

DIN EN 17501

ICS 19.100

Einsprüche bis 2020-06-17

Entwurf**Zerstörungsfreie Prüfung –
Thermografische Prüfung –
Aktive Thermografie mit Laser-Anregung;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17501:2020**

Non-destructive testing –
Thermographic testing –
Active thermography with laser excitation;
German and English version prEN 17501:2020

Essais non destructifs –
Analyse thermographique;
Version allemande et anglaise prEN 17501:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-04-17 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

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

Gesamtumfang 67 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17501:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-08-27 AA „Visuelle und thermografische Prüfung“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

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

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

Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Aktive Thermografie mit Laser-Anregung

Essais non destructifs — Analyse thermographique

Non-destructive testing — Thermographic testing — Active thermography with laser excitation

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.10b

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Qualifizierung und Zertifizierung des Personals	6
5 Prinzip der Laser-Thermografie und Messgeräteaufbau	7
5.1 Allgemeines	7
5.2 Übliche Anregungskonfigurationen	8
5.2.1 Allgemeines	8
5.2.2 Laser-Thermografie in statischer Konfiguration (ohne Relativbewegung)	8
5.2.3 Laser-Thermografie in dynamischer Konfiguration (mit Relativbewegung)	8
5.2.4 Laser-Thermografie mit zeitlich verschiedenen Anregungen	9
5.2.5 Laser-Thermografie mit räumlich verschiedenen Anregungen	9
5.3 Anforderungen an den Laser und die Laseroptik	9
5.3.1 Bestrahlungsstärke und Wellenlänge des Lasers	9
5.3.2 Räumliche Beleuchtungsformen	10
5.3.3 Schaltbarer Laser für die Lock-in-Thermografie und andere zeitliche Verfahren	10
5.3.4 Sicherheit	11
5.4 Anforderungen an das Abtastsystem	11
5.4.1 Allgemeines	11
5.4.2 Position und Ausrichtung des Prüfgegenstandes	12
5.4.3 Bewegung des Prüfgegenstandes	13
5.4.4 Bewegung des gesamten Messsystems	13
5.4.5 Bewegung des Laserstrahls durch die Optik	13
5.4.6 Bewegung von Laserstrahl und IR-Kamera durch die Optik	13
5.4.7 Aufbaustabilität	13
5.5 Spezifikationen der IR-Kamera	13
5.6 Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren	14
5.6.1 Allgemeines	14
5.6.2 Spot mit Relativbewegung	15
5.6.3 Linie mit Relativbewegung	17
5.7 Datenverarbeitung zur Charakterisierung des Risses	17
5.7.1 Allgemeines	17
5.7.2 Statischer PulsLaserspot	17
5.7.3 Stetige Abtastung mittels Laserspot	19
5.7.4 Stetige Abtastung mittels Laserlinie	19
5.8 Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren für die Bestimmung der lateralen thermischen Diffusivität	20
5.9 Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren für die Berichtigung des Emissionsgrades	20
5.10 Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren zur Steuerung der Beschichtungsdicke	20
6 Referenzprobekörper	21
7 Kalibrierung, Validierung und Durchführung der Prüfungen	21
8 Bewertung, Klassifizierung und Erfassung der thermografischen Anzeigen	21

9	Berichterstattung	22	
Anhang A (informativ) Liste der Einflussparameter für die NDT-Qualifizierung des			
	Laser-Thermografiesystems	24	
A.1	Allgemeines	24	
A.2	Parameter nach Gruppen von Eingabedaten	24	
A.2.1	Bauteil und dessen Umgebung:	24	
A.2.2	Unregelmäßigkeiten:	24	
A.3	NDT-Laser-TT-System (Verfahrensparameter)	25	
A.3.1	IR-Kamera und Optik	25	
A.3.2	Laser	26	
A.3.3	Abtastsystem und Aufbau.....	26	
A.3.4	Kalibrierblöcke	26	
A.3.5	Datenverarbeitung und -auswertung	27	
Anhang B (informativ) Referenzblöcke			28
B.1	Probekörper, der eine künstliche zur Oberfläche hin offene Kerbe aufweist.....	28	
B.2	Probekörper, der einen natürlichen Riss aufweist.....	29	
B.3	Probekörper, der natürliche Risse aufweist — Referenzblock Nr. 1 für die Magnetpulverprüfung nach EN ISO 9934-2	30	
B.4	Probekörper, der künstliche oberflächennahe Kerben aufweist.....	31	
Literaturhinweise.....			33

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17501:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument bestimmt die Leitlinien und Spezifikationen für zerstörungsfreie Prüfungen mittels aktiver Thermografie mit Laser-Anregung.

Aktive Thermografie mit Laser-Anregung ist hauptsächlich, aber nicht ausschließlich auf verschiedene Werkstoffe (z. B. Verbundstoffe, Metalle, Keramik) und bei Folgendem anwendbar:

- Erkennung von zur Oberfläche hin offenen Unregelmäßigkeiten, besonders von Rissen;
- Erkennung von Unregelmäßigkeiten unmittelbar unter der Oberfläche oder unter Beschichtungen mit einem Wirkungsgrad, der bereits in einer Tiefe von wenigen mm schnell abnimmt;
- Erkennung von Ablösungen und Schichtablösung parallel zur untersuchten Oberfläche;
- Messung von thermischen Werkstoffeigenschaften, wie z. B. der thermischen Diffusivität;
- Messung der Beschichtungsdicke.

Es werden die Anforderungen an die Geräte, die Verifizierung des Systems, die Oberflächenbeschaffenheit des zu prüfenden Teils, die Abtastbedingungen, die Aufzeichnung sowie an die Verarbeitung und Auswertung der Ergebnisse festgelegt. Annahmekriterien werden nicht festgelegt.

Aktive Thermografie mit Laser-Anregung kann bei der industriellen Fertigung sowie bei der Wartung und Reparaturen (von Autoteilen, Motorteilen, Kraftwerken, in der Luft- und Raumfahrtindustrie usw.) angewendet werden.

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).

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

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

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

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

EN ISO 9934-2, *Zerstörungsfreie Prüfung — Magnetpulverprüfung — Teil 2: Prüfmittel (ISO 9934-2)*

EN 12464-1, *Licht und Beleuchtung — Beleuchtung von Arbeitsstätten — Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*

CEN/TR 14748, *Zerstörungsfreie Prüfung — Vorgehensweise zur Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen*

DIN 54184, *Zerstörungsfreie Prüfung — Impulsthermografie mit optischer Anregung*

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

3 Begriffe

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

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

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

Laser

Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung, die als Lichtquelle für die thermische Anregung bei der Laser-Thermografie genutzt wird

3.2

Abtastsystem

System, das eine Relativbewegung des geformten Laserstrahls, der Oberfläche des Prüfgegenstandes und/oder der IR-Kamera in Bezug aufeinander ermöglicht

3.3

Flying-Spot-Verfahren

Abtastung der Oberfläche des Prüfgegenstandes mit dem geformten Laserstrahl

3.4

Spot-Durchmesser

Halbwertsbreite des Strahlungsdichteprofiles des Laserstrahls in der Prüfebene

3.5

Abtastgeschwindigkeit

relative Geschwindigkeit des Laserspots in der Prüfebene

3.6

Beleuchtungsmuster

räumliche Verteilung der Strahlungsdichte des Lasers in der Prüfebene

4 Qualifizierung und Zertifizierung des Personals

Die Fachkunde des Prüfpersonals, das dieses Dokument anwendet, muss nach EN ISO 9712 oder einem gleichwertigen formalisierten System und Folgendem entsprechend nachgewiesen werden:

- nach den einschlägigen Normen, Regeln, Spezifikationen, Prüfanweisungen und Verfahrensbeschreibungen;
- dem Typ und dem Betrieb des Geräts entsprechend;
- dem Einbau, Design, Aufbau und Betrieb der zu prüfenden Gegenstände entsprechend.

