

# **Verbesserung der lateralen Auflösung der Wirbelstromprüfung durch Entwicklung magnetooptischer Sensorsysteme**

Von der Fakultät Maschinenbau  
der Universität Dortmund  
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Phys. Reiner Zielke  
aus Dortmund

Berichter:	Prof. Dr.-Ing. H.-A. Crostack
Mitberichter:	Prof. Dr. P. Görnert
Tag der mündlichen Prüfung:	5. Juli 2004

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Qualitätswesen der Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst-Artur Crostack, Inhaber des Lehrstuhls für Qualitätswesen, für die Ermöglichung dieser Arbeit, seine Unterstützung und die zahlreichen konstruktiven Diskussionen.

Für die Übernahme des Koreferats sowie seine kritische Durchsicht der Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. Peter Görnert.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr. Gottfried Fischer, Herrn Uwe Radtke, Herrn Harald Schoon, Herrn Martin Leuker und Herrn Dieter Schaefer sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls, die mit Hilfsbereitschaft und Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern danke ich, dass sie mir den gewünschten Ausbildungsweg ermöglicht haben.

Meinen ganz besonderen Dank gilt meiner Frau Ingeborg Zielke und meinen beiden Söhnen, Florian und Oliver, für ihr Verständnis und ihre Geduld. Meiner Frau danke ich darüber hinaus für die tatkräftige Unterstützung und Entlastung während der Erstellung der Arbeit.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung .....	6
2	Kritische Bewertung des Stands der Technik .....	9
2.1	Das Prinzip der Wirbelstromprüfung.....	9
2.2	Entwicklung der Signalanregung .....	19
2.3	Entwicklung der Messdatenauswertung .....	25
2.4	Entwicklung in der Sensorik .....	33
2.5	Funktionsweise der magnetooptischen Sensoren .....	38
3	Überlegungen zur Verbesserung der lateralen Auflösung bei Wirbelstromsensoren.....	41
4	Vorbereitende Arbeiten und Aufbau der magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme .....	44
4.1	Berechnung der induzierten Wirbelstromverteilung.....	44
4.2	Faraday-Rotator Materialien.....	55
4.3	Prinzipieller Aufbau der magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme.....	63
4.4	Berechnung des Empfangssignals .....	70
4.5	Simulationen zum magnetooptischen Prüfsystem.....	76
4.6	Aufbau des magnetooptischen Prüfsystems mit einer Fotodiode.....	82
4.7	Aufbau des magnetooptischen Prüfsystems mit CCD-Kamera .....	85
4.8	Funktionsüberprüfung beider Systeme.....	90
5	Messungen an Modellfehlern.....	97
5.1	Untersuchungen an Bohrungen.....	97
5.2	Untersuchungen an Nuten.....	104
5.3	Vergleich der Ergebnisse der magnetooptischen Systeme mit denen von konventionellen Systemen.....	117
5.4	Integration der CS-Technik und Adaption an konventionelle Wirbelstromprüfsysteme .....	120
6	Messungen an realitätsnahen Materialfehlern .....	126
6.1	Messungen mit dem Diodensystem .....	126
6.1.1	Untersuchung an einer Laserschweißnaht .....	126
6.1.2	Untersuchungen an einem Rissfeld.....	130
6.2	Messungen mit dem CCD-Kamerasystem .....	132
6.2.1	Untersuchungen an einem Rissfeld.....	132
6.2.2	Untersuchungen an einer Zugprobe .....	135
7	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick.....	138
8	Zusammenfassung .....	142
9	Literaturverzeichnis.....	144
10	Lebenslauf.....	151

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

$\vec{A}$	=	Vektorpotential
A/D	=	Analog-/Digital-Signalwandler
$\vec{B}$	=	magnetische Induktion
CS	=	Controlled Signals
D/A	=	Digital-/Analog-Signalwandler
$\vec{J}$	=	Elektrischer Strom
$\vec{D}$	=	elektrische Verschiebung
$\delta$	=	Eindringtiefe des Wirbelstroms
$\vec{E}$	=	elektrische Feld
$\varepsilon$	=	Dielektrizitätskonstante
f	=	Frequenz
F	=	Spezifische Faradayrotation
$\vec{H}$	=	Magnetfeld
$\vec{j}$	=	Stromdichte
i	=	imaginäre Einheit
K	=	Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls
L	=	Länge des Faradayrotators
$\sigma$	=	elektrische Leitfähigkeit
$\mu$	=	magnetische Permeabilität
rot	=	Rotationsoperator
t	=	Zeit
T	=	Zeitpunkt des Impulsmaximums des empfangenen CS-Impulses
U	=	elektrische Spannung
V	=	Verdetkonstante
W	=	Amplitude des Impulsmaximums des empfangenen CS-Impulses
ZfP	=	Zerstörungsfreie Prüfung
zfP-Verfahren	=	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

$\rho$	=	elektrische Ladung
$\omega$	=	Kreisfrequenz ( $=2\pi f$ )
$\nabla$	=	Nabla Operator
$\Delta$	=	Laplace Operator
$\Delta t$	=	Änderung des Zeitpunktes des CS-Impulses
$\Delta w$	=	Änderung der Amplitude des CS-Impulses

# 1 Einleitung und Problemstellung

Um einen hohen Qualitätsstandard für ein Produkt gewährleisten zu können, ist eine Regelung des Produktionsprozesses, mindestens aber eine Überwachung notwendig. Dies erfolgt mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP), die entsprechende Qualitätsmerkmale aufnehmen und somit regelnd in den Prozess eingreifen können. Dabei gewinnt die ZfP an Bedeutung, da auch sicherheitsrelevante Bauteile, aus Gründen einer kostengünstigen Fertigung, mit einem Minimum an Rohstoff hergestellt werden. Der geringere Materialeinsatz führt dabei zu einer Ausschöpfung der Belastungsgrenze des Werkstoffs. Um die Funktionssicherheit eines solchen Bauteils zu gewährleisten, ist eine zerstörungsfreie Prüfung unumgänglich. Neben der Fertigung nimmt die ZfP auch im Bereich des betrieblichen Einsatzes eine wichtige Position ein. So werden bei Inspektionen einzelne Bauteile geprüft und dann gegebenenfalls repariert oder ersetzt. Im sicherheitskritischen Bereich der Luftfahrt wird das "Damage Tolerance Concept" eingesetzt, welches vorhandene Fehler bewertet und demnach entsprechende Maßnahmen wie längere Inspektionsintervalle, Reparatur oder Austausch des Bauteils einleitet. Insbesondere bei dieser Anwendung der ZfP ist es notwendig, Fehler nicht nur frühzeitig zu erkennen, sondern auch beschreiben zu können. Nur so ist eine Bewertung des Fehlers nach einer Inspektion hinsichtlich seiner weiteren Entwicklung bis zum Risswachstum möglich. Dieser verstärkte Einsatz von ZfP-Verfahren bei der Produktion und Inspektions- und Wartungsarbeiten führt zu immer größeren Ansprüchen bezüglich der Fehlerdetektion und -beschreibung und damit des Auflösungsvermögens und der Handhabbarkeit der ZfP-Systeme.

Abhängig von der jeweiligen Prüfaufgabe und der zu prüfenden Werkstoffe werden unterschiedliche ZfP-Verfahren eingesetzt. Bei der Prüfung von elektrisch leitfähigen Materialien insbesondere im oberflächennahen Bereich hat das Wirbelstromverfahren eine hohe Bedeutung erlangt. Dabei induziert eine mit Wechselstrom betriebene Spule im elektrisch leitfähigen Material einen Wirbelstrom. Dieser erzeugt abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Werkstoffs ein Magnetfeld, welches sich mit dem der Spule überlagert. Das resultierende Mag-

netfeld wird gewöhnlich mit Hilfe einer zweiten Spule aufgenommen. Materialeigenschaften, die sich in der elektrischen Leitfähigkeit und/oder der Permeabilität äußern, können so zerstörungsfrei und berührungslos registriert werden. Die hohe Prüfgeschwindigkeit sowie die rechnergestützte Signalverarbeitung ermöglichen eine automatisierte Prüfung auch während des Produktionsprozesses. Auch im Bereich der Luftfahrt ist das Wirbelstromverfahren bedeutsam, da es neben einer hohen Genauigkeit und Prüfgeschwindigkeit auch sicherheitstechnisch unbedenklich ist, d. h. keine besonderen, kostenintensiven Sicherheitsmaßnahmen erfordert. Bei diesen Anwendungen ist ein möglichst hohes laterales Auflösungsvermögen sinnvoll. Zum Einen, um die Fehler in ihren Abmessungen genauer beschreiben zu können und zum Anderen, um auch dicht nebeneinander oder hintereinander liegende Materialfehler getrennt untersuchen zu können. Dieses Kenntnis ist für eine bruchmechanische Bewertung essentiell. Die geforderte hohe laterale Auflösung ist jedoch durch die Baugröße des Sensors und durch die eingesetzte Frequenz vorgegeben. Dabei gilt, je kleiner der Durchmesser des Sensors und je höher die Anregungsfrequenz ist, desto besser ist die laterale Auflösung. Mit der hohen Frequenz ist jedoch gleichzeitig eine geringere Eindringtiefe des Wirbelstroms verknüpft, so dass tief liegende Fehler nicht nachgewiesen werden. Weiterhin erfordern die hohen Frequenzen hochwertige D/A- bzw. A/D-Karten, wodurch die Kosten für das System ansteigen.

Für die lateral hoch aufgelöste Detektion tiefer liegender Bauteilfehler sind prinzipiell kleine induktive Sensoren sinnvoll, die mit geringer Anregungsfrequenz betrieben werden. Da jedoch auf Grund der Spulenübertragungsfunktion zwischen der Send- und Empfangsspule niedrige Frequenzen schlecht übertragen werden, sind die Empfangssignale zu gering, um eine zuverlässige Prüfung zu gewährleisten. Die zur niederfrequenten Wirbelstromprüfung eingesetzten induktiven Sensoren besitzen daher in der Regel eine hohe Windungszahl und werden mit hohen Stromstärken betrieben, um ein für eine Auswertung hinreichendes Empfangssignal zu erhalten. Diese Randbedingung, eine hohe Windungszahl und hohe Drahtstärke, welche eine hohe Stromstärke erlauben, schränken die Möglichkeiten für die Herstellung kleiner niederfrequenter induktiver Sensoren stark ein. Mit den herkömmlichen induktiven

Sensoren sind somit Messungen mit hohem lateralem Auflösungsvermögen bei niedrigen Frequenzen für tief im Bauteil liegende Fehler nicht möglich.

Um auch bei tiefer im Material liegenden Fehlern ein hohes laterales Auflösungsvermögen zu erreichen, muss die für den niederfrequenten Bereich unempfindliche Empfangsspule durch einen empfindlicheren Magnetfeldsensor ausgetauscht werden. Dann sind auch kleinere Sensorsysteme realisierbar, die eine hohe laterale Auflösung ermöglichen.

Das empfindlichste Magnetfeldmesssystem ist der aus supraleitendem Material bestehende SQUID, der Magnetfeldänderungen, wie sie z. B. durch Gehirnströme entstehen, nachweisen kann. Das System erfordert jedoch eine entsprechende Kühlung, z. B. mit flüssigem Stickstoff, was seine Handhabbarkeit einschränkt. Weiterhin liegt der Durchmesser des SQUIDs bei 5 mm, so dass zwar eine wesentlich höhere Tiefenempfindlichkeit erreicht wird, aber die laterale Auflösung nicht wesentlich gesteigert wird.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von magnetooptischen Sensoren, die das Magnetfeld mit Hilfe eines Laserstrahls und eines Faraday-Rotators messen. Durch die Fokussierung des Laserstrahls lassen sich die Magnetfeldänderungen auf sehr kleinem Raum nachweisen, was für die Herstellung von kleinen Sensoren mit hoher lateraler Auflösung vorteilhaft ist. Des Weiteren ist die Magnetfeldempfindlichkeit im niederfrequenten Bereich höher als bei induktiven Sensoren, wodurch sich tief liegende Fehler mit hohem lateralem Auflösungsvermögen detektieren lassen.

Daher wird im Folgenden untersucht, wie sich die magnetooptischen Sensoren in Wirbelstromprüfsysteme integrieren lassen.

## 2 Kritische Bewertung des Stands der Technik

### 2.1 Das Prinzip der Wirbelstromprüfung

Das Wirbelstromverfahren (DIN 54140) /1/-/3/ ist ein elektromagnetisches Verfahren, welches sich mit den Maxwellgleichungen /4/ beschreiben lässt. In der Differentialdarstellung ergeben sich diese zu:

$$\begin{array}{ll} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{Gleichung 1} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{Gleichung 2} \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 & \text{Gleichung 3} \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho & \text{Gleichung 4} \end{array}$$

Eine Spule wird mit einem Anregungsstrom  $\vec{J}_{\text{Anregung}}$  betrieben und erzeugt nach der Gleichung 1 ein Magnetfeld, das in dem zu untersuchenden Material eine magnetische Induktion  $\vec{B}_{\text{Anregung}} = \mu \vec{H}_{\text{Anregung}}$  (Gleichung 5) und eine elektrische Verschiebung  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  bewirkt. Hierbei ist  $\mu$  die magnetische Permeabilität und  $\epsilon$  die Dielektrizitätskonstante. Die magnetische Induktion  $\vec{B}_{\text{Anregung}}$  erzeugt nach dem Induktionsgesetz von Faraday, der 2. Maxwellgleichung (Gleichung 2), ein elektrisches Feld  $\vec{E}_{\text{Induziert}}$  im Material. Das so induzierte elektrische Feld bewirkt einen elektrischen Strom, der abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  des Materials ist und als Wirbelstrom bezeichnet wird:

$$\vec{J}_{\text{Wirbelstrom}} = \sigma \vec{E}_{\text{Induziert}} \quad (\text{Induzierte Wirbelstromdichte; Gleichung 6})$$

Die beiden Maxwellgleichungen (Gleichung 3 und Gleichung 4) geben das Grundgesetz des Magnetismus und der Elektrostatik wieder.

Unter der Voraussetzung einer guten elektrischen Leitfähigkeit des Materials kann der Verschiebungsstrom, bei den für die Wirbelstromprüfung eingesetzten Frequen-

zen, vernachlässigt werden. Somit ergibt sich nach der 2. Maxwellgleichung für die induzierte Wirbelstromdichte (Gleichung 6) folgender Zusammenhang:

$$\operatorname{rot} \vec{E}_{\text{Induziert}} = \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \vec{J}_{\text{Wirbelstrom}} = -\frac{\partial \vec{B}_{\text{Anregung}}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{H}_{\text{Anregung}}}{\partial t} \quad \text{Gleichung 7}$$

$$\Leftrightarrow \operatorname{rot} \vec{J}_{\text{Wirbelstrom}} = -i\sigma\mu\omega\vec{H}_{\text{Anregung}}$$

Vorausgesetzt wurde dabei eine harmonische Anregung mit der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  (mit  $f =$  Anregungsfrequenz). Der induzierte Wirbelstrom ist also neben der Frequenz auch abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität. Da bei der Wirbelstromprüfung die induzierte Wirbelstromdichteverteilung ausgewertet wird, reagiert das Verfahren also auf diese beiden Materialkennwerte, die elektrische Leitfähigkeit und die magnetische Permeabilität. Soweit Werkstoffeigenschaften diese beiden Kennwerte beeinflussen, sind sie prinzipiell mit dem Wirbelstromverfahren erfassbar. Einen Überblick über die Eigenschaftsänderungen, die mit dem Verfahren nachweisbar sind, wurde von Becker /5/ in einer Tabelle zusammengefasst (Tabelle 1).

Werkstoffeigenschaft	Leitfähigkeit $\sigma$	Permeabilität $\mu$
chemische Zusammensetzung	++	+
Mischkristall-Zusammensetzung	+	+
Gefüge, Korngröße	-	++
Ausscheidungen	-	++
Einflüsse, Poren	-	+
innere Spannungen	+	++
lamellar tearing, Anisotropie	-	+
Mikrorissfelder, Spannungsrisskorrosion	+	+
Verformung	-	+
$\delta$ -Ferrit in Austenit	+	++
Dendriten im Stahl	-	-
(-) ohne Einfluss, (+) mit Einfluss (++) mit starkem Einfluss		

Tabelle 1: Mit dem Wirbelstromprüfsystem nachweisbare Werkstoffeigenschaften nach R. Becker /5/

Nach der obigen Tabelle hat die Wirbelstromprüfung bei elektrisch leitfähigen Werkstoffen und Werkstoffkombinationen ein breites Anwendungsgebiet, das sich von der Prüfung auf verschiedene Werkstofffehler, der Bestimmung von Werkstoffen bis hin zur Kontrolle von Wärmebehandlungen erstreckt. Abhängig von der Leitfähigkeit und Permeabilität stellen sich verschiedene Wirbelstromverteilungen ein, die ausgewertet werden. Auf diese Weise können Bindefehler sowie Porosität nachgewiesen und Schichtdicken gemessen werden.

Neben den beiden Materialeigenschaften hat auch die Anregungsfrequenz (siehe Gleichung 7) einen Einfluss auf die induzierte Wirbelstromdichte. Bei gleich bleibenden Materialdaten und Magnetfeldstärken steigt die Wirbelstromdichte mit zunehmender Frequenz an. Durch die induzierten Wirbelströme wird das Anregungsfeld abgeschwächt, was zu einer begrenzten Eindringtiefe des Felds in das Material führt. Zur Beschreibung der Eindringtiefe wird ein Modell eingesetzt, bei dem das Verhalten einer ebenen, elektromagnetischen Welle analysiert wird, die in ein elektrisch leitfähiges Material eindringt. Dabei nimmt die Amplitude der Welle mit zunehmender Materialtiefe ab (Skinneffekt). Als Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle wird die Materialtiefe bezeichnet, bei der die Anfangsamplitude der Welle auf  $1/e$  abgefallen ist. Diese Eindringtiefe beträgt unter Berücksichtigung des oberen Modells:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu\sigma}} \quad \delta = \text{Eindringtiefe} \quad (\text{Gleichung 8})$$

Die Eindringtiefe ist demnach von der Anregungsfrequenz  $f$  sowie von der Leitfähigkeit  $\sigma$  und der Permeabilität  $\mu$  abhängig.

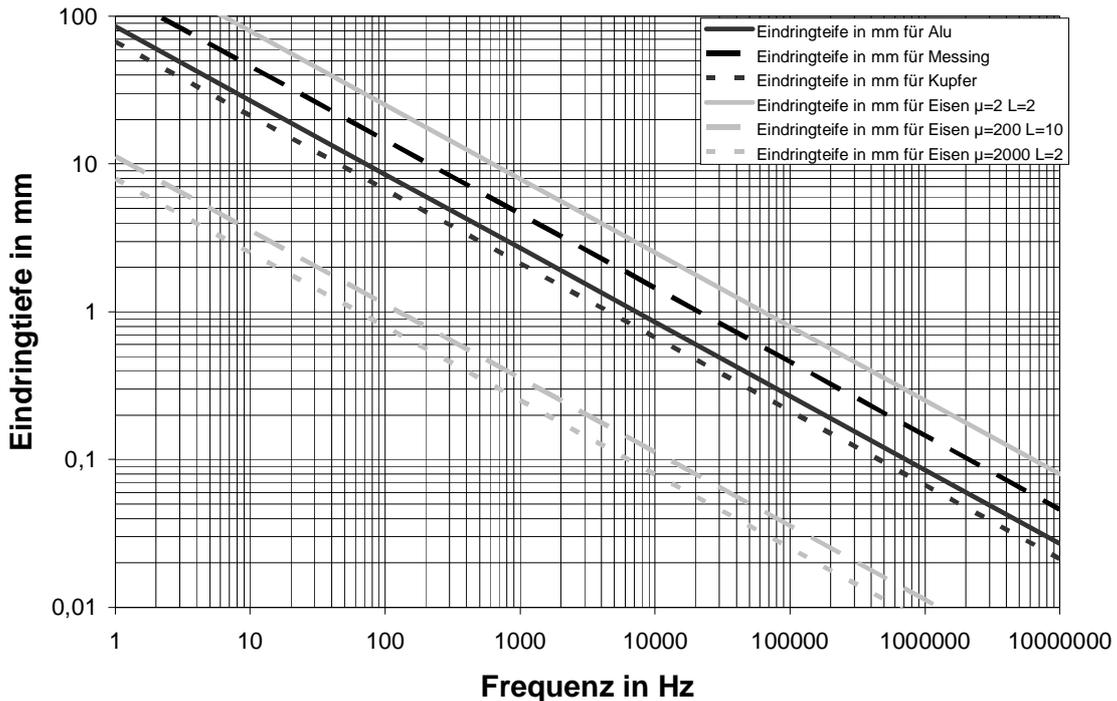


Bild 1: Eindringtiefe für verschiedene Materialien in Abhängigkeit von der Prüffrequenz /5/

Die Eindringtiefe für verschiedene Materialien in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz ist im Bild 1 aufgetragen. In der Darstellung ist die Eindringtiefe doppeltlogarithmisch gegen die Frequenz aufgetragen. Die Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Erregerfrequenz - mit zunehmender Frequenz verringert sich die Eindringtiefe - ist deutlich zu erkennen. Ebenso wird der Einfluss der Materialeigenschaften (Leitfähigkeit und Permeabilität) auf die Eindringtiefe deutlich. So hat beispielsweise Kupfer wegen seiner höheren Leitfähigkeit eine geringere Eindringtiefe als Aluminium und Messing. Diese Grafik zeigt deutlich den Einfluss der für die Wirbelstromprüfung relevanten Parameter, nämlich die elektrische Leitfähigkeit, die magnetische Permeabilität und die gewählte Anregungsfrequenz.

Die Induktion der Wirbelströme erfolgt mit einer Spule, die mit einem Wechselstrom betrieben wird und die sich über dem zu prüfenden Bauteil befindet. Dabei hat der Aufbau der Spule sowie deren Geometrie einen hohen Einfluss auf den Nachweisbereich des Sensors /6/ - /10/. Im Bild 2 ist diese so genannte Sendespule eingezeichnet, die im Material die Wirbelströme induziert. Diese Wirbelströme erzeugen

gen ein sekundäres Magnetfeld, das nach der Lenz'schen Regel dem primären Feld entgegengesetzt ist.

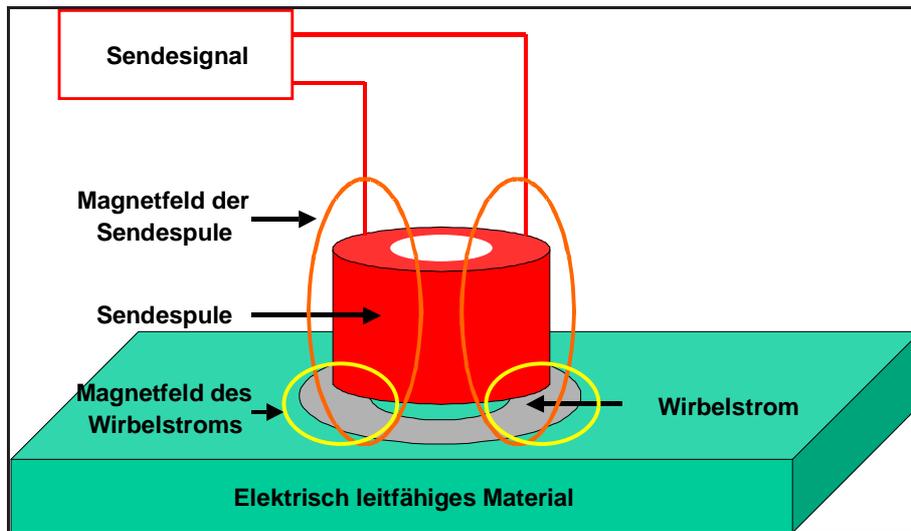


Bild 2: Induktion des Wirbelstroms mit einer Sendespule

Die Überlagerung der beiden Felder kann durch Messung der Induktivitätsänderung der Sendespule oder mit Hilfe einer zweiten Spule, der so genannten Empfangsspule, aufgenommen werden. Eine mögliche Lage der Empfangsspule ist im Bild 3 dargestellt.

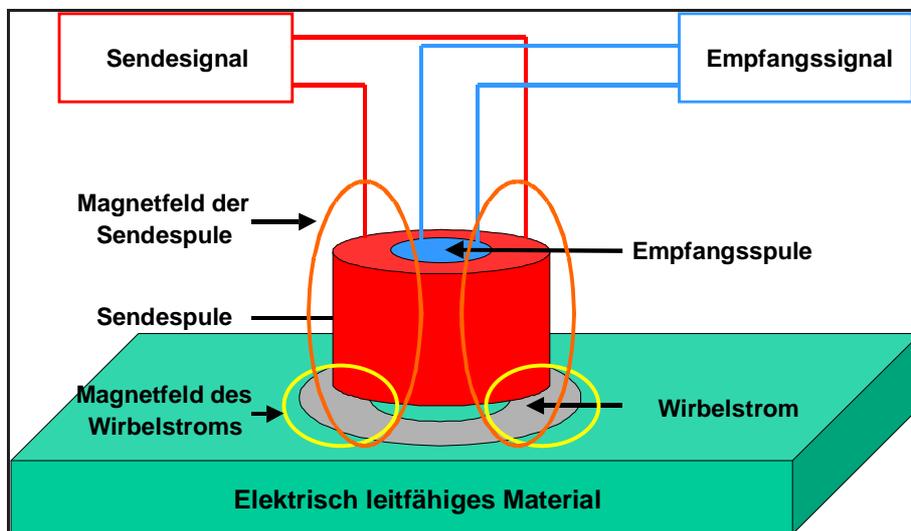


Bild 3: Aufbau eines Tastsensors

Das im Bild 3 dargestellte Sensorsystem entspricht dem eines Tastsensors, der über dem zu prüfenden Bauteil verfahren wird. Dabei wird das sich einstellende Magnetfeld - eine Überlagerung aus dem Anregungsfeld und dem vom Wirbelstrom erzeugten Magnetfeld - durch die an der Empfangsspule anliegende Spannung aufgenommen. Den erhaltenen Spannungsverlauf bei der Detektion eines Risses gibt Bild 4 wieder.

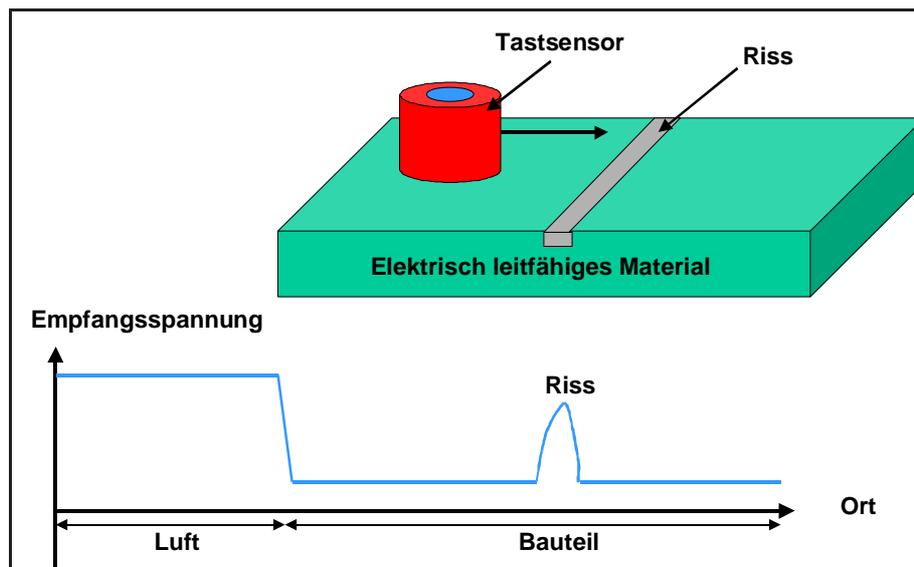


Bild 4: Detektion eines Risses mit dem Tastsensor (Absolutsystem)

Zu Beginn der Messung befand sich der Sensor neben dem Bauteil, es konnten also auch keine Wirbelströme induziert werden. In der Empfangsspule liegt somit nur das ungestörte Anregungsfeld vor, welches eine hohe Empfangsspannung induziert. Wenn sich der Sensor über dem Bauteil befindet, wird das Magnetfeld der Sendespule durch das Magnetfeld, welches von den Wirbelströmen erzeugt wird, gedämpft, was sich in einer Abnahme des Empfangssignals äußert. Die Änderung der Empfangsspannung ist dabei von der elektrischen Leitfähigkeit und Permeabilität des Bauteils abhängig. Auf diese Art ist somit auch eine Verwechslungsprüfung möglich, soweit sich die Bauteile in diesen Eigenschaften unterscheiden. Befindet sich der Sensor über dem Riss, müssen die Wirbelströme tiefer im Material fließen, was zu einer Zunahme des in der Empfangsspule überlagerten Magnetfelds und somit zum Ansteigen der Empfangsspannung führt.

Da bei diesem Sensor die Empfangsspannung proportional zum Absolutwert des Magnetfelds ist, wird es auch als Absolutsensor bezeichnet.

Ein weiteres Sensorsystem stellt der Differenzsensor dar, der durch den Einsatz von zwei Empfangsspulen die Magnetfelddifferenz zwischen zwei Messorten aufnimmt (Bild 5). Die beiden Empfangsspulen sind nebeneinander innerhalb der Sendespule positioniert.

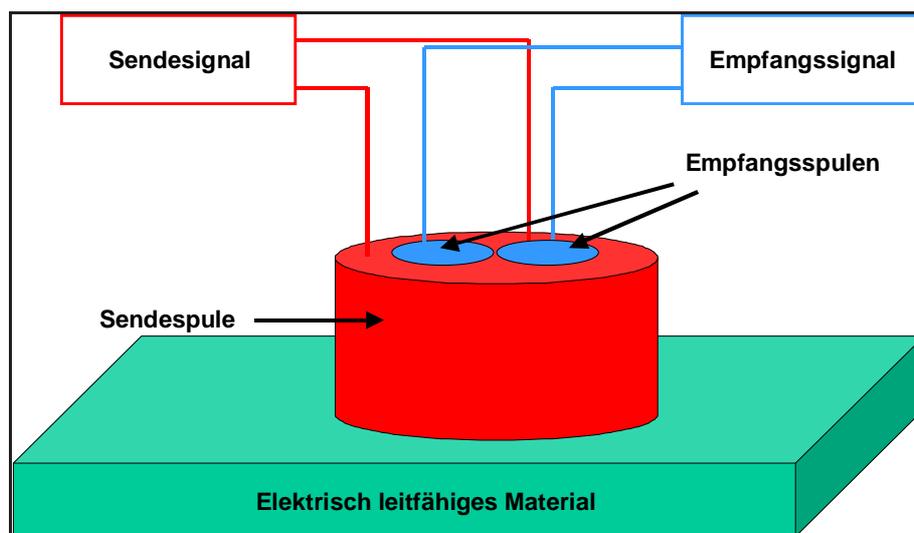


Bild 5: Aufbau des Differenzsensors

Ausgewertet wird bei diesem System die Spannungsdifferenz, die zwischen den beiden Empfangsspulen anliegt. Wie im Fall des Absolutsensors wird nun das Verhalten des Sensors bei der Detektion eines Risses betrachtet. Bild 6 zeigt den Verlauf der Empfangsspannung bei der Untersuchung des Bauteils.

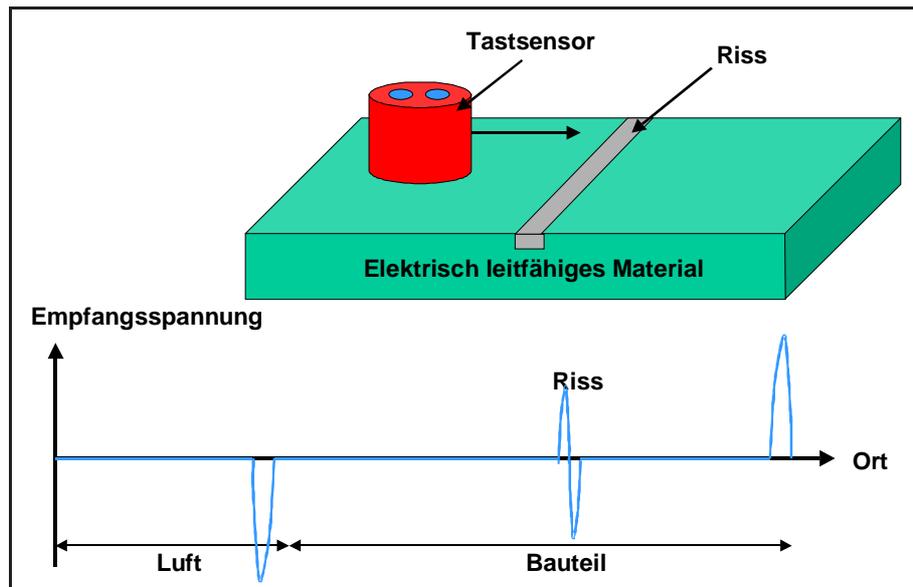


Bild 6: Detektion eines Risses mit dem Tastsensor (Differenzsystem)

Im Gegensatz zum Absolutsystem wird in der Luft und über homogenen Materialbereichen jeweils eine Empfangsspannung von Null angezeigt, da unterhalb der beiden Empfangsspulen gleiche Bedingungen und somit gleiche Induktionsspannungen vorliegen, so dass die Differenzspannung gleich Null ist. Eine Verwechslungsprüfung wie bei dem Absolutsensor ist mit diesem System daher nicht möglich. Im Fall von Materialänderungen, wie die Übergänge zwischen Luft und Bauteil und Bauteil und Luft, sind deutliche Signalanzeigen zu erkennen. Im Fall des Risses ist eine deutliche Anzeige in Form einer sinusähnlichen Kurve zu erkennen. Im Vergleich zum Absolutsensor besitzt der Differenzsensor eine höhere Dynamik und kann daher kleine Materialfehler wie Risse sehr empfindlich detektieren. Durch die Anordnung der beiden Empfangsspulen liegt jedoch im Fall des Differenzsensors eine Richtungsempfindlichkeit vor. Fehler, die auf beide Empfangsspulen gleichzeitig wirken, werden nicht angezeigt. Daher sind für eine vollständige Wirbelstromprüfung eines Bauteils mit dem Differenzsensor mindestens zwei Messungen (jeweils um 90 Grad gedreht) notwendig.

Die oben dargestellten Tastsensoren stellen nur eine Möglichkeit dar, wie die Sende- und Empfangsspule angeordnet sein können. Weitere Sensorsysteme sind z. B.:

- die Durchlaufspule, die insbesondere zur Prüfung von Stangen und Rohren geeignet ist.
- die Halbtransmissionssensoren, bei denen die Sendespule neben der Empfangsspule angeordnet ist.
- die Transmissionssensoren, bei denen sich die Sendespule über dem zu prüfenden Blech, die Empfangsspule aber auf der gegenüber liegenden Seite befindet.
- eine Besonderheit stellt der Mehrpolsensor dar, der wegen seiner drei Sendespulen und einer Empfangsspule neben einem hohen Nachweisbereich auch eine Richtungsempfindlichkeit, in der sich der detektierte Fehler befindet, liefert /11/.

Der Aufbau der oben aufgelisteten Systeme ist im Bild 7 skizziert.

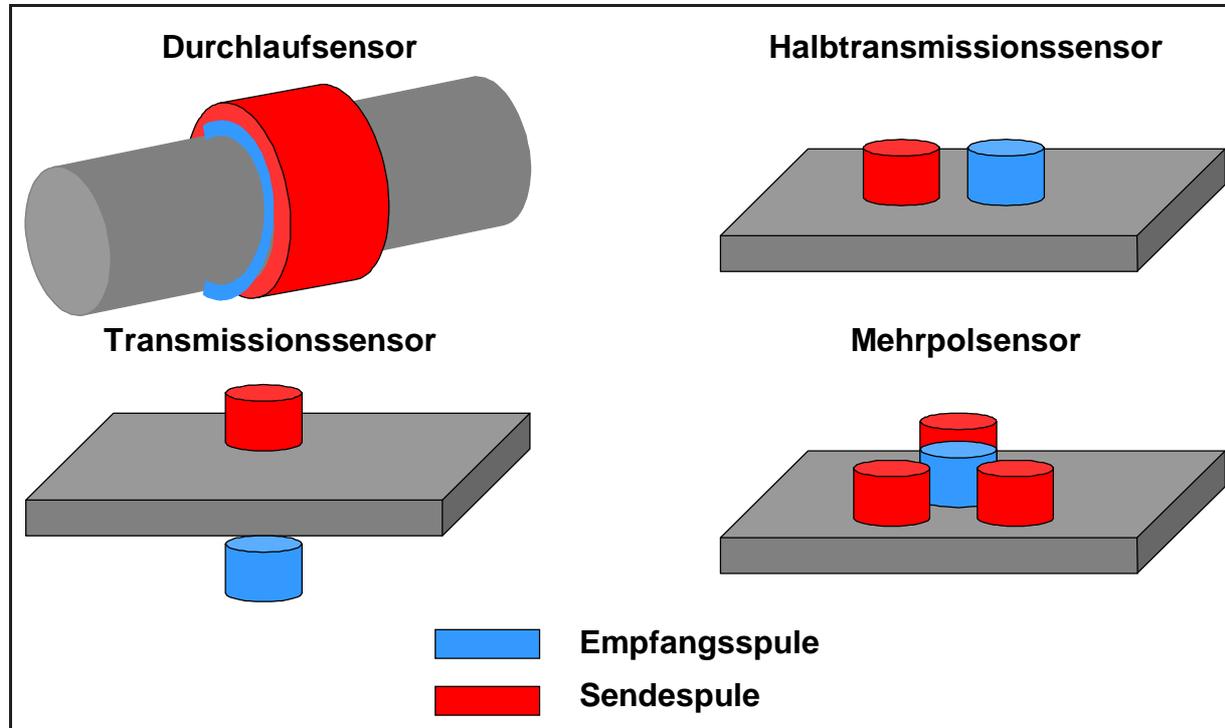


Bild 7: Weitere Sensorsysteme

Für alle Sensoren sind Nachweisbereich und Auflösungsvermögen abhängig von der induzierten Wirbelstromverteilung. Daher sind genaue Kenntnisse über die induzierte Wirbelstromverteilung in Abhängigkeit von der Sendespule (Geometrie, Anzahl der Windungen usw.), den Materialkenndaten (Geometrie des Prüfteils, elektrische Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität) und der Prüffrequenz Voraussetzung zur Optimierung von Wirbelstromprüfsystemen.

## 2.2 Entwicklung der Signalanregung

Im vorherigen Kapitel zeigte sich auch der hohe Einfluss der Anregungsfrequenz auf die Eindringtiefe der Wirbelströme und somit auf dem Nachweisbereich des Wirbelstromsensors. Daher liegt es nahe, dass durch entsprechende Anpassung der Anregungsart eine Optimierung der Wirbelstromprüfung erfolgen kann. Dieser Sachverhalt wurde zuerst von Förster und Mitarbeiter in den 50er Jahren untersucht. Die Aufnahme des Magnetfelds kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Eine Möglichkeit, die nur mit einer Spule, der Sendespule, auskommt, ist die Messung der Impedanz der Sendespule. Hierzu untersuchten Betzhold und Becker /12/ den Einfluss verschiedener Größen auf die Spulenimpedanz. Im Bild 8 ist die Impedanz für unterschiedliche Prüffrequenzen aufgetragen. Dabei sind die Real- und Imaginärteile jeweils normiert angegeben. Die Prüfdaten und die Daten der eingesetzten Spule sind oben rechts im Bild aufgelistet.

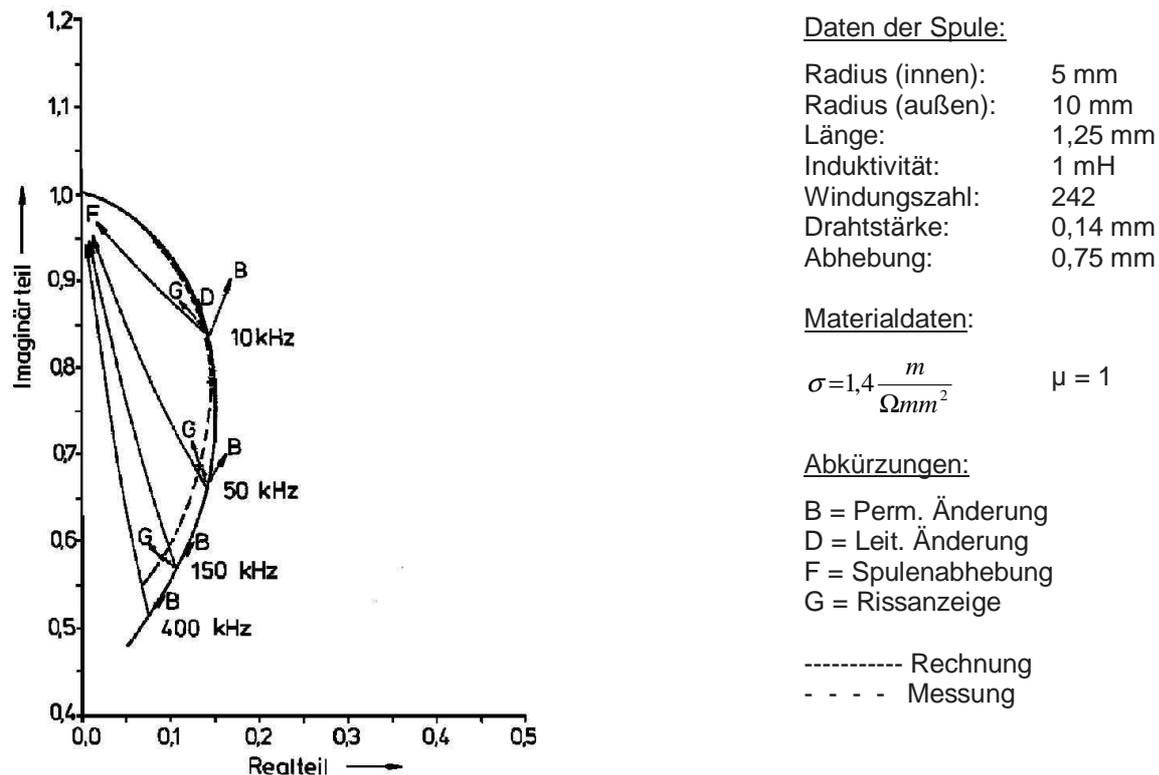


Bild 8: Messung der Impedanz für unterschiedliche Prüffrequenzen nach Becker und Betzhold /12/

Im Diagramm sind sowohl die gemessenen Werte (gestrichelte Linie) als auch die berechneten Werte (durchgezogene Linie) aufgetragen. Im Bereich hoher Frequenzen ist eine geringe Abweichung der beiden Kurven zu erkennen, wobei die gemessenen Werte geringer sind. Die Ursachen hierfür können sekundäre Einflüsse durch den Verstärker oder die Anschlussleitungen sein. Durch Änderung der Frequenz kann die Impedanzkurve abgefahren werden. Zusätzlich zum Einfluss der Frequenz sind auch die Auswirkungen der Permeabilität (B), der elektrischen Leitfähigkeit (D), der Spulenabhebung (F) und der Rissanzeige (G) eingezeichnet. Dabei fällt auf, dass bei einigen Frequenzen, wie z. B. 10 kHz, der Einfluss zweier Größen (hier die Rissanzeige und die Spulenabhebung) die gleiche Änderung der Impedanz bewirken. Dies hat zur Folge, dass bei dieser Frequenz keine Unterscheidung der beiden Eigenschaften möglich ist. Bei einer anderen Frequenz dagegen sind die Eigenschaften sehr gut zu trennen, wie beispielsweise bei der Frequenz von 150 kHz.

