

DIN 54186

DIN

ICS 19.100

**Zerstörungsfreie Prüfung –
Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen mit aktiver Thermografie**

Non-destructive Testing –

Testing of laser-beam welded joints using active thermography

Essais non destructifs –

Contrôle d'assemblages soudés au laser par thermographie active

Gesamtumfang 36 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Personalqualifikation	6
5 Prinzip der aktiven Thermografie zur Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen . .	7
5.1 Allgemeines	7
5.2 Beschreibung der Prüfaufgabe	7
5.2.1 Allgemeines	7
5.2.2 Qualitätskriterien von Laserstrahlschweißverbindungen	7
5.2.3 Unregelmäßigkeiten in Laserstrahlschweißverbindungen	8
5.3 Prüfklassen	9
5.4 Beschreibung der aktiven Thermografie	9
5.4.1 Allgemeines	9
5.4.2 Methoden zur Bestimmung des Nahtquerschnitts von Laserstrahlschweißverbindungen im Überlappstoß (Prüfklasse A)	10
5.4.3 Methoden zur Bestimmung von oberflächennahen Unregelmäßigkeiten (Prüfklasse B) . .	16
6 Anforderungen an die Gerätetechnik	17
6.1 Anforderungen an die Anregungsquelle	17
6.1.1 Allgemeines	17
6.1.2 Anregung mittels Induktion	17
6.1.3 Optische Anregung	19
6.1.4 Konvektive Anregung (ausschließlich Prüfklasse A)	22
6.2 Anforderungen an die IR-Kamera	22
6.3 Positionierung des Prüfobjekts	24
6.4 Relativbewegung während der Prüfung	24
7 Vorbereitung der Prüfung	25
7.1 Allgemeines	25
7.2 Überprüfung der Gerätetechnik	25
7.3 Referenzprobekörper	26
7.3.1 Referenzprobekörper zur Kalibrierung und Justierung	26
7.3.2 Idealisierte Referenzprobekörper Typ 2 zum Eignungsnachweis und zur Ermittlung der Nachweisgrenzen	26
7.3.3 Reale Referenzprobekörper Typ 3 zum Eignungsnachweis und zur Ermittlung der Nachweisgrenzen	26
7.4 Auswahl der Prüfparameter	27
7.5 Qualifizierung der Prüfung	30
7.6 Anforderungen an die Oberfläche des Prüfobjekts	31
8 Durchführung der Prüfung	31
9 Datenanalyse	31
10 Beurteilung von thermischen Indikationen	32
10.1 Allgemeine Vorgehensweise	32
10.2 Bewertung der Prüfergebnisse	32
10.3 Einfluss des Emissionsgrades auf das Prüfergebnis	32
11 Prüfbericht	32
Anhang A (informativ) Muster-Prüfprotokoll	34
Literaturhinweise	36

Bilder

Bild 1 — Geometrische Kenngrößen einer Laserstrahlschweißverbindung mit Überlappstoß . .	7
Bild 2 — Geometrische Kenngrößen einer Laserstrahlschweißverbindung mit Stumpfstoß	8
Bild 3 — Schematische Darstellung der Prüfung von Laserstrahlschweißnähten mit Überlappstoß in Transmissionsanordnung	11
Bild 4 — Schematische Darstellung der Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen in Reflexionskonfiguration	16
Bild 5 — Nachweis von Oberflächenunregelmäßigkeiten mit Induktionsanregung in Reflexionskonfiguration	19
Bild 6 — Schematische Darstellung der Thermogrammsequenz mit Wechselwirkung der Laseranregung und Oberflächenunregelmäßigkeit	20
Bild 7 — Schematische Prüfanordnung in Reflexionskonfiguration mit Laseranregung	21
Bild 8 — Nachweis von Abweichungen im Nahtquerschnitt mit konvektiver Anregung	22
Bild 9 — Prinzipieller Aufbau einer Prüfung mit Relativbewegung des Prüfobjekts zur fixierten Anregungsquelle und IR-Kamera	25
Bild 10 — Temperaturanstieg auf der Rückseite nach Anregung auf der Vorderseite mit einem Diracpuls	28
Bild 11 — Temperaturanstieg auf der Vorderseite nach Anregung auf der Vorderseite mit einem Diracpuls	29
Bild 12 — Abgeschätzte Messzeit nach Gleichung (4) in Abhängigkeit von der Prüfobjektdicke für Aluminium und Stahl	30