Das Prüfpersonal muss über ausreichende Kenntnis des Prüfgegenstandes und der möglichen diagnostischen Befunde verfügen.

5 Prinzip der Laser-Thermografie und Messgeräteaufbau

5.1 Allgemeines

Bei der Laser-Thermografie handelt es sich um ein Verfahren der aktiven Thermografie. Ein sehr elementarer Versuchsaufbau ist in Bild 1 dargestellt. Die Absorption der Laser-Strahlung an der Oberfläche führt zu einem Wärmestrom in den Prüfgegenstand (der auch als photothermischer Effekt bezeichnet wird). Das Beleuchtungsmuster des Lasers kann so gestaltet werden, dass ein fokussierter Messfleck, d. h. ein Spot, oder eine Linie oder eine Fläche (z. B. ein Quadrat oder ein Kreis) gebildet wird. Das Vorhandensein einer Unregelmäßigkeit im Prüfgegenstand oder auf seiner Oberfläche verändert den Wärmestrom auf spezifische Weise. Aufgrund dessen ermöglichen es die Form und Symmetrie der so hervorgerufenen Wärmestrommuster, die Prüfung auf verschiedene Klassen von Unregelmäßigkeiten, wie z. B. Flächen- und Volumenfehler oder lineare Risse, oder auf die Messung der Werkstoffeigenschaften mit Einfluss auf die Wärmediffusion zu optimieren. Der resultierende zeitliche Verlauf der Wärmestrahlungsverteilung über die Oberfläche während oder nach der Laserbeleuchtung wird mit Hilfe einer Infrarot(IR)-Kamera erfasst und in ein Signal umgewandelt, das sich mit Hilfe verschiedener Signalverarbeitungsalgorithmen analysieren lässt. Ein Vorteil der Anwendung eines Lasers als Wärmeenergiequelle ist, dass zwischen der Quelle und der Oberfläche des Prüfgegenstandes ein großer räumlicher Abstand (von üblicherweise einigen Zentimetern bis zu mehreren Metern) eingehalten werden kann. Ein weiterer Vorteil bei der Nutzung eines Lasers besteht in dessen schmalen Emissionsspektrum, das sich deutlich vom Erfassungsbereich der IR-Kamera unterscheiden lässt. Diese Eigenschaft erleichtert die Reflexionskonfiguration ohne Verwendung zusätzlicher Filter.

Üblicherweise werden Hochleistungs-Laser mit einer Ausgangsleistung von mehreren Watt bis Kilowatt verwendet. Durch die Fokussierung auf z. B. einen Punkt (Spot) oder eine Linie lässt sich eine hohe Bestrahlungsstärke (MW bis GW je m²) erzielen. Um die gesamte Oberfläche des Prüfgegenstandes zu prüfen, ist es notwendig, die gesamte Oberfläche des Prüfgegenstandes mittels einer Relativbewegung zwischen Prüfgegenstand, Laser und/oder IR-Kamera durch Beleuchtung abzutasten.

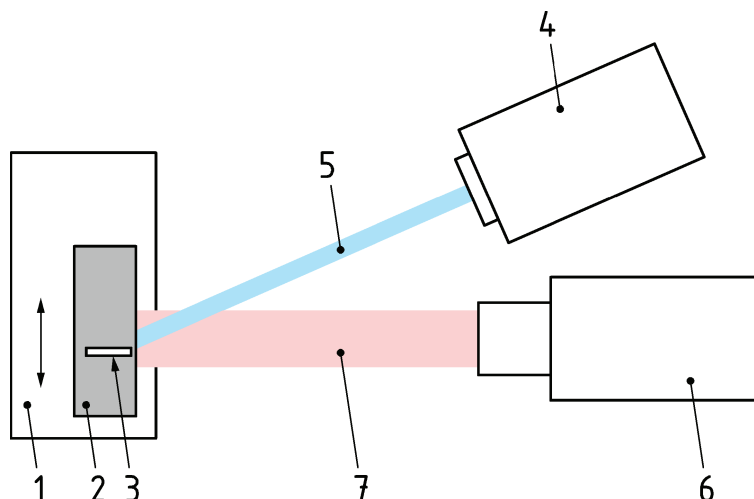
ANMERKUNG Es können Dauerstrich- oder auch PulsLasersysteme als Laserquellen eingesetzt werden.

Weil Laser üblicherweise sehr hohe Modulationsraten erlauben (der kHz-Bereich ist ohne Weiteres erreichbar), lassen sich zeitlich verschiedene Anregungs- und Prüfmodi umsetzen.

Die Qualität des thermografischen Signals ist von einer Reihe von Parametern des Versuchsaufbaus und des Prüfgegenstandes abhängig. Im Folgenden sind Voraussetzungen aufgeführt, die vorzugsweise erfüllt sein sollten, um die Signalqualität [d. h. das Signal-Rausch-Verhältnis und das Kontrast-Rausch-Verhältnis der festgestellten Unregelmäßigkeit(en)] zu verbessern:

- hohe Leistung und/oder Bestrahlungsstärke des Lasers;
- hoher und räumlich homogener spektraler Absorptionsgrad des Prüfgegenstandes bei der Wellenlänge des Lasers;
- hoher und räumlich homogener spektraler Emissionsgrad des Prüfgegenstandes bei der Wellenlänge der IR-Kamera;
- hohe zeitliche und mechanische Stabilität zwischen den Geräten, die sich relativ zueinander bewegen, d. h. zwischen dem Laser, dem Abtastsystem und der IR-Kamera;
- hohe Empfindlichkeit und niedriger NETD der IR-Kamera.

Falls z. B. der Absorptionsgrad oder der Emissionsgrad der Oberfläche des Prüfgegenstandes räumlich inhomogen ist, führt dies zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Wärmestrahlung, die als Anzeige eines Fehlers fehlinterpretiert werden kann. In diesem Fall könnte eine zusätzliche Beschichtung der Oberfläche aufgebracht werden.



Legende

- | | | | |
|---|------------------|---|----------------|
| 1 | Abtastsystem | 5 | Laserstrahl |
| 2 | Prüfgegenstand | 6 | IR-Kamera |
| 3 | Unregelmäßigkeit | 7 | Wärmestrahlung |
| 4 | Laser | | |

Bild 1 — Schematische Darstellung der Laser-Thermografie mit Bewegung des Prüfgegenstandes

5.2 Übliche Anregungskonfigurationen

5.2.1 Allgemeines

Nach EN 17119 kann Laser-Thermografie bei statischen ebenso wie bei dynamischen Konfigurationen und mit unterschiedlichen Arten der zeitlichen und räumlichen Anregung angewendet werden.

5.2.2 Laser-Thermografie in statischer Konfiguration (ohne Relativbewegung)

Laser-Thermografie kann ohne jede Relativbewegung zwischen Beleuchtung, Prüfgegenstand und IR-Kamera erfolgen. In diesem Fall wird bzw. werden bei dem (den) interessierenden Zeitpunkt(en) ein oder mehrere Thermogramm(e) der gesamten Szene erfasst. Das erfasste Thermogramm oder die Thermogrammsequenz kann dann weiterverarbeitet werden, um anzuzeigen, ob der Prüfgegenstand irgendwelche Unregelmäßigkeiten aufweist. Besonders impuls- und lock-in-thermografische Prüfverfahren, die nicht von einer Relativbewegung abhängig sind und bei denen entweder ein sehr kurzer optischer Impuls oder eine periodische optische Anregung erfolgt, können bei Verwendung eines Lasers als optische Energiequelle umgesetzt werden.

