

Laser-Thermografie für die schnelle Prüfung auf mikroskopische Risse in reflektierenden metallischen Oberflächen

Mathias ZIEGLER¹, Philipp MYRACH¹, Joachim SCHLICHTING^{1,2}, Christiane MAIERHOFER¹ und Marc KREUTZBRUCK¹

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung,
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
² jetzt Linde AG, Engineering Division
(mathias.ziegler@bam.de)

Kurzfassung. Thermografische ZfP-Verfahren erlauben die Erkennung einer Vielzahl von Defekten in unterschiedlichsten Werkstoffen. Neue Ansätze unter Verwendung von Lasern ermöglichen darüber hinaus die Prüfung auf Oberflächenrisse. Wir stellen die neuesten Entwicklungen dieser vielversprechenden Technik vor und zeigen warum deren Einsatz potentiell die Standardprüfverfahren Magnetpulver- bzw. Eindringprüfung für eine Reihe von Prüfproblemen beerben könnte. Hierzu stellen wir die Prüfergebnisse zu unterschiedlichen metallischen Werkstoffen, Rissgrößen und -typen in Abhängigkeit der Prüfparameter vor. Die aktuelle Grenze der Nachweisempfindlichkeit für die mittels klassischer Thermografie schwer prüfbar hoch-reflektierenden Metalloberflächen liegt mit Rissbreiten und -tiefen von wenigen Mikrometern im Bereich der fluoreszierenden Magnetpulver- und Eindringprüfung. Dabei sind weder Verbrauchsmittel noch eine Oberflächenpräparation notwendig und eine Prüfung kann berührungslos und automatisiert über Entfernungen im Meter-Bereich erfolgen.

1. Einführung

Für die zerstörungsfreie Risserkennung existiert eine Reihe von Ansätzen. Die Magnetpulver- und Eindringprüfung (MT und PT) werden im industriellen Maßstab zur Risserkennung eingesetzt. Neben der Lage des Risses und, im besten Falle, der Risslänge, können allerdings keine weiteren Geometrieinformationen gewonnen werden und es kommen teilweise umweltschädliche Verbrauchsmaterialien zum Einsatz. Prüfverfahren mittels Ultraschall oder magnetischer Streufelder erlauben in gewissen Grenzen zusätzlich zur Rissdetektion auch eine quantitative Geometriecharakterisierung. Mit den höchsten örtlichen Auflösungen können computertomografische Röntgen-Verfahren aufwarten. Allerdings ist die Wunschliste der Anwender lang. Das ZfP-Verfahren der Wahl sollte u.a. zerstörungsfrei, zuverlässig, schnell, berührungslos (möglichst mit großem Abstand), werkstoffunabhängig, automatisierbar, empfindlich für unterschiedlichste Rissgrößen und kostengünstig sein. Keines der genannten Verfahren bietet alle diese Vorzüge, was die Suche nach alternativen Ansätzen rechtfertigt.



Thermografische ZfP-Verfahren erlauben die Erkennung einer Vielzahl von Defekten in unterschiedlichsten Werkstoffen. Neue Ansätze unter Verwendung von Lasern ermöglichen darüber hinaus eine schnelle Prüfung auf Oberflächenrisse. Die an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die aktuelle Grenze der Nachweisempfindlichkeit der Laser-Thermografie für Risse in Metalloberflächen mit Breiten und Tiefen von wenigen Mikrometern im Bereich der fluoreszierenden MT und PT liegt. Dabei sind weder Verbrauchsmittel noch eine Oberflächenpräparation notwendig und eine Prüfung kann berührungslos und automatisiert über Entfernungen im Meter-Bereich erfolgen.

2. Physikalisches Prinzip & Messaufbau

Seit den 60er Jahren sind verwandte photothermische Methoden für die Rissprüfung im Gespräch. Allerdings erlauben erst die technologischen Fortschritte der jüngsten Zeit die Verwendung von nahezu „prüffertigen“ Hauptkomponenten, wie z.B. schnellen Thermo-Kameras und Hochleistungs-Diodenlasern mit optischen Scannern. Neben der technischen Voraussetzung benötigt der Anwender Informationen zur Vorgehensweise und zur Leistungsfähigkeit des Prüfverfahrens. An der BAM werden hierzu Vorschläge, Empfehlungen und Faustformeln für Referenzprüfkörper, geeignete Gerätekomponenten und Auswertungsalgorithmen und Diskussionen der Nachweisempfindlichkeit erarbeitet, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

