

# Kameragestütztes Flying-Spot-Verfahren zur Risserkennung

Joachim SCHLICHTING, Mathias ZIEGLER, Matthias PELKNER,  
Christiane MAIERHOFER, Marc KREUTZBRUCK

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FG 8.4, Unter den Eichen 87,  
12205 Berlin, joachim.schlichting@bam.de

**Kurzfassung.** In dieser Arbeit wird ein kameragestütztes Verfahren zur Flying-Spot-Thermografie vorgestellt. Die Anregung wird über einen Diodenlaser mit einem optischen Scanner realisiert. Bei der Auswertung kommt ein effizienter und robuster Algorithmus zum Einsatz, der direkt auf die mit der Kamera aufgenommene Thermografiesequenz angewendet werden kann, ohne auf eine Synchronisation zwischen Kamera und Lasersystem angewiesen zu sein. Daher eignet sich diese Herangehensweise besonders zur Nachrüstung bestehender Thermografiesysteme.

Die prinzipielle Eignung dieser Methode wird anhand einer Messung an einem Schienenstück mit Rollkontaktermüdrissen gezeigt. Als Referenzverfahren werden die Magnetpulverprüfung und eine auf GMR (Giant Magnetoresistance)-Sensoren basierende Streufeldmessung herangezogen. Mit dem thermografischen Verfahren konnten sämtliche enthaltenen Fehler erkannt werden. Dabei wurden Risse im mm-Abstand getrennt nachgewiesen, was etwa der geometrischen Auflösung der eingesetzten Kamera entspricht.

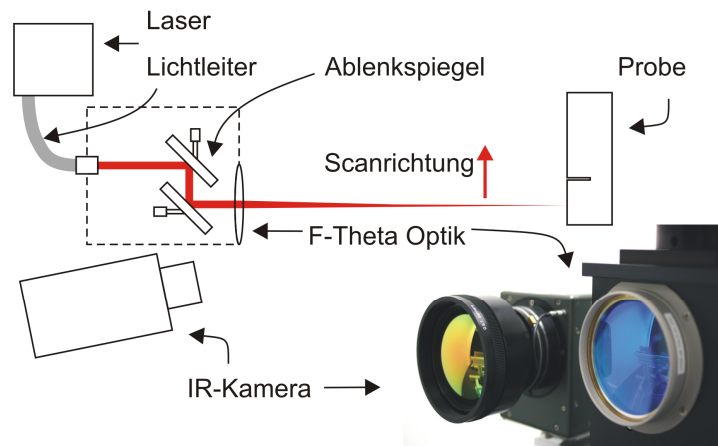
## Einführung

Bei der sogenannten Flying-Spot-Camera handelt es sich um ein System zur thermografischen Risserkennung. Bei diesem Verfahren wird die untersuchte Probe mit einer punktförmigen thermischen Anregung abgerastert, wobei die dadurch induzierte Temperaturänderung mit einem Einzelsensor in einem festen lateralen Abstand zur Anregung gemessen wird. Risse führen nun zu einem erhöhten lateralen thermischen Widerstand und können daher detektiert werden.

Dieses Verfahren wurde erstmals in den späten 1960ern vorgeschlagen [1]. Die Grundlagen wurden umfassend erläutert [2] und Systeme dieses Typs wurden erfolgreich bei realen Prüfproblemen eingesetzt [3]. Aktuelle Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet führten zuletzt zu einer Auswertungsprozedur, mit der es möglich scheint, sicher zwischen optischen und thermischen Effekten zu unterscheiden [4]. Eine andere Herangehensweise besteht darin, eine IR-Kamera zu verwenden, die sich in fester Position in Bezug auf den Laser befindet. Die Probe wird relativ dazu schrittweise verfahren [5]. Die Anregung erfolgt hier gepulst und die Auswertung basiert auf der zweiten räumlichen Ableitung der Temperaturverteilung.

In diesem Beitrag stellen wir eine Herangehensweise vor, die auf einem Laser mit Ablenkoptik basiert, so dass weder Probe noch Kamera mechanisch bewegt werden müssen. Zur Datenauswertung kommt ein Algorithmus zum Einsatz, in den keine weiteren Informationen über die Laserposition eingehen, so dass keine Synchronisation zwischen Kamera und Laser benötigt wird.





