

DIN 54185

DIN

ICS 19.100

**Zerstörungsfreie Prüfung –
Thermografische Prüfung –
Lock-in-Thermografie mit optischer Anregung**

Non-destructive testing –
Thermographic testing –
Lock-In thermography using optical excitation

Essais non destructifs –
Essais thermographiques –
Lock-in thermographie utilisant excitation optique

Gesamtumfang 29 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Personalqualifikation	7
5 Funktionsweise der Lock-in-Thermografie und Geräteaufbau	7
5.1 Allgemeines und Gesamtaufbau	7
5.2 Optische Anregungsquellen für die Lock-in-Thermografie	9
5.2.1 Allgemeines	9
5.2.2 Anregungsform	9
5.2.3 Halogenlampen	9
5.2.4 LED-Arrays	10
5.2.5 Laser und Laserarrays	12
5.3 IR-Kameras	13
5.4 Offline Lock-in-Thermografie	14
5.5 Online Lock-in-Thermografie	14
5.6 Probenpositionierung	14
5.7 Arbeitsschutz	15
6 Festlegung und Überprüfung der Kennwerte	15
6.1 Referenzprobekörper	15
6.2 Thermische Diffusionslänge	15
6.3 Örtliche Auflösung	17
6.4 Nachweisempfindlichkeit	18
6.5 Homogenität der Anregung	19
7 Vorbereitung der Prüfung	20
8 Durchführung der Prüfung	20
9 Datenauswertung	21
9.1 Berechnung der Amplituden- und Phasenbilder bei der Lock-in-Thermografie	21
9.2 Detektion von Fehlstellen in Amplituden- und Phasenbildern	21
9.2.1 Bestimmung des Amplituden- und Phasenkontrastes von Fehlstellen	21
9.2.2 Bestimmung des CNR von Fehlstellen	22
9.3 Schichtdickenmessung und Bestimmung der Überdeckung von Fehlstellen	22
9.4 Bestimmung der lateralen Größe von Fehlstellen	23
10 Prüfbericht	23
Anhang A (informativ) Analytische Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung für Schichten [2]	25
Anhang B (informativ) Muster-Prüfbericht	27
Literaturhinweise	29

Bilder

Bild 1 — Abhängigkeit der relativen Ausgangsleistung von Halogenlampen und LED-Arrays von der Anregungsfrequenz	11
Bild 2 — Thermische Diffusionslänge in verschiedenen Materialien in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz	12
Bild 3 — Abhängigkeit der Amplitude (a) und Phase (b) der Prüfobjekttiefe in Stahl ($\alpha = 0,066 \text{ cm}^2/\text{s}$) für verschiedene Anregungsfrequenzen	17
Bild A.1 — Vielfachreflexionen in einer Schicht der Dicke d zwischen Luft und Substrat [4]	25

Tabellen

Tabelle 1 — Anforderungen an und Eigenschaften von Messungen in Reflexionskonfiguration mit Lock-in-Thermografie	8
Tabelle 2 — Eigenschaften der verschiedenen Anregungsquellen	13

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 062-08-27 AA „Visuelle und thermografische Prüfung“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) erarbeitet.

Die Erarbeitung wurde von einer Arbeitsgruppe zur Lock-in-Thermografie im Rahmen des Förderprogramms „TNS-Transfer von FuE-Ergebnissen durch Normung und Standardisierung“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie angestoßen.

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

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Durchführung der Lock-in-Thermografie zum Zweck der Zustandsanalyse fest. Diese Prüfungen dienen

- dem Nachweis von Materialfehlern und anderen Unregelmäßigkeiten;
- der Bestimmung von Geometrien/Formen parallel zur Messoberfläche;
- der Bestimmung der Überdeckung von Fehlstellen und von Schichtdicken;
- der Bestimmung von thermischen Materialeigenschaften.

Die Lock-in-Thermografie wird dazu unter Verwendung von Halogenlampen, Infrarotstrahlern, LED-Arrays oder einer ausreichend starken und aufgeweiteten Laserquelle in Reflexions- oder Transmissionskonfiguration eingesetzt. Bei Materialien mit hoher Temperaturleitfähigkeit sollten zur Erwärmung Quellen verwendet werden, die auch bei höheren Frequenzen moduliert werden können. In diesem Dokument wird nur die Anregung mit optischen Strahlungsquellen betrachtet.