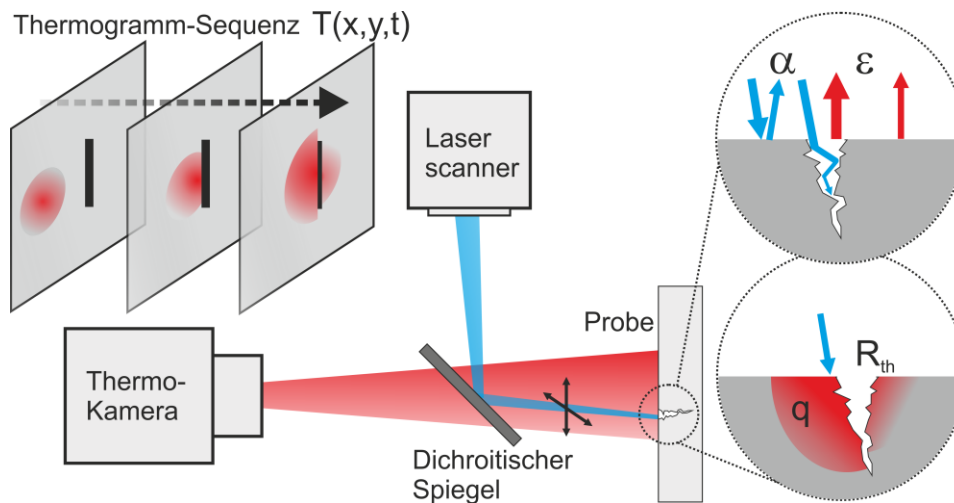


Abbildung 1: Schema der thermografischen Rissprüfung. Der Laser scannt über den Riss, die Thermo-Kamera misst die Temperaturverteilung. Rechts: physikalische Mechanismen für den Risskontrast. Links: Thermogramm-Sequenz beim Überstreichen des Risses.

Das vorgestellte Verfahren basiert auf der lokalen Erwärmung mittels eines Lasers, Schema siehe Abbildung 1. Mithilfe einer Thermo-Kamera wird die so erzeugte Temperaturverteilung an der Prüfteiloberfläche zeitlich und räumlich aufgelöst erfasst. An der BAM stehen hierfür ein fasergekoppeltes Hochleistungs-Diodenlasersystem (Emissionswellenlänge 940 nm, Ausgangsleistung max. 500 W, Spotgröße ca. 1,5 mm) mit 2D-Scanner und eine InSb-IR-Kamera (Spektralbereich 3-5 μm , Aufnahmefrequenz 100 Hz, Bildgröße 640x512 Pixel) zur Verfügung. Da Risse zu einem erhöhten lateralen (d.h. parallel zur Oberfläche) thermischen Widerstand (R_{th}) führen, können sie über lokale Temperaturerhöhungen detektiert werden. Hier ist auch die Abgrenzung zu klassischen aktiven Thermografieverfahren zu sehen, bei denen die zur Defekterkennung notwendige Wärme z.B. über Blitz- oder Halogenlampen räumlich möglichst homogen eingebracht wird. Aus Symmetriegründen wird

bei letzteren nur ein Wärmefluss senkrecht zur Oberfläche induziert und es können lediglich parallel zur Oberfläche orientierte Fehlstellen, nicht aber senkrechte Risse erkannt werden. Das Vorhandensein von Oberflächenrissen führt darüber hinaus zu einer verstärkten Absorption (α) der Laserstrahlung und Emission (ϵ) der Wärmestrahlung.

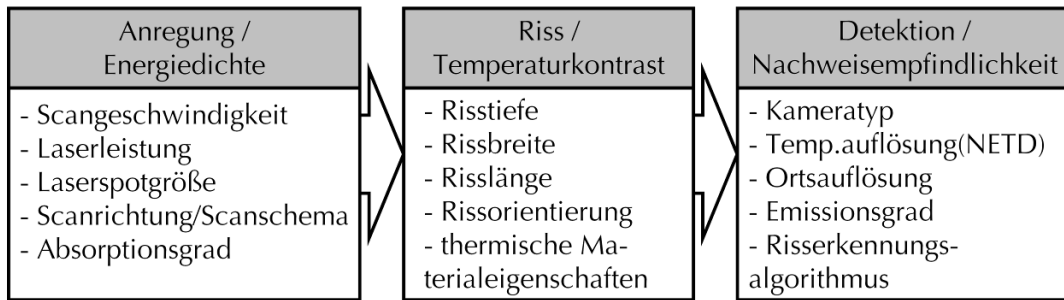


Abbildung 2: Einflussfaktoren der Nachweisbarkeit von Rissen durch lokal angeregte Thermografie.

