

Konzeption und Aufbau einer robotergestützten Plattform für optisch angeregte Wärmefluss-Thermografie

Guido MAHLER *, Christian EITZINGER **

* InfraTec GmbH, 01217 Dresden, G.Mahler@InfraTec.de

** PROFACOR GmbH, A-4407 Steyr-Gleink, Österreich,
christian.eitzinger@profactor.at

Kurzfassung. Die zunehmende Verbreitung der Wärmefluss-Thermografie als Verfahren zur zerstörungsfreien Bauteil-Prüfung führt einerseits zur Ausweitung des Einsatzgebietes durch Erschließung immer weiterer Applikationen, wirkt andererseits aber auch zunehmend Fragen nach deren Vertiefung und Intensivierung in bereits bekannten Anwendungsfeldern auf.

Neben einer bestmöglichen Objektivierung der Prüfergebnisse ist insbesondere das Handling von Prüflingen und ggf. darüber hinaus beteiligter Komponenten während des Prüfablaufs Ansatzpunkt für die Automatisierung und damit Produktivitätssteigerung bei der Prüfung von Serienbauteilen.

Speziell bei komplex geformten Prüflingen, wie sie beispielsweise im Automobilbau häufig vorkommen, stellt eine exakte und wegoptimierte Positionierung von Kamera, Anregungsquelle und Prüfling hierfür ein erhebliches Potential dar. Insbesondere gilt dies für eine thermografische Rissprüfung, bei welcher sowohl die energetische Anregung als auch die Erfassung der Wärmeausbreitung an der Oberfläche in der Bewegung stattfinden. Damit erhöhen sich die Anforderungen an die Roboter-Positionierung von der statischen Aufgabenstellung einer lückenlosen Flächenabdeckung aller zu prüfenden Oberflächen-Abschnitte hin zu einer dynamischen Aufgabenstellung mit der Zusatzbedingung eines vollständig determinierten Zeitverhaltens der Relativbewegung der beteiligten Komponenten zueinander während der Prüfung.

Ausgehend von der Analyse der thermografischen Aufgabenstellung werden die an Gerätetechnik und Software gestellten Anforderungen diskutiert, mit welcher diese Bedingungen erfüllt werden können und eine daraus abgeleitete Konzeption für eine modular aufgebaute Plattform für ein solches System vorgestellt.

1. Einführung

Als eines der jüngeren ZfP-Verfahren hat sich die thermografische Prüfung mittlerweile zu einer ernst zu nehmenden Alternative gegenüber traditionellen Verfahren wie der Ultraschall- bzw. Durchstrahlungsprüfung entwickelt. Ihre Vorzüge werden insbesondere bei der Prüfung mehrschichtiger Flach-Bauteile auf Integrität und Einschluss-Freiheit, aber auch bei der Prüfung von Kleb- oder Schweißverbindungen sowie für die Schichtdickenbestimmung genutzt. Neben den aus strahlungsphysikalischer Sicht besonders günstig zu erfassenden Kunststoff-Materialien, wie die in Luftfahrt und zunehmend auch im Automobilbau verbreiteten CFK- bzw. GFK-Materialien, finden auch die Anwendungen im Bereich metallischer Prüflinge eine immer größere Verbreitung.



Neben der Prüfung von Punkt- bzw. Laser-Schweißverbindungen ist dabei die Rissdetektion zunehmend in den Focus der Bemühungen zur Weiterentwicklung des thermografischen Verfahrens gerückt.

Die thermografische Prüfung auf unter der Oberfläche befindliche Inhomogenitäten wie Lunker, Einschlüsse oder Schichtablösungen bedarf prinzipiell keiner lateralen Komponente des hierzu eingebrachten Wärmestroms und kann daher mit einer festen geometrischen Zuordnung von Prüfling, Anregungsquelle und Thermografiekamera erfolgen. Die bei der Prüfung von Bauteilen größerer Längenausdehnung dennoch mitunter eingesetzte Bewegungs-Komponente in Ausdehnungsrichtung, verbunden mit einer linienhaften anstelle flächiger energetischer Anregung, stellt eine ausführungstechnische Alternative zum ansonsten vorzunehmenden Abrastern der Oberfläche mit Einzelaufnahmen dar, ist aber keine verfahrenstechnisch bedingte Notwendigkeit.

Im Gegensatz dazu basiert die thermografische Rissprüfung üblicherweise auf der Erzeugung eines lateralen Wärmestroms unmittelbar auf bzw. nahe der Oberfläche des zu prüfenden Objektes [1, 2]. Statt eines möglichst homogenen großflächigen Energieeintrags in die zu untersuchende Fläche besteht demnach die Anforderung der Erzeugung eines lokalen Temperaturgradienten an allen zu untersuchenden Stellen, ohne dabei jedoch die zulässige Belastungsgrenze des Materials zu überschreiten. Eine praktische Möglichkeit hierzu besteht darin, die Anregungsenergie örtlich begrenzt auf das Objekt einwirken zu lassen, während dessen Prüfling und Anregungsquelle relativ zueinander bewegt werden.

