

## **Magnetooptische Wirbelstromprüfsysteme**

**R. Zielke, H.-A. Crostack, Universität Dortmund**  
**P. Görnert, A. Lorenz, Innovent, Jena**

### **Zusammenfassung**

Im Beitrag werden zwei magnetooptische Wirbelstromprüfsysteme, welche vom Lehrstuhl für Qualitätswesen der Universität Dortmund entwickelt wurden, vorgestellt. Dabei wird zunächst die Funktionsweise der magnetooptischen Wirbelstromsensoren und der Aufbau der erstellten Systeme erläutert. Erstellt wurde zum einen ein System, das ähnlich wie ein konventionelles System eine Empfangsspannung liefert, welche nach Amplitude und Phase ausgewertet werden kann, und zum anderen ein System, welches mit Hilfe einer CCD-Kamera die Magnetfeldverteilung visuell wiedergibt. Mit beiden Systemen werden Messungen sowohl an Modellfehlern als auch an praxisnahen Fehlern präsentiert.

### **Einleitung**

Zur genauen Prüfung eines Bauteils ist bei der Wirbelstromprüfung sowohl ein hohes laterales Auflösungsvermögen als auch eine entsprechende Tiefenempfindlichkeit notwendig. Bei den konventionellen Sensoren liegt der laterale Nachweisbereich in der Größenordnung vom Durchmesser des Sensorsystems. Daher werden bei Messungen mit hohem lateralem Auflösungsvermögen kleine Sensoren eingesetzt, wobei hier der minimale Durchmesser fertigungsbedingt bei 1 mm liegt. Dies entspricht somit dem lateralen Auflösungsvermögen bei konventionellen Sensoren. Diese Sensoren haben auf Grund ihrer Spulenübertragungsfunktion nur bei hohen Anregungsfrequenzen eine hinreichende Empfindlichkeit. Bei diesen Anregungsfrequenzen ist jedoch wegen des Skin-Effektes die Eindringtiefe des Wirbelstroms gering und somit auch der Nachweisbereich in Richtung der Bauteiltiefe.

Für Prüfungen wie z. B. einer engspaltigen Schweißnaht ist jedoch ein hohes laterales Auflösungsvermögen zur Beschreibung der Materialfehler aber auch ein hinreichender Tiefennachweisbereich notwendig. Hierzu ist es sinnvoll, die konventionelle Empfangsspule durch einen anderen Magnetfeldsensor zu ersetzen, der eine hohe Empfindlichkeit auch bei niedrigen Frequenzen besitzt und zusätzlich ein hohes laterales Auflösungsvermögen ermöglicht. Bild 1 gibt hierzu einen Überblick über die Empfindlichkeit von Magnetfeldsensoren.

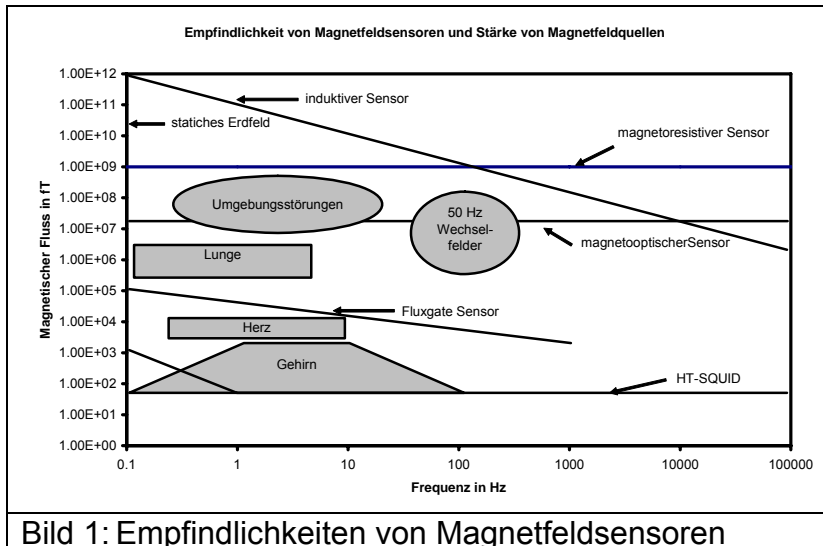


Bild 1: Empfindlichkeiten von Magnetfeldsensoren

Auf der Ordinate ist die Magnetfeldauflösung gegen die Frequenz aufgetragen. Im Diagramm sind zusätzlich zu den Magnetfeldsensoren die Größen einiger Magnetfeldquellen eingetragen. Der magnetooptische Sensor sowie der SQUID haben eine frequenzunabhängige Empfindlichkeit, wogegen die Empfindlichkeit des induktiven Sensors mit steigender Frequenz zunimmt.