Die Nachweisempfindlichkeit des Prüfsystems wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, deren genaue Abhängigkeit, auch voneinander, bislang noch nicht vollständig geklärt ist. Insbesondere gilt dies für mikroskopische Risse. Dennoch ist es möglich, drei Komplexe mit ihren Einflussgrößen zu unterscheiden, welche in Abbildung 2 dargestellt sind. Entscheidende Eingangsparmeter sind die Energiedichte und die Rissgeometrie. Diese beiden Größen legen die Temperaturverteilung auf der Oberfläche fest und bestimmen insbesondere die Größe des durch den Riss erzeugten Temperaturkontrastes. Der zu erwartende Temperaturkontrast wiederum legt über den Emissionsgrad dann die Nachweisbarkeit eines Risses für ein spezifisches Detektionssystem fest.

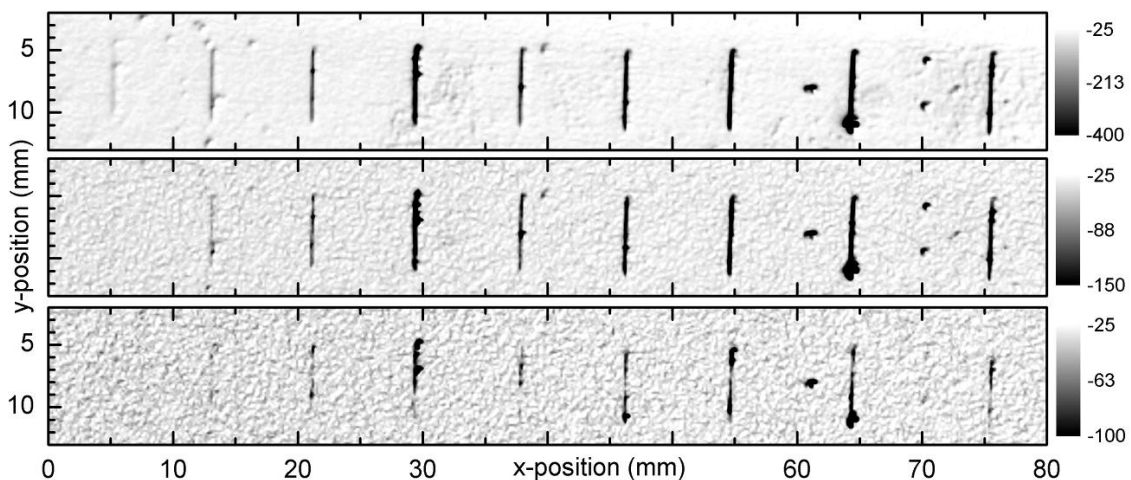


Abbildung 3: Rissanzeigen für den Nutenprobekörper mit Risttiefen von 10, 30, 40, 110/110, 110, 210, 380, 850, 1780 μm und Rissweiten von 80, 80, 90, 100/100, 120, 140, 190, 250, und 150 μm (Doppelnut bei $x=30\text{mm}$) für einen Linienscan mit 1 mm Linienabstand, 93 W Laserleistung, 1,3 mm Spotdurchmesser und einer Kameraauflösung von 160 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Oben für eine Scangeschwindigkeit von $v_L=100$ mm/s. Mitte: $v_L=1000$ mm/s. Unten: $v_L=10000$ mm/s.

3. Beispiele: Von großen künstlichen Rissen zu winzigen natürlichen Rissen

Aufgrund der Komplexität der Problemstellung (z.B. aufgrund der Geometrie natürlicher Risse) und des fehlenden physikalischen Gesamtbildes, wurden die aufgeführten Größen an der BAM mittels eines Variationsansatzes systematisch untersucht. Für die Klärung der Abhängigkeit vom Riss (mittlerer Kasten in Abb. 2) wurden bislang unterschiedliche Probekörperserien mit Rissbreiten von ca. 0,1 bis 200 μm , Risttiefen zwischen 10 μm und 12

mm und Risslängen von ca. 1 bis 30 mm, hergestellt, untersucht und mit Referenzverfahren (PT, MT, optische und Elektronenstrahl-Mikroskopie) getestet. Drei Beispiele, sollen hier im Folgenden besprochen werden. Um die bestmögliche Übertragbarkeit der Prüfmethodik auf die industrielle Prüfsituation zu gewährleisten, wurden die Oberflächen der Probekörper unbehandelt gelassen, d.h. die bei der thermografischen Prüfung übliche Schwärzung zur Erhöhung von Absorptions- und Emissionsgrad wurde nicht durchgeführt.

