichtleitenden oder leitenden Grundwerkstoffen.

Bei der Messung metallischer Überzüge auf metallischem Grundwerkstoff sollte das Produkt der Leitfähigkeit und der Permeabilität (σ, μ) eines der Werkstoffe mindestens das 2fache des Produktes der Leitfähigkeit und der Permeabilität des anderen Werkstoffs betragen. 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 5725-1:1994, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles 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 und 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: unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: 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 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“ 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, 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

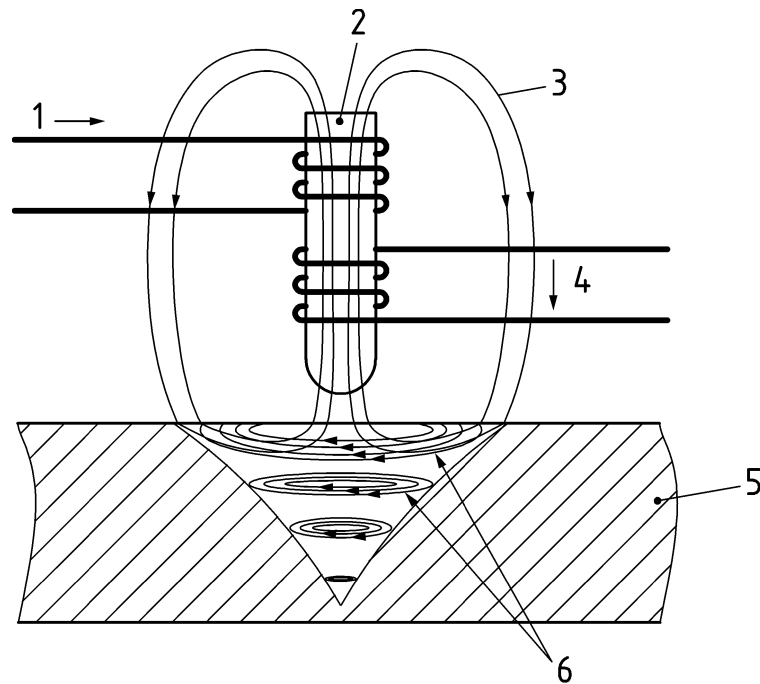
Phasensensitive Wirbelstromgeräte arbeiten nach dem Prinzip, dass ein im Prüfkopfsystem des Gerätes generiertes, hochfrequentes, elektromagnetisches Feld Wirbelströme in der Beschichtung, auf die der Prüfkopf gesetzt wird sowie im Grundwerkstoff unter der Beschichtung, sofern dieser Grundwerkstoff leitfähig ist (siehe Bild 1), erzeugt. Diese induzierten Ströme führen zu einer Änderung des elektromagnetischen Feldes, das das Prüfspulensystem umgibt, und ergeben daher einer Änderung der Amplitude und des Phasenwinkels der Impedanz der Prüfspule. Die induzierte Wirbelstromdichte ist eine Funktion der Schichtdicke, der Leitfähigkeit des Beschichtungsstoffs, der verwendeten Frequenz des Prüfkopfsystems und der Leitfähigkeit des Grundmetalls. Wenn die Dicke einer Beschichtung 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 der Beschichtung 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.

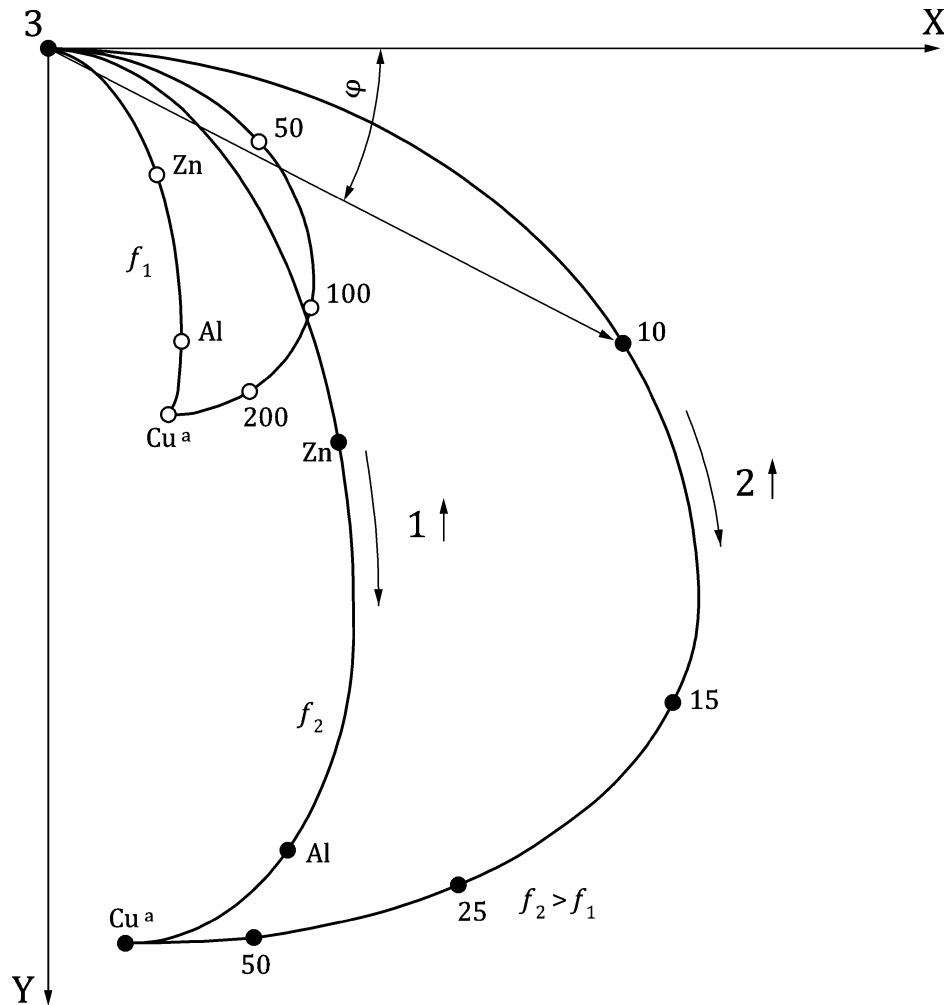
ANMERKUNG 2 Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen, werden in Abschnitt 5 behandelt.