**Abbildung 1.** Experimenteller Aufbau. Die Laserstrahlung (Wellenlänge 920 nm, Dauerleistung max. 100 W) wird über eine fasergekoppelte Ablenkoptik (Fokussdurchmesser:  $\sim 1$  mm, Scangeschwindigkeit: maximal 20 m/s) auf die Probe fokussiert. Die resultierende Erwärmung wird mittels einer InSb-IR-Kamera (640 x 512 Pixel bei 100 Hz) aufgenommen.

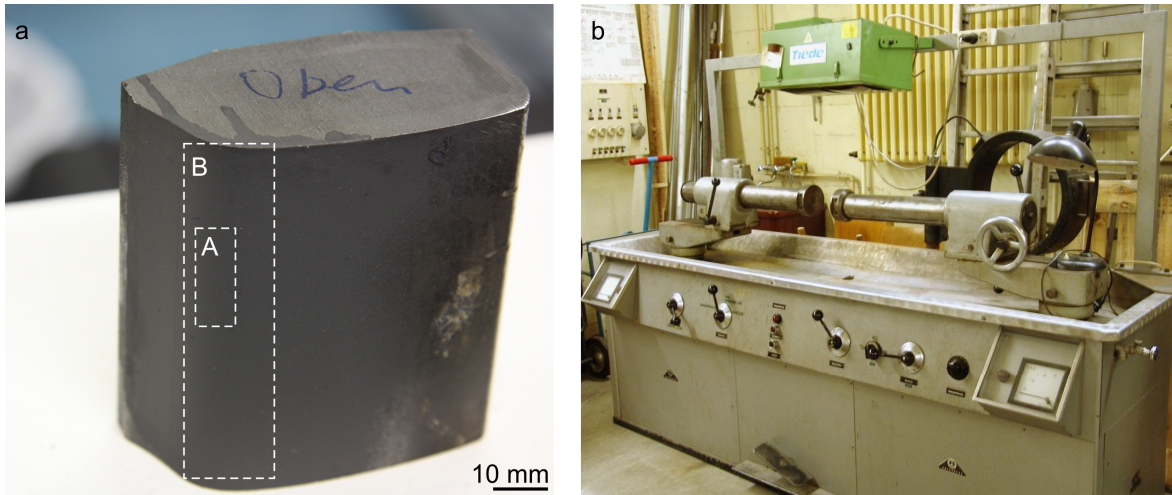
## Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau für die in dieser Arbeit präsentierte thermografische Prüfung (siehe Abbildung 1) besteht aus einem Diodenlaser (Wellenlänge: 920 nm, Ausgangsleistung maximal 100 W im Dauerstrichbetrieb), der über einen Lichtleiter an eine 2-Achsen-Ablenkoptik (Fokussdurchmesser:  $\sim 1$  mm, Scangeschwindigkeit: maximal 20 m/s bei ca. 500 mm Arbeitsabstand) gekoppelt ist. Die Benutzung einer Ablenkoptik ist aber keine zwingende Voraussetzung für das vorgestellte Verfahren. Ein direktes mechanisches Verfahren einer Laserdiode würde zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Die resultierende Erwärmung der Probe wird mit einer InSb-IR-Kamera (640 x 512 Pixel bei 100 Hz Bildwiederholrate) aufgenommen, wobei sich die Kamera in einer festen Position in Bezug auf die Probe befindet. Der untersuchte Bereich wird sukzessive in parallelen Linien gleicher Richtung abgescannt. Der Abstand zwischen zwei Linien wird entsprechend dem Fokussdurchmesser des Lasers gewählt. Die besten Ergebnisse wurden mit konstanten Scangeschwindigkeiten zwischen 20 und 100 mm/s erreicht.

Als umfassend charakterisierter Probekörper kam ein Schienenstück mit Rollkontaktermüdungsrissen (oft auch als "head checks" bezeichnet) zum Einsatz. Die enthaltenen Risse haben eine typische Länge von 20 mm und einen Abstand zueinander von weniger als 4 mm. Um die Emissivität zu erhöhen, wurde die Probe mit Graphit beschichtet. Die Probe weist ein sehr homogenes Fehlerbild auf. Außerdem ist sie ferromagnetisch, was die Anwendung magnetischer Verfahren als Referenzverfahren zur besseren Einordnung der Ergebnisse der thermografischen Methode ermöglicht.