Diese Bewegung kann im Falle von Langmaterial, wie z. B. Band- oder Profilstählen, besonders einfach über dessen kontinuierliche Vorschub-Bewegung mithilfe eines linearen Antriebes erfolgen [3]. Im Fall einer geometrisch komplizierteren Gestalt sind hingegen 3-dimensionale Raumbeziehungen zwischen Prüfling, Anregungsquelle und Thermografiekamera zu gewährleisten, welche für die nachfolgende Auswertung der Bildsequenzen zusätzlich noch mit exakten Zeitstempeln aufnahmesynchron erfasst werden müssen. Für diesen Zweck bietet sich der Einsatz eines Roboters an, dessen Integration in den Prüfplatz diesen zu einer universellen Plattform für die zerstörungsfreie Bauteilprüfung mittels Wärmefluss-Thermografie werden lässt.

Wenngleich eine aus der Kombination von Thermografiekamera, Anregungseinheit, Roboter sowie Datenverarbeitungseinheit gebildete System-Plattform grundsätzlich die Möglichkeit verschiedener thermografischer Prüfanwendungen bietet, steht bei den hier vorzustellenden Arbeiten zunächst insbesondere die automatisierte Rissprüfung von Fahrzeugkomponenten im Vordergrund [4, 5].

2. Physikalische Grundlagen

Die Basisfunktion der Rissprüfung wird im System durch eine örtlich variierende lokale Anregung des Prüflings bei gleichzeitiger thermografischer Erfassung des Erwärmungsverlaufs in der Umgebung des Anregungsortes realisiert. Daher ist es ausreichend, sich bei der physikalischen Beschreibung dieses Vorganges auf die lokalen Effekte im Nahbereich der Erwärmungsposition zu beschränken. Dessen Ausdehnung wird durch die thermischen Übertragungseigenschaften des Objektes bestimmt und kann als jener Oberflächenbereich betrachtet werden, innerhalb dessen hinreichend große lokale Temperaturdifferenzen auftreten.

Eine grundlegende Beschreibung der Wärmeausbreitung in Festkörpern ist durch die Wärmeleitungsgleichung gegeben, die für den allgemeinen anisotropen Fall

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g_{(t,x,y,z)} \quad (1)$$

und im Falle isotroper Wärmeausbreitung (gleicher Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ in alle Richtungen)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{g_{(t,x,y,z)}}{\rho c_p} \quad (2)$$

lautet, wobei der Term $g_{(t,x,y,z)}$ den Energieeintrag über die Anregungsquelle und damit im Fall einer Laserspot-Anregung dessen Strahlungsabsorption an der Objekt Oberfläche beschreibt. Die sich daraus ergebende typische Wärmestromverteilung ist in Abbildung 1 dargestellt.

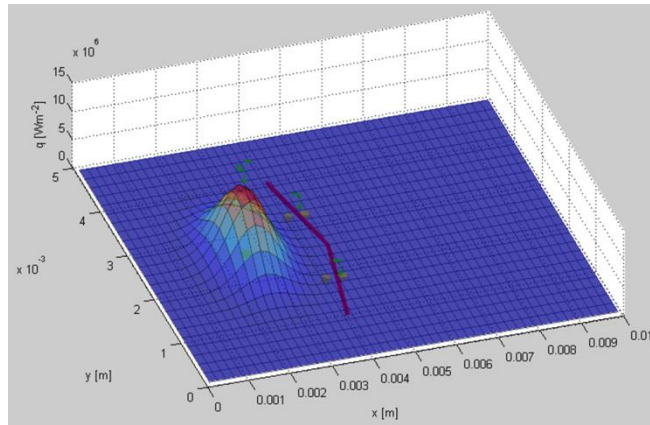


Abbildung 1: Wärmestromverteilung bei lokaler Laser-Anregung (FDM-Simulation)

Wird nun aufgrund einer Relativbewegung von Laserspot und Riss (dargestellt durch den roten Pfeil im Diagramm) dieser vom Bereich der Temperaturerhöhung überstrichen, dann trifft der laterale Wärmestrom auf ein lokales Hindernis, was zu einer örtlich begrenzten Reduzierung des Wärmestroms und damit wiederum zu einem diskontinuierlichen Temperaturverlauf mit einem bestimmten Signalhub an der Rissstelle führt. Dieser ist abhängig vom örtlichen Temperaturgradienten im ungestörten Fall, der sich als Lösung von Differentialgleichung (2) für ein unendlich ausgedehntes Objekt gemäß Gleichung (3) für eine Step-Anregung bzw. Gleichung (4) für eine Impulsanregung berechnen lässt.

$$\Delta T_{(x,y,z,t)} = \frac{Q}{\rho c_p} \frac{e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4\kappa t}}}{(4\pi\kappa t)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{(x,y,z,t)} = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}{\sqrt{4\kappa t}} \quad (4)$$

Indem man von rotationssymmetrischer Wärmeausbreitung an der Oberfläche um den Laserspot herum ausgeht, lassen sich damit auf einfache Weise Fallbeispiele des zu erwartenden Temperaturhubs näherungsweise berechnen und damit die für den zu untersuchenden Werkstoff zu schaffenden Untersuchungsbedingungen näher eingrenzen.

Unter Einsetzen der Materialkonstanten von Stahl

Dichte:	$\rho = 7,86 \text{ g cm}^{-3}$
Spezifische Wärmekapazität:	$c = 480 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Spezifische Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 47 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Thermische Diffusivität:	$\kappa = 1,246 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

ergeben sich beispielsweise die in den Abbildungen 2 und 3 dargestellten örtlichen Temperaturerhöhungen (links) bzw. -gradienten (rechts).

