

CT als Referenz zur Thermographischen Untersuchung von Defekten im gesenkgeschmiedeten Stahl

Karsten EHRIG*, Dietmar MEINEL*, Philipp MYRACH*, Anton STRANZINGER-MAYRHAUSER**, Mathias ZIEGLER*

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

** BRP-Powertrain GmbH & Co. KG

Kurzfassung. Die Computertomographie (CT) eignet sich aufgrund der isotropen dichteaufgelösten 3D-Darstellung des durchstrahlten Objekts besonders gut zur Defektcharakterisierung (Risse, Materialverunreinigungen). Bei der Untersuchung von gesenkgeschmiedeten Stahl mittels CT sind insbesondere die durchstrahlbare Dicke und Durchstrahlungsartefakte (Streustrahlung, Strahlaufhärtung) zu beachten, wobei Mikrofokusbedingungen mit einem Brennfleck $< 10 \mu\text{m}$ zur Erkennung von Rissen eingehalten werden müssen. In diesem Beitrag werden CT-Untersuchungen von unterschiedlichen Defekten im gesenkgeschmiedeten Stahl im Hinblick auf ihre Besonderheiten diskutiert. Aufgrund der Einschränkungen, die sich durch die limitierte Durchstrahlungslänge und die vergleichsweise langen Prüfdauern ergeben, besteht ein Bedarf an schnellen und berührungslosen Alternativen für die Vor-Ort-Prüfung. Hier bieten sich insbesondere thermographische Verfahren an, welche gegenüber den Standardprüfverfahren Magnetpulver- bzw. Eindringprüfung keine Verbrauchsmittel benötigen. Der thermographische Nachweis beruht hierbei auf der Messung der zeitaufgelösten Oberflächentemperaturverteilung, welche durch Defekte in charakteristischer Weise beeinflusst wird. Neueste Entwicklungen der thermographischen Prüftechnik erlauben beispielsweise den Nachweis von mikroskopischen Oberflächenrissen. Neben der bloßen Erkennung solcher Oberflächenrisse sind Aussagen zu deren Größe und Geometrie wichtig. Die Rekonstruktion dieser Parameter aus den Thermographiedaten ist jedoch nicht trivial und bislang noch nicht gelöst. Als einen vielversprechenden Ansatz zur Lösung des Problems stellen wir hier einen Vergleich zwischen CT- und Thermographiedaten an.

1 Einführung

Standardmäßig wird die Magnetpulverprüfung (MT-Prüfung) zur Defekterkennung in gesenkgeschmiedeten Stahl eingesetzt. Nachteile der MT-Prüfung sind umweltbelastende Verbrauchsmaterialien und die nicht automatisierbare Anwendung, welche zeit- und personalaufwendig ist. Abbildung 1 zeigt eine Kurbelwelle mit Defekt, erkannt in der MT-Prüfung.





Abb. 1: Kurbelwelle mit Defekt in MT-Prüfung

Für die μ -CT Untersuchung an der BAM müssten die Proben entsprechend präpariert werden, da die geforderte Voxelgröße von 25 μm nur mit einer Mikrofokus-Röntgenröhre erreicht werden konnte. Als Scanparameter wurden 2400 Winkelprojektionen über 360° bei einer Röhrenenergie von 210 kV, einem Quellen-Objekt-Abstand von 146,2 mm und einem Quellen-Detektor-Abstand von 1169,59 mm gewählt. Als Detektor kam ein Flachdetektor mit 2048x2048 Pixeln und einem Pixelpitch von 0,2 mm der Firma PerkinElmer zum Einsatz. Abbildung 2 zeigt die Probe nach Zuschnitt zur CT-Untersuchung.