5.2.3 Laser-Thermografie in dynamischer Konfiguration (mit Relativbewegung)

Laser-Thermografie kann auch erfolgen, während sich Beleuchtung, Prüfgegenstand und IR-Kamera relativ zueinander bewegen. In diesem Fall wird die IR-Kamera so eingestellt, dass sie entweder den Bereich, in dem die Beleuchtung erfolgt, oder einen Bereich abdeckt, in dem keine Beleuchtung mehr erfolgt, in dem aber deren thermische Auswirkungen noch sichtbar sind (Zeitversatz). Das erfasste Thermogramm oder die Thermogrammsequenz kann dann weiterverarbeitet werden, um anzuzeigen, ob der Prüfgegenstand irgendwelche Unregelmäßigkeiten aufweist.

5.2.4 Laser-Thermografie mit zeitlich verschiedenen Anregungen

Je nach dem im gegebenen Fall verwendeten Laser können zeitlich verschiedene Anregungsmodi umgesetzt werden. Besonders im Falle der Verwendung eines sehr kurzen Laserimpulses ähnelt dies dem Impuls-Thermografie-Prüfverfahren mit Hilfe optischer Quellen. Ein anderes bekanntes zeitliches Verfahren ist die Prüfung mittels Lock-in-Thermografie unter Nutzung einer optischen Quelle, deren Bestrahlungsstärke periodisch, z. B. durch eine Sinus-, Dreieck- oder Rechteckfunktion, moduliert wird. Laserquellen erlauben den Dauerstrichbetrieb (en: continuous wave [cw] operation) und können mit sehr hohen Modulationsraten (>10 kHz) moduliert werden. Daher können Laser für alle bekannten zeitlichen Anregungsverfahren und darüber hinaus mit bis zu sehr hohen Modulationsfrequenzen sowie für frei wählbare zeitliche Anregungsfunktionen verwendet werden.

5.2.5 Laser-Thermografie mit räumlich verschiedenen Anregungen

Je nach dem im gegebenen Fall verwendeten Laser können räumlich verschiedene Anregungsmodi umgesetzt werden. Ein fokussierter Laserspot kann z. B. für das Flying-Spot-Verfahren genutzt werden, bei dem der Prüfgegenstand stetig oder nach dem Zufallsprinzip mit einem Laserspot abgetastet wird. In diesem Fall muss der 3D-Wärmeübergang berücksichtigt werden. Eine fokussierte Laserlinie kann für Verfahren genutzt werden, bei denen der Prüfgegenstand stetig oder nach dem Zufallsprinzip mit einer Laserlinie abgetastet wird. In diesem Fall ist nur der 2D-Wärmeübergang zu berücksichtigen. Ein verbreiteter Laserstrahl kann zur homogenen Beleuchtung einer größeren Fläche verwendet werden. Abhängig von der Größe dieser Fläche ist nur der 1D-Wärmeübergang in Tiefenrichtung zu berücksichtigen.

Beleuchtungsmuster, wie z. B. Spots oder Linien, können nicht nur zur Lokalisierung und Quantifizierung von Unregelmäßigkeiten, sondern auch zur Bestimmung der Richtungsabhängigkeit von thermischen Werkstoffeigenschaften, wie z. B. der thermischen Diffusivität, verwendet werden.

5.3 Anforderungen an den Laser und die Laseroptik

5.3.1 Bestrahlungsstärke und Wellenlänge des Lasers

Das für die Untersuchungen verwendete Lasersystem muss die speziell für die thermografische Prüfaufgabe geltenden Anforderungen erfüllen. Im Falle einer festgelegten IR-Kamera sind die Hauptparameter, die den kleinsten nachweisbaren Temperaturanstieg auf der Oberfläche des Prüfgegenstandes durch die IR-Kamera bestimmen, die Bestrahlungsstärke der Laserstrahlung und die optischen und thermischen Werkstoffeigenschaften des Prüfgegenstandes. Hinsichtlich der Bestrahlungsstärke der Laserstrahlung ist die Beziehung zum Temperaturanstieg linear. Das bedeutet, dass die gewählten Werte der Laserausgangsleistung und der Abbildungsoptik direkten Einfluss auf den erreichbaren Temperaturanstieg haben. Außerdem bestimmt der spektrale Absorptionsgrad des Prüfgegenstandes bei der Laser-Wellenlänge, in welchem Maße die einfallende Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt wird. Daher muss die Laser-Bestrahlungsstärke, wenn der Absorptionsgrad klein ist, wie z. B. bei polierten Metallen oder teilweise transparenten Polymeren, entsprechend hoch sein. Im besten Fall wird die Laser-Wellenlänge dem Höchstwert des spektralen Absorptionsgrades des Prüfgegenstandes entsprechend gewählt. Außerdem sollte die Laser-Wellenlänge außerhalb des spektralen Empfindlichkeitsbereichs der IR-Kamera liegen, um eine Beschädigung des Detektors zu verhindern und um zu vermeiden, dass die vom Prüfgegenstand teilweise reflektierte Laserstrahlung mit der vom Prüfgegenstand ausgehenden thermischen Strahlung verwechselt werden kann. Neben der Bestrahlungsstärke und dem Absorptionsgrad des Prüfgegenstandes bestimmen die thermischen Werkstoffeigenschaften des Prüfgegenstandes (d. h. die Wärmeleitfähigkeit k , die spezifische Wärme c_p und die Dichte ρ) den durch die Erwärmung mittels Laser bedingten Temperaturanstieg. Für die beiden Grenzfälle der Impuls- und Lock-in-Thermografie ist der Temperaturanstieg ΔT proportional zu $(k \cdot c_p \cdot \rho)^{-1/2}$. Das bedeutet, dass bei stark wärmeleitenden Werkstoffen nur ein geringer Temperaturanstieg hervorgerufen wird. Entsprechend muss die Laser-Bestrahlungsstärke hoch genug gewählt werden, um einen ausreichenden Temperaturanstieg während der Prüfung zu kompensieren.

ANMERKUNG Für die maximale Laserleistung sollte berücksichtigt werden, dass der Prüfgegenstand nicht z. B. durch Schmelzen, Oxidation, beleuchtungsbedingte Farbveränderungen oder Polymeralterung, zerstört wird. Diese Effekte werden nicht nur durch die Laser-Bestrahlungsstärke, sondern auch die Impulslänge, thermische und optische Werkstoffeigenschaften, die chemische Zusammensetzung usw. beeinflusst.

5.3.2 Räumliche Beleuchtungsformen

5.3.2.1 Allgemeines

Das Beleuchtungsmuster muss dem jeweiligen für die Prüfung genutzten räumlichen und zeitlichen Anregungsmodus entsprechend gewählt werden. Es kann mit Hilfe optischer, strahlformender Geräte eingestellt werden.

Grundsätzlich ist die Strahlqualität bei Faser-, Festkörper- und Gas-Lasern höher als bei Dioden-Lasern, und diese lassen sich auf eine geringere Breite fokussieren. Bei fokussierten Laserspots ist die Spot-Größe nur innerhalb der Schärfentiefe der Laseroptik gegeben.

Falls die Laserstrahlung über eine optische Faser zum System geführt wird, sollten diese Faser und die gesamte restliche Optik so eingestellt werden, dass der Laserstrahl eine für die Untersuchung angemessene Form hat.

