

Bestimmung der Schichtdicke von Beschichtungen mittels Ultraschallmessung

Determination of the film thickness of coatings using an ultrasonic gage

Détermination de l'épaisseur du feuil de revêtements par mesurage ultrasons

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln eines Fachberichts erstellt.

Gesamtumfang 21 Seiten

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

Inhalt

Seite

Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Verweisungen.....	3
3 Begriffe	3
4 Kurzbeschreibung	6
5 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens und der Anwendung	6
6 Geräte und Hilfsmittel	8
7 Kalibrierung, Justierung und Überprüfung des Messgerätes	9
8 Durchführung der Messung.....	9
9 Einfluss der Temperatur während der Messung	9
10 Präzision	10
11 Prüfbericht.....	13
Anhang A (informativ) Qualifikation des Personals	14
Anhang B (informativ) Bestimmung der Präzision	15
Literaturhinweise	21

Vorwort

Dieser Fachbericht (DIN SPEC Fachbericht 55661:2013) wurde vom Arbeitskreis NA 002-00-07-10 AK „Schichtdicke“ im Arbeitsausschuss NA 002-00-07 AA „Allgemeine Prüfverfahren für Beschichtungsstoffe und Beschichtungen“ des Normenausschusses Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB) im DIN ausgearbeitet.

1 Anwendungsbereich

Dieser Fachbericht legt ein Verfahren zum Bestimmen der Schichtdicke von Beschichtungen auf metallischen und nichtmetallischen Substraten mittels Ultraschallmessung fest.

2 Verweisungen

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

DIN EN ISO 4618, *Beschichtungsstoffe — Begriffe*

3 Begriffe

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

3.1

Ultraschallwelle

akustische Welle mit einer Frequenz, die über dem Hörbereich des menschlichen Ohres liegt; üblicherweise also über 20 kHz

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 3.1.1]

3.2

Longitudinalwelle

Druckwelle

Welle in einem Werkstoff mit zur Ausbreitungsrichtung paralleler Schwingungsrichtung

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 2.3.1]

3.3

Echo

Ultraschallimpuls, der zum Prüfkopf reflektiert wurde

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 5.5.2]

3.4

Echohöhe

Echoamplitude

Höhe einer Echoanzeige auf dem Bildschirm

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 5.5.5]

3.5

Ultraschall-Impuls

Ultraschall-Signal von kurzer Dauer

3.6

Ultraschall-Sensor

Ultraschall-Prüfkopf

Vorrichtung zum Aussenden und zum Empfangen von Ultraschallwellen, zumeist basierend auf piezoelektrischen Materialien

3.7

Akustische Impedanz

Schallwellenwiderstand

Z

Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte eines Werkstoffes

3.8

Reflexionsfaktor

Verhältnis des an einer Grenzfläche reflektierten Schalldrucks zum einfallenden Schalldruck

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 3.4.11]

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einer ebenen Welle berechnet sich der Reflexionsfaktor R aus den akustischen Impedanzen Z_1 und Z_2 der angrenzenden Medien, wobei 1 das Medium des einfallenden Schalls ist:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Bei einem negativen Reflexionsfaktor wird die Phase des reflektierten Signals um 180° verändert.

3.9

Phase

Phase einer Welle ist ein Teil einer vollständigen Wellenperiode, angegeben als Winkel

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 2.2.5]

3.10

Grenzfläche

Grenze zwischen zwei Medien unterschiedlicher Schallwellenwiderstände, die sich in akustischem Kontakt befinden

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 3.4.1]

3.11

Schalllaufzeit

für den Schalllaufweg benötigte Zeit

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 5.6.3]

3.12**Koppelmittel****Koppelschicht**

Mittel, das zwischen Prüfkopf und Prüfgegenstand gebracht wird, um den Übergang von Ultraschallwellen zwischen beiden zu ermöglichen

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 5.3.2]

3.13**A-Bild**

bildliche Darstellung des Ultraschallsignals, bei der auf der X-Achse die Zeit und auf der Y-Achse die Amplitude aufgetragen ist

[QUELLE: DIN EN 1330-4:2010-05, 5.5.16]

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei Schichtdickenmessgeräten auf Ultraschallbasis werden auf einem Sichtteil (Bildschirm) neben den numerischen Werten der ermittelten Schichtdicken in der Regel auch A-Bilder zur Kontrolle der Echoformen und Echofolgen dargestellt.

3.14**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 den 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 oder einer Kalibriertabelle ausgedrückt werden. In einigen Fällen kann sie aus einer additiven oder multiplikativen Korrektur der Anzeige mit der beigeordneten Messunsicherheit bestehen.

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

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

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007-12, 2.39]

3.15**Justierung eines Messsystems****Justierung**

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Zu den Justierungsarten eines Messsystems gehören Nullpunktjustierung eines Messsystems, Offset-Justierung und Kennwertjustierung (manchmal auch Verstärkungsjustierung genannt).

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

Anmerkung 3 zum Begriff: Nach der Justierung eines Messsystems muss das Messsystem für gewöhnlich neu kalibriert werden.