Legende

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

Bild 1 — Phasenempfindliches Wirbelstromverfahren



Legende

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

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

Für jedes Messgerät gibt es eine maximal messbare Schichtdicke.

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 (einer Sonde), d. h. der Messeffekt, ist abhängig von der verwendeten Frequenz, der Leitfähigkeit des Überzugs und des Grundwerkstoffs und der Eigenschaften des Prüfkopfsystems. Die resultierende Unsicherheit der Dicke ist, neben den Eigenschaften des Prüfkopfes, vom Probenwerkstoff abhängig, z. B. der Homogenität des Überzugs und der Leitfähigkeit und Rauheit des Grundmetalls.

5.2 Elektrische Eigenschaften der Beschichtung

Die Leitfähigkeit des Überzugs, aber auch 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 Minstdicke des Grundmetalls vernachlässigt werden.

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

Die kritische Minstdicke 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 Minstdicke des Grundmetalls beschrieben.

Sind allerdings keine anderen Informationen vorhanden, kann die geforderte Minstdicke 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 braucht 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 der Beschichtung 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 wird; 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.

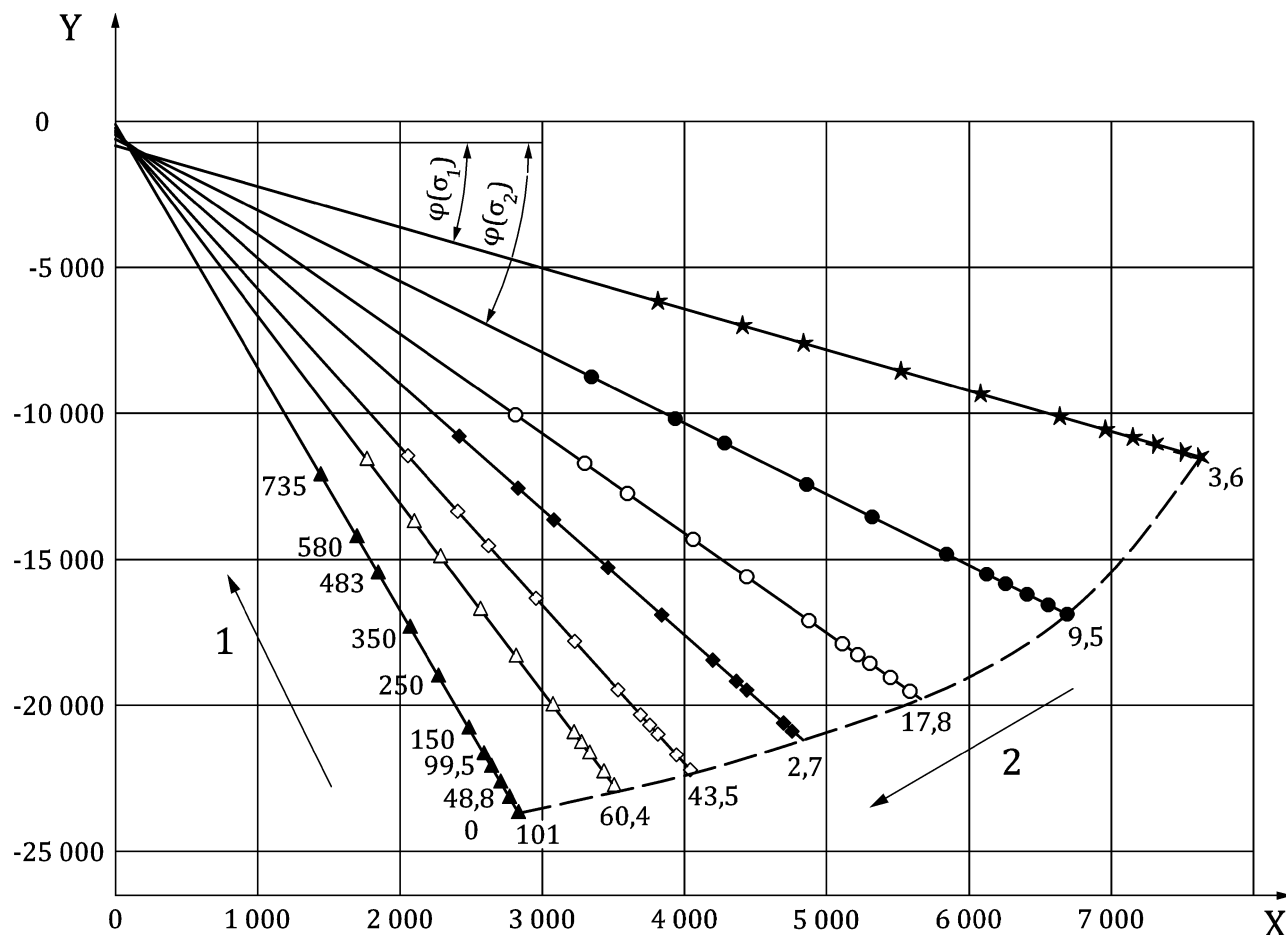
Falls erforderlich, sollte die Definition der verwendeten mittleren Schichtdicken zwischen Anbieter und Kunde festgelegt werden.

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 geeigneter Hard- und/oder Software 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

X Realteil

Y Imaginärteil

1 ansteigende Abhebehöhe, in μm

2 ansteigende σ in % IACS

Bild 3 — Abhebeeffekt

Die Kompensation des Abhebeeffektes muss nach den Anweisungen des Herstellers durch Verwendung elektrisch nicht leitender Folien mit bekannter Dicke überprüft werden, die zwischen Prüfkopf und Überzug aufgelegt werden.