Hierzu wurde die Probe an der in Abbildung 2 b gezeigten Magnetisierungsbank in Längsrichtung (entspricht in allen gezeigten Abbildungen der vertikalen Achse) aufmagnetisiert. Das angelegte Tangentialfeld betrug in der Probenmitte (außerhalb des Materials) 6,6 kA/m und direkt über den Rissen 7,5 kA/m. Zum Nachweis der Risse wurde eine Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO 9934 durchgeführt. Außerdem kam eine GMR-Messung (giant magneto resistance) mit dem von Pelkner et al. in Ref. 6 beschriebenen System zum Einsatz. Die verwendeten Sensoren lassen sich wegen des zugrunde liegenden quantenmechanischen Wirkprinzips sehr klein fertigen. Die sensitiven Flächen besitzen eine Größe im mittleren  $\mu\text{m}$ -Bereich. Die resultierende Ortsauflösung ist im Vergleich zu AMR- oder Hall-Sensoren bei gleichbleibender Signalempfindlichkeit deutlich höher. Zur Messung wurde die Probe abgerastert. Der Abstand der einzelnen Messpunkte entlang des Linienscans betrug ca. 50  $\mu\text{m}$ , der zwischen zwei Linien lag bei 100  $\mu\text{m}$ .





**Abbildung 2.** a: Foto des verwendeten Probekörpers: Ausschnitt aus einer Eisenbahnschiene mit dem Profil S54, zur Emissivitätssteigerung mit Graphit beschichtet. Mit A und B sind die im Text beschriebenen Messbereiche bezeichnet. b: Foto der zur Magnetpulverprüfung verwendeten Magnetisierungsbank.

## 2. Messdatenanalyse-Algorithmus

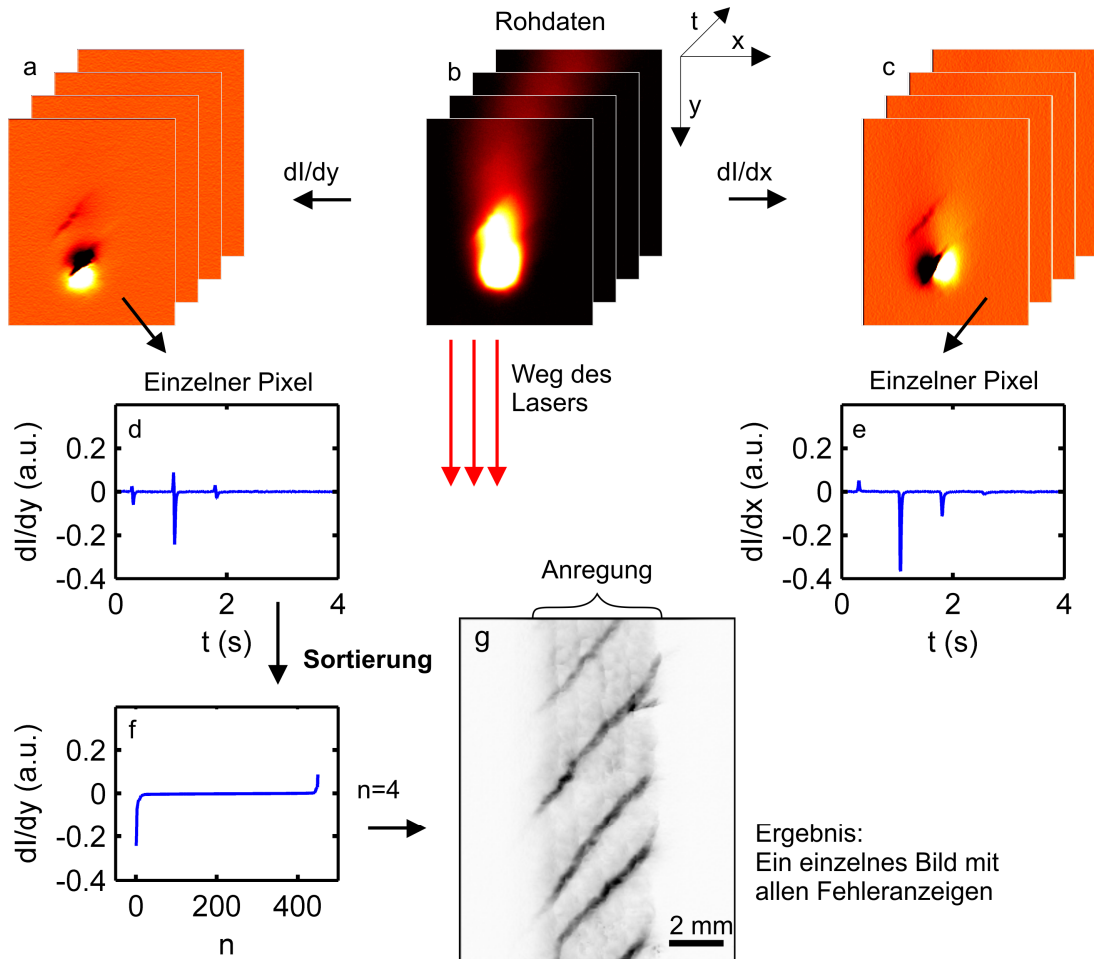
Bevor der zur thermografischen Prüfung verwendete Algorithmus vorgestellt wird, soll zunächst erläutert werden, wie es zur thermischen Signatur der Risse kommt. Am einfachsten lässt sich der physikalische Zusammenhang an der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung erklären:

$$\vec{q} = -k\nabla T = -R_{th}^{-1}\nabla T \quad \text{Gl. 1}$$

Hierin bezeichnet  $q$  den gerichteten Wärmefluss,  $k$  die Wärmeleitfähigkeit,  $R_{th}$  den thermischen Widerstand und  $\nabla T$  den Temperaturgradienten. Nimmt man nun einen konstanten Wärmefluss  $q$  an, so führt ein lokalisierter thermischer Widerstand – z.B. durch einen Riss verursacht – zu einem hohen Wert von  $\nabla T$  an dieser Stelle. Hier kommt es also zu einem Sprung in der Temperaturverteilung. Zwar stellt diese Annahme eine Vereinfachung zu den tatsächlichen Bedingungen bei einer lokalen Anregung dar, jedoch bleibt die qualitative Aussage gültig. Des Weiteren verhindert der thermische Widerstand eines Risses die Abkühlung, wenn der Laser das Material in seiner Nähe erwärmt. Dies führt, wenn die Temperaturverteilung nach der Anregung der gesamten Probe betrachtet wird, zu höheren Maximal-Temperaturen in der direkten Umgebung der Risse und so schließlich zum Kontrast in den thermografischen Aufnahmen.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des von uns vorgeschlagenen Algorithmus. Ausgehend von den Rohdaten (a) werden zunächst einzelbildweise die ersten räumlichen Ableitungen in zwei orthogonalen Richtungen, die Projektion von  $\nabla T = -R_{th}\vec{q}$  auf die jeweilige Richtung, gebildet (a und c). Das Ergebnis dieser Berechnung sind zwei Sequenzen mit den räumlichen Ableitungen von jedem Einzelbild. Da beim direkten Durchgang des Lasers für jeden Pixel die höchsten Temperaturen erreicht werden, kommt es zu diesem Zeitpunkt auch zu den höchsten Gradienten (siehe d und e). Um diesen Wert für jeden einzelnen Pixel in einem einzigen Ergebnisbild darzustellen, wird nun zu folgendem Vorgehen gegriffen: Die beiden Sequenzen der Ableitungen werden zu einer Sequenz zusammen gefasst. Diese wird nun pixelweise entlang der Zeitachse nach den Werten der Ableitungen sortiert (f). Das erste und das letzte Bild entsprechen nun dem Minimum bzw. Maximum. In diesen Einzelbildern sind alle Fehleranzeigen vorhanden.

Noch bessere Ergebnisse konnten erzielt werden, wenn nicht direkt die Bilder der Extremwerte, sondern benachbarte Bilder herangezogen werden, wie in diesem Beispiel das 4. Bild (g) der sortierten Sequenz. Nur so ist es möglich, Ausreißer, wie sie z. B. durch das Rauschen der Kamera oder einmalige Ereignisse, wie z. B. das Verbrennen von Staub auf der Probenoberfläche, auftreten können, zu unterdrücken.



**Abbildung 3.** Schematische Darstellung des Algorithmus zur Risserkennung. Die Probe wird mit dem Laser im zu untersuchenden Bereich nahezu flächendeckend abgescannert. Im so erhaltenen Messfilm können Risse anhand von Intensitätssprüngen in der thermischen Signatur des Lasers erkannt werden (b). Diese Anzeigen lassen sich durch die Anwendung von räumlichen Ableitungen verstärken (a, c). Für jeden Pixel treten die höchsten Werte beim direkten Durchlauf des Lasers auf, in der angrenzenden Scanlinie kommt es zu kleineren Ausschlägen (d, e). Um diese extremen Werte für jeden Pixel in einem einzigen Bild zusammenzufassen, wird der abgeleitete Messfilm für jeden Pixel entlang der Zeitachse in Reihenfolge der erreichten Werte sortiert (f). Ein geeignetes Einzelbild aus diesem Datensatz enthält dann alle relevanten Fehleranzeigen (g).