Dies führt dazu, dass der magnetooptische Sensor im niederfrequenten Bereich eine um mehrere Größenordnungen höhere Empfindlichkeit als der induktive Sensor besitzt. Somit besitzt der magnetooptische Wirbelstromsensor im Vergleich zum induktiven Sensor eine höhere Empfindlichkeit für tief im Bauteil liegende Fehler. Da das Magnetfeld mit Hilfe des Lichtes gemessen wird, liegt somit die laterale Auflösung theoretisch in der Größenordnung der Wellenlänge des eingesetzten Lichtes. Des Weiteren ermöglicht der magnetooptische Sensor eine Visualisierung der Magnetfelder, wodurch die Interpretation der Wirbelstrombefunde stark vereinfacht wird.

### Funktionsweise der magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme

Die Anregung der Wirbelströme bei den magnetooptischen Wirbelstromprüfsystemen erfolgt wie bei den konventionellen Systemen mit Hilfe einer Sendespule. Die Messung der Magnetfelder erfolgt jedoch nicht mit einer Empfangsspule sondern durch den magnetooptischen Sensor. Die Grundlage dieser Sensoren bildet der Faraday-Effekt, der im Bild 2 skizziert ist. Ein Lichtstrahl mit einer Ausbreitungsrichtung  $\vec{k}$  und einer Polarisationsrichtung  $\vec{E}$  tritt in ein optisch aktives Material ein.

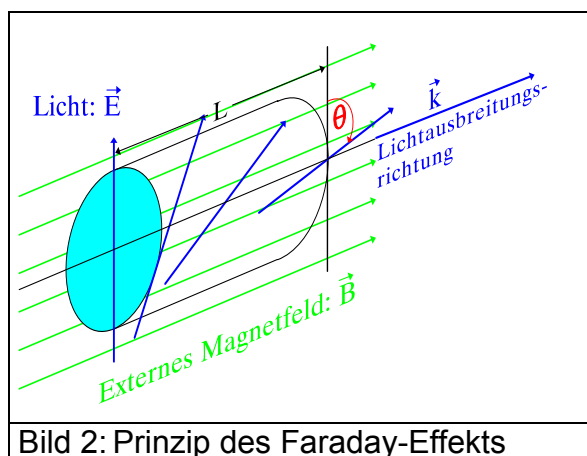


Bild 2: Prinzip des Faraday-Effekts

Dieses auch als Faraday-Rotator bezeichnete Material dreht nun die Polarisationsrichtung des Lichtes in Abhängigkeit des Magnetfeldes. Somit hat sich die Polarisationsdrehung des Lichtstrahles nach Austritt aus dem Faraday-Rotator um den Winkel  $\theta$  gedreht. Hierbei fand Faraday empirisch folgenden Zusammenhang:  $\theta = V \cdot L \cdot B$ , wobei  $V$  gleich die Verdetkonstante,  $L$  die Länge des Rotators und  $B$  das Magnetfeld ist.

Auf diese Weise ist es möglich, die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule in unterschiedliche Polarisationsdrehungen des Lichtes umzuwandeln.