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

ANMERKUNG 2 Anstelle der Kompensation des Abhebeeffekts, kann die Amplitudenänderung als Messeffekt verwendet werden, um die Schichtdicke nichtleitender Überzüge auf leitfähigem Grundmaterial zu messen (siehe Anhang A).

5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs

Der Prüfkopf muss mit konstantem Druck auf den Probekörper aufgebracht werden, weil das den Messwert des Messgeräts beeinflussen kann.

ANMERKUNG Die phasensensitive Wirbelstrommessung kann deutlich weniger durch den Anpressdruck des Prüfkopfs auf die Probe beeinflusst werden, als die amplitudensensitive Wirbelstrommessung nach ISO 2360. Berührungslose Messungen sind möglich.

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 zur Senkrechten zu Messfehlern führen kann.

Die Möglichkeit einer unbeabsichtigten Neigung des Prüfkopfs kann durch die Konstruktion des Prüfkopfs oder durch Anwendung einer Haltevorrichtung für den Prüfkopf auf ein Mindestmaß reduziert werden.

5.10 Temperatureffekte

Da Temperaturänderungen die Kennwerte des Prüfkopfs beeinflussen, sollte der Prüfkopf bei ähnlichen Temperaturbedingungen wie bei der Kalibrierung des Gerätes verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Der Einfluss von Temperaturänderungen kann durch eine Temperaturkompensation des Prüfkopfs verringert werden. Die Spezifikation des Herstellers muss berücksichtigt werden.

Die meisten Metalle ändern ihre elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Da die gemessene Schichtdicke durch Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Überzugs und des Grundwerkstoffs beeinflusst wird, sollten große Temperaturveränderungen vermieden werden (siehe 5.2).

ANMERKUNG 2 Temperaturunterschiede zwischen Prüfkopf, Messgeräteelektronik, Umgebung und Probe können bei der Bestimmung der Schichtdicke zu großen Fehlern führen. Ein Beispiel ist die Dickenmessung von heißen Beschichtungen.

5.11 Zwischenschichten

Das Vorhandensein einer Zwischenschicht kann die Messung der Schichtdicke beeinflussen, wenn die elektrischen Eigenschaften dieser Zwischenschicht sich von denen der Beschichtung oder des Grundmetalls unterscheiden. Falls eine Abweichung vorliegt, werden die Messungen zusätzlich beeinflusst, wenn die Zwischenschicht dünner als $t_{\min}$ ist. Falls die Zwischenschicht dicker als $t_{\min}$ und nichtmagnetisch ist, kann sie wie das Grundmetall behandelt werden (siehe 5.3).

5.12 Äußere elektromagnetische Felder

Die Messergebnisse können durch starke elektromagnetische Störfelder beeinflusst sein. Wenn unerwartete Ergebnisse oder eine starke Schwankung der Ergebnisse beobachtet werden, die nicht durch andere Faktoren erklärt werden können, sollte dieser Einfluss in Betracht gezogen werden. In diesem Fall sollte an einem Ort ohne Störfelder eine Vergleichsmessung durchgeführt werden.

6 Kalibrierung und Justierung des Messgeräts

6.1 Allgemeines

Vor dem Gebrauch muss jedes Messgerät den Herstelleranweisungen entsprechend kalibriert oder justiert werden, unter Verwendung geeigneter Dicken-Bezugsnormale, von Grundwerkstoff und eines Bezugsnormals mit ausreichender Schichtdicke wie ein Sättigungswerkstoff. Der Werkstoff, die Geometrie und Oberflächeneigenschaften des bei der Kalibrierung oder Justierung verwendeten Grundmetalls sollten vergleichbar mit denen der Proben sein, 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 sollten die Messgeräte, die Normale und der Grundwerkstoff die gleiche Temperatur haben wie die Proben, um temperaturinduzierte Unterschiede zu minimieren.

Um den Einfluss einer Messgerätedrift zu verhindern, werden regelmäßige Kontrollmessungen mit Bezugsnormalen oder Kontrollproben empfohlen. Erforderlichenfalls ist das Messgerät erneut zu justieren.

ANMERKUNG Die meisten Messgeräte justieren sich selbständig während einer Funktion, die als „Kalibrierung“ bezeichnet wird und welche durch den Bediener durchgeführt wird; das Ergebnis der Kalibrierung ist meist nicht offensichtlich.

6.2 Schichtdickennormale

Schichtdickennormale für die Kalibrierung und Justierung sind entweder beschichtete Grundwerkstoffe oder, falls verfügbar, Metallfolien, die auf unbeschichtete Grundwerkstoffe aufgelegt werden.

Metallfolien und -überzüge müssen dieselbe Leitfähigkeit wie die zu messenden Beschichtungen aufweisen. Die Dickenwerte der Bezugsnormale und deren zugehörige Unsicherheiten müssen bekannt und eindeutig dokumentiert sein. Der Oberflächenbereich, für den diese Werte gültig sind, muss markiert sein. Die Dickenwerte sollten auf zertifizierte Bezugsnormale rückverfolgbar sein.

Die Unsicherheiten müssen unter Angabe des damit verbundenen Vertrauensbereichs dokumentiert werden, z. B. U (95 %), d. h. dass die Wahrscheinlichkeit, dass der „echte“ Wert innerhalb dieses angegebenen Unsicherheitsbereichs um den dokumentierten Dickenwert liegt, mindestens 95 % beträgt.

Vor der Nutzung sind Metallfolien und -überzüge visuell auf Beschädigungen oder mechanischen Verschleiß zu prüfen, die zu einer falschen Justierung und somit zu einer systematischen Abweichung aller Messwerte führen würden.

Die Verwendung von Metallfolien als Bezugsnormale im Vergleich zu ausgewählten beschichteten Grundmetallen hat den Vorteil, dass die Folien direkt auf jeden Grundwerkstoff aufgebracht werden können. Der Geometrieinfluss und andere Faktoren werden dann bereits während der Justierung berücksichtigt.

