

# Thermoelektrisches Prüfverfahren mit magnetischer Auslesung (TEM) unter Verwendung klassischer Magnetometer

Johann HINKEN<sup>1</sup>, Michael CHARPENTIER<sup>1</sup>, Denny MEYER<sup>1</sup> <sup>1</sup> Hochschule Magdeburg-Stendal (FH), Institut für Elektrotechnik, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg, johann.hinken@hs-magdeburg.de. Tel.: 0391-886-4719

**Kurzfassung**. Hersteller hochreiner Legierungen sind an der zerstörungsfreien Prüfung ihrer Werkstoffe im Hinblick auf Inhomogenitäten wie z.B. Seigerungen interessiert. Dieses gilt auch für Anwender wie Flugtriebwerkhersteller und Betreiber von Teilchenbeschleunigern.

Das TEM-Verfahren gehört zu den kontaktlosen magnetischen Prüftechniken. Bei der TEM-Methode wird der thermoelektrische Effekt, auch bekannt als Seebeck-Effekt, ausgenutzt. Aufgrund einer bei Metallunterschieden auftretenden primären Thermospannung fließt in metallischen Werkstücken ein Strom, der ein Magnetfeld auch außerhalb des Werkstücks hervorruft. Dadurch ist es möglich, eine Materialinhomogenität auf die Weise zu detektieren, dass an der Oberfläche des Werkstücks das Magnetfeld abgetastet wird. Da es sich bei diesen Änderungen um sehr kleine Magnetfelder handelt, die in ihrer Stärke weit unter dem Erdmagnetfeld liegen, muss sowohl ein Magnetometer mit hoher Ansprechempfindlichkeit als auch eine abgeschirmte Prüfeinrichtung oder ein Gradiometeraufbau (Differenzmessung) verwendet werden. Frühere Arbeiten zu diesem Thema unter Verwendung SQUID-Sensoren sind bekannt. Hier wird supraleitender nun eine handhabenden Machbarkeitsstudie mit einfacher zu normal leitenden Magnetometern beschrieben.

Es wurden Fluxgate-Sensoren und GMR- (Giant Magneto Resistance) Sensoren getestet, um einen Versuchsaufbau hinsichtlich Empfindlichkeit und detektierbarer Defektgröße zu optimieren. GMR-Gradiometer haben hierbei mehrere entscheidende Vorteile gegenüber den Fluxgate-Gradiometern. Sie sind kleiner und leichter zu handhaben, und damit ist der industrielle Einsatz leichter zu realisieren. Mit unserem Versuchsaufbau war es möglich, verschiedene künstliche Defekte zu finden, wie z.B. Waspaloy-Schweißnähte in Udimet-720-Grundmaterial.

## **1** Einleitung

Hersteller und Anwender hochreiner Werkstoffe sind immer an der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) interessiert. 1989 stürzte in Sioux City/USA ein Flugzeug ab. Die Ursache war eine Seigerung in einer Turbinenscheibe. Während des Fluges kam es zum Ausfall der Turbine, die dabei in Einzelteile zersprang. In Bild 1 ist die teilweise rekonstruierte Turbinenscheibe mit Schaufeln dargestellt, die beim Unglück zerborsten war.





Bild 1: Rekonstruktion der zerstörten Turbinenscheibe vom Unglück in Sioux City / USA

Durch diesen tragischen Unfall kamen 111 Menschen ums Leben.

1996 gab es in Pensacola einen ähnlichen Vorfall. Bei der Scheibenherstellung war ein defektes Werkzeug benutzt worden, und die Überhitzung führte zu einer Materialphasenumwandlung, die ursächlich für die Zerstörung der Turbinenscheibe war. Hierbei starben 2 Menschen.

Diese Defekte wurden vor den Unglücken nicht erkannt und somit konnten auch keine Maßnahmen ergriffen werden, um das Bauteil auszutauschen. Die Hochschule Magdeburg-Stendal (FH) hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, die Prüftechnik zu verbessern, um diese Art der Defekte erkennen zu können.

Die von uns entwickelte TEM-Methode erkennt Fremdeinschlüsse (andere Metalle), Seigerungen und teilweise Phasenübergänge oder makroskopische Kristallkonfigurationsänderungen, z.B. auf Grund von Materialermüdungen. Diese Fehler können durch eine fehlerhafte Materialherstellung, eine fehlerhafte Bearbeitung oder durch eine Überbeanspruchung entstehen.

