

# Vergleich konventioneller und neuer Oberflächenprüfverfahren für ferromagnetische Werkstoffe

Ralf CASPERSON<sup>1</sup>, René HEIDEKLANG<sup>1</sup>, Philipp MYRACH<sup>1</sup>, Yener ONEL<sup>1</sup>,  
Matthias PELKNER<sup>1</sup>, Rainer POHL<sup>1</sup>, Robert STEGEMANN<sup>1</sup>, Mathias ZIEGLER<sup>1</sup>,  
Marc KREUTZBRUCK<sup>(1),2</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> Institut für Kunststofftechnik (IKT), Stuttgart

**Kurzfassung.** Sicherheitsrelevante und zyklisch hoch belastete Bauteile erfordern zur Vermeidung von kostenintensiven Ausfällen besonders stabile Prozessparameter. Bereits sehr kleine Randzonenfehler können unter zyklischer Bauteilbelastung zu Risswachstum und letztendlich zum Bauteilversagen führen. Die frühzeitige Erkennung von Randzonenfehler in Hochleistungsbauteilen wie z.B. Zahnräder, Ritzelwellen und Kurbelwellen erfordert daher eine leistungsfähige zerstörungsfreie Oberflächenrissprüfung, die es ermöglicht in den hochbeanspruchten Funktionsflächen auch Härterisse, Schleifrisse oder Zundereinschlüsse zu detektieren.

Hierzu sind in den letzten Jahren einige neue, innovative Oberflächenprüfverfahren wie die laserangeregte Thermografie und die Streuflussprüfung mit hochauflösenden GMR-Sensoren oder magnetooptischen Verfahren entwickelt worden. Zusätzlich zur hohen Empfindlichkeit zeichnen sich diese innovativen Verfahren durch einen schnellen und teils auch berührungslosen Einsatz aus. Da die noch relativ neuen Verfahren naturgemäß noch nicht normativ verankert sind, wurden auch bereits erste Validierungen durchgeführt. Um die Leistungsfähigkeit der Verfahren eingehend zu untersuchen, erfolgten Testreihen an verschiedenen Testkörpern in Bezug auf Ortsauflösung, Empfindlichkeit, Automatisierung und Bewertung der Messsignale.

Neben den neuen Verfahren und ihren ersten Schritten hin zur Validierung kamen als Referenz auch die „klassischen“ Verfahren der Magnetpulver- und Wirbelstromprüfung zum Einsatz, deren Leistungsfähigkeit durch angepasste Sondenentwicklung auch für sehr kleine Oberflächendefekte nochmals unter Beweis gestellt wurde. Zusätzlich wurde an einigen Testkörpern eine hochauflösende CT durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Vergleiches werden vorgestellt und Möglichkeiten sowie Grenzen der einzelnen Verfahren herausgearbeitet.

## Einführung

Künstliche, z. B. funkenerosiv hergestellte Referenzfehler sind nur bedingt dazu geeignet, die Leistungsfähigkeit verschiedener Prüfverfahren in Bezug auf natürliche Inhomogenitäten zu beurteilen, da die Referenzfehler in der Regel breiter als natürliche Inhomogenitäten sind. Außerdem besitzen natürliche Inhomogenitäten selten eine so regelmäßige Geometrie wie die künstlichen Referenzfehler. Für den Vergleich der neuen und klassischen Prüfverfahren wurden an der BAM Untersuchungen an einem Vergleichskörper 1 nach ISO 9934-2 [4] durchgeführt. Dieser Vergleichskörper 1 (Stahlscheibe aus



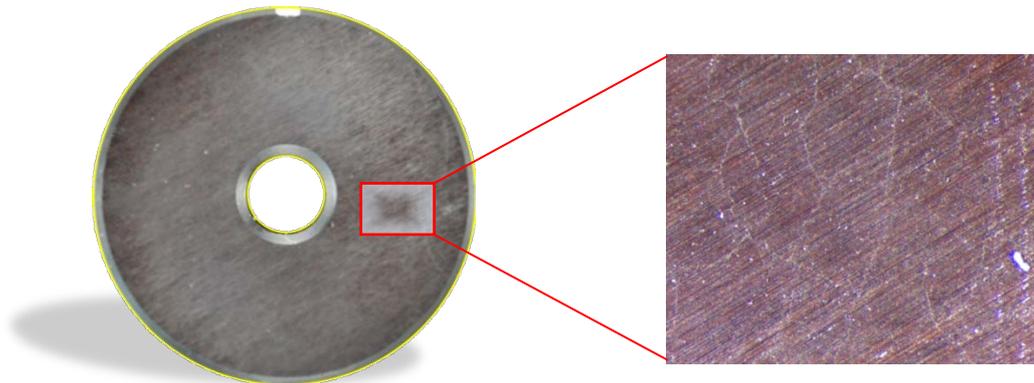
90MnCrV8, gehärtet und gebeizt, 50 mm Außen-Ø, 10,5 mm Innen-Ø, 9,7 mm Dicke) sollte ein enges Netz aus groben Schleif- und feinen Spannungskorrosionsrissen, die besondere Anforderungen an die örtliche Auflösung der Prüfverfahren stellen. Das untersuchte Exemplar weist jedoch nur die feineren Spannungskorrosionsrisse mit Rissbreiten zwischen 0,1 µm und 3 µm auf. Der Vergleichskörper 1 ist mit einem durch die Bohrung durchgesteckten Leiter remanent zirkular magnetisiert, so dass während der Magnetpulver- und Streuflussprüfung keine weitere Magnetisierung erforderlich ist.