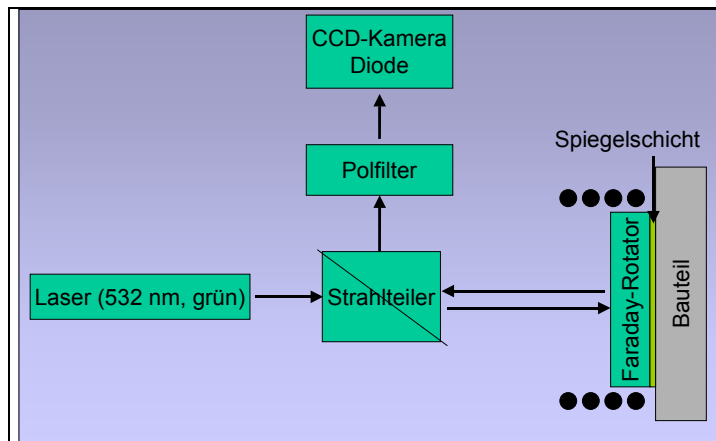


Bild 3: Prinzip des magneto-optischen Sensors

Der prinzipielle Aufbau der magneto-optischen Wirbelstromprüfsysteme ist im Bild 3 dargestellt. Die Sendespule wird vom Laser ausgeleuchtet, wobei der Laserstrahl in den Faraday-Rotator eindringt, an der Spiegelschicht reflektiert wird, erneut den Rotator durchquert und dann die Sendespule verlässt. Hier liegt nun die Magnetfeldinformation in der Polarisationsdrehung des Laserlichts vor.

Diese wird nun mit Hilfe des Polfilters in eine Lichtintensität umgewandelt, welche dann sowohl mit einer Fotodiode oder auch mit einer CCD-Kamera aufgenommen werden kann. Dabei liefert die Fotodiode wie das kommerzielle Wirbelstromprüfsystem ein Signal, welches nach Amplitude und Phase ausgewertet werden kann und das CCD-Kamerasystem ermöglicht es, die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule visuell darzustellen.

### Aufbau der magneto-optischen Wirbelstromprüfsysteme

Bild 4 zeigt den Aufbau des Systems mit der Fotodiode zur Lichtintensitätsmessung. Die zu untersuchende Probe befindet sich auf dem Manipulator, der in diesem Fall ein sogenannter Hexapod ist, bei dem die sechs Beine einzeln angesteuert werden können, und somit kann die Probe in allen sechs Freiheitsgraden verfahren werden.

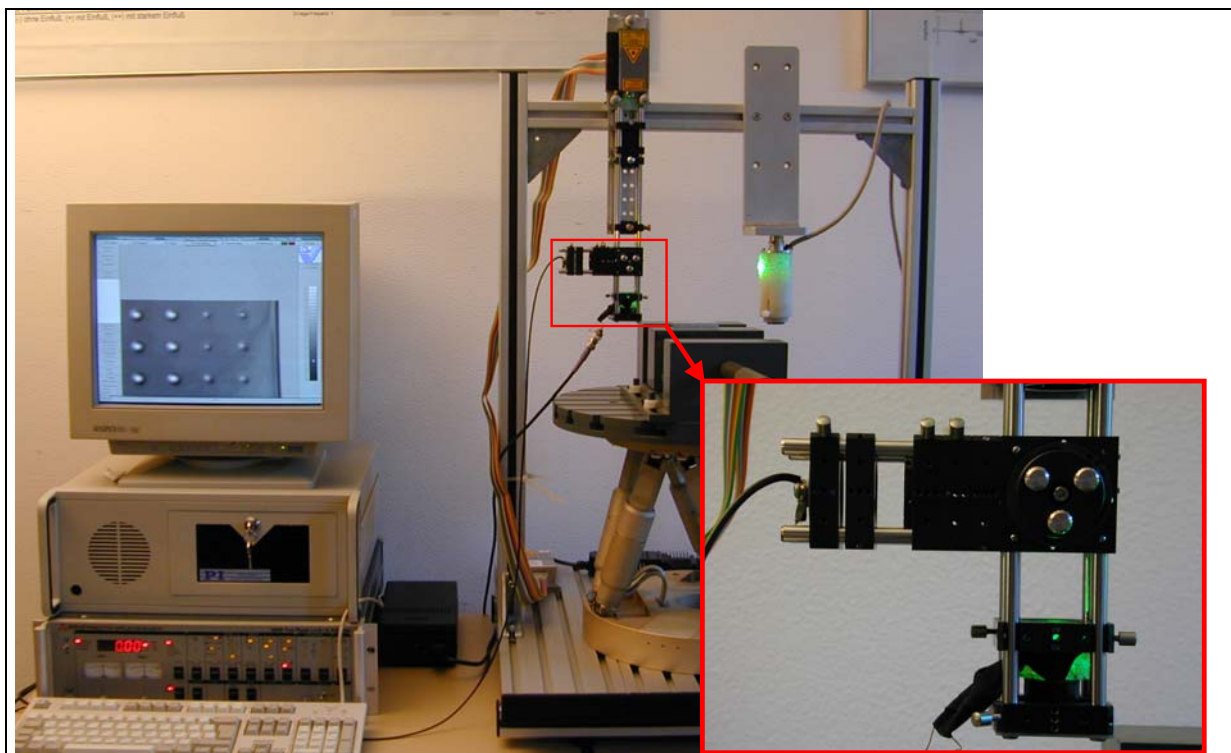


Bild 4: Aufbau des magneto-optischen Wirbelstromprüfsystems mit Fotodiode

Der magnetooptische Sensor ist oberhalb des Manipulators starr befestigt. Zur Messung wird nun die Probe mit Hilfe des Manipulators unterhalb des Sensors verfahren. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass keine Erschütterungen durch den Manipulator am Sensor auftreten können, die den Messbefund verfälschen würden.