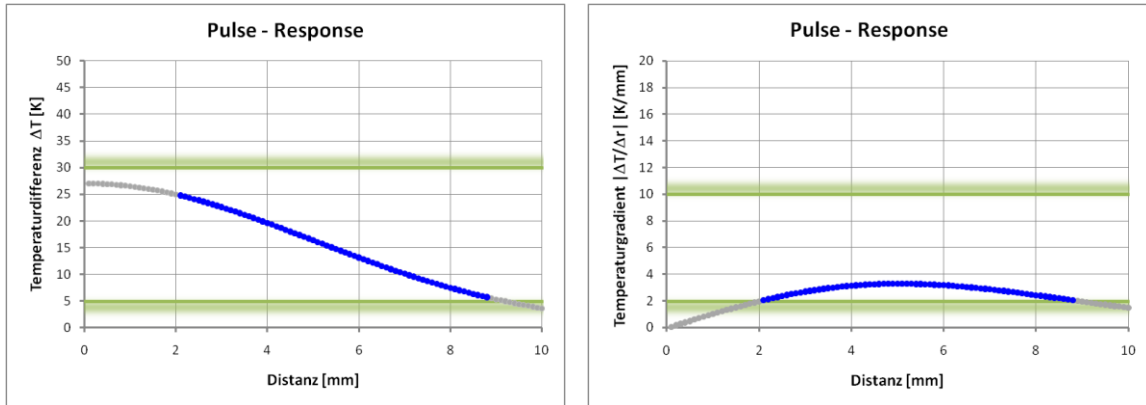


Abbildung 2: Impuls-Anregung mit 200 Ws Laserspot (nach 1 s)

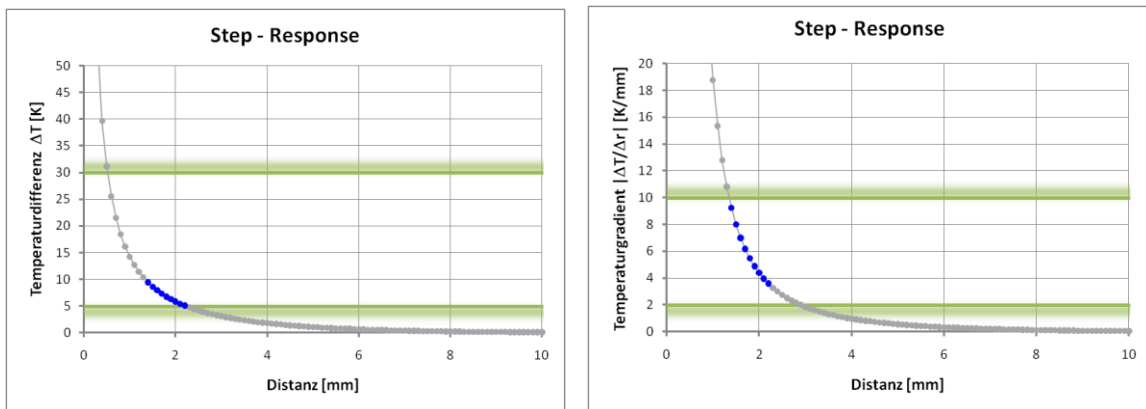


Abbildung 3: Step-Anregung mit 10 W Laserspot (1 s nach Beginn)

Die jeweils blau hervorgehobenen Teile der Kurven stellen dabei jenen Abstand zum Zentrum des Laserspots dar, in welchem beide Kenngrößen einerseits das für die Untersuchung benötigte Minimum erreichen, andererseits aber weder den Kamera-Messbereich noch die thermische Belastung des Prüflings unerwünscht überschreiten.

$$5 \text{ K} < |\Delta T| < 30 \text{ K}$$

$$2 \text{ K/mm} < |\Delta T / \Delta r| < 10 \text{ K/mm}$$

Deutlich wird ersichtlich, dass der für eine thermografische Rissdetektion verfügbare Bereich, wie in Abbildung 4 dargestellt, die Form eines Ringes um das Zentrum des Laserspots herum hat, dessen Breite die für eine lückenlose Detektion erforderliche Häufigkeit aufeinanderfolgender Einzelaufnahmen bestimmt.

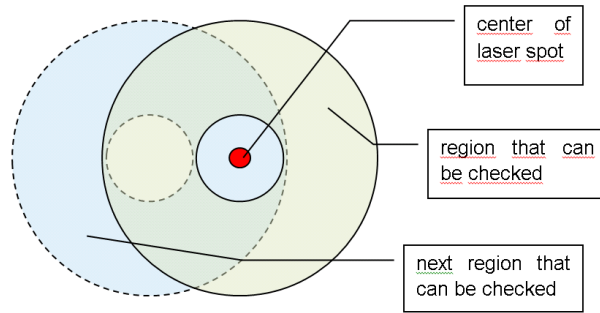


Abbildung 4: Für Rissdetektion nutzbarer Oberflächenbereich bei Laserspot-Anregung, schematisch

Diese wiederum ergibt sich im Wesentlichen aus den Parametern Laserleistung und lateraler Spot-Geschwindigkeit, wobei als zusätzliche, von dieser einfachen Abschätzung nicht mit erfasste Kenngröße, darüber hinaus auch noch der Durchmesser des Laserspots zu berücksichtigen ist. Dieser beeinflusst insbesondere die tatsächlich auftretenden Maximalwerte von Temperatur und Temperaturgradient und ist daher bei der Parameterfestlegung ebenfalls zu berücksichtigen bzw. kann für die Einstellung der Prüfregionen-Größe herangezogen werden.

