

DIN EN ISO 2360

ICS 17.040.20

Entwurf

Einsprüche bis 2016-06-29
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 2360:2004-04

**Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen metallischen
Grundwerkstoffen –
Messen der Schichtdicke –
Wirbelstromverfahren (ISO/DIS 2360:2016);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 2360:2016**

Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals –
Measurement of coating thickness –
Amplitude-sensitive eddy-current method (ISO/DIS 2360:2016);
German and English version prEN ISO 2360:2016

Revêtements non conducteurs sur matériaux de base non magnétiques conducteurs de
l'électricité –
Mesurage de l'épaisseur de revêtement –
Méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude (ISO/DIS 2360:2016);
Version allemande et anglaise prEN ISO 2360:2016

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-04-29 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de 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/stellungnahme 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 (Hausanschrift: 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.

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)
DIN-Normenausschuss Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB)

Gesamtumfang 85 Seiten

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 2360:2016) 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“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Großbritannien) gehalten wird.

Der zuständige deutsche Arbeitsausschuss ist der NA 062-01-61 AA „Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der prEN ISO 2360 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 2064	siehe DIN EN ISO 2064
ISO 2178,	siehe DIN EN ISO 2178
ISO 4618	siehe DIN EN ISO 4618
ISO 5725-1	siehe DIN EN ISO 5725-1
ISO 21968	siehe DIN EN ISO 21968

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 2360:2004-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Klarstellung des Anwendungsbereiches;
- b) normative Verweisungen aktualisiert;
- c) Aufnahme eines neuen Abschnittes mit Begriffen;
- d) Überarbeitung des Abschnittes 4;
- e) Abschnitt 6 wurde überarbeitet und die Justierung des Messgeräts ergänzt;
- f) Abschnitt 8 zur Angabe von Messunsicherheiten wurde ergänzt;
- g) Abschnitt 9 „Präzision“ wurde ergänzt;
- h) Anhänge A bis G neu aufgenommen;
- i) redaktionelle Überarbeitung.

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 4618, *Beschichtungsstoffe — Begriffe*

DIN EN ISO 21968, *Nichtmagnetische metallische Überzüge auf metallischen und nichtmetallischen Grundwerkstoffen — Messung der Schichtdicke — Wirbelstromphasenwechselverfahren*

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

— Leerseite —

**Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen metallischen
Grundwerkstoffen — Messen der Schichtdicke — Wirbelstromverfahren
(ISO/DIS 2360:2016)**

Revêtements non conducteurs sur matériaux de base non magnétiques conducteurs de l'électricité — Mesurage de l'épaisseur de revêtement — Méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude (ISO/DIS 2360:2016)

Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals — Measurement of coating thickness — Amplitude-sensitive eddy-current method (ISO/DIS 2360:2016)

ICS:

Deskriptoren:

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

STD Version 2.8f

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Prinzip der Messung	7
5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen	8
5.1 Grundlegende Einflüsse auf die Schichtdicke	8
5.2 Elektrische Eigenschaften des Grundmetalls	9
5.3 Geometrie: Dicke des Grundmetalls	9
5.4 Geometrie: Kanteneffekte	9
5.5 Geometrie: Oberflächenkrümmung	10
5.6 Oberflächenrauheit	10
5.7 Reinlichkeit Abhebeeffekt	10
5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs	10
5.9 Neigung des Prüfkopfs	11
5.10 Temperatureffekte	11
5.11 Zwischenschicht	11
5.12 Äußere elektromagnetische Felder	11
6 Verfahrensweise	11
6.1 Kalibrierung der Geräte	11
6.2 Schichtdickennormale	12
6.3 Justierverfahren	12
7 Durchführung der Messung und Auswertung	13
7.1 Allgemeines	13
7.2 Anzahl der Messungen und Auswertung	14
8 Unsicherheit der Ergebnisse	14
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 zusammengefasst sind	16
8.5 Kombinierte Unsicherheit, erweiterte Unsicherheit und Endergebnis	17
9 Präzision	17
9.1 Allgemeines	17
9.2 Wiederholgenauigkeit (r)	17
9.3 Grenzwert der Vergleichbarkeit (R)	18
10 Prüfbericht	19
Anhang A (informativ) Erzeugung von Wirbelstrom in einem metallischen Leiter	20
A.1 Allgemeines	20
A.2 Beispiel 1 — Nichtleitende Beschichtung auf einem leitenden Grundmetall	21
A.3 Beispiel 2 — Leitende Beschichtung auf einem nichtleitenden Grundmetall	22

A.4	Beispiel 3 — Leitende Beschichtung auf einem leitenden und/oder magnetischen Grundmetall	23
A.5	Beispiel 4 — Nichtleitende Beschichtung auf einem metallischen Grundmetall.....	23
Anhang B (informativ) Grundlagen zur Bestimmung der Unsicherheit einer Messung des angewandten Messverfahrens nach ISO/IEC Guide 98-3.....		24
B.1	Allgemeines	24
B.2	Typ A	24
B.3	Typ B	25
Anhang C (informativ) Grundlegende Leistungsanforderungen an Schichtdickenmessgeräte, die auf dem amplitudenempfindlichen Wirbelstromverfahren basieren, wie in dieser Norm beschrieben		26
C.1	Technische Spezifikation.....	26
C.2	Kontrolle/Verifizierung der Messgeräte und Prüfköpfe vor der Lieferung, nach Reparatur und nach regelmäßigen Zeitabständen nach der Nutzung.....	27
C.3	Kontrolle/Verifizierung von Messgeräten und Prüfköpfen vor Ort durchgeführt	27
Anhang D (informativ) Beispiele für experimentelle Abschätzung von Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen.....		28
D.1	Allgemeines	28
D.2	Kanteneffekt.....	28
D.3	Dicke des Grundmetalls	29
D.4	Oberflächenkrümmung.....	30
D.5	Leitfähigkeit des Grundmetalls	31
Anhang E (informativ) Tabelle des Student-Faktors.....		33
Anhang F (informativ) Beispiel für die Abschätzung der Unsicherheit (siehe Abschnitt 8)		34
F.1	Zu messende Probe.....	34
F.2	Erforderliche Schritte	34
Anhang G (informativ) Einzelheiten zur Genauigkeit.....		36
G.1	Allgemeine Anmerkungen zum Ringversuch.....	36
G.2	Proben	36
G.3	Schichtdickenmessgeräte.....	36
G.4	Kalibrierung.....	36
G.5	Anzahl der Messungen.....	37
G.6	Auswertung.....	37
G.6.1	Auswertung des ersten Messpunkts.....	37
G.6.2	Auswertung von allen fünf Messpunkten.....	37
Literaturhinweise.....		41