Das Sensorsystem besteht aus einem Laser, gefolgt von einem Isolator, der verhindert, dass das reflektierte Laserlicht zurück in den Laser geleitet wird, was zu Leistungsschwankungen des Lasers führen würde. Nach dem Isolator wird der Laserstrahl auf den Innendurchmesser der Sendespule aufgeweitet, wodurch gewährleistet ist, dass die gesamte Fläche des Faraday-Rotators zur Messung genutzt wird. Der folgende Aufbau ist rechts im Bild 4 vergrößert dargestellt. Der Laserstrahl durchquert den Strahlteiler, trifft auf den Faraday-Rotator, der innerhalb der Sendespule liegt, dort erfolgt nun die Magnetfeldmessung. Der reflektierte Strahl wird dann über den Strahlteiler auf den Polfilter und schließlich auf die Fotodiode geleitet. Das Fotodiodensignal wird nun mit Hilfe des Lock-In-Verstärkers nach Amplitude und Phase ausgewertet. Der PC rechts im Bild wird sowohl für die Ansteuerung des Manipulators als auch für das magnetooptische Prüfsystem eingesetzt.

Das System zur Visualisierung des Magnetfeldes innerhalb der Sendespule mit Hilfe einer CCD-Kamera ist im Bild 5 dargestellt.