6.3 Justierverfahren

Schichtdickenmessgeräte werden justiert, indem die Prüfköpfe auf unbeschichtete und/oder ein oder mehrere beschichtete Stücke des Grundmetalls mit bekannter Schichtdicke aufgesetzt werden sowie auf ein beschichtetes Stück mit ausreichend hoher Schichtdicke, so dass es als Sättigungsnormal verwendet werden kann. Je nach Art des Messgeräts, den Herstelleranweisungen und dem Messbereich des verwendeten Geräts können Justierungen an den folgenden Elementen durchgeführt werden:

- a) einem Teil aus unbeschichtetem Grundwerkstoff;
- b) einem beschichteten Teil mit ausreichend hoher Schichtdicke (Sättigungsnormal);

- c) einem Teil aus unbeschichtetem Grundwerkstoff und einem Teil beschichtetem Grundwerkstoff mit definierter Schichtdicke;
- d) einem Teil aus unbeschichtetem Grundwerkstoff und mehreren Teilen beschichtetem Grundwerkstoff mit definierter, jedoch unterschiedlicher Schichtdicke;
- e) einem Teil unbeschichtetem Grundwerkstoff; einem oder mehreren Teilen beschichtetem Grundwerkstoff mit definierter, jedoch unterschiedlicher Schichtdicke und einem Teil beschichtetem Grundwerkstoff mit ausreichend großer Schichtdicke (Sättigungsnormal);
- f) mehreren Teilen beschichtetem Grundwerkstoff mit definierter, jedoch unterschiedlicher Schichtdicke;
- g) mehreren Stücken beschichtetem Grundwerkstoff mit definierter, jedoch unterschiedlicher Schichtdicke und einem Teil beschichtetem Grundwerkstoff mit ausreichend großer Schichtdicke (Sättigungsnormal).

Der Begriff „beschichteter Grundwerkstoff“ umfasst nach 6.2 auch auf unbeschichteten dem Grundwerkstoff aufgelegte Metallfolien.

Die angegebenen Justierverfahren können zu unterschiedlichen Messunsicherheiten der Messergebnisse führen. Daher sollte ein Verfahren angewandt werden, das der gegebenen Anwendung am besten entspricht und zur gewünschten Genauigkeit führt. Die Messunsicherheit, die mit den unterschiedlichen Justierverfahren erreicht werden kann, hängt vom Auswertalgorithmus der Messgeräte sowie vom Werkstoff, von der Geometrie und von der Oberflächenbeschaffenheit der Normale und der zu messenden Grundmetalle ab. Wird die gewünschte Genauigkeit durch ein Verfahren nicht erreicht, kann ein anderes Justierverfahren zu besseren Ergebnissen führen. Im Allgemeinen kann die Messunsicherheit verringert werden, indem die Anzahl der Justierpunkte erhöht wird und je besser und näher die Justierungspunkte den voraussichtlichen Dickenbereich der zu messenden Beschichtung abdecken.

ANMERKUNG 1 Der Vorgang, der verwendet wird, um den Prüfkopf an einen bestimmten Grundwerkstoff anzupassen, indem der Prüfkopf auf den unbeschichteten Grundwerkstoff aufgesetzt wird, wird häufig als „Nullabgleich“ oder „Nullpunktkalibrierung“ bezeichnet. Dennoch ist auch dieser Vorgang eine „Justierung“ oder Teil eines Justiervorgangs wie in diesem Dokument definiert. Diese Art Justierung ist nur notwendig, wenn der Grundwerkstoff aus leitfähigem Material besteht.

ANMERKUNG 2 Je nachdem, wie viele Teile der beschichteten und unbeschichteten Grundmetalle zur Justierung des Messgeräts verwendet werden, wird das entsprechende Justierverfahren als „Einpunkt-“, „Zweipunkt-“ oder „Mehrpunktjustierung“ bezeichnet.

ANMERKUNG 3 Der angewendete Prozess zur Anpassung des Prüfkopfes an ein gegebenes Teil beschichteten Grundwerkstoff mit ausreichend großer Schichtdicke (Sättigungsnormal) wird häufig als „Sättigungsmessung“ oder „Sättigungskalibrierung“ bezeichnet. Dennoch ist auch dieser Vorgang eine „Justierung“ oder Teil eines Justiervorgangs wie in diesem Dokument definiert.

Die von einer Justierung des Messgeräts herrührende Messunsicherheit kann nicht für alle nachfolgenden Messungen verallgemeinert werden. Auf jeden Fall sind alle spezifischen und zusätzlichen Einflussfaktoren im Einzelnen zu berücksichtigen, siehe Abschnitt 5 und Anhang D.

ANMERKUNG 4 Einige Arten von Messgeräten erlauben die Zurücksetzung auf die ursprüngliche Justierung des Herstellers. Diese Justierung gilt nur für die unbeschichteten oder beschichteten Bezugsnormale des Herstellers. Wenn diese Normale oder die gleiche Art von Normalen nach einer Nutzungsdauer zur Kontrolle des Messgeräts verwendet werden, können eventuelle Beeinträchtigungen des Messgeräts und der Prüfköpfe, z. B. der Verschleiß des Prüfkopfs durch Abrieb des Kontaktpols, anhand von Abweichungen der Messergebnisse erkannt werden.

7 Durchführung der Messung und Auswertung

7.1 Allgemeines

Jedes Messgerät ist entsprechend den Herstelleranweisungen zu bedienen und die die Messunsicherheit beeinflussenden Faktoren, wie in Abschnitt 5 behandelt, sind besonders zu berücksichtigen.

Vor der Benutzung des Messgeräts und nach Änderungen, die die Messunsicherheit beeinflussen (siehe Abschnitt 5), ist die Justierung des Messgeräts zu kontrollieren.