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 2360:2016) 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“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 2360:2016 wurde vom CEN als prEN ISO 2360:2016 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees 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 Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen 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. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien 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 empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der WTO-Grundsätze zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: Foreword - Supplementary information.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 107 „Metallic and other inorganic coatings“

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt ein Verfahren für zerstörungsfreie Schichtdickenmessungen nichtleitender Beschichtungen auf nichtmagnetischen, elektrisch-leitenden (üblicherweise metallischen) Grundmetallen mittels amplitudensensitiver Wirbelstrommessgeräte fest.

In dieser Internationalen Norm wird der Begriff „Beschichtung“ verwendet für z. B. Lacke und Anstrichstoffe, galvanische Überzüge, Email, Kunststoffschichten, Umhüllungen, Pulverlacke. Dieses Verfahren wird insbesondere angewendet bei Schichtdickenmessungen der meisten Oxidschichten, die durch Anodisieren hergestellt wird, wird aber nicht angewendet bei allen Konversionsschichten, von denen einige zu dünn sind, um durch dieses Verfahren gemessen zu werden (siehe Abschnitt 6).

Dieses Verfahren kann auch bei Messung nichtmagnetischer metallischer Beschichtungen auf nichtleitenden Grundmetallen genutzt werden. Allerdings ist das phasensensitive Wirbelstromverfahren nach ISO 21968 für diese Anwendung besonders geeignet und kann Ergebnisse mit einer höheren Genauigkeit liefern (siehe Anhang A).

Dieses Verfahren ist nicht bei Messung nichtmagnetischer metallischer Beschichtungen auf leitenden Grundmetallen anwendbar. Das phasensensitive Wirbelstromverfahren wie in ISO 21968 festgelegt, ist für diese Anwendung besonders geeignet. Allerdings kann im speziellen Fall von sehr dünnen Beschichtungen mit einer sehr niedrigen Leitfähigkeit auch das amplitudensensitive Wirbelstromverfahren für diese Anwendung eingesetzt werden (siehe Anhang A).

Obwohl das Verfahren für Schichtdickenmessungen auf magnetischen Grundmetallen eingesetzt werden kann, wird dessen Einsatz für diese Anwendung nicht empfohlen. In solchen Fällen sollte das nach ISO 2178 festgelegte magnetische Verfahren, eingesetzt werden. Lediglich im Fall von sehr dicken Beschichtungen über ungefähr 1 mm kann das amplitudenempfindliche Wirbelstromverfahren auch für diese Anwendung eingesetzt werden (siehe Anhang A).

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).

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

ISO 2178, *Non-magnetic coatings on magnetic substrates — Measurement of coating thickness — Magnetic method*

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

ISO 5725-1, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions*

ISO 21968, *Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials — Measurement of coating thickness — Phase-sensitive eddy-current method*

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.

3.1

Justierung eines Messsystems

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

ANMERKUNG 1 Zur Justierung eines Messsystems können Nullpunkteinstellung, Abgleich der Nullpunktverschiebung [Offsetjustierung] und Bereichsjustierung (manchmal als Gain-Abgleich bezeichnet) gehören.

ANMERKUNG 2 Die Justierung eines Messsystems sollte nicht mit der Kalibrierung verwechselt werden, die eine Grundvoraussetzung für die Justierung ist.

ANMERKUNG 3 Nach einer Justierung eines Messsystems ist das Messsystem im Allgemeinen erneut zu kalibrieren.

[VIM, ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11]

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.

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 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 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 Oft wird nur der erste Schritt in der obigen Definition als Kalibrierung angesehen.

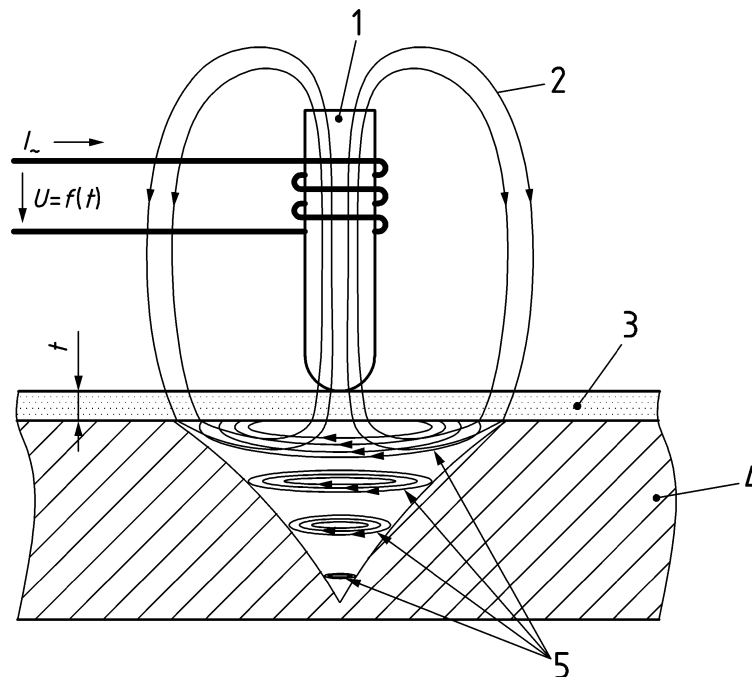
[VIM, ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39]