5.3.2.2 Spot

Mit Hilfe eines Systems optischer Linsen oder Spiegel kann ein auf eine runde Form fokussierter oder kollimierter Laserspot erzeugt werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Lasertyp und der verwendeten Optik lassen sich unterschiedliche Spot-Größen erzielen.

5.3.2.3 Gerade Linie

Mit Hilfe einer Zylinderlinse oder eines Linsensystems kann ein auf eine gerade Linie fokussierter Laser erzeugt werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Lasertyp und der verwendeten Optik lassen sich unterschiedliche Längen, Breiten und Formen der Linie erzielen. In diesem Fall ist die Empfindlichkeit der Detektion bei parallel zur Laserlinie ausgerichteten Unregelmäßigkeiten besser.

5.3.2.4 Fläche

Mit Hilfe von Linsensystemen lassen sich größere Flächen homogen beleuchten. Falls die Laserquelle für Impuls- oder Lock-in-Thermografie zu verwenden ist, muss das Maß der beleuchteten Fläche wesentlich größer als die Wärmediffusionslänge sein. Anderenfalls bezieht sich diese Konfiguration auf das photothermische Verfahren oder das Flying-Spot-Verfahren. Um laterale Wärmeströme zu vermeiden, muss anstelle eines Gauß-Strahlprofils vorzugsweise ein Top-Hat-Strahlprofil (in Form eines Zylinderhuts) gewählt werden.

5.3.2.5 Muster

Spezielle, von den oben genannten Formen abweichende Werkstoffeigenschaften können z. B. mit Hilfe von Laserarrays, Linsenanordnungen oder diffraktiven optischen Elementen erzeugt werden. Die Form der Muster kann auf verschiedene Arten von Unregelmäßigkeiten optimiert werden.

5.3.3 Schaltbarer Laser für die Lock-in-Thermografie und andere zeitliche Verfahren

Bei allen zeitlichen Anregungsverfahren und besonders bei denen, die die zeitliche Anregungsfunktion mit dem zeitlichen Temperaturverhalten des Prüfgegenstandes korrelieren, muss die Bestrahlungsstärke des Lasers möglichst genau geregelt werden. Ein gängiger Ansatz ist, die Ausgangsleistung des Lasersystems durch einen externen Funktionsgenerator über einen analogen Spannungseingang zu steuern, der sich durch die IR-Kamera auslösen lässt. Für eine bestmögliche Leistung sollte die Ausgangsleistung in einer linearen

Beziehung zur Steuerspannung stehen, sodass der Signalverarbeitungsalgorithmus direkt angewendet werden kann. Falls keine lineare Beziehung vorliegt, muss der Anwender der Laser-Kennlinie (d. h. der Ausgangsleistung über der Steuerspannung) angemessene Rechnung tragen. Im Hinblick auf das zeitbezogene Verhalten müssen die Ein- und Ausschaltzeiten des Lasers für die höchstmögliche Modulationsfrequenz berücksichtigt werden.

5.3.4 Sicherheit

Die wichtigsten Europäischen Normen zur Sicherheit von Lasern, zur Sicherheit von optischer Strahlung und den entsprechenden Schutzmaßnahmen sind im Folgenden aufgeführt:

- EN 60825, *Sicherheit von Lasereinrichtungen* mit mehreren maßgeblichen Teilen, z. B.:
 - EN 60825-1, *Sicherheit von Lasereinrichtungen — Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen*;
 - EN 60825-4, *Sicherheit von Lasereinrichtungen — Teil 4: Laserschutzwände*;
- EN ISO 11553, *Sicherheit von Maschinen — Laserbearbeitungsmaschinen* mit mehreren maßgeblichen Teilen, z. B.:
 - EN ISO 11553-1, *Sicherheit von Maschinen — Laserbearbeitungsmaschinen — Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen*;
 - EN ISO 11553-2, *Sicherheit von Maschinen — Laserbearbeitungsmaschinen — Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte*;

Augenschutz:

- EN 207, *Persönlicher Augenschutz — Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen)*;
- EN 208, *Persönlicher Augenschutz — Augenschutzgeräte für Justierarbeiten an Lasern und Laseraufbauten (Laser-Justierbrillen)*;
- EN 12254, *Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen — Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung*;
- EN 62471, *Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen*.

Während der Prüfung muss der Arbeitsplatz angemessen und in Übereinstimmung mit EN 12464-1 beleuchtet sein. Es wird davon ausgegangen, dass die nach den Arbeitsschutzvorschriften und den Vorschriften zu künstlicher optischer Strahlung notwendigen Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden.

Es muss sichergestellt werden, dass sich während der Prüfung keine brennbaren Materialien in der Nähe des Prüfgeräts und des Untersuchungsgegenstandes befinden.

Darüber hinaus besteht das Risiko, sich an stark erwärmten Teilen der Strahlungsquellen, des Prüfgegenstandes und weiterer im Pfad des Strahls befindlicher Gegenstände zu verbrennen.

5.4 Anforderungen an das Abtastsystem

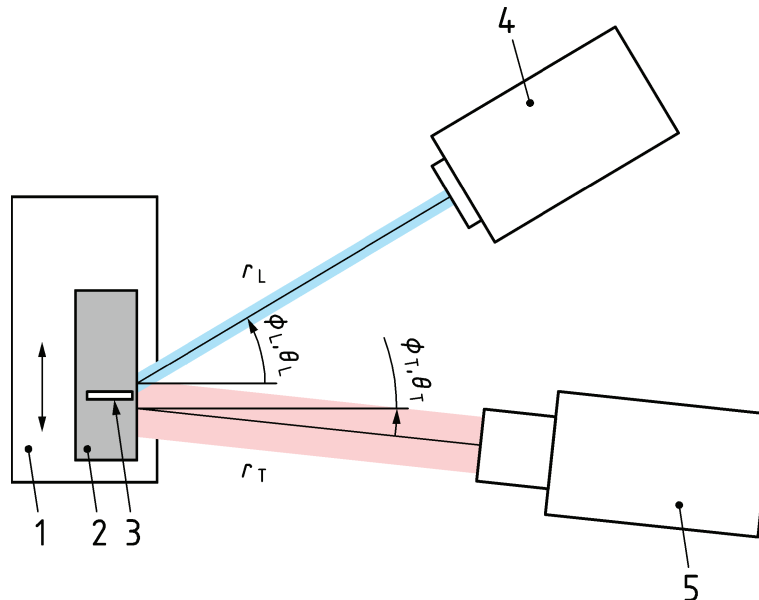
5.4.1 Allgemeines

Das Abtastsystem sollte es dem Laser ermöglichen, die gesamte zu untersuchende Fläche aus einer oder mehreren Positionen des Lasers, der IR-Kamera und/oder des Prüfgegenstandes zu erreichen, während der

Laserstrahl und die zur Untersuchung dienende IR-Kamera scharf gestellt bleiben. Die maximale Abtastgeschwindigkeit ist mit der Leistungsdichte des Lasers und der Bildwiederholrate der IR-Kamera verknüpft.

Je nach der Anwendung erfolgt die Bewegung der betreffenden Teile des Abtastsystems entweder schrittweise oder stetig.