3.1 Senkrechte Nuten in Stahl

An der BAM wurde eine Stahlprobe mit funkenerodierten Nuten, also künstlichen Rissen, hergestellt. Der Nutenprobekörper besteht aus einer Platte aus C 45 E Vergütungsstahl mit Außenmaßen von $11 \times 6 \times 0.8 \text{ cm}^3$ (B×H×T) und beinhaltet funkenerodierte Nuten mit Längen zwischen 4,8 und 5,7 mm, Tiefen zwischen 10 und 2,24 μm und Breiten zwischen 81 und 192 μm . Die Dimensionen der Nuten wurden mittels optischer Mikroskopie verifiziert.

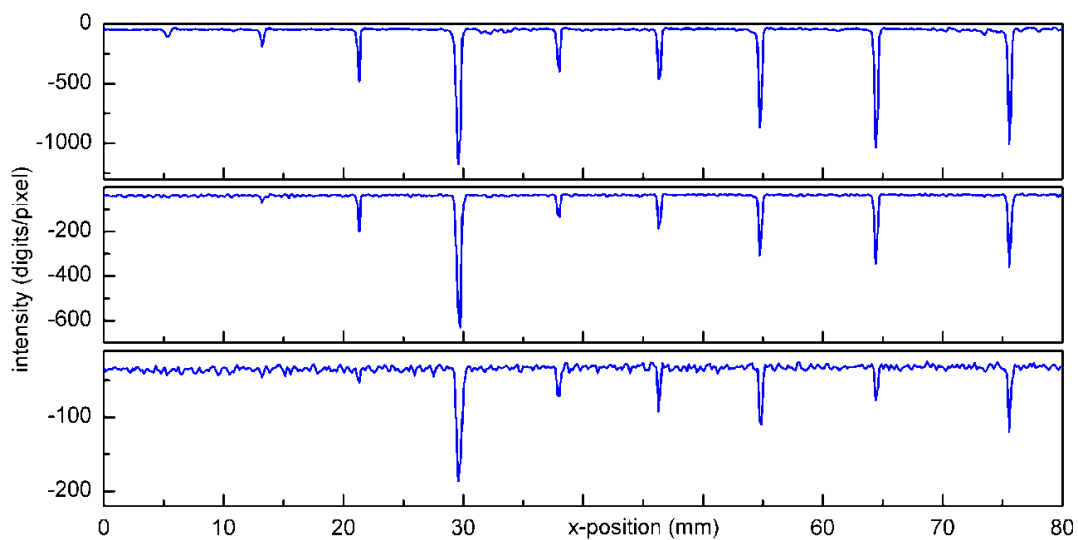


Abbildung 4: Laterale Profile durch die Rissanzeigen in Abbildung 3, gemittelt über 2 mm in y-Richtung.

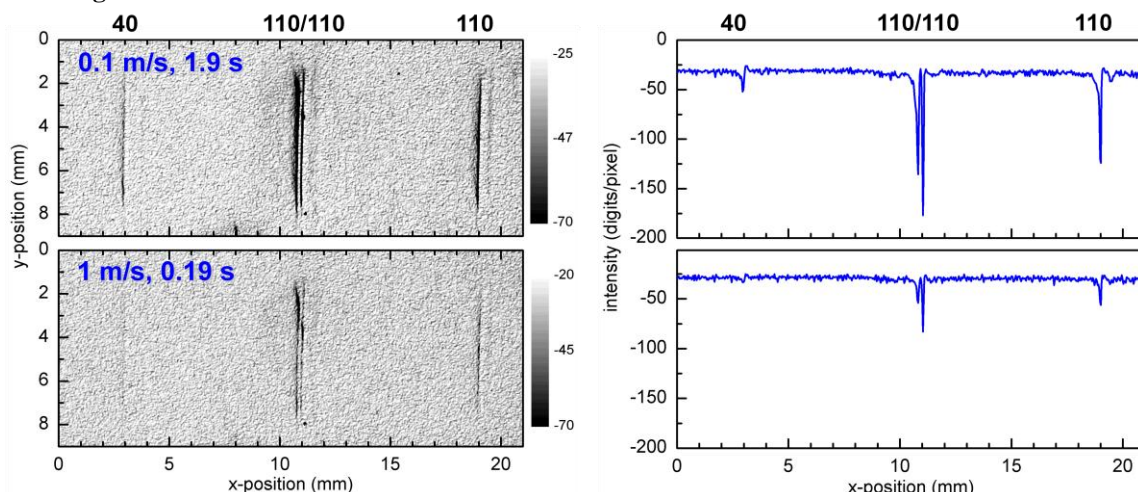


Abbildung 5: Rissanzeigen und laterale Profile für den Nutenprobekörper für den Bereich um die mittig angeordnete Doppelnut, im Vergleich zu Abbildung 3 wurde eine Kameraauflösung von $35 \mu\text{m}/\text{pixel}$ verwendet.