Ähnliche Verhältnisse liegen vor, wenn die komplexe Spannung einer Empfangsspule ausgewertet wird. Auch hier ergeben sich Kurven in der komplexen Spannungsebene, die mit denen der Impedanzmessungen vergleichbar sind. Auch da können, bei ungünstig gewählter Frequenz, zwei Eigenschaften nicht getrennt werden.

Eine Sonderstellung bei der Wirbelstromprüfung nehmen die Differenzspulen ein, die auf lokale Magnetfeldänderungen reagieren. Die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Empfangsspulen wird, wie bei den zuvor betrachteten Absolutspulen, die aus einer Empfangsspule bestehen, ebenfalls in der komplexen Spannungsebene ausgewertet. Dabei erhält man so genannte Lissajous-Figuren wie der Messbefund im Bild 9, bei der Detektion von verdeckten Rissen in unterschiedlicher Tiefe, darstellt.

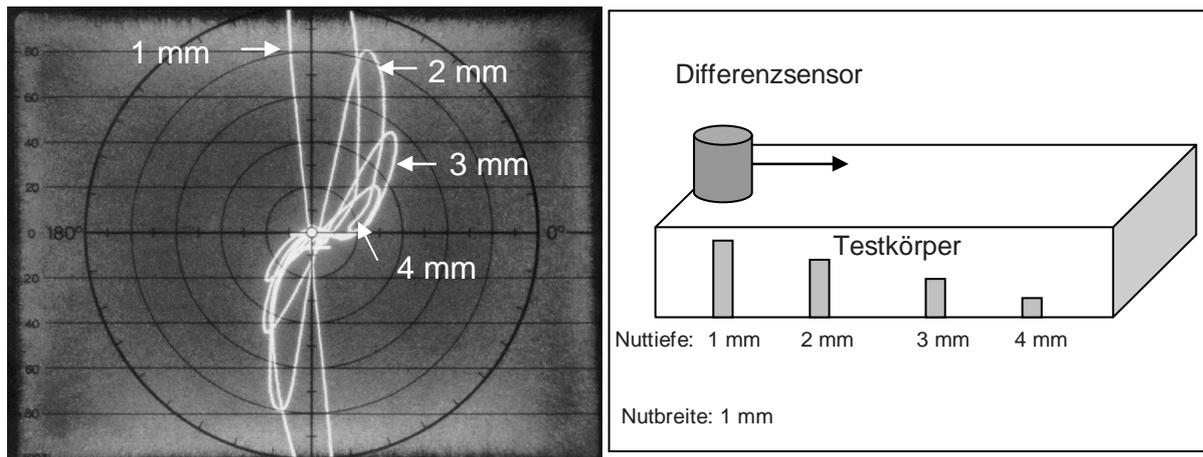


Bild 9: Detektion von Rissen mit einem Differenzsensor

Rechts im Bild 9 ist die Messsituation skizziert. Der Differenzsensor wird über dem Testkörper, der Risse in unterschiedlichen Tiefen besitzt, verfahren und dabei wird die gemessene Empfangsspannung mit Hilfe des Oszilloskops dargestellt. Die Höhe der Lissajous-Figuren gibt die Tiefe des Risses an.

Bei der bisher beschriebenen Anregung kann es bei ungünstiger Frequenz zu Auswertefehlern kommen, da die Einflüsse zweier Größen nicht getrennt werden können. Dies führte zum Einsatz von Mehrfrequenzsystemen, welche eine zuverlässigere Prüfaussage ermöglichen.

Bei den Mehrfrequenzsystemen /13/ wird der Sensor gleichzeitig oder auch nacheinander mit unterschiedlichen Frequenzen angeregt. Durch eine kombinierte Auswertung der Amplituden und Phasen der eingesetzten Prüfsignale ist somit eine sichere Zuordnung zu Einflussgrößen möglich. Dabei gilt nach Becker /14/, dass für die Elimination von  $2n-1$  Störgrößen aus dem Nutzsignal  $n$  Frequenzen mit  $2n$  Kennwerten (pro Frequenz eine Amplitude und Phase) notwendig sind. Somit steigt die Genauigkeit des Systems mit steigender Prüffrequenzenanzahl.

Eine konsequente Weiterentwicklung der Mehrfrequenztechnik stellt die Impulstechnik /15/ - /18/ dar, die mit einem Frequenzband, also beliebig vielen Frequenzen arbeitet. Im Folgenden wird die am Lehrstuhl für Qualitätswesen der Universität

Dortmund entwickelte CS-Impulswirbelstromtechnik /19/ - /22/ (CS = Controlled Signal) näher erläutert.

Hierbei wird anstelle einer einzelnen Frequenz ein ganzes Frequenzband zur Generierung des Sendesignals verwendet (Bild 10). Der entscheidende Vorteil ist, dass Amplitude und Phase der einzelnen Frequenzen des Frequenzbands frei vorgebar sind. Das aus dem Amplituden- und Phasenspektrum durch Fouriertransformation berechnete und anschließend mittels D/A-Wandler in einen Stromimpuls umgewandelte Prüfsignal kann daher, angepasst an die jeweilige Prüfproblemstellung, optimiert werden.

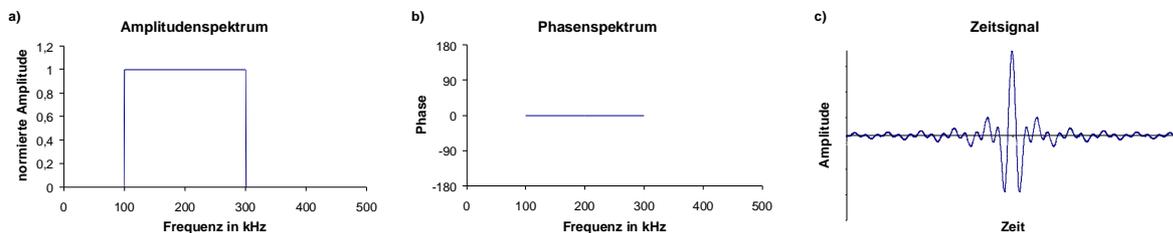


Bild 10: Signalgenerierung bei dem CS-Impulswirbelstromverfahren durch Vorgabe von Amplituden- und Phasenspektrum (a bzw. b) und Berechnung des Zeitsignals (c) durch Fouriertransformation

So kann beispielsweise der Einfluss der Übertragungsfunktion des Sensors auf das Empfangssignal unterdrückt werden, indem die Amplitude der vom Sensor stärker übertragenen Frequenzen des Sendesignals abgesenkt wird.

Das Empfangssignal wird digitalisiert und nach einer inversen Fouriertransformation bezüglich seines Amplituden- und Frequenzspektrums ausgewertet. Eine sehr interessante Auswertemethode im Zeitbereich ist die Korrelation des Empfangssignals mit einem von einem Musterfehler stammenden Referenzsignal. Das zuvor aufgenommene Referenzsignal besitzt ein für den jeweiligen Fehlertyp charakteristisches Amplituden- und Phasenspektrum. Da die aus Referenz- und Empfangssignal berechnete Kreuzkorrelationsfunktion /23/ die Ähnlichkeit beider Signale beschreibt, besteht die Möglichkeit, spezifische Fehler mit hoher Empfindlichkeit nachzuweisen und beim Auftreten verschiedener Fehlertypen eindeutig zu identifizieren.

Wegen der Äquivalenz von Korrelation und Faltung bei einer linearen Übertragungsfunktion von Sensor und Werkstoff lässt sich das Sendesignal bereits so anpassen, dass beim Empfang direkt die Kreuzkorrelationsfunktion erhalten wird. Diese Anpassung ist in Bild 11 verdeutlicht.

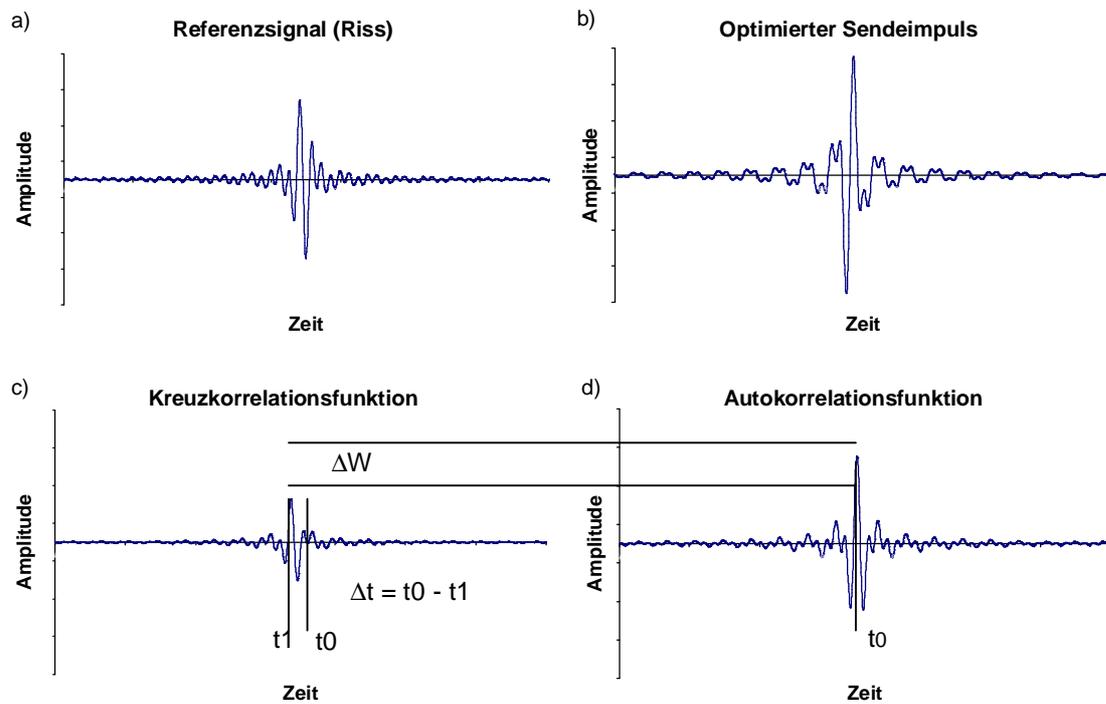


Bild 11: Anwendung der Kreuzkorrelationstechnik beim CS-Impulswirbelstromverfahren

In Teilbild a ist das Empfangssignal des Musterfehlers dargestellt, das man bei dem anfänglich gewählten Sendepuls erhält. Ausgehend von diesem Referenzsignal wird ein optimierter Sendepuls berechnet (Teilbild b). Wird der Musterfehler mit dem optimierten Sendepuls erneut vermessen, so entspricht das Empfangssignal der Autokorrelationsfunktion, da es identisch mit dem Referenzsignal ist (Teilbild d). Wird dagegen ein fehlerfreier Bereich vermessen, so ergibt sich als Empfangssignal die Kreuzkorrelationsfunktion (Teilbild c).

Die Änderung der Maximalamplitude  $\Delta W$  und der Zeitversatz des Maximums  $\Delta t$  ist ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen Empfangs- und Referenzsignal. Je kleiner  $\Delta W$

und  $\Delta t$  ausfallen, desto größer ist die Ähnlichkeit bzw. Wahrscheinlichkeit, dass das Empfangssignal einem spezifischen Fehlertyp zuzuordnen ist.

Wie die oben beschriebenen Beispiele zeigen, ist durch eine entsprechende Signalanregung eine Steigerung der Prüfsicherheit des Wirbelstromsystems möglich. Insbesondere die zuletzt beschriebene CS-Technik ermöglicht, durch Vorgabe eines definierten Frequenzbands und der Möglichkeit der sendeseitigen Korrelation, eine optimale Anpassung an das jeweilige Prüfproblem.

Mit Hilfe der CS-Technik konnte die Fehlerbeschreibung einzelner Wirbelstromprüfsysteme wesentlich gesteigert werden [24] - [27]. So konnte eine höhere Empfindlichkeit für gesuchte Defekte erzielt werden, sowie eine Trennung von großflächigen Materialänderungen zu lokalen Defekten.

Eine Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens ist, bis auf die Möglichkeit hohe Frequenzen einzusetzen, die eine Fokussierung der Wirbelströme bewirken, allein durch eine angepasste Signalanregung jedoch nicht möglich.

### 2.3 Entwicklung der Messdatenauswertung

Anhand des vorherigen Kapitels, welches die Möglichkeiten der Signalanregung analysierte, wurde deutlich, dass die Optimierung bezüglich der Anregung zu einer Erhöhung des Informationsgehalts des Empfangssignals führt. Das hat zur Folge, dass die der Messung anschließende Messdatenauswertung umfangreicher wird. Das Ziel der Messdatenauswertung ist es, das Nutzsignal aus dem Messsignal zu separieren und den Einfluss von Störsignalen, wie sie beispielsweise durch Verkipfung des Sensors oder durch Abstandsänderungen entstehen, zu unterdrücken. Durch die in den letzten Jahren gestiegene Rechentechnik wird bevorzugt die digitale Signalverarbeitung angewandt, welche auch eine schnelle Auswertung und gleichzeitige Dokumentation ermöglicht, was für Online-Prüfsysteme ein notwendiges Kriterium ist.

An erster Stelle - vor dem Einsatz einer umfangreichen Signalverarbeitung - steht jedoch die Bestimmung von relevanten Kennwerten aus dem Empfangssignal. Hierzu werden Messungen an Bauteilen mit den zu bestimmenden Eigenschaften durchgeführt und die erhaltenen Empfangssignale ausgewertet. Sinnvoll ist es dabei, Prüfparameter wie Prüffrequenzen oder Sensoren zu variieren, um Kennwerte aus dem Wirbelstromsignal zu erhalten, die optimal mit der gewünschten Bauteileigenschaft korrelieren. Dazu werden auch Simulationen der Prüfaufgabe unterstützend eingesetzt. Mit dem so optimal für die vorliegende Prüfaufgabe abgestimmten System kann nun eine entsprechende Signalauswertung erfolgen [71].

Je nach Aufgabe und gewünschter Genauigkeit des Prüfsystems werden unterschiedliche Auswertemethoden eingesetzt. So kann beispielsweise bei Anwendungen, bei denen sich die relevanten Kennwerte stark unterscheiden oder nur eine geringe Genauigkeit erfordert wird, eine einfache Schwellwertauswertung der Messgröße, wie Amplitude und Phase bei der monofrequenten Prüfung, ausreichen. Hierbei nimmt die CS-Impulswirbelstromprüfung (siehe Kapitel 2.2) einen besonderen Stellenwert ein. Die Auswertung kann, wie bei den oben beschriebenen monofrequenten Verfahren, durch eine einfache Schwellwertsetzung für die beiden Kennwerte, die Amplitude  $W$  und der Zeitpunkt  $T$ , erfolgen. Da jedoch bereits eine

Korrelation erfolgte, besitzt dieses Verfahren trotz der gleichen Auswertemethode eine wesentlich umfangreichere Datenverarbeitung. Falls Sensorhandhabungssysteme eingesetzt werden, die periodisch über das Bauteil verfahren werden, wie rotierende Sensoren für die Rohrrinnenprüfung /28/, kann diese Frequenz mit zur Auswertung genutzt werden. Dazu wird das Empfangssignal auf Frequenzen ausgewertet, die gleich der Rotationsfrequenz des Sensors sind. Signale anderer Frequenzen werden ignoriert, da sie nicht von einem lokalen Defekt des Rohres ausgehen können.

Bei der Wirbelstromprüfung von ferromagnetischen Werkstoffen treten wegen der werkstoffabhängigen Hystereseschleife Oberwellen auf /29/, die für eine Auswertung mit einbezogen werden können. Hierzu wurde sowohl die mehrdimensionale Regression als auch ein neuronales Netz erfolgreich eingesetzt /30/ - /32/. Das neuronale Netz hat den Vorteil, dass es durch einfache Handhabung (Trainieren) auf eine andere ähnliche Prüfaufgabe optimiert werden kann, sich also der Prüfaufgabe anpassen kann. Die mehrdimensionale Regression erfordert dagegen einen höheren Aufwand bei einer notwendigen Anpassung des Systems.

Neben den bisher genannten Möglichkeiten der Signalauswertung spielt die Bildverarbeitung bei der Wirbelstromprüfung eine wesentliche Rolle /33/ - /35/. Eingesetzt wird sie bei den flächenhaften Untersuchungen von Bauteilen. Hierzu wird der Sensor mit Hilfe eines Manipulators über das Bauteil verfahren. Das Empfangssignal sowie die zugehörigen Koordinaten werden dann digital abgespeichert und können nach der kompletten Messung z. B. in Form einer Falschfarbendarstellung oder eines Flächenplots dargestellt werden. Zur Auswertung solcher Flächenscans wird bereits in der Wirbelstromprüfung Bildverarbeitungssoftware eingesetzt /36/ - /37/. Im Folgenden werden anhand eines einfachen Beispiels die Möglichkeiten zur Auswertung eines Flächenscans gezeigt.

Als Probekörper wurde eine Zugprobe aus VA-Stahl gewählt. Über einen Anriss, der sich in der Mitte des verjüngten Teils befand, wurde durch Zugbelastung ein Risswachstum induziert. Im Bild 12 ist die untersuchte Zugprobe abgebildet.

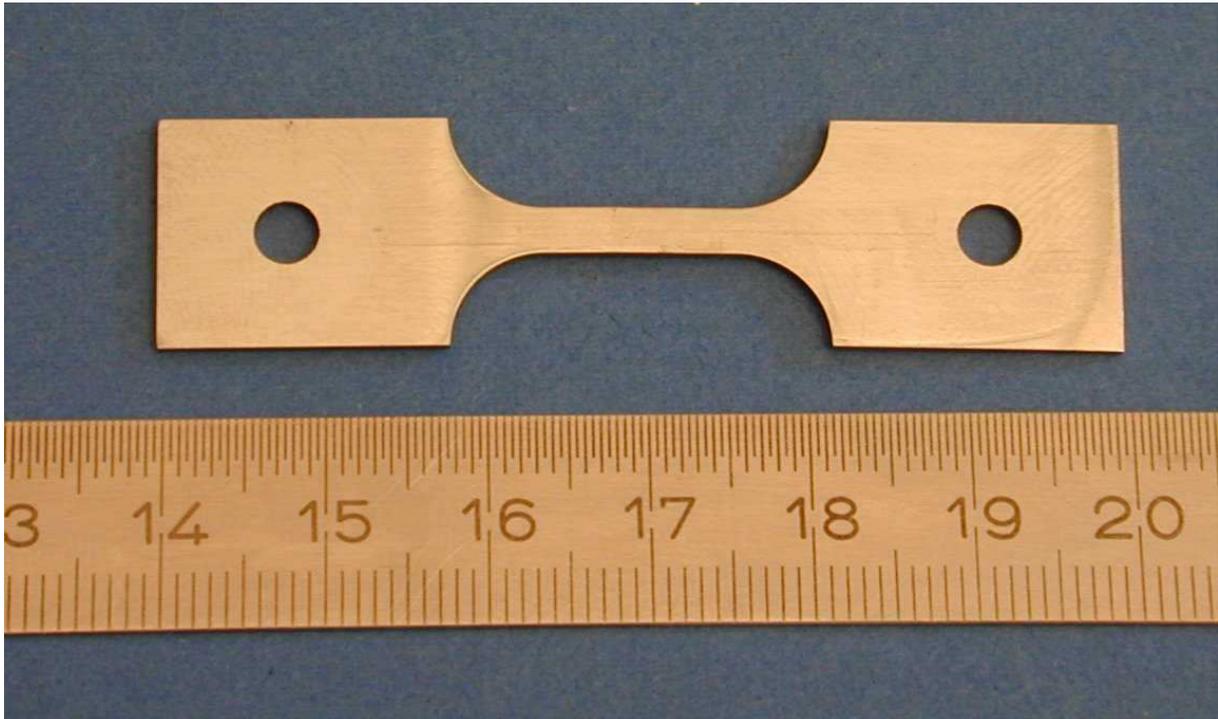


Bild 12: Zugprobe aus VA-Stahl mit Haarriss

Um die genaue Lage und den Verlauf des Risses zu messen, ist ein Handhabungssystem notwendig, das den Wirbelstromsensor exakt und reproduzierbar über die Zugprobe verfährt. Bei dieser Untersuchung wurde als Manipulator ein so genannter Hexapod eingesetzt, der im Bild 13 dargestellt ist. Durch die Ansteuerung der sechs Beine ist ein Verfahren des Messtisches in alle sechs Freiheitsgrade möglich. Somit ist dieser Manipulator nicht nur für die Prüfung von ebenen Flächen geeignet, sondern kann auch zur Prüfung von komplexen Bauteilen, wie beispielsweise von Turbinenschaufeln, eingesetzt werden.



Bild 13: Zur Prüfung der Zugprobe eingesetzter Manipulator

Als Sensor wurde zunächst ein hochfrequenter Absolutsensor eingesetzt, der mit einer Frequenz von 2 MHz vom Messrechner über eine D/A-Karte angesteuert wird. Das Empfangssignal wurde nach einer Digitalisierung vom Messrechner abgespeichert. Die Zugprobe wurde unterhalb des Sensors verfahren, wobei der Abstand zwischen Bauteiloberfläche und Sensor ca. 0,2 mm betrug. Untersucht wurde die komplette Zugprobe, wobei das abgescannte Gebiet 20 mm mal 65 mm und die Schrittweite in beiden Richtungen 0,1 mm betragen. Das unbehandelte Messergebnis ist oben im Bild 14 in Form einer Grauwertdarstellung, welche die Empfangsamplitude wiedergibt, abgebildet.

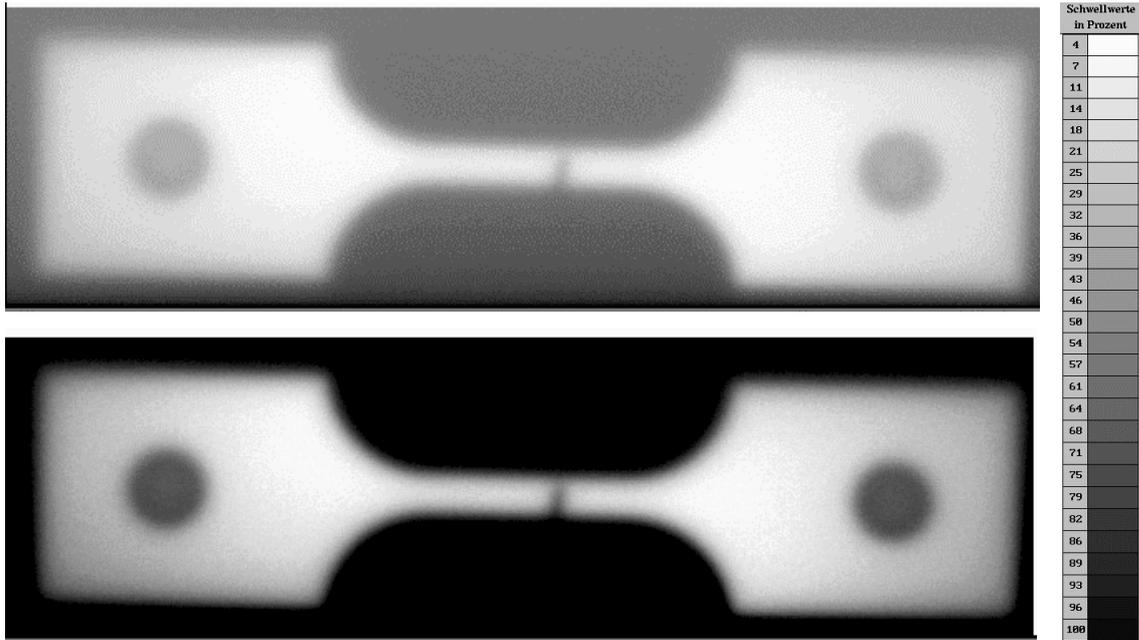


Bild 14: Messbefund mit Absolutsensor (Messfrequenz: 2 MHz)  
 Oben: unbehandelte Messwerte  
 Unten: angepasste Schwellwertauswertung

Die Grauwertskalierung wurde so gewählt, dass der Hintergrund dunkel und die Zugprobe hell erscheint, d. h. hohe Amplituden erhalten dunkle Grauwerte und kleine Amplituden helle Grauwerte. Bei dieser und den folgenden Auswertungen wurden 28 Grauwerte eingesetzt, was zu einer Auflösung von ca. 4 % Amplitudenänderung führt, bezogen auf die Differenz zwischen maximaler und minimaler Amplitude. Bereits beim unbehandelten Messbefund ist der Riss deutlich zuerkennen, wobei der Kontrast durch eine angepasste Schwellwertauswertung erhöht wurde (Bild unten).

Durch Einsatz eines Differenzsensors ergeben sich folgende Messbefunde (Bild 15). Bei dieser Untersuchung sind wegen der Richtungsabhängigkeit des Differenzsensors zwei Messungen notwendig, bei der der Sensor im Fall der zweiten Messung um 90 Grad gedreht wird. Anhand der unbehandelten Messwerte ist bereits die Richtungsabhängigkeit des Sensors zu erkennen. Im oberen Bild sind die waagerechten Linien und im unteren die senkrechten Linien stärker zu sehen.

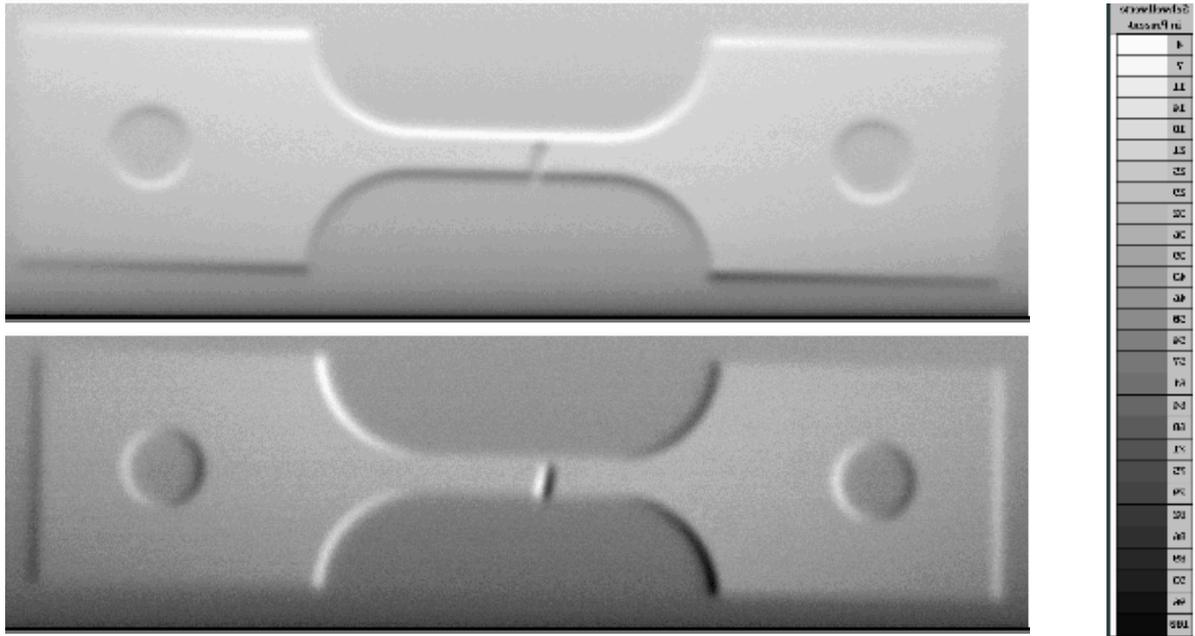


Bild 15: Messbefund mit Differenzsensor (Messfrequenz: 2 MHz)

Oben: Empfindlichkeit des Sensors:  $\uparrow$

Unten: Empfindlichkeit des Sensors:  $\rightarrow$

In diesem Fall kann, wie bei der Absolutmessung, durch eine angepasste Schwellwertsetzung die Lage und auch der Verlauf des Fehlers stärker zu Geltung kommen. Jedoch ist gerade für die Messung mit einem Differenzsensor eine weitere Methode, bei der der Gradient ausgewertet wird, sinnvoller. Hierzu werden Gebiete, bei denen ein hoher Gradient vorliegt, was bei den typischen sinusförmigen Differenzsignalen der Fall ist, farblich markiert. Die so erhaltenen Ergebnisse sind im Bild 16 dargestellt.

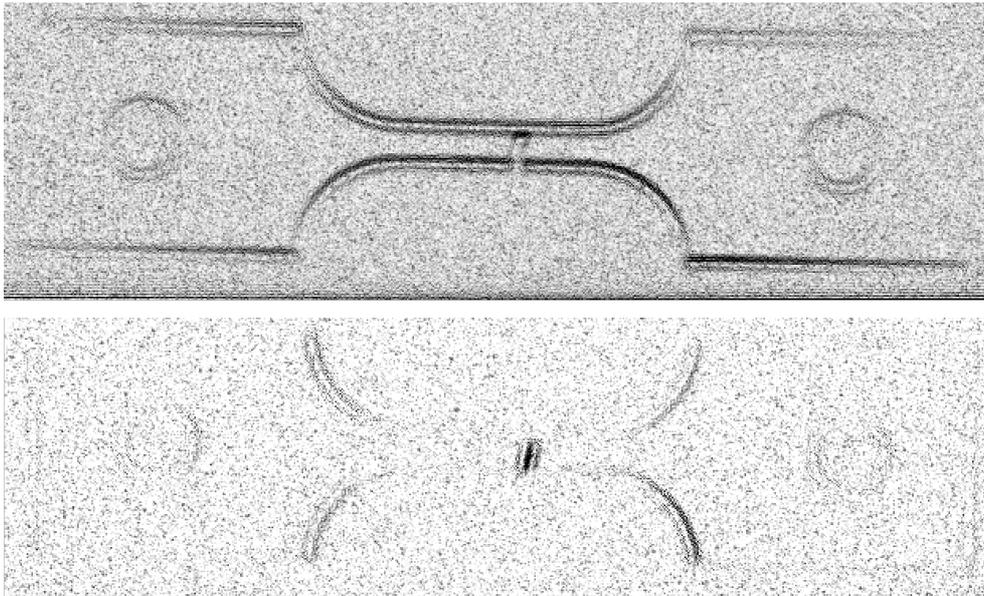


Bild 16: Messbefund mit Differenzsensor (Messfrequenz: 2 MHz)  
 Gradientenauswertung  
 Oben: Empfindlichkeit des Sensors:  $\uparrow$   
 Unten: Empfindlichkeit des Sensors:  $\rightarrow$

Der vollständige Messbefund im Fall der Differenzmessung ergibt sich erst nach Überlagerung der beiden Messbefunde. Bei dieser Auswertungsart sind die Kanten der Zugprobe sowie der Riss deutlich anhand der dunklen Linien zu erkennen. Einflüsse wie z. B. der Abstandseffekt werden bei dieser Auswertungsart unterdrückt.

Diese einfachen Bearbeitungen von Flächenscans zeigen, wie effektiv solche Verfahren sein können. Eine weitere wesentlich komplexere Anwendung ist die Unterdrückung von Störsignalen, die von der Geometrie des Bauteils ausgehen, was durch den Einsatz von Ortsfiltern ermöglicht wird. Dadurch ist die Unterdrückung des Einflusses von komplex geformten Oberflächenkrümmungen, wie sie bei Turbinenschaufeln vorkommen, möglich /38/. Ebenso kann dieser Einfluss durch die Subtraktion eines Referenzbilds, welches die Wirbelstromanteile einer unbeschädigten Turbinenschaufel wiedergibt, eliminiert werden. Insbesondere in diesem Bereich hat die Bildverarbeitung im Bereich der Wirbelstromprüfung einen hohen Stellenwert.

Wie das einfache Beispiel zur Auswertung von Flächenscans der Zugprobe zeigte, ist eine Steigerung der Ortsauflösung, d. h. die Lage des Fehlers, möglich. Daher sind die Auswertemethoden auch bezüglich einer Verbesserung des lateralen Auflösungsvermögens, besserer Fehlerbeschreibung sowie zur Separation dicht nebeneinander liegender Fehleranzeigen geeignet. So wurde bei der Vermessung eines Aluminiumtestkörpers durch entsprechende Signalauswertung das laterale Auflösungsvermögen zur Trennung dicht nebeneinander liegender Fehler um den Faktor 3 auf 300  $\mu\text{m}$  gesteigert /39/.

Neben dem Aufbau des Sensors und der Anregungsart und –frequenz hat somit die anschließende Signalverarbeitung ebenfalls einen hohen Einfluss auf das laterale Auflösungsvermögen.

## 2.4 Entwicklung in der Sensorik

Die bisherigen Betrachtungen ergaben, dass sowohl die Anregungsfrequenzen als auch die Geometrie des Sensors einen hohen Einfluss auf die Wirbelstromverteilung und somit auf den Nachweisbereich des Sensors haben. Daher kann durch Anpassung des Sensors bezüglich der Geometrie und des Frequenzverhaltens der Nachweisbereich gezielt optimiert werden.

Bei Prüfungen in größeren Bauteiltiefen, wie sie beispielsweise bei der Gefügeprüfung notwendig sind, sind wegen des Skin效ekts Sensoren notwendig, die besonders im niederfrequenten Bereich empfindlich sind. Auf Grund der Spulenübertragungsfunktion (geringe Empfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen) werden diese Sensoren mit großen Stromstärken betrieben, um das Signal/Rauschverhältnis zu verbessern. Dies erfordert eine hohe Drahtstärke und, um ein hohes Anregungsfeld zu erreichen, eine hohe Windungszahl. Zusätzlich ist es gegebenenfalls noch notwendig, den Sensor an eine vorhandene Geometrie anzupassen. Bild 17 zeigt einen solchen Sensor.

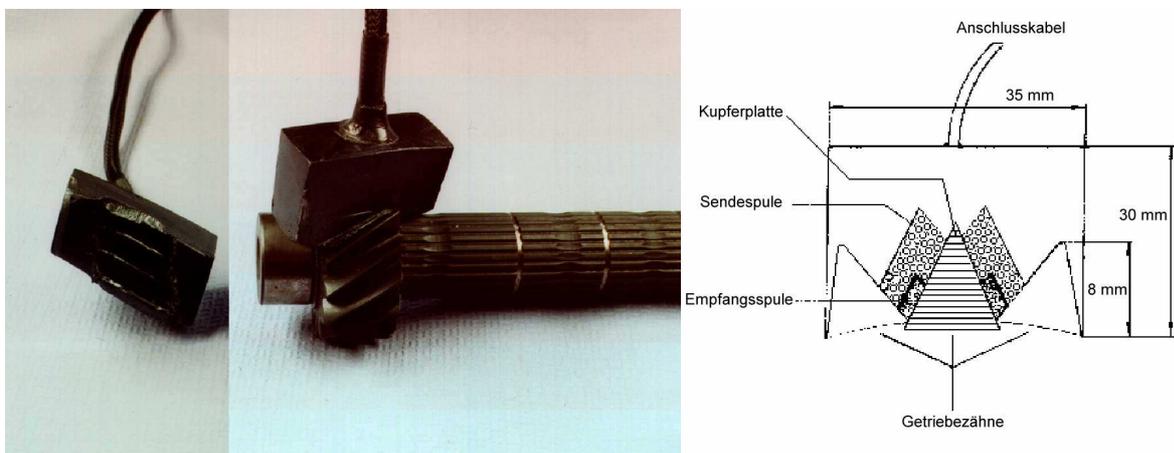


Bild 17: Niederfrequenter Sensor zur Prüfung von Härtetiefen an Getriebewellen

Der Sensor wurde zur Prüfung der Härtetiefe in Getriebewellen erstellt. Eine Skizze des Sensoraufbaus ist rechts im Bild 17 abgebildet. Sende- und Empfangsspule umgeben den zu prüfenden Getriebezahn. Die Passformen für die Zähne rechts und links daneben dienen zur genauen Positionierung des Sensors und um Verkippungseffekte bei der durchzuführenden Handmessung zu reduzieren. Die Abschirmbleche (Kupferplatten) dienen zur Unterdrückung des Einflusses der Randzone der Zähne auf das Empfangssignal. Mit diesem Sensor, zusammen mit einer Oberwellenauswertung, konnte die Härtetiefe für einen Bereich von 150 bis 650  $\mu\text{m}$  mit einer Genauigkeit von 9  $\mu\text{m}$  bestimmt werden /29/ - /32/.

Für sehr tief im Material liegende Prüfmerkmale werden die im niederfrequenten Bereich unempfindlichen induktiven Sensoren gegen empfindlichere Systeme ersetzt. Den empfindlichsten Sensor stellt der SQUID (**S**uperconducting **Q**uantum **I**nterference **D**evice) /40/ dar. Die Empfindlichkeit dieses Systems ist bei einer Anregungsfrequenz von 10 Hz um ca. 8 Größenordnungen besser als bei dem konventionellen induktiven Sensor.

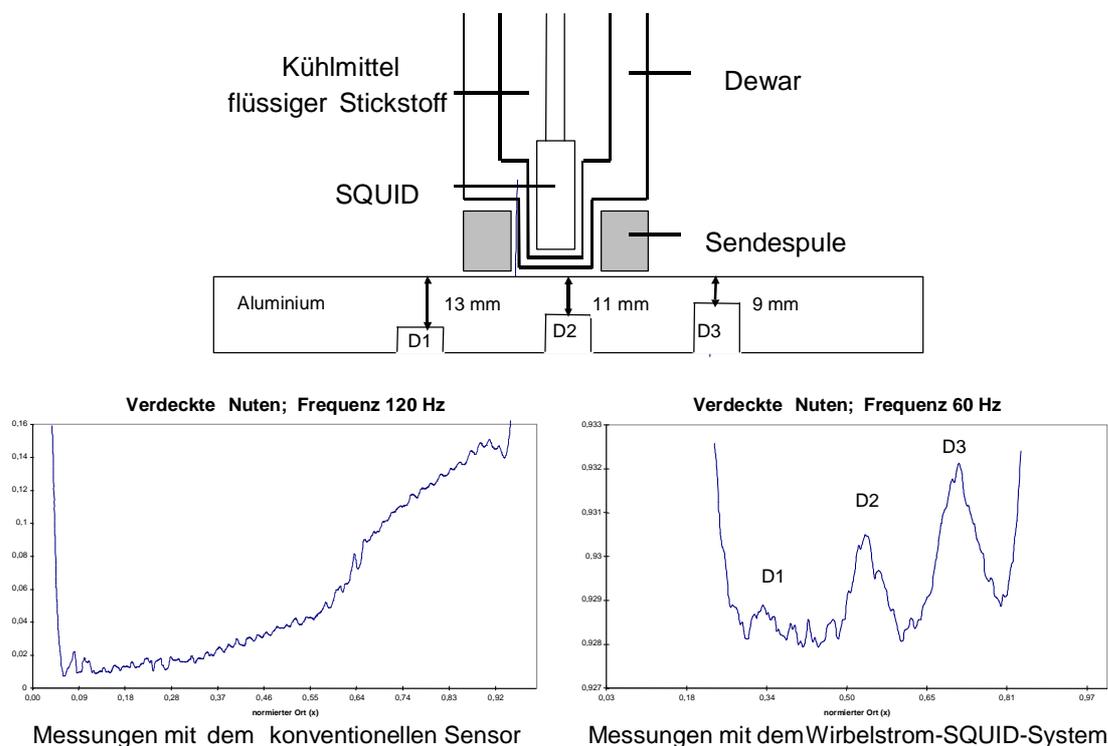


Bild 18: SQUID-Wirbelstromprüfsystem zur Detektion tief liegender Fehler  
 Oben: Aufbau des Systems  
 Unten links: Messbefunde mit dem konventionellen Sensor  
 Unten rechts: Messbefunde mit dem SQUID-Wirbelstromprüfsystem

Die hierzu durchgeführten Untersuchungen /41/ - /44/ bestätigten den hohen Nachweisbereich des SQUID-Wirbelstromsensors. Den Aufbau des Sensors sowie die entsprechenden Messergebnisse zeigt Bild 18.

Der SQUID befindet sich innerhalb der Sendespule und übernimmt dort die Funktion der konventionellen Empfangsspule. Da der Supraleiter auf eine Temperatur von - 197 Grad Celsius abgekühlt werden muss, befindet sich das System innerhalb eines Dewargefäßes, welches mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist. Ausgewertet wird, wie bei den konventionellen induktiven Sensoren, die Empfangsspannung, die proportional zum vorliegenden Magnetfeld ist. Die Messergebnisse unten im Bild zeigen, dass mit dem SQUID-Wirbelstromprüfsystem Materialfehler in einer Tiefe von über 1 cm mit einer Anregungsfrequenz von 60 Hz detektiert werden können, die mit dem konventionellen System, wegen der geringen Empfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen, nicht erkannt werden. Das SQUID-Wirbelstromprüfsystem wurde in den letzten Jahren von einem Konsortium aus Forschungsstellen und Industrie speziell für die Prüfung von Aluminiumbauteilen in der Luftfahrt konsequent weiterentwickelt. Dabei sind bereits erste Ansätze für die Vertreibung eines kommerziellen SQUID-Wirbelstromsystems zu erkennen /45/.

Die bisher beschriebenen Sensoren haben einen hohen Nachweisbereich, der mit einer hohen Wirkbreite, die durch den Durchmesser der Spule, welcher in der Größenordnung von 1 cm liegt, bestimmt wird, und einer hohen Eindringtiefe, durch Einsatz geringer Frequenzen, realisiert wurde. Liegen innerhalb des Nachweisbereichs mehrere oder auch unterschiedliche Materialfehler vor, so werden sie jedoch als nur ein Materialfehler angezeigt. Liegen die Fehler zusätzlich noch dicht nebeneinander, so können sie, da der Nachweisbereich größer als der Abstand zwischen den Fehlern ist, nicht aufgelöst werden. Um auch solche Fehler sicher trennen zu können, sind daher Sensoren mit einem hohen lateralen Auflösungsvermögen notwendig.

Eine hohe laterale Auflösung wird durch eine geringe Wirkbreite realisiert, welche einen kleinen Spulendurchmesser und Einsatz von hohen Frequenzen, die den Wir-

belstrom fokussieren, voraussetzen. Bild 19 zeigt einen so optimierten induktiven Tastsensor. Das laterale Auflösungsvermögen wird bei diesem Sensor durch den Spulendurchmesser von ca. 1 mm beschränkt. Geringere Durchmesser sind wegen dem zu integrierenden Spulensystem (Sende- und Empfangsspulen) und der notwendigen Empfindlichkeit, welche von der Anzahl der Windungen abhängt, kaum realisierbar.