Tabellen

Tabelle 1 — Thermische Signaturen innerer typischer Unregelmäßigkeiten beim Überlappstoß (Prüfklasse A)	12
Tabelle 2 — Mindestanforderungen an die Spezifikationen der IR-Kamera	23

Vorwort

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

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 aktiven Thermografie zum Zweck der Laserstrahlschweißnahtprüfung von metallischen Werkstoffen fest. Dieses Dokument ist für die Prüfung von Überlappschweißverbindungen sowie für die Prüfung von Stumpfstoßverbindungen anwendbar. Dieses Dokument ist für einfache Geometrien von Verbindungen anwendbar.

In diesem Dokument werden zwei Prüfklassen festgelegt:

- Prüfkategorie A: Nachweis von inneren Unregelmäßigkeiten der Schweißnaht (insbesondere Unregelmäßigkeiten der Nahtbreite an der Grenzfläche);
- Prüfkategorie B: Nachweis von Oberflächenunregelmäßigkeiten und verdeckten, oberflächennahen Unregelmäßigkeiten (Poren, Risse, Nahtauswürfe).

Dieses Dokument beschreibt die Anwendung der aktiven Thermografie zur Ortung, Größenabschätzung und Charakterisierung dieser Unregelmäßigkeiten. Die aktive Thermografie wird dazu unter Verwendung unterschiedlicher Anregungsquellen in Reflexions- und Transmissionskonfiguration eingesetzt. Anwendungsgebiete der aktiven Thermografie zur Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen sind in der industriellen Fertigung (Fahrzeug-, Triebwerks- und Kraftwerkskomponenten, usw.) und in der Herstellung von elektrisch leitenden Werkstücken (z. B. Zellverbinder bei Batterien) zu finden. Die aktive Thermografie kommt dabei online (im Serientakt) und offline (serienbegleitende Stichprobenprüfung) zum Einsatz.

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).

DIN 54161, *Zerstörungsfreie Prüfung — Qualifizierung von Prüfwerkern der zerstörungsfreien Prüfung*

DIN 54183, *Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Induktiv angeregte Thermografie*

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

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 17501, *Zerstörungsfreie Prüfung — Thermografische Prüfung — Aktive Thermografie mit Laser-Anregung*

DIN EN ISO 6520-1, *Schweißen und verwandte Prozesse — Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen — Teil 1: Schmelzschweißen*

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

DIN EN ISO 13919-1, *Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen — Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten — Teil 1: Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen*

DIN EN ISO 13919-2, *Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen — Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten — Teil 2: Aluminium, Magnesium und ihre Legierungen und reines Kupfer*

DIN IEC/TS 63144-1, *Geräte zur industriellen Prozesssteuerung — Thermografiekameras — Teil 1: Metrologische Charakterisierung*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN EN 16714-3, DIN EN 17119, DIN EN ISO 13919-1 und DIN EN ISO 13919-2 und die folgenden Begriffe, die speziell bei der aktiven Thermografie zur Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen von Bedeutung sind.