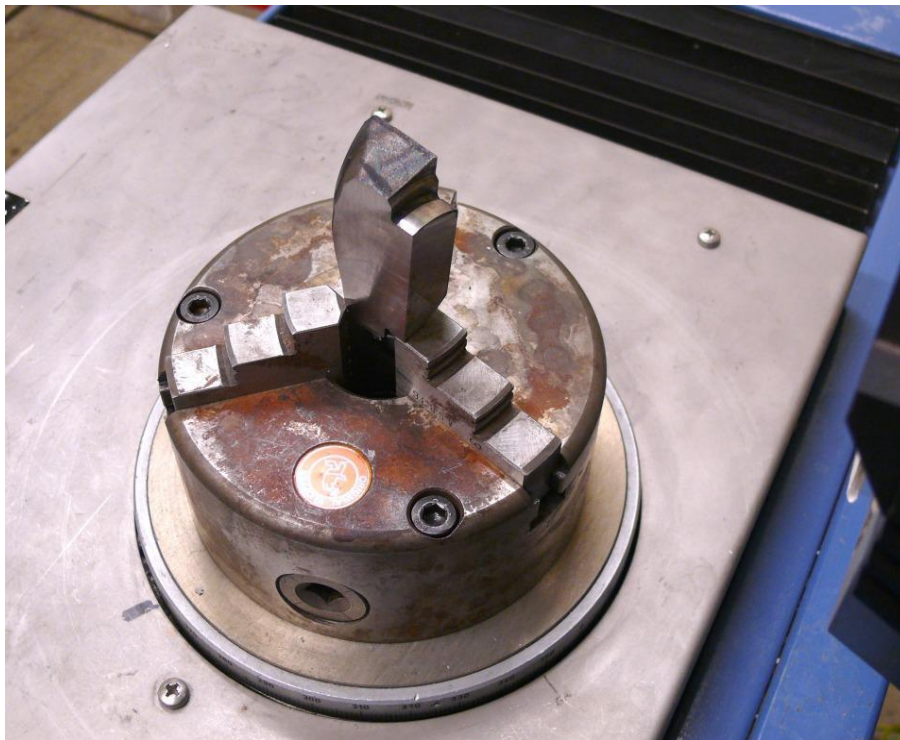


Abb. 2: Zuschnitt des defekten Bereichs der Kurbelwelle zur CT-Untersuchung

Das Prinzip der BAM Laser-Thermographie beruht auf der lokalen Erwärmung der Prüfoberfläche durch einen Laserscanner. Die Thermokamera detektiert den Wärmestau an einem Riss und lokale Variationen der optischen Eigenschaften. Der Datenverarbeitungsalgorithmus besteht in der räumlichen Ableitung auf Bildebene, sowie einer zeitlichen Sortierung auf Pixelebene [1]. Somit werden Rissanzeigen in Min- und/oder Max-Bildern wiedergegeben. Abbildung 3 stellt das Prinzip grafisch dar.

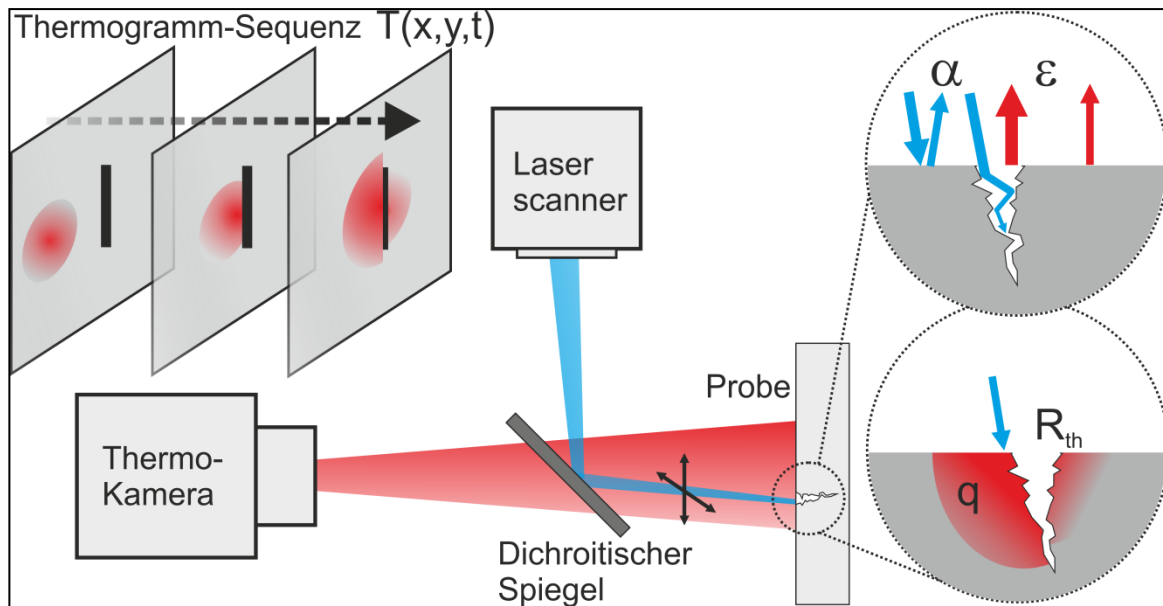


Abb. 3: Prinzip der BAM Laser-Thermographie [1]