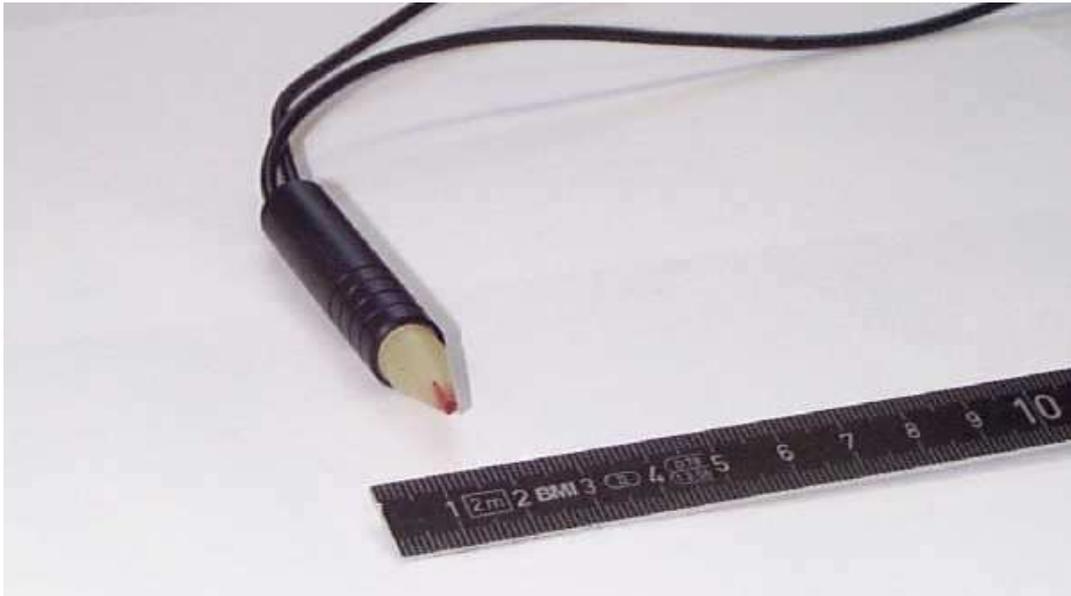


Bild 19: Konventioneller induktiver Tastsensor mit hohem lateralem Auflösungsvermögen

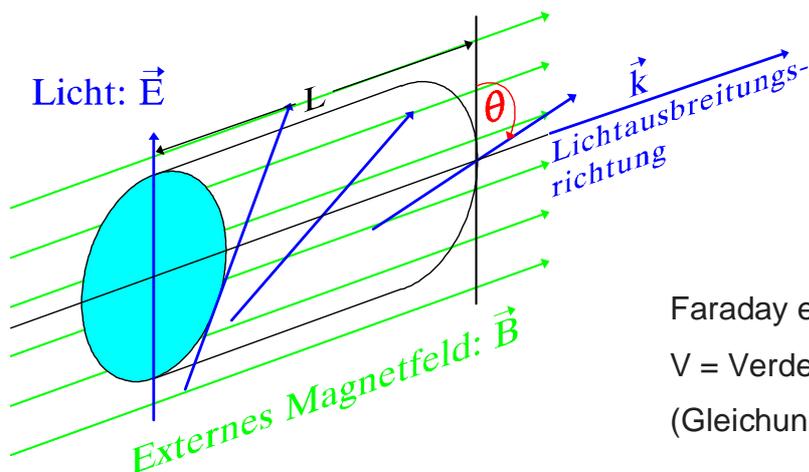
Da bei derart kleinen Spulensystemen eine hinreichend hohe Empfindlichkeit erst bei hohen Frequenzen (größer 1 MHz) erreicht wird, können wegen des Skin效ekts keine tief im Material liegenden Fehler detektiert werden.

Um das laterale Auflösungsvermögen zu steigern, kann die Empfangsspule durch einen anderen Magnetfeldsensor - mit für diese Prüfaufgabe besseren Merkmalen - ersetzt werden, wie es zur Verbesserung der Tiefenauflösung durch Einsatz eines SQUIDs erfolgte. Für Sensoren mit hohem lateralem Auflösungsvermögen sind Magnetfeldsensoren optimal, die auf einer möglichst kleinen Fläche das Magnetfeld messen, was für den Bau kleiner Sensoren mit geringer Wirkbreite notwendig ist. Weiterhin wäre es für die Detektion von tief liegenden Fehlern vorteilhaft, wenn der Sensor auch im niederfrequenten Bereich eine hohe Empfindlichkeit besitzen würde.

Auf Grund der oben aufgeführten Randbedingungen bietet sich der Einsatz magnetooptischer Sensoren an, die auf dem Faradayeffekt basieren. Dieser besitzt bei einer Anregungsfrequenz von 10 kHz eine mit dem induktiven Sensor vergleichbare Empfindlichkeit. Diese ist jedoch frequenzunabhängig, so dass auch bei niedrigen Frequenzen, wie z. B. bei 10 Hz, eine um zwei Größenordnungen höhere Empfindlichkeit vorliegt als bei dem induktiven Sensor. Hierzu wurden bereits von Fritzpatrick /46/ - /49/ Untersuchungen durchgeführt, die das Ziel einer großflächigen Prüfung ebener Bauteile und einer Online-Visualisierung der Wirbelstrombefunde besaßen. Arbeiten zur Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens sind jedoch nicht bekannt. Magnetooptische Materialien wurden auch schon in anderen Bereichen wie z. B. zur Strommessung in Energiekabeln erfolgreich eingesetzt /50/ - /52/. Die Funktionsweise dieses Sensors wird im folgenden Kapitel beschrieben.

## 2.5 Funktionsweise der magnetooptischen Sensoren

Die Grundlage der magnetooptischen Sensoren bildet der im Jahre 1845 von Faraday entdeckten und später nach ihm benannte Effekt /53/, /54/. Dieser beschreibt die Drehung der Polarisations Ebene des Lichts bei Anwesenheit eines Magnetfelds, welches parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichts verläuft. Dieser Effekt ist im Bild 20 skizziert.



Faraday empirisch:  $\theta = V \cdot B \cdot L$ ;  
 $V$  = Verdetkonstante  
(Gleichung 9)

Bild 20: Prinzip des Faraday-Effekts

Das Licht mit einer Ausbreitungsrichtung  $K$  tritt in ein optisch aktives Material ein. Innerhalb dieses Materials wird die Polarisierung des Lichts in Abhängigkeit des parallel zum Licht verlaufenden Magnetfelds um den Winkel  $\theta$  gedreht. Dabei ist der Drehungswinkel  $\theta$  abhängig von der Verdetkonstante  $V$ , der Länge  $L$  des Faraday-Rotators und der Magnetfeldstärke  $B$ . Unter der Voraussetzung, dass die Verdetkonstante unabhängig von  $B$  ist und die Länge des Faraday-Rotators konstant ist, kann über die Bestimmung des Winkels  $\theta$  die Magnetfeldstärke gemessen werden.

Zur Messung der Polarisationsdrehung muss der in den Faraday-Rotator einfallende Lichtstrahl eine definierte Polarisations Ebene besitzen, also linear polarisiert ein. Dies ist der Fall, wenn der elektrische Feldvektor des Lichts, das eine elektromagnetische Welle ist, konstant in eine Richtung zeigt. Diese Richtung ist gleich der Polarisationsrichtung des Lichts. Dringt dieses Licht in den Faraday-Rotator ein, so trifft es auf

bewegte Ladungen, die wegen des anliegenden Magnetfelds eine Präzessionsbewegung mit einer Frequenz von  $\omega' = \frac{e}{m} B$  (Gleichung 10) ausführen. Die Frequenz ist dabei abhängig von der elektrischen Ladung ( $e$ ), der Masse ( $m$ ) und dem Magnetfeld ( $B$ ) und wird auch als Larmor-Frequenz bezeichnet. Das einfallende linear polarisierte Licht lässt sich in zwei zirkular polarisierte Wellen gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Rotationsrichtung (links und rechts drehend) zerlegen, die als Überlagerung wieder die linear polarisierte Welle ergeben (siehe Bild 21 a). Hierbei sind die elektrischen Felder der Wellen aufgetragen. Diese beiden Wellen stoßen nun auf die beweglichen Ladungsträger, dabei ändern sich wegen des Rotations-Doppler-Effekts die Frequenzen für die beiden Wellen zu  $\omega - \omega'$  (Gleichung 11) und  $\omega + \omega'$  (Gleichung 12) /55/. D. h. die beiden Wellen besitzen wegen der Larmor-Frequenz der schwingenden Ladungen des Faraday-Rotators unterschiedliche Frequenzen und damit Geschwindigkeiten. Nach Durchqueren des Faraday-Rotators ergibt sich durch Überlagerung der beiden Wellen, wegen der unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Rotator, eine andere Polarisationsrichtung als vor dem Eindringen in den Rotator (siehe Bild 21 b). Für den Änderungswinkel ergibt sich:  $\Theta = V \cdot L \cdot B$  (Gleichung 9)

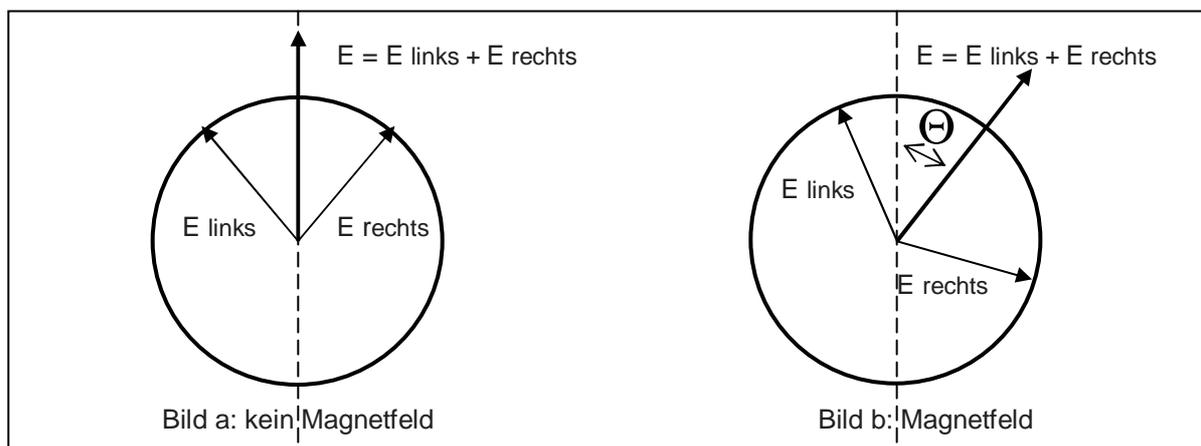


Bild 21: Drehung der Polarisationssebene (Elektrisches Feld E) beim Faraday-Effekt nach Gerthsen /55/

Für den Einsatz des Faraday-Effekts in der Wirbelstromprüfung ist eine möglichst hohe Änderung des Winkels bei kleinen Magnetfeldern sinnvoll. Da der Winkel von der Länge des Rotators und der Verdetkonstante  $V$  abhängt, die wiederum von der Frequenz des eingesetzten Lichts abhängig ist, müssen folgende Parameter für einen optimalen Einsatz der Wirbelstromprüfung angepasst werden:

- die Verdetkonstante
- die Länge des Rotators
- die Lage des Rotators innerhalb der Sendespule
- die eingesetzte Wellenlänge des Lichts.

Der eingesetzte Lichtstrahl kann auf einen Durchmesser von nur wenigen  $\mu\text{m}$  reduziert werden was die Erstellung sehr kleiner Sensoren ermöglicht. Da Empfindlichkeit dieser Sensoren weitestgehend für den für die Wirbelstromprüfung relevanten Anregungsfrequenzbereich frequenzunabhängig ist, können so hoch auflösende Messungen in hohen Bauteiltiefen durchgeführt werden. Erste Untersuchungen zur Erstellung von magnetooptischen Wirbelstromprüfsystemen wurden bereits an der Universität Dortmund am Lehrstuhl für Qualitätswesen durchgeführt /56/ - /58/. Dabei zeigte sich das hohe Potential solcher Systeme für eine Verbesserung des lateralen Auflösungsvermögens.

### **3 Überlegungen zur Verbesserung der lateralen Auflösung bei Wirbelstromsensoren**

Immer höhere Produkthanforderungen haben zur Folge, dass auch die Anforderungen an die Prüfgeräte ansteigen. Denn nur mit Hilfe einer genauen und sicheren Prüftechnik kann die Qualität von Bauteilen, die auch in sicherheitsrelevanten Bereichen wie z. B. der Luftfahrt eingesetzt werden, gewährleistet werden. Im Bereich der zerstörungsfreien Wirbelstromprüfung werden speziell für die Oberflächenprüfung Systeme mit einem hohen lateralen Auflösungsvermögen gefordert. Nur so können dicht nebeneinander liegende Fehler getrennt werden, wodurch eine genaue Bewertung der Schädigung des Bauteils möglich ist.

Für die Herstellung von Sensoren mit hohem lateralem Auflösungsvermögen sind, wie die Betrachtungen im vorherigen Kapitel zeigten, Spulen mit kleinem Durchmesser sinnvoll. Eine weitere Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens ist durch Einsatz hoher Anregungsfrequenzen möglich. Nach diesem Muster werden hoch auflösende Sensoren kommerziell hergestellt. Dabei ergibt sich durch die Konstruktion des notwendigen Spulensystems aus Sende- und Empfangsspule eine untere Grenze für den Sensordurchmesser und somit für das Auflösungsvermögen, die bei ca. 1 mm liegt. Bei diesen Betrachtungen darf jedoch nicht vergessen werden, dass das Material selbst durch seine elektrische Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität einen Einfluss auf das Auflösungsvermögen hat.

Eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens ist nur durch einen Austausch der Empfangsspule durch einen kleineren Magnetfeldsensor möglich. Auf ähnliche Weise wurde bereits das Nachweisvermögen in Richtung der Bauteiltiefe eines Wirbelstromsensors durch Integration eines hoch auflösenden SQUIDs wesentlich erhöht /41/, /42/. Vor der Integration eines anderen Magnetfeldsensors müssen erst die Anforderungen an den Sensor festgelegt werden, wonach dann eine Auswahl erfolgen kann. Zur Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens ist ein Magnetfeldsensor, der nur über eine sehr kleine Fläche ( $\ll 1$  mm) misst, sinnvoll. Des Weiteren soll er auch für niedrigere Frequenzen empfindlich sein, da nur so tiefer

liegende Bauteilfehler detektiert werden können, für die es zur Zeit noch kein System mit hoher lateraler Auflösung gibt.

Diese Anforderungen, kleiner Messort und hohe Empfindlichkeit, erfüllt grundsätzlich ein der magnetooptisches System. Ein auf einem magnetooptischen Sensor basierendes Wirbelstromprüfsystem wurde von Fritzpatrick entwickelt /59/ - /61/ und unter anderem zur Prüfung von Aluminiumblechen aus dem Bereich der Luftfahrt erfolgreich eingesetzt /62/, /63/. Der Sensor basiert auf dem Faraday-Effekt, der die Polarisationssebene eines Laserstrahls in Abhängigkeit des vorliegenden Magnetfelds dreht. Durch Messung der Polarisationsdrehung kann somit auf die Stärke des Magnetfelds geschlossen werden. Bei dem von Fritzpatrick entwickelten und auch patentierten System /48/, /49/ wurde ein magnetooptischer Sensor mit einem Durchmesser von knapp 8 cm eingesetzt, der eine schnelle und großflächige Prüfung ermöglicht. Dabei wurde die gemessene Magnetfeldverteilung mit Hilfe einer CCD-Kamera visualisiert. Schwerpunkt dieses Systems liegt bei der schnellen und auch einfach zu interpretierenden Prüfung von Blechen auf Korrosion oder Prüfung von Nietverbindungen. Als Lichtquelle wurde eine polarisierte Weißlichtquelle eingesetzt, welche die gesamte Sensoroberfläche ausleuchtet.

Durch den Einsatz eines Lasers ist jedoch eine Fokussierung des Lichtstrahls, also auch des Messfelds, auf bis zu 1  $\mu\text{m}$  Durchmesser möglich, wodurch theoretisch auch die Herstellung von Sensoren mit Durchmessern von dieser Größenordnung möglich wäre. Da das Auflösungsvermögen direkt vom Durchmesser abhängt, ist so auch eine hohe Steigerung des Auflösungsvermögens möglich. Des Weiteren ist die Empfindlichkeit dieses Systems weitestgehend frequenzunabhängig, wodurch prinzipiell auch Messungen mit hoher Eindringtiefe (geringe Frequenzen) möglich sind. Durch die Integration eines magnetooptischen Systems in einen Wirbelstromsensor ist demnach eine Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens sowohl für den oberflächennahen Bereich als auch für tiefer im Material liegende Fehler zu erwarten.

Da der magnetooptische Sensor ein sehr hohes Potential zur Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens von Wirbelstromsensoren beinhaltet, werden im Folgenden die Möglichkeiten zur Realisierung eines solchen magnetooptischen Wir-

belstromprüfsystems untersucht. Zuerst werden Berechnungen zur induzierten Wirbelstromverteilung durchgeführt, um die Einflüsse der Prüf-, Sensor- und Materialkenndaten auf das laterale Auflösungsvermögen zu untersuchen. Danach erfolgt die Auswahl des einzusetzenden Faraday-Rotators, wobei neben messtechnischen Gründen auch der wirtschaftliche Aspekt für eine spätere Produktion der Sensoren berücksichtigt werden muss. Aus dem ausgewählten Faraday-Rotatormaterial sind Magnetfeldsensoren herzustellen, deren Magnetfeldempfindlichkeit mittels Messungen bestimmt werden. Nach der Fertigstellung und Überprüfung der Magnetfeldsensoren sind diese in Wirbelstromsysteme zu integrieren, wobei auch Ergebnisse aus Simulationen berücksichtigt werden. Hierbei kommen zwei Auswertarten in Frage. Die Polarisationsdrehung wird in eine Änderung der Lichtintensität umgewandelt und mit Hilfe einer Fotodiode detektiert. Diese Messaufnahme ist mit denen der Spulensysteme vergleichbar, da beide Systeme eine Amplitude und Phase auswerten. Eine weitere Möglichkeit zur Aufnahme der Messinformation ist der Einsatz einer CCD-Kamera anstelle der Fotodiode. Hierbei wird die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule online graphisch dargestellt, was es erlaubt, auf den Vorteil bildverarbeitender Verfahren zurückzugreifen. Da die Messinformation in diesem Fall in dem Laserstrahl vorliegt, kann durch einfachen Einsatz einer Lichtmikroskopoptik eine Vergrößerung erfolgen. Mit diesem zuletzt beschriebenen System sind sehr hoch auflösende und wegen der Visualisierung leicht auswertbare Messungen möglich. Mit beiden Systemen sollen Messungen an Modellfehlern durchgeführt werden, deren Ergebnisse mit denen von konventionellen Systemen verglichen werden. Abschließend sollen beide Systeme an Bauteilen mit realitätsnahen Fehlern eingesetzt und im Hinblick auf eine praxisnahe Anwendung analysiert werden.

## 4 Vorbereitende Arbeiten und Aufbau der magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme

### 4.1 Berechnung der induzierten Wirbelstromverteilung

Der Nachweisbereich eines Wirbelstromsensors lässt sich durch zwei Größen, die Eindringtiefe und die Wirkbreite, beschreiben /64/, wobei die Eindringtiefe ein Maß für den Nachweisbereich des Sensors in der Bauteiltiefe ist und die Wirkbreite den lateralen Nachweisbereich des Sensorsystems beschreibt. Für die Abschätzung der Eindringtiefe wurde im vorherigen Kapitel 2.1 bereits ein einfaches Modell vorgestellt, welches jedoch wegen seiner Annahme einer ebenen elektromagnetischen Welle nur eingeschränkt zur Beschreibung der Eindringtiefe geeignet ist. Für die Wirkbreite hingegen kann dieses Modell der ebenen Welle nicht angewandt werden. Für die Optimierung des lateralen und axialen Auflösungsvermögens eines Sensors sind somit exaktere Berechnungen der induzierten Wirbelstromverteilung, welche den Nachweisbereich des Sensors bestimmen, notwendig.

Die Berechnung der Wirbelstromverteilung kann mit kommerziellen Simulationsprogrammen erfolgen, welche die elektrischen und magnetischen Felder mit Hilfe der Finiten-Differenzen- oder der Finiten-Element-Methode berechnen /65/, /66/. Bei beiden Methoden wird zuerst ein Modell generiert, das sowohl den betrachteten oberflächennahen Materialausschnitt als auch die Anregungsspule beinhaltet, und mit Hilfe eines Gitternetzes diskretisiert. Nach Festlegung der Randbedingungen für den zu untersuchenden Bereich, der Materialkenndaten (elektrische Leitfähigkeit und Permeabilität) und der Prüfparameter (Stromstärke und Anregungsfrequenz) erfolgt die Berechnung. Der Rechenaufwand ist abhängig von der Anzahl der Berechnungspunkte, welche insbesondere bei dreidimensionaler Geometrie und einer hohen Auflösung (Größe einer Berechnungszelle), erheblich sein kann. Somit sind schnelle Rechnersysteme wie z.B. eine Workstation für einen effektiven Einsatz solcher Simulationsprogramme notwendig. Eine alternative Möglichkeit zur Berechnung der Wirbelstromverteilung zeigten Dodd und Deeds /67 - /69/. Die Berechnung des elektrischen Felds an einem beliebigen Raumpunkt erfolgt hierbei durch die Lösung eines

Integralausdrucks. Angaben zu benachbarten Punkten, wie sie bei der Finiten-Differenzen oder der Finiten-Elemente Methode notwendig sind, sind für die Berechnung nicht erforderlich. Daher entfallen die Diskretisierung des berechneten Gebiets und das Aufstellen sowie die Lösung einer Berechnungsmatrix. Die Methode von Dodd und Deeds ermöglicht es also mit geringerem Rechenaufwand die induzierte Wirbelstromverteilung zu bestimmen. Einschränkungen liegen bei den zu simulierenden Anordnungen. So können nur rotationssymmetrische Situationen berechnet werden, was die Simulation eines Bauteilfehlers wie z. B. eines Risses nicht zulässt. Für die grundlegenden Untersuchungen zum Auflösungsvermögen bei Tastsensoren über fehlerfreiem Material oder Schichtverbundwerkstoffen sind diese Einschränkungen jedoch nicht relevant. Aus diesem Grund wurde für eine schnelle und sichere Untersuchung zum Auflösungsvermögen der Tastsensoren die Methode von Dodd und Deeds eingesetzt.

Die Grundlage für die Berechnung nach der Methode von Dodd und Deeds /67 - /69/ bildet die aus den Maxwellgleichungen hergeleitete allgemeine Wellengleichung:

$$\Delta \vec{E} = i\sigma\mu\omega\vec{E} - \epsilon\mu\omega^2\vec{E} \quad \text{mit einer harmonischen Anregung Gleichung 13}$$

Die Wellengleichung für das magnetische Feld  $\vec{H}$  erhält man durch Einsetzen von  $\vec{E}$  für  $\vec{H}$  in Gleichung 13. Unter der Bedingung, dass  $\sigma \gg \epsilon\omega$  gilt, kann der Verschiebungsstrom, der durch den zweiten Teil der Gleichung 13 beschrieben wird, vernachlässigt werden. Für die bei der Wirbelstromprüfung üblichen Materialien wie z. B. Aluminium ergibt sich eine Frequenz von  $6,3 \cdot 10^{17}$  Hz bei der  $\sigma = \epsilon\omega$  ist. Da bei der Wirbelstromprüfung Frequenzen bis zu  $1,0 \cdot 10^7$  Hz eingesetzt werden, ist  $\sigma$  um mehrere Größenordnungen größer als  $\epsilon\omega$ , so dass der Verschiebungsstrom bei der Berechnung der Wirbelstromverteilung vernachlässigt werden kann. Gleichung 13 ergibt sich dann zu:

$$\Delta \vec{E} = i\sigma\mu\omega\vec{E} \quad \text{Gleichung 14}$$

Die Berechnung nach Dodd und Deeds erfolgt unter Annahme eines quellenfreien Vektorpotentials  $\vec{A}$  (d.h.  $\text{div } \vec{A} = 0$ ) /69/, /70/ mit dem sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld berechnet werden kann. Aus dem Ergebnis des elektrischen Felds kann dann auch der Wirbelstrom berechnet werden. Mit Hilfe des Vektorpotentials und unter Berücksichtigung des Anregungsstroms  $\vec{J}_{\text{Anregung}}$  sowie einer harmonischen Anregung ergibt sich die Gleichung 14 zu:

$$\Delta \vec{A} = \mu \vec{J}_{\text{Anregend}} + j\omega \mu \sigma \vec{A} \quad \text{Gleichung 15}$$

Die Gleichung 15 wird nun für vier unterschiedliche Bereiche, wie sie im Bild 22 links dargestellt sind, gelöst.

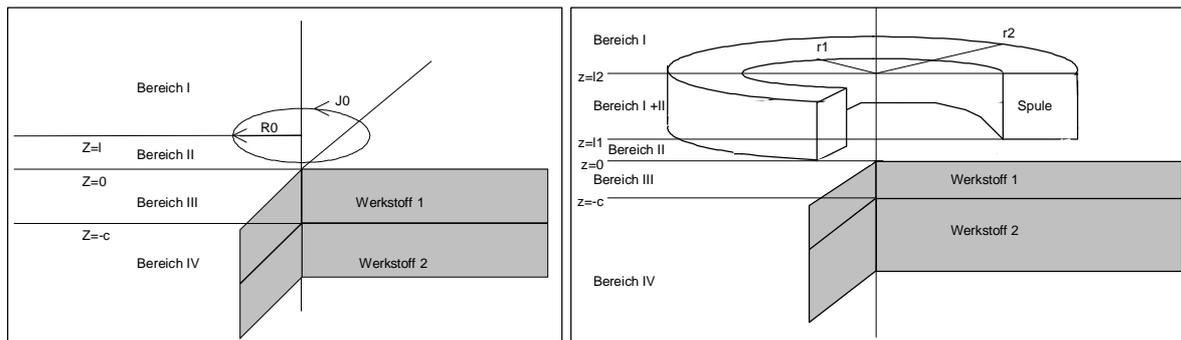


Bild 22: Ausgangspunkt für die Simulation nach Dodd und Deeds

Dieses Modell gilt nur für eine Stromschleife. Um das von einer ausgedehnten Spule ausgehende Feld zu berechnen, werden die Lösungen für die einzelnen Stromschleifen überlagert, wie im Bild 22 rechts dargestellt. Die Überlagerung der einzelnen Anregungsfelder kann mathematisch zusammengefasst werden, so dass auch für diesen Fall nur die Lösung einer Integralgleichung notwendig ist.

Das nach diesem Ansatz am Lehrstuhl entwickelte Simulationsprogramm berücksichtigt folgende Eingabegrößen /71/:

Sensordaten:

- Innen- und Außendurchmesser der Sende- und Empfangsspule
- Länge der Sende- und Empfangsspule
- Windungszahl der Sende- und Empfangsspule

Prüfparameter:

- Anregungsfrequenz
- Stromstärke
- Abstand des Sensors zur Bauteiloberfläche

Materialdaten:

- Elektrische Leitfähigkeit für Schicht und Substrat
- Magnetische Permeabilität für Schicht und Substrat
- Schichtdicke

Aus dem mit dem Simulationsprogramm berechneten Vektorpotential lassen sich nun weitere Größen wie die Wirbelstromdichte an einem Ort  $(r, z)$  ( $r$  = Radius vom Sensormittelpunkt,  $z$  = Bauteiltiefe) auf folgende Art berechnen:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\omega\sigma \vec{A}(r, z) \quad \text{Gleichung 16}$$

Nachfolgend sind die physikalischen Größen aufgelistet, die sich ebenfalls mit dem erstellten Simulationsprogramm berechnen lassen:

- das elektrische Feld
- die magnetische Induktion
- die Wirbelstromdichte
- die an der Empfangsspule induzierte Spannung
- die Impedanzänderung der Sendespule

Mit dem Programm sind, da alle für die Wirbelstromprüfung relevanten Daten berücksichtigt werden, umfangreiche Untersuchungen zur induzierten Wirbelstromverteilung und damit zum Nachweisvermögen des Sensors möglich.

Im Folgenden wird der Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf die Wirbelstromverteilung mit Hilfe von Simulationen untersucht. Berechnet wurde die Wirbelstromverteilung, die von einer Sendespule in einem Material geringer elektrischer Leitfähigkeit ( $\sigma = 2 \frac{m}{\Omega mm^2}$ ) und einer relativen Permeabilität von 1 induziert wird. Diese Daten entsprechen ungefähr denen eines austenitischen Stahls. Die Sendespule befindet sich 1 mm über dem Werkstoff, ihr Innendurchmesser beträgt 16 mm, der Außendurchmesser 30 mm, die Länge 31 mm und besteht aus 480 Windungen. Das Simulationsergebnis für eine Prüffrequenz von 10 kHz und einer effektiven Stromstärke von 0,125 Ampere ist im Bild 23 dargestellt.

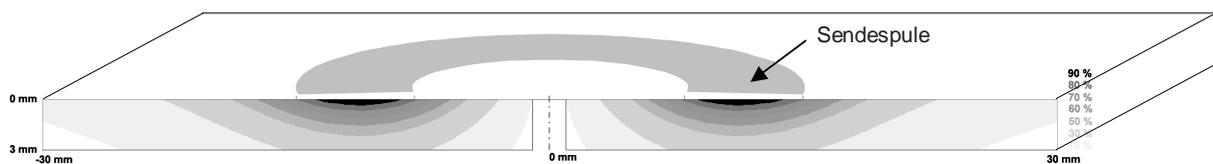


Bild 23: Simulationsergebnis: Wirbelstromverteilung im Material geringer Leitfähigkeit; (Prüffrequenz: 10 kHz,  $\sigma = 2 \frac{m}{\Omega mm^2}$ ,  $\mu = 1$ )

Abgebildet ist ein Schnitt durch die Sendespule und den Werkstoff. Oberhalb des Werkstoffs ist die Lage der Sendespule skizziert, wobei die gestrichelte Linie die Symmetrieachse des Tastsensors angibt. Im Werkstoff selber ist die berechnete Wirbelstromdichte grauwertskaliert dargestellt. Dabei wurde ein Bereich gewählt, der sich 30 mm vom Mittelpunkt der Spule bis hin zu 3 mm in der Bauteiltiefe erstreckt. An der Werkstoffoberfläche ist die Wirbelstromdichte maximal, erkennbar an dem schwarzen Bereich, der eine Wirbelstromdichte von 90 % bis 100 % des Maximalwerts kennzeichnet. Ausgehend von diesem Bereich nimmt die Wirbelstromdichte sowohl in radialer als auch in axialer Richtung ab. Die Eindringtiefe liegt bei einem Betrag von  $1/e$  des Maximums der Wirbelstromdichte (entspricht ca. 37 %) und beträgt bei dieser Berechnung unterhalb des Leiterquerschnitts gut 3 mm. Dieser Wert

stimmt mit der Eindringtiefe, die mit dem einfachen Modell der ebenen Welle (siehe Kapitel 2.1) berechnet wurde, überein. Jedoch wird diese Eindringtiefe nur unterhalb des Leiterquerschnitts der Sendespule erreicht. Neben dem Leiterquerschnitt der Spule liegen geringe Eindringtiefen vor. Die Wirbelstromdichteverteilung zeigt, dass der laterale Einflussbereich des Sensors wesentlich größer als der Außendurchmesser der Sendespule ist.

Zum Vergleich wurde eine Simulation mit einem Material mit einer wesentlich höheren Leitfähigkeit von  $(\sigma = 50 \frac{m}{\Omega mm^2})$ , die der von Kupfer entspricht, bei ansonsten gleichen Parametern wie bei der vorherigen Simulation, durchgeführt. Das Ergebnis der Simulation ist im Bild 24 ebenfalls grauwertskaliert dargestellt.

In diesem Fall konzentrieren sich die Wirbelströme im Bereich unterhalb des Leiterquerschnitts der Sendespule. Dies hat zur Folge, dass die Eindringtiefe, im Vergleich zur Simulation mit der geringeren Leitfähigkeit, wesentlich kleiner ist und bei 0,7 mm liegt.

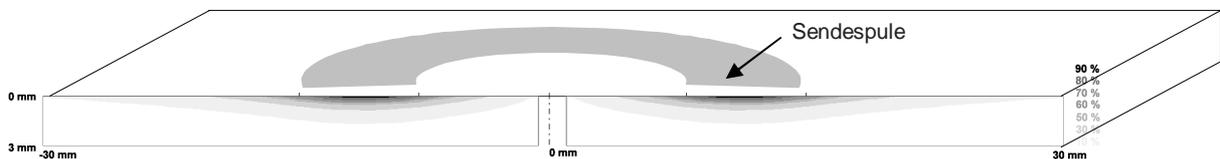


Bild 24: Simulationsergebnis: Wirbelstromverteilung im Material hoher Leitfähigkeit; (Prüffrequenz: 10 kHz,  $\sigma = 50 \frac{m}{\Omega mm^2}$ ,  $\mu = 1$ )

Weiterhin bewirkt die höhere Leitfähigkeit eine Fokussierung der Wirbelströme in lateraler Richtung, wie der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt.

Die beiden Simulationen zeigen, dass die Materialkennndaten einen hohen Einfluss auf die Wirbelstromverteilung und somit auf den Nachweisbereich des Sensors haben. Die Eindringtiefe nimmt mit steigender Leitfähigkeit ab, ist dabei unterhalb des Leiterquerschnitts der Spule maximal und lässt sich durch die Geometrie des Sensors (Variation der Durchmesser) nicht beeinflussen. Der laterale Nachweisbereich

ist, da die Wirbelstromdichte unterhalb des Leiterquerschnittes maximal ist, jedoch stark von dem Durchmesser des Sensors abhängig und kann durch eine hohe Leitfähigkeit des Materials fokussiert werden.

Als nächstes wird der Einfluss der Anregungsfrequenz auf die Wirbelstromverteilung analysiert. Die Simulationen werden hierbei an einem Schichtverbundwerkstoff durchgeführt, wobei die beiden Materialien aus den vorherigen Simulationen eingesetzt wurden. Der Modellschichtwerkstoff besteht dabei aus einer 0,8 mm starken Austenitschicht, die auf ein Kupfersubstrat aufgebracht wurde.

Zur Simulation wurde eine Anregungsfrequenz von 1 MHz, bei sonst gleichen Parametern (Spulengeometrie, Abstand der Spule zum Werkstoff,...) eingesetzt. Bild 25 zeigt das zugehörige Simulationsergebnis.

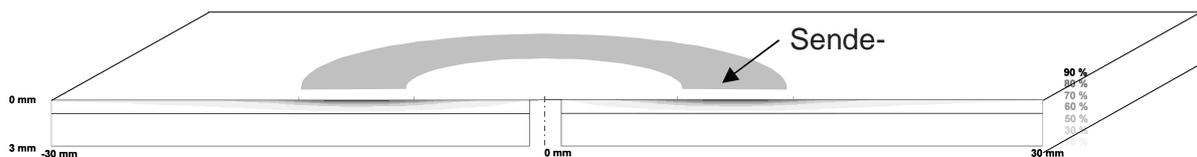


Bild 25: Simulationsergebnis: Wirbelstromverteilung im Schichtwerkstoff (Prüffrequenz: 1 MHz, Schicht: Austenit, Substrat: Kupfer)

Wie zuvor wurde ein Werkstoffbereich von 60 mm in radialer und 3 mm in axialer Richtung berechnet. Die waagerechte Linie im Werkstoff gibt die Schichtgrenze zwischen dem oberen Austenit und dem unteren Kupfermaterial an. Der Wirbelstrom liegt nur im Bereich der Schicht vor, d. h. die Eindringtiefe des Wirbelstroms im Austenit ist bei dieser Anregungsfrequenz von 1 MHz wesentlich kleiner als die Schichtdicke. Diese Frequenz ist also zur Prüfung der Schicht ohne den Einfluss des Substrats geeignet.

Um auch das Substrat zu prüfen ist eine geringere Anregungsfrequenz von 100 kHz notwendig wie die folgende Simulation zeigt (Bild 26).

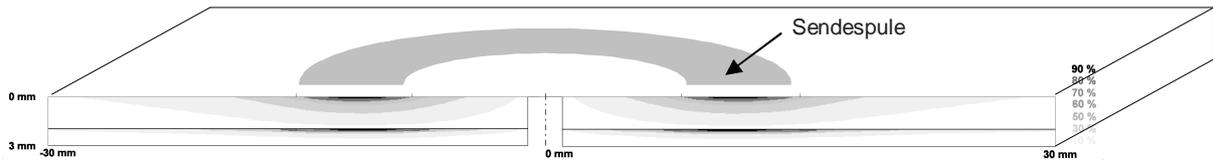


Bild 26: Simulationsergebnis: Wirbelstromverteilung im Schichtwerkstoff (Prüffrequenz: 100 kHz, Schicht: Austenit, Substrat: Kupfer)

Hier liegen sowohl in der Schicht als auch im Substrat Wirbelströme vor, so dass bei der Prüfung beide Bereiche gleichzeitig bewertet werden.

Um nur das Substrat zu prüfen, muss die Anregungsfrequenz weiter reduziert werden. Bild 27 zeigt hierzu die Wirbelstromverteilung bei einer geringen Frequenz von 10 kHz.

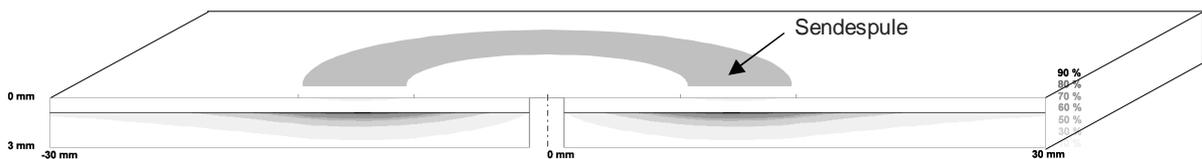


Bild 27: Simulationsergebnis: Wirbelstromverteilung im Schichtwerkstoff (Prüffrequenz: 10 kHz, Schicht: Austenit, Substrat: Kupfer)

In diesem Fall werden die Wirbelströme überwiegend im Substrat induziert. Diese niedrige Frequenz ist also zur Untersuchung des Substrats geeignet.

Die drei Simulationen zeigen deutlich, welchen relevanten Einfluss die Frequenz bei der Wirbelstromprüfung hat, da durch entsprechende Frequenzwahl der axiale Nachweisbereich dem Prüfproblem angepasst werden kann. Weiterhin zeigt insbesondere die letzte Simulation, dass für eine Untersuchung des Substrats niederfrequente Sensoren notwendig sind. Die Sensoren sollten, um das Substrat exakt prüfen zu können, ein hohes laterales Auflösungsvermögen besitzen.

Bei der Prüfung komplexer Geometrien können Abstandsänderungen zwischen den Sensor und dem Bauteil erfolgen. Des Weiteren ist es sinnvoll einen Abstand zwischen Sensor und Bauteil einzuhalten, um Beschädigungen zu vermeiden. Hierzu

wurde die vorherige Simulation nochmals durchgeführt, wobei der Abstand des Sensors zur Bauteiloberfläche von 1 mm auf 10 mm erhöht wurde (Bild 28).

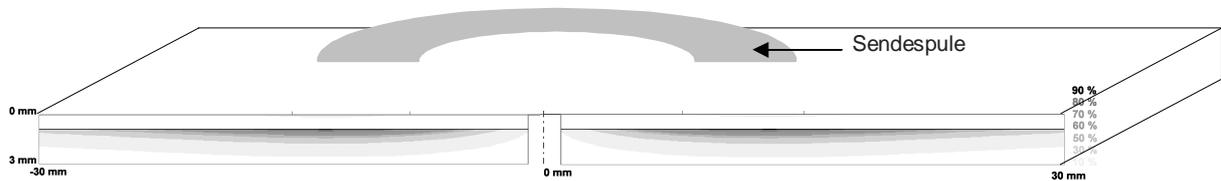


Bild 28: Simulationsergebnis: Wirbelstromverteilung im Schichtwerkstoff (Prüffrequenz: 10 kHz; Schicht: Austenit, Substrat: Kupfer, Abstand zwischen Sensor und Werkstoff: 10 mm)

Wie zuvor liegen nur im Substrat Wirbelströme vor, deren Eindringtiefe mit der der vorherigen Berechnung übereinstimmt. Allerdings hat sich die radiale Verteilung der Wirbelströme stark verändert. Die Wirbelstromdichte fällt mit zunehmendem Abstand zum Mittelpunkt des Sensors weniger stark ab. Der laterale Nachweisbereich wird also größer. Hierzu muss berücksichtigt werden, dass hier immer die relative Verteilung der Wirbelstromdichte ausgewertet wurde. Die Absolutwerte der induzierten Wirbelströme sind bei der letzten Simulation wesentlich geringer als bei den vorherigen.

Für Sensoren mit einem hohen lateralen Auflösungsvermögen, welches für eine Detektion von dicht nebeneinander liegenden Materialfehlern notwendig ist, sind nach den Ergebnissen der oben durchgeführten Simulationen nur Sensorsysteme mit sehr kleinen Durchmessern sinnvoll. Da diese nur einen sehr kleinen Nachweisbereich an der Oberfläche des Bauteils haben, ist deren Auflösung für nebeneinander liegende Fehler besser als bei großen Sensorsystemen. Weiterhin unterstützt eine hohe elektrische Leitfähigkeit und eine hohe Prüffrequenz, wie die Simulationen mit 1 MHz und 100 kHz (Bild 25 und Bild 26) zeigen, die Fokussierung der Wirbelströme in Richtung des Leiterquerschnitts der Sendespule, was eine Verbesserung der lateralen Auflösung bewirkt. Die letzte Simulation zeigt weiterhin, dass ein geringer Abstand des Sensors zur Bauteiloberfläche das laterale Auflösungsvermögen steigert.

Im Folgenden wird nun das Frequenzverhalten der induktiven Wirbelstromsensoren untersucht. Hierzu wurde die induzierten Spannung bei einem 1“ – Absolutsensor, der sich ein über einem Kupferbauteil befand, für unterschiedliche Frequenzen bei sonst gleichen Bedingungen berechnet. Zusätzlich wurden mit einem monofrequen-ten Wirbelstromgerät und einem Tastsensor, der mit der simulierten Sendespule vergleichbare Kennwerte besitzt, Messungen durchgeführt, um die Gültigkeit der Berechnungen zu überprüfen.

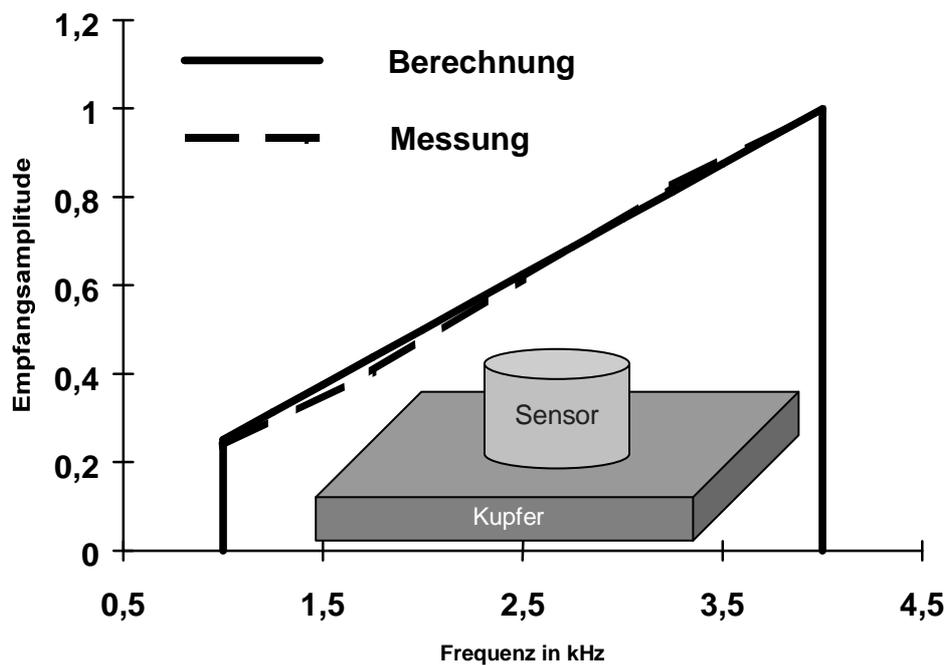


Bild 29: Abhängigkeit der Empfangsspannung von der Prüffrequenz  
(Prüfkörper: Kupfer; Frequenzbereich: 1 kHz bis 4 kHz)

Im Bild 29 ist das erhaltene Ergebnis in Form eines Diagramms aufgetragen. Dabei ist die jeweils auf den Maximalwert normierte berechnete und gemessene Empfangsspannung gegen die Anregungsfrequenz aufgetragen. Die leichten Unter- und Oberschwingungen der gemessenen Werte (gestrichelte Linie) im Vergleich zu den berechneten Werten (durchgezogene Linie) weisen auf sekundäre Übertragungsfunktionen hin, verursacht durch den Verstärker und Anschlussleitungen. In beiden Fällen wird deutlich, dass die Empfangsspannung mit geringer werdenden Frequenzen abnimmt (Spulenübertragungsfunktion). Da die Empfangsspannung die

eigentliche Messgröße der Wirbelstromprüfung ist, nimmt somit auch die Empfindlichkeit mit niedrigeren Frequenzen ab. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, sind höhere Windungszahlen bei den Spulen, verbunden mit einer höheren Anregungsstromstärke notwendig. Die so für die niederfrequente Prüfung optimierten Sensoren haben jedoch auf Grund ihrer notwendigen großen Bauform einen hohen Wirkungsbereich und damit ein geringeres laterales Auflösungsvermögen.