### 3. Ergebnisse

In Abbildung 4 ist das Ergebnis einer thermografischen Prüfung (a und d) auf Grundlage des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Auswertungsverfahrens des Bereichs B aus Abbildung 2 a zusammen mit dem Ergebnis der Magnetpulverprüfung (b und e) für denselben Bereich und dem der GMR-Streifelfeld-Messung (c) für einen geringfügig

schmalere Bereich gezeigt. Alle Fehleranzeigen aus dem Ergebnis der Magnetpulverprüfung treten sowohl im Ergebnisbild der thermografischen Prüfung als auch im dem der GMR-Messung auf. Dabei konnten Risse mit einem Abstand von unter einem Millimeter getrennt aufgelöst werden. Im oberen Bereich der Ausschnittsvergrößerung (c) werden die Auflösungsgrenzen deutlich. Die durch den Pfeil markierten Risse, die einen Abstand von etwa einem halben Millimeter zueinander haben, können mit dem thermografischen Verfahren nicht mehr getrennt aufgelöst werden, mit der Magnetpulverprüfung jedoch schon.

Die Magnetpulverprüfung führt insgesamt zur höchsten räumlichen Auflösung. Jedoch variiert die Erkennbarkeit der Rissanzeigen stark. So sind die Rissanzeigen insbesondere im oberen Bereich nur schwer auszumachen. Bei der GMR-Prüfung treten alle Rissanzeigen eindeutig hervor. Jedoch weist das Ergebnisbild Artefakte durch die wegen der Krümmung der Probe nötigen Neujustage des Verfahrensystems für den Sensor auf. Das einheitlichste Bild ergibt die thermografische Prüfung.

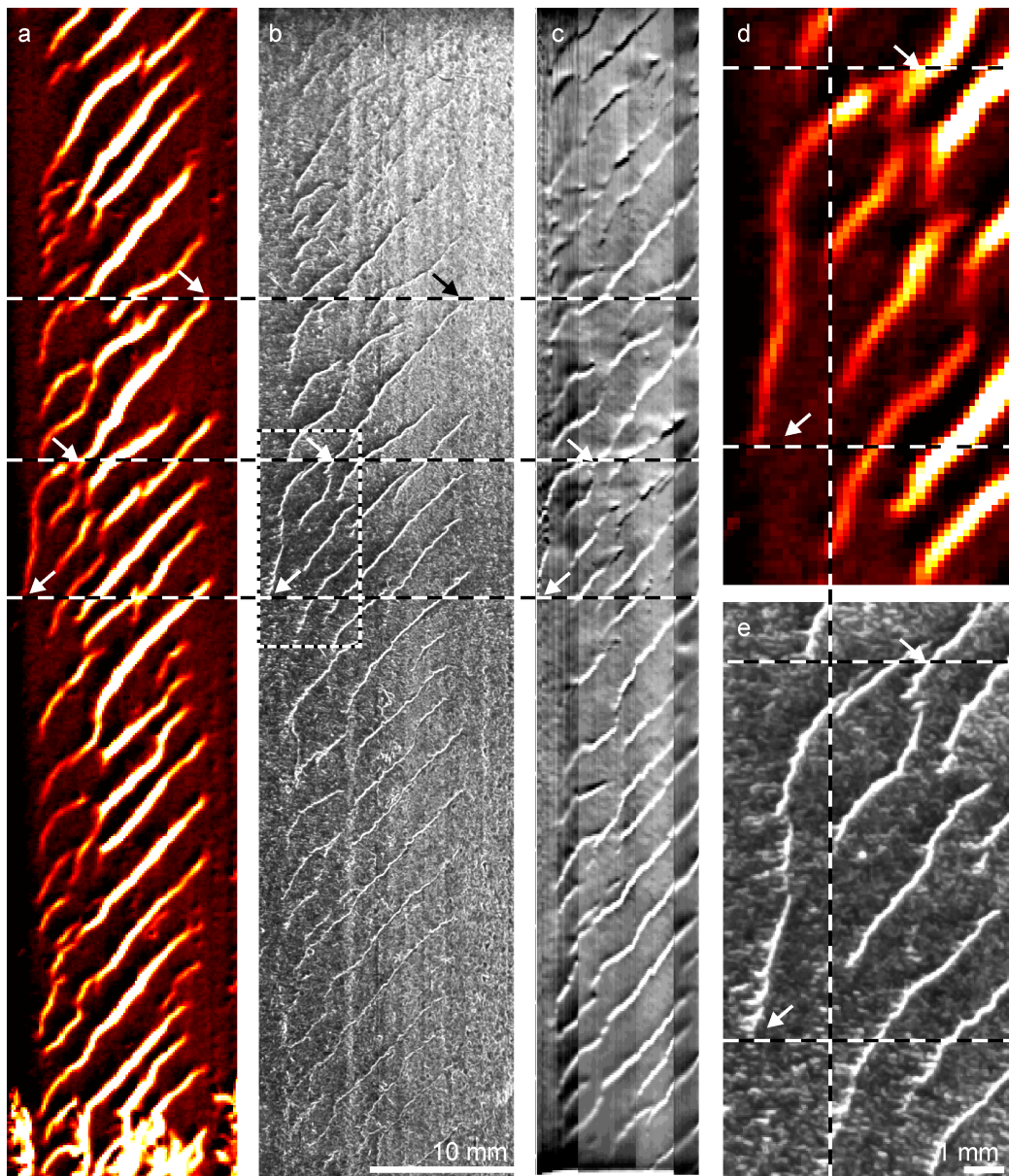
#### **4. Zusammenfassung und Diskussion**