Anwendungsgebiete der Lock-in-Thermografie sind in der industriellen Fertigung (Kunststoffe, Verbundwerkstoffe, Keramiken, Fahrzeug-, Triebwerks- und Kraftwerkskomponenten, Fügetechnik, additive Fertigung, elektronische Bauelemente usw.) und in der Instandhaltung (Luft- und Raumfahrt, Kraftwerksanlagen, Versorgungstechnik, Bauwesen usw.) zu finden. Nur eingeschränkt eignet sich das Verfahren zur Prüfung von Materialien mit sehr hohem Porenanteil (z. B. Dämmstoffe) und von teiltransparenten Werkstoffen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Ergänzungen 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).

DIN EN 15042-2, *Schichtdickenmessung und Charakterisierung von Oberflächen mittels Oberflächenwellen — Teil 2: Leitfaden zur photothermischen Schichtdickenmessung*

DIN EN 16714-1, *Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Teil 1: Allgemeine Grundlagen*

DIN EN 16714-2, *Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Teil 2: Geräte*

DIN EN 16714-3, *Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Teil 3: Begriffe*

DIN EN 17119, *Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Aktive Thermografie*

DIN EN 62471 (VDE 0837-471), *Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen*

DIN EN ISO 9712, *Zerstörungsfreie Prüfung — Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung*

ASR A 3.4, Technische Regeln für Arbeitsstätten — Beleuchtung (Ausgabe: April 2011, zuletzt geändert GMBI 2014, S. 287)¹⁾

1) Verfügbar unter:
werk/ASR/ASR-A3-4.html

<https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-A3-4.html>

BGBl. I Nr. 38/2010, Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen²⁾

TROS IOS (alle Teile), Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung — TROS Inkohärente Optische Strahlung³⁾

Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung⁴⁾

Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16, Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG)⁵⁾

VDI/VDE 5585 Blatt 1, *Technische Temperaturmessung — Temperaturmessung mit Thermografiekameras — Messtechnische Charakterisierung*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN EN 16714-3, DIN EN 17119 und DIN EN 15042-2 und die folgenden Begriffe.

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

— DIN-Terminologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term/>

— DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Kontaktwiderstand

thermischer Übergangswiderstand an der Grenzfläche zweier Materialien z. B. mit rauer Grenzfläche oder einem sog. Kissing Bond

3.2

Aspektverhältnis

Verhältnis der lateralen Ausdehnung einer Fehlstelle zu ihrer Überdeckung

3.3

Online Lock-in-Thermografie

Lock-in-Thermografie, bei der Phasen- und Amplitudenbild kontinuierlich während der laufenden Messung berechnet werden

3.4

Offline Lock-in-Thermografie

Lock-in-Thermografie, bei der Phasen- und Amplitudenbild erst im Anschluss an die Messung aus der erfassten Sequenz berechnet werden

2) Verfügbar unter: <https://www.bgbl.de>

3) Verfügbar unter: <https://baua.de>

4) Verfügbar unter: <http://ec.europa.eu/social/main.jsp?pubId=5926&langId=de&catId=738&furtherPubs=yes&>

5) Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32006L0025>

3.5**Homogenisierungsoptik**

Optik am Faserende des Lasers zur Erzeugung einer Linie oder einer rechteckigen Strahlfläche mit homogener Intensitätsverteilung

3.6**Chirp**

Anregungssignal, dessen Frequenz mit der Zeit geändert wird

3.7**Einschwingzeit**

Zeit, die benötigt wird, bis die thermische Welle nach dem Einschalten der Anregungsquelle die Fehlstelle erreicht hat

4 Personalqualifikation

Kenntnisse und Fertigkeiten in der Lock-in-Thermografie müssen durch eine Qualifizierung nachgewiesen werden. Als Nachweis dient ein Qualifizierungsnachweis nach DIN EN ISO 9712 oder gleichwertig. Das Prüfpersonal muss hinreichende Kenntnisse über die Prüfgegenstände, ggf. über die Fertigungsprozesse und über die möglicherweise auftretenden nachzuweisenden Fehler besitzen.