Zu den einzelnen Verfahren sind die allgemeinen ISO-, EN-, bzw. DIN-Normen aufgeführt. Andere Regelwerke sowie produktspezifische Normen sind dabei nicht berücksichtigt.

### Sichtprüfung (VT)

Die Sichtprüfung ist das älteste Oberflächenprüfverfahren. Es kommt in vielen Fällen ohne Hilfsmittel aus. Bei kleinen Inhomogenitäten kann eine Lupe oder ein Mikroskop, bei schwierigen Geometrien der Einsatz von Spiegeln oder Endoskopen erforderlich sein. Neben der visuellen Zugänglichkeit ist eine ausreichende Beleuchtungsstärke eine notwendige Voraussetzung für die Sichtprüfung. Eine Tiefenbewertung ist möglich, sofern es gelingt, in die Inhomogenität hineinzusehen.

Am Vergleichskörper 1 sind mit bloßem Auge nur die Oberflächenstruktur, jedoch keine Risse erkennbar. Erst unter dem Mikroskop werden die Risse sichtbar (Abb. 1).

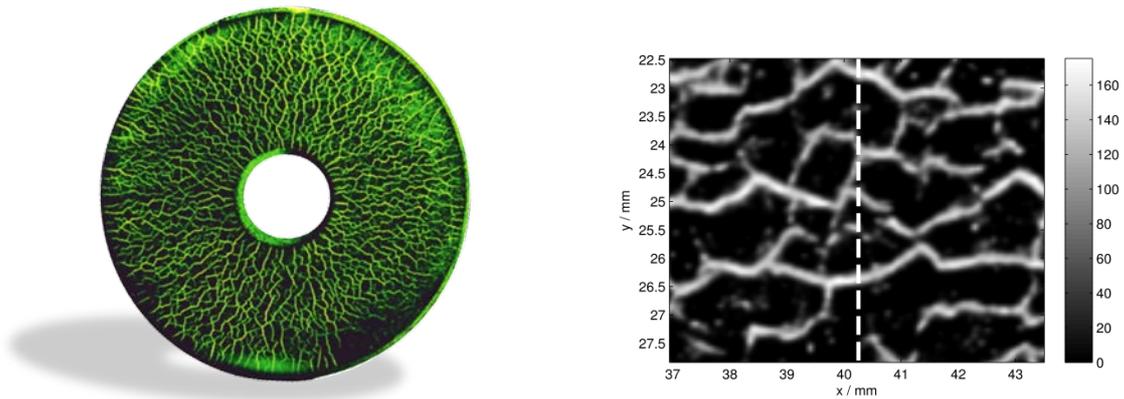


**Abb. 1: Sichtprüfung am Vergleichskörper 1  
rechts: Mikroskopie, vergrößerter Ausschnitt ca. 5 × 7 mm<sup>2</sup>**

Obwohl es sich bei der Sichtprüfung um das älteste ZfP-Verfahren handelt, gibt es auf internationaler Ebene bisher nur die ISO 3058 zur Auswahl schwach vergrößernder Linsen. Die Sichtprüfung selbst ist nach den europäischen Standards EN 1330–10 [7], EN 13018 [8] und EN 13927 [9] genormt.

### Magnetpulverprüfung (MT)

Der Vergleichskörper 1 ist remanent in zirkularer Richtung magnetisiert. Dementsprechend werden Risse in radialer Richtung (senkrecht zum remanenten Magnetfeld) deutlich angezeigt, während Risse in Umfangsrichtung (parallel zum remanenten Magnetfeld) kaum erkennbar sind (Abb. 2).



**Abb. 2: Magnetpulverprüfung am Vergleichskörper 1, Referenzfoto der Helling GmbH rechts: gleicher Ausschnitt wie in Abb. 1**

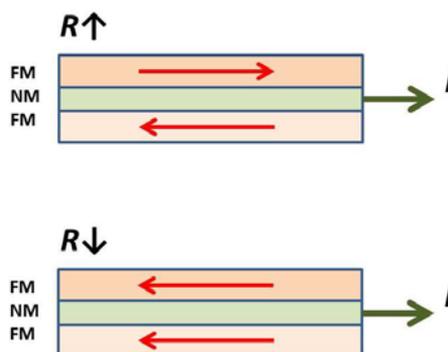
Die Magnetpulverprüfung ist ein schnelles, bildgebendes Verfahren, das für ferromagnetische Bauteile nahezu jeder Größe und Geometrie geeignet ist. Am jeweiligen Prüfort muss lediglich eine ausreichend hohe Magnetisierung sichergestellt werden und eine visuelle Zugänglichkeit gegeben sein. Das Verfahren kommt jedoch nicht ohne Verbrauchsmaterialien (Magnetpulver-Suspension, ggf. Reiniger) aus, die umweltgerecht entsorgt werden müssen. Bei der Verwendung fluoreszierender Prüfmittel sind außerdem Schutzmaßnahmen vor UV-Strahlung bzw. intensivem Blaulicht zu beachten.

Eine Fehlertiefenbewertung ist mit diesem Verfahren nicht möglich.

Die Magnetpulverprüfung ist nach den internationalen Standards ISO 3059 [2] und ISO 9934, Teil 1 bis 3 [4] genormt.