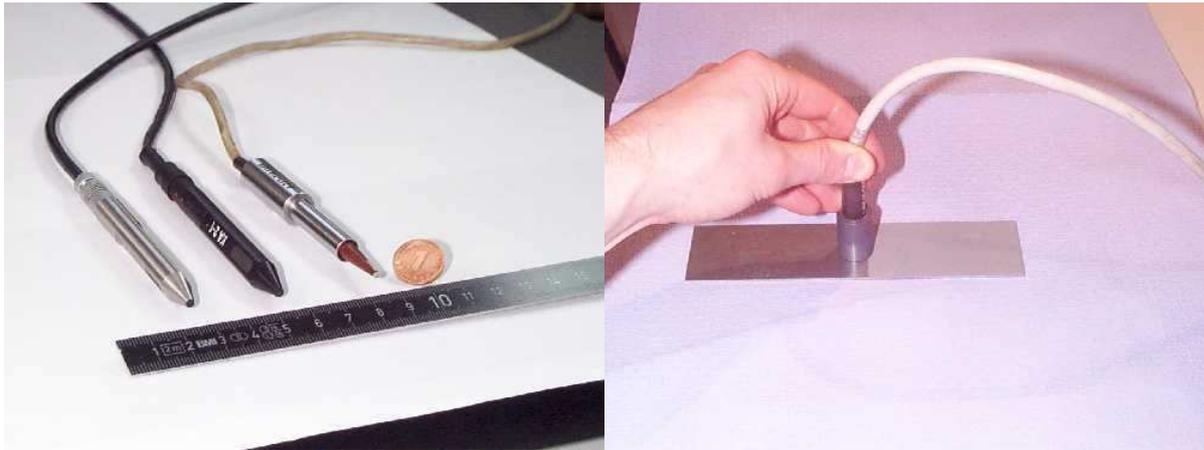


Bild 30: Handelsübliche Wirbelstromtastensensoren (links für die oberflächennahe Prüfung mit hohem Auflösungsvermögen: rechts für die niederfrequente Prüfung)

Entsprechende handelsübliche Sensoren mit hohem lateralem Auflösungsvermögen von ca. 1 mm sind im Bild 30 links abgebildet. Für die niederfrequente Messung optimierte Sensoren (siehe Bild 30 rechts) sind wiederum wegen ihrer großen Bauform nicht für eine Messung mit hohem lateralem Auflösungsvermögen geeignet.

Die Simulationen zeigen, dass induktive Wirbelstromsensoren prinzipiell nicht für Untersuchungen mit hohem lateralem Auflösungsvermögen bei niederfrequenter Anregung geeignet sind.

## 4.2 Faraday-Rotator Materialien

Bei den magnetooptischen Sensoren geht die Verdetkonstante des Materials direkt in die Messgröße ein (siehe Kapitel 2.5) und somit hat die Materialauswahl für den Rotator einen sehr großen Einfluss auf die Empfindlichkeit des Prüfsystems. Da bei der Wirbelstromprüfung wegen der eingesetzten Stromstärken und Frequenzen auch eine Temperaturerhöhung innerhalb des Sensors auftreten kann, ist eine Temperaturempfindlichkeit des Faraday-Rotators eine Voraussetzung für einen unproblematischen Einsatz.

Aus dieser Überlegung kommen insbesondere zwei Materialien in Betracht:

- die Glasart SF 57
- und ferrimagnetische Kristalle aus Yttrium-Eisen-Granat (YIG) sowie dessen durch Bismut Atome substituierte Abarten (BI-YIG).

Im Folgenden werden zunächst die Eigenschaften der Glasart SF 57 ausführlich untersucht.

### Die Glasart SF 57

Diese gehört zu den diamagnetischen Gläsern /72/, welche im Vergleich zu den para- und ferrimagnetischen Materialien /73/ die geringste Temperaturempfindlichkeit bezüglich der Verdetkonstante besitzen. Die Verdetkonstante einiger Gläser bei Raumtemperatur (20 Grad Celsius) ist für unterschiedliche Wellenlängen in der Tabelle 2 aufgelistet.

Glasart	Verdetkonstante V in Rad/T m					
	439,5 nm	480,0 nm	546,1 nm	589,3 nm	632,8 nm	656,3 nm
SF 1	37,8	30,0	21,5	18,0	15,4	14,5
SF 2	31,0	23,0	16,9	13,8	11,6	9,9
SF 5	31,7	25,6	18,6	15,7	13,1	11,9
SF 6	49,5	39,3	28,5	23,6	20,1	18,3
SF 8	33,3	26,5	19,8	16,6	14,3	13,1
SF 14	36,7	29,1	21,2	17,7	15,1	13,4
SF 18	39,3	30,3	22,1	18,6	15,7	14,0
SF 53	38,7	29,7	21,5	17,7	15,1	13,7
SF 57	55,0	44,2	31,7	26,2	21,8	20,7

Tabelle 2: Verdetkonstanten verschiedener optischer Gläser /72/

Die größte Verdetkonstante bei allen angegebenen Wellenlängen besitzt die Glasart SF 57, welche somit für die Wirbelstromprüfung die geeignetste Glasart zu sein scheint. Die Temperaturabhängigkeit der Glasart SF 57 wurde von P. A. Williams /74/ exakt untersucht. Das zugehörige Ergebnis ist in dem Bild 31 graphisch dargestellt.

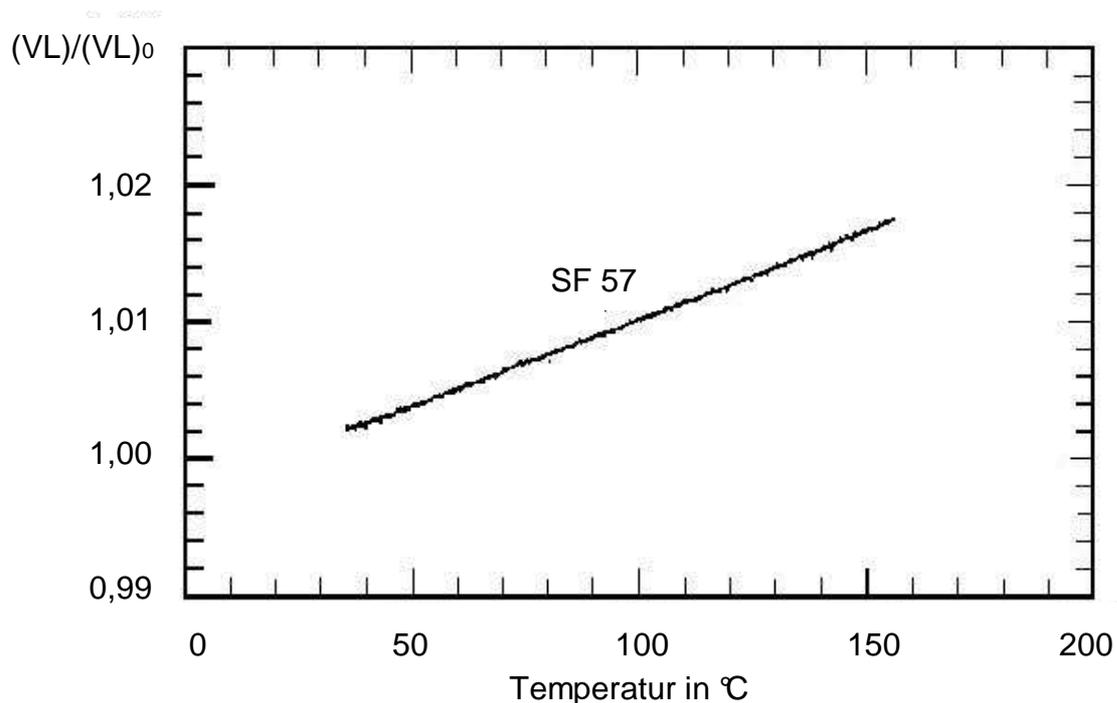


Bild 31: Temperaturabhängigkeit eines SF 57 Glasstabes nach P. A. Williams /74/

Die Temperatur hat sowohl auf die Verdetkonstante als auch auf die Länge des Glases SF 57 einen Einfluss. Um die thermische Ausdehnung des Glases mit zu berücksichtigen, wurde das Produkt aus Glaslänge und Verdetkonstante ausgewertet. Das Produkt wurde auf den Wert bei Raumtemperatur (20 Grad Celsius) normiert. Bei einer Temperaturänderung von 30 Grad auf 160 Grad ändert sich der Quotient der Produkte um 0,02 d. h. um 2 %. Bei der angestrebten Wirbelstromprüfung kann zwar eine Temperaturerhöhung durch auftretende ohmsche Verluste eintreten, jedoch sind Temperaturschwankungen dieser Größenordnung von 100 Grad Celsius während des Messbetriebs unwahrscheinlich, so dass ein temperaturabhängiger Fehler bei diesem Material vernachlässigbar ist. Eine Temperaturerhöhung durch Absorption des eingesetzten Laserstrahls im Faraday-Rotator-Material tritt, da die Glasart SF 57 im sichtbaren Spektralbereich transparent ist, nicht auf.

Weitere Faraday-Rotator-Materialien sind ferrimagnetische Kristalle aus Yttrium-Eisen-Granat (YIG), deren Eigenschaften im Folgenden beschrieben werden.

### **YIG-Kristalle**

Das Erwärmen des Faraday-Rotators durch Absorption des Lichtstrahls kann vernachlässigt werden, wenn eine Lichtquelle gewählt wird, die im transparenten Wellenlängenbereich des Rotators liegt. Somit hat die eingesetzte Wellenlänge, da sie sowohl einen Einfluss auf die Verdetkonstante als auch auf die Temperatur des Rotators hat, einen hohen Stellenwert.

Aus diesen Gründen werden diese Eigenschaften in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts für den YIG-Kristall untersucht. Im Bild 32 ist hierzu die spezifische Rotation  $F$  und im Bild 33 der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen [75]. Die angegebene spezifische Rotation  $F$  gilt für den bis zur Sättigung aufmagnetisierten YIG-Einkristall.

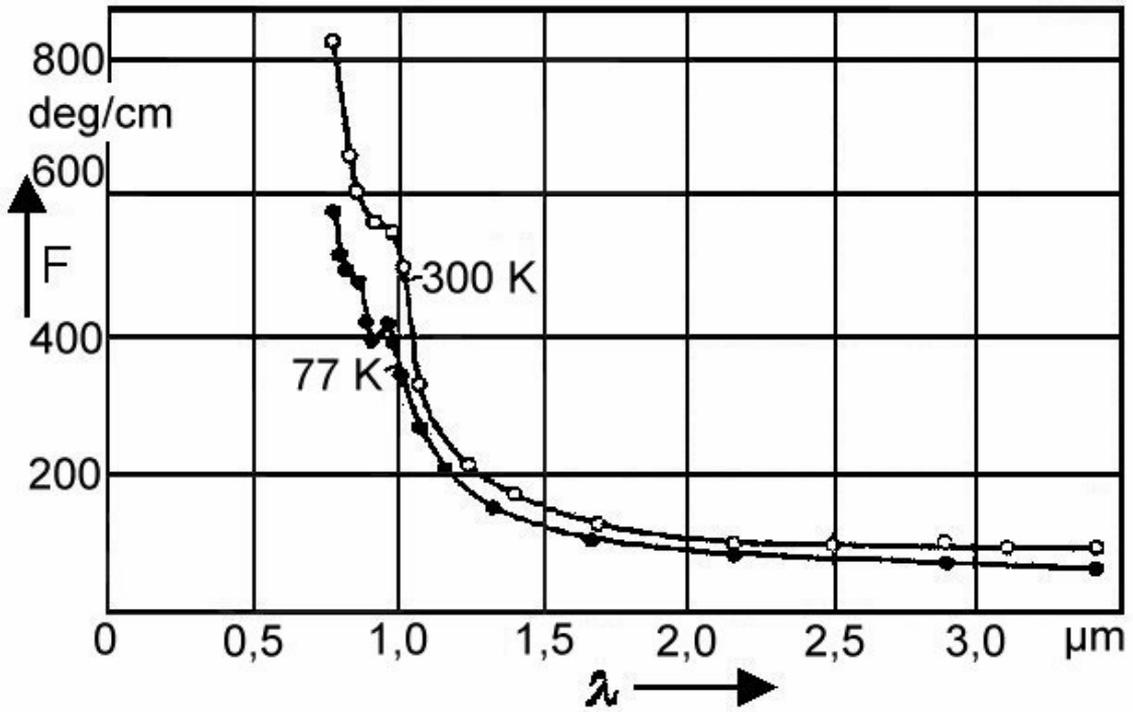


Bild 32: Spezifische Rotation F von YIG /75/

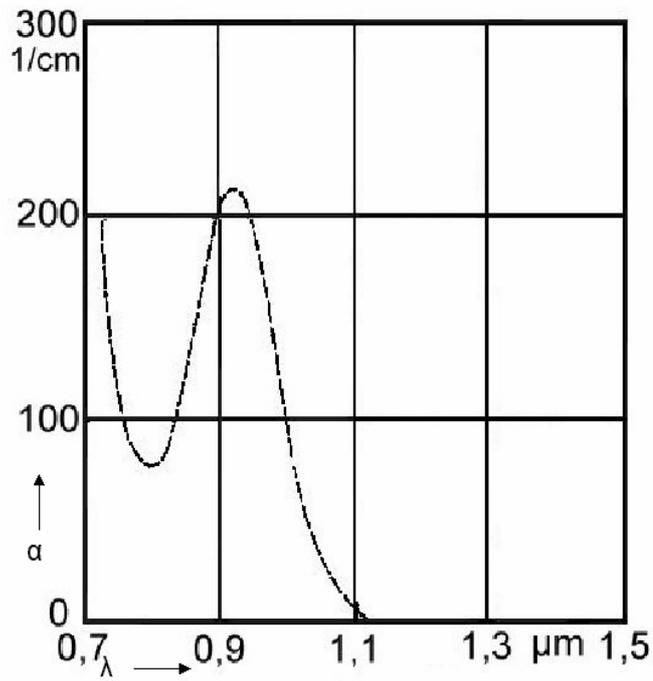


Bild 33: Absorptionskoeffizient von YIG /75/

Auf Grund des Diagramms (Bild 32) ist die spezifische Rotation  $F$  bei geringer Wellenlänge, also hoher Frequenz maximal, was mit einer hohen Magnetfeldempfindlichkeit, welche für die Wirbelstromprüfung angestrebt wird, gleichzusetzen ist. Neben der spezifischen Rotation  $F$  ist jedoch auch das Absorptionsverhalten des Kristalls bei gegebener Wellenlänge entscheidend. Ist die Absorption zu hoch, kann dies außer zu einer Erwärmung des Kristalls auch dazu führen, dass die Lichtintensität nach dem Durchlaufen des YIG-Kristalls zu gering ist. Auf Grund der beiden Diagramme im Bild 32 und Bild 33 ergibt sich eine für die Wirbelstromprüfung geeignete Wellenlänge von  $1 \mu\text{m}$ . Weiterhin ist im Bild 32 der Temperatureinfluss auf die spezifische Rotation  $F$  eingetragen. Die untere Kurve gibt die Rotation bei  $77 \text{ Grad Kelvin}$  und die obere bei  $300 \text{ Grad Kelvin}$  an. Bei der durch den Betrieb der Spule zu erwartenden Temperaturänderung von ca.  $30 \text{ Grad Kelvin}$  ist jedoch der Einfluss auf die Rotation zu vernachlässigen.

Bei diesem Material ist die spezifische Rotation  $F$  abhängig von der Magnetisierung des Materials. Um also reproduzierbar messen zu können, muss der YIG-Kristall vor Beginn der Messung durch entsprechende Permanentmagnete magnetisiert werden. Die Magnetfeldänderung der Spule, also das Messsignal muss hierbei geringer als das statische Feld für die notwendige Magnetisierung des Kristalls sein.

Noch höhere spezifische Rotationen lassen sich mit Kristallen erzielen, in denen Yttrium-Atome durch Bismut-Atome substituiert sind, die so genannten BI-YIG-Schichten.

### **BI-YIG-Schichten**

Diese Faraday-Rotatoren werden mit Hilfe der Flüssig-Phasen Epitaxie (LPE) /76/, /77/ auf ein Substrat, welches einen vergleichbaren thermischen Ausdehnungskoeffizienten hat wie die aufgetragene BI-YIG-Schicht, hergestellt. Dabei können die Schichten so erstellt werden, dass die magnetische Vorzugsrichtung innerhalb der Schichtebene liegt. Auf Grund dieser In-plane Anisotropie sind diese Schichten auch bei Abwesenheit eines äußeren Magnetfelds definiert magnetisiert /78/. Damit entfällt

im Gegensatz zum YIG-Kristall die Vormagnetisierung mit Hilfe von Permanentmagneten.

Mit diesem Verfahren lassen sich einige  $\mu\text{m}$  dicke Schichten erstellen. In den hier vorgestellten Untersuchungen wurden bis zu  $5\ \mu\text{m}$  dicke Schichten, welche vom Institut für physikalische Hochtechnologie (IPHT) hergestellt wurden, eingesetzt. Größere Schichtdicken, bis zu  $50\ \mu\text{m}$ , sind nach Auskunft des IPHT, nach entsprechender Optimierung des Herstellungsverfahrens, möglich. Da die Schichtdicke linear in die Faraday-Drehung eingeht, würde eine Erhöhung der Schichtdicke von  $5$  auf  $50\ \mu\text{m}$  eine Steigerung der Empfindlichkeit um den Faktor  $10$  bewirken.

Neben der Schichtdicke hat auch die Bismut-Konzentration einen hohen Einfluss auf die Empfindlichkeit der Schicht. In Bild 34 ist hierzu die Empfindlichkeit gegenüber der Bismut-Konzentration in der Schicht aufgetragen.

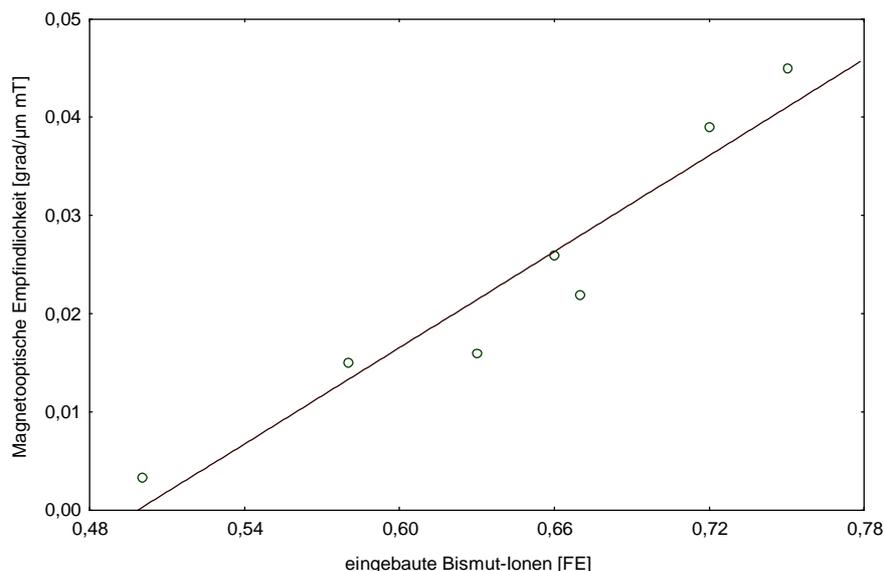


Bild 34: Spezifische Rotation  $F$  von typischen in-plane BI-YIG-Schichten

Es ist zu erkennen, dass  $F$  mit zunehmender Konzentration von Bismut-Atomen betragsmäßig ansteigt.

Der Vergleich der drei Faraday-Rotator Materialien ergibt, dass insbesondere die BI-YIG-Schicht für die Anwendung im Wirbelstromprüfsystem geeignet ist. Sie besitzt im

Vergleich zum Glas eine höhere Verdetkonstante und benötigt keine von außen eingebrachte Vormagnetisierung wie der YIG-Kristall. Schließlich steckt in dem Herstellungsverfahren durch Änderung der Bismut-Konzentration und durch Erhöhung der Schichtdicke noch Potential zur Optimierung der Schichten. Weiterhin lassen sich mit dem LPE-Verfahren auch nur wenige  $\mu\text{m}$  dicke Schichten herstellen, wodurch die Absorptionsverluste des Lichts erheblich reduziert werden können.

### Auswahl des Faraday-Rotators

Die oben beschriebenen Materialien wurden bezüglich ihrer Magnetfeldauflösung untersucht. Hierzu wurden die Schichten innerhalb einer Spule positioniert, welche mit einer konstanten Frequenz von 1 kHz angeregt wurde. Die Schicht wurde mit einem Laser beleuchtet und das von der Schicht reflektierte Licht mit Hilfe eines Polfilters ausgewertet. Mittels einer Fotodiode wurde die Lichtintensität gemessen und über eine A/D-Karte auf einen PC geleitet. Dort wurde das Empfangssignal über die Messzeit aufgenommen. Das in der Spule wirkende Magnetfeld kann mittels der Amplitude der Anregungsspannung variiert werden. Die auf diese Art erhaltenen Messwerte sind für den YIG-Kristall und dem SF 57 Glas im Bild 35 dargestellt.

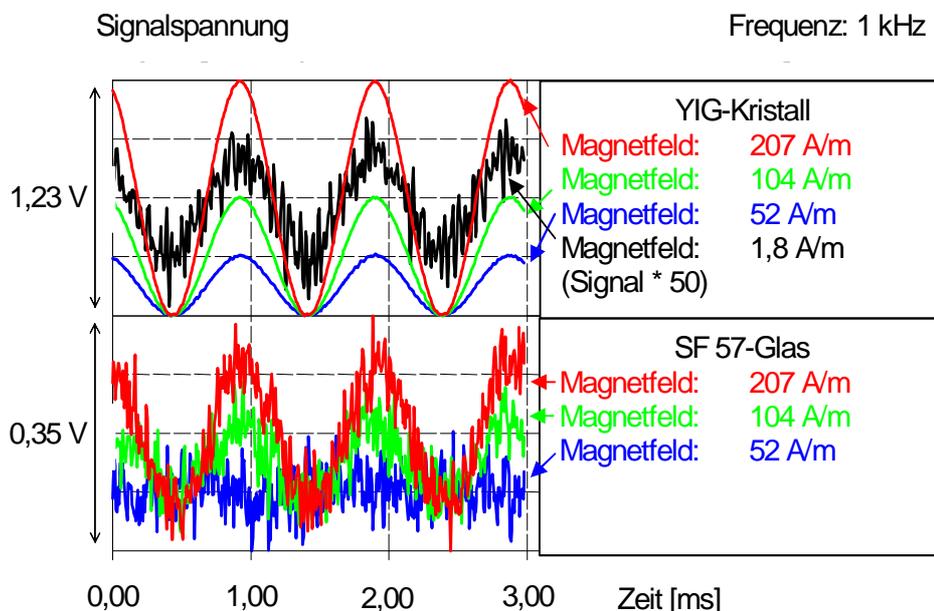


Bild 35: Bestimmung der Magnetfeldauflösung von SF 57 und dem YIG-Kristall

Die Magnetfeldstärken wurden mit Hilfe der Spulendaten und der gemessenen Anregungsstromstärke berechnet.

Anhand der Messungen ergeben sich folgende Detektionsgrenzen für homogene Magnetfelder:

$$\begin{aligned} \text{YIG-Kristall:} & \quad \approx \quad 0,45 \text{ [A/m]} = \quad 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ [T]} \\ \text{Glas SF 57:} & \quad \approx \quad 64,4 \text{ [A/m]} = \quad 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ [T]} \\ \text{(Erdmagnetfeld:} & \quad \approx \quad 15 \text{ [A/m])} \end{aligned}$$

Die Vermessung der BI-YIG-Schicht ergab eine vergleichbare Magnetfeldauflösung wie beim YIG-Kristall, wobei hier die Schichtdicke von nur 3  $\mu\text{m}$  im Vergleich zu 2 mm im Fall des YIG-Kristalls wesentlich geringer war.

Auf Grund der im Vergleich zu dem YIG und BI-YIG-Material geringen Magnetfeldempfindlichkeit ist das SF 57 für das angestrebte hoch auflösenden Systems weniger geeignet. Da der YIG-Kristall im Gegensatz zum BI-YIG-Material eine definierte Magnetisierung benötigt, ist für die angestrebte Anwendung das BI-YIG-Material das geeignetste Material. Weiterhin ist bei diesem Material eine Steigerung der Empfindlichkeit durch Erhöhung der Schichtdicke relativ einfach möglich.

Die für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden BI-YIG-Schichten eingesetzt, welche vom Institut für physikalische Hochtechnologie (IPHT Jena) entwickelt und hergestellt wurden.

### 4.3 Prinzipieller Aufbau der magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme

In den vorherigen Kapiteln wurde der Faraday-Effekt zur Messung von Magnetfeldern beschrieben. Im Folgenden wird nun untersucht, wie dieser für die Wirbelstromprüfung eingesetzt werden kann. Der Aufbau des magnetooptischen Systems ist im Bild 36 skizziert.

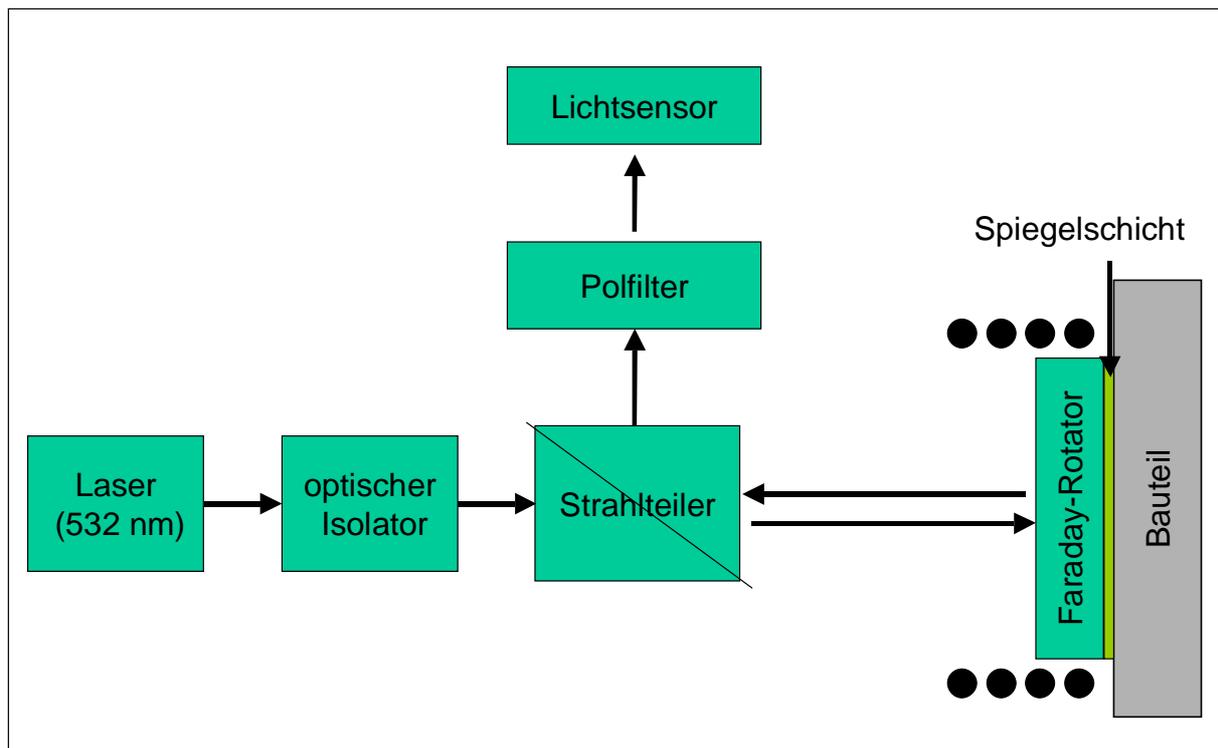


Bild 36: Prinzipieller Aufbau der magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme

Da der Faraday-Effekt auf der Messung einer Polarisationsdrehung beruht, wurde ein Laser, der linear polarisiertes Licht aussendet, gewählt, welcher links im Bild eingezeichnet ist. Als Wellenlänge wurde 532 nm – also im sichtbaren grünen Bereich ausgewählt – bei welcher der eingesetzte Faraday-Rotator eine hohe Empfindlichkeit besitzt. Um Leistungsschwankungen des Lasers durch einen reflektierten Strahl zu verhindern, wurde unmittelbar nach dem Laser ein optischer Isolator, der nur Licht in Richtung des Strahlteilers durchlässt, eingesetzt. Nach dem Strahlteiler tritt der Laserstrahl nun in den Faraday-Rotator ein, der innerhalb der Sendespule liegt, wird an der Spiegelschicht reflektiert und verlässt dann wieder den Rotator. Ab da liegt die Magnetfeldinformation in Form von Polarisationsdrehungen im Licht vor. Nach Ab-

lenkung des Laserstrahls mit Hilfe des Strahlteilers trifft dieser auf einen Polfilter, der nur Licht einer Polarisationsrichtung durchlässt. Danach liegt die Messinformation (Drehung des Polarisationswinkels) in Form einer Lichtintensität vor. Diese Information kann nun auf zwei Arten weiterverarbeitet werden. Zum einen kann der nach dem Polfilter vorliegende Laserstrahl mittels einer Sammellinse auf eine Fotodiode fokussiert werden oder der Laserstrahl wird mit einer CCD-Kamera ausgewertet, welche dann eine visuelle Darstellung der Magnetfeldverteilung ermöglicht.

## Aufbau mit Fotodiode

Der prinzipielle Aufbau des Systems ist im Bild 37 skizziert. Die Lichtintensität des Laserstrahls wird mit Hilfe einer Fotodiode gemessen. Das Spannungssignal an der Fotodiode wird, wie bei der konventionellen Wirbelstromprüfung, nach Amplitude und Phase ausgewertet. Dabei kann, wie im Bild 37 eingezeichnet, zur Erhöhung der Messgenauigkeit ein Lock-In-Verstärker eingesetzt werden.

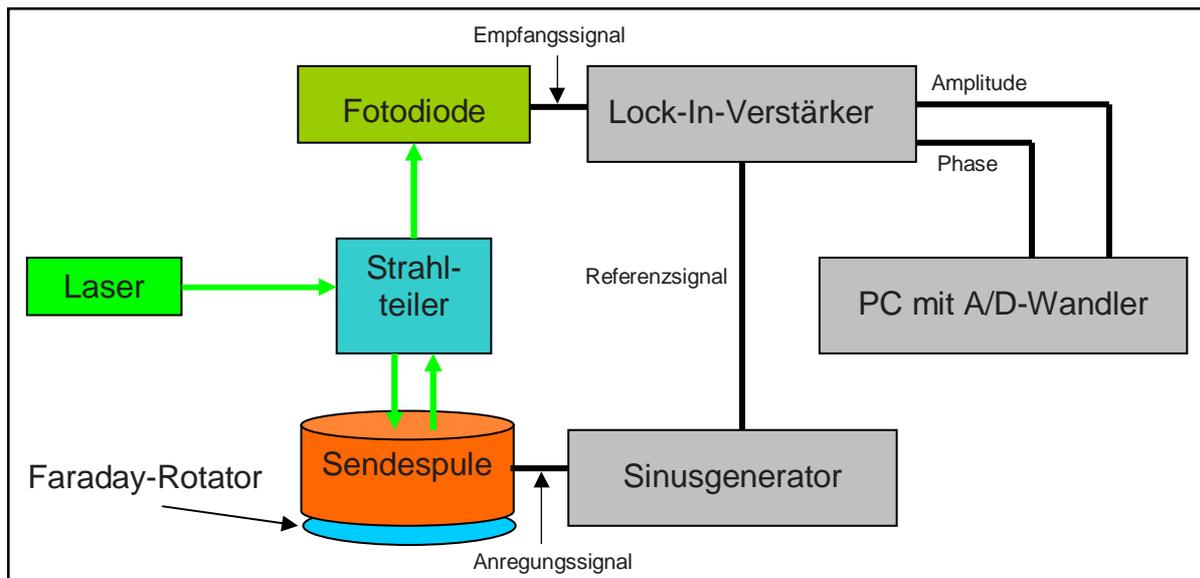


Bild 37: Aufbau mit Fotodiode

Links im Bild 37 ist noch einmal der optische Aufbau bestehend aus Laser, Strahlteiler, Sendespule, Rotator und Fotodiode dargestellt. Die Sendespule wird mit Hilfe eines Sinusgenerators mit einer fest eingestellten Frequenz betrieben, welche dann die Wirbelströme induziert. Das an der Fotodiode anliegende Empfangssignal wird an einen Lock-In-Verstärker weitergeleitet. Dieser erhält von dem Sinusgenerator ein Referenzsignal, welches von der Frequenz und der Phase her dem Sendesignal entspricht. Der Lock-In-Verstärker sucht nun im Empfangssignal eine Wechselspannung gleicher Frequenz und bestimmt ihre Amplitude und Phase im Bezug zum Referenzsignal. Die Daten für die erhaltenen Amplituden und Phasen werden an einen PC weitergeleitet, wo sie dann abgespeichert und ausgewertet werden. Die so erhaltenen Amplituden und Phasen können, wie bei der konventionellen Wirbelstromprüfung, weiter verarbeitet werden.

## Aufbau mit CCD-Kamera

Im Fall des Aufbaus mit der CCD-Kamera müssen weitere optische Bauteile in den Aufbau integriert werden, um eine gezielte Auswertung eines Anregungszustands zu ermöglichen. Die Kamera hat die Eigenschaft, mit konstanter Wiederholungsfrequenz ein digitales Bild aufzunehmen, wobei die Wiederholungsfrequenz bei Standardkameranerasystemen bei 50 Hz liegt. Wird nun mit einer für die Wirbelstromprüfung gängigen Anregungsfrequenz von 1 kHz gemessen und die Kamera während der ganzen Messzeit mit einer Wiederholungsfrequenz von 50 Hz betrieben, dann erhält man Bilder zu unterschiedlichen Anregungszuständen. Diese sind beispielsweise: kein Anregungsstrom, maximaler Anregungsstrom, entgegengesetzter Anregungsstrom usw.. Die Kamera zeigt nun nacheinander die unterschiedlichen Bilder an, wodurch kein eindeutiger Messbefund möglich ist. Daher ist es notwendig, die Kamera zur Anregungsfrequenz zu synchronisieren, damit gewährleistet ist, dass immer der gleiche Anregungszustand, z. B. maximaler Anregungsstrom, von der Kamera aufgenommen wird. Zur Synchronisation der Kamera mit der Anregungsfrequenz werden nun zwei Möglichkeiten betrachtet.

- Synchronisation durch Triggerung der Kamera
- Synchronisation durch Einsatz eines optischen Modulators

Im ersten Fall wird die Kamera mit einem Triggerungssignal angesteuert, wodurch eine Aufnahme erfolgt. Um immer gleiche Anregungszustände aufzunehmen, muss das Triggerungssignal die gleiche Frequenz wie der Anregungsstrom der Sendespule haben. Weiterhin muss, um unterschiedliche Anregungszustände aufzunehmen, die Phasenverschiebung zum Sendesignal frei wählbar sein. Die beiden Signale für die Sendespule und die Triggersignale für die Kamera sind im Bild 38 dargestellt. Links im Bild ist die Phasenverschiebung so gewählt worden, dass jeweils beim Maximum der Anregungsspannung belichtet wird, rechts im Bild dagegen beim Nulldurchgang der Anregungsspannung.

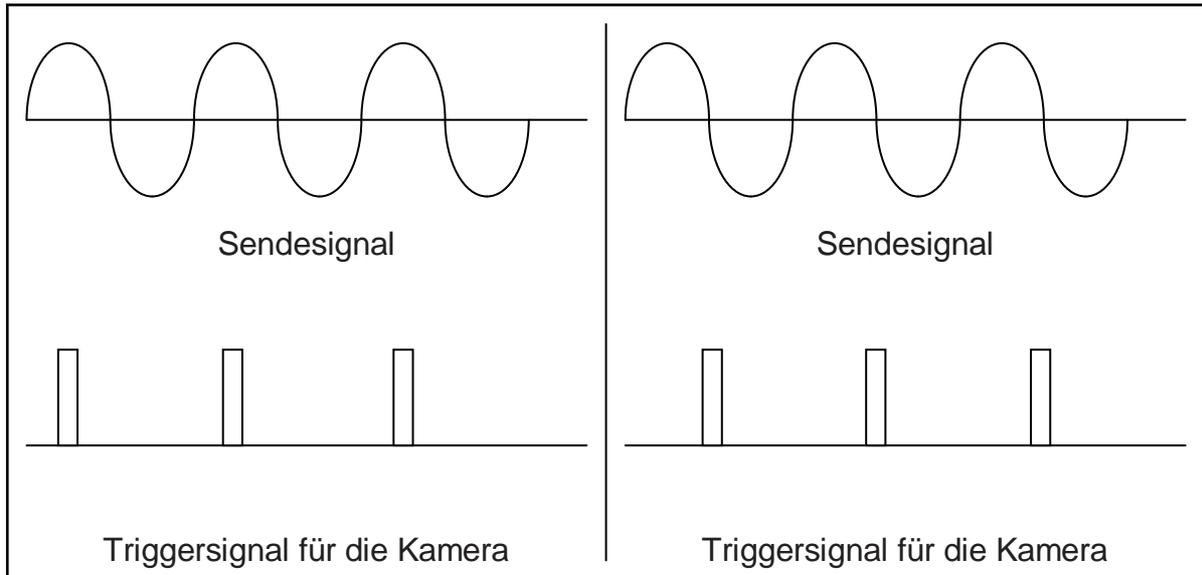


Bild 38: Sendesignal und Triggerungssignal (links: bei maximaler Anregungsspannung; rechts: bei minimaler Anregungsspannung)

Durch diese Ansteuerung ist es nun möglich, einen frei wählbaren Anregungszustand durch Einstellung der Phasenverschiebung auszuwählen. Die Belichtungszeit, also die Dauer der Aufnahme ist von der Kamera vorgegeben und kann bei dieser Ansteuerungsvariante nicht beeinflusst werden.

Bei der zweiten Synchronisationsart wird nach dem optischen Isolator und vor dem Strahlteiler ein optischer Modulator eingesetzt. Dieser modifizierte Aufbau ist im Bild 39 skizziert. Mit Hilfe des optischen Modulators kann der Laserstrahl gezielt ein- und ausgeblendet werden. In diesem Fall nimmt die Kamera kontinuierlich auf und die eigentliche Belichtung erfolgt durch Ein- und Ausblenden des Lasers.

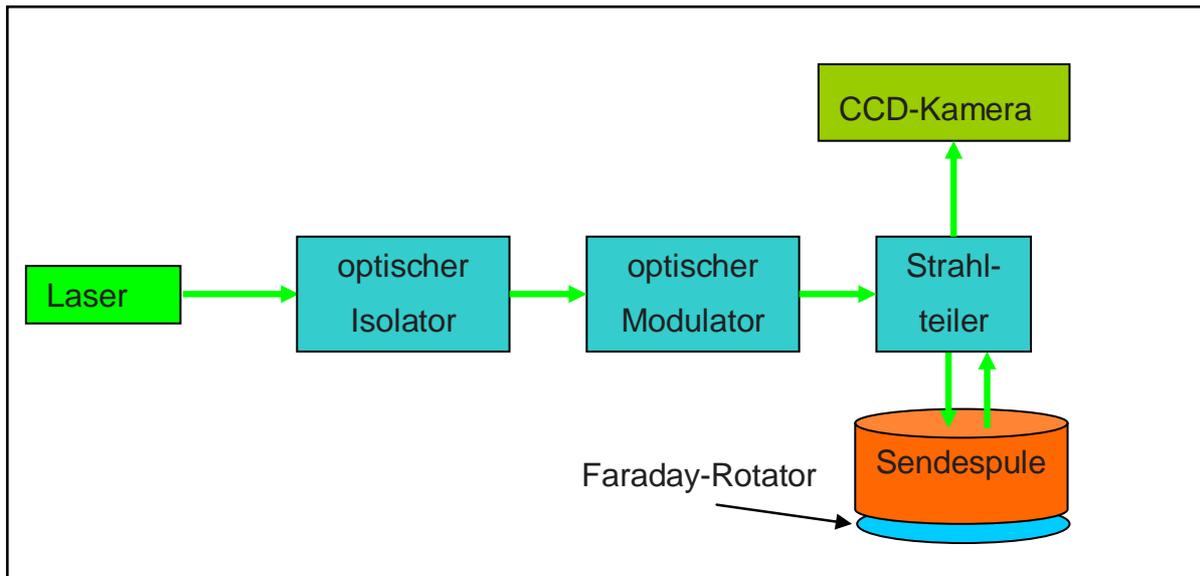


Bild 39: Aufbau des Kamerasystems mit optischem Modulator

Wie zuvor bei der Ansteuerung der Kamera, muss auch hier in Abhängigkeit des Sendesignals die Belichtung erfolgen. Hierzu wird der Modulator mit einem entsprechenden Triggerungssignal angesteuert. Im Gegensatz zur Triggerung der Kamera kann hier auch die Dauer der Belichtung, d. h. wie lange der Laser eingeblendet ist, eingestellt werden. Im Bild 40 sind das Sendesignal sowie zwei Belichtungsarten abgebildet. Links wird zum Zeitpunkt der maximalen Anregungsspannung belichtet, wobei eine Belichtungszeit von einer 1/2 Periodendauer gewählt wurde.