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007-12, 3.11]

3.16

Bezugsnormal

Normal, das auf ein nationales Normal rückführbar ist

[QUELLE: DIN EN 60731:2006-09, 3.4.1.2]

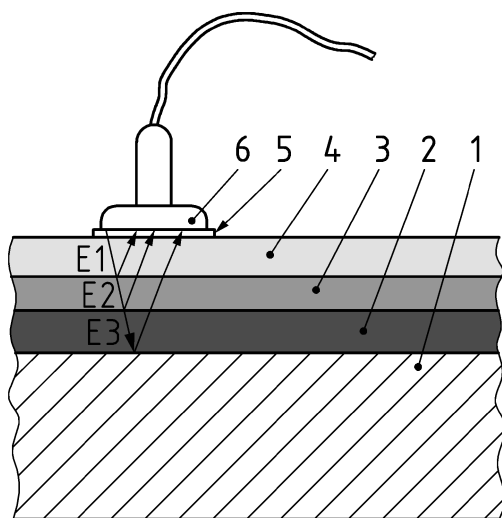
4 Kurzbeschreibung

Bei dem in diesem Dokument beschriebenen Verfahren zur Messung der Schichtdicke werden die Einzelschichtdicken aus den Laufzeiten eines an den Grenzflächen des Beschichtungssystems partiell reflektierten Ultraschall-Impulsen abgeleitet. Anhand der Messdaten für verschiedene praxisrelevante Schicht-Substrat-Kombinationen werden die Stärken und auch die Schwächen des Verfahrens aufgezeigt.

5 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens und der Anwendung

Zur Schichtdickenmessung mit Ultraschall werden Longitudinalwellen verwendet, da sie sich leicht erzeugen und mit fast allen Flüssigkeiten in ein Werkstück einkoppeln lassen (siehe Bild 1). Ein Sensor (Bild 1, Position 6) besteht in seinem Inneren aus einer piezoelektrischen Scheibe zur Schallerzeugung und zum Empfang und aus einer sogenannten Vorlaufstrecke. Der im Sensor erzeugte Ultraschall-Impuls durchläuft zunächst die Vorlaufstrecke und breitet sich durch die Schichten 1 bis 3 bis zum Substrat (Bild 1, Position 1) und durch das Substrat hindurch aus.

An jeder Grenzfläche wird ein Teil der auftreffenden Ultraschall-Welle als neuer Ultraschall-Impuls reflektiert, ein Teil durchgelassen. Eine erste Reflexion entsteht bereits im Ultraschall-Sensor beim Auftreffen des Ultraschall-Impulses auf die erste Schicht (Bild 1, Position 4).



Legende

- 1 Substrat
- 2 Schicht 3
- 3 Schicht 2
- 4 Schicht 1
- 5 Koppelmittel (Flüssigkeit)
- 6 Ultraschall-Sensor (Sender und Empfänger)
- E Echo 1, 2, 3

Bild 1 — Ultraschall-Verfahren

Beim Empfangen werden im Ultraschall-Sensor Ultraschall-Impulse registriert, deren zeitliche Abstände zueinander den Schalllaufzeiten T_i ($i = 1, 2, 3$) in den drei einzelnen Schichten entsprechen. Die Amplitude bzw. Echohöhe des an jeder Grenzfläche reflektierten Ultraschall-Impulses hängt von den jeweiligen Reflexionsfaktoren ab. Sofern die Schallgeschwindigkeit in jeder Einzelschicht bekannt ist, kann die jeweilige Schichtdicke mit Hilfe der Laufzeiten berechnet werden (siehe Bild 2). Für jede Schicht gilt Gleichung (1):

$$v = \frac{t_d}{T/2} \quad (1)$$

Dabei ist

- v die Schallgeschwindigkeit;
- t_d die Trockenschichtdicke;
- T die Schalllaufzeit in der Schicht (hin und zurück).

Um in Geräten mit A-Bild-Anzeige Echos mit kurzen Schalllaufzeit-Abständen (z. B. 20 ns in einer 20 µm dicken Beschichtung) noch mit dem Auge auflösen zu können, müssen die Ultraschall-Impulse mindestens genauso kurz sein. Dazu müssen die verwendeten Ultraschall-Frequenzen entsprechend hoch (mindestens Kehrwert der halben Laufzeit) sein oder das A-Bild muss aus tieferen Frequenzen mittels digitaler Signalverarbeitung erzeugt sein. Ein Beispiel für ein A-Bild siehe Bild 2.

Bei zu dünnen Schichten laufen die Echos der einzelnen Schichten ineinander. Eine optische Kontrolle der Auswertung im A-Bild ist dann nicht mehr möglich.

Sofern das A-Bild positive und negative Halbwellen darstellt, muss beachtet werden, dass bei negativem Reflexionsfaktor ($Z_2 < Z_1$) sich die Phase des Ultraschall-Impulses um 180° verändert. Lässt man dies unberücksichtigt, kann ein Laufzeitfehler von einer halben Wellenlänge entstehen.

Voraussetzung dafür, dass an der Grenzfläche zweier Schichten Ultraschall-Impulse mit zur Auswertung genügend hoher Signalamplitude entstehen, ist ein hinreichend hoher Reflexionsfaktor bzw. entsprechend unterschiedliche akustische Impedanzen Z und ein scharf abgegrenzter Übergang zwischen den Werkstoffen. Ist dies nicht der Fall, können die Reflexionen zum Nachweis zu klein werden. Dies kann auch bei gekrümmten Werkstücken auftreten, wenn infolge der Geometrie nicht mehr alle Schallanteile von einer Grenzfläche zeitgleich wieder beim Sensor auftreffen.