### Streulichtprüfung mit Magnetfeldsensoren (GMR)

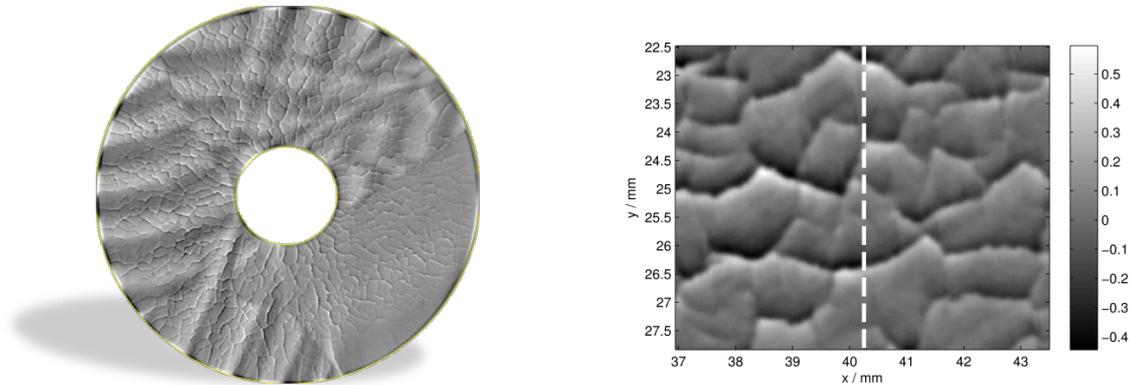
Eine Alternative zur Magnetpulverprüfung stellt die Streulichtprüfung mit Magnetfeldsensoren dar. Hierbei lassen sich verschiedene physikalische Effekte wie z. B. der Hall- oder der GMR-Effekt zur Messung des Magnetfeldes ausnutzen.



**Abb. 3: GMR-Effekt für zwei verschiedene Magnetisierungszustände der ferromagnetischen Schichten (FM), die durch eine nichtmagnetische, stromleitende Schicht (NM) voneinander getrennt sind.**

Ein GMR (*engl.*: giant magneto resistance; Riesenmagnetwiderstand) besteht aus einem mehrlagigen Schichtsystem aus mindestens zwei ferromagnetischen Schichten (FM), die durch eine nichtmagnetische Schicht (NM) voneinander getrennt sind [13][16] (Abb. 3). Je nachdem, wie die Magnetisierungen der einzelnen FM-Schichten zueinander ausgerichtet sind, stellt sich ein unterschiedlicher elektrischer Widerstand  $R$  ein. Bei anti-paralleler Ausrichtung ist der elektrische Widerstand des GMRs hoch, bei paralleler Ausrichtung niedrig. Wird die Magnetisierung der einen FM-Schicht fixiert („gepinnt“), während sich die Mag-

netisierung der anderen FM-Schicht von einem äußeren Magnetfeld beeinflussen lässt, erhält man einen magnetfeldabhängigen Widerstand, der sich zur quantitativen Messung des Streufeldes eignet. Aufgrund ihrer sensitiven Flächen im  $\mu\text{m}^2$ -Bereich lässt sich mit diesen hochauflösenden Magnetfeldsensoren, die u. A. in Festplatten als Leseköpfe verwendet werden [19], bei der Streuflussprüfung eine ähnliche gute Ortsauflösung wie bei der Magnetpulverprüfung erreichen (Abb. 4).



**Abb. 4: Streuflussprüfung am Vergleichkörper 1 mit GMR-Sensoren  
rechts: gleicher Ausschnitt wie in Abb. 1**

Die Vorteile der Streuflussprüfung mit GMR-Sensoren gegenüber der Magnetpulverprüfung liegen darin, dass keine Verbrauchsmaterialien anfallen und weder Schutzmaßnahmen vor UV-Strahlung bzw. intensivem Blaulicht noch eine Verdunkelung notwendig sind. Die Magnetfeldsensoren liefern außerdem ein tiefenabhängiges Streuflusssignal, das eine Bewertung der Schädigungstiefe ermöglicht [20][21].

Der Nachteil der Magnetfeldsensoren liegt darin, dass sie das Magnetfeld nur punktuell messen und der Prüfgegenstand, um ein Abbild der Oberfläche zu erhalten, in engem Spurabstand abgescannt werden muss. Die Streuflussprüfung mit Magnetfeldsensoren eignet sich daher nur für Prüfgegenstände mit relativ einfacher, leicht abzutastender Geometrie. Je nach abzutastender Fläche und Anzahl der Messspuren ergeben sich u. U. deutlich höhere Prüfzeiten als bei der Magnetpulverprüfung. Zudem muss gewährleistet werden, dass der Abstand zwischen Sensor und Oberfläche im Bereich von wenigen  $100\ \mu\text{m}$  liegt, damit ein noch ausreichend großes Streufeld, welches mit zunehmenden Abstand quadratisch abnimmt, gemessen werden kann [14].