5.4.2 Position und Ausrichtung des Prüfgegenstandes



Legende

1	Abtastsystem	r_T	Radialabstand der IR-Kamera zur Oberfläche des Prüfgegenstandes
2	Prüfgegenstand	φ_T	Azimutwinkel zwischen der IR-Kamera und der Oberfläche des Prüfgegenstandes
3	Unregelmäßigkeit	θ_T	Polarwinkel zwischen der IR-Kamera und der Oberfläche des Prüfgegenstandes
4	Laser	φ_L	Azimutwinkel zwischen dem Laserstrahl und der Oberfläche des Prüfgegenstandes
5	IR-Kamera	θ_L	Polarwinkel zwischen dem Laserstrahl und der Oberfläche des Prüfgegenstandes
		r_L	Radialabstand des Laserstrahlausgangs zur Oberfläche des Prüfgegenstandes

Bild 2 — Beispiel für eine Abtastkonfiguration für die Laser-Thermografie

Die Schärfentiefe der IR-Kamera und, im Falle eines fokussierten Lasers, die des Lasers schränkt die Ausrichtung des Prüfgegenstandes in Bezug auf die IR-Kamera und den Laser ein. Darüber hinaus sind sowohl der Absorptionsgrad als auch der Emissionsgrad des Prüfgegenstandes im Spektralbereich des Lasers bzw. der IR-Kamera vom Einfallwinkel abhängig. Falls diese Größen von einer Messung zur nächsten oder im Verlauf einer Messung geändert werden, ändern sich auch die Erwärmung des Prüfgegenstandes und die von der IR-Kamera detektierte Wärmestrahlung. Daher ist es notwendig, die relative Position und Ausrichtung von Prüfgegenstand, Laser und IR-Kamera festzulegen und angemessen zu dokumentieren. Eine mögliche in Kugelkoordinaten angegebene Konfiguration ist in Bild 2 dargestellt.

5.4.3 Bewegung des Prüfgegenstandes

In diesem Fall ist das aus Laser und IR-Kamera bestehende Messsystem in seiner Position fixiert und wird der Prüfgegenstand während der Datenerfassung vor ihm bewegt (siehe Bild 2).

5.4.4 Bewegung des gesamten Messsystems

In diesem Fall ist der Prüfgegenstand in seiner Position fixiert. Das aus Laser und IR-Kameras bestehende Messsystem wird während der Datenerfassung vor dem Prüfgegenstand bewegt.

5.4.5 Bewegung des Laserstrahls durch die Optik

In diesem Fall sind sowohl der Prüfgegenstand als auch die IR-Kamera während der Datenerfassung in ihrer Position fixiert, und es wird ein optischer Aufbau, bestehend z. B. aus Spiegeln, Goniometern oder Laser-Abtastköpfen, verwendet, um den Laserstrahl umzulenken.

5.4.6 Bewegung von Laserstrahl und IR-Kamera durch die Optik

In diesem Fall sind sowohl der Prüfgegenstand als auch die IR-Kamera während der Datenerfassung in ihrer Position fixiert, und es wird ein optischer Aufbau, bestehend z. B. aus Spiegeln und Goniometern, verwendet, um sowohl die Wärmestrahlung als auch den Laserstrahl umzulenken.

5.4.7 Aufbaustabilität

Ist für eine Datenerfassung die Auswertung einer Thermogrammsequenz erforderlich, so ist es von entscheidender Bedeutung, für eine vorschriftsmäßige Pixelkorrespondenz zwischen den einzelnen Darstellungen der Sequenz zu sorgen. Entsprechend sollte der Aufbau eine Stabilität gegenüber Schwingungen und thermischer Drift aufweisen, die so bemessen ist, dass die Unsicherheit der Bewegung jedes einzelnen Teils des Aufbaus kleiner als die Ortsauflösung der IR-Kamera ist.

5.5 Spezifikationen der IR-Kamera

Tabelle 1 enthält die Mindestanforderungen an die Eigenschaften der IR-Kamera.

Tabelle 1 — Mindestanforderungen an die Eigenschaften der IR-Kamera

Eigenschaft		Mindestanforderung
1	Spektralbereich (µm)	In Übereinstimmung mit EN 16714-2: Außerdem darf der Spektralbereich der IR-Kamera nicht mit der Wellenlänge des Lasers überlappen.
2	Temperaturmessbereich (K, digitale Einheit)	Die IR-Kamera sollte in der Lage sein, alle Temperaturschwankungen des Prüfgegenstandes zu detektieren. Hierfür muss ein entsprechender Temperaturmessbereich eingestellt werden. Bei IR-Kameras ohne Temperaturkalibrierung wird ein entsprechender Anzeigebereich eingestellt, z. B. durch Wahl einer geeigneten Integrationszeit.
3	Thermische Auflösung (K, digitale Einheit)	Die thermische Auflösung kann durch die rauschäquivalente Temperaturdifferenz (en: Noise Equivalent Temperature Difference, NETD; nach EN 16714-2) oder einen äquivalenten Parameter beschrieben werden. Dieser Parameter muss ausreichend kleiner sein als die von der Wärmequelle hervorgerufene scheinbare Temperaturdifferenz. Üblicherweise sollte er mindestens 2 Mal bis 3 Mal kleiner sein, und in einigen Sonderfällen kann er sogar noch kleiner sein (z. B. bei der Lock-in-Thermografie).
4	Thermische Kurzzeitstabilität (K/s)	Die Temperaturdrift im Verlauf der Datenerfassung muss <i>kleiner als die NETD</i> sein, damit sie die thermische Auflösung nicht beeinträchtigt. Ein Maß für die thermische Stabilität ist die Kurzzeitstabilität (angegeben in K/s), die (nach VDI/VDE 5585-5) möglichst klein sein sollte. Automatische Kalibrierberichtigungen müssen während der Datenerfassung unterbleiben.

Eigenschaft		Mindestanforderung
5	Detektorformat	Beim Detektor kann es sich um eine lineare oder eine Matrixanordnung handeln. Deren Anzahl an Array-Elementen muss der geforderten Ortsauflösung, der verwendeten Optik und der zu untersuchenden Fläche entsprechend festgelegt werden.
6	Linse	Kennwerte wie z. B. die Brennweite und die Blende müssen der Leistung der Anwendung bezüglich Empfindlichkeit der Detektion und Ortsauflösung angemessen sein. Die Schärfentiefe muss der Geometrie der zu prüfenden Teile angemessen sein. Der Arbeitsabstand muss der Prüfumgebung angemessen sein.
7	Ortsauflösung (mm)	Die Ortsauflösung muss <i>mindestens 3 Mal</i> kleiner als die Länge der kürzesten zu detektierenden Unregelmäßigkeit sein. Der Begriff der Länge der Unregelmäßigkeit bezieht sich auf deren größtes Maß in der Beobachtungsebene. Üblicherweise können bei ausreichender Länge auch sehr dünne Risse mit einer Öffnungsweite kleiner als die Ortsauflösung aufgefunden werden. Ein Maß für die Ortsauflösung ist der kleinste bei der Temperaturmessung messbare Bildfeldwinkel (MFOV) nach VDI/VDE 5585-1. Als eine typische Mindestanforderung sollte die Beziehung zwischen dem MFOV und dem Bildfeldwinkel eines Einzeldetektors (IFOV) verwendet werden: $MFOV \geq 3 \text{ IFOV}$. Das bedeutet, dass der MFOV mindestens so groß wie die Länge der kürzesten zu detektierenden Unregelmäßigkeit sein sollte. Er kann mit Hilfe auswechselbarer Linsen und/oder Zwischenringe angepasst werden.
8	Zeitliche Auflösung (s)	Die bei der Datenerfassung anzuwendende Bildwiederholrate muss hoch genug sein, um eine korrekte Abtastung des thermischen Signals entsprechend dem zu untersuchenden Merkmal (thermische Eigenschaften der Werkstoffe, Geometrie der Unregelmäßigkeiten, Wärmeleistungsverteilung, Abtastgeschwindigkeit, Verarbeitung usw.) zu ermöglichen.
9	Zeitliche Stabilität (s)	Bei bestimmten Arten der Verarbeitung ist eine hohe zeitliche Stabilität der Bildwiederholrate erforderlich. Alternativ können für jeden Frame genaue Zeitstempel aufgezeichnet werden.
10	Integrationsmodus	Für den Integrationsmodus ist ein Schnappschussmodus vorzuziehen. Bei bestimmten Arten der Verarbeitung muss im Falle der Anwendung eines Rolling-Frame-Integrationsmodus eine Berichtigung angewendet werden.
11	Synchronisation	Bei bestimmten Arten der Verarbeitung ist es notwendig, die Erfassung mit der Abtastung zu synchronisieren. Bei Mikrobolometer-Kameras muss das Synchronisationssignal von der IR-Kamera freigegeben werden. Quantumdetektorkameras können ebenso extern synchronisiert werden.
12	Dokumentation	Die IR-Kamera muss Aufzeichnungen liefern, die radiometrische Daten enthalten.
13	Schutz der IR-Kamera vor Laser-Licht	Der Sensor der IR-Kamera muss so geschützt werden, dass der Laserstrahl weder direkt noch indirekt auf den Sensor trifft. Das ist auch dann erforderlich, wenn die Wellenlänge des Laser-Lichts außerhalb des Spektralbereichs der IR-Kamera liegt.