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

Wärme-fluss-thermografie

thermografische Prüfung eines Prüfobjekts mit Hilfe eines erzeugten Wärmeflusses

3.2

Wärme-durch-fluss-thermografie

Wärme-fluss-thermografie, bei der der Wärmefluss durch den gesamten Querschnitt des Prüfobjekts hindurch verläuft

3.3

Vorderseite

Prüfobjektseite, von der die Einschweißung erfolgt ist (Nahtoberseite)

3.4

Rückseite

Prüfobjektseite, die der Einschweißung abgewandt ist (Nahtunterseite)

3.5

oberes Werkstück

Werkstück mit Nahtoberseite bei Überlappschweißverbindungen

3.6

unteres Werkstück

Werkstück mit Nahtunterseite bei Überlappschweißverbindungen

4 Personalqualifikation

Bei einer manuellen Auswertung der Prüfergebnisse müssen Kenntnisse und Fertigkeiten in der aktiven Thermografie durch eine Qualifizierung nachgewiesen werden. Als Nachweis dient ein Qualifizierungsnachweis oder ein Zertifikat nach DIN EN ISO 9712 bzw. eine gleichwertige Qualifizierungsart. Das Prüfpersonal muss hinreichende Kenntnisse über die Prüfgegenstände, ggf. die Schweißprozesse und die möglicherweise auftretenden nachzuweisenden Unregelmäßigkeiten besitzen.

Bei einer manuellen Zuführung des Prüfobjekts und automatisierter Prüfung mit anschließender automatisierter Auswertung dürfen eingewiesene Bediener eingesetzt werden, wenn sichergestellt wird, dass eine Fehlbedienung die eindeutige IO/NIO Bewertung nicht beeinflusst, siehe DIN 54161.

Auch bei einer automatisierten Zuführung des Prüfobjekts und automatisierter Prüfung und Auswertung der Prüfergebnisse müssen nur für einstellberechtigte Bediener der Prüfmaschine Kenntnisse und Fertigkeiten in der aktiven Thermografie durch eine Qualifizierung nachgewiesen werden.

5 Prinzip der aktiven Thermografie zur Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen

5.1 Allgemeines

Die aktive Thermografie zur Qualitätssicherung von Laserstrahlschweißprozessen ist in der Lage, einen Großteil der fertigungsrelevanten Unregelmäßigkeiten zu detektieren. Die Prüfungsgeschwindigkeit ist vergleichbar zur Geschwindigkeit der Fertigung, daher kann die Prüfung auch direkt im Anschluss an den Fertigungsprozess erfolgen. Die Prüfung erfolgt berührungslos, ist unempfindlich gegen äußere Störgrößen und kann auch bei unebenen Nahtoberflächen eingesetzt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Prüfklassen und die Varianten der aktiven Thermografie zur Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen beschrieben.

5.2 Beschreibung der Prüfaufgabe

5.2.1 Allgemeines

Laserstrahlschweißverbindungen können als Stumpfstoßverbindung zweier Werkstücke oder als Überlappverbindung zweier oder mehrerer Werkstücke ausgeführt werden.

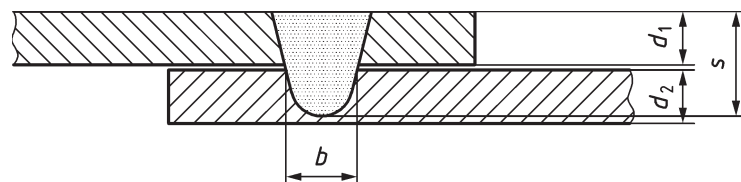
Laserstrahlschweißverbindungen werden in der Regel ohne Zusatzwerkstoffe ausgeführt, so dass die Verbindung durch das aufgeschmolzene Material der Werkstücke erreicht wird.

Die aktive Thermografie kommt dabei hauptsächlich bei der Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen metallischer Werkstoffe zur Anwendung.

5.2.2 Qualitätskriterien von Laserstrahlschweißverbindungen

Das relevante Maß für die mechanische Belastbarkeit und somit der Qualität einer Laserstrahlschweißnaht ist der tatsächlich vorhandene Nahtquerschnitt an der Grenzfläche zwischen den gefügten Werkstücken.