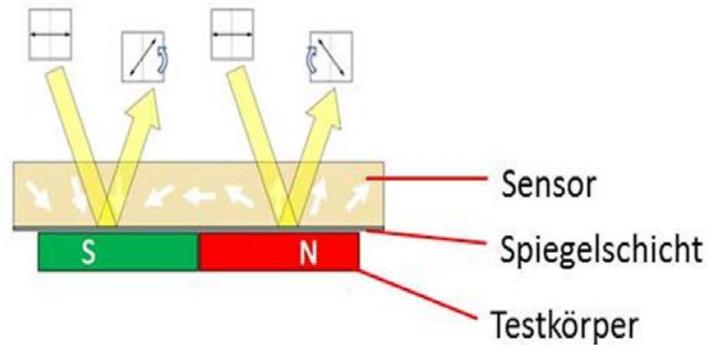
Das Streifenmuster ist eine Eigenschaft des verwendeten Vergleichskörpers 1 und deutet auf eine zusätzliche remanente Magnetisierung hin, die von der eingebrachten zirkularen Magnetisierung abweicht. Bei genauem Hinsehen deutet sich diese Streifenstruktur auch in der Magnetpulveranzeige (Abb. 2) an.

Zur Streuflussprüfung mit Magnetfeldsensoren existiert die DIN 54136:1988 [11], die jedoch nur Hallsonden und Fluxgates berücksichtigt, da moderne Magnetfeldsensoren wie GMR im Erscheinungsjahr der Norm noch nicht zur Verfügung standen. Europäische oder internationale Standards existieren nicht.

### **Magnetooptische Streuflussprüfung (MO)**

Eine noch höhere Ortsauflösung erreicht man mit magnetooptischen Sensoren basierend auf dem Faraday-Effekt [13]. Bei diesen Sensoren wird polarisiertes Licht durch eine einseitig verspiegelte, magnetooptische Schicht geleitet. Die magnetooptische Schicht ändert die Polarisationsrichtung des Lichtes in Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes

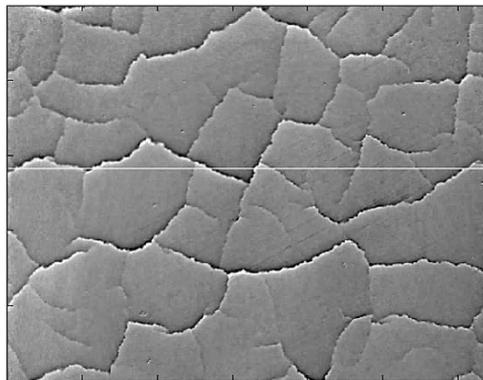
(Abb. 5). Mit Hilfe eines Polarisationsfilters erhält man ein direktes Abbild der magnetischen Feldstärke an der Oberfläche des Prüfbodentes.



**Abb. 5: Faraday-Effekt**

Die hohe optische Auflösung erkauft man sich jedoch mit einer relativ kleinen Prüffläche, die von der Optik sowie dem CCD-Chip der Kamera abhängt. Das eingesetzte System „mageye“ der Fa. Matesy [24] besitzt eine sensitive Fläche von ca.  $5 \times 7 \text{ mm}^2$  (Abb. 6). Eine Darstellung des gesamten Prüfbodentes ist nur durch Abrastern mit anschließender Bildmontage möglich. Zudem ist eine kontaktlose Prüfung hier nicht möglich. Die Prüfsonde muss auf das Bauteil aufgesetzt werden. Hierdurch kann es bei nicht ordnungsgemäßer Durchführung zu Schädigungen der MO-Schicht kommen.

Es lassen sich nur ebene Flächen prüfen. Wie die Magnetfeldsensoren liefern auch MO-Schichten ein tiefenabhängiges Streuflusssignal, das eine Bewertung der Schädigungstiefe ermöglicht [20][21].



**Abb. 6: Streuflussprüfung am Vergleichskörper 1 mit magnetooptischem Sensor (MO), Prüffläche ca.  $5 \times 7 \text{ mm}^2$ , gleicher Ausschnitt wie in Abb. 1**

Zur Streuflussprüfung mit magnetooptischen Sensoren existiert bisher noch keine Norm.

### **Farbeindringprüfung (PT)**

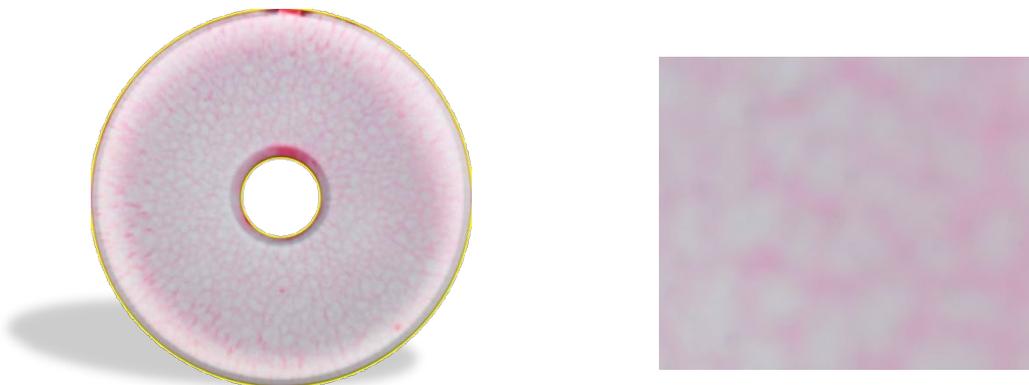
Die Farbeindringprüfung ist als etabliertes Prüfverfahren weit verbreitet und sehr flexibel einsetzbar. Es können nahezu alle Materialien und Geometrien mit hoher Empfindlichkeit geprüft werden. Die Farbeindringprüfung ist wie die Magnetpulverprüfung direkt bildgebend, im Gegensatz zu dieser jedoch richtungsunabhängig. Die Oberfläche muss staub- und fettfrei sein. Nachzuweisende Inhomogenitäten müssen zur Oberfläche offen und frei von Verunreinigungen sein. Dies erfordert eine gründliche Reinigung. Wiederholungsprüfungen sind nur eingeschränkt möglich, da sich eingetrocknete Prüfmittelreste nur schwer aus den

Inhomogenitäten herauswaschen lassen und diese ein erneutes Eindringen des Prüfmittels behindern.