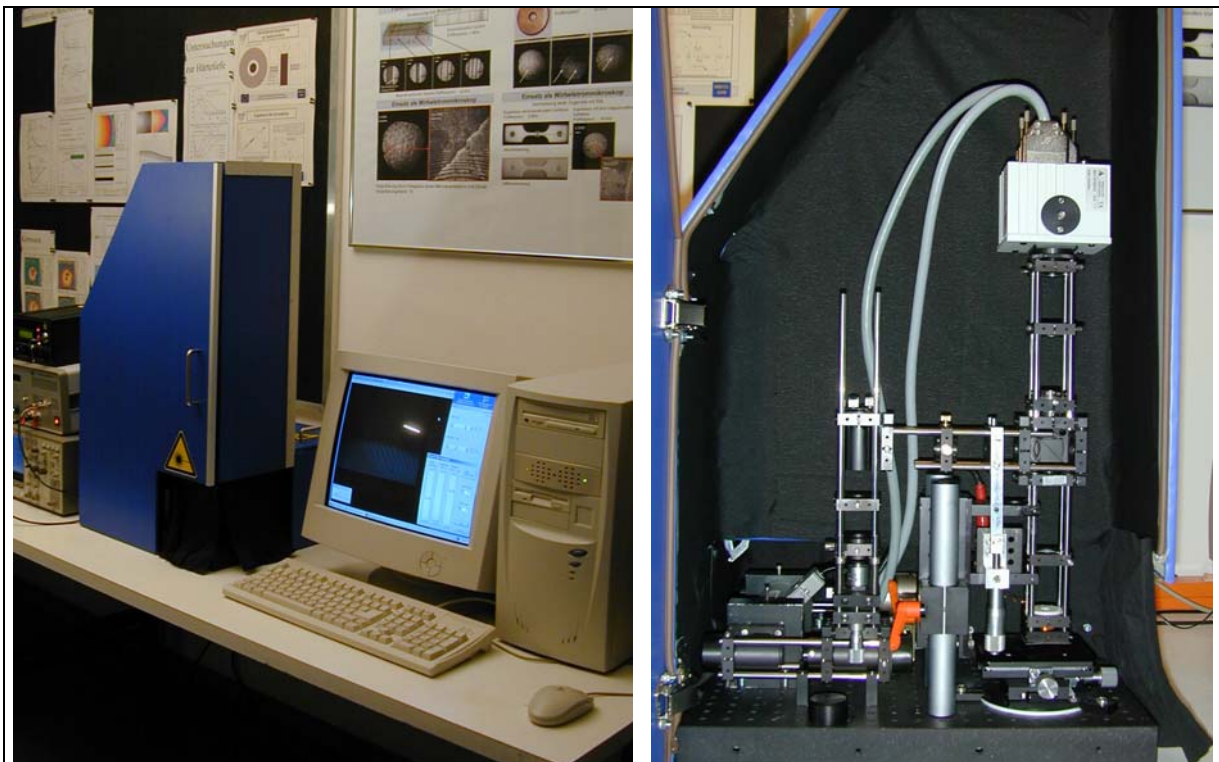


Bild 5: Aufbau des magnetooptischen Wirbelstromprüfsystems mit CCD-Kamera

Um bei den Messungen den Einfluss von Streulicht zu reduzieren, wurde um das magnetooptische System eine Kammer errichtet. Rechts im Bild 5 ist das System mit geöffnetem Gehäuse abgebildet. Der Laser sowie der Isolator sind im hinteren Teil (im Bild nicht sichtbar) untergebracht. Unten links im Bild ist der Modulator zu erkennen, der eine gezielte Belichtung (Ein- und Ausblenden des Lasers bei maximaler Anregungsstromstärke der Sendespule) sowie Belichtungsdauer ermöglicht. Danach wird der Strahl umgeleitet und trifft dann auf den Strahlteiler. Hier wird der Laserstrahl wie bei dem Diodensystem in den Sensor geleitet, wo er reflektiert und nach Durchqueren des Polfilters auf der CCD-Kamera abgebildet wird.



## Untersuchungen an einer Schweißnaht

Der für die Untersuchungen eingesetzte Probekörper ist im Bild 6 abgebildet. Mittig der Probe ist die Laserschweißnaht deutlich zu erkennen. In der Schweißnaht sind lokal einzelne Materialinhomogenitäten eingebracht, welche zum Teil auch schon bei der visuellen Untersuchung zu sehen sind. Die Abmaße des Probekörpers betragen 190 mm mal 60 mm. Die Schweißnaht selbst hat eine Breite von 2 mm, die sichtbare Wärmeeinflusszone ist ca. 4 mm breit.

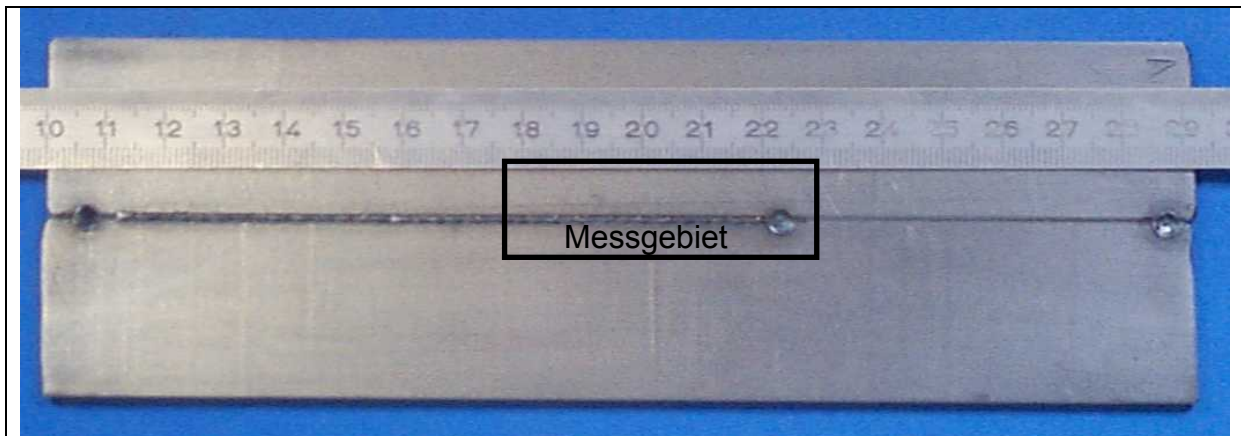


Bild 6: Probekörper mit Laserschweißnaht

Die Untersuchungen wurden mit dem Fotodiodensystem durchgeführt. Hierzu wurde die Probe mit Hilfe des Manipulators unter dem Sensor verfahren, wobei der Messpunkt Abstand parallel und senkrecht zur Schweißnaht 0,2 mm betrug. Das vermessene Gebiet betrug 50 mm mal 20 mm und als Anregungsfrequenz wurde eine Frequenz von 1 kHz eingesetzt. Bild 7 zeigt den Messbefund mit dem aufgeweiteten Strahl (Durchmesser: 5 mm) in Form einer Grauwertdarstellung.