5 Funktionsweise der Lock-in-Thermografie und Geräteaufbau**5.1 Allgemeines und Gesamtaufbau**

Bei der Lock-in-Thermografie werden die für die Detektion von Fehlstellen erforderlichen Wärmeströme durch eine periodische Anregung der Probe mit geeigneten Energiequellen generiert. Die periodische Erwärmung der Probe und damit das Antwortverhalten der einlaufenden Wärmewelle wird mit einer Infrarot(IR)-Kamera korreliert zum Anregungssignal erfasst und anschließend (Offline) oder auch während der Messung (Online) ausgewertet. Die Auswertung erfolgt durch Korrelation des Anregungssignals mit dem Antwortsignal und liefert im Ergebnis ein Amplituden- und ein Phasenbild bei der Anregungsfrequenz [3]. Diese lassen Schlüsse auf den Zustand der untersuchten Strukturen zu und ermöglichen u. a. die Detektion von Einschlüssen, Delaminationen, Minderdicken, Faserbrüchen (Faserkunststoffverbund) oder Rissen.

Die Erwärmung kann sowohl homogen als auch mit einer orts aufgelösten Verteilung der Anregungsenergie über die zu untersuchende Oberfläche erfolgen. Dabei sind auch lokale Anregungen, z. B. mit einem Laserfleck oder einer Laserlinie, möglich.

Wie in DIN EN 17119 festgelegt, kann die Prüfung sowohl in Reflexions- als auch in Transmissionskonfiguration durchgeführt werden. In Reflexionskonfiguration befinden sich die Anregungsquelle und die IR-Kamera auf derselben Seite des Prüfobjektes, in Transmissionskonfiguration auf gegenüberliegenden Seiten. Durch Vertauschen von Vorder- und Rückseite kann somit ein Prüfobjekt bei beidseitiger Zugänglichkeit insgesamt in vier verschiedenen Konfigurationen untersucht werden. Die häufigsten Anwendungen der optischen Lock-in-Thermografie nutzen jedoch die Reflexionskonfiguration, so dass diese im Folgenden näher betrachtet wird. Die Anforderungen an und die Eigenschaften von Reflexionsmessungen mit der Lock-in-Thermografie sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 — Anforderungen an und Eigenschaften von Messungen in Reflexionskonfiguration mit Lock-in-Thermografie

Anforderungen und Eigenschaften	Lock-in-Thermografie in Reflexionskonfiguration
Voraussetzungen der Zugänglichkeit des Prüfobjektes	Mindestens einseitige Zugänglichkeit
Geometrie des Prüfobjektes	Keine wesentlichen Einschränkungen bzgl. der Geometrie des Prüfobjektes, Randeffekte müssen insbesondere bei niedrigen Anregungsfrequenzen berücksichtigt werden.
Voraussetzungen an den Versuchsaufbau	Die Strahlungsquellen und insbesondere die Laser- und LED-Strahlung sollten zum Schutz der Optiken und des Detektors nicht direkt in die IR-Kamera einstrahlen oder reflektieren. Daher ist die Wahl geeigneter Winkel im Versuchsaufbau erforderlich oder es müssen dichroitische Spiegel eingesetzt werden.
Thermische Diffusionslänge (auch thermische Eindringtiefe genannt)	Die thermische Diffusionslänge ist von der Anregungsfrequenz, den thermischen Materialeigenschaften und der Leistung der Anregungsquelle abhängig, siehe 6.2. Sie nimmt zu mit kleineren Anregungsfrequenzen, höheren Temperaturleitfähigkeiten und höheren Leistungen.
Nachweisbarkeit von Fehlstellen	Die Nachweisempfindlichkeit ist hoch für Fehlstellen nahe der Oberfläche und/oder für Fehlstellen mit großer lateraler Ausdehnung (d. h. großes Aspektverhältnis), und für große Effusivitätsunterschiede.
Laterale Ortsauflösung im Ergebnisbild	Die laterale Auflösung ist hoch für hohe Anregungsfrequenzen, geringe Fehlstellenüberdeckungen und geringe Temperaturleitfähigkeit in lateraler Richtung.
Tiefenauflösung im Ergebnisbild	Die Tiefenauflösung ist hoch für hohe Anregungsfrequenzen, geringe Fehlstellenüberdeckungen und geringe Temperaturleitfähigkeiten in Tiefenrichtung.
Bestimmung der Überdeckung von Fehlstellen, Schichtdickenmessung	Ist möglich bei bekannter Temperaturleitfähigkeit, sowie bekannten thermischen Reflexionskoeffizienten der beteiligten Materialien oder mit Hilfe von Kalibrierkurven.
Dickenmessung des Gesamtprüfobjektes	Ist möglich bei bekannter Temperaturleitfähigkeit des Materials oder mit Hilfe von Kalibrierkurven.
Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit des ungestörten Materials	Ist möglich bei bekannter Dicke des Objektes/der Schicht oder mit Hilfe von Kalibrierkurven.