Bei Überlappstoßverbindungen ergibt sich der Nahtquerschnitt an der Grenzfläche der Schweißnaht als Produkt der Nahtbreite b an der Grenzfläche horizontal zwischen den Werkstücken (siehe Bild 1) und der Schweißnahtlänge L (Schweißnahtprüflänge). Die Schmelzzonentiefe hat nur indirekte Einflüsse auf die Belastbarkeit (über eine möglicherweise resultierende abnehmende Nahtbreite an der Grenzfläche).

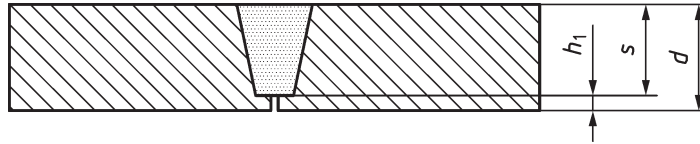


Legende

- b Nahtbreite an der Grenzfläche
- s Schmelzzonentiefe
- d_1 Dicke des oberen Werkstücks
- d_2 Dicke des unteren Werkstücks

Bild 1 — Geometrische Kenngrößen einer Laserstrahlschweißverbindung mit Überlappstoß

Bei Stumpfstoßverbindungen liegt der relevante Nahtquerschnitt senkrecht zwischen den verbundenen Werkstücken, siehe Bild 2. Der Nahtquerschnitt ergibt sich aus dem Produkt von Schmelzzonentiefe s und der Schweißnahtlänge L . Die festgelegte Schmelzzonentiefe ist bei dünnen Verbindungen in der Regel gleich der Werkstückdicke d . Ungenügende Durchschweißungen (Abweichungen h_1 von der vollen Schmelzzonentiefe) vermindern den Nahtquerschnitt an der Grenzfläche und können somit die Belastbarkeit reduzieren.



Legende

- d Werkstückdicke
- s Schmelzzonentiefe
- h_1 Abweichung von der vollen Schmelzzonentiefe

Bild 2 — Geometrische Kenngrößen einer Laserstrahlschweißverbindung mit Stumpfstoß

Neben der mechanischen Belastbarkeit kann auch die Mediendichtigkeit (ggf. auch Druckbelastbarkeit), also die durchgängige Ausführung der Schweißnaht, ein Qualitätskriterium sein z. B. bei Verbindungen in medienführenden Prüfobjekten. Darüber hinaus können in bestimmten Anwendungsfällen auch die optische Beschaffenheit (Oberflächenqualität) und die Beständigkeit gegenüber Korrosion qualitätsrelevant sein.

5.2.3 Unregelmäßigkeiten in Laserstrahlschweißverbindungen

Unregelmäßigkeiten in Laserstrahlschweißverbindungen lassen sich nach DIN EN ISO 13919-1 und DIN EN ISO 13919-2 in innere Unregelmäßigkeiten, Oberflächenunregelmäßigkeiten und Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie unterteilen.

Innere Unregelmäßigkeiten sind:

- Risse (unter der Oberfläche, d. h. zur Oberfläche hin geschlossen);
- Hohlräume;
- Poren (Porennester/Porenzeilen);
- Bindefehler;
- Unvollständige Durchschweißung (Stumpfstoß);
- Abweichung der Naht (Überlappstoß).

Oberflächenunregelmäßigkeiten sind:

- Risse (einschließlich Endkraterisse);
- Oberflächenporen (einschließlich Wurzelporosität);
- Offene Endkraterlunker;
- Bindefehler (bis zur Oberfläche durchgehend);
- Ungenügender Wurzeleinbrand;
- Einbrandkerben;

- Wurzelrückfall bzw. Wurzelkerben;
- Zu große Nahtüberhöhung;
- Zu große Wurzelüberhöhung;
- Schweißgutüberläufe;
- Verlaufenes Schweißgut Decklagenunterwölbung;
- Durchbrand (Löcher);
- Spritzer.

Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie sind:

- Kantenversatz;
- Winkelversatz.