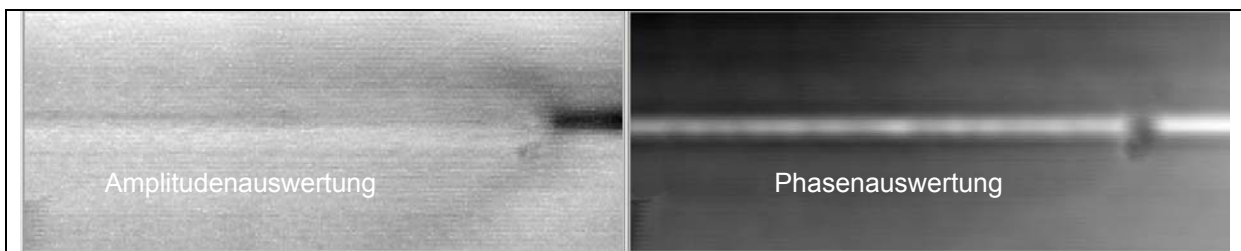


Bild 7 : Messung mit aufgeweitetem Laserstrahl; Durchmesser: 5 mm

Insbesondere im Fall der Phasenauswertung ist die Schweißnaht deutlich zu erkennen. Zusätzlich sind entlang der Naht einzelne Bereiche durch hellere Grauwerte zu sehen, die mit den Fehlstellen der Naht übereinstimmen. Insgesamt sind jedoch die Anzeigen leicht verwaschen, was auf eine zu geringe laterale Auflösung hinweist. Daher wurde das gleiche Gebiet erneut, jedoch diesmal mit einem fokussierten Laserstrahl, vermessen. Dabei betrug der Durchmesser des Strahls ungefähr 0,5 mm. Die zugehörigen Befunde, Amplituden und Phasenauswertungen, sind im Bild 8 ebenfalls in einer Grauwertdarstellung abgebildet.

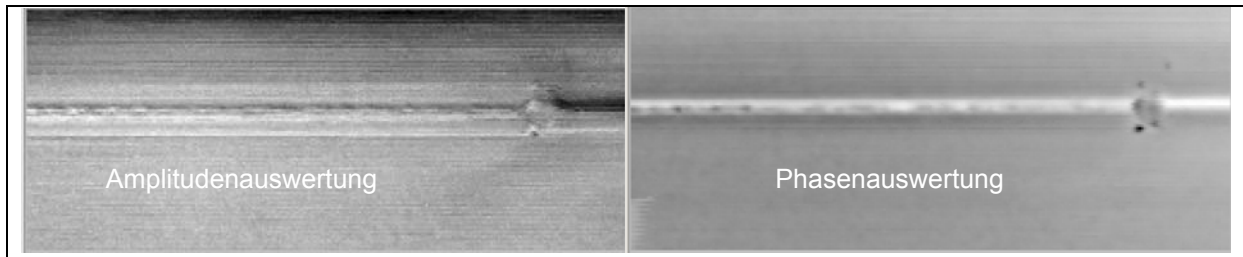


Bild 8: Messung mit fokussiertem Laserstrahl; Durchmesser: 0,5 mm

Im Gegensatz zur ersten Messung sind sowohl bei der Amplituden- als auch bei der Phasenauswertung wesentlich mehr Details der Naht zu erkennen. Das laterale Auflösungsvermögen der Messung mit fokussiertem Laserstrahl liegt bei 0,5 mm und ist damit mit denen von hoch auflösenden konventionellen Sensoren vergleichbar. Allerdings betrug die Anregungsfrequenz lediglich 1 kHz, wobei bei konventionellen hoch auflösenden Sensoren Anregungsfrequenzen von mehreren MHz notwendig sind. Daher sind mit dem magnetooptischen System, durch die möglichen niedrigen Anregungsfrequenzen, im Vergleich zu konventionellen Systemen auch größere Nachweisbereiche in der Bauteiltiefe möglich.