Von den hier vorgestellten Oberflächenprüfverfahren ist die Farbeindringprüfung das Verfahren mit dem höchsten manuellen Arbeitsaufwand (Vorreinigung zur Entfernung von Schmutz und Fett, Auftragen des Farbeindringmittels, Zwischenreinigung, Trocknung, Auftragen des Entwicklers, Inspektion und Dokumentation der Rissanzeigen, Endreinigung zur Entfernung von Farbeindringmittelresten und Entwickler).

Anhand des Vergleichskörpers 1 mit seinem dichten Netzwerk aus Mikrorissen zeigt sich deutlich, dass auch trotz eines hohen Arbeitsaufwandes die prinzipiell sehr hohe Ortsauflösung der Farbeindringprüfung nicht immer zum gewünschten Ergebnis führt. Am besten sind die feinen Risse des Vergleichskörpers 1 kurz nach dem Auftragen des Entwicklers im noch feuchten Zustand zu erkennen (Abb. 7). Schon nach kurzer Zeit verlaufen die Anzeigen ineinander und die Oberfläche färbt sich einheitlich rosa.

Der Vergleichskörper 1 ist nur bedingt für die Farbeindringprüfung geeignet, da die Risse während der Herstellung durch das Beschleifen der Oberfläche teilweise zuge­schmiert werden, so dass nur wenig Prüfmittel in die Risse eindringen kann.

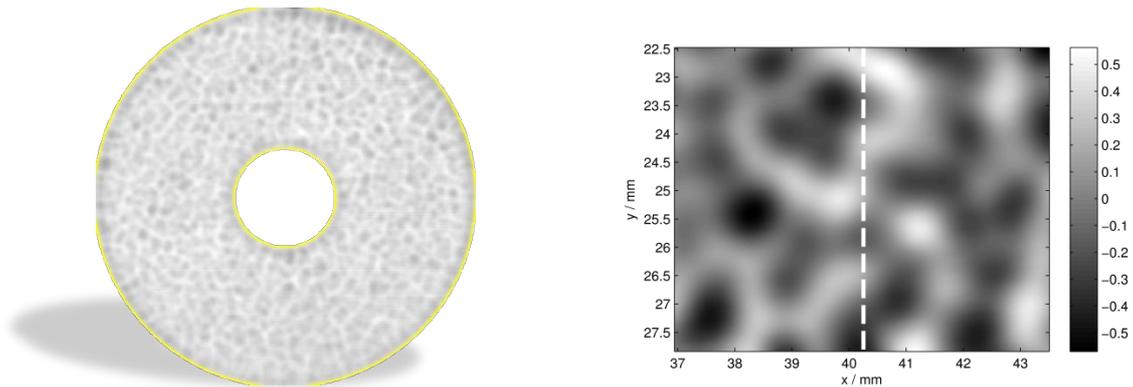


**Abb. 7: Farbeindringprüfung am Vergleichskörper 1  
rechts: gleicher Ausschnitt wie in Abb. 1**

Die Farbeindringprüfung ist nach internationalem Standard in der ISO 3059 [2] und ISO 3452, Teil 1 bis 6 [3] genormt.

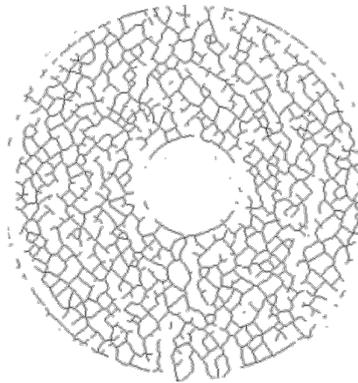
### **Wirbelstromprüfung (ET)**

Für die bildgebende Wirbelstromprüfung wurde eine für Abbildungszwecke optimierte, richtungsunabhängige Absolutsonde mit einer Wirkbreite  $< 1$  mm verwendet [17]. Wie auch beim GMR ist ein flächenhaftes Abscannen der Oberfläche erforderlich. Daraus ergeben sich ähnliche Einschränkungen für die Bauteilgeometrie wie bei der Verwendung von GMRs. Aufgrund der geringeren Ortsauflösung kann beim Abscannen ein gröberes Raster gewählt werden, woraus sich kürzere Scannzeiten ergeben. Die Wirbelstromprüfung ist auf elektrisch leitfähige Materialien beschränkt. Eine Tiefenbewertung ist in gewissen Grenzen mit Hilfe einer Kalibrierung an künstlichen Referenzfehlern möglich. Die örtliche Auflösung der verwendeten Wirbelstromsonde reicht jedoch nicht aus, um die feinen Rissfelder des Vergleichskörpers 1 aufzulösen. Es entstehen vielmehr schwer interpretierbare Überlagerungsanzeigen. Eine Risstiefenbestimmung ist aufgrund der Überlagerungen kaum möglich (Abb. 8).