4 Prinzip der Messung

Wirbelstromgeräte arbeiten nach dem Prinzip, dass ein hochfrequentes elektromagnetische Feld, das durch das Prüfkopfsystem des Messgeräts, Wirbelströme im Grundmetall unter der Beschichtung, auf die der Prüfkopf gesetzt wird (siehe Bild 1), erzeugt. Diese induzierten Stromstärken führen zu einer Änderung des elektromagnetischen Feldes, das die Prüfspule umgibt und ergeben daher einer Änderung der Amplitude der Impedanz der Prüfspule. Die induzierte Wirbelstromdichte ist eine Funktion des Abstands zwischen der erzeugenden Spule und der Oberfläche des Grundmetalls. Demzufolge kann diese Änderung der Impedanz als ein Maß für die Dicke der Beschichtung auf dem Leiter durch eine Kalibrierung mit der Bezugsnormale genutzt werden (siehe auch Anhang A).

Um eine Änderung der Amplitude der Impedanz der Spule zu messen ist die Prüfspule normalerweise Teil eines Schwingkreises mit einer Resonanzfrequenz, welche durch die Induktivität und den Widerstand der Spule bestimmt wird. Eine Änderung der Amplitude der Impedanz der Spule verschiebt die

Resonanzfrequenz. Demzufolge entspricht die gemessene Resonanzfrequenz einem Maß für die Schichtdicke. Die Werte werden auf einem Messgerät mit geeigneter Skala entweder digital oder direkt angezeigt.



Legende

1	Ferritkern des Prüfkopfs	$I_{\sim}$	Erregerstrom
2	hochfrequentes Elektromagnetfeld	$U = f(t)$	Messsignal
3	nichtleitender Überzug	t	Schichtdicke
4	Grundmetall	5	induzierter Wirbelstrom

Bild 1 — Amplitudenempfindliches Wirbelstromverfahren

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

ANMERKUNG Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen, sind in Abschnitt 5 beschrieben.

5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen

5.1 Grundlegende Einflüsse auf die Schichtdicke

Die Empfindlichkeit eines Prüfkopfs (einer Sonde), d.h. der Messeffekt, nimmt mit zunehmender Schichtdicke innerhalb des Messbereichs des Prüfkopfs ab. Im unteren Messbereich ist diese Messunsicherheit (absolut betrachtet) unabhängig von der Schichtdicke konstant. Der Absolutwert dieser Unsicherheit ist abhängig von den Eigenschaften des Prüfkopfsystems und der verwendeten Probenwerkstoffe, z.B. von der Homogenität der magnetischen Leitfähigkeit des Grundmetalls und der Rauheit des Grundmetalls und der Probenoberfläche. Im oberen Messbereich wird die Unsicherheit etwa ein konstanter Bruchteil der Beschichtungsdicke.

5.2 Elektrische Eigenschaften des Grundmetalls

Die Leitfähigkeit des Grundmetalls bestimmt die induzierte Wirbelstromdichte für ein vorgegebenes Prüfkopfsystem und für eine Frequenz. Demnach wird der Messeffekt des Grundmetalls durch die Leitfähigkeit des Grundmetalls bedingt. Der Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Messwert ist stark abhängig von der Leitfähigkeit des Grundmetalls. Folglich müssen die Kalibrierungsverfahren und die Messungen am gleichen Werkstoff erfolgen. Verschiedene Werkstoffe mit unterschiedlicher Leitfähigkeit können zu mehr oder weniger gravierenden Fehlern bei der Schichtdickenbestimmung führen, so wie auch örtliche Veränderungen der Leitfähigkeit oder Unterschiede zwischen verschiedenen Proben dazu führen können.

ANMERKUNG Es sind Messgeräte und Prüfköpfe verfügbar, die in der Lage sind, die Leitfähigkeit des Grundmetalls automatisch zu kompensieren und dadurch die resultierenden Fehler bei Schichtdicken vermeiden.

5.3 Geometrie: Dicke des Grundmetalls

Die mögliche Erzeugung von Wirbelströmen durch das Magnetfeld der Spule in der Tiefe des Grundmetalls wird gehemmt, wenn die Schichtdicke des Grundmetalls nicht ausreichend 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 zu geringe Dicke des Grundmetalls verursachte Fehler können durch Justierung des Messgeräts kompensiert 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 Grundmetalls ab. Ihr Wert sollte experimentell bestimmt werden, es sei denn, er ist vom Hersteller festgelegt.

ANMERKUNG In D.3 ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung der kritischen Mindestdicke des Grundmetalls beschrieben.

Sind allerdings keine anderen Informationen vorhanden, kann die geforderte Schichtdicke des Grundmetalls, $t_{\min}$, anhand der Gleichung (1) eingeschätzt werden.

$$t_{\min} = 3 \cdot \delta_0 \quad (1)$$

Dabei ist

δ_0 die Standardeindringtiefe des Grundmetalls (siehe A.1).

5.4 Geometrie: Kanteneffekte

Die Induzierung von Wirbelströmen wird durch geometrische Einschränkungen des Grundmetalls (z. B. Kanten, Bohrungen usw.) behindert. 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 verhindern, ist vom Sondensystem abhängig (Feldverteilung).

ANMERKUNG 1 In D.2 ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung des Kanteneffekts beschrieben.