5.2 Optische Anregungsquellen für die Lock-in-Thermografie

5.2.1 Allgemeines

Um die notwendige Wärme in das Prüfobjekt einzubringen, bieten sich Lichtquellen an, deren Strahlungsenergie an der Oberfläche möglichst vollständig absorbiert und in Wärme umgewandelt wird (photothermischer Effekt). Damit ist eine berührungslose, zerstörungsfreie und flexible Untersuchung des Prüfobjektes möglich.

Bei der Auswahl der Leistung, Anzahl und des Abstands der verwendeten optischen Anregungsquellen sowie der Anregungsfrequenz und -dauer ist zu berücksichtigen, dass die erreichte Temperaturerhöhung **keine Beschädigung des Prüfobjektes** verursacht und dass der in 5.7 beschriebene **Arbeitsschutz** eingehalten wird.

Die auf eine bestimmte Oberflächenposition aufgebrachte Bestrahlungsstärke kann z. B. mit einem Strahlungsleistungsmessgerät mit thermischem Detektor, Breitbandabsorber (z. B. 0,19 µm bis 20 µm), großer Apertur und geringer Energieschwelle (z. B. > 50 mJ) bestimmt werden.

Zur Bestimmung der relativen räumlichen Verteilung der Bestrahlungsstärke kann vor der Prüfung ein Thermogramm einer großen Platte mit homogenem hohen Absorptionsgrad während der Bestrahlung aufgenommen werden (siehe auch Referenzprobekörper Typ 1 in DIN EN 16714-1). Es können auch die bei der Messung erzeugten Amplitudenbilder zur Bestimmung der Verteilung der Strahlungsleistung herangezogen werden.

Die Frequenz der Modulation der optischen Anregung hängt von der erforderlichen thermischen Diffusionslänge in das zu untersuchende Prüfobjekt ab. Es muss gewährleistet sein, dass diese Frequenz mit der verwendeten Anregungsquelle realisiert werden kann.

5.2.2 Anregungsform

In der Regel erfolgt die periodische Anregung idealerweise mit einem sinusförmigen Intensitätsverlauf oder vereinfacht mit einem rechteckförmigen Intensitätsverlauf. Bei Verwendung eines rechteckförmigen Verlaufs erhöht sich die Anregungsenergie in der Grundwelle um den Faktor $4/\pi$ und es werden höhere harmonische Frequenzen angeregt. Wesentliche Unterschiede treten in den beiden Anregungsformen jedoch nicht auf.

In der Regel gilt folgende in Gleichung (1) gegebene Mindestanforderung an die Anregungsfrequenz f_1 des Signals bezogen auf die Bildwiederholrate f_s der IR-Kamera:

$$f_1 = \frac{f_s}{4} \quad (1)$$

Neben der Verwendung einer einzelnen Anregungsfrequenz in einer Einzelmessung, bzw. mehrerer einzelner Anregungsfrequenzen in aufeinander folgenden Einzelmessungen, können auch Chirps eingesetzt werden, d. h. die Frequenz des Anregungssignals wird mit der Zeit langsam moduliert, z. B. linear mit der Zeit von niedrigen zu hohen Frequenzen. Dadurch kann gegebenenfalls auf mehrere Einzelmessungen bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen verzichtet werden (siehe Literaturhinweise). Um ein gutes Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (en: Contrast-to-Noise-Ratio, CNR) zu erhalten, kann die Gesamtdauer der Messung verlängert werden.

ANMERKUNG: Für die Chirp-Anregung sind LED-Arrays oder Laser geeignet. Schlechter modulierbare Anregungsquellen, wie zum Beispiel Halogenlampen, sind nicht geeignet.

5.2.3 Halogenlampen

Die verwendeten Halogenlampen sollten eine möglichst homogene Erwärmung der Oberfläche des Prüfobjektes erlauben. Dies wird zum einen mit einem Reflektor erreicht. Um die Homogenität der Erwärmung zu verbessern und/oder um eine möglichst hohe Bestrahlungsstärke zu erreichen, können zum anderen auch mehrere miteinander synchronisierte Halogenlampen verwendet werden. Die Ansteuerung der Halogenlampen kann über einen Frequenzgenerator erfolgen.