Es wurde eine neue Herangehensweise zur Flying-Spot-Thermografie vorgestellt, die allein auf kommerziell erhältlichen Geräten basiert. Zur Datenauswertung werden zunächst bildweise die ersten räumlichen Ableitungen in zwei orthogonalen Richtungen gebildet. Der resultierende Datensatz wird dann entlang der Zeitachse sortiert und daraus ein Ergebnisbild ausgewählt, das alle Fehleranzeigen erhält. Durch Sortierung werden keine weiteren Informationen über die Position des Lasers benötigt, so dass auf eine Synchronisation zwischen diesem und der IR-Kamera verzichtet werden kann.

Um die Machbarkeit des Verfahrens zu zeigen, wurde ein Schienenstück mit Rollkontaktermüdungsrissen untersucht. Zum Vergleich wurde dieselbe Probe mittels zweier magnetischer Verfahren untersucht: der klassischen Magnetpulverprüfung und einem GMR-Verfahren. Mit sämtlichen Verfahren konnten alle enthaltenen Fehler nachgewiesen werden.

#### **Referenzen**

- [1] Kubiak E.J.. Infrared detection of fatigue cracks and other near-surface defects. Applied Optics, 7(9):1743, 1968.
- [2] Gruss C., Balageas D., "Theoretical and experimental applications of the flying spot camera", Proc. QIRT 92 (Seminar Eurotherm No. 27), p. 19-24, 1992.
- [3] Legrandjacques L., Piriou M., Gros J., Gente D., "On site Tubes to plate welds Inspection by Photothermal Camera", 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Com-ponents, May 24-26, 2000, New Orleans, Louisiana USA.
- [4] Joubert P.-Y., Hermosilla-Lara S., Placko D., Lepoutre F., Piriou M., Enhancement of open-crack detection in flying-spot photo-thermal non-destructive testing using physi-cal effect identification, QIRT Journal, Vol. 3, No 1 (2006), pp. 53-70.
- [5] Li T., Almond D.P., Andrew D., Rees S., Weekes B., Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography. NDT & E International, Vol. 44, Issue 2, pp. 216-225, 2011
- [6] Pelkner M., Reimund V., Blome M., Thomas H.-M., Kreutzbruck M., „3D-GMR-Messung an Referenzbauteilen und Rekonstruktion der Rissparameter“. Konferenzbeitrag DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt



**Abbildung 4.** Vergleich der Ergebnisse der thermografischen Prüfung mit denen einer Magnetpulverprüfung und einer GMR-Streifelfeld-Messung im gesamten Probenbereich (siehe Abbildung 2 a: Bereich B). a: Gemeinsam sortierte erste Ableitungen der thermografischen Prüfung; b: Foto des Ergebnisses der Magnetpulverprüfung. c: Ergebnis der GMR-Streifelfeld-Messung. d und e: Ausschnittsvergrößerungen der thermischen Prüfung und der Magnetfeldprüfung des in b eingezeichneten Bereichs. In d ist die auflösungsbegrenzende Pixelstruktur deutlich zu erkennen.