ANMERKUNG 2 Verglichen mit dem phasensensitive Verfahren nach ISO 21968, können die amplitudensensitiven Wirbelstrommessgeräte erheblich mehr von den Kanteneffekten beeinflusst sein.

5.5 Geometrie: Oberflächenkrümmung

Die Ausbreitung des Magnetfelds und damit die Induzierung der Wirbelströme wird durch die Oberflächenkrümmung des Grundmetalls beeinflusst. Dieser Einfluss ist mit abnehmendem Radius der Krümmung und mit abnehmender Schichtdicke deutlicher ausgeprägt. Um diesen Einfluss zu minimieren, sollte eine Justierung auf einem Grundmetall 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 des Grundmetalls automatisch zu kompensieren und dadurch die daraus resultierenden Fehler bei Schichtdicken zu vermeiden.

ANMERKUNG 2 In D.4 ist ein einfacher Versuch zur Abschätzung des Effekts der Oberflächenkrümmung beschrieben.

5.6 Oberflächenrauheit

Messungen werden durch die Oberflächentopografie des Grundmetalls und der Beschichtung beeinflusst. Raue Oberflächen können systematische und zufällige Fehler verursachen. Zufällige Fehler können durch Mehrfachmessungen reduziert werden, wobei jede Messung an einer anderen Stelle durchgeführt wird; anschließend wird der Mittelwert dieser Messreihe bestimmt.

Um den Einfluss der Rauheit zu verringern, sollte eine Kalibrierung mit einem unbeschichteten Grundmetall mit der gleichen Rauheit wie das beschichtete Grundmetall durchgeführt werden.

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

ANMERKUNG Verglichen mit dem phasensensitiven Verfahren nach ISO 21968, kann die amplitudensensitive Wirbelstrom-Messung von der Rauheit des Grundmetalls mehr beeinflusst sein.

5.7 Reinlichkeit Abhebeeffekt

Wenn der Prüfkopf nicht direkt auf der Beschichtung aufgesetzt wird, wird der Spalt zwischen Prüfkopf und Beschichtung (Abhebeeffekt, en: lift-off) wie eine zusätzliche Schichtdicke wirken und somit die Messung beeinträchtigen. Der Abhebeeffekt kann durch kleine Partikel zwischen Prüfkopf und Beschichtung unbeabsichtigt hervorgerufen werden. Die Prüfkopfspitze ist regelmäßig auf Sauberkeit zu kontrollieren.

5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs

Der Druck, mit dem der Prüfkopf auf die Probe gedrückt wird, kann die Ablesung des Messgeräts beeinträchtigen und muss bei der Justierung und den Messungen immer gleich sein.

Der Einfluss des Anpressdrucks des Prüfkopfs ist bei weichen Beschichtungen stärker ausgeprägt, weil die Prüfkopfspitze in die Beschichtung hineingedrückt werden kann. Deshalb sollte der Anpressdruck des Prüfkopfs möglichst gering sein. Die meisten handelsüblichen Messgeräte sind mit gefederten Prüfköpfen ausgestattet, die einen konstanten Druck beim Anpressen des Prüfkopfs sicherstellen. Falls der Prüfkopf nicht gefedert ist, sollte ein geeignetes Hilfsmittel verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Der konstante Druck und die Eindringtiefe der Prüfkopfspitze können reduziert werden, indem die aufgebrachte Anpresskraft verringert oder ein Prüfkopf mit größerem Durchmesser der Prüfkopfspitze verwendet wird.

ANMERKUNG 2 Bei weichen Beschichtungen kann eine Schutzfolie mit bekannter Dicke auf der beschichteten Oberfläche das Eindringen der Prüfkopfspitze verringern. In diesem Fall ist die Schichtdicke die gemessene Dicke weniger der Foliendicke.

5.9 Neigung des Prüfkopfs

Sofern vom Hersteller nicht anders vorgeschrieben, muss der Prüfkopf senkrecht zur beschichteten Oberfläche aufgesetzt werden, da eine Neigung des Prüfkopfs zur Senkrechten 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 gefederten Prüfköpfen ausgestattet, die ein senkrecht Aufsetzen des Prüfkopfs auf der Probenoberfläche sicherstellen.

5.10 Temperatureffekte

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

ANMERKUNG 1 Der Einfluss von Temperaturänderungen kann durch eine Temperaturkompensation des Prüfkopfs verringert werden. Die Spezifikation des Herstellers ist zu berücksichtigen.

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

Die meisten Metalle ändern ihre elektrische Leitfähigkeit mit der Temperatur. Da die gemessene Schichtdicke durch Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Grundmetalls beeinflusst wird, sollten große Temperaturveränderungen vermieden werden (siehe 5.2).

5.11 Zwischenschicht

Das Vorhandensein einer Zwischenschicht kann die Messung der Schichtdicke beeinflussen, wenn die elektrischen Eigenschaften dieser Zwischenschicht sich von der Beschichtung des Grundmetalls unterscheiden. Wenn ein Unterschied vorhanden ist, dann werden die Messungen zusätzlich von einer Zwischenbeschichtungsdicke von weniger als $t_{\min}$ beeinflusst werden. Wenn die Dicke mehr als $t_{\min}$ beträgt, dann kann die Zwischenbeschichtung, falls diese nichtmetallisch ist, als Grundmetall behandelt werden (siehe 5.3).

5.12 Äußere elektromagnetische Felder

Die Messergebnisse können durch starke elektromagnetisch interferierende Felder beeinflusst sein. Im Falle von 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 Verfahrensweise

6.1 Kalibrierung der Geräte

Jedes Messgerät ist vor der Benutzung entsprechend den Herstelleranweisungen mit geeigneten Schichtdickennormalen und Grundmetall zu kalibrieren oder zu justieren. Werkstoff, Geometrie und Oberflächeneigenschaften des bei der Kalibrierung oder Justierung verwendeten Grundmetalls 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 Normale und das Grundmetall die gleiche Temperatur haben wie die Proben, um temperaturinduzierte Unterschiede zu minimieren.