5.6 Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren

5.6.1 Allgemeines

Die Wärmebilder können mit üblichen Datenverarbeitungsverfahren bearbeitet werden, um den Fehler visuell hervorzuheben und/oder als Vorbereitungsschritt der Datenauswertung.

Einige der bei der Laser-Thermografie anwendbaren Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren werden in anderen Normen beschrieben. Besonders auch bei Anwendung großer Spot-Größen für die Beleuchtung (d. h. erheblich größer als die Wärmediffusionslänge) können andere Technologien, z. B. Halogen- oder Blitzlampen, für die Prüfung angewendet werden. Falls ein sehr kurzer Laserimpuls genutzt wird, ähnelt dies dem Impuls-Thermografie-Prüfverfahren mit Hilfe optischer Quellen, siehe DIN 54184. Im

Falle eines periodisch (z. B. durch eine Sinus- oder eine Rechteckfunktion) modulierten Laserstrahls ähnelt dies dem Lock-in-Verfahren, das in EN 17119 beschrieben ist.

Einige Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren basieren auf der Möglichkeit, den Laser zur Umsetzung verschiedener Beleuchtungsmuster oder einer Relativbewegung zwischen dem Ort der Erwärmung und der Unregelmäßigkeit innerhalb des Prüfgegenstandes zu nutzen. Aufgrund der sich daraus ergebenden großen Zahl von Freiheitsgraden ist es nicht möglich, alle vorstellbaren Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren abzudecken. Einige Beispiele für die wichtigsten Datenverarbeitungs- und -auswertungsverfahren sind in Anhang A beschrieben.

5.6.2 Spot mit Relativbewegung

5.6.2.1 Allgemeine Datenauswertung

Wie in 5.2.5 beschrieben, ist eine Möglichkeit, die Laser-Thermografie für die Detektierung von zur Oberfläche hin offenen Rissen zu nutzen, das Flying-Spot-Laserverfahren. Bei diesem Verfahren wird der Prüfgegenstand mit einem fokussierten Laserspot durch die Relativbewegung zwischen Prüfgegenstand, Laser und/oder IR-Kamera abgetastet. Um genau eine Darstellung zu erhalten, die alle Anzeigen einer Thermogrammsequenz enthält, müssen spezielle Darstellungs- und Signalverarbeitungsalgorithmen angewendet werden. Das Vorhandensein einer Unregelmäßigkeit kann sich im räumlichen, zeitlichen oder frequenzbezogenen Bereich zeigen. Daher gibt es verschiedene Ansätze. Einige nutzen eine lokale räumliche Analyse des dynamischen Temperaturfeldes, z. B. durch Anwendung eines Differential-Kantendetektionsfilters, bevor die so erhaltene Darstellung wieder zusammengesetzt wird, während einige zunächst die Thermogrammsequenz, z. B. durch Sortierung oder durch Verfolgung der Laserposition, zu einer neuen Sequenz zusammensetzen und die rissbedingten Störungen erst im Anschluss daran detektieren. Bei allen Ansätzen muss der korrekten Darstellungserfassung aller verwendeten Daten besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Nur dann lässt sich der Riss genau lokalisieren. Im Folgenden werden ausgewählte geeignete Datenauswertungsverfahren ausführlicher beschrieben, es dürfen aber auch andere Verfahren angewendet werden.

5.6.2.2 Datenauswertung durch räumliche Ableitung und zeitliche Datensortierung

Dieses Verfahren der Datenauswertung kann dann angewendet werden, wenn die Oberfläche des Prüfgegenstandes stetig, schrittweise oder nach dem Zufallsprinzip mit dem Laserspot abgerastert wird. In diesem Fall liegt keine Relativbewegung zwischen Prüfgegenstand und IR-Kamera vor. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte [1], [2], siehe Bild 3:

- a) Subtraktion eines Thermogramms oder eines Durchschnitts mehrerer Thermogramme von der Gesamt-Thermogrammsequenz, die von der Szene vor der Erwärmung aufgezeichnet wurden. Nach der Subtraktion erscheinen im Wesentlichen nur noch die durch die Lasererwärmung verursachten Temperaturanstiege in den Thermogrammen.
- b) Für jedes Thermogramm der Sequenz $T(x,y,t)$ werden die ersten räumlichen Ableitungen entlang der beiden Hauptachsen der Darstellung (d. h. in x - und y -Richtung) berechnet und $T'_x(x,y,t)$ und $T'_y(x,y,t)$ ermittelt. Hierfür kann z. B. ein Prewitt- oder ein Sobel-Filter verwendet werden. Falls erwartet wird, dass die Risse ausschließlich z. B. in der x -Richtung ausgerichtet sind, braucht nur die erste räumliche Ableitung in y -Richtung berechnet zu werden.

Alternativ werden entweder die zweiten räumlichen Ableitungen berechnet oder wird ein diskreter Laplace-Filter verwendet (gewichtete Summe der beiden zweiten räumlichen Ableitungen). Es ist zu beachten, dass jede Ableitung von Rauschdaten zu einem vermehrten Rauschen im resultierenden Datensatz führt. Daher ist, um einen ableitenden Filter verwenden zu können, ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis wichtig.

- c) Die beiden Datensätze der Ableitungen in x - und y -Richtung werden zusammengeführt und nach ihren Werten in aufsteigender Reihenfolge sortiert, sodass sich eine Thermogrammsequenz ergibt:

$$T'_{\text{sort}}(x, y, n) \in \{T'_x(x, y, t), T'_y(x, y, t)\} \text{ und } T'_{\text{sort}}(x, y, n) \leq T'_{\text{sort}}(x, y, n + 1) \quad (1)$$

n ist der Index der Darstellungen in der Sequenz, und N ist die Gesamtanzahl an Darstellungen in einer Sequenz. Nach Anwendung von Gleichung (1) enthält der resultierende Datensatz für $n = 1$ das gemeinsame Minimum und für $n = 2N$ das gemeinsame Maximum. Eine angemessene bildliche Darstellung der Rissanzeigen kann möglicherweise erhalten werden, wenn n diesen Extremwerten gleich ist oder nahe bei diesen Extremwerten liegt (z. B. $n = 4$ oder $n = 2N - 4$).