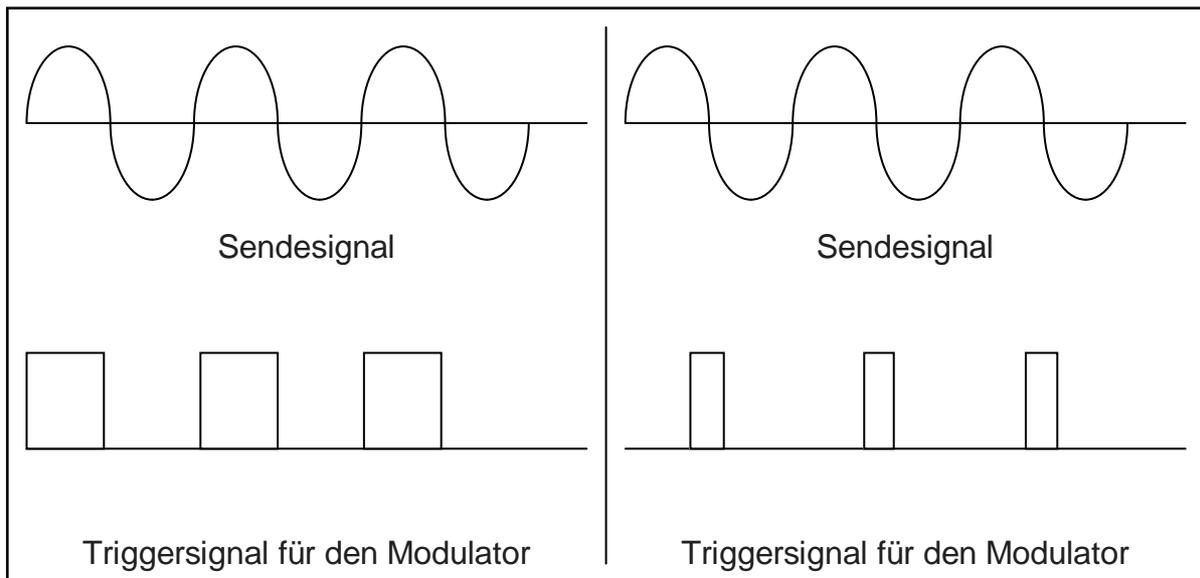


Bild 40: Sendesignal und Triggersignal (links: bei maximaler Anregungsspannung und langer Belichtungsdauer; rechts: bei minimaler Anregungsspannung und kurzer Belichtungszeit)

Rechts wurde die Messzeit bei minimaler Anregung gewählt, wobei eine Belichtungszeit von  $1/4$  Periode gewählt wurde.

Bei beiden Synchronisationsarten ist eine gezielte Analyse eines bestimmten Anregungszustands durch Anpassung der Phasenverschiebung möglich. Im Fall der Steuerung mit Hilfe des optischen Modulators ist zusätzlich eine Belichtungsdauer wählbar. Da bei dieser Synchronisationsart die Kamera kontinuierlich mit ihrer Wiederholungsfrequenz aufnimmt, werden auch Bilder aufgenommen, wo der Laser ausgeblendet wurde. Dadurch kann es zu Helligkeitsverlusten bei dieser Synchronisationsmethode kommen. Dies kann durch gleichzeitigen Einsatz beider Synchronisationsarten verhindert werden. Dann erfolgt die Aufnahme nur, wenn der Laser eingeschaltet ist. Eine Steuerung der Belichtungszeit über die Einblendungszeit des Lasers ist aber trotzdem gegeben.

Bei dem in der Arbeit realisierter Aufbau wurden beide Synchronisationsarten parallel eingesetzt.

#### 4.4 Berechnung des Empfangssignals

Im vorherigen Kapitel wurde der prinzipielle Aufbau des magnetooptischen Wirbelstromprüfsystems beschrieben. Dabei wird die Lichtintensität des an dem Faraday-Rotator reflektierten Lichts und durch einen Polarisator geleiteten Laserstrahls gemessen. Im Folgenden wird das zu erwartende Empfangssignal mit Hilfe des Jones-Matrix-Formalismus [79], [80] berechnet.

Dieser Formalismus ermöglicht es, das Ausgangssignal eines optischen Systems zu berechnen. Dabei muss das untersuchte System folgende Voraussetzungen erfüllen:

- einen seriellen Aufbau, d. h. die einzelnen optischen Komponenten werden nacheinander vom Licht durchstrahlt (analog zur elektrischen Reihenschaltung)
- unerwünschte Reflexionen werden vernachlässigt
- der Lichtstrahl wird als monochromatische ebene Welle beschrieben

In Luft besitzt die ebene Welle in der Ausbreitungsrichtung kein elektrisches Feld. Im Folgenden wird eine ebene Welle betrachtet, die sich in Z-Richtung ausbreitet. Diese kann nun mit Hilfe zweier elektrischer Felder beschrieben werden:

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} E_x e^{i\phi_x} \\ E_y e^{i\phi_y} \end{pmatrix}, \quad \text{Gleichung 17}$$

Dieser Vektor, der die ebene Welle nach Betrag, Phase und Polarisation beschreibt, wird als Jones-Vektor bezeichnet.

Auf ähnliche Weise lassen sich die Eigenschaften von optischen Bauteilen als Matrizen beschreiben. Durch Multiplikation des Jones-Vektors mit der Jones-Matrix eines optischen Bauteils lässt sich der Einfluss des Bauteils auf den Lichtstrahl berechnen.

Im Folgenden werden nun die Matrizen für die einzelnen optischen Komponenten des magnetooptischen Wirbelstromsystems berechnet.

Der Laser durchdringt als erstes den Strahlteiler, der später, nach der Reflexion des Strahls an der Spiegelschicht des Faraday-Rotators, den Strahl auf die Fotodiode bzw. die CCD-Kamera lenkt. Der Strahlteiler bewirkt eine 50 prozentige Abschwächung der Lichtintensität, jedoch keine Änderung der Polarisation oder der Ausbreitungsrichtung des Lichts. Da der Messeffekt ausschließlich auf Polarisations-effekten beruht, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden.

Nach dem Strahlteiler dringt der Laserstrahl in den Faraday-Rotator ein. Dort wird die Polarisation des Lichts in Abhängigkeit des Magnetfelds gedreht. Diese Drehung lässt sich durch eine Rotationsmatrix beschreiben, welche die Länge des Rotators  $L$  und das Drehvermögen des optisch aktiven Materials  $F[\text{rad}/m]$  berücksichtigt. Dabei ergibt sich diese vor der Reflexion zu:

$$R(F) = \begin{pmatrix} \cos FL & -\sin FL \\ \sin FL & \cos FL \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 18}$$

Die Drehrichtung ist abhängig von der Ausbreitungsrichtung und der Magnetfeldrichtung. Dies wird bei der Rotationsmatrix für den reflektierten Strahl durch die Transformation von  $F$  nach  $-F$  berücksichtigt. Damit gilt für die Rotationsmatrix für den reflektierten Strahl:

$$R(-F) = \begin{pmatrix} \cos FL & \sin FL \\ -\sin FL & \cos FL \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 19}$$

Die am Ende des Faraday-Rotators angebrachte Spiegelschicht bewirkt eine Änderung des Koordinatensystems des Lichtstrahls, welche im Bild 41 skizziert ist.

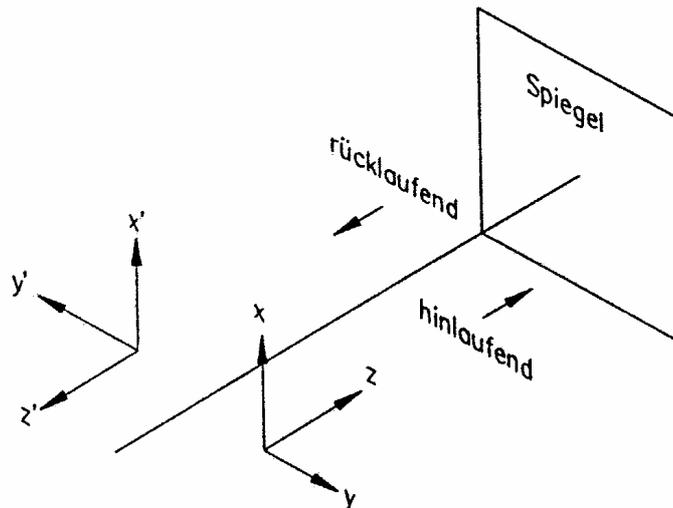


Bild 41: Änderung des Koordinatensystems des Lichtstrahls durch Reflexion am Spiegel

Die entsprechende Jones-Matrix für den Einfluss des Spiegels lautet:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 20}$$

Diese bewirkt die oben im Bild 41 skizzierte Transformation des Koordinatensystems. Diese Matrix muss für alle optischen Komponenten, die nach dem Spiegel angeordnet sind, angewandt werden.

Der Strahlteiler, die nächste optische Komponente, hat - wie bereits anfangs beschrieben - keinen Einfluss auf die Polarisationsrichtung des Strahls und wird daher, wie zuvor, nicht berücksichtigt.

Nach der Reflexion des Strahls am Strahlteiler gelangt das Licht nun zum Analysator, welcher durch die folgende Jones-Matrix beschrieben wird.

$$A(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 21}$$

Der Analysator hat eine frei wählbare Achse auf die die Projektion des Jones-Vektors erfolgt. Diese besitzt die Orientierung  $\alpha$  zur x-Achse. Die Größe der Projektion bestimmt die vom Analysator durchgelassene Intensität.

Diese Intensität wird nun von der Fotodiode bzw. CCD-Kamera gemessen und ist abhängig von dem Jones-Vektor  $\vec{J}$  nach Durchlauf aller optischen Komponenten. Weiterhin wird die Messspannung auch von anderen Faktoren wie von der Empfindlichkeit der Fotodiode oder der gegebenenfalls nachgeschalteten elektrischen Verstärkung beeinflusst. Diese Faktoren werden mit einer Konstanten C berücksichtigt. Somit ergibt sich für die Messspannung U folgender Zusammenhang:

$$U = C \cdot |\vec{J}|^2 \quad \text{Gleichung 22}$$

Da nun sowohl der Einfluss aller optischen Komponenten in Form von Jones-Matrizen berücksichtigt wurden als auch der Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Fotodiodensignal mathematisch formuliert wurde, kann nun die eigentliche Berechnung des Empfangssignals erfolgen.

Zur Berechnung des Empfangssignals werden nun zuerst die Eigenschaften des einfallenden Laserstrahls festgelegt und in Form des Jones-Vektors formuliert. Der einfallende Laserstrahl sei linear in x-Richtung polarisiert. Somit ergibt sich der zugehörige Jones-Vektor zu:

$$\vec{J}_{\text{Einfallender Strahl}} = E_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 23}$$

Dabei gibt  $E_0$  die Anfangsamplitude des elektrischen Felds an. Die Berechnung des Empfangssignals erfolgt nun durch sukzessive Multiplikation der einzelnen Jones-Matrizen mit dem Jones-Vektor.

Nach dem ersten Durchqueren des Rotators mit der Länge L und dem Drehvermögen F ergibt sich für den Jones-Vektor:

$$\vec{J}_1 = R(F, L) \cdot \vec{J}_{\text{Einf allender Strahl}} \quad \text{Gleichung 24}$$

Nun wird die Reflexion am Spiegel sowie das zweite Durchlaufen des Faraday-Rotators berechnet:

$$\vec{J}_2 = S^{-1} \cdot R(-F, L) \cdot S \cdot R(F, L) \cdot \vec{J}_0 \quad \text{Gleichung 25}$$

Wobei sich nach Ausführung der Matrizenmultiplikationen folgender Ausdruck ergibt:

$$\vec{J}_2 = E_0 \cdot \begin{pmatrix} \cos 2FL \\ \sin 2FL \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 26}$$

Nach Durchlaufen des Faraday-Rotators hat sich also die Polarisation des Laserstrahls um den Winkel  $2FL$  gedreht.

Diese Drehung wird nun mit Hilfe des Analysators in eine Lichtintensität umgewandelt. Der in der folgenden Gleichung, welche den Jones-Vektor nach dem Analysator berechnet, angegebene Winkel  $\alpha$  gibt die Lage des Analysators zur X-Achse wieder.

$$\vec{J}_3 = A(\alpha) \cdot \vec{J}_2 = E_0 \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos 2FL \\ \sin 2FL \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{J}_3 = E_0 \cdot \begin{pmatrix} \cos(2FL - \alpha) \cdot \cos \alpha \\ \cos(2FL - \alpha) \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

Gleichung 27

Als letzter Schritt erfolgt nun die Umrechnung der Amplitude des Jones-Vektors in eine Intensität, welche dann in ein Spannungssignal der Fotodiode umgerechnet wird. Dabei ergibt sich für das Fotodiodensignal:

$$U = C \cdot |\vec{J}_3|^2 = C \cdot E_0^2 \cdot \cos^2(2FL - \alpha) = U_0 \cdot \cos^2(2FL - \alpha) \quad \text{Gleichung 28}$$

Unter der Voraussetzung, dass der Analysator in einem Winkel von 45 Grad zur X-Achse ausgerichtet ist ( $\alpha = 45^\circ$ ), ergibt sich nach Berücksichtigung der Relationen zwischen den Winkelfunktionen folgender Zusammenhang:

$$U = \frac{U_0}{2} \cdot (1 + \sin 4FL) \quad \text{Gleichung 29}$$

Unter der Randbedingung, dass  $2FL = 2VHL \ll 1$  ist, kann die Reihenentwicklung der Sinusfunktion nach dem ersten Glied abgebrochen werden und es folgt nun eine lineare Abhängigkeit des Messsignals von der magnetischen Feldstärke H:

$$U \approx \frac{U_0}{2} \cdot (1 + 4VHL) \quad \text{Gleichung 30}$$

Die Berechnung des Empfangssignals zeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Messgröße U und der am Faraday-Rotator anliegenden Magnetfeldstärke vorliegt. Weiterhin ergab diese theoretische Untersuchung, dass sich die vom Magnetfeld verursachte Polarisationsdrehung nicht auf Grund des Strahlengangs des Lichts (der Faraday-Rotator wird auf Grund des Spiegels zweimal vom Licht durchstrahlt) aufhebt, sondern sich die Drehungen addieren.

#### 4.5 Simulationen zum magnetooptischen Prüfsystem

Die bisherigen Überlegungen ergaben, dass ein kleiner Sensordurchmesser sowie der Einsatz hoher Frequenzen für ein gutes laterales Auflösungsvermögen bei konventionellen Sensoren vorteilhaft sind. Im Fall der magnetooptischen Systeme liegen jedoch andere Verhältnisse vor. Hier kann die Messung des Magnetfelds innerhalb der Sendespule mit hoher lateraler Auflösung erfolgen. So kann der Laserstrahl auf einige  $\mu\text{m}$  fokussiert und beliebig innerhalb der Sendespule positioniert werden. Das von der Fotodiode aufgenommene Signal gibt somit das Magnetfeld an diesem Ort wieder. Wird anstelle der Fotodiode eine CCD-Kamera eingesetzt und wird der Laserstrahl auf den Durchmesser der Sendespule aufgeweitet, gibt die Kamera die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule wieder. Das laterale Auflösungsvermögen ist in dem Fall von der Auflösung der Kamera, sowie von dem Objektiv und dem Okular abhängig, liegt jedoch prinzipiell im Bereich der Wellenlänge des benutzten Lasers. Bei beiden magnetooptischen Systemen erfolgen im Gegensatz zum konventionellen System keine integralen Messungen über das gesamte Innenvolumen der Sendespule. Der Durchmesser der Sendespule hat daher nur einen geringen Einfluss auf das laterale Auflösungsvermögen. Der Nachweisbereich des Sensors in axialer und lateraler Richtung ist jedoch wie zuvor von der Frequenz abhängig.

Eine entscheidende Einflussgröße auf die Empfindlichkeit des magnetooptischen Systems ist die Lage der magnetooptischen Schicht, deren Dicke nur einige  $\mu\text{m}$  beträgt. Für ein optimales System sollte sich die magnetooptische Schicht in einem Bereich befinden, in dem die Magnetfeldänderung durch einen Materialfehler maximal ist.

Hierzu wurden Simulationen mit dem kommerziellen Dreidimensionalen-Finite-Differenzen-Programm MAFIA (**MA**xwell's equations by the **Fi**nite **I**ntegration **Algo**rithm) /81/ - /83/, welches bereits erfolgreich bei ähnlichen Aufgabenstellungen eingesetzt wurde /84/, /85/, und dem am Lehrstuhl entwickelten Programm WIRBEL /71/ durchgeführt. Das für die Simulationen mit dem Programm MAFIA benutzte Geometriemodell ist im Bild 42 dargestellt. Die folgende Simulation wurde für den

Aufbau mit der CCD-Kamera durchgeführt, da hierbei auch das Objektiv bei der Simulation berücksichtigt wird. Bei dem Aufbau mit der Fotodiode fällt das Objektiv weg, die sonstigen Verhältnisse sind jedoch identisch.

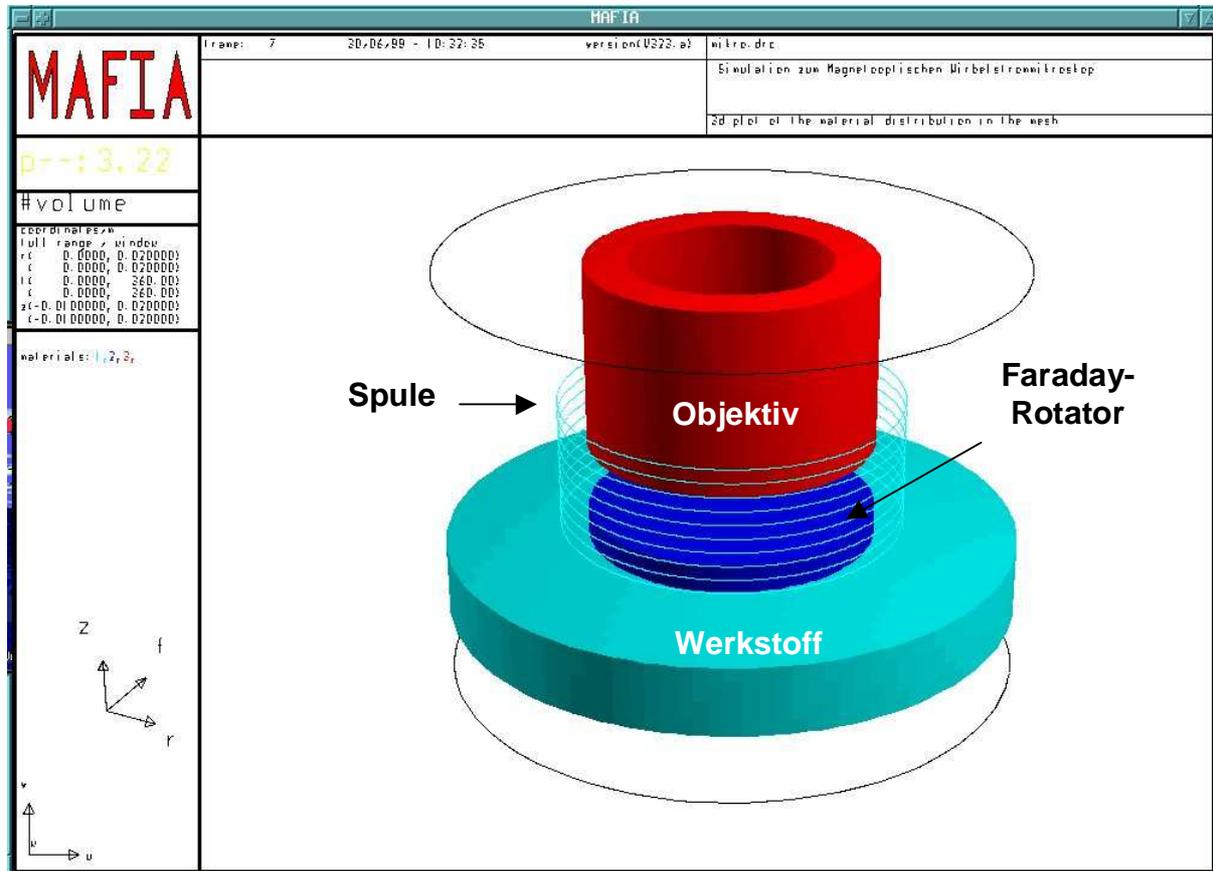


Bild 42: Geometriemodell zur Simulation des magnetooptischen Wirbelstromprüfsystems mit CCD-Kamera mit dem Programm MAFIA

Die untere Scheibe stellt den zu untersuchenden Werkstoff dar, dem entsprechende Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität zugeordnet werden. Die dunkle Scheibe auf dem Werkstoff gibt den Faraday-Rotator und der Zylinder darüber das Objektiv, welchen auch eine elektrische Leitfähigkeit zugeordnet wurde, wieder. Die Windungen der Sendespule umgeben den Rotator und das Objektiv.

Berechnet wurden nun die induzierten Wirbelströme sowie das sich einstellende Magnetfeld für unterschiedliche Anregungsfrequenzen und Materialkennwerten für den zu untersuchenden Werkstoff und das eingesetzte Objektiv. Im Bild 43 ist exem-

plarisch das Ergebnis für eine Prüffrequenz von 100 Hz in einem austenitischen Testkörper abgebildet.

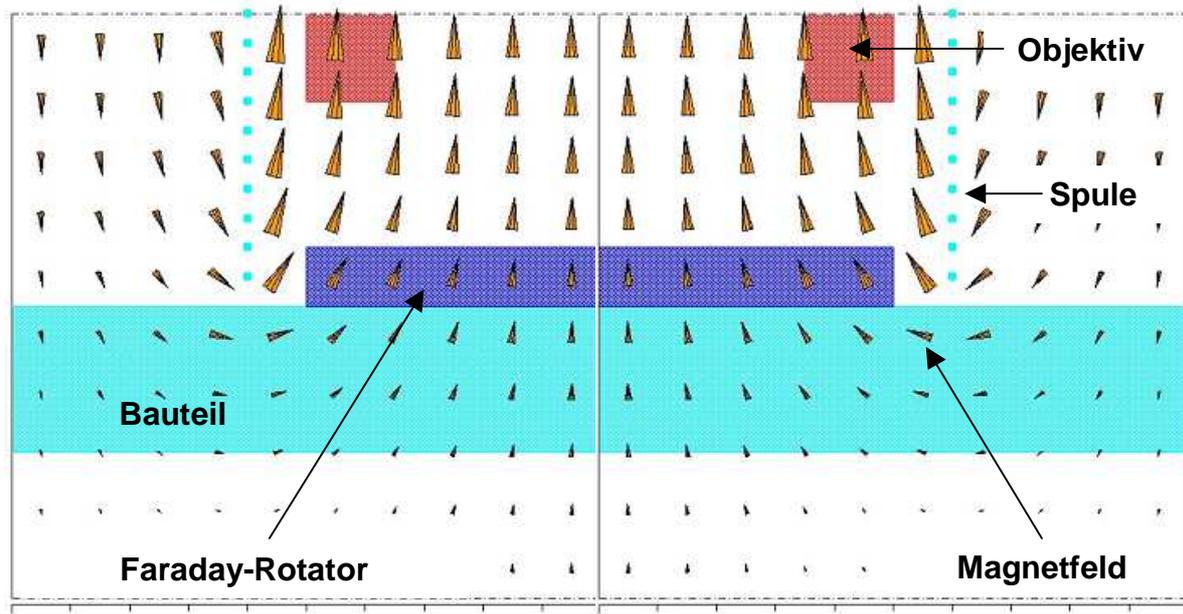


Bild 43: Simulationsergebnis mit dem Programm MAFIA: Magnetfeldverteilung

Dargestellt ist die Magnetfeldverteilung, die sich aus der Sendespule und den im Werkstoff und im Objektiv induzierten Wirbelströme einstellt. Aus Übersichtsgründen wurde auf eine 3d-Ansicht verzichtet und dafür ein zweidimensionaler Schnitt durch die Sendespule und den Werkstoff gewählt. Die sich einstellende Magnetfeldverteilung ist mit Hilfe der Pfeile dargestellt, wobei diese die Richtung und durch ihre Größe auch den Betrag des Felds wiedergeben. Das Magnetfeld dringt von außen in das Bauteil ein und tritt innerhalb der Spule wieder aus. Dann durchläuft es den Innenraum der Spule und tritt am anderen Ende der Spule (die dem Bauteil abgewandte Seite, welche im Bild 43 nicht mehr dargestellt ist) wieder aus, umläuft die Spule und dringt wieder in das Bauteil ein, so dass der magnetische Kreis geschlossen ist. Die Magnetfeldmessung erfolgt im dunklen Bereich auf dem Werkstoff, der den Rotator darstellt. Hier laufen die Magnetfelder hauptsächlich senkrecht zur Bauteiloberfläche, d. h. der Faraday-Rotator muss empfindlich auf Magnetfeldänderungen in dieser Richtung reagieren. Da bei der magnetooptischen Magnetfeldmessung nur eine Richtungskomponente des Magnetfelds gemessen wird, nämlich in Ausbreitungsrichtung des Lichts, sollte diese auf Grund des Simula-

tionsergebnisses senkrecht zur Bauteiloberfläche liegen. Am Rand des Rotators zeigt die Magnetfeldrichtung jedoch leicht in Richtung der Symmetrieachse der Spule. Dies hat zur Folge, dass bei der Magnetfeldmessung, bei der nur die senkrechte Komponente des Felds gemessen wird, am Rotatorrand ein kleineres Feld gemessen wird. Weiterhin ergaben die Simulationen, dass das leitfähige Objektiv auf Grund seiner Rotationssymmetrie und des großen Abstands zur Bauteiloberfläche keinen relevanten Einfluss auf die sich einstellende Magnetfeldverteilung im Rotatorelement hat.

Nach den Betrachtungen zur Magnetfeldverteilung und deren Einfluss auf das Rotatorelement wurden nun Simulationen durchgeführt, um die Magnetfeldänderungen bei Variation der Materialeigenschaften des Prüfteils (elektrische Leitfähigkeit und Permeabilität) exakt zu untersuchen. Um dabei den Berechnungsaufwand zu reduzieren, wurde nur das Magnetfeld entlang der Symmetrieachse der Spule berechnet. Auf der Symmetrieachse verlaufen die Magnetfeldlinien, wie die zuvor durchgeführte Simulation zeigt, senkrecht zur Bauteiloberfläche also auch in die Richtung der maximalen Empfindlichkeit des magnetoopischen Sensors. Bei den Berechnungen wurde neben dem Programm MAFIA auch das Programm WIRBEL, welches bereits im Kapitel 4.1 vorgestellt wurde, eingesetzt. Die hierzu simulierte Prüfsituation ist im Bild 44 graphisch dargestellt. Der Sensor befindet sich auf dem Werkstoff, welcher durch die elektrische Leitfähigkeit und Permeabilität beschrieben wird.

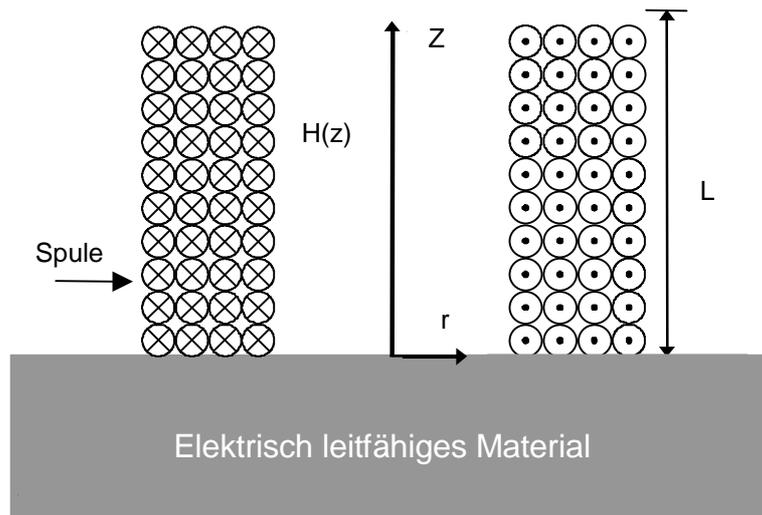


Bild 44: Simulierte Prüfsituation

Berechnet wurde nun der Betrag des Magnetfelds entlang der Z-Achse, welche bei Null (der Bauteiloberfläche) beginnt und bis zu 10 mm reicht, was in diesem Beispiel dem Mittelpunkt der 20 mm langen Spule entspricht. Die Ergebnisse sind im Bild 45 dargestellt.

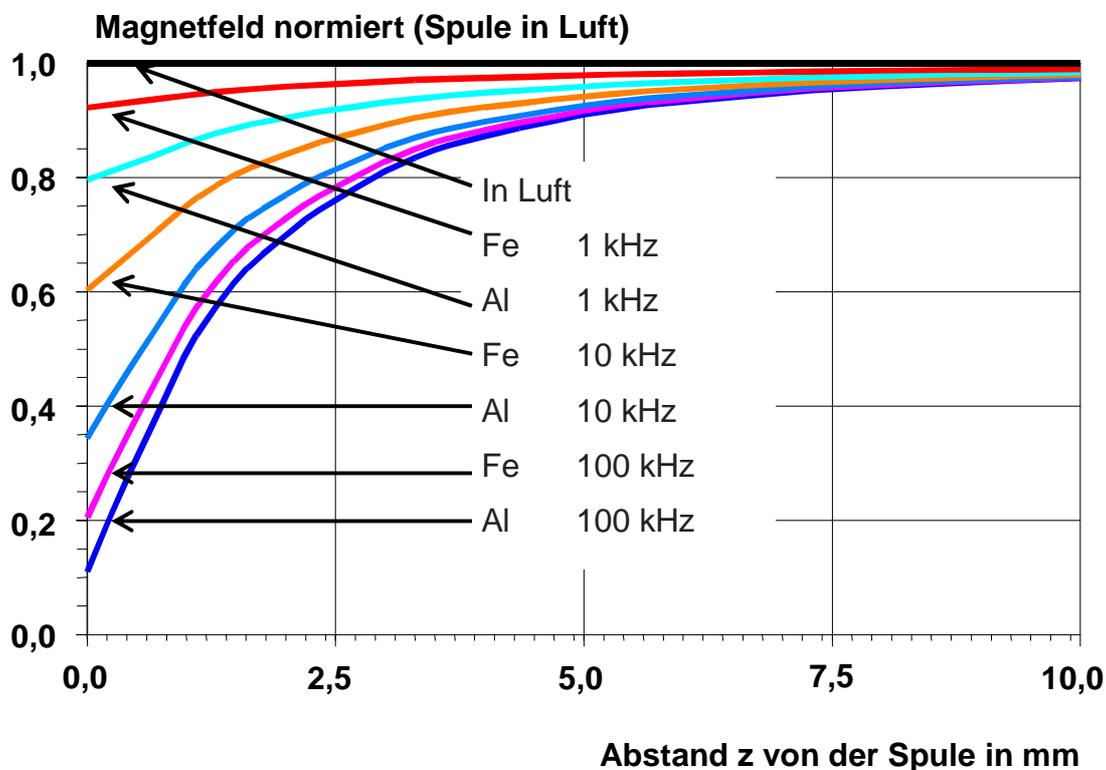


Bild 45: Normierter Betrag des Magnetfelds entlang der Symmetrieachse der Sendespule

Simuliert wurde die Magnetfeldverteilung bei 3 Anregungsfrequenzen (1, 10 und 100 kHz) für die Werkstoffe Aluminium und Stahl, welche standardmäßig mit dem Wirbelstromverfahren geprüft werden. Die berechnete Magnetfeldverteilung an Luft wurde als Referenzgröße gewählt, auf die die Magnetfelder normiert wurden.

Bei allen Prüffrequenzen kann ein deutlicher Unterschied zwischen Aluminium und Stahl festgestellt werden. Für  $z = 0$  mm, also an der Bauteiloberfläche, bzw. Spulenanfang, sind die Magnetfeldänderungen maximal, wobei mit steigender Anregungsfrequenz die Differenz ansteigt. Mit steigendem Abstand zur Bauteiloberfläche wird die Differenz geringer, d. h. der Einfluss des Magnetfelds, welches durch die Wirbelströme erzeugt wird, nimmt ab.

Durch diese Simulation ergibt sich, dass die optimale Lage des Faraday-Rotators an der Bauteiloberfläche ist, da hier die Änderungen maximal sind. Weiterhin folgt, dass die Länge des Faraday-Rotators nicht größer als ca. 5 mm sein muss, da ab dieser Lage keine relevanten Unterschiede in den Magnetfeldänderungen vorliegen.

Diese Ergebnisse gehen in den Aufbau der beiden Systeme ein.

#### 4.6 Aufbau des magnetooptischen Prüfsystems mit einer Fotodiode

Im Bild 46 ist der Aufbau des Systems skizziert. Mit Hilfe des Sinusgenerators wird die Sendespule mit einer konstanten Frequenz angeregt. Hierbei kann das Sendesignal noch über den nach dem Sinusgenerator geschalteten Verstärker angepasst werden. Der Laserstrahl wird mit Hilfe einer Aufweitungsoptik verbreitert, so dass er die gesamte Innenfläche der Sendespule ausleuchtet. Vor die Aufweitungsoptik ist ein optischer Isolator geschaltet, der eine Reflexion des Strahls zurück in den Laser verhindert, was sonst zu Leistungsschwankungen des Lasers führen kann.

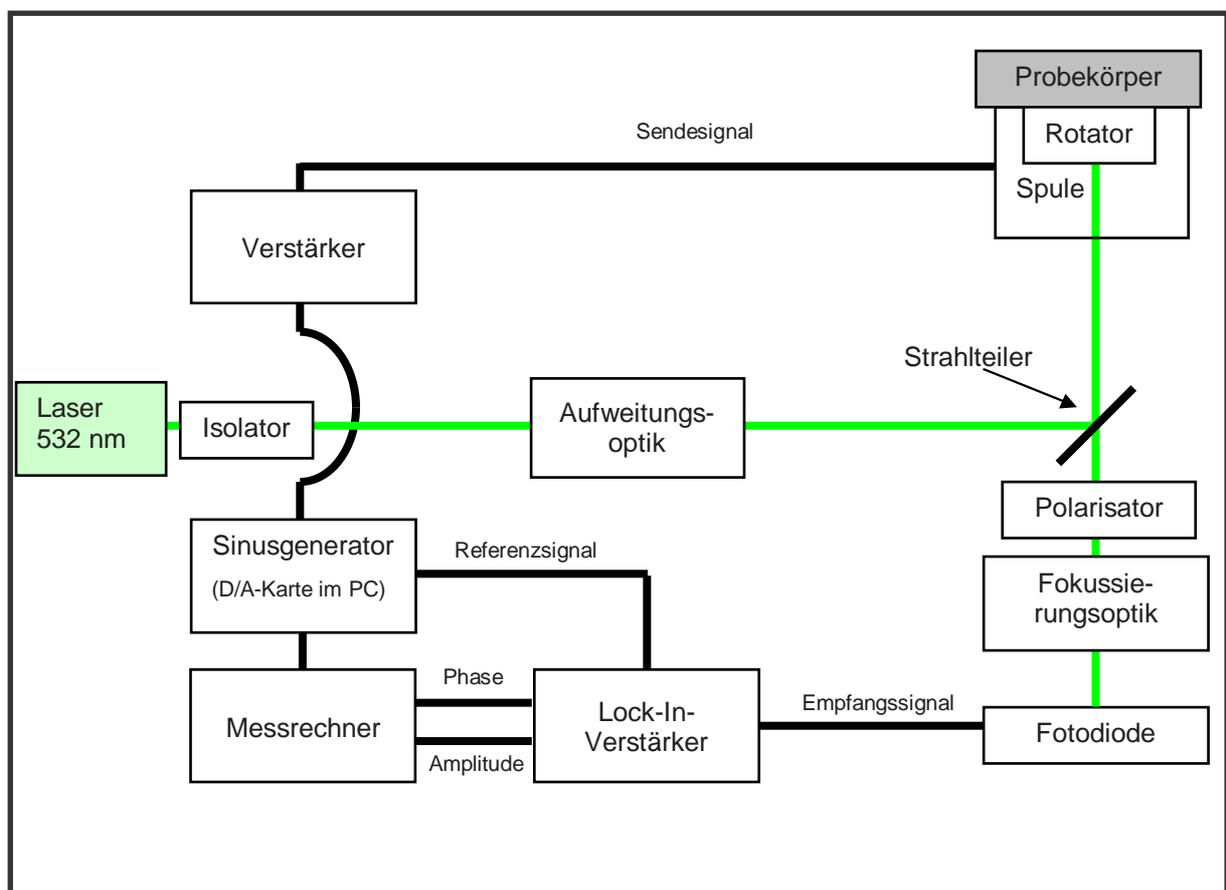


Bild 46: Messaufbau mit Fotodiode

Über den Strahlteiler wird der aufgeweitete Laserstrahl auf den Faraday-Rotator gelenkt, wo die Magnetfeldmessung stattfindet. Der dann an der Spiegelschicht des Faraday-Rotators reflektierte Strahl wird mittels einer Fokussierungsoptik auf die Fotodiode abgebildet. Das Empfangssignal wird von einem Lock-In-Verstärker, der für diese Auswertung von dem Sinusgenerator ein Referenzsignal erhält, nach Ampli-

tude und Phase ausgewertet und dann auf den Messrechner weitergeleitet. Dort werden sie online dargestellt und abgespeichert.

Für dieses System ist ein Manipulator notwendig, der den Sensor über das Prüfteil bewegt. Für die Untersuchungen wurde ein Hexapod eingesetzt (siehe Bild 47), der eine Bewegung in alle sechs Freiheitsgrade ermöglicht und dabei eine Genauigkeit von 1  $\mu\text{m}$  besitzt. Dieses System hat neben der hohen Genauigkeit auch den Vorteil, dass auf Grund seiner hohen Tragkraft auch das Bauteil unter dem feststehenden Sensor bewegt werden kann. Dadurch wird der Sensor nicht durch Erschütterungen, wie sie durch ein schnelles Verfahren verursacht werden können, belastet.

Oberhalb des Verfahrtesches des Hexapods wurde das magnetooptische Wirbelstromsystem befestigt. Dieses ist unten rechts im Bild 47 separat dargestellt. Mittig ist der Strahlteiler, unten die Spule mit dem Faraday-Rotator und links die Fotodiode mit Fokussierungsoptik zu erkennen. Weiterhin sind der Messrechner und der Lock-In-Verstärker auf dem Labortisch zu sehen.

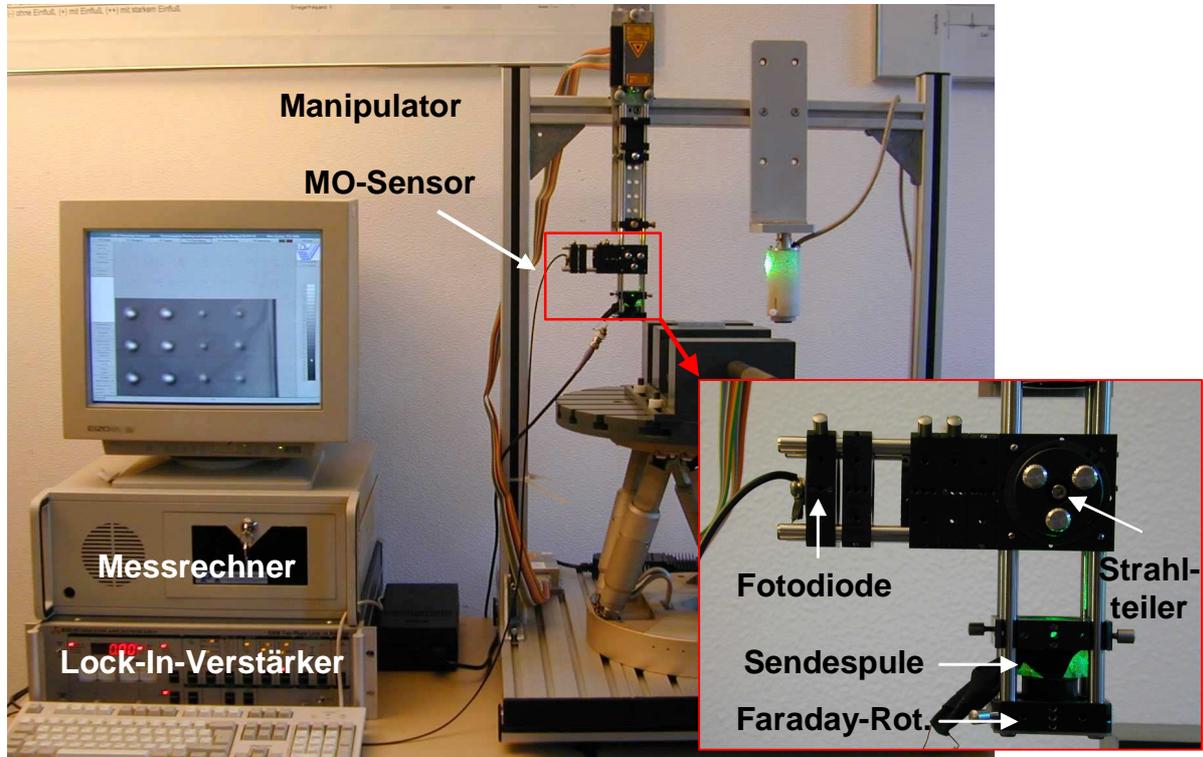


Bild 47: Aufbau des erstellten magnetooptischen Prüfsystems mit Fotodiode

Dieses System liefert, wie ein konventionelles Wirbelstromsystem, eine Empfangsspannung, die nach Amplitude und Phase ausgewertet werden kann. Weiterhin ermöglicht dieses, für die Messungen mit der Fotodiode erstellte System, durch den modularen Aufbau ein schnelles Anpassen und Wechseln der Sensoren und weiterer Komponenten, wie z. B. der Strahlaufweitung. Weiterhin gewährleistet der eingesetzte Manipulator eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, die für grundlegende Untersuchungen notwendig sind.

Mit diesem System wurden umfangreiche Messungen zum lateralen Auflösungsvermögen durchgeführt, deren erste Ergebnisse bereits auf wissenschaftlichen Tagungen präsentiert und diskutiert wurden /86/, /87/.

Bei der Herstellung der Sensoren, bestehend aus Sendespule und Faraday-Rotator, wurde darauf geachtet, dass sie sowohl für den Aufbau mit Fotodiode als auch für den Aufbau mit CCD-Kamera eingesetzt werden können. Somit lassen sich die Ergebnisse der beiden Systeme direkt vergleichen.

#### 4.7 Aufbau des magnetooptischen Prüfsystems mit CCD-Kamera

Das System zur Visualisierung des Magnetfelds innerhalb der Sendespule mit Hilfe einer CCD-Kamera ist im Bild 48, welches den schematischen Aufbau des Prüfsystems zeigt, dargestellt.