Um sicherzustellen, dass das Messgerät genau misst, ist es jedes Mal am Ort der Untersuchung mit gültigen Normalen zu kalibrieren, bei

- a) Inbetriebnahme des Gerätes,
- b) Änderung von Probenwerkstoff- und -geometrie, oder
- c) Änderung anderer Bedingungen der Prüfung (z. B. Temperatur), deren Auswirkungen nicht bekannt sind.

Da nicht alle Veränderungen der Messbedingungen und deren Auswirkungen auf die Messunsicherheit sofort festgestellt werden können (z. B. Drift, Verschleiß des Prüfkopfs), sollte das Messgerät in regelmäßigen Zeitabständen kalibriert werden, wenn es in Benutzung ist.

7.2 Anzahl der Messungen und Auswertung

Die Schichtdicke sollte als arithmetischer Mittelwert aus mehreren Einzelwerten bestimmt werden, die in einer definierten Bezugsfläche der Beschichtung gemessen werden. Zusätzlich zum Mittelwert sollte die Standardabweichung angegeben werden (siehe Anhang B). Der Anteil der zufälligen Abweichungen an der Messunsicherheit kann verringert werden, indem die Anzahl der Messungen erhöht wird. Falls nicht anders angegeben oder vereinbart, wird empfohlen, mindestens fünf Einzelwerte zu messen (je nach Anwendung).

ANMERKUNG 1 Aus der Standardabweichung kann ein Variationskoeffizient V berechnet werden. V entspricht der relativen Standardabweichung (z. B. in %) und ermöglicht einen direkten Vergleich der Standardabweichung für verschiedene Schichtdicken.

ANMERKUNG 2 Die Gesamtstreuung der Messung setzt sich zusammen aus der Streuung des Messgeräts selbst und der durch die Probe verursachten Streuung. Die im gemessenen Schichtdickenbereich durch den Prüfer oder den Prüfkopf verursachte Standardabweichung wird durch wiederholte Messungen an der gleichen Stelle bestimmt, falls notwendig mit Hilfseinrichtungen zum Aufsetzen des Prüfkopfs.

Bei Messungen, die an rauen Oberflächen oder an Proben mit bekannten großen Schichtdickengradienten (z. B. aufgrund ihrer Größe und/oder Form) durchgeführt werden, sollte der Grund für Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen mithilfe einer systematischen Messreihe bestimmt werden.

8 Unsicherheit der Ergebnisse

8.1 Allgemeine Anmerkungen

Eine vollständige Auswertung der Unsicherheit der gemessenen Schichtdicke ist nach ISO/IEC Guide 98-3 durchzuführen. Einzelheiten zum Hintergrund der Angabe der Unsicherheit sind in Anhang B zusammengefasst und ein typisches Beispiel für diese Berechnung ist in Anhang F beschrieben.

Die Unsicherheit des Schichtdickenmessergebnisses stellt eine Kombination von Unsicherheiten dar, die aus vielen verschiedenen Quellen herrühren. Wichtige Quellen, die berücksichtigt werden sollten, beinhalten das Folgende:

- a) Unsicherheit der Kalibrierung des Messgeräts;
- b) stochastische Einflüsse, die sich auf die Messung auswirken;
- c) Unsicherheiten, die durch Faktoren verursacht werden, die in Abschnitt 5 zusammengefasst sind;
- d) weitere Einflüsse, Drifts, Digitalisierungseffekte und sonstige Effekte.

Alle Komponenten der Unsicherheit sind abzuschätzen und zur kombinierten Standardunsicherheit zusammenzufassen, wie in ISO/IEC Guide 98-3 beschrieben, siehe Anhang B.

Ein mögliches Verfahren zur Abschätzung der Unsicherheit stellt die folgende vereinfachte Herangehensweise dar (siehe 8.2 bis 8.5).

Die einzelnen Unsicherheitskomponenten der aufgeführten Quellen sind von den jeweiligen Messungen, den Eigenschaften der gemessenen Proben, dem Messgerät, den Umgebungsbedingungen usw. abhängig und können für verschiedene Anwendungen große Unterschiede aufweisen. Daher sind die einzelnen Unsicherheitskomponenten für jede Messung im Detail abzuschätzen. Die Qualität der Unsicherheit wird durch die Qualität der Abschätzung aller Unsicherheitskomponenten bestimmt. Fehlende Komponenten resultieren in einer falschen Abschätzung der Unsicherheit und folglich in falschen Ergebnissen bei Schichtdickenmessungen.

Besonders die in Abschnitt 5 aufgeführten Faktoren können in großen Unsicherheitswerten resultieren und sollten, sofern möglich, durch eine Justierung minimiert werden.

ANMERKUNG Zusätzlich zu dem Erfordernis, die Unsicherheit im Ergebnis anzugeben, liefert die Analyse der möglichen Unsicherheitskomponenten detaillierte Informationen zur Verbesserung der Messung.

8.2 Unsicherheit der Kalibrierung des Messgeräts

Falls nicht anders angegeben, kann die aktuelle Unsicherheit eines Messgeräts innerhalb eines ebegrenzten Schichtdickenbereichs durch n wiederholte Messungen auf einem gegebenen Bezugsnormal mit bekannter Schichtdicke t_r und der Unsicherheit $U_r(k=2)$ abgeschätzt werden. Das Messergebnis ist der arithmetische Mittelwert $\bar{t}_m$ der gemessenen Schichtdickenwerte mit der Standardabweichung $s(t_m)$. Die Qualität der Kalibrierung wird durch den Quotienten E aus der resultierenden Differenz $|\bar{t}_m - t_r|$ und der kombinierten Unsicherheit der Kalibriermessung bestimmt. Es wird angenommen, dass diese Unsicherheit (Nenner von E , $k=2$) durch den stochastischen Fehler der Messung mit n Wiederholungen (vergleiche 8.3) und die gegebene Unsicherheit des Bezugsnormals U_r verursacht wird. Bei $E \leq 1$ ist die Kalibrierung gültig und kann mithilfe dieses Bezugsnormals nicht weiter verbessert werden, d.h. die Differenz kann nicht von der Unsicherheit unterschieden werden. Daher wird die Standardunsicherheit der Kalibrierung $u_{cal}(k=1)$ durch die kombinierte Unsicherheit der Kontrollmessung angegeben, aber bezogen auf den 1-Sigma-Bereich ($k=1$).