Die genannten Unregelmäßigkeiten sind unzulässig oder begrenzt zulässig, und somit grundsätzlich zu detektieren.

5.3 Prüfklassen

Für das Prüfverfahren aktive Thermografie stellen sich zwei Aufgaben und damit zwei Prüfklassen:

- Prüfkategorie A: Die Detektion und Charakterisierung von inneren Unregelmäßigkeiten bei Laserstrahlschweißverbindungen mit Überlappstoß und insbesondere von Unregelmäßigkeiten, die zu Abweichungen in der Nahtbreite an der Grenzfläche zwischen den Werkstücken (Nahtquerschnitt) führen.
- Prüfkategorie B: Die Detektion und Charakterisierung von oberflächlichen bzw. oberflächennahen Unregelmäßigkeiten bei Laserstrahlschweißverbindungen mit Überlappstoß und mit Stumpfstoß, insbesondere von Rissen, Poren und Löchern aufgrund von Durchbrand.

Auf Abweichungen in der Nahtgeometrie (Kantenversatz und Winkelversatz) reagieren die Verfahren der aktiven Thermografie nahezu unempfindlich, daher sollen diese nicht weiter behandelt werden. Hier müssen ggf. andere Prüfverfahren zum Einsatz kommen.

5.4 Beschreibung der aktiven Thermografie

5.4.1 Allgemeines

Die aktive Thermografie basiert auf einer gezielten – zeitlich meist puls- oder sinusförmig modulierten – Erwärmung des Prüfbereichs, die zu einem Wärmeﬂuss im Prüfobjekt führt. Unregelmäßigkeiten im Prüfobjekt erzeugen dabei kurzzeitig auftretende Temperaturunterschiede an der Oberfläche, die mit einer Infrarot(IR)-Kamera aufgezeichnet und bewertet werden. Die Einbringung der Anregungsenergie kann dabei durch unterschiedliche Erwärmungsmechanismen erfolgen. Die unmittelbare Nutzung der Prozesswärme des Fügeprozesses zählt jedoch nicht zur aktiven Thermografie.

Der Prüfaufbau der aktiven Thermografie besteht daher immer aus einer IR-Kamera zur Messung der Oberflächentemperatur, einer Anregungsquelle zur Erzeugung eines instationären Wärmetransports und dem Prüfobjekt. Die Prüfkonzeppte unterscheiden sich in Abhängigkeit der Randbedingungen der Prüfung, der Funktionsweise der Anregungsquelle und der zu detektierenden Fehlstellen. Die Prüfkonfiguration (Transmissionsanordnung oder Reflexionsanordnung) wird durch die relative Lage und Bewegung der drei Komponenten zueinander bestimmt.

Für die Prüfung von Laserstrahlschweißverbindungen sind dabei besonders die Anregungsmethoden geeignet, die metallische Werkstoffe effektiv erwärmen können. Von Vorteil ist zumeist eine lokale Erwärmung, die nur im Bereich der Laserstrahlschweißnaht und deren Umgebung aufgeprägt wird. Zur Anwendung kommen daher insbesondere die Laserthermografie und die Induktionsthermografie. In einigen Fällen kann auch die optisch angeregte Impulsthermografie mit Blitzanregung sowie die konvektiv angeregte Thermografie mit warmen oder kalten Fluiden (z. B. Luft) angewendet werden.