2 Vergleich der ZfP-Techniken

Im Vergleich der ZfP-Techniken liefert die MT-Prüfung keine Tiefeninformation. Die Technik ist schnell, berührend und umweltbelastend durch Verbrauchsmaterial. Die Laser-Thermographie (Laser-TT) Prüfung liefert zusätzliche Tiefeninformation (qualitativ), eine genauere Geometrie des Defekts (Breite, Tiefe, Winkel), wobei die Auswertung dieser Informationen nicht trivial ist. Die TT-Prüfung ist berührungslos, umweltschonend und es ist keine Probenpräparation notwendig. Die CT liefert einen isometrisch skalierten 3D-Datensatz mit vollen Tiefen- und Geometrieinformationen. Die Technik ist langsam mit Scanzeiten von 10 Minuten bis mehreren Stunden, sowie berührungslos und erfordert eine Probenpräparation unter Berücksichtigung der maximal zu durchstrahlenden Dicken. Abbildung 4 zeigt die verwendeten Techniken im Vergleich.

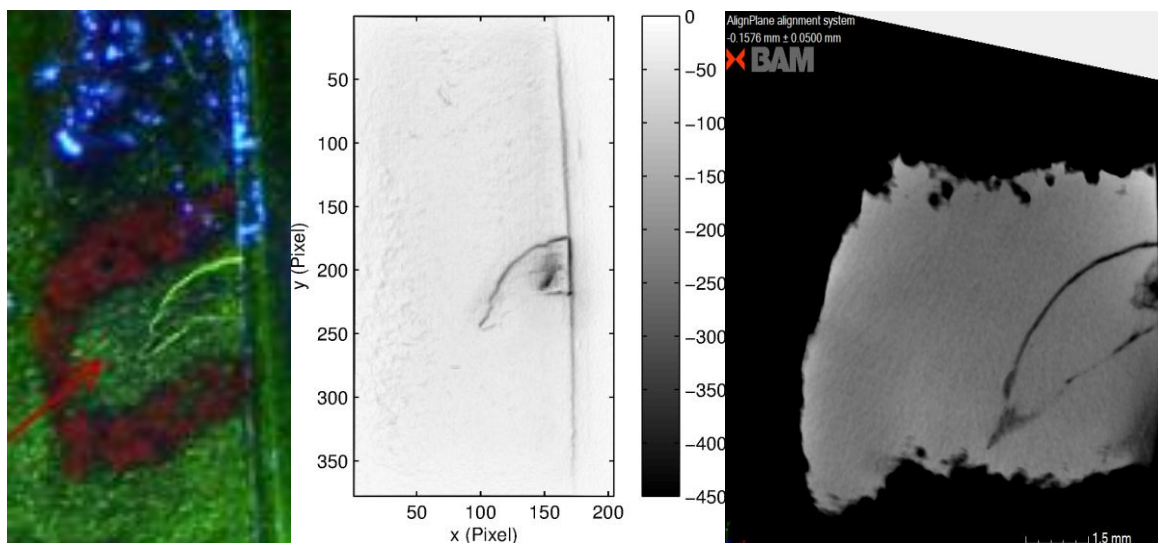


Abb. 4: MT-Prüfung (links), TT-Prüfung (Mitte) und CT-Prüfung (rechts) im Vergleich

3 Statistische Analyse

Zur statistischen Analyse werden die Thermographischen Aufnahmen Pixel für Pixel mit den CT-Referenzwerten verglichen. Der Vergleich wird mit binären Werten (wahr, falsch) durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die verwendete Klassifizierungs-Matrix.

Tabelle 1: Klassifizierungs-Matrix zur statistischen Analyse

	Referenz: CT	
Thermographie	wahr	falsch
wahr	True Positive (TP)	False Positive (FP)
falsch	False Negative (FN)	True Negative (TN)

Zum Vergleich der Thermographie und CT-Referenzdaten wurden diese zunächst nach der Kamera/Proben Orientierung des Thermografie Setups der BAM ausgerichtet. Abbildung 5 zeigt den binären Vergleich der beiden Bilder, was zu einem kombinierten Bild mit vier Grauwerten für richtig positive, falsch positiv, richtig negativ und falsch negativ (Hintergrund) Werte führt, aus denen in der Ergebnistabelle die Werte für Sensitivität und Spezifität berechnet werden.

