

DIN EN ISO 2360



ICS 17.040.20

Ersatz für
DIN EN ISO 2360:2004-04

**Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen metallischen
Grundwerkstoffen –
Messen der Schichtdicke –
Wirbelstromverfahren (ISO 2360:2017);
Deutsche Fassung EN ISO 2360:2017**

Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals –
Measurement of coating thickness –
Amplitude-sensitive eddy-current method (ISO 2360:2017);
German version EN ISO 2360:2017

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 2360:2017);
Version allemande EN ISO 2360:2017

Gesamtumfang 45 Seiten

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

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 2360:2017) 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.

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).

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 2361	siehe DIN EN ISO 2361
ISO 2808	siehe DIN EN ISO 2808
ISO 4618	siehe DIN EN ISO 4618
ISO 5725-1	siehe DIN ISO 5725-1
ISO 5725-2	siehe DIN ISO 5725-2
ISO 21968	siehe DIN EN ISO 21968
ISO/TR 22971	siehe DIN ISO/TR 22971, DIN SPEC 55318

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.

Frühere Ausgaben

DIN 50984: 1978-08

DIN EN ISO 2360: 1995-04, 2004-04

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 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 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*

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

DIN ISO/TR 22971, DIN SPEC 55318, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen — Leitfaden zur Verwendung von ISO 5725-2:1994 bei der Entwicklung, Einführung und statistischen Analyse von Ringversuchsergebnissen zur Wiederhol- und Vergleichpräzision*

— Leerseite —

Deutsche Fassung

**Nichtleitende Überzüge auf nichtmagnetischen
metallischen Grundwerkstoffen —
Messen der Schichtdicke —
Wirbelstromverfahren
(ISO 2360:2017)**

Non-conductive coatings on non-magnetic
electrically conductive base metals —
Measurement of coating thickness —
Amplitude-sensitive eddy-current method
(ISO 2360:2017)

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 2360:2017)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 8. Juli 2017 angenommen.

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

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

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



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

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Prinzip der Messung	7
5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen	8
5.1 Grundlegender Einfluss auf die Schichtdicke	8
5.2 Elektrische Eigenschaften des Grundmetalls	8
5.3 Geometrie: Dicke des Grundmetalls	9
5.4 Geometrie: Kanteneffekte	9
5.5 Geometrie: Oberflächenkrümmung	9
5.6 Oberflächenrauheit	10
5.7 Sauberkeit: Abhebeeffekt	10
5.8 Anpressdruck des Prüfkopfs	10
5.9 Neigung des Prüfkopfs	10
5.10 Temperatureffekte	11
5.11 Zwischenschicht	11
5.12 Äußere elektromagnetische Felder	11
6 Kalibrierung und Justierung des Messgeräts	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Schichtdickennormale	12
6.3 Justierverfahren	13
7 Durchführung der Messung und Auswertung	14
7.1 Allgemeines	14
7.2 Anzahl der Messungen und Auswertung	14
8 Unsicherheit der Ergebnisse	14
8.1 Allgemeine Anmerkungen	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	17
8.5 Kombinierte Unsicherheit, erweiterte Unsicherheit und Endergebnis	17
9 Präzision	18
9.1 Allgemeines	18
9.2 Wiederholpräzision (r)	18
9.3 Vergleichsgrenze (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 magnetischen Grundmetall	23
Anhang B (informativ) Grundlagen zur Bestimmung der Unsicherheit einer Messung des angewandten Messverfahrens nach ISO/IEC Guide 98-3.....		25
B.1	Allgemeines	25
B.2	Typ A	25
B.3	Typ B	26
Anhang C (informativ) Grundlegende Leistungsanforderungen an Schichtdickenmessgeräte, die auf dem amplitudensensitiven Wirbelstromverfahren basieren, wie in diesem Dokument beschrieben		27
C.1	Technische Spezifikation.....	27
C.2	Kontrolle/Prüfung von Messgeräten und Prüfköpfen.....	28
C.2.1	Vor Lieferungen, nach Reparatur und in regelmäßigen Zeitabständen nach der Nutzung	28
C.2.2	Durchführung vor Ort.....	28
Anhang D (informativ) Beispiele für die experimentelle Abschätzung von Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen.....		29
D.1	Allgemeines	29
D.2	Kanteneffekt.....	29
D.3	Dicke des Grundmetalls	30
D.4	Oberflächenkrümmung.....	31
D.5	Leitfähigkeit des Grundmetalls.....	32
Anhang E (informativ) Tabelle des Student-Faktors.....		34
Anhang F (informativ) Beispiel für die Abschätzung der Unsicherheit (siehe Abschnitt 8)		35
F.1	Informationen zur Probe	35
F.2	Schritte	35
Anhang G (informativ) Einzelheiten zur Messunsicherheit		37
G.1	Allgemeine Anmerkungen zum Ringversuch.....	37
G.2	Proben	37
G.3	Schichtdickenmessgeräte.....	37
G.4	Kalibrierung.....	38
G.5	Anzahl der Messungen.....	38
G.6	Auswertung.....	38
G.6.1	Allgemeines	38
G.6.2	Auswertung des ersten Messpunkts.....	38
G.6.3	Auswertung von allen fünf Messpunkten.....	38
Literaturhinweise.....		41