**Abb. 8: Wirbelstromprüfung mit Absolutsonde  
rechts: gleicher Ausschnitt wie in Abb. 1**

Trotz der Überlagerungsanzeigen gelingt durch lokale Schätzung der Hessematrix (Bildung der zweiten Ableitung) mit anschließender Schwellwertbildung [18] eine teilweise Detektion der Risse (Abb. 9). Die Tiefeninformation geht bei dieser Art der automatischen Rissdetektion jedoch verloren.



**Abb. 9: Rissdetektion am Wirbelstromprüfergebnis**

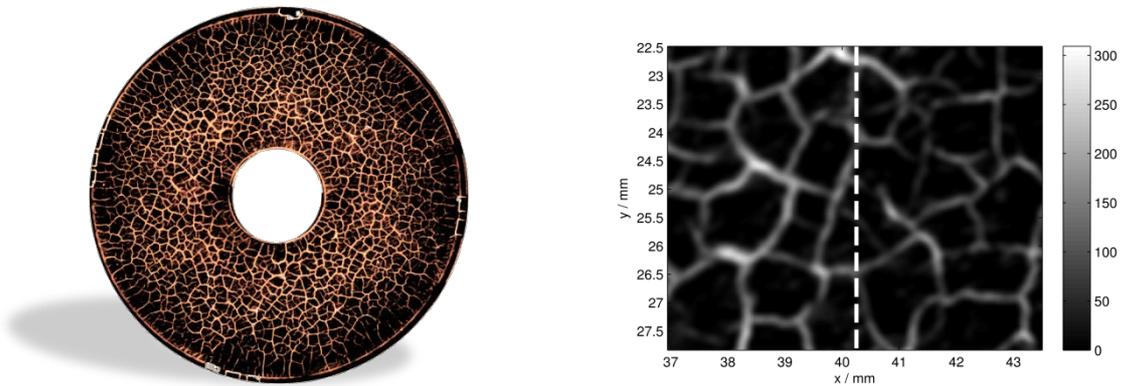
Die Wirbelstromprüfung ist nach internationalem Standard in der ISO 12718 [5] und ISO 15548, Teil 1 bis 3 [6] genormt.

### **Thermografie (TT)**

Die aktive Thermografie mit flächenhafter Anregung durch Blitzlampen, Heizstrahler, o. Ä. ist gut geeignet, um flächenhafte Inhomogenitäten parallel zur Oberfläche wie z. B. Delamination in Faserverbundwerkstoffen nachzuweisen. Risse, die senkrecht zur Prüfoberfläche verlaufen, lassen sich bei flächenhafter Anregung dagegen nicht detektieren, da die Wärme ungehindert an ihnen vorbeifließen kann.

Anders bei der aktiven Laser-Thermografie mit ihrer punktförmigen Anregung [21]: Vom Laserpunkt breitet sich die Wärme in alle Richtungen aus. Befindet sich der Laserpunkt neben einem Riss, kommt es an der Rissflanke zu einem Wärmestau, der sich als lokale Temperaturerhöhung mit einer Infrarotkamera detektieren lässt. Wird der Laser mit einer Scaneinheit über den Bildausschnitt der Infrarotkamera bewegt, lässt sich aus der Bildsequenz ein flächenhaftes Thermogramm der Prüfoberfläche erzeugen [21][23] (Abb. 10). Für das Prüfergebnis in Abb. 9 wurden 8 Einzelaufnahmen (45° Kreissegmente) zusammengesetzt. Es kam ein fasergekoppelter Hochleistungsdiodenlaser mit einer Wellenlänge von  $(940 \pm 10)$  nm und einem Fokussdurchmesser von ca. 1,5 mm zum Einsatz, die Ausgangsleistung betrug  $(5 \pm 1)$  W und die Scangeschwindigkeit  $6 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Die eingesetzte

InSb-Infrarotkamera wurde mit einer Bildwiederholrate von 100 Hz und einer Ortsauflösung von ca. 40  $\mu\text{m}$  betrieben.



**Abb. 10: Laser-Thermografie am Vergleichkörper 1  
rechts: gleicher Ausschnitt wie in Abb. 1**

Im Gegensatz zur Magnetpulver- und Streuflussprüfung ist die Thermografie richtungsunabhängig, d. h. Risse werden unabhängig von ihrer Orientierung mit der gleichen Empfindlichkeit angezeigt. Die Thermografie ist nicht auf ferromagnetische oder elektrisch leitfähige Werkstoffe beschränkt sondern lässt sich auch auf Kunststoffe und Keramik anwenden. Ein gewichtiger Vorteil der Laserthermografie liegt in der Möglichkeit große Arbeitsabstände bis in den Meterbereich realisieren zu können; im gezeigten Beispiel wurden 46 cm eingestellt. Auch für den Fall reflektierender Werkstücke (z. B. Chrom, Aluminium) kann das Verfahren eingesetzt werden, wenn eine ausreichende Laserleistung zur Verfügung steht. Im gezeigten Fall wurden lediglich 5 W von möglichen 500 W verwendet. Zur Detektion mikroskopischer Risse müssen dann jedoch hohe Ortsauflösungen und entsprechend lange Scanzeiten von 1...20 s/cm<sup>2</sup> –im gezeigten Beispiel insgesamt ca. 8 min– eingeplant werden.