Die thermografische Prüfung erfolgte mit linienförmiger Laser-Anregung, wobei der Linienabstand 1 mm betrug. Die Nutenprobekörper mit ihren vergleichsweise großen künstlichen Rissen bieten die Möglichkeit die maximale Prüfgeschwindigkeit festzustellen. Abbil-

dung 3 bis Abbildung 5 zeigen eine eindeutige Verringerung der Anzeigenamplitude mit zunehmender Scangeschwindigkeit, so lassen sich beispielsweise bei umgerechneten Flächenprüfgeschwindigkeiten von $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ noch Nuten mit einer Tiefe von $10 \text{ }\mu\text{m}$ erkennen, wohingegen bei einer Flächenprüfgeschwindigkeiten von $100 \text{ cm}^2/\text{s}$ (entspricht einer Scangeschwindigkeit von 10 m/s bei 1 mm Linienabstand) die Nachweistiefe auf über $100 \text{ }\mu\text{m}$ steigt.

Neben der Scangeschwindigkeit beeinflusst auch die Laserleistung die Anzeigenamplitude. Beide Parameter gehen linear in die in der Probe deponierte Energie ein welche hierdurch als entscheidendes Kriterium für die Nachweisempfindlichkeit der Methode erkannt wurde. Bei den untersuchten weiten Nuten von bis zu $250 \text{ }\mu\text{m}$ Breite kann ein erheblicher Teil des Laserspots direkt in die Nut einkoppeln und führt somit zu einer direkten Erwärmung der Nuten ohne den Umweg über die laterale Wärmeleitung.

3.2 MT-Vergleichskörper mit Mikrorissen

Um einen möglichst direkten Vergleich der Thermografie (TT) mit der fluoreszierenden MT zu ermöglichen, wurde der Vergleichskörper Typ 1 nach EN ISO 9934-2 Anhang B (sog. MTU Testkörper Nr. 3) untersucht. Dieser stellt in der MT-Praxis eine etablierte Methode zur Überprüfung des Prüfsystems dar. Die kreisrunde, remanent magnetisierte Stahlscheibe (90MnCrV8) enthält feine Spannungskorrosions- (Rissbreiten: $0,1\text{-}3 \text{ }\mu\text{m}$) und gröbere Schleifrisse.

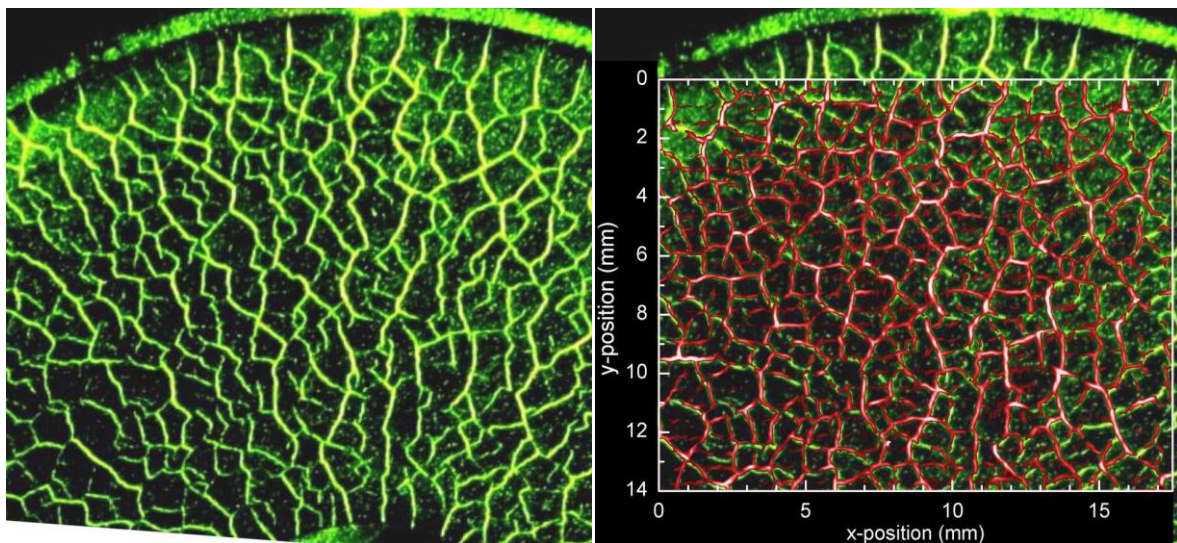


Abbildung 6: Bildhafter Vergleich der MT und TT-Prüfung des MT-Vergleichskörpers 1. Für den Vergleich wurde das beste Anzeigenbild der Laserrissprüfung verwendet, eingefärbt und per Schwellwertverfahren die Rissanzeigen extrahiert. Links: Nur MT-Anzeige, Rechts: TT-Anzeige über MT-Anzeige

Das Ergebnis der fluoreszierenden MT ist in Abb. 3 zusammen mit den überlagerten TT-Anzeigen dargestellt. Aufgrund der dunklen Oberflächenbeschaffenheit ist eine Prüfung hier schon bei relativ geringen Laserleistungen ($\sim 10 \text{ W}$) erfolgreich, und ein Vergleich der Anzeigenbilder zeigt recht deutlich, dass beide Verfahren fast identische Rissanzeigen liefern. Dabei bewegte sich der Laserspot mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s über die Probenoberfläche.