3. Systemkonzept und -aufbau

Die Hardware-Plattform des Systems besteht aus den drei Hauptkomponenten Roboter, Anregungseinheit (Laser) und Thermografiekamera, die in der in Abbildung 5 dargestellten Anordnung zusammen in einer Schutzkabine untergebracht sind, sowie einer Steuereinheit (PC).

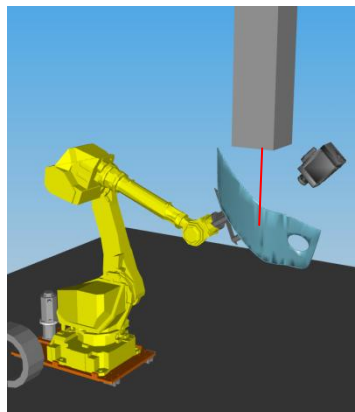


Abbildung 5: Robotergestütztes Thermografie-Prüfsystem mit Laser-Anregung, Komponenten-Anordnung

Aus dem vorgesehenen Ablauf für eine robotergestützte thermografische Rissprüfung ergeben sich dabei allerdings besondere Anforderungen an die Spezifikation bestimmter Komponenten bzw. deren Systemintegration. Dieser Ablauf soll sich so gestalten, dass für ein neues Bauteil zunächst die 3D-CAD-Daten bereitgestellt werden. Das System verwendet ein Prozessmodell der thermografischen Bilderfassung sowie eine Workcell-Simulation für die Planung einer kollisionsfreien Roboter-Bahn mit vollständiger Abdeckung der Oberfläche. Während der Untersuchung führt das System die thermografische Prüfung einschließlich Bildsegmentierung, Fehlererkennung und -

klassifizierung aus. Gleichzeitig findet eine Online-Prozesssimulation zur Bewertung der Qualität (des Kontrasts) der Aufnahmen statt. Deren Ergebnisse werden in Echtzeit an die Robotersteuerung übermittelt, um im Falle unbekannter Abweichungen (z. B. Geometrie, Oberflächenstruktur, thermodynamische Eigenschaften) die Roboterbahn entsprechend anzupassen.

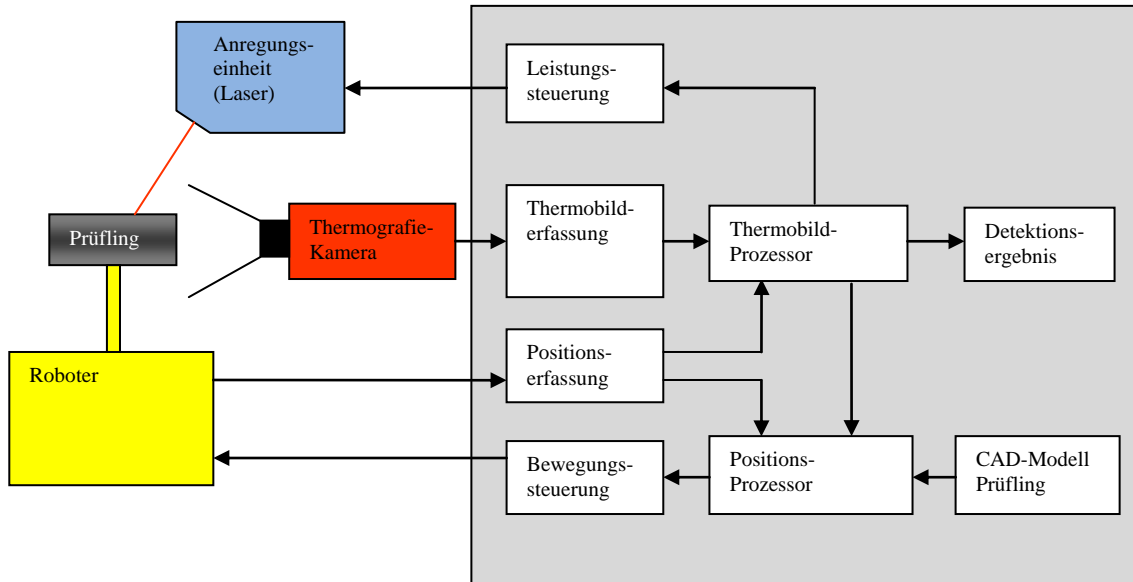


Abbildung 6: Robotergestütztes Thermografie-Prüfsystem, Blockdiagramm

Während Kamera und Laser über ihre herstellerseitigen Standard-Interfaces mit der Steuereinheit verbunden werden, ist das im Fall des Roboters nicht möglich. Die enge Verzahnung von Thermobildauswertung und Bewegungssteuerung erfordert einerseits eine thermobild-synchrone Erfassung der Roboter-Position und andererseits eine in Echtzeit beeinflussbare Pfadplanung, was wiederum die Übernahme der kompletten Bewegungssteuerung durch die Steuereinheit notwendig macht. Diese sowie die laufende Positionserfassung werden dann über ein spezielles Software-Interface des Roboter-Controllers realisiert.

Für diese speziellen Anforderungen hat sich ein Roboter vom Typ FANUC M710 iC50 als geeignet erwiesen, der zudem mit 50 kg eine passende Tragkraft für die in Betracht gezogenen Untersuchungsobjekte aufweist.

Als Anregungsquelle kommt ein CO₂-Laser mit einer Leistung von 100 W zum Einsatz. Damit ist die Möglichkeit eines effizienten Energieeintrags auch in massive Objekte mit großer Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit gegeben.