Allerdings wird bei $E > 1$ eine signifikante Abweichung der Kalibrierung innerhalb der Unsicherheit nachgewiesen und es sollte eine Justierung des Messgeräts durchgeführt werden, um die Kalibriergenauigkeit zu verbessern.

$$E = \frac{|t_r - \bar{t}_m|}{2 \cdot u_{\text{cal}}} \quad (3)$$

$$u_{\text{cal}} = \sqrt{\left[t(68,27\%, n-1) \cdot \frac{s(t_m)}{\sqrt{n}} \right]^2 + [0,5 \cdot U_r]^2} \quad (4)$$

ANMERKUNG 1 Im Fall, dass die Toleranz T des Bezugsnormals anstatt U_r angegeben ist, d. h. $(t_r \pm T)$, beispielsweise im Zertifikat für ein zertifiziertes Referenzmaterial, kann die entsprechende Standardunsicherheit (für einen Vertrauensbereich von 68,3 %) als $u_r = T/\sqrt{3}$ und die erweiterte Unsicherheit (für einen Vertrauensbereich von 95,4 %) als $U_r = 1,653 \cdot T/\sqrt{3}$ berechnet werden. Die Abweichung von dem üblichen Faktor 2 für die Normalverteilung ist der Tatsache geschuldet, dass Toleranzen einer rechtwinkligen Verteilung folgen.

Die Kalibrierunsicherheit u_{cal} ist nur in einem kleinen Schichtdickenbereich um t_r gültig. Im Fall eines größeren zu messenden Schichtdickenbereiches sollte die Unsicherheit u_{cal} auf beiden Seiten des Schichtdickenbereiches abgeschätzt werden. Die lineare Interpolation zwischen beiden Werten ergibt die Unsicherheit als Funktion der Schichtdicke.

Sehr häufig wird die Genauigkeit der Kalibrierung durch die gegebene Unsicherheit des Bezugsnormals eingeschränkt, da die Unsicherheit der Kalibrierung nicht kleiner als die Unsicherheit des verwendeten Bezugsnormals sein kann. Um die Kalibrierung zu verbessern, ist ein Bezugsnormal mit kleinerer Unsicherheit erforderlich.

Normalerweise wird vom Hersteller zu Beginn einer Messung eine Normierung oder ein Nullabgleich auf einem unbeschichteten Grundmetall empfohlen. Es wird angenommen, dass die resultierende Unsicherheit dieser Normierung bereits in u_{cal} enthalten ist.

ANMERKUNG 2 $t(68,27\%, n-1)$ ist der Student-Faktor (Freiheitsgrade $f = n-1$ und Vertrauensniveau mit $p = 68,27\%$). Die jeweiligen Werte sind in Anhang E zusammengefasst.

8.3 Stochastische Fehler

Allgemein werden wiederholte Messungen empfohlen, um die Genauigkeit des arithmetischen Mittelwerts $\bar{t}$ der gemessenen Schichtdickenwerte (siehe 7.2) zu verbessern, d. h. um die Unsicherheit der Ergebnisse der Schichtdickenmessung zu verringern. Bei n wiederholten Messungen kann die Standardunsicherheit u_{sto} ($k = 1$) des arithmetischen Mittelwerts $\bar{t}$ (Typ A) abgeschätzt werden:

$$u_{\text{sto}} = t(68,27\%, n-1) \cdot \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Die Standardunsicherheit u_{sto} ist ein Maß für alle Fehler, die aus unvorhersehbaren oder stochastischen zeitlichen und räumlichen Schwankungen von Einflussgrößen herrühren.

ANMERKUNG 1 Die Standardunsicherheit u_{sto} kann verringert werden, indem die Anzahl der wiederholten Messungen erhöht wird. Das kann z. B. bei rauen Probenoberflächen wichtig sein.

ANMERKUNG 2 Nicht alle Beiträge zur Unsicherheit u_{sto} sind zufälliger Natur (Typ A). Das hängt von der Versuchsplannung ab. Zum Beispiel resultiert die gemessene Schichtdicke einer größeren Probe mit einem Dickengradienten in einer großen Unsicherheit u_{sto} aufgrund der systematischen Schichtdickenschwankung. Bei einer verkleinerten Messfläche wird u_{sto} verringert und der arithmetische Mittelwert $\bar{t}$ liefert eine bessere Beschreibung der lokalen Schichtdicke.

Es sollte darauf geachtet werden, zu berücksichtigen, dass die Typ-B-Standardunsicherheiten (z. B. siehe 8.4), die zu Typ-A-Standardunsicherheiten beitragen könnten, nicht doppelt gezählt werden.

8.4 Unsicherheiten, die durch Faktoren verursacht werden, die in Abschnitt 5 zusammengefasst sind;

Wann immer möglich, sollte der Einfluss von den in Abschnitt 5 zusammengefassten Faktoren mithilfe einer Justierung minimiert werden. Diese Einflüsse können sehr häufig nur abgeschätzt werden und die resultierende Unsicherheit muss als eine Komponente der kombinierten Unsicherheit der Messung berücksichtigt werden. Einfache Versuche zur Abschätzung der Unsicherheit einiger dieser Faktoren sind in Anhang D beschrieben. Normalerweise sind der Einfluss dieser Faktoren und somit die resultierenden Unsicherheiten eine Funktion der Schichtdicke. Um die Unsicherheit für eine gegebene Schichtdicke oder zumindest einen kleinen Schichtdickenbereich abzuschätzen, müssen folglich Versuche an Proben durchgeführt werden, deren Schichtdicke mit der zu messenden Schichtdicke identisch ist.