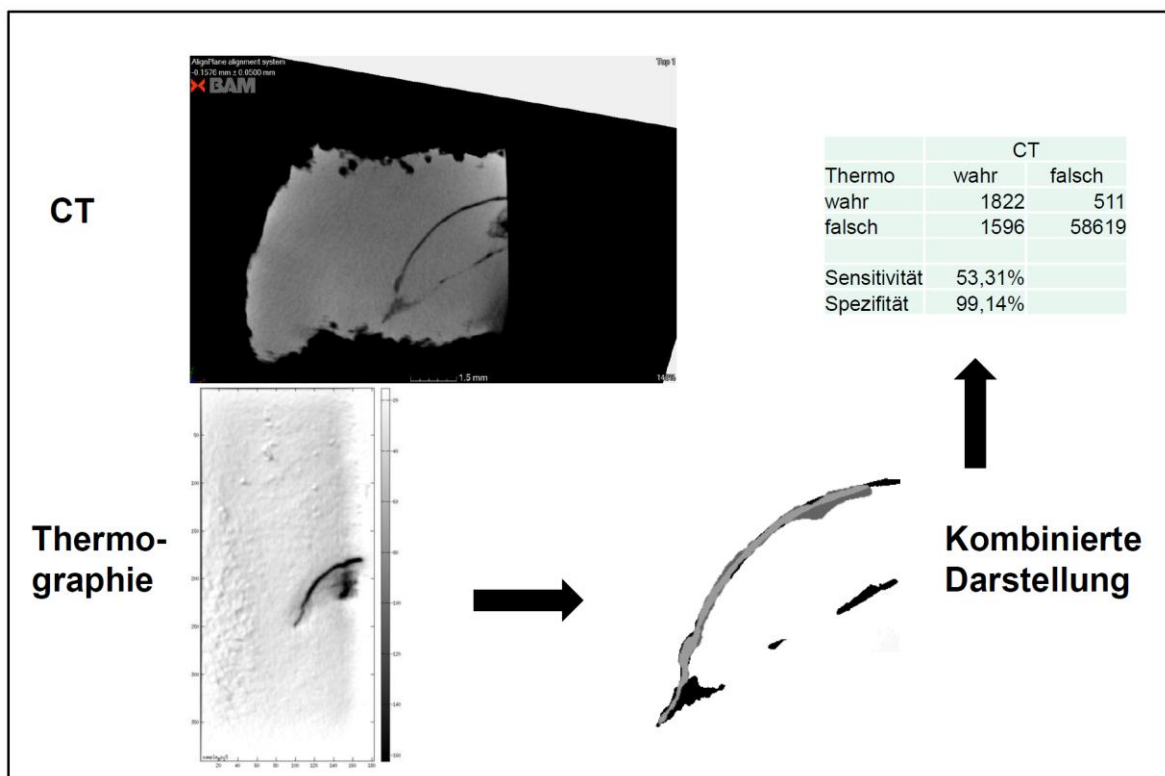


Abb. 5: Statistische Analyse des Vergleich CT-Referenz mit Thermographischer Aufnahme

Die Ergebnisse zeigen, dass der obere Teil des Risses nahezu vollständig (zu 99%) detektiert wurde, wobei im unteren Teil der Riss nur von der CT erkannt wurde.

Die statistischen Analysen wurden für 3 Proben (Sample No. 15, 16 und 18) mit verschiedenen Parametern zur Binarisierung des Grau-Wert-Bildes des Thermographie Scans wiederholt, woraus sich die ROC-Kurve aus Abb.5 ergeben hat.