3.3 Hoch-reflektierender PT-Kontrollkörper mit Mikrorissen

Die PT-Kontrollkörper 1 nach DIN EN ISO 3452-3 die in der Eindringprüfung zur Bestimmung der Empfindlichkeit des Prüfsystems dienen, erlauben eine Klassifizierung der

thermografischen Prüfung hinsichtlich der für die PT bestehenden Empfindlichkeitsklassen:

	Empfindlichkeits-Klasse	Empfindlichkeit	Verwendete Platte
Farbeindringprüfung	1	Normal	50 μm
	2	Hochempfindlich	30 μm
Fluoreszierende Eindringprüfung	1	Normal	30 μm
	2	Hochempfindlich	20 μm
	3	Ultrahochempfindlich	10 μm

Dies bietet die Möglichkeit einer schnellen Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Thermografieprüfsystems. Es handelt sich hierbei um vier Messingplatten mit den Abmessungen (35x100x2) mm³. Die Risse wurden dabei hergestellt, indem auf diese Platten Nickel-Chrom-Schichten unterschiedlicher Dicken aufgedampft und anschließend gestreckt wurden. Dabei entstehen Risse senkrecht zur Zugrichtung, die die Tiefe der jeweiligen Schichtdicke haben. Nach Herstellerangaben stellt sich ein Breiten/Tiefen-Verhältnis der Risse von etwa 1:20 ein. Die Rissbreiten sollten also in einem Bereich zwischen 0,5 μm und 2,5 μm liegen. Jedoch zeigten die Mikroskopieuntersuchungen, dass diese nicht mit den tatsächlich vorgefundenen Rissbreiten übereinstimmen. Für die Rissbreite eines einzelnen Kontrollkörpers kann ein mittlerer Wert angegeben werden, siehe Abbildung 7.

Die Kontrollkörper besitzen polierte und damit hochreflektierende Oberflächen. Dies ist einerseits nachteilig für die optische Energieein- und Wärmestrahlungsauskopplung und damit für den Nachweis von Rissen, andererseits bietet dies die Möglichkeit die Laser-Thermografie für die Anwendung an maximal ungünstigen Prüfproblemen zu testen und damit auch Ihre Nachweisbarkeitsgrenze zu finden. Gegenüber dem oben gezeigten MT-Vergleichkörper mit matter dunkler Oberfläche, ist eine um den Faktor 5-11 höhere Energiedichte notwendig.



Abbildung 7: Links: Fotografie der vier Kontrollkörper mit 50, 30, 20 und 10 μm Risstiefe. Rechts: Maßstabsgetreue Darstellung der mittleren Rissgeometrie für die unterschiedlichen Kontrollkörper.

Die mit der Laser-Thermografie erzielten Ergebnisse sind zusammen mit denen der fluoreszierenden PT in Abbildung 8 dargestellt. Im direkten Vergleich können wir feststellen, dass die verwendeten Einstellungen der Laser-Thermografie eine Oberflächenrissprüfung äquivalent zur hochempfindlichen PT zulassen. Mit Einschränkung können auch kleinere Risse mit einer Breite von 0,7 μm in der 20 μm dicken Schicht nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze ist damit objektiv erreicht, eine Detektion sollte prinzipiell aber durch die Erhöhung der Energiedichte, also beispielsweise durch eine höhere Laserleistung oder eine geringere Scangeschwindigkeit, möglich sein.

In der weiterführenden Bewertung der Messergebnisse ist in diesem Fall keine eindeutige Aussage über den Zusammenhang von Detektierbarkeit und Risstiefe möglich. Dies

ist begründet in der Tatsache, dass zwischen den einzelnen Probekörper nicht nur die Riss-tiefe, sondern auch die Rissbreite variiert. Jedoch lässt sich festhalten, dass für die thermo-grafische Risserkennung lediglich eine minimale Risstiefe im Bereich von wenigen Mik-ro-metern notwendig ist. Weiterhin zeigt sich, dass die Breite im Bereich der Mikrorisse einen größeren Einfluss als die Risstiefe auf die Detektierbarkeit hat. Dieser Effekt und der allgemeine Zusammenhang von Tiefen/Breiten Verhältnis auf die Risserkennung muss im Bereich der Mikrorisse noch weiter untersucht werden. Ein starker Einfluss der Rissbreite könnte darin begründet liegen, dass die Rissbreiten in der Größenordnung und sogar unterhalb der Wellenlänge der Wärmestrahlung ($\sim 10 \mu\text{m}$ bei Raumtemperatur) liegen. Eine ra-diative Wärmeübertragung über die beiden Rissflanken sollte dann eine stark nichtlineare Abstandabhängigkeit aufweisen.