Die Thermografie ist ein relativ junges Prüfverfahren, das entsprechende Regelwerk befindet sich noch im Aufbau. Bisher existiert zur aktiven Thermografie nur die DIN 54192 [12]. Die hier verwendete Laser-Thermografie ist jedoch nicht Bestandteil dieser Norm.

### **Radiografie (CT, RT)**

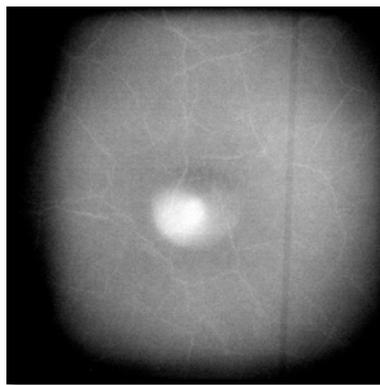
Als Referenz wollten wir mit Hilfe der Mikro-CT ein dreidimensionales Abbild der Risse im Vergleichkörper 1 erstellen.

Mit der verfügbaren Energie der  $\mu\text{CT}$ -Anlage der BAM von 180 kV lässt sich der Vergleichkörper 1 nur axial und nicht radial durchstrahlen. Um die notwendige hohe Auflösung der Radiographie von etwa 3  $\mu\text{m}$  durch vergrößernde Projektion zu erreichen, muss der Vergleichkörper 1 sehr nahe am Brennfleck der Röntgenröhre positioniert werden. In dem geringen Abstand ( $\approx 7$  mm) ist die für die CT erforderliche Rotation des Vergleichkörpers 1 um 360° nicht möglich (Abb. 11).



**Abb. 11: Vergleichskörper 1 vor der Röntgenröhre der  $\mu$ CT-Anlage**

Es blieb eine vergrößernde Radiografie unter Verwendung der Nanofokus-Röhre der  $\mu$ CT-Anlage (Abb. 12). Der dunkle Rand und helle Fleck sind eine Folge der inhomogenen Intensitätsverteilung der verwendeten Nanofokus-Röhre. Der senkrechte, dunkle Strich rührt von einem Metalldraht her, der zur Orientierung auf den Vergleichskörper 1 gelegt wurde. Größere Spannungskorrosionsrisse zeichnen sich deutlich als helle Linien ab, feinere Spannungskorrosionsrisse sind jedoch kaum erkennbar. Es kann nicht zwischen Rissen auf der Vorder- und Rückseite des Vergleichskörpers 1 unterschieden werden.

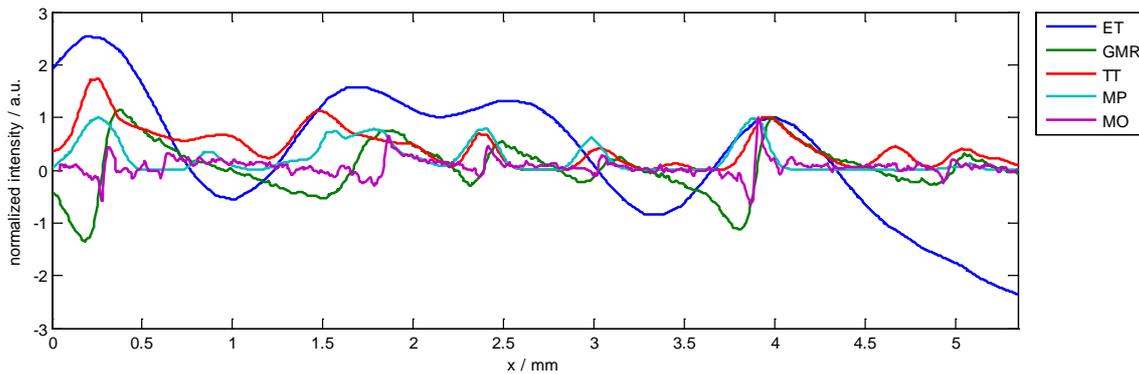


**Abb. 12: Radiografie mit Nanofokus-Röhre, Prüfausschnitt ca.  $5 \times 5 \text{ mm}^2$**

Die Computertomografie ist nach dem europäischen Standard EN 16016 [10] genormt. Zur Radiografie existieren mehrere ISO-Normen, die jedoch nicht vom CEN in das europäische Regelwerk übernommen wurden.

### **Zusammenfassung**

In Abb. 13 sind die Ergebnisse der Wirbelstromprüfung, Streuflussprüfung, Laser-Thermografie und Magnetpulverprüfung als normierte Amplituden einer ausgewählten Prüfspur dargestellt.



**Abb. 13: Vergleich der Prüfergebnisse der Wirbelstromprüfung (ET), Streuflussprüfung (GMR, MO), Laser-Thermografie (TT) und Magnetpulverprüfung (MP) anhand einer ausgewählten Prüfspur**

Das beste Prüfergebnis am Vergleichskörper 1 lieferte die Laserthermografie. Die Spannungskorrosionsrisse sind unabhängig von ihrer Orientierung gut zu erkennen. Die Thermografie arbeitet berührungslos, lässt sich bei fast allen Werkstoffen einsetzen und kommt ohne Verbrauchsmaterialien aus.