Diese Messungen zeigen, dass beim magnetooptischen Diodensystem die laterale Auflösung durch einfache Variation des Laserstrahldurchmessers angepasst werden kann. Für eine praktische Anwendung wie der Schweißnahtprüfung kann somit die Prüfung ohne Austauschen des Sensors an einen neuen Schweißauftrag angepasst werden.

### Untersuchungen an einer Scheckkarte

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden mit dem CCD-Kamerasystem durchgeführt, für das eine spezielle Ansteuerungs- und Auswertesoftware erstellt wurde, die im Bild 9 dargestellt ist.

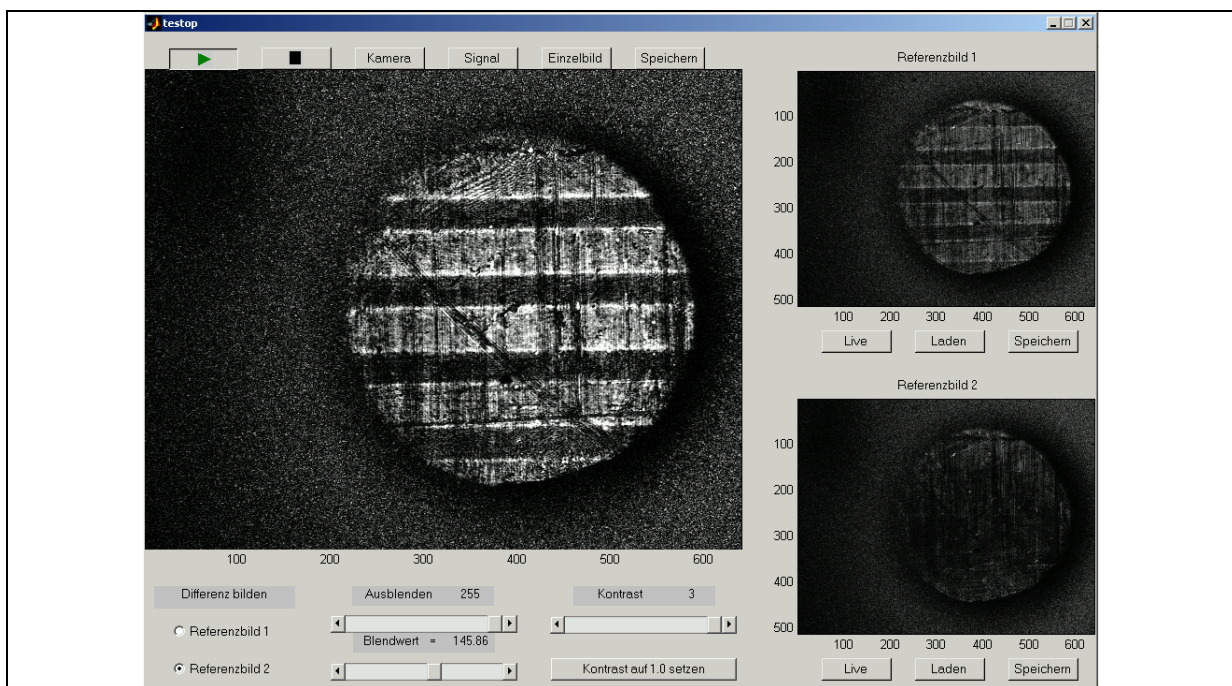
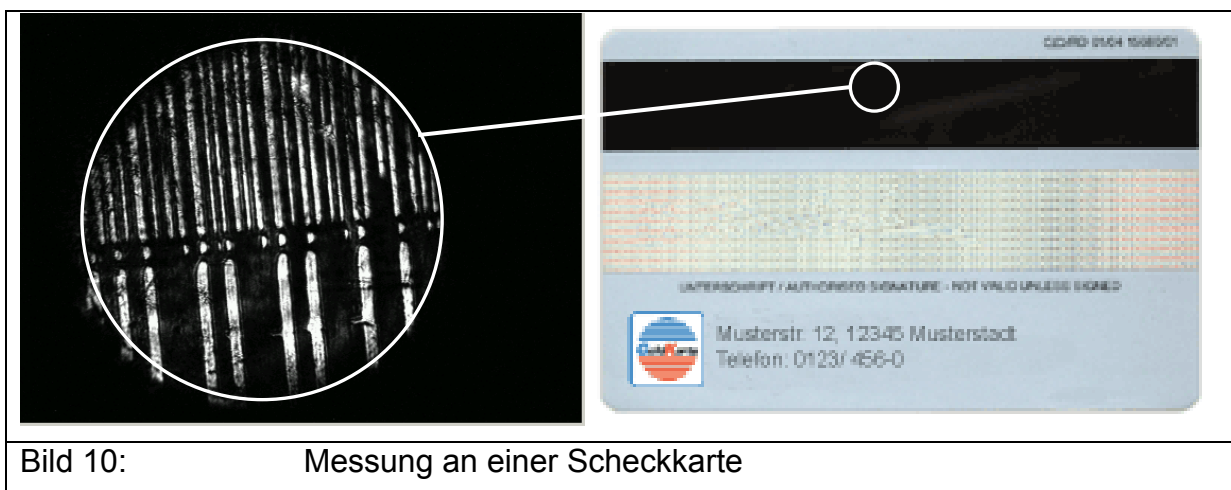