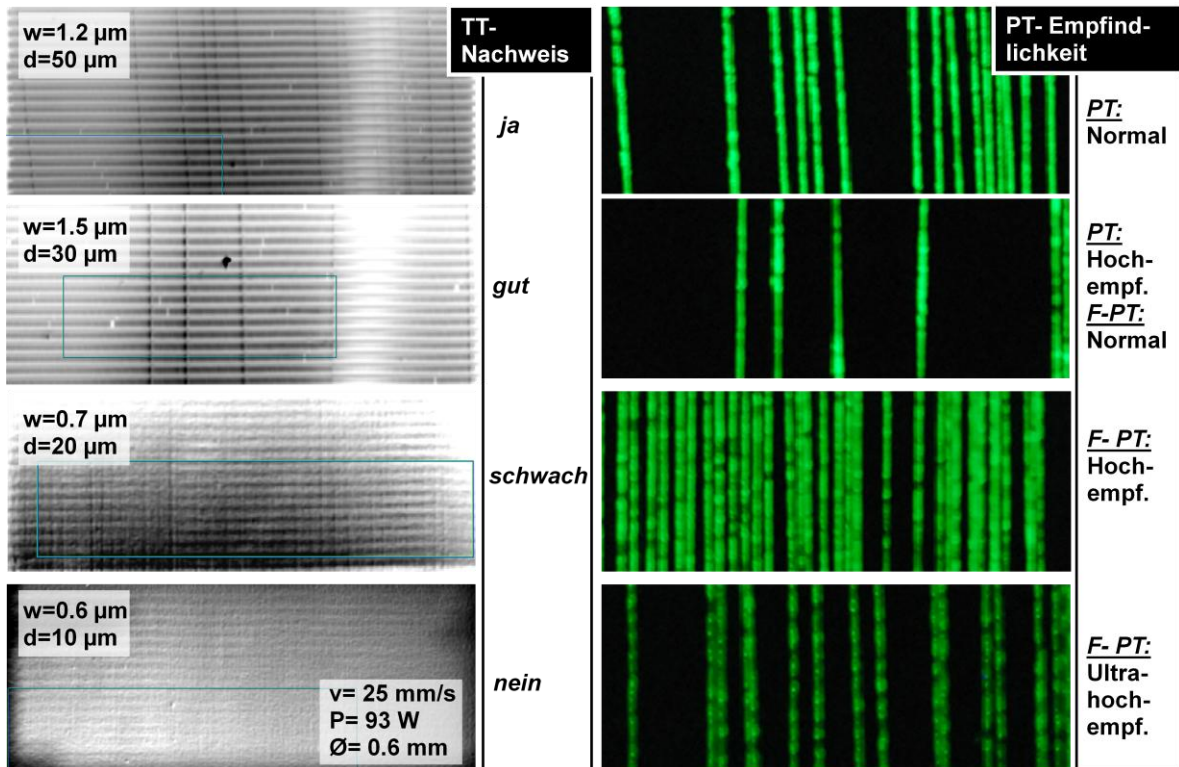


Abbildung 8: Darstellung der Ergebnisse der Laser-Thermografie und der PT im Vergleich. Die TT-Untersuchungen erfolgten mit 93 W Laserleistung, 0,6 mm Laserspotdurchmesser und einer Kameraauflösung von 60 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Die horizontalen Streifen sind Artefakte aufgrund der linienförmigen Abrasterung mit dem hochintensiven Laserstrahl. Eine engere Abrasterung als mit dem gewählten Abstand von 0,5 mm oder Vergrößerung des Spotdurchmessers verringert diese Artefakte.