- d) Alternativ zu den Schritten 2 und 3 werden die Temperaturwerte für jeden Pixel über die Zeitskala der gesamten Sequenz gemittelt. Eine Darstellung dieser Mittelwerte zeigt Anzeigen, die zur Position der Risse weisen, jedoch üblicherweise mit einer geringeren Ortsauflösung und einem geringeren Signal-Rausch-Verhältnis als bei den Schritten 2 und 3.

ANMERKUNG Anstelle der Verwendung von aus Temperaturwerten bestehenden Thermogrammsequenzen (d. h. durch Verwendung einer temperaturkalibrierten IR-Kamera) können auch Thermogrammsequenzen verwendet werden, die aus Kameralesungen bestehen, die der Strahldichte des erwärmten Prüfgegenstandes proportional sind.

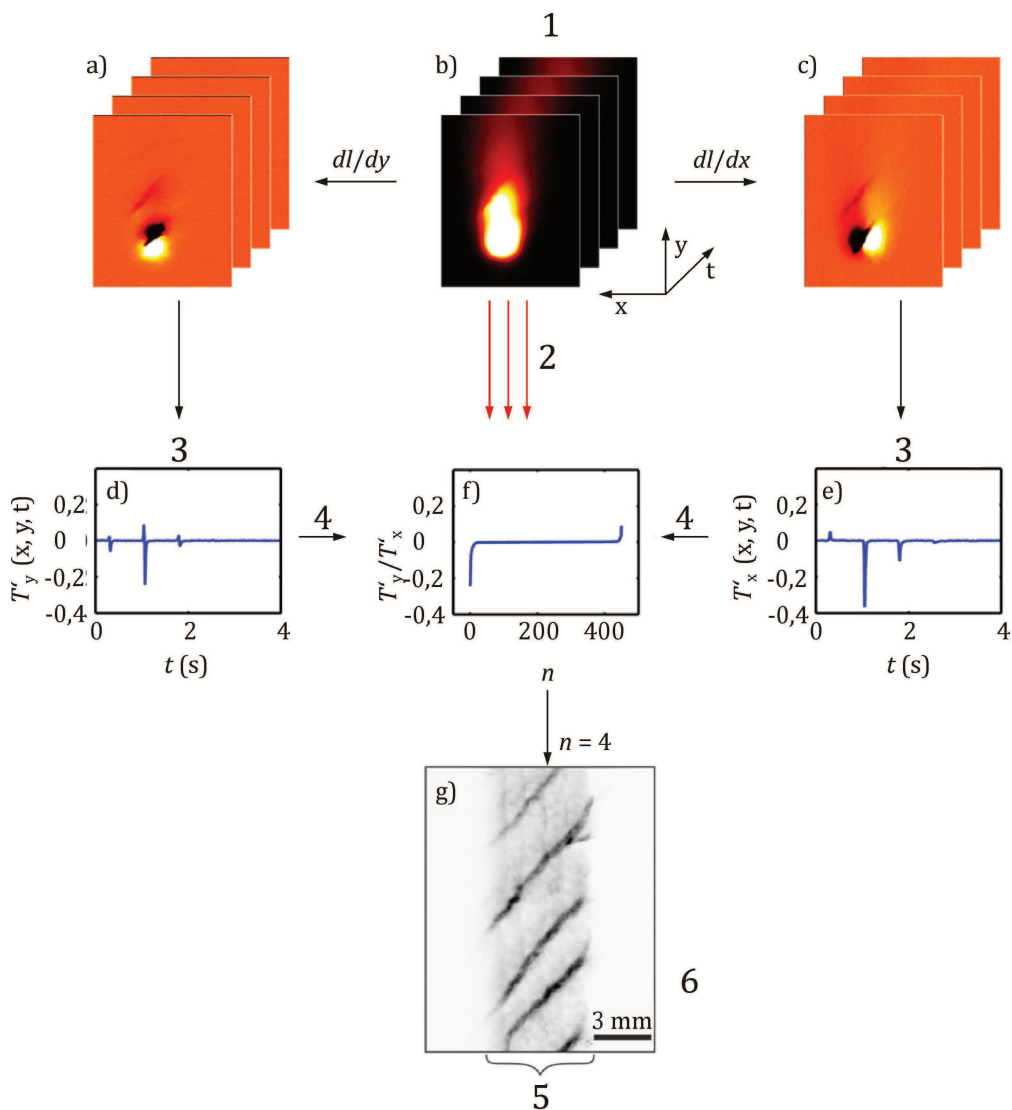


Bild 3 — Beispiel für die Datenverarbeitung nach der Datenaufzeichnung mit einem Abtast-Laserspot

Bild 3 zeigt ein Beispiel für die Datenverarbeitung nach der Datenaufzeichnung mit einem in y -Richtung geführten Abtast-Laserspot. In diesem Bild sind die folgenden Einzelheiten dargestellt:

- Bild 3 a) Darstellungen nach Anwendung einer räumlichen Ableitung in y -Richtung auf die Thermogramme;
- Bild 3 b) Thermogramme des Rohdatensatzes nach Subtraktion eines Thermogramms vor der Erwärmung;
- Bild 3 c) Darstellungen nach Anwendung einer räumlichen Ableitung in x -Richtung auf die Thermogramme;
- Bild 3 d) Beispiel für den zeitlichen Verlauf eines Pixels nach Anwendung der räumlichen Ableitung in y -Richtung;
- Bild 3 e) Beispiel für den zeitlichen Verlauf eines Pixels nach Anwendung der räumlichen Ableitung in x -Richtung;
- Bild 3 f) Beispiel für den zeitlichen Verlauf eines Pixels nach Anwendung der räumlichen Ableitung in y -Richtung und nach Sortierung der Pixelwerte;
- Bild 3 g) resultierende Darstellung bei $n = 4$ nach Zusammenführung der beiden Datensätze mit den beiden räumlichen Ableitungen [1].

5.6.3 Linie mit Relativbewegung

Falls der Scan erfolgt, indem eine Laserlinie über den Prüfgegenstand geführt wird, kann ein ähnliches Datenauswertungsverfahren wie in 5.6.2 für den Laserspot beschrieben, angewendet werden. Hierfür wird empfohlen, die Abtastrichtung entlang einer der Hauptachsen der Darstellung zu wählen und die Ableitung nur in dieser Richtung der Bewegung der Laserlinie zu berechnen.

5.7 Datenverarbeitung zur Charakterisierung des Risses

5.7.1 Allgemeines

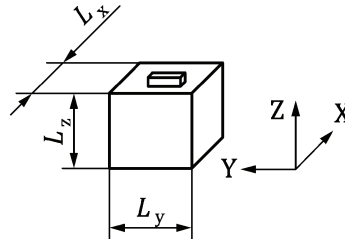
Die Charakterisierung des Risses ist gleichbedeutend mit der Bestimmung der Risstiefe C_z , der Risslänge C_y , der Rissbreite C_x und des Risswinkels α , siehe Bild 4. In der Regel ist es nicht möglich, die Rissform anhand von Laser-Thermografiemessungen zu rekonstruieren. In Sonderfällen lassen sich mit Hilfe der Laser-Thermografie Näherungswerte für C_z , C_y und α bestimmen. C_y kann anhand der Länge der RissSignatur direkt bestimmt werden, wie in Bild 3 g) dargestellt. Um C_z und α zu bestimmen, können auch die Temperaturunterschiede an zwei festgelegten Positionen auf gegenüber liegenden Seiten des Risses bewertet werden. Das kann auf zwei verschiedene Arten und Weisen erfolgen.