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 2360:2017) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 107 „Metallic and other inorganic coatings“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 262 „Metallische und andere anorganische Überzüge, einschließlich des Korrosionsschutzes und der Korrosionsprüfung von Metallen und Legierungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2018, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2018 zurückgezogen werden.

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

Dieses Dokument ersetzt EN ISO 2360:2003.

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

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 2360:2017 wurde von CEN als EN ISO 2360:2017 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 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 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. 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 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.

Dieses Dokument wurde erarbeitet durch das Technische Komitee ISO/TC 107, *Metallic and other inorganic coatings*.

Diese vierte Ausgabe ersetzt die dritte Ausgabe (ISO 2360:2003), die technisch überarbeitet wurde.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren für zerstörungsfreie Schichtdickenmessungen nichtleitender Beschichtungen auf nichtmagnetischen, elektrisch leitenden Grundmetallen mittels amplitudensensitiver Wirbelstrommessgeräte fest.

In diesem Dokument wird der Begriff „Beschichtung“ verwendet für z. B. Lacke und Anstrichstoffe, galvanische Überzüge, Email, Kunststoffschichten, Umhüllungen und Pulverlacke. Dieses Verfahren ist insbesondere anwendbar für die Schichtdickenmessungen der meisten Oxidschichten, die durch Anodisieren hergestellt werden, aber nicht anwendbar 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 Grundmaterialien genutzt werden. Allerdings ist das phasensensitive Wirbelstromverfahren nach ISO 21968 für diese Anwendung besonders geeignet und kann Ergebnisse mit einer höheren Messunsicherheit liefern (siehe Anhang A).

Dieses Verfahren ist bei Messung nichtmagnetischer metallischer Beschichtungen auf leitenden Grundmetallen nicht anwendbar. Das phasensensitive Wirbelstromverfahren wie in ISO 21968 festgelegt ist für diese Anwendung besonders geeignet. Allerdings kann in dem 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 kann das nach ISO 2178 festgelegte magnetische Verfahren eingesetzt werden. Lediglich im Fall von sehr dicken Beschichtungen, über ungefähr 1 mm, kann das amplitudensensitive Wirbelstromverfahren auch für diese Anwendung eingesetzt werden (siehe Anhang A).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

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

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

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

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 2064 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“)]