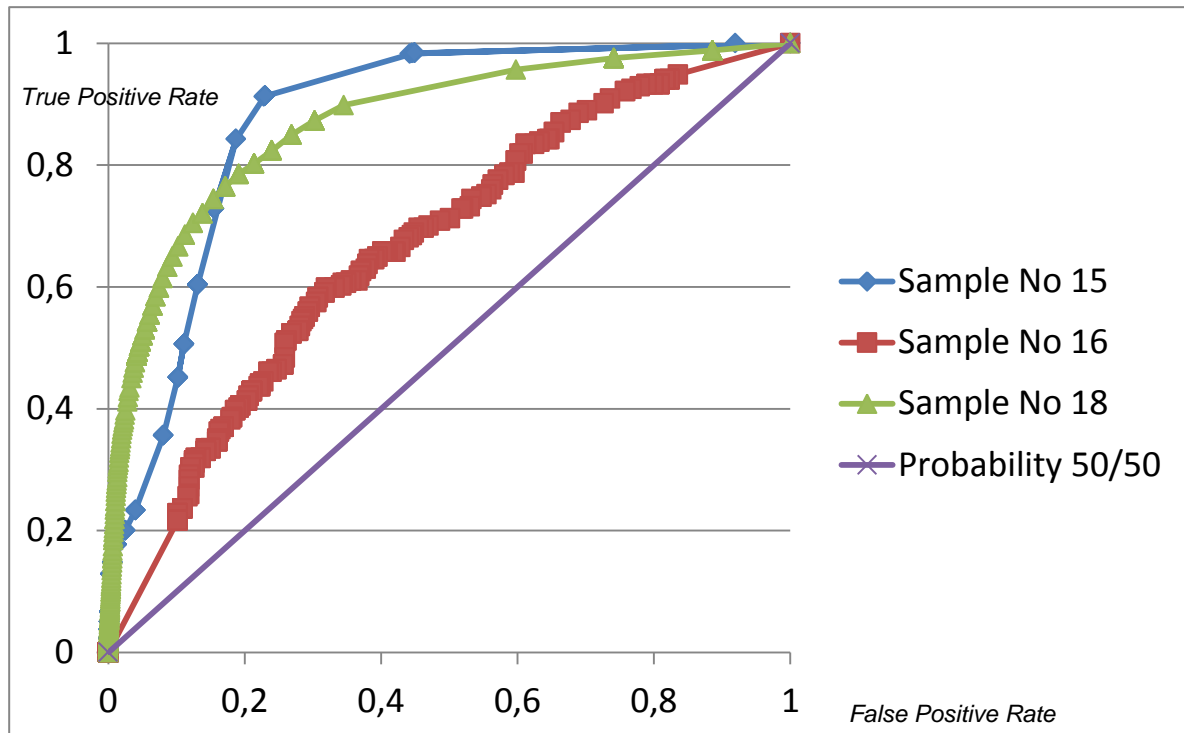


Abb. 5: ROC-Kurve zum Vergleich der Thermographischen Bilder mit der CT-Referenz

Sehr gute Korrelationen würden einen Kurvenverlauf am oberen linken Rand des ROC Raums ergeben, wohingegen eine komplett zufällig verlaufende Korrelation in einer Kurve nahe bei der vertikalen Linie resultieren würde.

Die Resultate zeigen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten der Fehlerdetektion bei der Analyse von 3 Proben aus gesenkgeschmiedeten Stahl. Die Untersuchungen haben ergeben, dass eine Rissdetektion mit Thermographischen Verfahren in allen untersuchten Fällen möglich ist.

4 Zusammenfassung

Die ZfP-Verfahren MT, TT und CT eignen sich zur Rissdetektion in Proben aus gesenkgeschmiedeten Stahl. Die μ -CT liefert hierbei eine isotrop skalierte 3D-Darstellung des linearen Schwächungskoeffizienten, setzt allerdings eine vollständige Durchstrahlbarkeit der Probe und damit eine gute Probenpräparation voraus. Thermographische Verfahren bieten hierbei eine schnelle, umweltschonende, berührungslose Alternative für die Vor-Ort-Prüfung. Die Ortsauflösung ist allerdings abhängig von der Risstiefe.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Projekt ThermoBot im Rahmen des FP7 unter dem Grant Agreement No. 284607 von der Europäischen Union gefördert.

Referenzen

[1] J. Schlichting, M. Ziegler, A. Dey, C. Maierhofer, M. Kreuzbruck, "Efficient data evaluation for thermographic crack detection", QIRT Journal, Short communication, 8(1), 119, 2011

[2] Wikipedia, Receiver Operating Characteristic (ROC),
http://de.wikipedia.org/wiki/Receiver_Operating_Characteristic