5.7.2 Statischer PulsLaserspot

Bei der ersten Option wird eine feste Position für den stationären Laserspot auf einer Seite des Risses in einem Abstand d zum Riss gewählt und der Temperaturverlauf als Mittelwert der gewählten Flächen A1 und A2 der beiden Seiten des Risses und symmetrisch in einem Abstand e zum Laserspot aufgezeichnet, siehe Bild 4 [2]. Durch Aufsummieren der absoluten Temperaturdifferenz der beiden Seiten ΔI über einen bestimmten Zeitraum und Division dieses Integrals durch die Dauer dieses Zeitraums kann ein so genannter Risstiefenwert c_{dv} bewertet werden, siehe Gleichung 2. Dieser Parameter ist von der Risstiefe C_z abhängig, darüber hinaus aber auch vom Abstand der Flächen e , vom Abstand des Laserspots zum Riss d , von der Größe des Laserspots und der Bestrahlungsstärke sowie vom Absorptionsgrad der Oberfläche und dem Winkel α des Risses zur Oberfläche. Somit kann durch Wiederholung der Messungen mit dem Laserspot auf

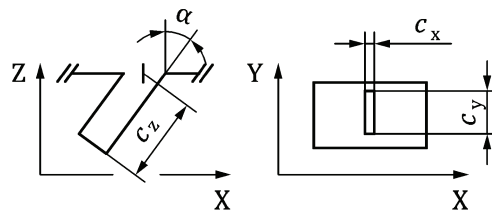
der gegenüberliegenden Position des Risses und entsprechender Datenauswertung auch der Einfluss des Risswinkels bestimmt werden. cdv_1 und cdv_2 (siehe Gleichung 2) entsprechen den Risstiefenwerten der beiden gegenüberliegenden Seiten des Risses. Der endgültige Risstiefenwert wird nach Gleichung 3 berechnet. Der Wert des Risswinkels cav kann nach Gleichung 4 berechnet werden. Eine quantitative Bestimmung der Risstiefe C_z und des Risswinkels α kann durch Vergleich der Ergebnisse der Werte für die Risstiefe cdv (siehe Gleichung 3) und den Risswinkel cav (siehe Gleichung 4) mit numerischen Simulationen oder Kalibrierkurven erfolgen.

a) Position des Risses innerhalb des Probekörpers;

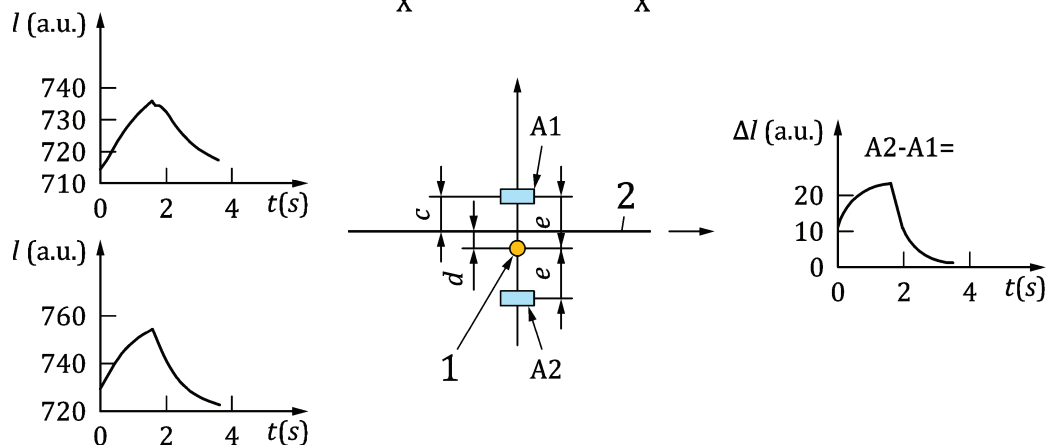


a)

b) Beschreibung von Rissparametern;



c) schematische Darstellung der Positionen des Risses, des Laserspots und der Bereiche, in denen die Temperaturwerte aufgezeichnet wurden, in Verbindung mit dem Temperaturverlauf während und nach der Impulserhitzung.



Legende

L_x, L_y, L_z	Masse des Probekörpers, der den Riss aufweist	A1	Fläche zur einen Seite des Risses, deren mittlere Temperatur berechnet wird
C_x	Breite des Risses	A2	Fläche zur anderen Seite des Risses, deren mittlere Temperatur berechnet wird
C_y	Länge des Risses	d	Abstand zwischen Riss und Laserspot
C_z	Tiefe des Risses	e	Abstände zwischen dem Laserspot und den Flächen A1 und A2
α	Winkel der Ausrichtung des Risses zur Flächennormale	c	Abstand zwischen Riss und Fläche A1; $c = e - d$

Bild 4 — Quantitative Charakterisierung der Maße des Risses mit einem statischen PulsLaserspot

$$cdv_{1/2} = \frac{1}{t_n - t_1} \sum_{i=1}^n t \cdot \Delta I_{A1/2}(t_i) \quad (2)$$

$$cdv = \frac{cdv_1 + cdv_2}{2} \quad (3)$$

$$cav = \frac{cdv_1 - cdv_2}{2} \quad (4)$$

5.7.3 Stetige Abtastung mittels Laserspot

Als zweite Option kann der Riss durch einen über den Riss erfolgenden Laserspot-Scan charakterisiert werden. Hierbei wird der Temperaturunterschied zwischen den beiden gegenüberliegenden Risskanten analysiert [12]. Dieser Temperaturunterschied hängt von der Größe des Laserspots, der Bestrahlungsstärke des Lasers, der Abtastgeschwindigkeit sowie der Rissbreite (Öffnung), Risslänge und Risstiefe ab und ist bei voneinander verschiedenen Werten dieser Parameter schnell gesättigt. Daher reagiert dieses Verfahren auf z. B. die Risstiefe weniger empfindlich als die in 5.7.2 beschriebene erste Option.

Es können auch andere Verfahren mittels Spot-Abtastung angewendet werden, so z. B. das von Boué [13] vorgeschlagene Mehrfrequenz-Lock-in-Verfahren. Der Lock-in-Prozess wird mit der Verschiebung einer punktuellen Wärmequelle synchronisiert. Damit lässt sich die Tiefe unabhängig von der Rissbreite und der Bewegungsbahn der Wärmequelle schätzen.

5.7.4 Stetige Abtastung mittels Laserlinie

Die dritte Möglichkeit ist die Abtastung des Risses mit Hilfe einer fliegenden Laserlinie. Die Charakterisierung erfolgt durch Korrelation der (im Falle einer fliegenden Laserlinie bipolaren) Amplitude des Signals mit der Fehlertiefe/dem Fehlersteg während eines Kalibrierverfahrens (siehe Bild 5). Die Einflussparameter sind:

- die Laserleistung (üblicherweise 50 W bis 100 W);
- die relative Abtastgeschwindigkeit von Laserlinie und Oberfläche (üblicherweise 5 mm/s bis 10 mm/s);
- die Länge des Fehlers (üblicherweise 1 mm bis 5 mm);
- die thermische Diffusivität des Werkstoffs (üblicherweise $[20 \text{ bis } 40] \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$);
- die Oberflächenrauheit (üblicherweise 1 μm bis 4 μm).

Die Fehlertiefen/-stege betragen bei Flying-Spot-Anwendungen üblicherweise etwa 1 mm.