Als Beispiel wird die Änderung der Leitfähigkeit des Grundmetalls betrachtet. Wie in Anhang B beschrieben, sollte die erwartete Abweichung für die zu messende Schichtdicke abgeschätzt werden. Die resultierende Schichtdickenänderung bezogen auf die gewählte Referenzprobe für den Grundwerkstoff sollte $\Delta t_{bm} = |t_{\min} - t_r|$ oder $\Delta t_{bm} = |t_{\max} - t_r|$ betragen. Das liefert die Standardunsicherheit durch die Änderungen der Eigenschaften des Grundmetalls $u_{bm}(k=1)$:

$$u_{bm} = \frac{\Delta t_{bm}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Die gleiche Abschätzung der Standardunsicherheit ist für alle in Abschnitt 5 aufgelisteten relevanten Faktoren durchzuführen. Beispielsweise kann die Standardunsicherheit im Fall einer voraussichtlichen Änderung der Oberflächenkrümmung, die auf das Verfahren D.4 bezogen, Δt_{cs} ergibt, als $u_{cs}(k=1)$ abgeschätzt werden:

$$u_{cs} = \frac{\Delta t_{cs}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Für den Fall, dass der Einfluss eines Faktors durch eine Justierung minimiert wird, muss die verbleibende Unsicherheit berücksichtigt werden.

Einige dieser die Messunsicherheit beeinflussenden Faktoren, z. B. Eigenschaften des Grundmetalls (5.3) oder Oberflächenkrümmung (5.5), können minimiert werden, wenn die Kalibrierung mit flexiblen Folien als Bezugsnormale auf einem Grundmetall aus identischem Material und mit identischen Krümmungseigenschaften wie bei der zu messenden Probe durchgeführt wird. In diesem Fall sind nur mögliche Änderungen der Probeneigenschaften zu berücksichtigen.

8.5 Kombinierte Unsicherheit, erweiterte Unsicherheit und Endergebnis

Die kombinierte Unsicherheit fasst alle Komponenten der Standardunsicherheit (8.2, 8.3, 8.4 und alle anderen möglichen Komponenten) zusammen. Bei der beschriebenen vereinfachten Herangehensweise zur Abschätzung der Unsicherheiten für eine gegebene Schichtdicke oder einen sehr kleinen Schichtdickenbereich kann davon ausgegangen werden, dass die Empfindlichkeitskoeffizienten gleich 1 sind (siehe Anhang B). Daraus ergibt sich die kombinierte Unsicherheit u_c :

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{sto}^2 + u_{bm}^2 + u_{cs}^2 + \dots} \quad (8)$$

Als Endergebnis wird die erweiterte Unsicherheit $U(k=2)$ berechnet (2-Sigma-Bereich, 95,45 %):

$$U(k=2) = 2u_c \quad (9)$$

Und das vollständige Ergebnis der Messung mit dem Wert der Schichtdicke $\bar{t}$ beträgt:

$$t = \bar{t} \pm U(k=2) \quad (10)$$

9 Präzision

9.1 Allgemeines

Weitere Informationen zur Bestimmung der Präzision sind in Anhang G enthalten.

9.2 Wiederholpräzision (r)

Die Wiederholpräzision r entspricht dem Wert, unter dem oder gleich dem der Betrag der absoluten Differenz zwischen zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Prüfergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann (nach ISO 5725-2:2002, 3.16). Die Wiederholgrenze r , nach diesem Dokument und mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % berechnet, ist für typische Anwendungen dieses Messverfahrens in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Wiederholgrenze (r)

Anwendung	Dicke t μm	Wiederholgrenze r μm
Cu/Epoxidharz	4,9	0,033
	16,7	0,042
	32,1	0,078
	64,0	0,092
Folie/Cu/Epoxidharz	4,9	0,028
	16,6	0,038
	31,8	0,062
	63,7	0,082
Cu/Fe	3,5	0,23
	5,2	0,21
	9,3	0,28
	11,0	0,32
	14,1	0,19
	19,3	0,18
	26,1	0,64
Folie/Cu/Fe	3,5	0,21
	11,0	0,28
	14,1	0,22
	19,4	0,14
	26,2	0,59
Zn/Fe	6,2	0,07
	7,7	0,29
	12,1	0,25
	16,5	0,31
	23,3	0,45
	28,1	1,31
	35,5	1,8

Anwendung	Dicke	Wiederholgrenze
	t μm	r μm
Folie/Zn/Fe	6,2	0,06
	12,0	0,12
	16,4	0,31
	23,2	0,34
	35,5	1,56
Ni/Fe	5,1	0,21
	6,1	0,16
	9,6	0,16
	13,2	0,36
	16,8	0,72
	21,7	0,7
	27,6	1,19
Folie/Ni/Fe	6,5	0,15
	10,0	0,16
	13,4	0,37
	22,0	0,66
	27,6	1,19
ANMERKUNG „Folie“ bedeutet eine mögliche nichtleitende Beschichtung auf dem zu betrachtenden metallischen Überzug, z. B. ein Schutzlack. Dicke der verwendeten Folie: etwa 75 μm .		

9.3 Vergleichsgrenze (R)

Die Vergleichsgrenze R entspricht dem Wert, unter dem oder gleich dem der Betrag der absoluten Differenz zwischen zwei unter Vergleichsbedingungen gewonnenen Prüfergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann (nach ISO 5725-2:2002, 3.20). Die Vergleichsgrenze R , in Übereinstimmung mit dieser Internationalen Norm und berechnet mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % wird in Tabelle 2 für typische Anwendungen dieses Messverfahrens angegeben.