## 2. Messprinzip

Bei unseren Prüfverfahren handelt es sich um ein kontaktloses Verfahren mit einer magnetischen Auslesung. Bei dieser Methode wird der thermoelektrische Effekt ausgenutzt, der auch unter dem Namen Seebeck-Effekt bekannt ist. Die Methode basiert darauf, dass bei einer Inhomogenität im Material sich zwei Materialen mit unterschiedlichem Seebeck-Koeffizienten berühren. An dieser Kontaktstelle tritt eine sogenannte Kontaktspannung auf, die im Normalfall durch andere Kontaktspannungen im Material kompensiert wird. Wenn nun ein Wärmegradient in das Material gebracht wird, entsteht eine Spannung, die nicht mehr kompensiert werden kann. Diese zumeist kleine Spannung hat einen großen Stromfluss im Material, aufgrund der hohen Leitfähigkeit des Metalls, zur Folge. Dieser Stromfluss liegt im Material so, dass er als ein Kreisstrom angesehen werden kann. Dieser erzeugt ein Magnetfeld, welches aus der Probe tritt und detektiert werden kann. Hierbei handelt es sich um ein sehr schwaches Magnetfeld, was den Einsatz eines Sensors mit hoher Ansprechempfindlichkeit erforderlich macht. Zusätzlich sollen die Sensoren leicht handhabbar sein; deswegen sollen nur normalleitende Sensoren zum Einsatz kommen.

Es können mit dieser Methode vornehmlich Materialen untersucht werden, die eine hohe elektrische Leitfähigkeit und eine geringe thermische Leitfähigkeit besitzen. Unter diese Stoffklasse fallen Materialen wie Titan-, Nickel- und Niob-Basislegierungen mit entsprechenden Verunreinigungen.

Bei unseren Versuchen zeigte sich, dass es sinnvoll ist, die Probe unter dem Sensor zu bewegen, um ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu bekommen. Dabei sind Magnetfeldsensor und Wärmequelle gekoppelt und ortsfest. Für die Wärmequelle haben wir uns für ein Heißluftgebläse entschieden, da es kostengünstig herzustellen und leicht zu handhaben war. Zusätzlich bietet diese Wärmeeinbringung die Möglichkeit, einen hohen lokalen Temperaturgradienten und somit einen hohen thermoelektrischen Effekt zu erzeugen.

## 3. Sensoren

Bei unseren Versuchen kamen zwei Arten von Magnetfeldsensoren zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Fluxgate-Sensoren und GMR-Sensoren. Fluxgate-Sensoren, wie man sie in Bild 2 sehen kann, haben den Vorteil, dass sie eine hohe Ansprechempfindlichkeit besitzen.





Messung der örtlichen Änderung des Magnetfeldes ∆B<sub>z</sub>

Bild 2: Fluxgate-Sensoren; links: Messsystem aus drei Einzelsensoren; rechts: Foto des fertigen Fluxgate-Moduls

Gerade diese Eigenschaft ist notwendig, da bei der hier verwendeten Methode sehr kleine Magnetfelder detektiert werden müssen. Jedoch haben die Fluxgate-Sensoren zwei große Nachteile. Zum einen besitzen die verwendeten Sensoren eine große Basislänge, was zur Folge hat, dass Störfelder naher Quellen nicht ausgeblendet werden können. Zum anderen sind die Sensoren sehr voluminös und bieten somit eine schlechte Ortsauflösung.

Als zweite Art der Sensoren wurden die GMR-Sensoren eingesetzt, wie man sie in Bild 3 erkennen kann.



Bild 3: GMR-Sensor; links: schematische Darstellung des Bauelements; rechts: Foto eines kontaktierten GMR-Moduls

Die GMR-Sensoren haben gegenüber den Fluxgate-Sensoren folgende Vorteile. Sie sind bedeutend kleiner, was zu einer höheren Ortsauflösung führt. Ihre geringe Basislänge von 1,5mm führt zu einer Ausblendung sensornaher Störquellen. Weiter sind sie leichter zu handhaben als Fluxgate-Sensoren. Jedoch haben die GMR-Strukturen entscheidende Nachteile gegenüber den Fluxgate-Sensoren. Da die GMR-Technik auf einer Abfolge von Halbleiterschichtstapeln beruht und diese immer auf Änderungen der Temperatur reagieren, wird die GMR-Schicht temperaturempfindlich. Diese Eigenschaft ist bei einem thermoelektrischen Prozess nicht wünschenswert, wodurch Maßnahmen ergriffen werden mussten, um diesen Effekt zu kompensieren. Ein weiterer Nachteil der GMR-Sensoren ist die geringere Ansprechempfindlichkeit gegenüber den verwendeten Fluxgate-Sensoren.

#### 4. Messaufbau

Für die unterschiedlichen Sensoren mussten unterschiedliche Versuchsaufbauten realisiert werden. Für die Fluxgate-Sensoren ist der Versuchsaufbau und ein Blockschaltbild für die elektrische Schaltung in Bild 4 dargestellt.



Bild 4: Versuchsaufbau des Fluxgate-Sensors (links) und das Blockschild für die elektrische Schaltung als Blockdiagramm

Hierbei lassen sich gut die verschiedenen Teile des Versuchsaufbaus erkennen. Man kann links oben die Heizung für das Heißluftgebläse erkennen, die über einen Schlauch heiße Luft zur Probe leitet. Die Wärmequelle ist dabei starr mit dem Sensor verbunden. Beide sind wiederum mit Stativmaterial ortsfest befestigt sind. Rechts unten lässt sich die verwendete Auswerteelektronik erkennen.