Bei der Auswahl der Thermografiekamera wurde neben guter Temporauflösung und einer genügend hohen Bildpunkt-Anzahl insbesondere auf ausreichende Reserven bei der Bildfrequenz sowie verschiedene Möglichkeiten zur Synchronisation der Bildaufnahme wie ein externer Triggereingang bzw. ein Synchronausgang geachtet. Erfüllt werden alle diese Anforderungen durch die MWIR-Kamera ImageIR[®] 8300 ([6], siehe Abbildung 7) mit den folgenden Kenndaten.

Spektralbereich:	(1,8 ... 5,5) μm
Detektor:	MCT bzw. InSb, (640 x 512) Pixel mit 15 μm Pitch
NETD:	< 15 mK @ 30 °C
IR-Bildfrequenz:	bis 300 Hz (570 / 1000 / 2.400 Hz im Teilbild-Modus)

Zwar schließt der Spektralbereich der Kamera die Laserwellenlänge von $10,6\ \mu\text{m}$ nicht mit ein, dennoch wird sie zum Schutz des Objektivs mit einem speziellen Laser-Schutzfenster ausgestattet.



Abbildung 7: Thermografiecamera ImageIR[®] 8300 (links) und Laser-Schutzfenster (rechts)

Wie in Abbildung 6 dargestellt, umfasst die in der Steuereinheit implementierte, in Echtzeit auszuführende Software zwei parallele und miteinander gekoppelte Funktionsblöcke: den Thermobild- sowie den Positions-Prozessor. Das Thermobild einer laufenden Folge wird zunächst unter Einbeziehung seiner Vorgänger sowie der aktuellen Daten zum Bewegungsablauf des Roboters hinsichtlich des Vorhandenseins von Defekten ausgewertet. Ein möglicher, dabei speziell für die Risserkennung zum Einsatz kommender Algorithmus auf Basis einer Gradienten-Auswertung ist in [7] beschrieben, dessen Wirkung anhand des in Abbildung 8 dargestellten Beispiels nachvollziehbar ist.

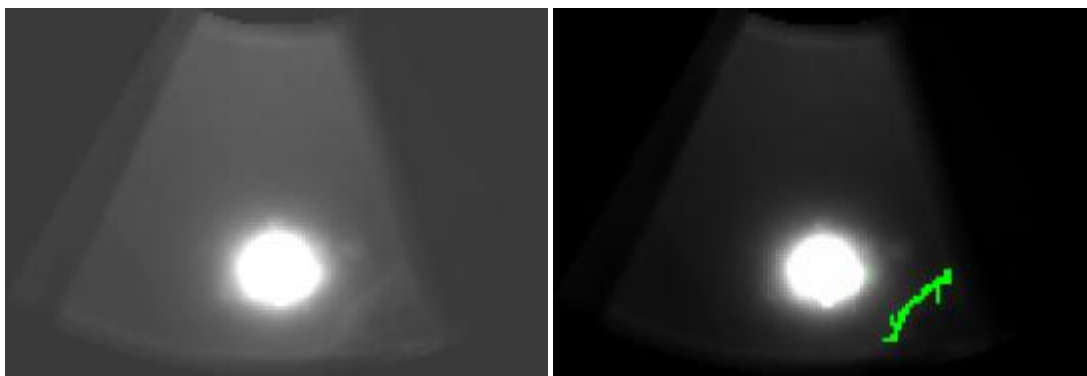


Abbildung 8: Thermobild mit Riss (links) sowie Detektions-Ergebnis (rechts)

Die auf diese Weise ermittelte Position der Defektstelle im Thermobild ist nunmehr den korrespondierenden Orten auf der Oberfläche des Prüflings zuzuordnen. Dies erfolgt im Zuge der geometrischen 3D-Rückprojektion auf dessen CAD-Modell unter Verwendung der aktuellen Position des Roboterarmes und somit des zugehörigen momentanen Bildfeldes der Kamera.

Zusätzlich zu gefundenen Defektstellen wird auf gleiche Weise der bei diesem Detektionsschritt überstrichene Bereich aus dem Thermobild auf das CAD-Modell übertragen. Damit ist es dem Funktionsblock des Positions-Prozessors möglich, die für die Fortführung der lückenlosen Erfassung der Prüflings-Oberfläche notwendige Positionsänderung des Werkstücks zu berechnen und an den Roboter zu übermitteln.

4. Thermografie-Untersuchungen

Im Zuge der Realisierung des beschriebenen Systems wurden dessen Komponenten in einem gemeinsamen mechanischen Aufbau zusammengefügt sowie in einer Schutzkabine installiert (siehe Abbildung 9) und standen somit für praktische Untersuchungen zur Verfügung.

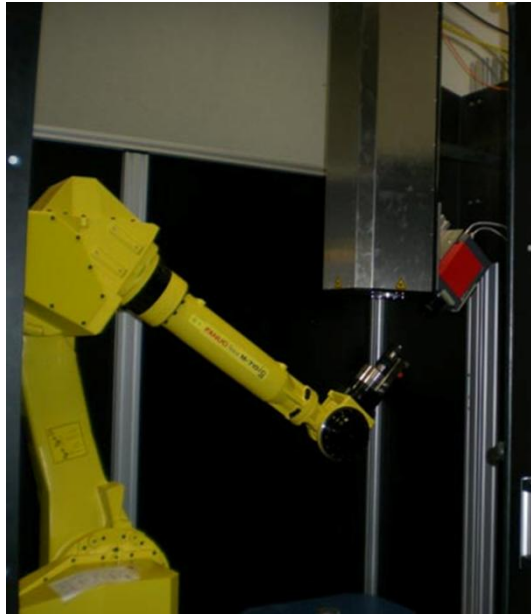


Abbildung 9: Hardware-Systemaufbau mit Roboter (links), Laser (oben) und Thermografiekamera (rechts)

Eine erste Untersuchung betraf die Wirksamkeit der Laseranregung, wofür als Objekt die nicht geschliffene Wange einer Kurbelwelle herangezogen wurde, deren grobe Oberflächenstruktur im Thermobild deutlich zu erkennen ist.