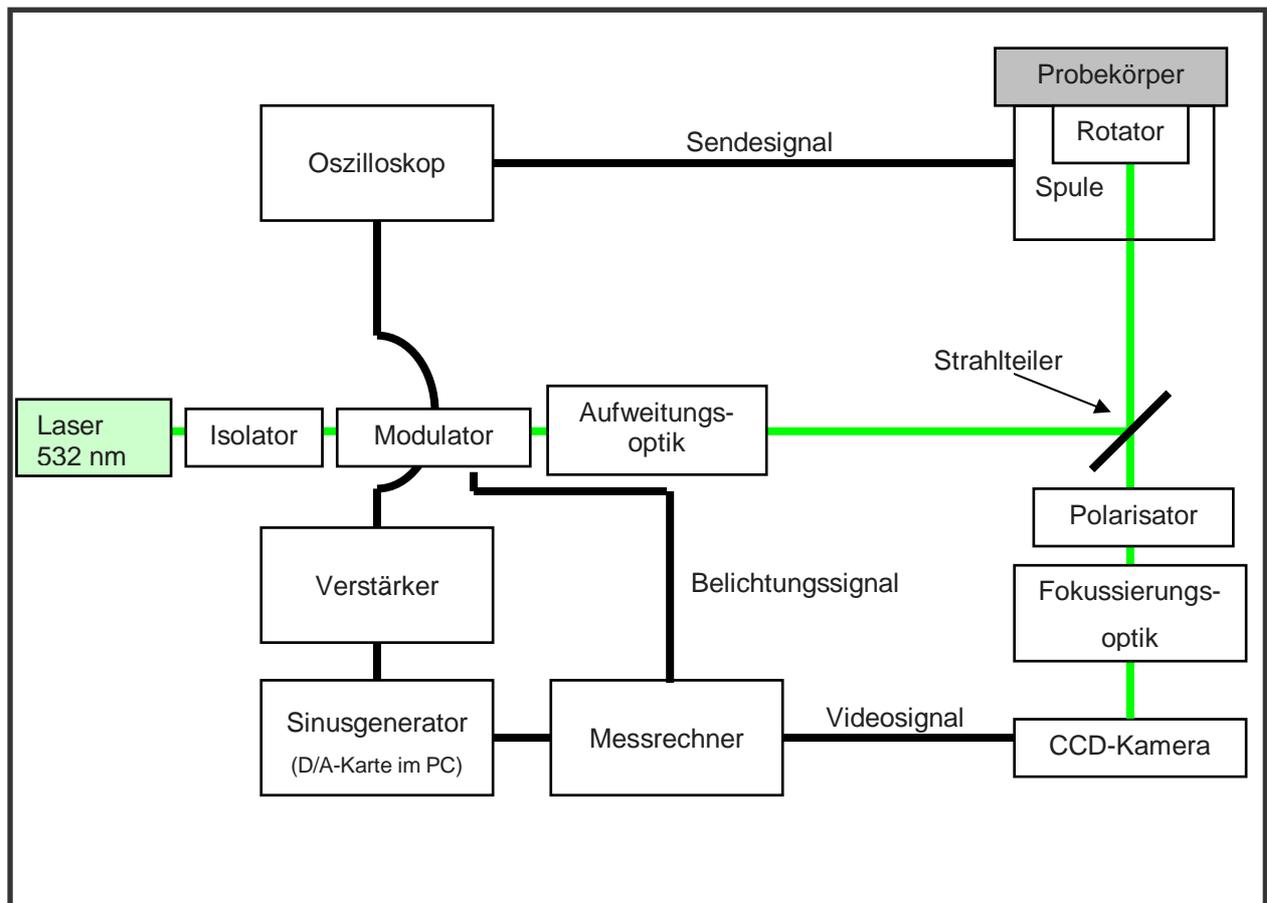


Bild 48: Aufbau des magnetooptischen Systems mit CCD-Kamera

Ein zentrales Element des Systems ist der Messrechner, mit dem die einzelnen Komponenten angesteuert werden. Mit Hilfe einer speziell für dieses System erstellten Software kann die Prüffrequenz eingestellt werden, welche dann über einen Verstärker auf die Sendespule geleitet wird. Diese induziert im Bauteil einen Wirbelstrom, dessen Magnetfeld sich mit dem der Sendespule überlagert. Parallel zur Anregungsfrequenz steuert der Messrechner den Modulator an, der den Laserstrahl ein- und ausblendet und somit eine gezielte Belichtung ermöglicht. So kann beispielsweise die Belichtung jeweils bei dem maximalen Anregungsstrom der Sendespule erfolgen. Der so getaktete Laserstrahl trifft nach einer Aufweitungs-optik

auf einen Strahlteiler, der das Laserlicht auf den Faraday-Rotator weiterleitet. Dort erfolgt in Abhängigkeit des vorliegenden Magnetfelds eine Drehung der Polarisationssebene des Lichts. Das von der Spiegelschicht reflektierte Licht wird nach Durchlaufen des Strahlteilers, eines Polarisators und einer Fokussierungsoptik auf eine CCD-Kamera abgebildet. Das dort aufgenommene Bild wird online auf den PC weitergeleitet. Der zusätzlich eingebaute Isolator verhindert eine Rückkopplung des Laserstrahls und das Oszilloskop dient zur Überwachung der Anregungsfrequenz sowie der Belichtung.

Das erstellte System ist im Bild 49 dargestellt. Unten links im Bild ist der Laser abgebildet, gefolgt von dem optischen Isolator und Modulator.

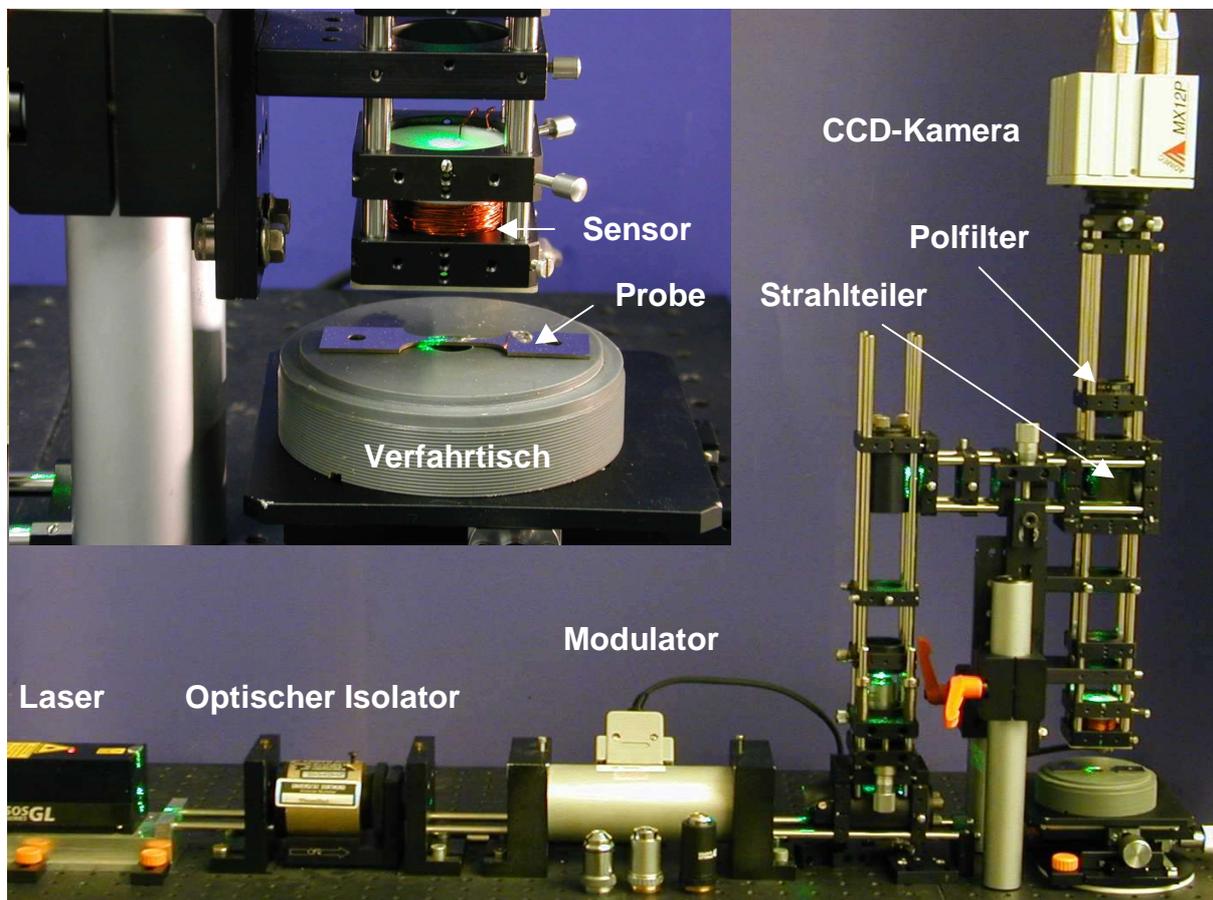


Bild 49: Aufbau des magnetooptischen Prüfsystems mit CCD-Kamera

Danach wird der Strahl umgeleitet, damit er - analog zum konventionellen Mikroskop – senkrecht auf den Probekörper auftrifft. Dort erfolgt die eigentliche Messung. Der

Sensor sowie die zu untersuchende Probe sind links oben im Bild separat abgebildet. Der Probekörper wird unterhalb des Sensors mit Hilfe des Verfahrtsches bewegt. Die Bedienung ist mit der eines Lichtmikroskops vergleichbar. Danach wird der Laserstrahl über den Strahlteiler auf die CCD-Kamera geleitet.

Ein Foto eines eingesetzten Sensors zeigt Bild 50. Links im Bild ist der Sensor im geöffneten Zustand, und rechts im montierten abgebildet, wie er zur Messung eingesetzt wurde.

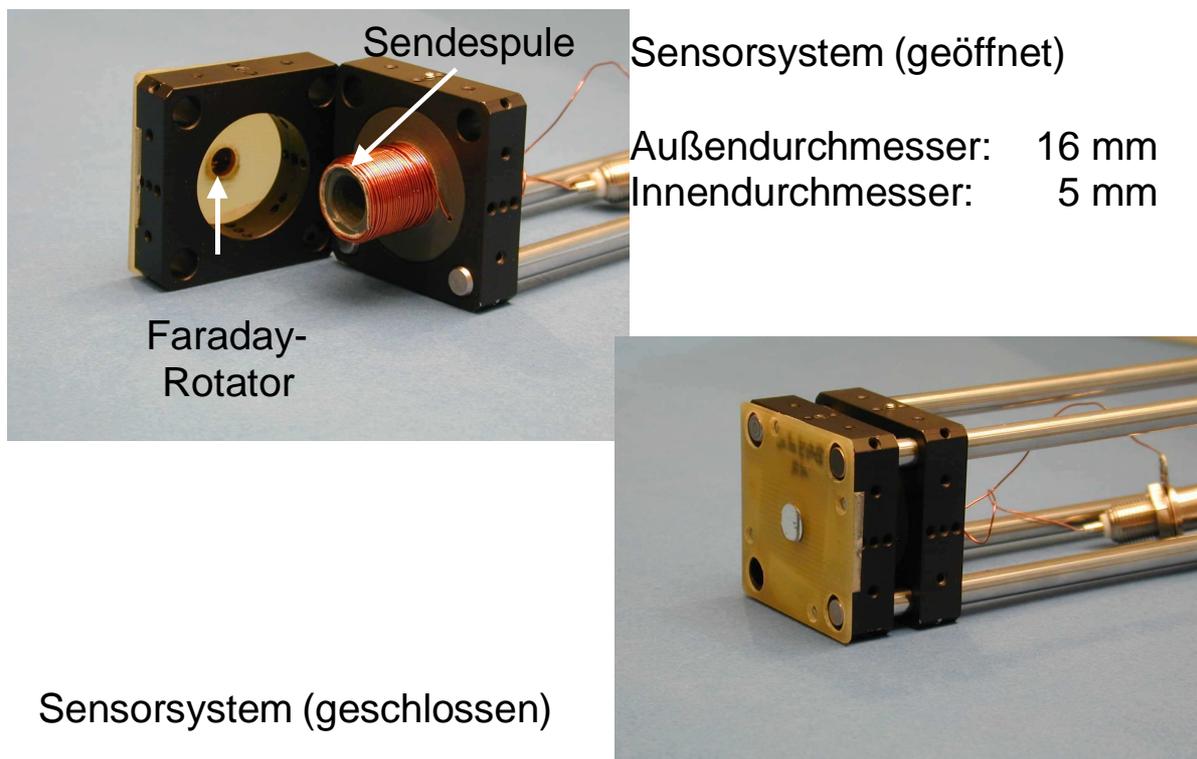


Bild 50: Aufbau des eingesetzten magnetooptischen Sensors

Die einzelnen Elemente des Sensors, Spule und Faraday-Rotator sind im linken Bild deutlich zu erkennen. Dieser Aufbau ermöglicht es, Sensorparameter, wie Lage des Faraday-Rotators zur Spule und Werkstoff oder Art der Anregungsspule schnell zu variieren. Ebenso lässt sich die magnetooptische Schicht leicht austauschen. In späteren Anwendungen, wo die optimalen Parameter bereits bekannt sind, können auch kleinere kompaktere Sensoren hergestellt werden. Dieser Sensor kann auch für Messungen mit dem Fotodiodensystem eingesetzt werden.

Zur Ansteuerung und Messung wurde eine spezielle Software erstellt, dessen Benutzeroberfläche im Bild 51 abgebildet ist.

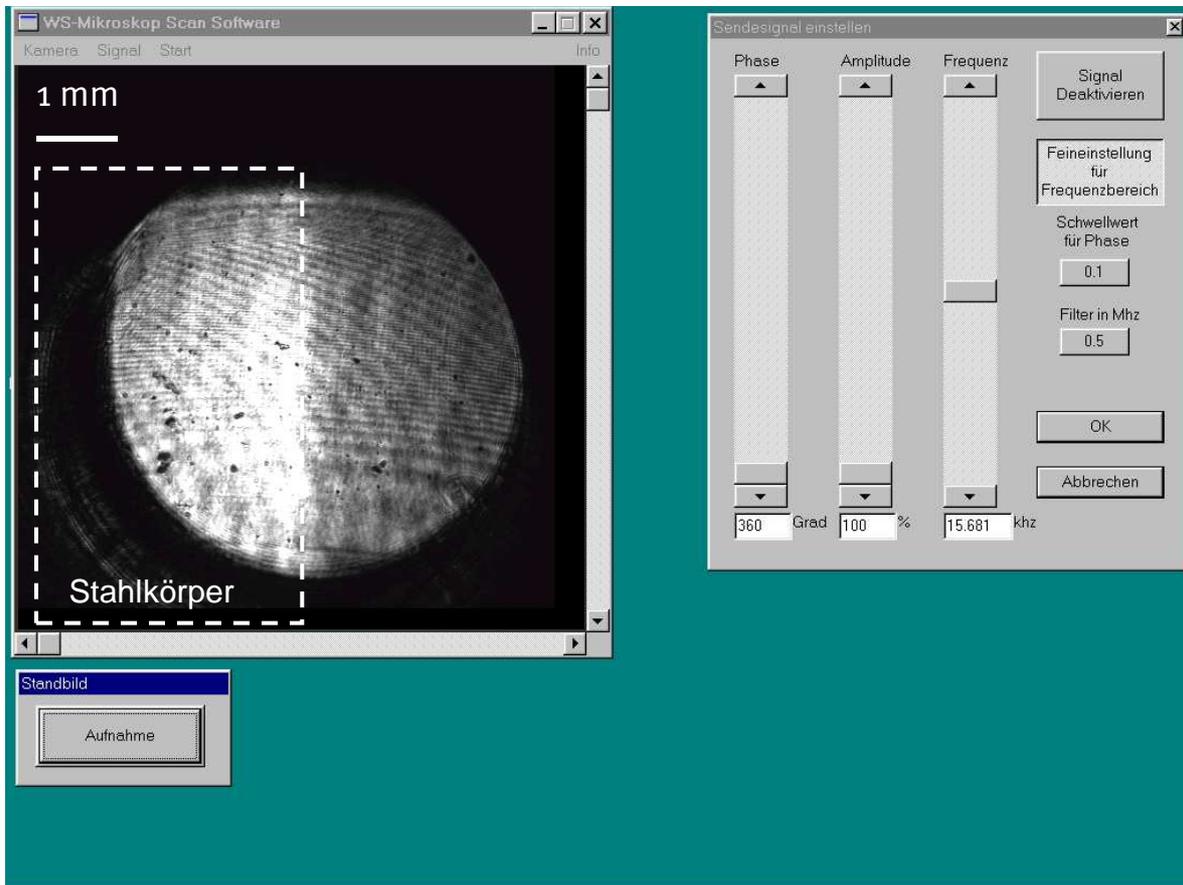


Bild 51: Messsoftware

Oben links ist das Online-Bild der CCD-Kamera angegeben. Bei dieser Messung wurde die Bauteilkante eines Stahlkörpers untersucht. Dieser befand sich links im helleren Bereich, wobei seine Lage im Messbefund durch die weiße gestrichelte Linie angegeben ist.. Rechts der dunkle Bereich gibt den Bereich der Luft wieder. Die Kante wurde also eindeutig detektiert. Der runde Messbereich ergibt sich dadurch, dass der Laserstrahl die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule, welche rund ist, wiedergibt. Außerhalb dieses Messbereichs befindet sich die Sendespule. Rechts im Bild ist das Ansteuerungsmenü abgebildet. Dort kann die Frequenz sowie die Amplitude der Erregerspannung eingestellt werden. Zusätzlich kann über den Phasenregler und eine Schwellwertsetzung der Zeitpunkt und die Dauer der Belichtung, Einblenden des Lasers mit Hilfe des Modulators, eingestellt werden. Mit Hilfe des Aufnahmeschalters kann der Messbefund digital abgespeichert werden.

Da dieses System bereits auf Messen wie der MTQ 2002 präsentiert wurde, ist der lineare Aufbau wie in Bild 49 dargestellt in einen kompakteren Aufbau mit quadratischer Grundfläche geändert worden (siehe Bild 52). Zusätzlich wurde um das Prüfsystem eine Kammer gebaut, die zum einen die Laserschutzbestimmungen einhält und zum anderen Störungen, wie z.B. durch Streulicht, verhindert.

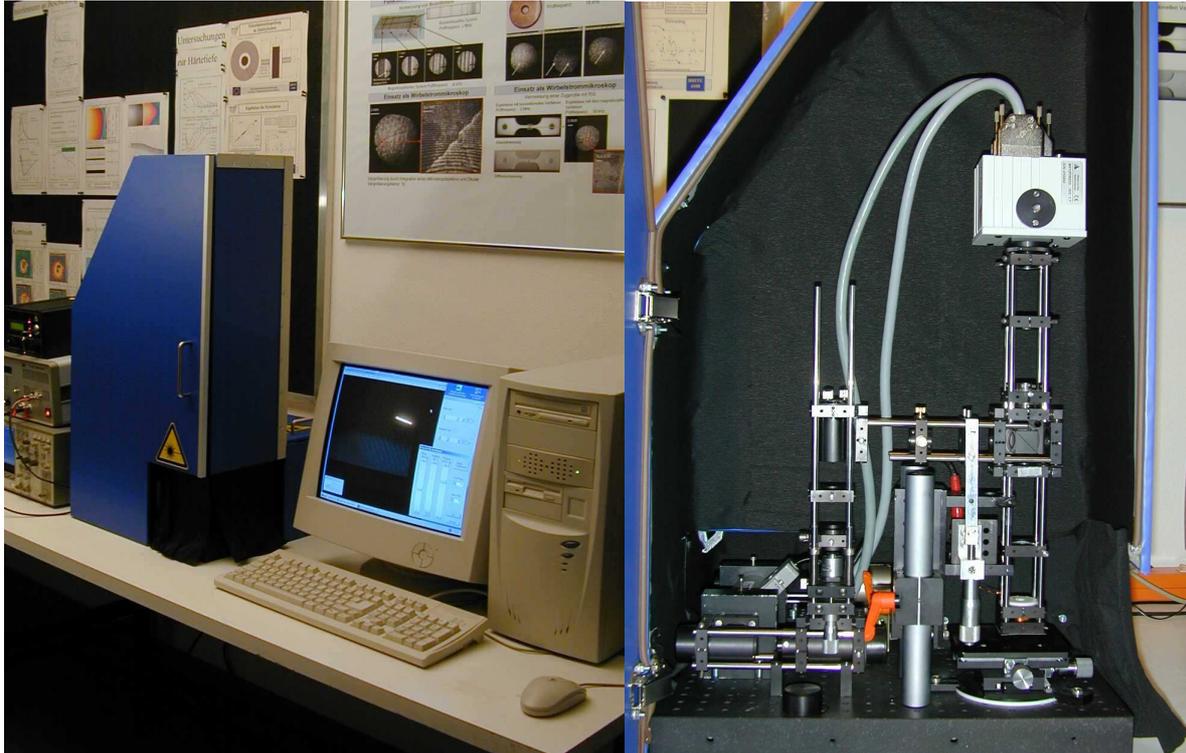


Bild 52: Geänderter Aufbau des magnetooptischen Prüfsystems mit CCD-Kamera

Rechts im Bild 52 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, oben die Kamera und unten rechts der Sensor. Mit den beiden magnetooptischen Wirbelstromprüfsystemen, dem CCD-Kamera- und dem Fotodioden-System, wurden zunächst Messungen zur Funktionsüberprüfung durchgeführt.

## 4.8 Funktionsüberprüfung beider Systeme

### Überprüfung des Systems mit der Fotodiode

Das erstellte System wurde zunächst anhand einer einfachen Messsituation auf seine Funktion hin überprüft. Dazu wurde die Vermessung einer Bauteilkante ausgewählt. Die Messsituation ist im Bild 53 dargestellt.

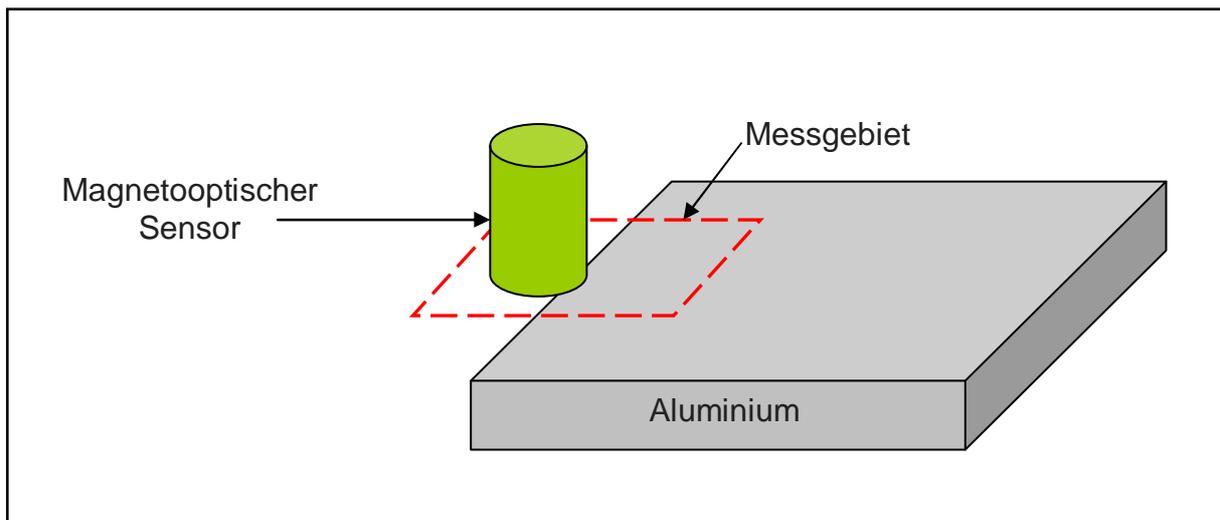


Bild 53: Messaufbau zur Funktionsüberprüfung des Diodensystems

Der Aluminiumkörper wurde mit Hilfe des 6-Achsen-Manipulators unterhalb des Sensors verfahren. Das Messgebiet ist im Bild 53 durch die gestrichelte Linie eingezeichnet, wobei sich die Bauteilkante mittig des Messgebiets befindet. Nachfolgend sind die Daten der eingesetzten Sendespule aufgelistet.

Bezeichnung der Sendespule: 01

Außendurchmesser:	7 mm	Innendurchmesser:	5 mm
Länge:	10 mm	Windungszahl:	50

Der Laser wurde mit Hilfe einer Optik auf einen Strahldurchmesser von 5 mm aufgeweitet und füllt somit die gesamte Spuleninnenfläche aus. Der aufgeweitete Strahl wurde mit Hilfe einer weiteren Optik auf die Fotodiode fokussiert. Auf diese Weise wird, wie bei dem konventionellen System, integral über das Spuleninnenvolumen gemessen. Die dabei erhaltenen Amplituden- und Phasenwerte werden von der

Messsoftware für jeden einzelnen Messpunkt abgespeichert. Das für dieses System eingesetzte Mess- und Auswerteprogramm zeigt Bild 54. Oben im Bild ist die Menüleiste abgebildet, welche das Einladen von Messdateien, die Ansteuerung des Manipulators, die Auswahl der Messfrequenz, die Darstellung und die Auswertung ermöglicht. Links in der Spalte sind Datei- und Messinformationen wie das bei der Messung nachgewiesene Minimum und Maximum, der Dateiname, die Messfrequenz usw. aufgelistet. In der Mitte des Bilds ist das Messergebnis in Form einer Grauwertdarstellung abgebildet. Dazu wurden zwischen dem in der linken Spalte angegebenen Minimum und Maximum 28 äquidistante Intervalle berechnet und den darin liegenden Messwerten unterschiedliche Grauwerte zugeordnet.

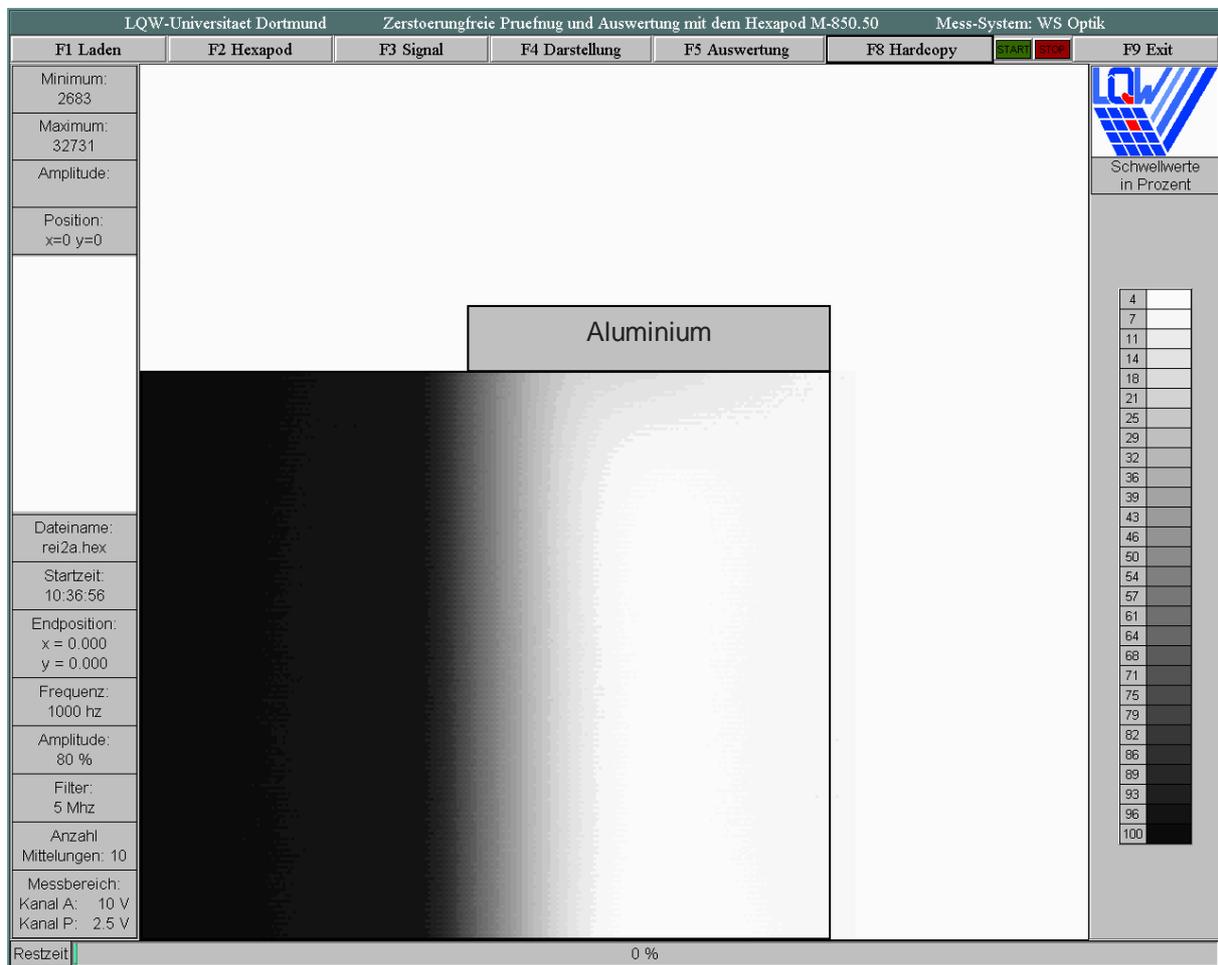


Bild 54: Mess- und Auswerteprogramm; Vermessung einer Bauteilkante  
Amplitudenauswertung

Die entsprechenden Grauwerte sind rechts im Bild aufgelistet, die nebenstehenden Zahlen geben Prozentwerte an, dabei entspricht 100 % dem nachgewiesenen Maximum und wird mit Schwarz markiert. Die geringste Amplitude wird dagegen mit Weiß dargestellt.

Die im Bild 54 graphisch dargestellten Messwerte geben die gemessene Amplitude für die im Bild 53 skizzierte Messung wieder. Die Messfläche betrug 20 mm \* 20 mm, der Messpunktabstand 1/10 mm in beiden Richtungen und als Messfrequenz wurde 1 kHz gewählt. Die Amplitude ist im linken Bereich, wo kein Material war, maximal nimmt dann zu Mitte hin ab und wird rechts, wo sich der Sensor über den Aluminiumbauteil befand, minimal. Die Bauteilkante entspricht dabei dem grauen Bereich. Der Verlauf der gemessenen Amplitude in waagerechter Richtung ist in Form eines Linienplots im Bild 55 dargestellt.

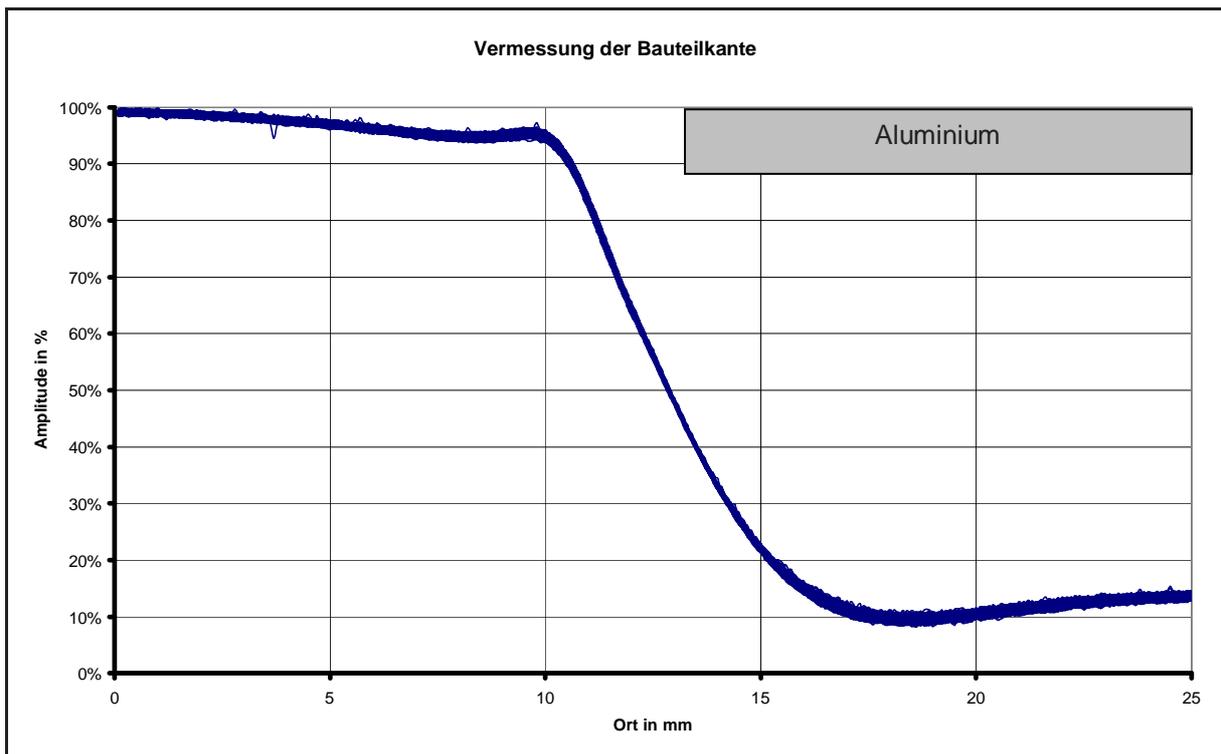


Bild 55: Verlauf der Amplitude in waagerechter Richtung

Zusätzlich zum Verlauf der Amplitude ist die Lage des Bauteils eingezeichnet. Die beiden Bereiche (Sensor ohne Bauteil und Sensor auf dem Bauteil) sind deutlich zu erkennen.

Bei den hier dargestellten Messwerten handelt es sich um unbearbeitete Daten, d. h. sie wurden nicht nachträglich weiterverarbeitet. Anhand der oben dargestellten Messung erkennt man auch die Stabilität des Systems. Insbesondere bei der Grauwertdarstellung sind keine dem Messbefund überlagerten Störsignale zu erkennen, wie sie z. B. durch eine Drift verursacht werden.

Das erstellte System stellt neben den Amplitudenwerten auch die Phasendifferenz zwischen dem Empfangs- und Sendesignal dar. Diese ist für die oben beschriebene Messung im Bild 56 ebenfalls mit Hilfe einer Grauwertdarstellung abgebildet.

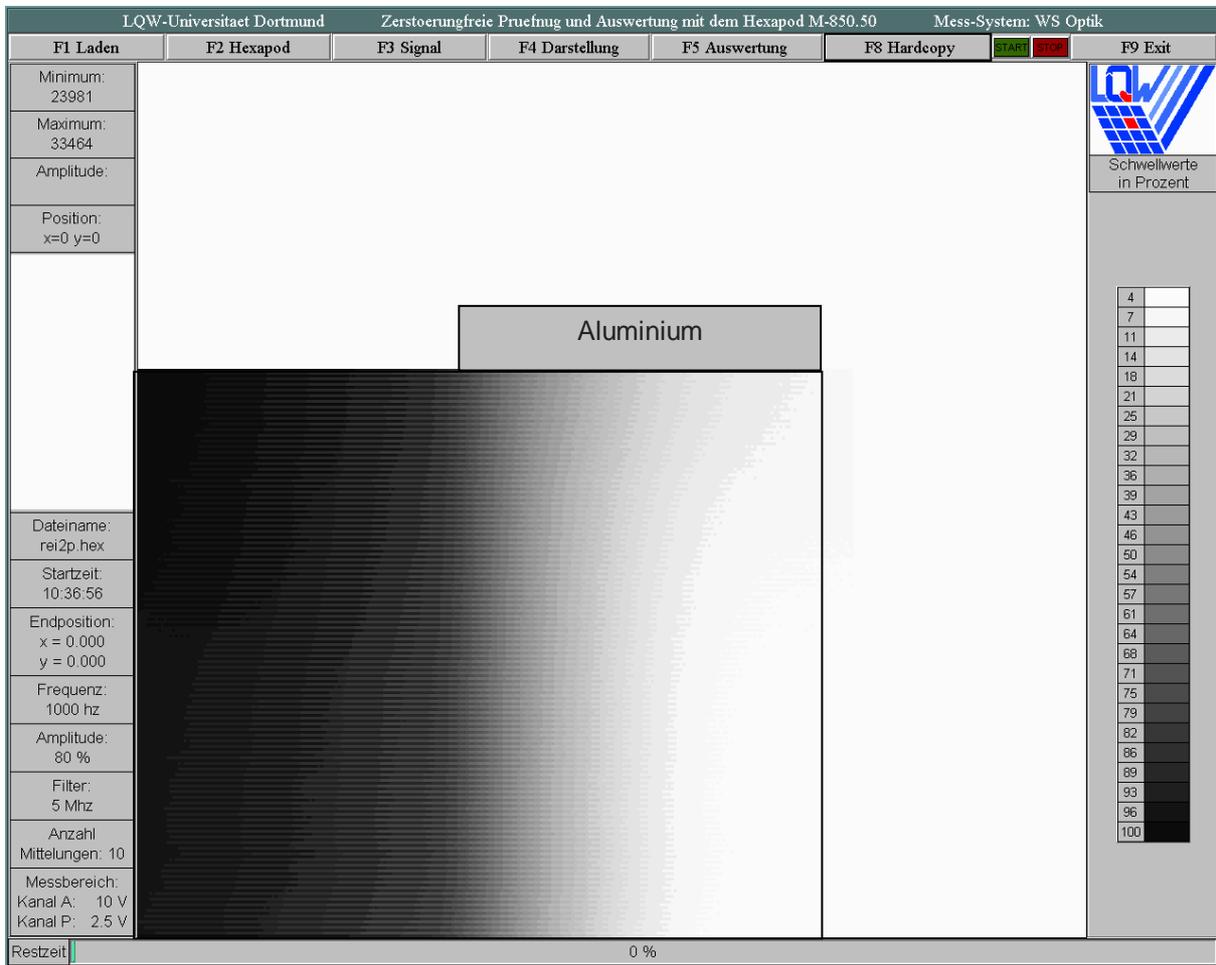


Bild 56: Vermessung einer Bauteilkante, Phasenauswertung

Auch hier sind die beiden Bereiche, Luft und Aluminium, deutlich zu erkennen.

Die Vermessung der Bauteilkante zeigt, dass das erstellte System funktionsfähig ist und zur zerstörungsfreien Wirbelstromprüfung eingesetzt werden kann. Als nächstes wird das zweite erstellte System mit der CCD-Kamera auf seine Funktionsfähigkeit überprüft.

### **Überprüfung des Systems mit der CCD-Kamera**

Das aufgebaute System wurde zunächst an einfachen Prüfsituationen getestet, um so die Funktionsweise des Systems zu prüfen. Hierzu wurde ebenfalls die Detektion einer Bauteilkante ausgewählt, da hier die größten Magnetfeldänderungen zu erwarten sind. Dabei wurden Probekörper aus ST37 und Kupfer eingesetzt. Im Folgenden wird die Messung an dem ST37-Testkörper betrachtet. Gemessen wurde mit einer Anregungsfrequenz von 25 kHz, wobei folgende Sendespule eingesetzt wurde:

Bezeichnung der Sendespule: 02

Außendurchmesser:	13 mm	Innendurchmesser:	5 mm
Länge:	15 mm	Windungszahl:	400

Für die Messungen wurde eine Aufnahme mit und eine ohne Wirbelstromanregung durchgeführt. Ausgewertet wurde die Differenz der beiden Bilder, die dann das Magnetfeld wiedergibt, welches durch den induzierten Wirbelstrom erzeugt wird. Diese Differenz ist im Bild 57 in Form einer Grauwertdarstellung abgebildet, wobei rechts im Bild die Messsituation dargestellt ist. In der Bildmitte ist das von dem Faraday-Rotator reflektierte Laserlicht abgebildet, welches die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule an der Bauteiloberfläche wiedergibt. Dabei geben helle Grauwerte ein hohes Magnetfeld und dunkle Werte ein geringes Magnetfeld an. Als Maßstab wurde zusätzlich die Strecke für 1 mm mit in das Bild 57 eingezeichnet.

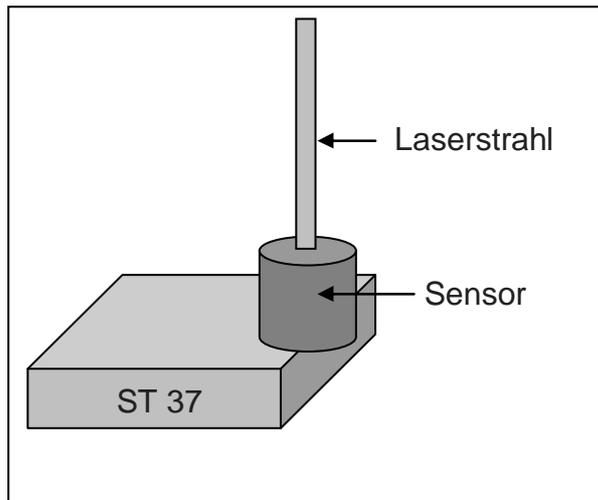
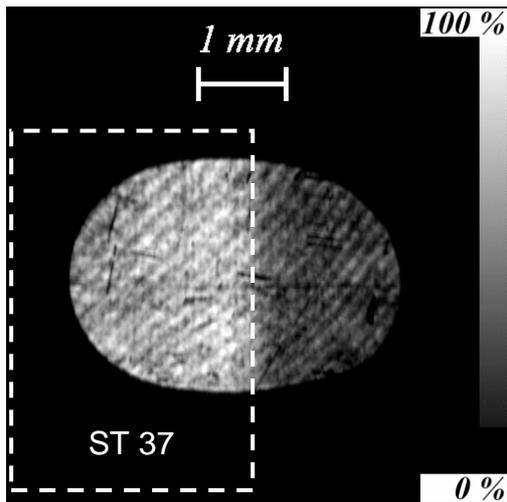


Bild 57: Messung der Bauteilkante des ST37-Testkörpers  
(links: ST 37, rechts: Luft)

Der Testkörper befand sich links im Bild, wo höhere Magnetfelder vorliegen. Diese Verstärkung des Magnetfelds wird durch die magnetische Permeabilität des ST 37 verursacht.

Im Vergleich dazu ergaben die Messungen an dem Kupfer-Testkörper folgenden Befund (Bild 58). In diesem Fall befand sich der Testkörper ebenfalls auf der linken Seite des Messfelds. Auf Grund der relativen Permeabilität von ( $\mu = 1$ ) des Kupfers, erfolgt jedoch keine Verstärkung des Magnetfelds, sondern nur eine Abschwächung des Felds durch die induzierten Wirbelströme.

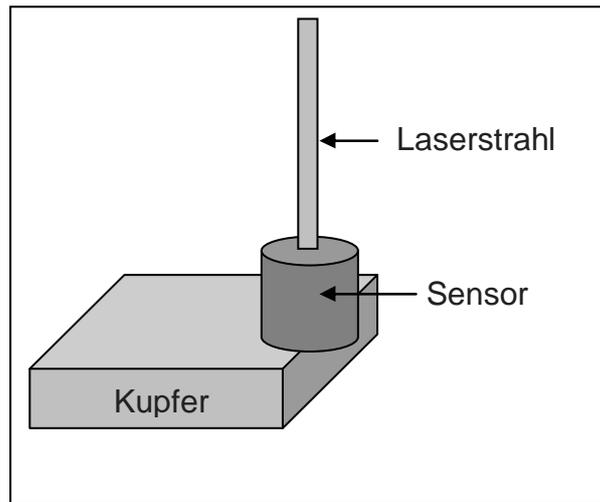
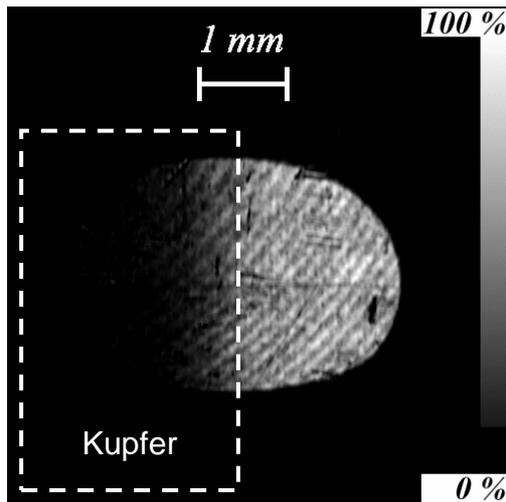


Bild 58: Messung der Bauteilkante des Kupfer-Testkörpers  
(links: Kupfer, rechts: Luft)

Diese Abschwächung ist durch die dunkleren Grauwerte im linken Bereich deutlich zu erkennen. An Luft wird das Magnetfeld nicht durch Wirbelströme abgeschwächt und ist somit höher als über der Kupferprobe.