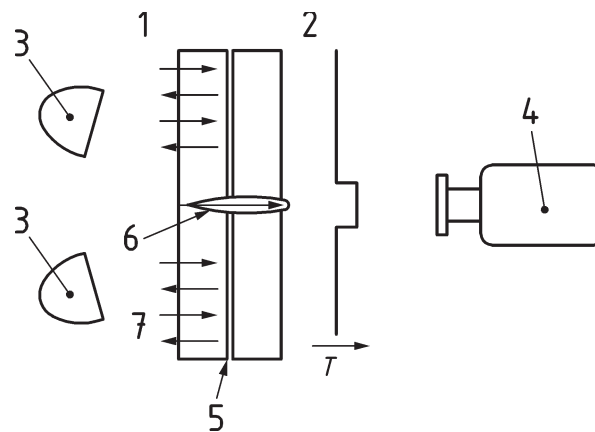
5.4.2 Methoden zur Bestimmung des Nahtquerschnitts von Laserstrahlschweißverbindungen im Überlappstoß (Prüfklasse A)

5.4.2.1 Allgemeines

Die Wärmeflussthermografie unter Ausnutzung des Wärmeflusses senkrecht zur Oberfläche, hier auch als Wärmedurchflussthermografie bezeichnet, ist besonders gut geeignet, den tatsächlichen Nahtquerschnitt in der Grenzfläche der Werkstücke — oder im Extremfall das Fehlen der Verbindung — von Laserstrahlschweißverbindungen mit Überlappstoß zu bestimmen. Bevorzugt genutzt werden kann dabei — wenn möglich — die Transmissionsanordnung. Ist das Prüfobjekt nur einseitig zugänglich oder liegen andere Gründe vor, dann kann auch die Reflexionsanordnung eingesetzt werden. Die Transmissions- und Reflexionskonfiguration sowie deren Vor- und Nachteile werden ausführlich in DIN 54184 beschrieben.

5.4.2.2 Transmissionskonfiguration

In dieser Prüfkongfiguration wird die Prüfobjektrückseite erwärmt und auf Grundlage der Bewertung der transienten Temperaturkontraste auf der Prüfobjektvorderseite Rückschluss auf die Qualität der Fügeverbindung gezogen. Die Ausprägung des Temperaturkontrastes steht in einem direkten Zusammenhang mit dem vorhandenen Verbindungsquerschnitt der Naht an der Grenzfläche. Da nur dieser Nahtquerschnitt der Schweißverbindung eine stoffschlüssige Verbindung darstellt, kann auch nur in diesem Bereich eine effektive Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und damit ein Wärmedurchfluss stattfinden. Die nicht verbundenen Bereiche sind durch Luftspalte getrennt und damit thermisch nahezu isolierend. Hier ist nur eine sehr ineffiziente Wärmeübertragung möglich. Bild 3 verdeutlicht das Funktionsprinzip anhand einer Prinzipskizze. Die Pfeile deuten den Wärmefluss an.



Legende

- 1 Rückseite des Prüfobjekts
- 2 Vorderseite des Prüfobjekts
- 3 Anregungsquelle
- 4 IR-Kamera
- 5 Prüfobjekt
- 6 Laserstrahlschweißnaht mit Wärmedurchfluss
- 7 Wärmefluss
- T Temperaturprofil

Bild 3 — Schematische Darstellung der Prüfung von Laserstrahlschweißnähten mit Überlappstoß in Transmissionsanordnung

Es ist eine zweiseitige Zugänglichkeit des Prüfbereichs erforderlich, da die Anregungsquelle auf der Rückseite des Prüfobjekts und die IR-Kamera auf der Vorderseite des Prüfobjekts positioniert werden, siehe Bild 3.

Abgesehen von der notwendigen zweiseitigen Zugänglichkeit der Fügeverbindung ist diese Konfiguration die prüftechnisch am einfachsten zu realisierende Lösung. Die Anregungsquelle kann so gewählt werden, dass eine möglichst gut auf die geometrischen Gegebenheiten der Laserstrahlschweißverbindung angepasste Erwärmung erfolgt und dabei in diesem Bereich eine möglichst maximale Wärmestromdichte vorliegt. Mögliche IR-Reflexionen der Anregungsquelle spielen keine Rolle.

In Tabelle 1 werden die zu erwartenden thermischen Signaturen für verschiedene Beispiele von Unregelmäßigkeiten für Überlappverbindungen beschrieben.