Bild 9: Auswertesoftware für das CCD-Kamerasystem

Oben im Menue können Untermenues zur Ansteuerung der CCD-Kamera, wo z.B. die Verstärkung eingestellt werden kann, und zum Anregungssignal, wo Amplitude und Frequenz eingestellt werden können, aufgerufen werden. Weiterhin kann hier das Livebild der Kamera aktiviert sowie einzelne Bilder abgespeichert werden. Das Online Bild der Kamera wird links im Bild dargestellt.

Die Grauwerte geben hierbei die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule wieder. Im Messbefund sind vier Nuten zu erkennen, die von einem Stahlkörper stammen. Dabei handelt es sich um oberflächenoffene Nuten, die eine Breite von 0,35 mm und einen Abstand zueinander von 0,5 mm haben. Eine derartig hohe laterale Auflösung ist mit konventionellen Wirbelstromprüfsystemen nicht möglich. Die Auswertesoftware ermöglicht es nun, mit Referenzbildern zu arbeiten. So ist es möglich Referenzbilder von fehlerfreien Bereichen oder ohne Anregungssignal abzuspeichern und online vom Kamerabild abzuziehen. Die Referenzbilder werden dabei rechts im Bild dargestellt. Im Bild 9 ist oben als Referenzbild 1 der Befund ohne Bildverarbeitung dargestellt. Die einzelnen Nuten sind nur schwach zu erkennen. Im Referenzbild 2 ist der Befund ohne Signalanregung abgebildet. Hier sind die Nuten nicht zu sehen. Dieses Referenzbild wurde nun vom Onlinebild der Kamera abgezogen, wobei das Ergebnis links im Bild dargestellt ist. Hier sind die Nuten sehr deutlich zu erkennen. Somit wurde durch Integration der Bildverarbeitung die Auflösung des Systems gesteigert.

Mit dem System sind auch Untersuchungen an statischen Magnetfeldern möglich. In diesem Fall wird die Sendespule nicht angesteuert, so dass mit dem System nur schon vorhandene statische Felder gemessen werden. Um diese Einsatzmöglichkeit zu präsentieren, wird im Folgenden eine Messung am Magnetstreifen einer Scheckkarte gezeigt. Hierzu wurde ein Bereich des Magnetstreifens mit dem CCD-Kamerasystem untersucht, wobei keine Magnetfeldanregung durch die Sendespule eingesetzt wurde. Der Befund ist im Bild 10 in Form einer Grauwertdarstellung abgebildet.



Abgebildet ist wiederum das Magnetfeld in Form der Grauwertschattierung. Die senkrechten weißen Linien geben die Information, welche in Magnetstreifen abgespeichert sind, wieder. Dabei entspricht der Durchmesser des Sensors 5 mm. Mit den 25 abgebildeten Magnetstreifen (oben im Bild) ergibt sich somit ein Abstand zwischen den Magnetfeldstreifen von ca. 0,20 mm.

Auch bei diesem Beispiel wird das hohe laterale Auflösungsvermögen des Systems deutlich.

### **Ausblick**

Wie die Untersuchungen mit dem Fotodiodensystem an der Laserschweißnaht zeigen, werden mit den erstellten magnetooptischen Wirbelstromprüfsystemen, nach der Erprobung an Modellfehlern, nun reale Materialfehler untersucht. Hier liegt auch der Schwerpunkt bei den zur Zeit laufenden Arbeiten zum magnetooptischen Kamerasystem.

Die in diesem Beitrag durchgeführten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.