Wie die beiden Untersuchungen zeigen, gibt das erstellte CCD-Kamerasystem die Magnetfeldverteilung korrekt wieder. Weiterhin ermöglicht dieses System mit nur einer Messung eine eindeutige Detektion und Ortsbestimmung der Bauteilkante, wofür mit einem konventionellen Tastsensor gleicher Abmaße mehrere Messungen notwendig wären.

## 5 Messungen an Modellfehlern

Nach der Funktionsüberprüfung beider Systeme wurden Messungen an unterschiedlichen Modellkörpern durchgeführt, um das Verhalten der Systeme sowie deren Auflösungsvermögen zu bewerten. Hierzu werden zunächst Untersuchungen an Bohrungen vorgestellt. Danach erfolgen Messungen an eng nebeneinander liegenden und unterschiedlich tiefen Nuten, um das Auflösungsvermögen der Systeme bewerten zu können. Hierzu werden auch Vergleichsmessungen mit einem konventionellen System vorgestellt.

### 5.1 Untersuchungen an Bohrungen

Für diese Messungen wurde ein ebener ST37-Probekörper ausgewählt, in den Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser, von 1 mm bis 2 mm, eingebracht wurden. Ein Foto des zu vermessenden Probekörpers zeigt Bild 59.

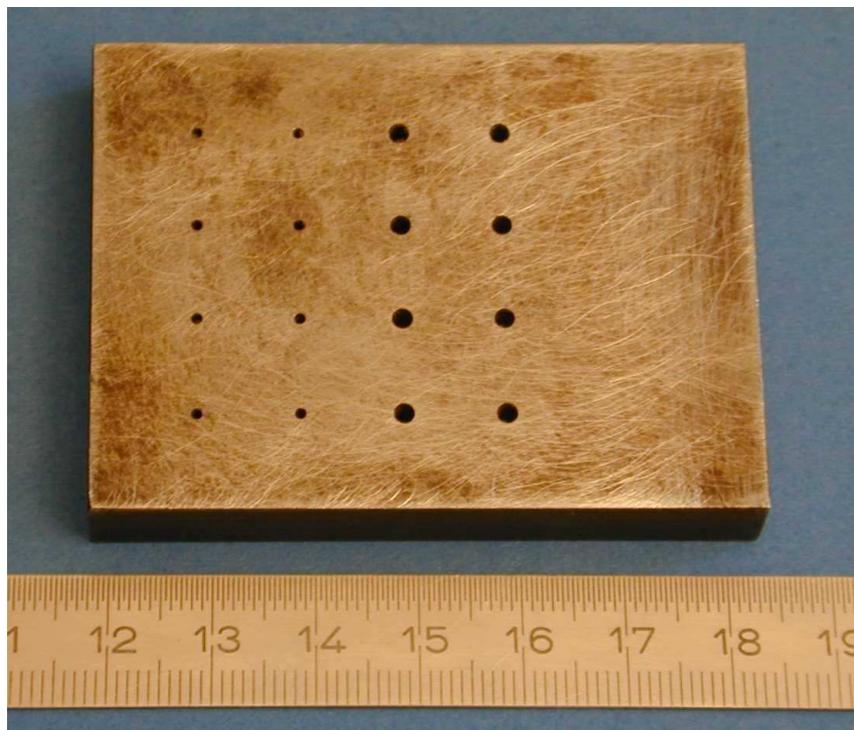


Bild 59: ST37-Probekörper mit Bohrungen

Der Probekörper wurde zum einen mit dem Fotodiodensystem und zum anderen mit dem CCD-Kamerasystem vermessen.

### Messungen mit dem System mit Fotodiode

Der Probekörper wurde an dem Manipulator befestigt und unterhalb des magnetooptischen Sensors verfahren. Für die Messung wurde der Sensor, der bereits zuvor bei der Funktionsprüfung eingesetzt wurde, angewandt. Ebenso wurde der Laserstrahl auf den Durchmesser der Sendespule aufgeweitet. Als Anregungsfrequenz wurde eine Frequenz von 1 kHz gewählt. Ausgewertet wurden die Amplitude und Phase des Empfangssignals, welche in Bild 60 und Bild 61 aufgetragen sind.



Bild 60: Messung mit dem Fotodiodensystem: Amplitudenauswertung

Jeweils oben rechts im Bild der Amplituden- und Phasenauswertung ist der Durchmesser der Sendespule und damit auch des magneto-optischen Sensors eingezeichnet.

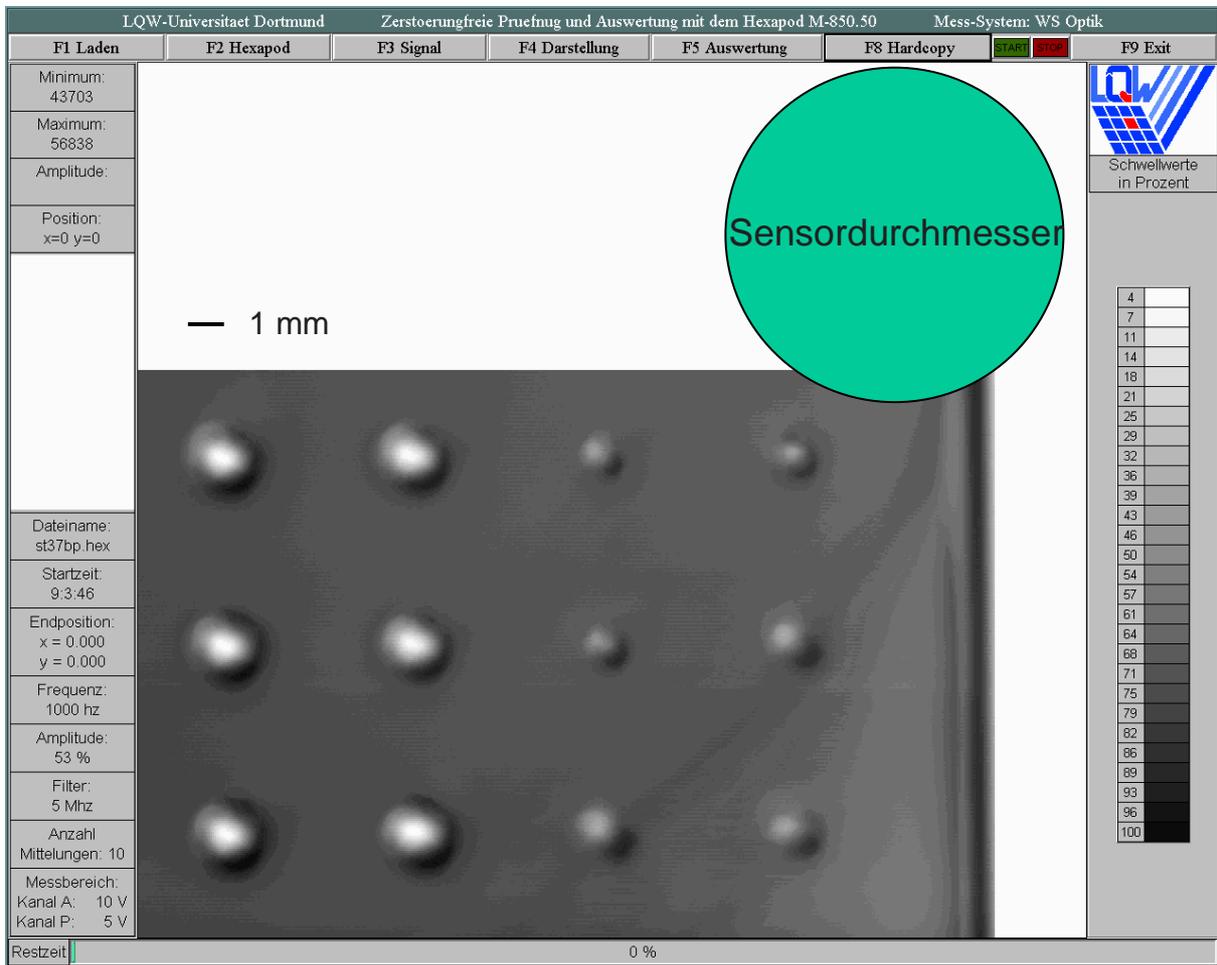


Bild 61: Messung mit dem Fotodiodensystem: Phasenauswertung

Rechts neben der Grauwertdarstellung der Amplitude und Phase sind die prozentualen Änderungen des Messsignals und die zugehörigen Grauwerte aufgelistet. Die Messdaten für die Amplituden und Phase sind jeweils unbearbeitet, wurden also nicht nachträglich ausgewertet.

Sowohl bei der Amplituden- als auch im Fall der Phasenauswertung sind die einzelnen Bohrungen deutlich zu erkennen, wobei eine trotz des großen Sensordurchmessers hohe laterale Auflösung vorliegt.

## Messungen mit dem System mit integrierter CCD-Kamera

Der oben mit dem Diodensystem vermessene Probekörper wurde nun mit dem CCD-Kamerasystem vermessen. Für diese Untersuchungen wurde eine optimierte Sendespule mit folgenden Kenndaten eingesetzt:

Bezeichnung der Sendespule: 03

Außendurchmesser:	26 mm	Innendurchmesser:	7 mm
Länge:	16 mm	Windungszahl:	950

Diese optimierte Sendespule erzeugte ein um 30 Prozent höheres Magnetfeld als die Sendespule, welche zur Funktionsüberprüfung eingesetzt wurde, was einen höheren Kontrast im Messbefund bewirkt. Als Prüffrequenz wurde eine Frequenz von 16 kHz gewählt. Auf Grund der Optimierung der Sendespule konnte bei diesen Messungen auf eine Differenzbildung der Messungen mit und ohne Wirbelstromanregung verzichtet werden. Bild 62 zeigt die Vermessung der Bauteilkante des ST37. Dieser Messbefund gibt das Online-Bild der Kamera wieder und wurde nicht nachträglich bearbeitet.

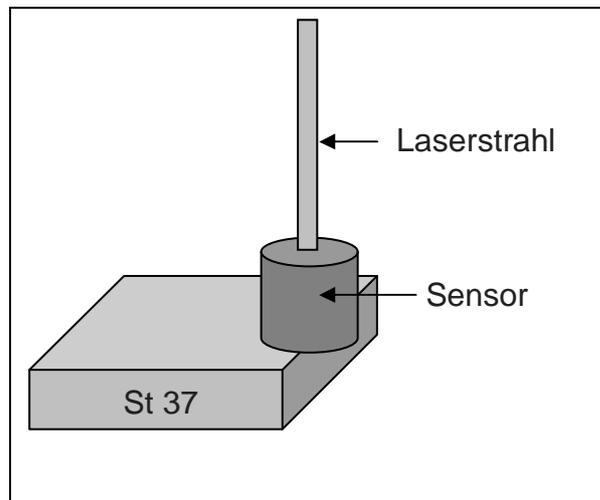
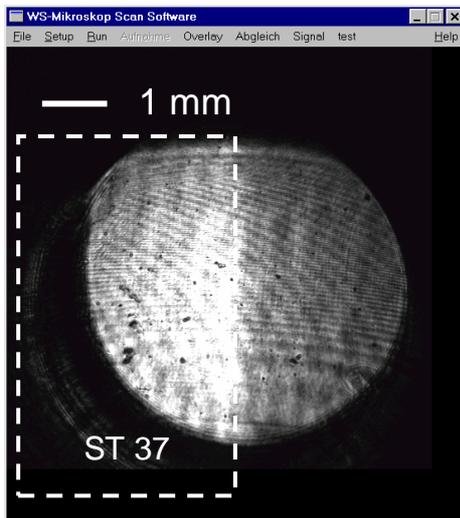


Bild 62: Messung der Bauteilkante des ST37-Testkörpers  
(links: ST37, rechts: Luft)

Wie bei den Messungen zur Funktionsüberprüfung befand sich das Bauteil links im Bild, also bei hohen Magnetfeldern. Im rechten Teil des Bilds, wo kein Material vorlag, wurden geringere Magnetfelder gemessen.

Im Bild 63 ist der Messbefund zur Detektion einer 2 mm Bohrung abgebildet. Dabei handelt es sich ebenfalls um das unbearbeitete Kamerabild.

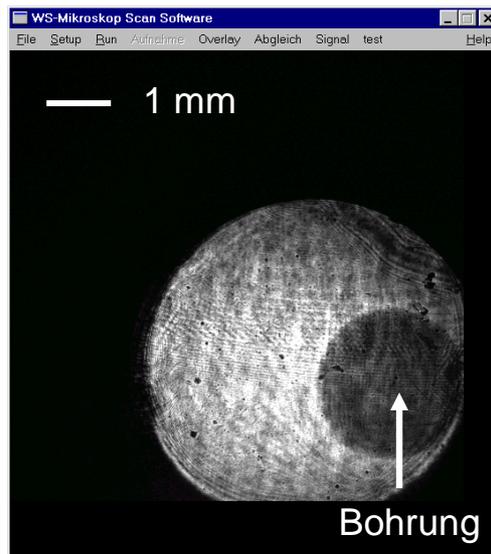


Bild 63: Detektion einer 2 mm Bohrung im ST37

Der dunkle Kreis gibt die Lage und Größe der Bohrung wieder. Der Modellfehler kann also sofort im Kamerabild erkannt und klassifiziert werden. Im Fall der Detektion einer 1 mm Bohrung, wie im Bild 64, sind einige Besonderheiten im Messbefund zu erkennen.

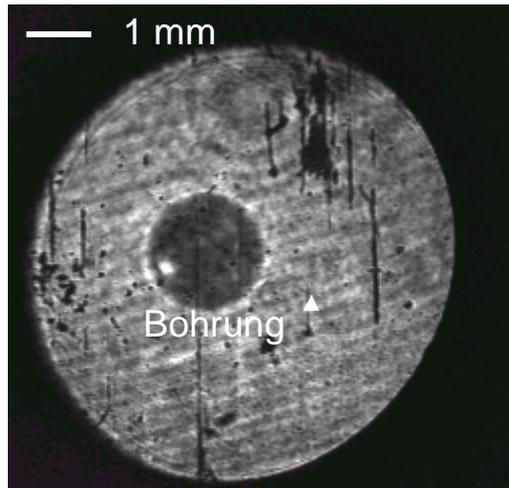


Bild 64: Detektion einer 1 mm Bohrung im ST37

So sind Verschleißspuren der Schicht, verursacht durch Aufsetzen oder Schleifen auf dem Testkörper, anhand der schwarzen Streifen zu sehen. An diesen Stellen ist die Spiegelschicht des Sensors beschädigt, d. h. es wird kein Licht zurück in die CCD-Kamera reflektiert. Der Sensor ist an dieser Stelle sozusagen blind, liefert also keine Information über das vorliegende Magnetfeld. Weiterhin ist der weiße Punkt innerhalb der Bohrung auffällig. Diese Messanzeige trat nur bei dieser 1 mm Bohrung auf und wurde mehrmals mit unterschiedlichen Messeinstellungen erfolgreich detektiert. Um die Ursache für diese Anzeige zu klären, wurde die Probe mit einem Videomikroskop näher untersucht. Jedoch wurde keine auffällige Materialeigenschaften, die auf diese Anzeige deuten, gefunden. Nach der Untersuchung mit dem Mikroskop konnte jedoch auch mit dem magnetooptischen System diese Anzeige nicht mehr festgestellt werden. Daher ist es wahrscheinlich, dass die Ursache für diese Anzeige vor oder auch während der Mikroskopuntersuchungen eliminiert wurde. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass sich innerhalb der Bohrung ein magnetischer Span, z. B. von dem eingesetzten Bohrer, befand, der sich später durch den Transport und der Probenvorbereitung für die Mikroskopie aus der Bohrung löste.

Abschließend zeigen die Messungen, dass mit beiden magnetooptischen Systemen die Bohrungen exakt detektiert wurden und dabei mit beiden Systemen ein hohes laterales Auflösungsvermögen vorliegt. Des Weiteren zeigen sich die Vorteile des CCD-Kamerassystems, mit dem die Fehlerart (hier Bohrung) sofort online zu erkennen ist, wogegen bei dem Diodensystem wie auch bei dem konventionellen Prüfsystem die Fehlerart erst nach Abscannen der Probe und nach anschließender Auswertung zu erkennen ist.

## 5.2 Untersuchungen an Nuten

### Messungen an einem Kupfer-Testkörper

Zu Bewertung des Auflösungsvermögens für unterschiedlich tiefe Risse wurde nun ein nicht ferromagnetisches Material mit definiert eingebrachten Nuten ausgewählt. Die Abmaße des Kupfer-Testkörpers betragen  $120 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ . Die Nutbreite beträgt 0,1 mm, die Länge 10 mm und die Tiefe variiert zwischen 0,1 und 9 mm (siehe Bild 65).

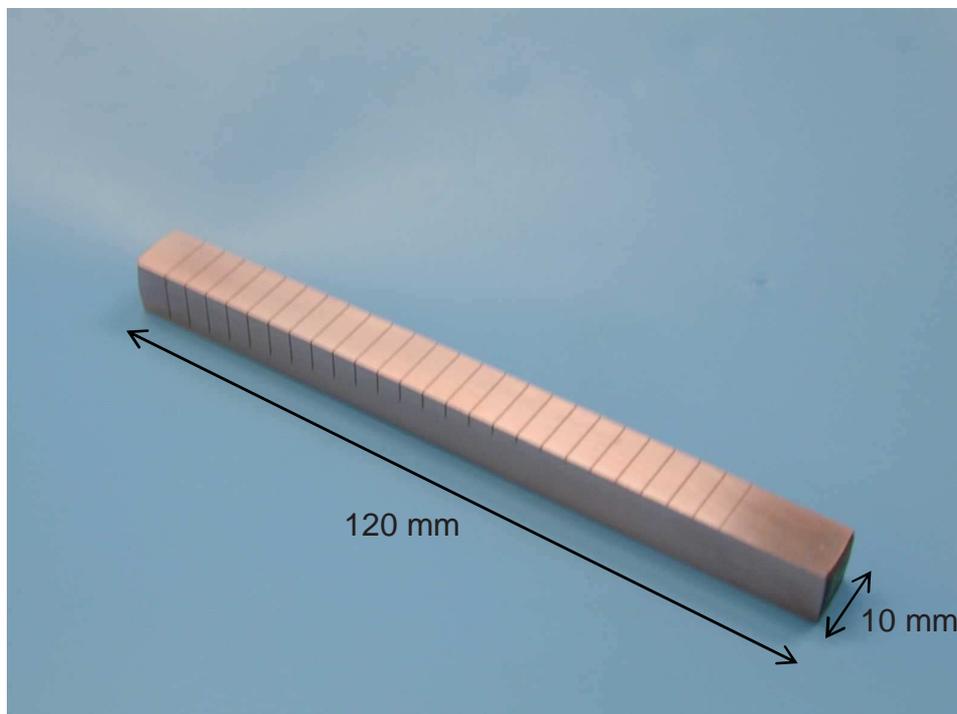


Bild 65: Testkörper aus Kupfer

### Messungen mit dem Fotodiodesystem

Der Testkörper wurde unter denselben Bedingungen wie der ST37 vermessen. Der Messbefund ist wie zuvor im Bild 61 in Form einer Grauwertdarstellung abgebildet.

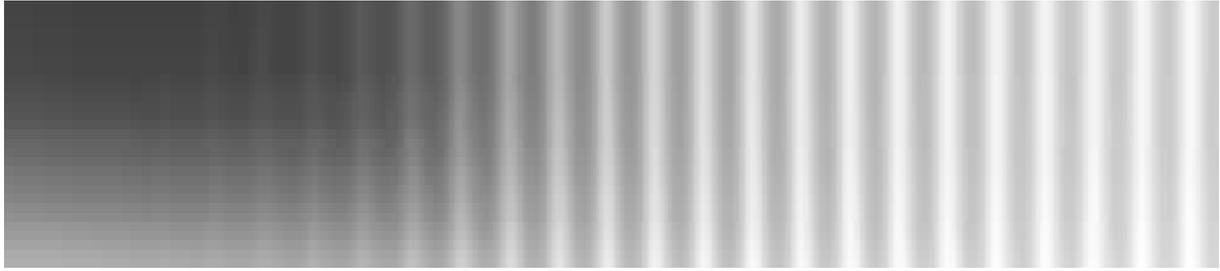


Bild 66: Messbefund mit einer Anregungsfrequenz von 1 kHz; Amplitudenauswertung

Im rechten Teil des Messbefunds sind die Nuten deutlich anhand der hellen senkrechten Streifen zu erkennen. Im linken Bereich, wo wesentlich geringere Nutttiefen vorliegen, sind die Anzeigen weniger deutlich. Die Darstellung ergibt, dass die Amplitude oben links geringer als unten rechts im Messfeld ist. Dies deutet auf einen Abstandseffekt hin, d. h. die Probe war nicht parallel zur Sensorebene ausgerichtet. Ein weiterer Grund für diesen Verlauf kann die Lage des Testkörpers zum Sensor sein. Da der Testkörper schmäler als der Sensor ist, kann es zu ähnlichen Anzeigeänderungen kommen, wenn der Testkörper nicht exakt zur Bewegungsrichtung des Sensors ausgerichtet ist. Weiterhin muss auch die Bearbeitung des Probekörpers und das Einbringen der Nuten berücksichtigt werden, die eine Verformung bzw. Verbiegung des gesamten Probekörpers verursachen kann, so dass der Testkörper nicht mehr parallel zur Sensorebene ausgerichtet werden kann.

Neben diesem Signalverlauf sind jedoch entlang der Messspuren in waagerechter Richtung einzelne Maxima zu sehen, die auf die Nuten hinweisen. Nachfolgend wird eine Spur genauer analysiert (Bild 67).

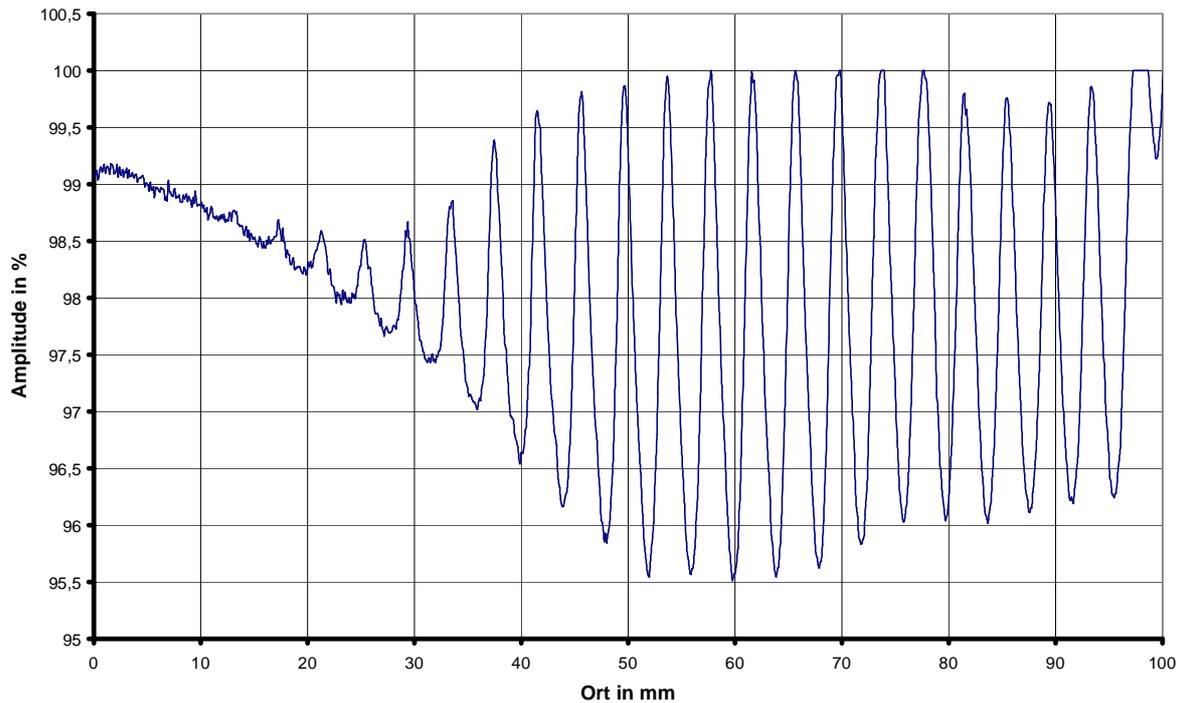


Bild 67: Verlauf einer Messspur in waagerechter Richtung

Die einzelnen Maxima geben die Lage der detektierten Nuten wieder. Durch einfaches Abzählen der Maxima und Vergleich mit dem Probekörper kann somit auf die noch detektierte Nuttiefe geschlossen werden, welche bei dieser Messung bei ca. 0,3 mm liegt.

## Messungen mit dem System mit integrierter CCD-Kamera

Geprüft wurde der Testkörper unter gleichen Bedingungen wie die Stahlprobe vorher. Dabei zeigte sich, dass die Magnetfeldänderung durch den Kupferkörper, im Gegensatz zu der Untersuchung des Stahlkörpers, nicht ausreicht, um die Fehler ohne weitere Bildverarbeitung deutlich anzuzeigen.

Aus diesem Grunde wurde, wie bei der Funktionsüberprüfung, die Differenzauswertung durchgeführt. Dabei wurden die Bilder mit und ohne Wirbelstromanregung digital voneinander abgezogen. Im Bild 68 sind exemplarisch die Befunde einiger Risse abgebildet.

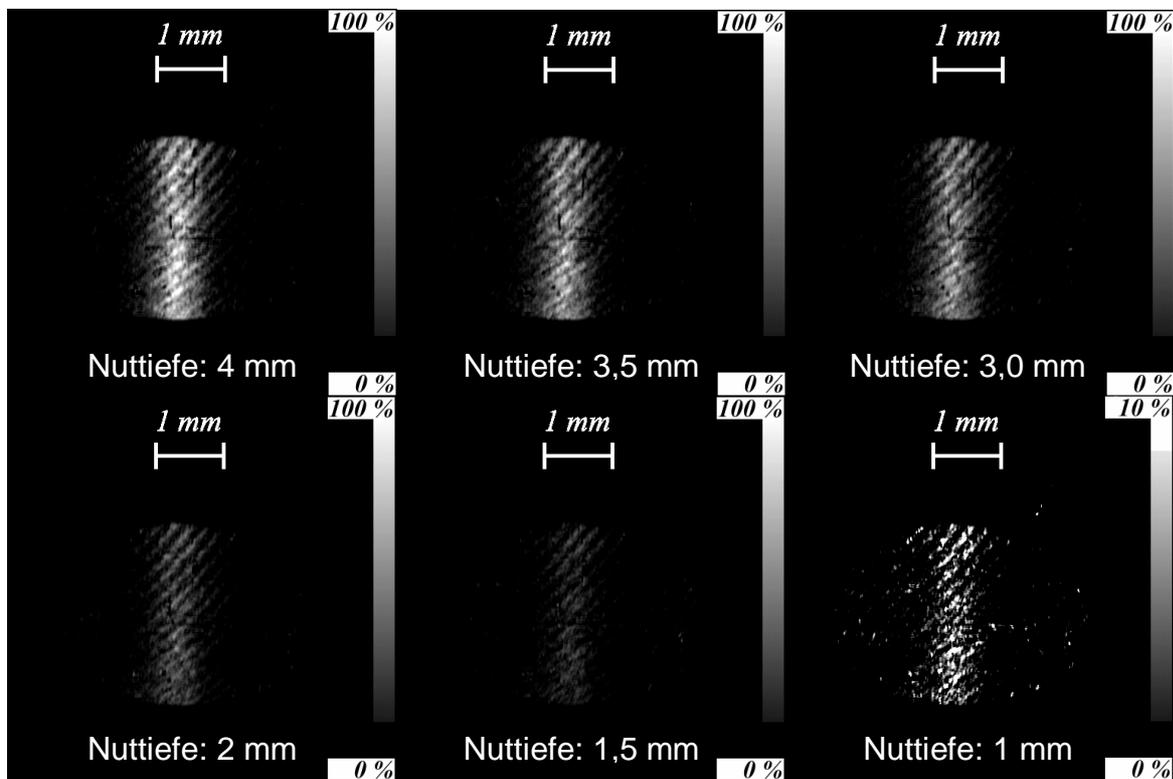


Bild 68: Messung der Nuten des Testkörpers aus Kupfer

Die Nuten sind in den Befunden (Bild 68) anhand der hellen Linien deutlich zu erkennen. Im Vergleich mit dem Diodensystem, bei dem nur eine Messspur ausgewertet wurde, konnten Nuten nur bis zu einer Tiefe von 1 mm detektiert werden. Ursache hierfür kann wieder die Lage des Sensors zum Bauteil sein, welche durch eine mögliche Verformung der Probe durch die eingebrachten Nuten nicht optimal war.

## Messungen an einem Stahl-Testkörper

Um das laterale Auflösungsvermögen der Systeme beurteilen zu können, wurde ein spezieller Probekörper aus ST37, welcher im Bild 69 abgebildet ist, mit definiert eingebrachten Nuten vermessen.

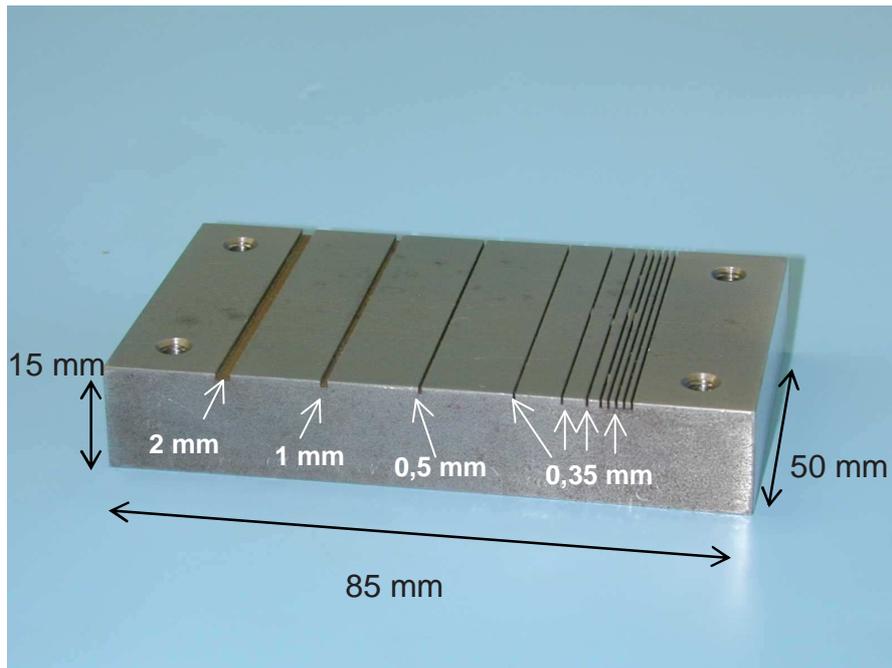


Bild 69: Testkörper aus ST37

Die Abmaße des Testkörpers sind  $85 \times 50 \times 15 \text{ mm}^3$ . In diesen wurden Nuten mit einer Länge von 50 mm und einer Tiefe von 1 mm eingebracht. Dabei beträgt die Nutbreite 2, 1, 0,5 und 0,35 mm. Weiterhin wurden unterschiedliche Abstände der Nuten zueinander gewählt, was eine Beurteilung des lateralen Auflösungsvermögens ermöglicht.

## Messungen mit dem konventionellen System

Die Untersuchungen mit dem konventionellen System wurden mit einem kommerziellen Wirbelstromsensor durchgeführt. Die Ansteuerung des Sensors sowie das Verfahren der Probe erfolgten mit demselben System wie bei dem magnetooptischen Prüfsystem mit integrierter Fotodiode. Das System ist im Bild 70 dargestellt. Der Sensor befindet sich innerhalb der weißen Halterung und wurde über die Probe verfahren.

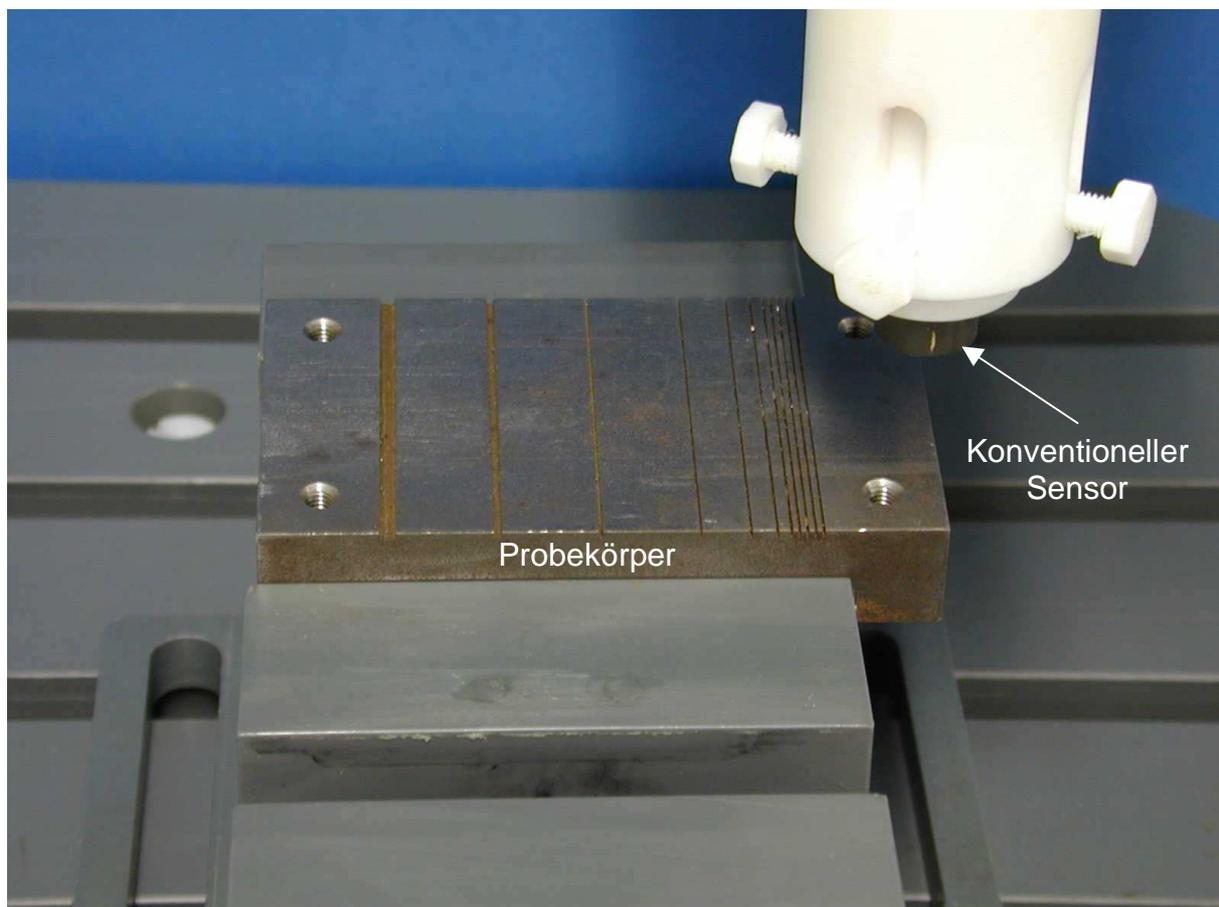


Bild 70: Prüfsystem für Untersuchungen mit dem konventionellen System

Wie bei dem magnetooptischen System wurde zur Aufnahme der Empfangsspannung ein Lock-In-Verstärker eingesetzt. Somit ist, da bis auf den Sensor das gesamte System beibehalten wurde, gewährleistet, dass die Unterschiede in den Messbefunden ausschließlich von den eingesetzten Sensoren stammen.

Um die Messungen mit den Untersuchungen der magnetooptischen Systeme vergleichen zu können, wurden folgende Kriterien für die Messungen mit dem konventionellen System festgelegt: Zum einen wurde ein konventioneller Sensor gewählt, der vergleichbare Abmaße der Sendespule besitzt wie der eingesetzte magnetooptische Sensor. Zum anderen wurde ein konventioneller Sensor gewählt, der ein möglichst hohes laterales Auflösungsvermögen hat, also ein Spulensystem mit sehr kleinem Durchmesser besitzt. Die dabei eingesetzten Sensoren sind im Bild 71 dargestellt. Dabei besitzen die rechts und links neben dem magnetooptischen Sensor liegenden konventionellen Sensoren (K1 und K2) vergleichbare Abmaße wie der magnetooptische Sensor (MO) und der ganz links im Bild 71 liegende Sensor (K3) ist ein konventioneller Sensor mit hohem lateralem Auflösungsvermögen.

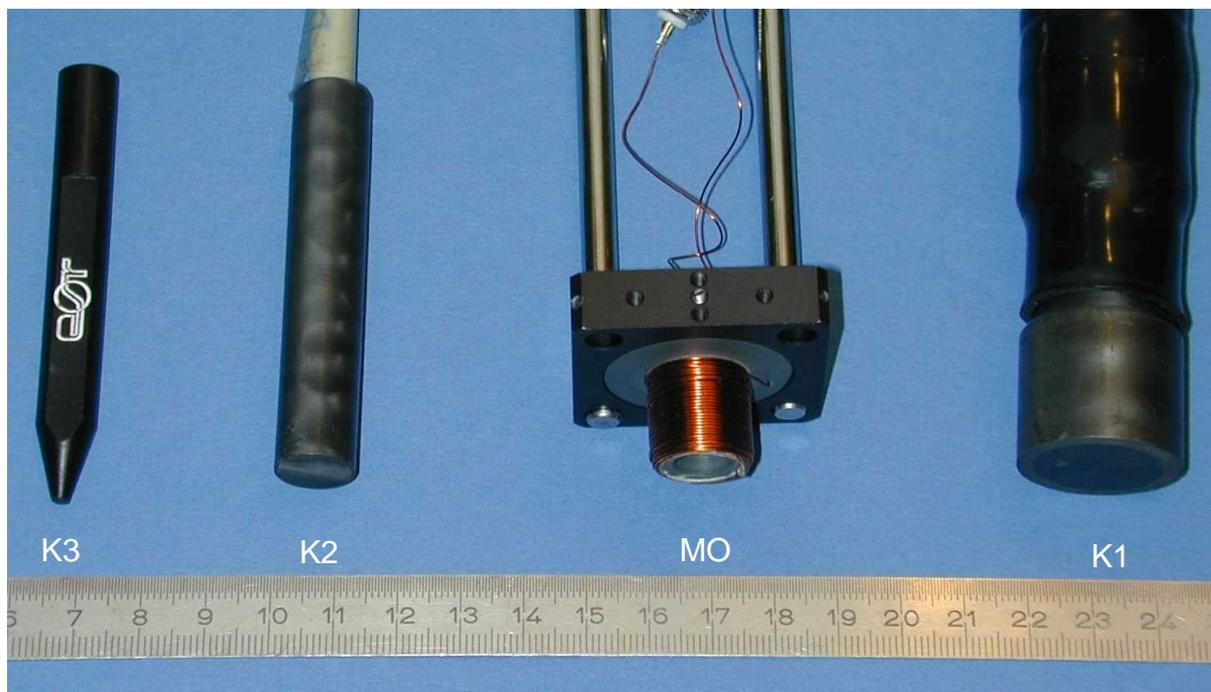


Bild 71: Eingesetzte Sensoren

Der Testkörper wurde zunächst mit dem konventionellen Sensor (K1), der vergleichbare Abmaße wie der magnetooptische Sensor besitzt, vermessen. Als Prüffrequenz wurde 1 kHz eingesetzt, welche auch bei der später folgenden Messung mit dem magnetooptischen System benutzt wurde. Ausgewertet wurde die Messung sowohl mit Hilfe einer Grauwertdarstellung (siehe Bild 72) als auch mittels eines Linienplots (Bild 73). Abgebildet ist jeweils die Amplitude der Empfangsspannung.

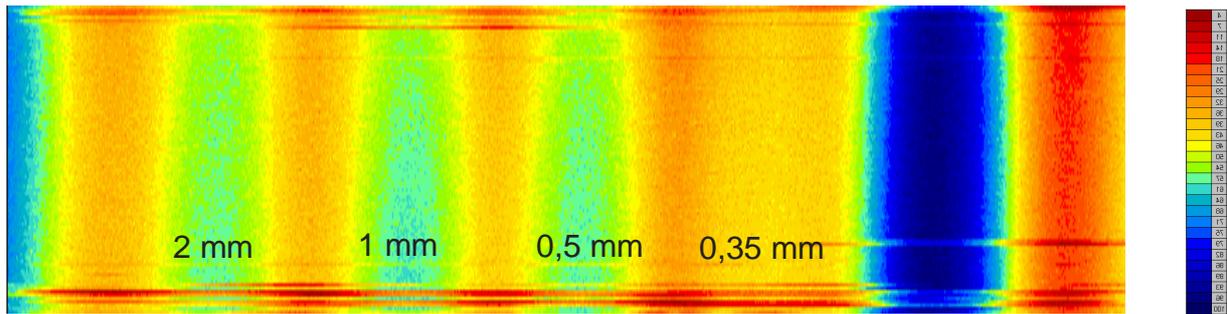


Bild 72: Falschfarbendarstellung des Messbefunds mit dem konventionellen System, Amplitudenauswertung, (Sensor K1, 1 kHz)

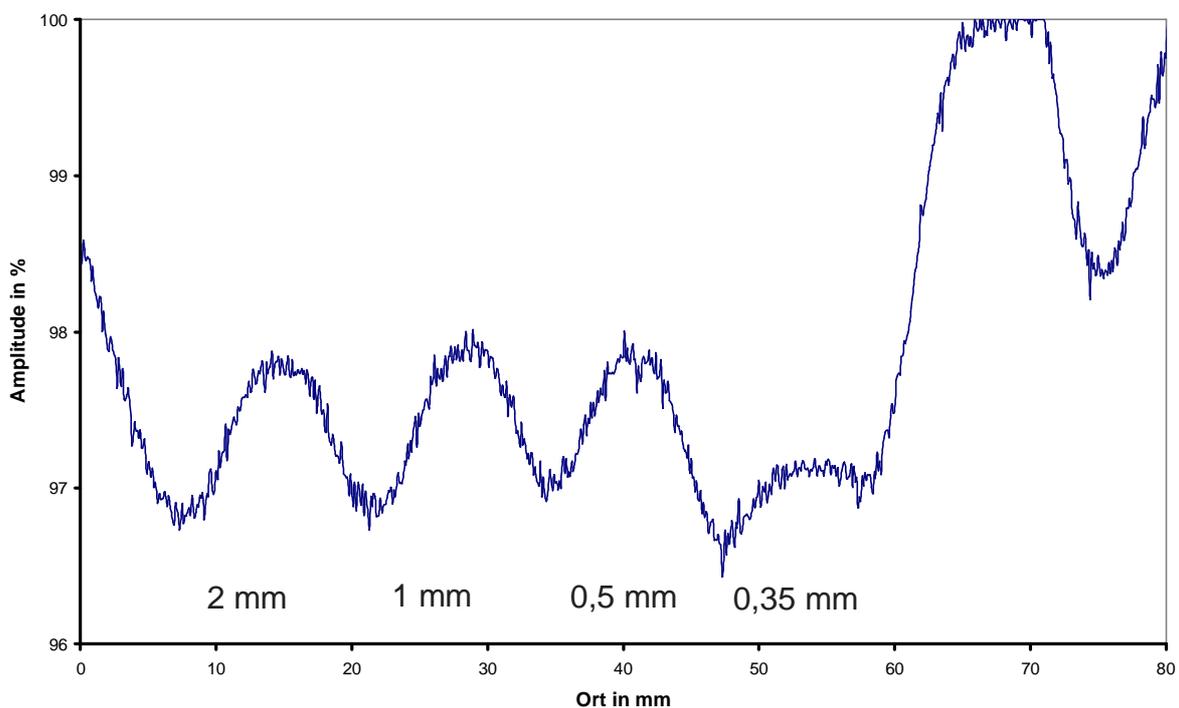


Bild 73: Linienplot des Messbefunds mit konventionellem System Amplitudenauswertung, (Sensortyp K1, 1 kHz)

Dargestellt ist jeweils die empfangene Amplitude, welche in Prozent angegeben ist. Dabei entspricht 100 % der größten aufgenommenen Empfangsspannung. In der Grauwertdarstellung erkennt man vier breite Streifen, welche von den ersten vier Nuten (2 mm, 1 mm, 0,5 mm und 0,35 mm) stammen. Die dann folgenden dicht nebeneinander liegenden Nuten werden zwar als Materialfehler angezeigt, können jedoch nicht mehr unterschieden werden. Das laterale Auflösungsvermögen ist also zu gering. Im Fall des Linienplots sind ebenfalls die vier Nuten und die dicht neben-

einander liegenden Nuten an den Maxima zu erkennen, jedoch ist auch hier eine Unterscheidung der dicht nebeneinander liegenden Nuten nicht möglich. Zusätzlich sind in der Grauwertdarstellung waagerechte Streifen zu erkennen, welche durch Berührung des Sensors mit der Probe stammen können. Um eine hohe Messempfindlichkeit zu erreichen wurde ein minimaler Abstand von ca. 0,1 mm zwischen Sensor und Probenoberfläche gewählt. Bei dem großen Durchmesser des Sensors kann es, wenn der Sensor nicht exakt parallel zur Probenoberfläche ausgerichtet ist, zu Berührungen zwischen Sensor und Bauteil kommen, die dann eine Verfälschung der Messwerte verursachen.