Um den Einfluss von Messgerätedrifts zu verhindern, werden regelmäßige Kontrollmessungen mit Bezugsnormen oder Referenzproben 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 Grundmetalle oder Folien, die auf unbeschichtete Grundmetalle aufgebracht werden.

Folien und Beschichtungen müssen nichtleitfähig und nichtmagnetisierbar sein. 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 sind zusammen mit ihren Vertrauensintervallen anzugeben, z. B. U(95 %), d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass der angegebene Dickenwert innerhalb des angegebenen Unsicherheitsniveaus liegt, beträgt 95 %.

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

In den meisten Fällen ist das Folienmaterial aus Kunststoff. Im Gegensatz zum magnetischen Verfahren (siehe ISO 2178) können leitfähige Materialien, z. B. Kupferlegierungen nicht verwendet werden weil in solchen Folien Wirbelströme induziert werden können. Diese würden die Messung beeinflussen und zu Fehlern bei der Bestimmung der Schichtdicke führen.

Der Vorteil bei der Verwendung von Folien im Vergleich zu ausgewählten beschichteten Grundmetallen als Bezugsnormale liegt in der Möglichkeit, dass die Folien direkt auf jedes Grundmetall aufgebracht werden können. Die beeinflussende Geometrie und andere Faktoren sind innerhalb dieser Justierung bereits berücksichtigt.

Beim Aufsetzen des Prüfkopfs auf die Folie können jedoch elastische oder plastische Verformungen auftreten, die das Messergebnis beeinflussen können. Außerdem ist jeder Spalt zwischen dem Pol des Prüfkopfs, Folie und Grundmetall zu vermeiden. Besonders bei konkaven Proben oder, wenn die Folie faltig oder geknickt ist, kann es vorkommen, dass der normalerweise geringe Anpressdruck der gefederten Führungshülse des Prüfkopfs nicht ausreicht, um sicherzustellen, dass es keinen Abstand gibt.

Eine mögliche elastische oder sogar plastische Verformung einer verwendeten Referenzfolie hängt von der auf den Prüfkopf aufgetragenen Belastungskraft und dem Durchmesser der Prüfkopfspitze ab (siehe 5.9). Folglich sollte die Kalibrierung derartiger Referenzfolien mit vergleichbaren Werten für die aufgetragene Kraft und den Durchmesser der Prüfkopfspitze durchgeführt werden, um unterschiedliche Eindrücktiefen während der Kalibrierung des Prüfkopfs zu vermeiden. Auf diese Weise sind die jeweiligen Eindruckfehler bereits im Dickenwert der Folie berücksichtigt, d. h. dieser Wert kann kleiner als die unbeeinflusste Geometriedicke sein. Die Werte für sowohl die aufgetragene Kraft als auch für den Durchmesser der Prüfkopfspitze, sollten vom Hersteller der Referenzfolie angegeben sein, um mögliche Fehler beim Messen der Dicke abschätzen zu können.

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. Je nach Art

des Messgeräts, den Herstelleranweisungen und dem Messbereich des verwendeten Geräts können Justierungen durchgeführt werden auf:

- a) einem Stück unbeschichteten Grundmetall;
- b) einem Stück unbeschichteten Grundmetall und einem Stück beschichteten Grundmetall mit definierter Schichtdicke;
- c) einem Stück unbeschichteten Grundmetall und mehreren Stücken beschichteten Grundmetalls mit definierter jedoch unterschiedlicher Schichtdicke;
- d) mehreren Stücken beschichtetem Grundmetall mit definierter jedoch unterschiedlicher Schichtdicke.

Die angegebenen Justierverfahren können zu unterschiedlichen Genauigkeiten 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 zu messenden Normale und 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 ein bestimmtes Grundmetall anzupassen, indem der Prüfkopf auf das unbeschichtete Grundmetall aufgesetzt wird, wird häufig als „Nullabgleich“ oder „Nullpunktkalibrierung“ bezeichnet. Dennoch ist auch dieser Vorgang eine „Justierung“ oder Teil eines Justiervorgangs laut Definition nach dieser Norm.

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

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 3 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, an Abweichungen der Messergebnisse erkannt werden.

7 Durchführung der Messung und Auswertung

7.1 Allgemeines

Jedes Messgerät ist entsprechend den Herstelleranweisungen zu bedienen und die Messgenauigkeit beeinflussenden Faktoren, siehe Abschnitt 5, sind besonders zu berücksichtigen.

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

Um sicherzustellen, dass das Messgerät genau misst, ist es jedes Mal bei Inbetriebnahme am Ort der Inspektion zu nach den gültigen Normen zu kalibrieren, wenn die Geometrie der Prüfprobe verändert wird oder sich andere Bedingungen der Prüfung geändert haben (z. B. Temperatur), bei denen die Auswirkungen nicht bekannt sind.

Da nicht alle Veränderungen der Messbedingungen und deren Auswirkungen auf die Messgenauigkeit 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 arithmetisches Mittel 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 Unsicherheit kann verringert werden, indem die Anzahl der Messungen erhöht wird. Falls nicht anders angegeben oder vereinbart, wird empfohlen, mindestens fünf Werte zu messen (je nach Anwendung).