Ähnlich gute Ergebnisse liefert die Magnetpulverprüfung, jedoch hängt hier die Erkennbarkeit der Risse von deren Orientierung zum Magnetfeld ab. Während Risse, die senkrecht zu den Feldlinien verlaufen, mit hoher Empfindlichkeit angezeigt werden, sind Risse, die parallel zu den Feldlinien verlaufen, nicht zu erkennen.

Die Streuflussprüfung mit Magnetfeldsensoren stellt bei Prüfteilen mit einfacher Geometrie, die sich leicht mechanisch abtasten lassen, eine echte Alternative zur Magnetpulverprüfung dar. Aufgrund der hohen Feldempfindlichkeit der Sensoren kommt die Prüfung mit wesentlich geringeren magnetischen Feldstärken als die Magnetpulverprüfung aus. Auch Risse, die nahezu parallel zu den Feldlinien verlaufen, erzeugen noch genügend Streufeld, um sich in der flächenhaften Darstellung als schwache Linien abzuzeichnen.

Die magnetooptische Streuflussprüfung eignet sich aufgrund der kleinen Prüffläche eher als Analysetool für kleine Risse in hochwertigen Oberflächen als zur Massenteilprüfung.

Die Farbeindringprüfung konnte mit ihrem hohen Arbeitsaufwand und den verwachsenen, in nur einem kurzen Zeitfenster auswertbaren Anzeigen bei der Anwendung am Vergleichskörper 1 nicht überzeugen.

Die Wirbelstromprüfung ist mit den feinen Rissen im Vergleichskörper 1 überfordert. Selbst hochauflösende Wirbelstromsonden mit einem Spulendurchmesser von nur 0,5 mm liefern schwer interpretierbare Überlagerungsanzeigen. Eine Rissdetektion ist zwar teilweise möglich, die Risstiefen lassen sich jedoch nicht auswerten.

Die Risse im verwendeten Vergleichskörper 1 sind bei der Sichtprüfung mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Erst unter Zuhilfenahme eines Mikroskops werden die Risse sichtbar.

Der Wunsch, eine Computertomografie als dreidimensionale Referenz durchzuführen, ließ sich mit der  $\mu$ CT-Anlage der BAM leider nicht realisieren.

## Normen

- [1] DIN EN ISO 3058, „Zerstörungsfreie Prüfung – Hilfsmittel für die visuelle Prüfung – Auswahl von schwach vergrößernden Linsen“, 1998
- [2] DIN EN ISO 3059, „Zerstörungsfreie Prüfung – Eindringprüfung und Magnetpulverprüfung – Betrachtungsbedingungen“, 2012

- [3] DIN EN ISO 3452, „Zerstörungsfreie Prüfung – Eindringprüfung“, Teil 1 bis 3: 2013, Teil 4: 1988, Teil 5: 2008, Teil 6: 2006
- [4] DIN EN ISO 9934, „Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulverprüfung“, Teil 1 bis 3, 2015
- [5] DIN EN ISO 12718, „Zerstörungsfreie Prüfung – Wirbelstromprüfung – Terminologie“, 2008
- [6] DIN EN ISO 15548, „Zerstörungsfreie Prüfung – Technische Ausrüstung für die Wirbelstromprüfung“, Teil 1 bis 3, 2013
- [7] DIN EN 1330, „Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie“, Teil 1: 2014, Teil 2: 1998, Teil 3: 1997, Teil 7: 2005, Teil 10: 2003
- [8] DIN EN 13018, „Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Allgemeine Grundlagen“, 2001
- [9] DIN EN 13927, „Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Geräte“, 2003
- [10] DIN EN 16016, „Zerstörungsfreie Prüfung – Computertomografie“, Teil 1 bis 4, 2012
- [11] DIN 54136, „Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetische Streuflussprüfung mit Sondenabtastung – Grundlagen“, 1988
- [12] DIN 54192, „Zerstörungsfreie Prüfung – Aktive Thermografie“, 2010

## Referenzen

- [13] Argyres; *Physical Review*, **97** (1954), 334 – 345
- [14] Förster, *Materialprüfung*, **23** (1981), 372
- [15] Baibich *et al.*; *Physical Review Letter*, **61** (1988), 2472 – 2475
- [16] Binasch *et al.*; *Physical Review B*, **39** (1989), 4828 – 4830
- [17] H.–M. Thomas, R. Casperson, „Optimierung von Wirbelstromsonden für die Visualisierung von Materialschäden“, DGZfP-Querschnittseminar, Stutensee, 1995
- [18] J. Staal, M. D. Abramoff, M. Niemeijer, M. A. Viergever, B. Ginneken, „Ridge-Based Vessel Segmentation in Color Images of the Retina“, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 23(4), 501-509, 2004
- [19] Thompson; *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41** (2008), 093001
- [20] Reimund *et al.*; *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **37** (2011), 199 – 205
- [21] J. Schlichting, M. Ziegler, C. Maierhofer, M. Kreutzbruck, „Efficient Data Evaluation for Thermographic Crack Detection“, *QIRT Journal, Short Communications* 8 (1), 2011
- [22] Reimund *et al.*, *NDT & E International*, **64** (2014), 21 – 29
- [23] P. Myrach, M. Ziegler, C. Maierhofer, M. Kreutzbruck, „Influence of the acquisition parameters on the performance of laser-thermography for crack detection in metallic components“, *Proceedings 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1624-1630, 2014
- [24] Mageye, Matesy GmbH, Otto-Schott-Straße 13, 07745 Jena, <http://www.matesy.de/>