4. Diskussion

Es zeigte sich, dass für Mikrorisse (Breite $\leq 1-10 \mu\text{m}$) eine einfache Beschreibung der Nachweisbarkeit über die Energiedichte nicht immer zufriedenstellend möglich ist. Neben der Energiedichte, die im Wesentlichen durch die Scangeschwindigkeit und die Laserleistung gegeben ist, stellt die Detektion von Mikrorissen weitere Anforderungen an das Messsystem. Für eine Auswertung ist es in diesem Fall erforderlich, dass die Anregung durch den Laser möglichst lückenlos detektiert wird. Dies bedeutet, dass die Scangeschwindigkeit v nicht unabhängig von der Aufnahme-frequenz f der Kamera gewählt werden kann. Ein als optimal anzusehender Wert ergibt sich dabei zu: $v = 0.1-0.2 \text{ mm} \times f$. In dem in Abbildung 6 dargestellten Beispiel wurde die Kamera mit $f = 100 \text{ Hz}$ betrieben, somit erreicht die Thermografie in diesem speziellen Fall eine Prüfgeschwindigkeit von $5 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Dieses Bild ändert (vereinfacht) sich beim Nachweis von größeren Rissen (Breite $\geq 10\text{-}100\ \mu\text{m}$). Diese wurden mit Hilfe von unterschiedlichen Probekörpern untersucht, in die durch Funkenerosion Nuten unterschiedlicher Breite (30-200 μm), Tiefe (10 μm - 2 mm) eingebracht wurden. Im Bereich dieser größeren Risse zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen Scangeschwindigkeit und Kameraaufnahmefrequenz. Als wesentliche Einflussgröße tritt hier die Energiedichte auf, die innerhalb weiter Grenzen variiert wurde. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich eine Erhöhung der Energiedichte immer positiv auf die Nachweisempfindlichkeit auswirkt. Dabei lassen sich die Parameter Laserleistung und Scangeschwindigkeit fast gänzlich frei wählen und bieten damit die Möglichkeit, das Prüfsystem an das jeweilige Prüfproblem anzupassen.

Als weiterer die Nachweisbarkeit von Rissen bestimmender Faktor geht nur noch die Ortsauflösung der Kamera ein. Entscheidend ist hier das Verhältnis von Rissbreite zu Pixelgröße. Wird dieses Verhältnis kleiner, so ist für die Detektion von Rissen eine nichtlinear höhere Energiedichte anzusetzen. Steigert man hingegen die Ortsauflösung der Kamera, kann mit kleineren Laserleistungen bzw. größeren Scangeschwindigkeiten gearbeitet werden. Die erreichbare Prüfgeschwindigkeit ergibt sich also immer aus der gewählten Kombination von Kameraauflösung, Scangeschwindigkeit und Laserleistung. Für die hier untersuchten Nutenprobekörper ergaben sich so Prüfgeschwindigkeiten von 10-100 cm^2/s . Die Kameraauflösung legt darüber hinaus fest, in welchem Maße zwei benachbarte Risse noch örtlich zu trennen sind. Die Untersuchung eines Probekörpers mit sich kreuzenden Nuten ergab dabei die auch theoretisch zu erwartende Grenze für den Abstand zweier Risse vom dreifachen der Kameraauflösung (siehe auch Abbildung 3 bis Abbildung 5). Für die messtechnische Praxis empfiehlt sich jedoch die fünffache Ortsauflösung als sinnvoller Kompromiss aus Performance und Validität.

5. Zusammenfassung & Ausblick

Abschließend lässt sich feststellen, dass mit der Laser-Thermografie die Liste der Rissprüfverfahren um ein leistungsfähiges, schnelles und umweltschonendes Verfahren erweitert werden kann. Als entscheidende Vorteile müssen hierbei die Skalierbarkeit und Materialunabhängigkeit der Methode angesehen werden. So lässt sich die Nachweisempfindlichkeit in weiten Bereichen durch die Wahl der Komponenten und Messparameter einstellen. Vor allem als Alternative zur manuell durchgeführten PT und MT zeigt sich hier großes Automatisierungspotenzial. Eine Prüfung ist mit vergleichbaren Ergebnissen schon heute möglich, wobei aber auf Verbrauchsmittel und eine aufwendige Oberflächenpräparation verzichtet werden kann. Während für metallische Werkstoffe die Nutzbarkeit der Methode nachgewiesen werden konnte, ist auch die Anwendung auf z.B. Verbundwerkstoffe gerade für die Luftfahrt-, Raumfahrt- und Automobilindustrie von Interesse, da gerade hier kaum belastbare Prüfverfahren zu Verfügung stehen.

Danksagung

Teile der Arbeit wurden gefördert im Rahmen des Projektes „Erarbeitung einer Richtlinie zur zerstörungsfreien Risserkennung mit lokal angeregter Thermografie“ Fördermaßnahme: INS - Innovation mit Normen und Standards, Finanzierung: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Die Autoren danken E. Hoffmann und A. Kranzmann für die Unterstützung durch die optische Mikroskopie & REM und A. Knöppchen, M. Lucht, M. Pelkner sowie W. Baer für die Bereitstellung von einigen Proben.