ANMERKUNG 1 Aus der Standardabweichung kann ein Koeffizient 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 durch den Prüfer oder den Prüfkopf verursachte Standardabweichung wird im gemessenen Schichtdickenbereich durch wiederholte Messungen an der gleichen Stelle bestimmt, falls erforderlich 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 Allgemeines

Eine vollständige Auswertung der Unsicherheit der gemessenen Schichtdicke ist nach ISO/IEC Guide 98-3 durchzuführen. Hintergrundinformationen zur Angabe der Unsicherheit sind in Anhang B zusammengefasst.

Die Unsicherheit des Schichtdickenmessergebnisses stellt eine Kombination von Unsicherheiten dar, die aus vielen verschiedenen Quellen herrühren. Wichtige Quellen, die berücksichtigt werden sollten, sind 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 Anhang B beschrieben.

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 Außer der 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 eingeschränkten 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 Quotient E aus der resultierenden Differenz $|\bar{t}_m - t_r|$ und der kombinierten Unsicherheit der Kontrollmessung 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 $E < 1$ 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.

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

$$u_{cal} = \sqrt{\left[t(68,27\%, n-1) \cdot \frac{s(t_m)}{\sqrt{n}} \right]^2 + [0,5 \cdot U_r]^2} \quad (3)$$

ANMERKUNG 1 Falls anstelle von U_r die Toleranz T des Bezugsnormals ($t_r \pm T$) angegeben ist, kann die jeweilige Unsicherheit $U_r(k=2)$ mit $U_r(k=2) = 1,653 \cdot \frac{T}{\sqrt{3}}$ berechnet werden.

Die Kalibrierunsicherheit u_{cal} ist nur in einem kleinen Schichtdickenbereich um t_r gültig. Bei einem größeren Schichtdickenbereich sollte die Unsicherheit u_{cal} auf beiden Seiten des Schichtdickenbereichs abgeschätzt werden und eine lineare Interpolation zwischen beiden Werten ergibt die Unsicherheit als Funktion der Schichtdicke.

ANMERKUNG 2 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 Normalisierung oder ein Nullabgleich auf einem unbeschichteten Grundmetall empfohlen. Es wird angenommen, dass die resultierende Unsicherheit dieser Normalisierung bereits in u_{cal} enthalten ist.

ANMERKUNG 3 $t(68,27\%, n-1)$ Student-Faktor (Freiheitsgrade $f = n - 1$ und Vertrauensniveau mit $p = 68,27\%$). Die jeweiligen Werte sind im Anhang E zusammengefasst.

8.3 Stochastische Fehler

Im Allgemeinen 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 Mittels $\bar{t}$ abgeschätzt werden nach (Typ A):

$$u_{\text{sto}} = t(68,27\%, n - 1) \cdot \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Die Standardunsicherheit u_{sto} ist ein Maß für alle Fehler, die aus unvorhersehbaren oder stochastischen zeitlichen oder 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 Versuchsplanung ab. Z. B. resultiert die gemessene Schichtdicke einer großen 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.

Die Gefahr einer Doppelberücksichtigung von Typ-B-Standardunsicherheiten (z. B. siehe 8.4), die zu Typ-A-Standardunsicherheiten beitragen könnten, sollte beachtet 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 magnetischen Eigenschaften des Grundmetalls betrachtet (Änderungen der Leitfähigkeit). Wie in D.5 beschrieben, sollte die erwartete Abweichung für die zu messende Schichtdicke abgeschätzt werden. Die resultierende Schichtdickenänderung bezogen auf die gewählte Referenzprobe für das Grundmetall sollte $\Delta t_{bm} = \text{abs}(t_{\min} - t_r)$ or $\Delta t_{bm} = \text{abs}(t_{\max} - t_r)$ betragen. Das liefert die Standardunsicherheit durch die Änderungen der Eigenschaften des Grundmetalls u_{bm} ($k = 1$).

$$u_{bm} = \frac{\Delta t_{bm}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

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

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

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

Einige dieser die Genauigkeit beeinflussenden Faktoren, z. B. Eigenschaften des Grundmetalls (5.3) oder Oberflächenkrümmung (5.5), können mithilfe von flexiblen Folien als Bezugsnormale reduziert werden, wenn die Kalibrierung mit Folien auf Grundmetall aus identischem Material und mit identischen Krümmungseigenschaften wie bei der zu messenden Probe durchgeführt wird. In diesem Fall sind nur voraussichtliche 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 andere mögliche Komponenten) zusammen. Bei der beschriebenen vereinfachten Herangehensweise zur Abschätzung der Unsicherheiten nur für eine gegebene Schichtdicke oder einen kleinen Schichtdickenbereich kann davon ausgegangen werden, dass die Empfindlichkeitskoeffizienten gleich 1 sind (siehe Anhang B). Daraus ergibt sich die kombinierte Unsicherheit u_c :

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{sto}^2 + u_{bml}^2 + u_{cs}^2 + \dots} \quad (7)$$

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

$$U(k = 2) = 2u_c \quad (8)$$

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

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

9 Präzision

9.1 Allgemeines

Für weitere Hinweise zur Bestimmung der Präzision siehe Anhang G (informativ).

9.2 Wiederholgenauigkeit (r)

Der Wert r , unter dem oder gleich dem der Betrag der Differenz zwischen zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Ermittlungsergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann (nach ISO 5725-1:1994, 3.16). Die Wiederholgrenze r wird nach dieser Norm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nach Tabelle 1 berechnet.

Tabelle 1 — Wiederholgrenze (r)

Schichtdicke	Wiederholgrenze des ersten Messpunkts (dreifache Messung)	Wiederholgrenze von allen fünf Messpunkten
etwa μm	r_{x_1} μm	$r_{\bar{x}}$ μm
12	1,0	1,0
25	1,7	2,3
125	2,7	12,5

9.3 Grenzwert der Vergleichbarkeit (R)

Der Wert unter dem oder gleich dem der Betrag der Differenz zwischen zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Ermittlungsergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann (nach ISO 5725-1:1994, 3.20). Die Wiederholgrenze R wird nach dieser Norm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nach Tabelle 2 berechnet.