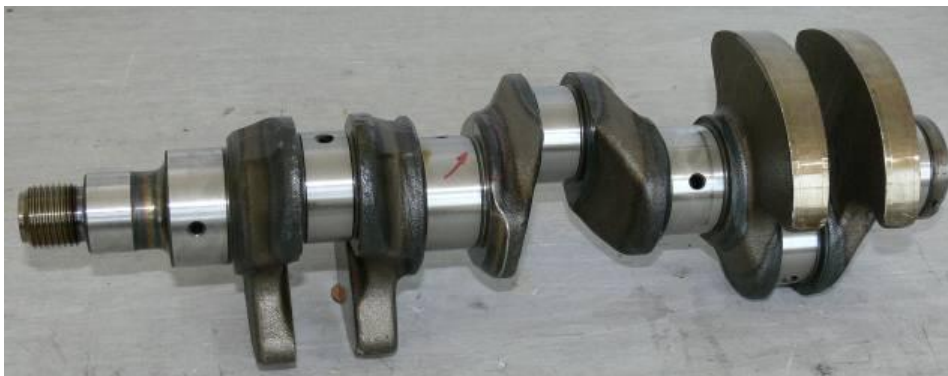


Abbildung 10: Kurbelwelle eines 3-Zylinder-Motors

Bei ruhendem Laserspot (Abbildung 11) bildet sich erwartungsgemäß ein kreisrundes Bildsegment aus, das sich anhand der vorab beschriebenen Kriterien für eine Rissdetektion eignet. Dieser Bereich mit einem Durchmesser von ca. 5 mm ist im rechten Bild weiß hervorgehoben. Zu beachten ist das zur Kompensation der aus der schrägen Kameraposition resultierenden perspektivischen Verzerrung vertikal gestauchte Bildformat.

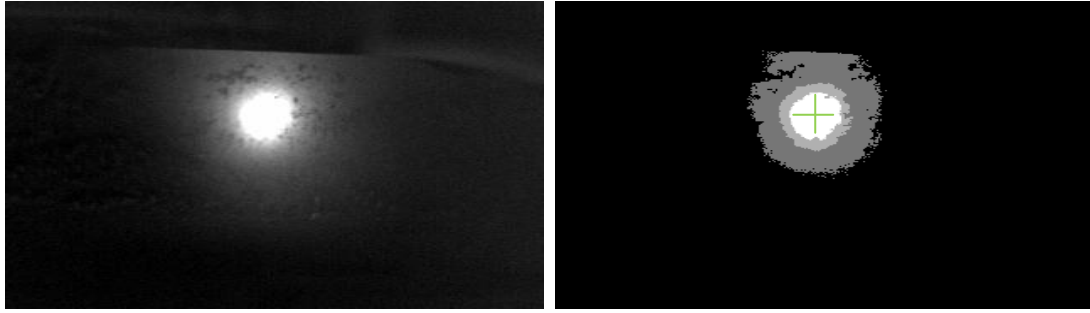


Abbildung 11: Laserspot ruhend, Thermobild (links) und auswertbares Bildsegment (rechts)

Wird das Objekt unter dem Laserspot bewegt, verformt sich dieser Bereich zu einer elliptischen Fläche, deren Flächenschwerpunkt in Bewegungsrichtung hinter dem Laserspot liegt (Abbildung 12). Aufgenommen wurde das Bild bei einer Laserleistung von 8 W und einer Spot-Geschwindigkeit von 120 mm/s.

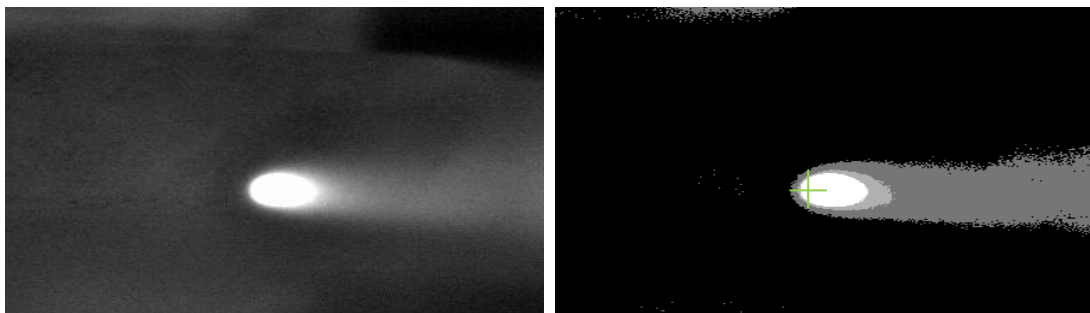


Abbildung 12: Laserspot in Bewegung, Thermobild (links) und auswertbares Bildsegment (rechts)

In der Auswertung der Intensitätswerte (Abbildung 13) ist insbesondere der deutlich nach oben abweichende und daher für eine reguläre Auswertung zu hohe Gradient an der in Bewegungsrichtung liegenden Begrenzung des erwärmten Gebiets zu erkennen.