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

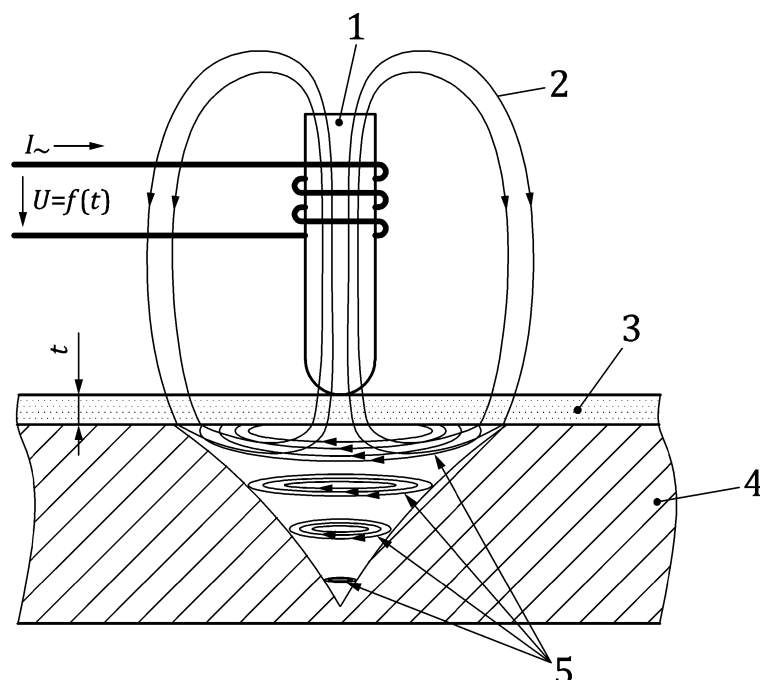
Wirbelstromgeräte arbeiten nach dem Prinzip, dass ein im Prüfkopf des Gerätes generiertes, hochfrequentes, elektromagnetisches Feld Wirbelströme im Grundmetall unter der Beschichtung, auf die der Prüfkopf gesetzt wird, erzeugt (siehe Bild 1). Diese induzierten Ströme führen zu einer Änderung des elektromagnetischen 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 Bezugsnormen 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 ist die gemessene Resonanzfrequenz ein Maß für die Schichtdicke. Die Werte werden entweder elektronisch vorverarbeitet oder direkt angezeigt auf einem Messgerät mit geeigneter Skala.

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 Messunsicherheit beeinflussen, sind in Abschnitt 5 beschrieben.



Legende

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

Bild 1 — Amplitudenempfindliches Wirbelstromverfahren

5 Faktoren, die die Messunsicherheit beeinflussen

5.1 Grundlegender Einfluss 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 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 gegebenes Prüfkopfsystem und eine gegebene Frequenz. Demnach wird der Messeffekt dieses Verfahrens 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 sowie auch örtliche Veränderungen der Leitfähigkeit oder Unterschiede zwischen verschiedenen Proben können (mehr oder weniger) Fehler bei der Schichtdickenbestimmung verursachen.

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

5.3 Geometrie: Dicke des Grundmetalls

Die Erzeugung von Wirbelströmen durch das Magnetfeld der Spule in der Tiefe des Grundmetalls wird gehemmt, wenn die Schichtdicke des Grundmetalls zu gering ist. Dieser Einfluss kann nur oberhalb einer bestimmten kritischen Mindestdicke des Grundmetalls vernachlässigt werden.

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

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

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 Mindestschichtdicke des Grundmetalls, $t_{\min}$, anhand der Gleichung (1) abgeschätzt 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 vermeiden, ist vom Sondensystem abhängig (Feldverteilung).

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

ANMERKUNG 2 Verglichen mit dem phasensensitiven Verfahren nach ISO 21968 können die amplitudensensitiven Wirbelstrommessgeräte erheblich mehr von 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 resultierenden Fehler bei Schichtdicken 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 verwendeten mittleren Schichtdicken 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 Sauberkeit: 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 Kontaktdruck 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 das Auftragen einer Schutzfolie mit bekannter Dicke auf der beschichteten Oberfläche das Eindringen der Prüfkopfspitze verringern. In diesem Fall ist die Schichtdicke die gemessene Dicke abzüglich der Foliendicke. Dieses Verfahren ist nicht bei Messung nichtmagnetischer metallischer Überzüge auf nichtleitenden Grundmetallen anwendbar.

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.