Tabelle 2 — Vergleichgrenze (R)

Schichtdicke	Wiederholgrenze des ersten Messpunkts (dreifache Messung)	Wiederholgrenze von allen fünf Messpunkten
etwa μm	R_{x_1} μm	$R_{\bar{x}}$ μm
12	- ^a	- ^a
25	5,0	5,3
125	6,0	13,0
^a keine Berechnung von R_{x_1} und $R_{\bar{x}}$ Wiederholbarkeit konnte aufgrund nur einer Probe erfolgen		

10 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden Angaben enthalten:

- a) alle für die Identifizierung der Probe erforderlichen Informationen;
- b) Verweisung auf diese Internationale Norm, einschließlich das Jahr der Veröffentlichung, d. h. ISO 2360:2016;
- c) Größen der Prüfflächen, auf denen die Messungen durchgeführt wurden, in Quadratmillimetern (mm²);

ANMERKUNG Nach Vereinbarung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer können andere Maßeinheiten verwendet 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 m, für jede Fläche, auf der die Prüfung durchgeführt wurde, einschließlich Ergebnissen der Einzelmessungen, und derer arithmetischer Mittelwerte;
- 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)

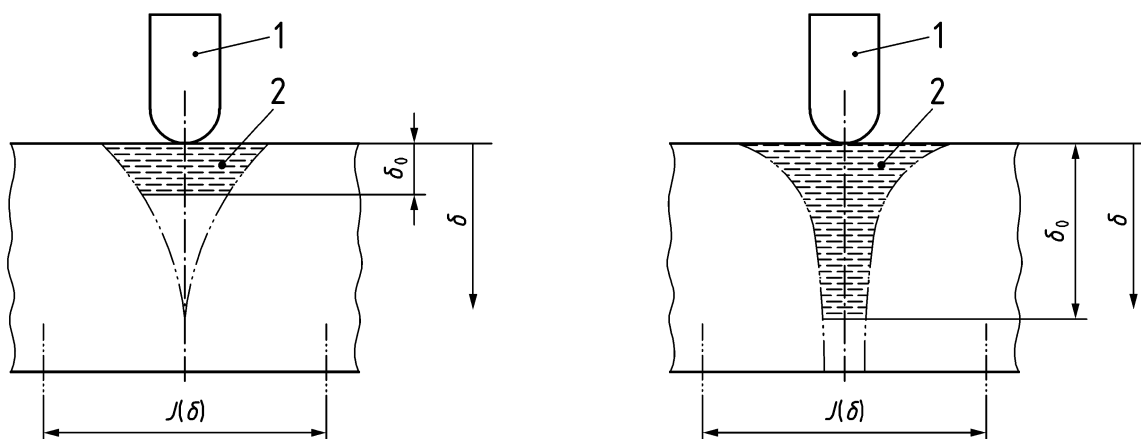
Erzeugung von Wirbelstrom in einem metallischen Leiter

A.1 Allgemeines

Wirbelstromgeräte arbeiten nach dem Prinzip, dass ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld, das durch das Prüfkopfsystem des Gerätes erzeugt wird, Wirbelströme in einem elektrischen Leiter erzeugen wird, auf den der Prüfkopf gesetzt wird. Diese induzierten Stromstärken führen zu einer Änderung des Elektromagnetfelds, das die Prüfspule umgibt und führen daher zu einer Änderung der Amplitude und/oder der Phase der Impedanz der Prüfspule, die als Maß der Dicke der Beschichtung auf dem Leiter (siehe Beispiel 1 und 4) oder des Leiters selbst (siehe Beispiel 2 und 3) genutzt werden kann.

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

Die induzierte Wirbelstromdichte $J(\delta)$ ändert ihre Magnitude mit zunehmendem Abstand δ von der Oberfläche des Leiters (Tiefe). In der Tiefe δ_0 (Standardeindringtiefe) fällt das Elektromagnetfeld und damit auch die Stromdichte auf $\frac{J(0)}{J(\delta_0)} = \frac{1}{e}$. Im Prinzip wird diese Standardeindringtiefe durch die Leitfähigkeit der Probe und der Permeabilität und der Frequenz des Prüfpulensystems bestimmt.



a) hohe Frequenz oder/und hohe Leitfähigkeit

b) niedrige Frequenz oder/und niedrige Leitfähigkeit

Legende

- | | |
|--|--------------------|
| 1 Spule | 2 Wirbelströme |
| δ_0 Standardtiefe der Penetration | $J(\delta)$ Dichte |
| δ Tiefe | |

Bild A.1 — Schematische Darstellungen, um den Einfluss der Frequenz und der Leitfähigkeit auf die Standardeindringtiefe zu zeigen

Die Standardeindringtiefe, δ_0 , ist ein nützlicher Wert für einige wichtige grobe Schätzungen. Sie kann berechnet werden, in mm, unter Verwendung der Gleichung:

$$\delta_0 = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}} \cdot F_p \quad (\text{A.1})$$

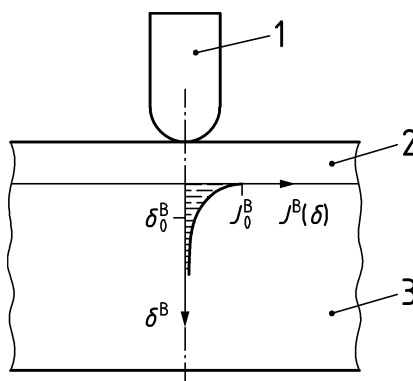
dabei ist

- f die Frequenz zur Inbetriebnahme der Spule, in Hertz;
- σ die elektrische Leitfähigkeit des Leiters, in Megasiemens pro Meter;
- μ_r die relative Permeabilität des Leiters (für nichtmagnetische Materialien $\mu_r = 1$)
- F_p ein Korrekturfaktor, der von der Geometrie der Spule bestimmt wird.