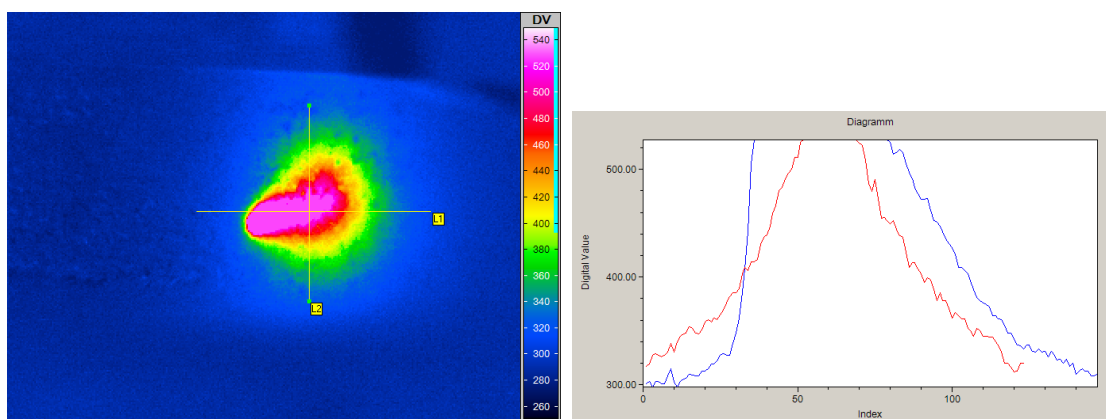


Abbildung 13: Thermografieaufnahme mit horizontalem (blau) und vertikalem (rot) Intensitäts-Profil

Weitere Untersuchungen betreffen die Einflüsse von Spot-Geschwindigkeit und Laserleistung auf das auswertbare Bildsegment. Hierfür wurde eine Probe aus gleichem Material mit einem diagonal im Bild verlaufenden Riss verwendet. Auf eine perspektivische Entzerrung wird nachfolgend verzichtet.

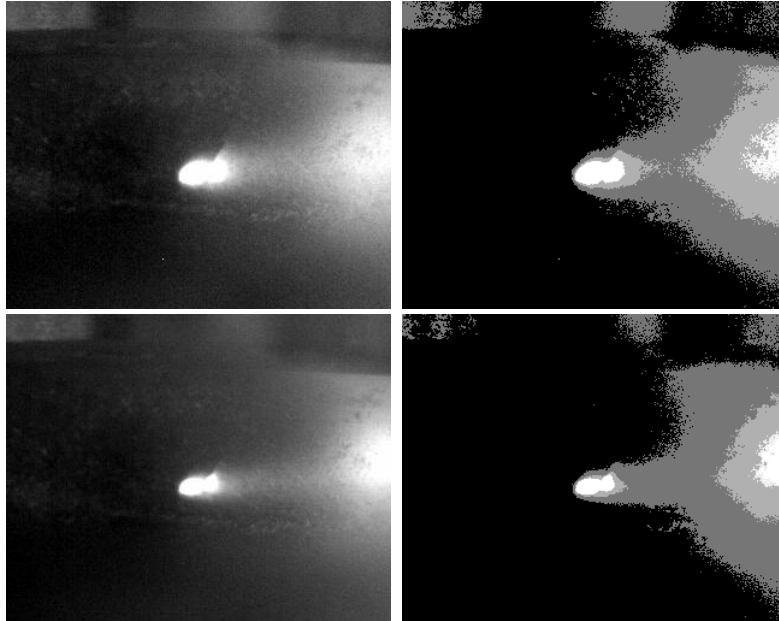


Abbildung 14: Einfluss der Spot-Geschwindigkeit (oben 70 mm/s, unten 170 mm)

Erwartungsgemäß verkleinert eine Erhöhung der Spot-Geschwindigkeit bei konstanter Laserleistung die Größe des innerhalb eines Bildes auswertbaren Bildsegmentes. Welcher der beiden gegensätzlichen Effekte jedoch schlussendlich den größeren Einfluss auf die gesamte Prüfzeit aufweist, ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht absehbar, sodass dieser Zusammenhang Gegenstand weiterer Untersuchungen sein wird.

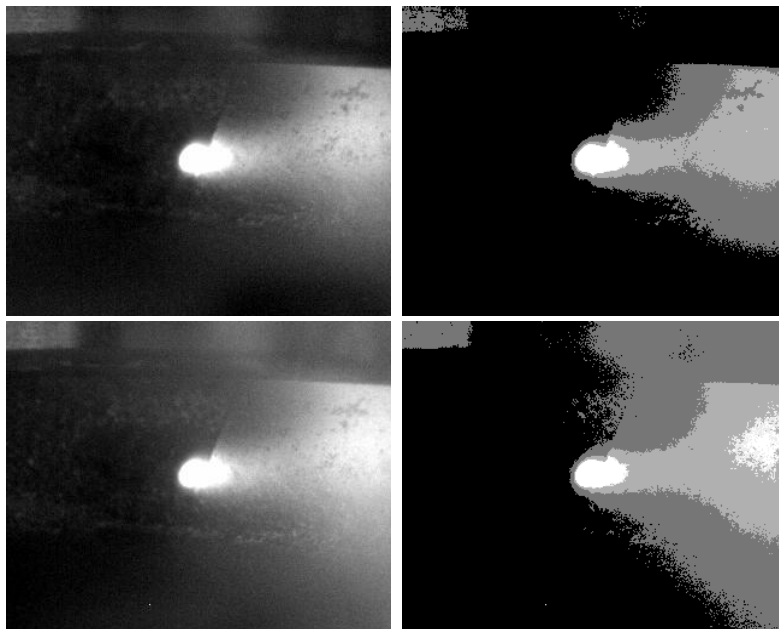


Abbildung 15: Einfluss der Laserleistung (oben 7 W, unten 20 W)