Bei unserem zweiten Versuchsaufbau, mit den GMR-Sensoren, ist derselbe Aufbau bezüglich der Wärmequelle in Bild 5 zu sehen. Nur die Auswerteelektronik unterscheidet beide Versuchsaufbauten. Statt einfacher Operationsverstärker zur Verstärkung des Messsignals wurde ein Lock-In-Verfahren benutzt. Dabei wurden die Sensoren mit einem Wechselspannungssignal betrieben, welches durch einen Funktionsgenerator zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Sensoren unter Nutzung einer Wechselspannung ein geringes Eigenrauschen aufweisen. Das Sensorsignal wurde dann mit einem rauscharmen Lock-In-Verstärker ausgewertet. Der Versuchsaufbau und das Blockschaltbild, bei Verwendung von GMR-Sensoren, sind in Bild 5 gezeigt.



Bild 5 Versuchsaufbau bei Verwendung eines GMR-Sensors (links) und das Blockschild für die elektrische Schaltung als Blockdiagramm

#### 5. Ergebnisse

Die Leistungsfähigkeit des Messsystems wurde an künstlichen Defekten demonstriert. Dazu wurde uns von unseren Industriepartnern geeignetes Material zur Verfügung gestellt, u. a. Udimet-720-Probenmaterial, das mit einer Auftragschweißung aus Waspaloy versehen wurde. Dabei standen unterschiedliche Geometrien an Defekten zur Verfügung. Die unterschiedlichen Proben wurden nun mit unserer Methode mäanderförmig abgefahren. Zuerst wurde das mit Fluxgate-Sensoren, durchgeführt und die Ergebnisse sind in Bild 6 zusammengestellt.



Bild 6: Ergebnisse von Messungen mit Fluxgate-Sensoren an Udimet-720-Probenmaterial mit einer Auftragschweißung aus Waspaloy als künstlicher Defekt.

Links zeigen die Fotos die Proben, nachdem die Auftragschweißung aufgetragen wurde. Später wurden die Proben abgefräst und poliert, sodass der Defekt visuell nicht mehr zu erkennen war. In der Mitte ist eine technische Zeichnung zu sehen, in der die Größenverhältnisse der Defekte gezeigt werden. Die eigentlichen Prüfergebnisse zeigen eindeutig den Defekt und zeigen wie leistungsfähig diese Prüfmethode ist.

Dasselbe Verfahren wurde dann mit den GMR-Sensoren durchgeführt und in Bild 7 dargestellt.



Bild 7: Ergebnisse von Messungen mit GMR-Sensoren an Udimet-720-Probenmaterial mit einer Auftragschweißung aus Waspaloy als künstlicher Defekt.

Auch bei den GMR-Messungen zeigt sich der Defekt durch unsere Prüfmethode. Dabei zeichnet sich der Defekt in Form und Größe wirklichkeitsnäher ab als bei den Fluxgate-Messungen. Das hängt damit zusammen, dass die GMR-Sensoren nur Magnetfelder von nahen Quellen detektieren können und die Fluxgate-Sensoren über eine größere Fläche integrieren und somit der Defekt größer erscheint.

Ein untersuchter realer Defekt ist eine Titan-Basislegierung mit einer Seigerung, wie sie bei der Herstellung des Grundmaterials entstehen kann. In Bild 8 werden die Probe und ihre Prüfergebnisse gezeigt.



Bild 8: Prüfergebnisse an einer Titan-Basislegierung mit einer Seigerung. Links: Foto der Probe mit der Seigerung entlang der weißen Pfeile; Rechts: Prüfergebnisse unserer Methode

Auch hier stellt sich der Defekt durch unser Prüfverfahren dar und es kann eindeutig ein realer Defekt in der Probe festgestellt werden. Damit konnten wir an einem weiteren Stoffsystem die ausgezeichnete Funktionsweise der neuen Prüfmethode zeigen

#### 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Brauchbarkeit der TEM-Methode unter Nutzung nicht supraleitender Magnetometer wurde an realen und künstlichen Defekten gezeigt. Es sei darauf hingewiesen, dass die TEM-Methode auch Materialinhomogenitäten nachweisen kann.

Jedoch ist es notwendig die GMR-Sensoren weiter zu entwickeln, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Dann kann auch ein Prototyp mit GMR-Sensoren erstellt werden, der ausgiebig getestet werden muss.

Die Autoren danken den Herren Feist und Dr. Bamberg von der MTU Aero Engines GmbH für die Bereitstellung von Proben und Herrn Dr. Mattheis vom IPHT in Jena für die Herstellung der GMR-Sensoren.