Das amplitudensensitive Wirbelstromverfahren wird am besten bei der Messung nichtleitender Beschichtungen auf nichtmagnetischen Grundmetallen (siehe A.2) angewandt, aber auch zur Abisolierung von nichtmetallischen Beschichtungen auf nichtleitenden Grundmetallen (siehe A.3). Das phasensensitive Wirbelstromverfahren (siehe ISO 21968) wird am besten bei der Messung nichtmagnetischer metallischer Beschichtungen auf metallischen oder nichtmetallischen Grundmetallen (siehe A.2 und A.3) angewandt, besonders dann, wenn die metallische Beschichtung durch Lack gemessen werden muss oder ein kontaktloses Messen nötig ist, d. h. eine „lift-off“-Kompensation nötig ist.

A.2 Beispiel 1 — Nichtleitende Beschichtung auf einem leitenden Grundmetall

In diesem Fall wird die induzierte Wirbelstromdichte nur durch den Abstand zwischen der Spule und dem Grundwerkstoffs bestimmt, d. h. der Schichtdicke (siehe Bild A.2). Eine umfangreichere Dicke resultiert in einer verminderten Wechselwirkung des Magnetfelds der Spule mit dem Grundmetall und verringert so auch die Dichte des Wirbelstroms. Dieser Effekt kann als Maß der Schichtdicke dienen.



Legende

- | | | | | | |
|---|-------|---|----------------------------|---|-----------------------|
| 1 | Spule | 2 | nichtleitende Beschichtung | 3 | leitendes Grundmetall |
|---|-------|---|----------------------------|---|-----------------------|

Bild A.2 — Schematische Darstellung der Wirbelstromdichte bei nichtleitender Beschichtung auf einem leitenden Grundmetall

Um sicherzustellen, dass die Wirbelstromdichte ein eindeutiges Maß der Schichtdicke ist, sollte diese Dichte die Dicke des Grundmetalls nicht beeinflussen oder mindern. Um dies zu erreichen, muss das Grundmetall

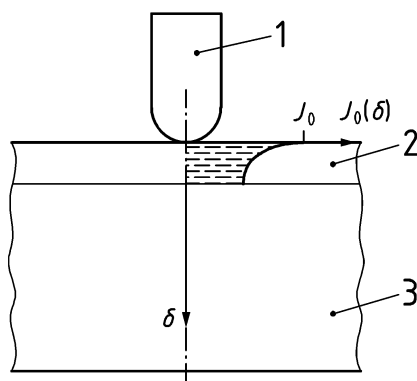
dicker als die Mindestdicke des Grundmetalls sein. Diese Mindestdicke, $t_{\min}$, in mm, kann geschätzt werden als (siehe 5.3):

$$t_{\min} = 3 \delta_0 \quad (\text{A.2})$$

ANMERKUNG $t_{\min}$ wird sehr oft "Sättigungsdicke" genannt. Wenn die Dicke des Grundmetalls geringer als die Mindestdicke $t_{\min}$ ist, wird der gemessene Wert der Beschichtungsdicke beeinflusst und eine zu hohe Dicke gemessen.

A.3 Beispiel 2 — Leitende Beschichtung auf einem nichtleitenden Grundmetall

In diesem Fall wird die Wirbelstromdichte nur durch die Dicke der leitenden Beschichtung bestimmt (siehe Bild A.3). Eine umfangreichere Dicke resultiert in einer gesteigerten Wechselwirkung des Magnetfelds der Spule mit der leitenden Beschichtung und erhöht konsequenterweise auch die Dichte des Wirbelstroms. Dieser Effekt kann als Maß der Schichtdicke dienen.



Legende

- 1 Spule 2 leitende Beschichtung 3 nichtleitendes Grundmetall

Bild A.3 — Schematische Darstellung der Wirbelstromdichte bei leitender Beschichtung auf einem leitenden Grundmetall

Die ungefähre maximal messbare Dicke, $t_{\max}$, in mm, kann berechnet werden durch die Gleichung:

$$t_{\max} = 0,8 \delta_0 \quad (\text{A.3})$$

D.h. der Bereich der Dicke wird begrenzt durch die Eindringtiefe δ_0 . Wenn die Dicke der leitenden Beschichtung weiter gesteigert wird, beginnt der resultierende Anstieg der erzeugten Wirbelstromdichte geringer zu werden, d. h. die Messempfindlichkeit wird verringert werden.

Das amplitudenempfindliche Wirbelstromverfahren ist nur in der Lage, eine leitende Beschichtung auf einem nichtleitenden Material zu messen. Im Falle einer leitenden Beschichtung auf einem leitenden Grundmetall, kann das amplitudenempfindliche Verfahren nicht zwischen der Beschichtung und dem Grundmetall unterscheiden, d. h. die gesamte Wirbelstromdichte, die in der Beschichtung und dem Grundmetall erzeugt wurde, würde genutzt werden, um die Schichtdicke zu bestimmen. Daraus ergeben sich falsche Werte der Schichtdicke.

Allerdings kann im speziellen Fall von sehr dünnen Beschichtungen mit einer sehr niedrigen Leitfähigkeit auch das amplitudensensitive Wirbelstromverfahren angewendet werden. Ein typisches Beispiel ist eine dünne verchromte Beschichtung auf Kupfer mit einer Schichtdicke unter 10 μm . In dieser Situation können die in der Beschichtung induzierten Auswirkungen der Wirbelströme vernachlässigt werden. Jedoch