Eine Erhöhung der Laserleistung führt ebenfalls zu einer Vergrößerung des auswertbaren Bildsegmentes, welche jedoch im Vergleich zum Einfluss der Spot-Geschwindigkeit deutlich weniger effektiv ausfällt. Auch hierzu werden sich weitere Untersuchungen anschließen.

5. Zusammenfassung

Vorgestellt wurden das Systemkonzept sowie Hard- und Softwarekomponenten für ein robotergestütztes System zur thermografischen Prüfung, dessen Funktionalität sich zunächst an den Erfordernissen einer automatisierten Rissprüfung, speziell von verschiedenen Fahrzeug-Bauteilen orientiert.

Neben metallischen Prüflingen, wie beispielsweise die heute noch in großer Zahl manuell geprüften Kurbelwellen, sollen aber auch aktuelle und zukünftige Objekte aus anderen, nichtmetallischen Werkstoffen wie CFK oder GFK Berücksichtigung finden. Die thermische Anregung mittels Laser soll diesem universellen Anspruch gerecht werden.

Von den konkreten Anforderungen der thermografischen Rissprüfung ausgehend, gestattet diese Hardware-Plattform jedoch auch eine Ausweitung auf andere zu prüfende Fehler, wie beispielhaft in nachfolgender Tabelle dargestellt.

	Metall-Teile			Polymer-Teile	
	geringe Komplexität	mittlere Komplexität	Größte Komplexität	GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff)	CFK (Carbonfaserverstärkter Kunststoff)
Beispiele	Antriebswelle	Nockenwelle	Kurbelwelle	Konstruktions-Bauteile	Karosserieteile, Verkleidungen
typ. Fehlerfall	herabgesetzte mechanische Stabilität bzw. Lebensdauer, Risiko eines Belastungsbruchs				dto., zusätzlich Beeinträchtigung des Erscheinungsbilds
Fehlerursachen	<ul style="list-style-type: none"> - Risse (Wärmebehandlung, Schleifen) - surface laps (Schmiedeprozess) - mikro-strukturelle Einschlüsse (Ausgangsmaterial) 			<ul style="list-style-type: none"> - Delaminationen/Porositäten (Matrix-Kontaminierung, unvollständige Aushärtung) - Disbonds/Verklebungsfehler (unzureichende Matrixfüllung) - visuell erkennbare Inhomogenitäten 	

Tabelle 1: Fallbeispiele für automatisierte thermografische Prüfungen an Fahrzeug-Bauteilen

Dank ihres modularen Aufbaus sind darüber hinaus auch weitere Modifikationen möglich und mit vergleichsweise geringem Aufwand realisierbar. So bietet die Kamera-Schnittstelle die Möglichkeit eines einfachen Austauschs gegen eine solche mit Mikrobolometer-Detektor, die für einige Aktiv-Thermografie-Anwendungen eine ernsthaft in Betracht zu ziehende Alternative darstellt.

Durch die Entscheidung, mithilfe des Roboters nicht die Kamera oder den Laser, sondern stattdessen den Prüfling zu bewegen, haben sich auch hinsichtlich alternativer Anregungsquellen größere Spielräume für künftige Modifikationen erhalten lassen.

So ist im Rahmen des bestehenden Systemkonzeptes beispielsweise ein Austausch der Laser- gegen eine Induktionseinheit oder eine Blitz-Anregungseinheit realisierbar, wenn dies die zu untersuchenden Fehlertypen bzw. Materialien erfordern oder günstiger erscheinen lassen sollten.

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden innerhalb des Projekts ThermoBot, welches im Rahmen des FP7 unter dem Grant Agreement No. 284607 von der Europäischen Union gefördert wird.

Referenzen

- [1] X. Maldague, “Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing”, John Wiley & Sons, New York, 2001
- [2] J. Schlichting, M. Ziegler, C. Maierhofer, M. Kreuzbruck, “Flying Laser Spot Thermography for the Fast Detection of Surface Breaking Cracks”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, 2012
- [3] B. Oswald-Tranta, M. Sorger, “Scanning Pulse Phase Thermografie mit induktiver linearer Heizung”, DGZfP DACH-Jahrestagung, Graz, 2012
- [4] Projekt-Homepage “EU-Projekt ThermoBot”, www.thermobot.eu
- [5] C. Eitzinger, S. Ghidoni, E. Menegatti, “Thermobot: towards semi-autonomous, thermographic detection of cracks”, International Conference on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, 2013
- [6] Produkt-Information “Thermografiekamera ImageIR[®]”, www.infratec.de
- [7] S. Ghidoni, M. Minella, L. Nanni, C. Ferrari, M. Moro, E. Pagello, E. Menegatti, “Automatic crack detection in thermal images for metal parts”, International Conference on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, 2013