Tabelle 2 — Vergleichgrenze (R)

Anwendung	Dicke <i>t</i> µm	Vergleichgrenze <i>R</i> µm
Cu/Epoxidharz	4,9	0,052
	16,7	0,181
	32,1	0,105
	64,0	0,827
Folie/Cu/Epoxidharz	4,9	0,126
	16,6	0,169
	31,8	0,150
	63,7	0,887
Cu/Fe	3,5	0,30
	5,2	0,45
	9,3	0,28
	11,0	0,62
	14,1	0,27
	19,3	0,40
	26,1	0,72
Folie/Cu/Fe	3,5	0,22
	11,0	0,51
	14,1	0,32
	19,4	0,40
	26,2	0,77
Zn/Fe	6,2	0,11
	7,7	0,90
	12,1	0,31
	16,5	0,39
	23,3	0,89
	28,1	1,81
	35,5	2,24
Folie/Zn/Fe	6,2	0,13
	12,0	0,18
	16,4	0,57
	23,2	0,72
	35,5	2,15

Anwendung	Dicke	Vergleichgrenze
	t μm	R μm
Ni/Fe	5,1	0,36
	6,1	0,40
	9,6	0,46
	13,2	1,24
	16,8	1,58
	21,7	1,66
	27,6	2,82
Folie/Ni/Fe	6,5	0,38
	10,0	0,52
	13,4	0,88
	22,0	1,53
	27,6	2,40
ANMERKUNG „Folie“ bedeutet eine mögliche nichtleitende Beschichtung auf dem zu betrachteten metallischen Überzug, z. B. ein Schutzlack. Dicke der verwendeten Folie: etwa 75 μm .		

10 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss folgende Angaben enthalten:

- a) alle für die Identifizierung der Probe erforderlichen Informationen;
- b) Verweisung auf dieses Dokument, einschließlich dem Jahr der Veröffentlichung, d. h. ISO 21968:2019;
- c) die Größe der Prüfflächen, in mm^2 , auf denen die Messungen ausgeführt wurden;

ANMERKUNG Bei Übereinkunft zwischen Lieferant und Kunden dürfen andere Einheiten angewendet werden.

- d) Position(en) der Prüffläche(n) auf jeder Probe;
- e) Anzahl der gemessenen Proben;
- f) Identifikation des Messgeräts, des Prüfkopfs und der Normale, die bei der Prüfung verwendet wurden, einschließlich Verweisung auf eventuelle Validierungszertifikate der Ausrüstung;
- g) Prüfergebnisse als gemessene Schichtdicken, in Mikrometer, für jede Fläche, auf der die Prüfung durchgeführt wurde, einschließlich den Ergebnissen der Einzelmessungen und deren arithmetischem Mittelwert;
- h) Name des Prüfers und der Prüforganisation;
- i) alle ungewöhnlichen Besonderheiten, die beobachtet wurden, und alle Umstände oder Bedingungen, die die Ergebnisse oder deren Gültigkeit beeinflusst haben könnten;
- j) alle Abweichungen vom festgelegten Verfahren;
- k) Datum der Prüfung.

Anhang A (informativ)

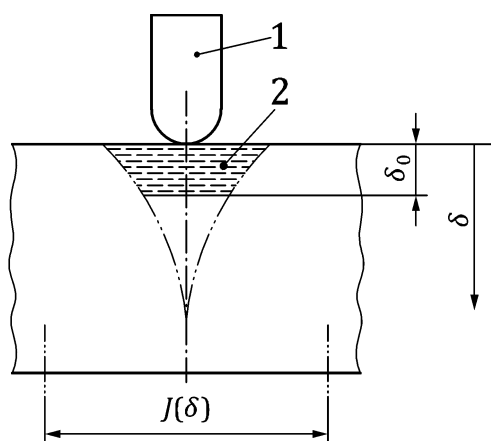
Wirbelstromerzeugung in einem metallischen Leiter

A.1 Allgemeines

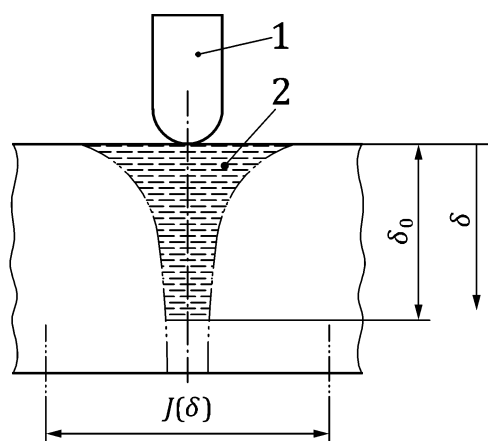
Wirbelstromgeräte arbeiten nach dem Prinzip, dass ein vom Prüfkopfsystem des Gerätes erzeugtes hochfrequentes elektromagnetisches Feld, Wirbelströme in einem elektrischen Leiter induziert, auf den der Prüfkopf aufgesetzt wird. Diese induzierten Wirbelströme führen zu einer Änderung des elektromagnetischen Felds, das das Prüfspulensystem umgibt, und führen daher zu einer Änderung der Amplitude und/oder der Phase der Impedanz der Prüfpule, die als Maß der Dicke des Leiters genutzt werden kann.

Die Erzeugung von Wirbelstrom in einem metallischen Leiter ist in Bild 1 dargestellt.

Die induzierte Wirbelstromdichte $J(\delta)$ ändert ihre Stärke mit zunehmender Schichtdicke des Leiters (Tiefe). In der Tiefe δ_0 (Standardeindringtiefe) fällt das elektromagnetische Feld und damit auch die Stromdichte auf $\frac{J(\delta_0)}{J(0)} = \frac{1}{e}$ ab. Prinzipiell wird diese Standardeindringtiefe durch die Leitfähigkeit der Probe, die Permeabilität und die Frequenz des Prüfspulensystems bestimmt.



a) hohe Frequenz oder/und hohe Leitfähigkeit



b) niedrige Frequenz oder/und niedrige Leitfähigkeit

Legende

1	Prüfkopf	δ_0	Standardeindringtiefe
2	Wirbelströme	δ	Tiefe
		$J(\delta)$	(Stärke der) Wirbelstromdichte

Bild A.1 — Schematische Darstellung des Einflusses der Frequenz und der Leitfähigkeit auf die Standardeindringtiefe