Als Anregungsfrequenz für die Untersuchung mit dem hoch auflösenden konventionellen Sensor (K3) wurde eine Frequenz von 2 MHz, die eine Fokussierung der Wirbelströme und somit eine Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens bewirkt, eingesetzt. Ausgewertet wurde hierbei die an der Empfangsspule gemessene Spannung. Diese ist im Bild 74 in Form einer Grauwertdarstellung und Bild 75 in Form eines Linienplots abgebildet.

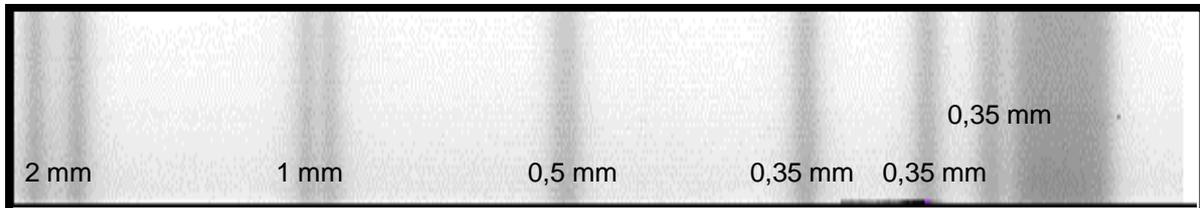


Bild 74: Falschfarbendarstellung des Messergebnisses mit dem konventionellen System, Amplitudenauswertung, (Sensortyp K3, 2 MHz)

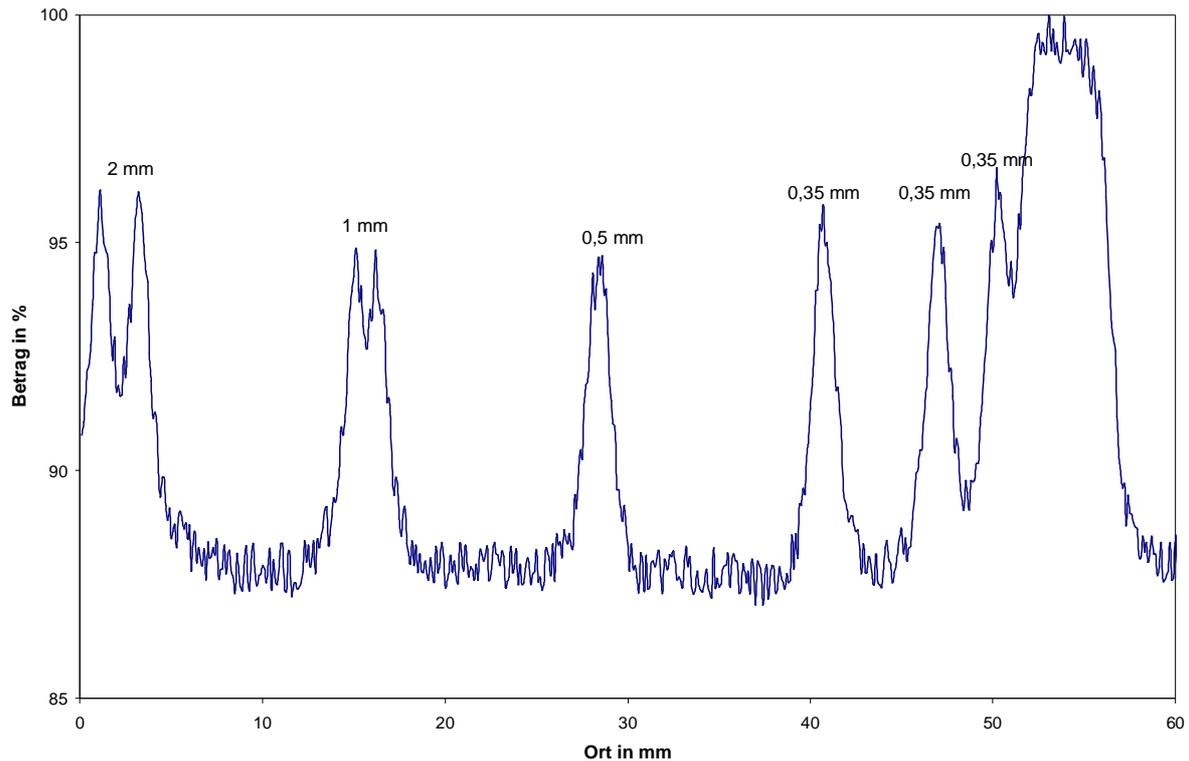


Bild 75: Linienplot des Messbefunds mit konventionellem System  
Amplitudenauswertung, (Sensortyp K3, 2 MHz)

Die Lage der einzelnen Nuten ist in beiden Befunden deutlich zu erkennen. Dabei entspricht die linke Linie der Nut mit einer Breite von 2 mm und der schwarze Bereich rechts im Bild gibt die dicht nebeneinander liegenden Nuten mit einer Breite von 0,35 mm wieder. Diese lassen sich mit diesem System ohne weitere Datenverarbeitung nicht auflösen. Das laterale Auflösungsvermögen reicht somit nicht zur Trennung der eng benachbarten Nuten aus. Im Vergleich zum Sensortyp K1 liegt jedoch eine wesentlich höhere laterale Auflösung vor.

### Messungen mit dem System mit Fotodiode

Der oben beschriebene und mit dem konventionellen Verfahren vermessene Probekörper wurde nun mit dem magneto-optischen System mit integrierter Fotodiode erneut vermessen.

Hierzu wurde zunächst dieselbe Sendespule sowie eine Anregungsfrequenz von 1 kHz, wie zuvor bei der Funktionsüberprüfung, eingesetzt. Bild 76 zeigt den erhaltenen Messbefund.

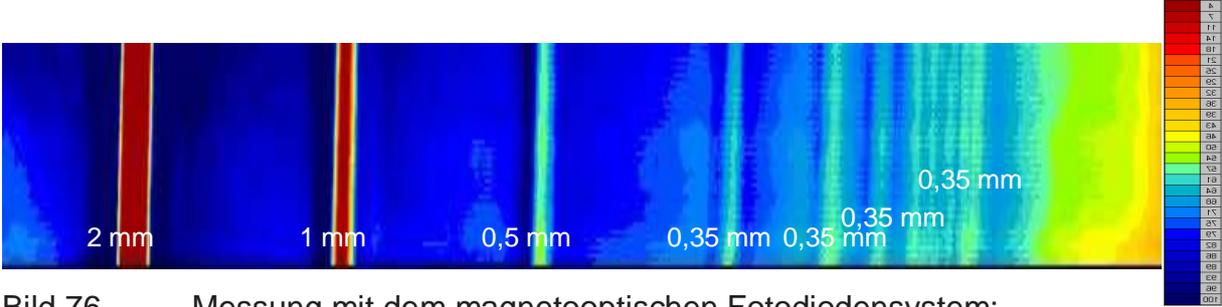


Bild 76 Messung mit dem magnetooptischen Fotodiodensystem; Amplitudenauswertung

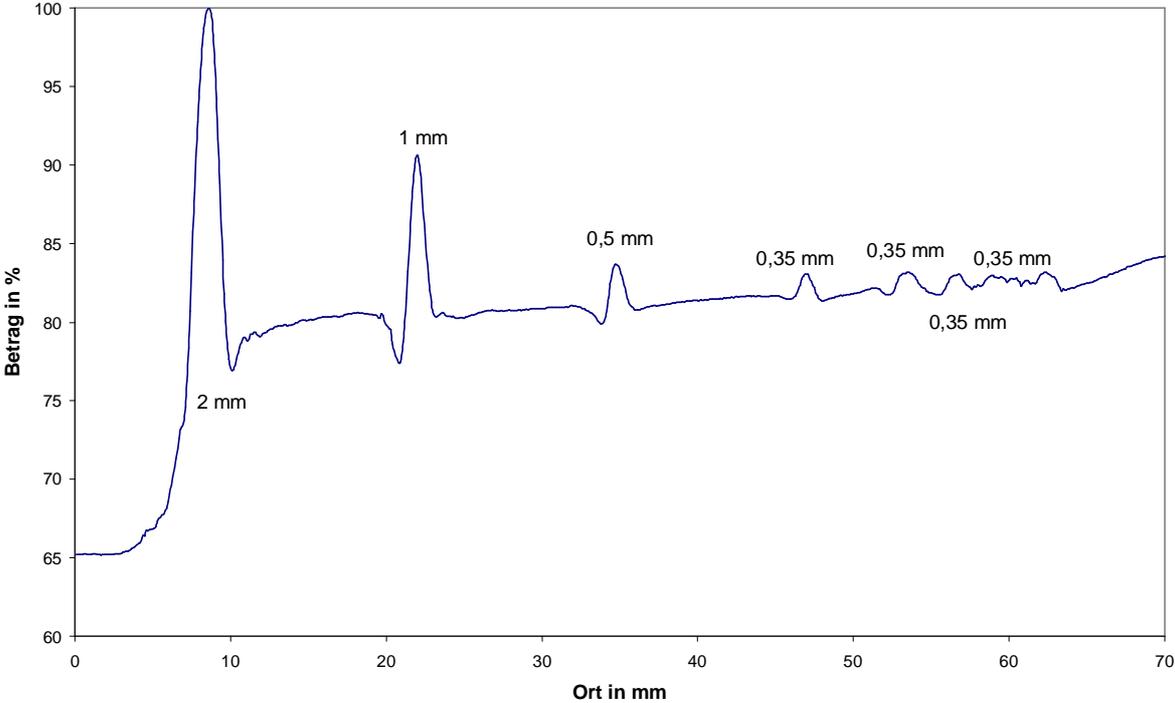


Bild 77 Linienplot der Messung mit dem magnetooptischen Fotodiodensystem Amplitudenauswertung

Im Fall der Messung mit dem magnetooptischen System sind auch die eng nebeneinander liegenden Nuten – rechts in den Bildern – deutlich zu erkennen.

Die Messung zeigt, dass mit dem magnetooptischen System mit Fotodiode ein wesentlich höheres laterales Auflösungsvermögen vorliegt.

Bei den bisherigen Messungen mit dem magnetooptischen Fotodiodensystem wurde immer mit einem aufgeweiteten Laserstrahl, der die gesamte Spulenfläche ausleuchtet, gearbeitet. Der Laser ermöglicht es jedoch auch mit einem wesentlich kleineren Strahl, der mittig innerhalb der Sendespule fokussiert wird, zu arbeiten. Hierzu wurde der Testkörper einmal wie zuvor mit aufgeweitetem Laserstrahl und einmal mit fokussiertem Strahl vermessen. Für diese Untersuchung wurden nur die Nuten ab 0,5 mm und kleiner, die eng zusammen liegen, vermessen. Des Weiteren wurde der Abstand zwischen Sensor und Testkörper von 0,2 mm auf 0,5 mm erhöht, um so den Abstandseffekt beurteilen zu können.



Amplitudenauswertung: Laserstrahldurchmesser: oben: 5 mm; unten: 0,5 mm



Phasenauswertung: Laserstrahldurchmesser: oben: 5 mm; unten: 0,5 mm

Bild 78: Einfluss des Laserstrahldurchmessers

Sowohl bei der Amplituden- als auch bei der Phasenauswertung ist das laterale Auflösungsvermögen im Falle des kleineren Laserdurchmessers besser als beim aufgeweiteten Laserstrahl. Der im Bild 76 gezeigte Befund ist auf Grund des geringeren Abstands zwischen Sensor und Bauteil genauer als die hier präsentierten Messungen. Die Messungen mit den unterschiedlichen Laserstrahldurchmessern zeigen, dass sich die laterale Auflösung des magnetooptischen Sensors durch Variation des Laserdurchmessers einstellen lässt. So ist es möglich mit einem Sensor zunächst mit aufgeweitetem Strahl das Bauteil schnell zu vermessen und dann bei Bedarf, durch Fokussierung des Laserstrahls, einzelne Gebiete mit höherem latera-

lem Auflösungsvermögen zu vermessen. Hierzu wäre eine entsprechende Optik wie beispielsweise ein Zoom-Objektiv im Strahlengang des magneto-optischen Sensors notwendig.

### Messungen mit dem System mit integrierter CCD-Kamera

Für diese Untersuchungen wurde der gleiche Sensor und die gleichen Prüfparameter eingesetzt, wie zuvor bei der Detektion der Bohrungen. Somit konnte auch bei diesen Messungen auf eine Bildverarbeitung, wie Differenzbildung zweier Aufnahmen, verzichtet werden. Die zugehörigen Befunde sind im Bild 79 dargestellt. Auch hier wurde jeweils das nicht nachbearbeitete Online-Bild der Kamera benutzt.

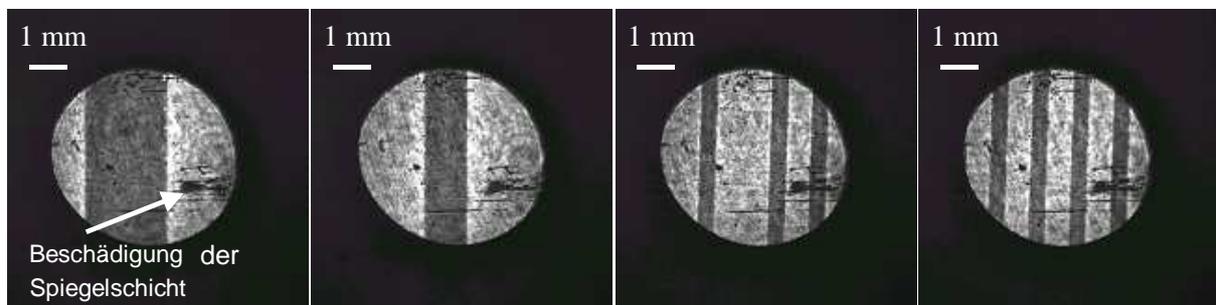


Bild 79: Messung der Nuten des ST37-Testkörpers

Alle Nuten des Probekörpers von 2 mm Breite bis zu 0,35 mm Breite sind deutlich zu erkennen. Bei den beiden letzten Messungen sind mehrere Nuten zu erkennen, die untereinander deutlich getrennt werden können. Diese Aussage ist mit einem konventionellen induktiven Sensor gleicher Abmaße nicht möglich, da er integral über die Fläche misst und so zwar den fehlerbehafteten Bereich erkennt, aber eine Separierung nach Lage und Anzahl der Nuten auf Grund des geringeren lateralen Auflösungsvermögens nicht erfolgen kann.

Die Untersuchungen insbesondere an dem Stahlkörper ergaben, dass das erstellte System zur exakten und schnellen Detektion von Materialfehlern geeignet ist. Im Gegensatz zum konventionellen Sensorsystem mit vergleichbar großer Sendespule, ist bei beiden Untersuchungen mit dem magneto-optischen System das laterale Auflösungsvermögen höher und erlaubt eine exaktere Beschreibung der Fehler.

### **5.3 Vergleich der Ergebnisse der magnetooptischen Systeme mit denen von konventionellen Systemen**

Insbesondere die Untersuchungen an dem letzten Probekörper mit den in unterschiedlichen Abständen eingebrachten Nuten ergaben, dass das laterale Auflösungsvermögen im Vergleich zu den konventionellen Wirbelstromprüfsystemen bei den magnetooptischen Systemen bei vergleichbarem Sensordurchmesser wesentlich höher ist. So besitzt der magnetooptische Sensor mit einem Durchmesser von ca. 7 mm das gleiche laterale Auflösungsvermögen wie ein hoch auflösender konventioneller Wirbelstromsensor mit einem Durchmesser von ca. 1 mm.

Ursache für die höhere Auflösung im Fall des Diodensystems im Vergleich zum konventionellen System können die verschiedenen Messbereiche sein, in denen das Magnetfeld gemessen wird. So ergaben die Simulationen zur Magnetfeldverteilung entlang der Symmetrieachse der Sendespule für unterschiedliche Prüfsituationen, wie sie im Kapitel 4.5 vorgestellt wurden, dass die Änderung des Magnetfelds an der Bauteiloberfläche maximal ist. Die Magnetfeldänderungen, die durch die Nuten verursacht werden, bewirken ebenfalls eine maximale Magnetfeldänderung an der Oberfläche des Probekörpers. Mit zunehmendem Abstand wird nun der durch die Nuten verursachte Einfluss auf das Magnetfeld immer geringer. Dieser Effekt ist in der Wirbelstromprüfung auch als Abstandseffekt bekannt. Im Fall der konventionellen Prüfung wird das Magnetfeld integral über das gesamte Volumen der Empfangsspule gemessen. Hier geht auch der Bereich mit ein, bei dem auf Grund des Abstandseffekts, die Magnetfeldänderungen, verursacht durch die Nuten, sehr gering ist. Bei dem magnetooptischen System hingegen wird nur direkt an der Oberfläche, die Schichtdicke beträgt nur einige  $\mu\text{m}$ , gemessen. Dadurch bewirken die Magnetfeldänderungen, verursacht durch die Nuten, wesentlich größere Messanzeigen als bei dem konventionellen System. Aus diesem Grund liegt bei dem magnetooptischen System ein höheres laterales Auflösungsvermögen vor als bei den konventionellen Systemen.

Weiterhin ermöglicht das Diodensystem durch Verringerung des Laserstrahldurchmessers bei gleich bleibender Sendespule eine Verbesserung des lateralen

Auflösungsvermögens, wie die Untersuchungen an den Stahlkörpern ergaben. Die Änderung des Durchmessers kann mit einem integrierten Zoom-Objektiv erfolgen. Dies würde es dann ermöglichen, einen Sensor mit einstellbarer und somit dem Prüfproblem angepasster Auflösung einzusetzen.

Eine Sonderstellung nimmt das magnetooptische System mit CCD-Kamera ein, das das höchste laterale Auflösungsvermögen erreichte. Die CCD-Kamera gibt die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule wieder. Dabei wird das laterale Auflösungsvermögen durch die eingesetzte Wellenlänge und durch das Auflösungsvermögen der CCD-Kamera bestimmt. Dabei gibt die Wellenlänge der eingesetzten Lichtquelle die theoretisch höchste Auflösung vor.

Der Vergleich der drei Systeme ergab, dass mit dem magnetooptischen Diodensystem eine Steigerung des Auflösungsvermögens im Vergleich zum konventionellen System erreicht wurde. Dabei liefert dieses System, wie die konventionellen Systeme, als Messgröße die Amplitude und Phase der Empfangsspannung und ist damit ähnlich Hand zu haben wie die konventionellen Systeme. D. h. nach entsprechender Anpassung der Sende- und Empfangssignale kann das magnetooptische Diodensystem direkt an eine Ansteuerungs- und Auswerteeinheit eines konventionellen Prüfsystems angeschlossen werden. Wenn ein noch höheres laterales Auflösungsvermögen notwendig ist, bietet sich das magnetooptische Kamerasystem an, welches das höchste laterale Auflösungsvermögen besitzt. Hierbei ist jedoch eine neue, speziell für dieses System angepasste Ansteuerungs- und Auswerteeinheit notwendig. Dieses neue System hat jedoch noch den Vorteil, dass die Wirbelstrombefunde online visualisiert werden, was eine Interpretation der Messbefunde wesentlich vereinfacht. Weiterhin kann die Dokumentation der Prüfung durch einfache Aufzeichnung der Kamerasignale erfolgen.

Die beiden magnetooptischen Systeme werden im Kapitel 6 an praxisnahen Untersuchungen weiter angepasst und optimiert.

Im Fall des Diodensystems, welches im Vergleich zum konventionellen ein höheres laterales Auflösungsvermögen besitzt, ist eine Anpassung des Sensors an konventi-

onelle Wirbelstrommesssysteme sinnvoll. Die Möglichkeiten zur Adaption dieses Systems an herkömmliche Prüfgeräte sowie die Integration der CS-Technik in das System wird im folgenden Kapitel 5.4 näher untersucht.

## 5.4 Integration der CS-Technik und Adaption an konventionelle Wirbelstromprüfsysteme

Bei den bisherigen Untersuchungen mit dem magnetooptischen Fotodiodensystem erfolgte die Auswertung des Empfangssignals nach Amplitude und Phase mit Hilfe eines Lock-In-Verstärkers. Dieser vergleicht das Empfangssignal mit dem Sendesignal, welches er in Form eines Referenzsignals vom PC erhält. Hierzu sucht er im Empfangssignal ein Signal mit der gleichen Frequenz wie das Referenzsignal und bestimmt die Amplitude und Phase dieses Signals im Vergleich zum Sendesignal. Dabei kann der Lock-In-Verstärker nur die Amplitude und Phase einer Frequenz, nämlich der des Referenzsignals, analysieren. Daher ist der Einsatz dieses Verstärkers auf die monofrequente Wirbelstromprüfung beschränkt. Der Vorteil des Lock-In-Verstärkers liegt bei der hohen Empfindlichkeit mit der dieses System arbeitet, welche hier bei den grundlegenden Untersuchungen von Vorteil ist.

Für einen praxisnahen Einsatz wäre es von Vorteil, wenn sich der Sensor wie ein kommerzieller Sensor an schon vorhandene Wirbelstromprüfeinheiten anschließen ließe. Weiterhin wäre der Einsatz der CS-Technik, welche mit einem Frequenzband arbeitet und sich daher mit der monofrequenten Auswertung des Lock-In-Verstärkers nicht kombinieren lässt, anstrebenswert, da so neben der hohen Auflösung des Systems auch eine Klassifizierung des Fehlers durch Einsatz der Kreuzkorrelation möglich wäre (siehe Kapitel 2.2).

Im Folgenden wird nun untersucht, wie sich der magnetooptische Fotodiodensensor in ein für konventionelle Sensoren optimiertes CS-Impulswirbelstromgerät integrieren lässt. Hierzu wurde der magnetooptische Fotodiodensensor wie ein konventioneller Sensor an das CS-Impulswirbelstromgerät angeschlossen. Der Versuchsaufbau ist im Bild 80 dargestellt.

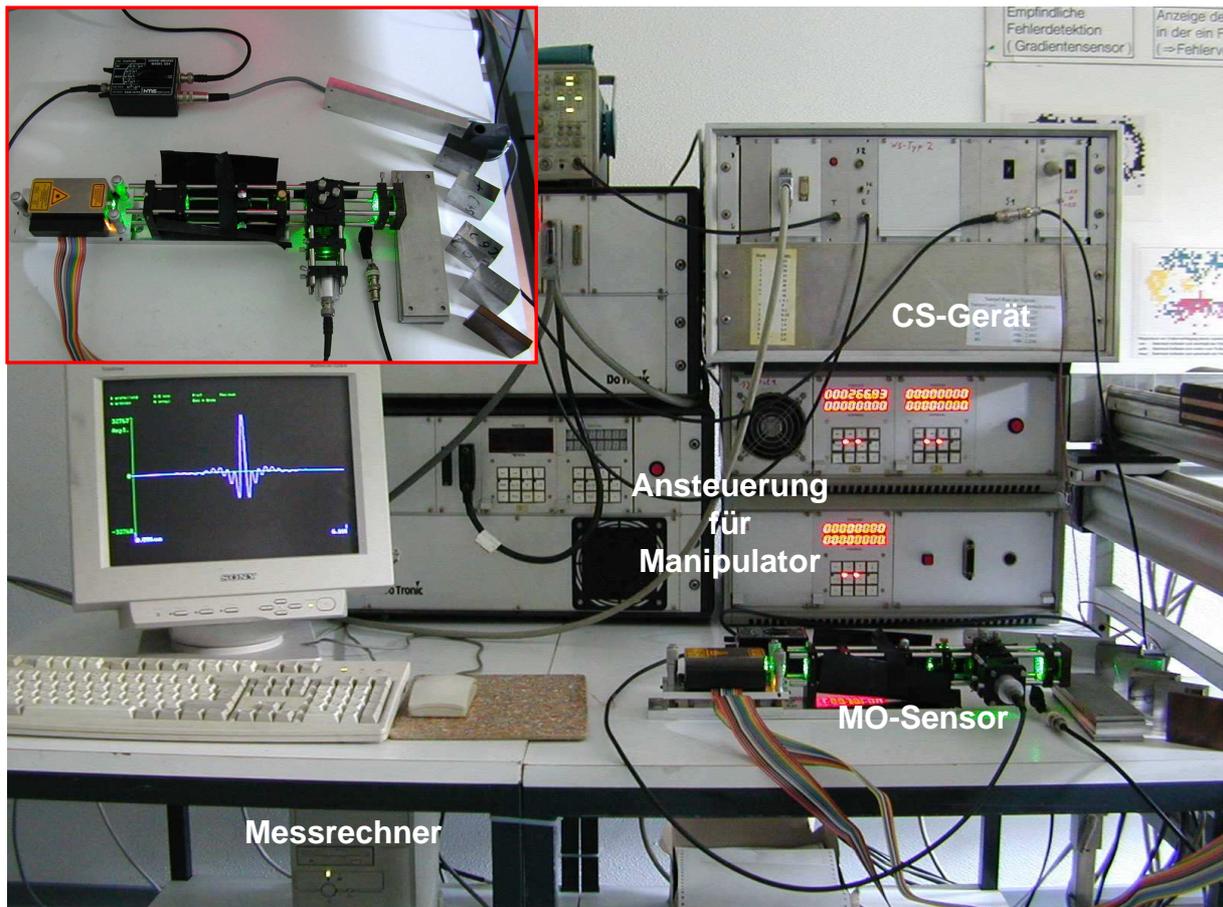


Bild 80: CS-Impulswirbelstromgerät mit magnetooptischem Fotodiodensystem

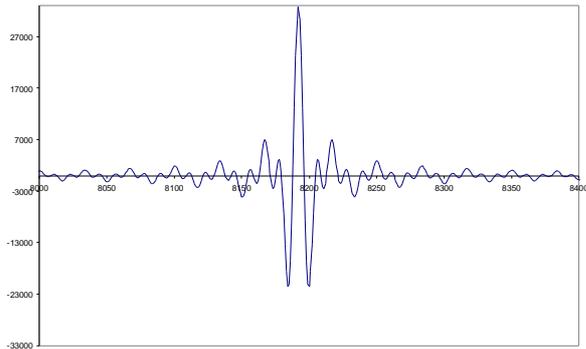
Links unten im Bild befindet sich der Messrechner, auf dessen Bildschirm ein CS-Sende-Impuls dargestellt ist. Dieser leitet das digital vorliegende Signal weiter zum CS-Gerät (oben rechts im Bild). Dort wird der Sendeimpuls in Abhängigkeit von der am Gerät gewählten Sendeverstärkung zur Sendespule des magnetooptischen Fotodiodensystems (unten rechts im Bild) geleitet. Der magnetooptische Sensor wurde nicht in den rechts zu erkennenden Manipulator eingesetzt, da die dort im Betrieb auftretenden mechanischen Schwingungen hohe Störsignale oder eine Dejustierung des experimentellen Aufbaus des magnetooptischen Fotodiodensystems verursachen können. Aus diesem Grund befand sich der Sensor, wie oben links im Bild separat abgebildet, auf einem Tisch. Im Bild sind die einzelnen Komponenten wie Laser, Sendespule und Fotodiode zu erkennen. Das von der Fotodiode aufgenommene Empfangssignal wird nun zurück an das CS-Gerät geleitet, wo es nach einem voreingestellten Verstärker digitalisiert und zurück an den PC geschickt wird, wo es dann abgespeichert wird.

Da der Manipulator auf Grund der mechanischen Schwingungen nicht zum Abscannen einer Probe eingesetzt werden konnte, wurde eine andere Messaufgabe, nämlich die Verwechslungsprüfung, gewählt.

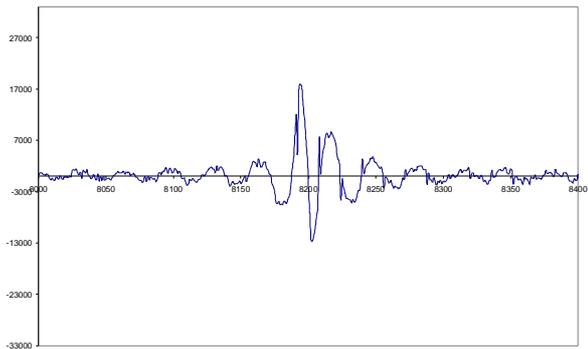
Hierzu wurden Werkstoffe mit unterschiedlichen Materialeigenschaften (elektrische Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität) nacheinander vor dem magnetooptischen Sensor positioniert, wobei pro Werkstoff drei Messungen mit der CS-Technik durchgeführt wurden. Durch Auswertung der Empfangssignale kann dabei auf die Werkstoffeigenschaften geschlossen werden. Die einzelnen Werkstoffe, sowie der Messaufbau, sind im Bild 80 oben links zu sehen.

Für die Messungen wurde ein CS-Impuls mit einem Frequenzbereich von 5 kHz bis 15 kHz generiert, welcher im nachfolgenden Bild 81 oben links abgebildet ist. Die im Bild 81 abgebildeten Signale sind alle in folgender Art dokumentiert: Auf der Ordinate ist die Empfangsspannung aufgetragen, wobei diese auf Grund der Digitalisierung nur Werte zwischen -32768 und +32767 annehmen kann. Ebenso ist die Zeitachse digitalisiert und kann Werte von 0 bis 16383 annehmen. Die Ordinate ist für alle Signale im Bild 81 von -32768 bis +32767 skaliert. Für die Abszisse wurde nur ein Bereich von 8000 bis 8400 gewählt, in dem sich der Impuls befindet. Durch diese einheitliche Skalierung lassen sich die Signale direkt vergleichen.

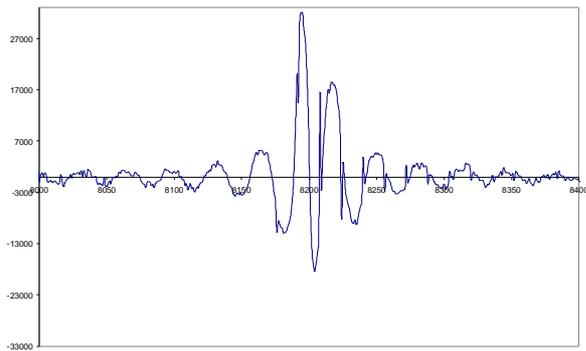
Rechts neben dem Sendesignal ist das Empfangssignal dargestellt, welches bei einer Messung ohne Bauteil, also an Luft, aufgenommen wurde. Im Vergleich zum Sendesignal hat es einen geänderten Verlauf. Diese Änderung stammt durch die Übertragungsfunktion der Spule und des magnetooptischen Sensors. In den folgenden Bildern sind nun die Signale abgebildet, welche beim Messen mit folgenden Materialien aufgenommen wurden: St37, St70, C45, C60, Aluminium und Kupfer.



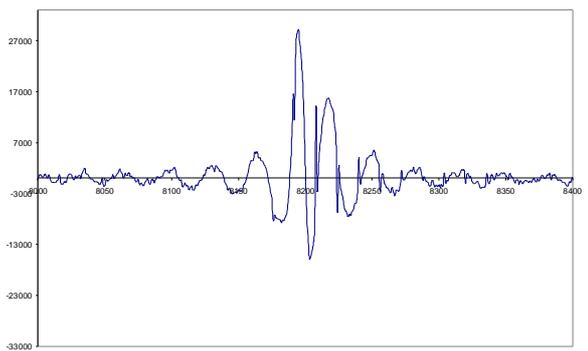
Sendesignal



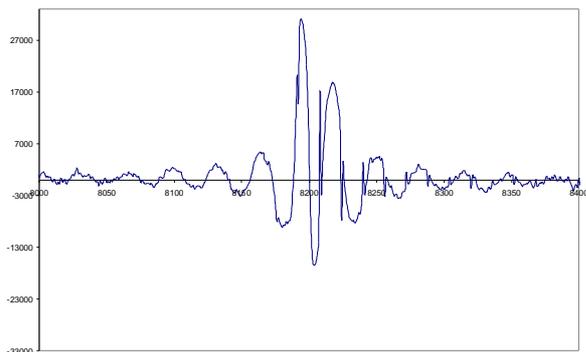
Luft



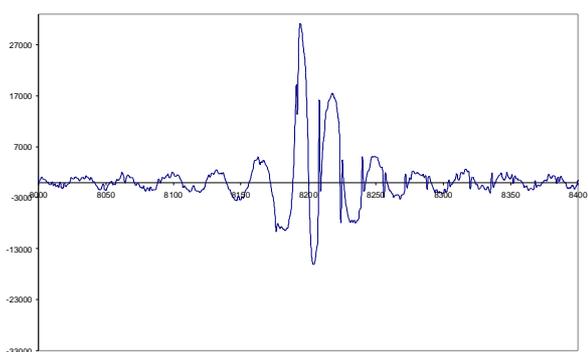
St37



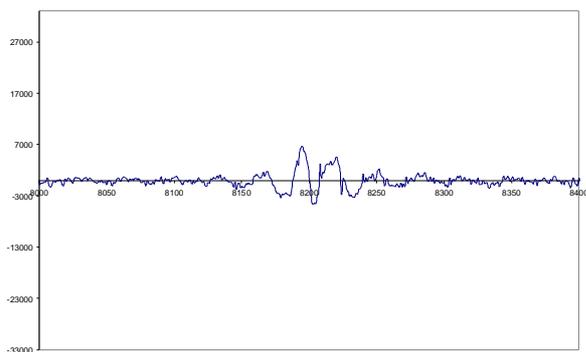
St70



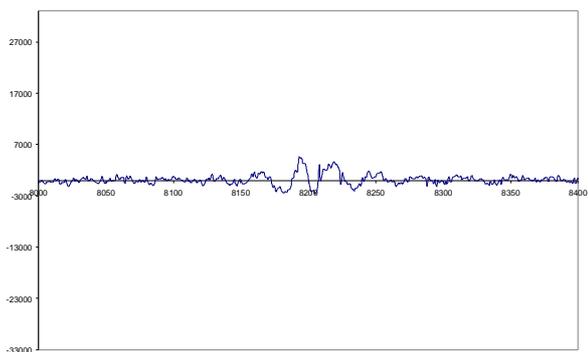
C45



C60



Aluminium



Kupfer

Bild 81: CS-Signale mit dem magnetooptischen Diodensystem

Beim Vergleich der einzelnen Signale erkennt man, dass die Amplitude bei den Stahlwerkstoffen ähnlich ist und über dem Wert bei der Messung an Luft liegt. Die Messungen an den nicht ferromagnetischen Materialien Aluminium und Kupfer hatten dagegen wesentlich geringere Amplituden. Die Amplituden für die einzelnen Messungen sind im Bild 82 zusammengefasst. Hier ist auf der Ordinate die Amplitude und auf der Abszisse die Nummer der Messung aufgetragen

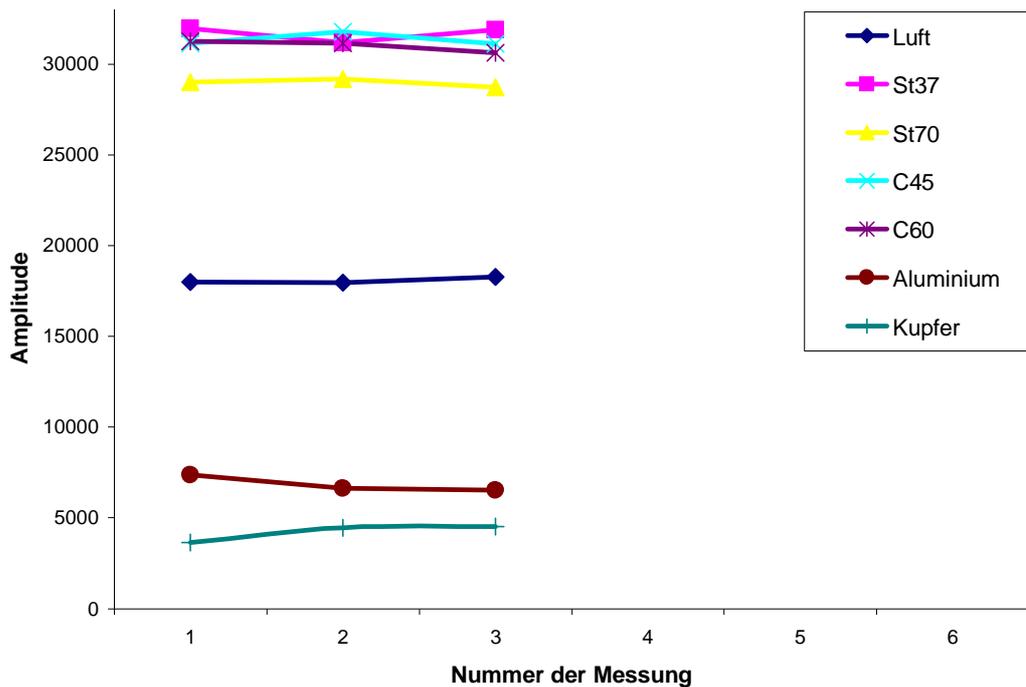


Bild 82: Verwechslungsprüfung mit dem CS-Magnetooptischen-Impuls-Wirbelstromprüfsystem

Die Auswertung der Amplitude zeigt, dass zwischen Stahl, Luft, Aluminium und Kupfer getrennt werden kann. Die einzelnen Stahlsorten konnten nicht getrennt werden. Dieses Ergebnis, kleine Amplituden für nicht ferromagnetische Materialien und hohe Amplituden für Stahl stimmen mit den Erfahrungen mit konventionellen Systemen überein. Auch bei konventionellen Systemen können die einzelnen Stahlsorten erst nach aufwendiger Oberwellenauswertung getrennt werden.

Die mit dem magnetooptischen Fotodiodensystem durchgeführte Verwechslungsprüfung zeigt, dass das magnetooptische Fotodiodensystem prinzipiell für die CS-

Technik geeignet ist. Die aufgenommenen Signale waren reproduzierbar und gaben die Messsituation korrekt wieder. Jedoch liegt bei den einzelnen Signalen ein Grundrauschen vor, welches dem eigentlichen Messsignal überlagert ist. So sind beispielsweise die neben dem Hauptimpuls liegenden Maxima verzerrt. Durch den Einsatz empfindlicherer Faraday-Rotatoren würde dieses Rauschen reduziert werden.

Durch die mechanischen Schwingungen des Manipulators konnten bei dieser Untersuchung keine Flächenscans durchgeführt werden. Eine Möglichkeit für die Integration des Sensors in solchen mechanisch schwingenden Manipulatoren ist der Einsatz von Glasfaserkabeln. Durch den Einsatz solcher Lichtleiter ist eine Entkopplung der Sendespule mit dem Faraday-Rotator von der Messeinheit, bestehend aus Strahlteiler, Optik und Fotodiode, möglich. Dadurch reduzieren sich die den mechanischen Schwingungen ausgesetzten Komponenten auf den eigentlichen Sensor (Sendespule und Faraday-Rotator). Die schwingungsempfindliche Messeinheit kann dann in einen schwingungsarmen Bereich, außerhalb des Manipulators, positioniert werden.

Da mit dem hier vorgestellten CS-Impulswirbelstromgerät auch kommerzielle Sensoren problemlos eingesetzt werden können und dieses System auch für das magnetooptische Fotodiodensystem erfolgreich angewandt wurde, ist der Rückschluss, dass der magnetooptische Fotodiodensensor prinzipiell auch in ein kommerzielles System erfolgreich eingesetzt werden kann, gerechtfertigt.

## **6 Messungen an realitätsnahen Materialfehlern**

Nach der Erprobung der beiden magnetooptischen Systeme an Modellfehlern werden nun beide Systeme zur Detektion von natürlichen, d. h. realitätsnahen Rissen, eingesetzt. Hierzu wurden für die beiden Systeme jeweils geeignete Prüfkörper ausgewählt. Für das Diodensystem, welches neben der hohen lateralen Auflösung auch die Möglichkeit besitzt das Auflösungsvermögen der Prüfaufgabe anzupassen, wurde eine Laserschweißnaht mit kleinen Defekten ausgewählt. Um das laterale Auflösungsvermögen mit fokussiertem Laserstrahl zu untersuchen, wurde ein weiterer Testkörper, in den ein feines Rissfeld eingebracht wurde, vermessen. Dieser Testkörper wurde dann mit dem CCD-Kamerasystem, welches die höchste laterale Auflösung besitzt, erneut untersucht. Mit dem CCD-Kamerasystem wurde nun versucht, einen natürlich entstandenen Riss mit sehr kleinen Abmaßen zu detektieren. Hierzu zählt die Zugprobe, in der, ausgehend von einem Anriss, durch Zugbelastung der Riss vergrößert wurde.

### **6.1 Messungen mit dem Diodensystem**

Die Vorteile des Diodensystems liegen zum einem in der hohen lateralen Auflösung auf Grund der geringen Messlänge von nur wenigen  $\mu\text{m}$  im Vergleich zu mm beim konventionellen Sensor und zum anderen in der Möglichkeit, das laterale Auflösungsvermögen durch Änderung des Laserstrahldurchmessers zu variieren. Eine praktische Anwendung, bei der unterschiedliche laterale Auflösungen sinnvoll sind, ist die Schweißnahtprüfung. Hier variiert je nach Schweißverfahren und Fügepartner die Breite der Naht und die Größe und Art der auftretenden Fehler. Hierzu wird im folgenden Kapitel die Einsatzmöglichkeit des Systems für Laserschweißnähte untersucht.

#### **6.1.1 Untersuchung an einer Laserschweißnaht**

Der für die Untersuchungen eingesetzte Probekörper ist im Bild 83 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 4 mm breit.

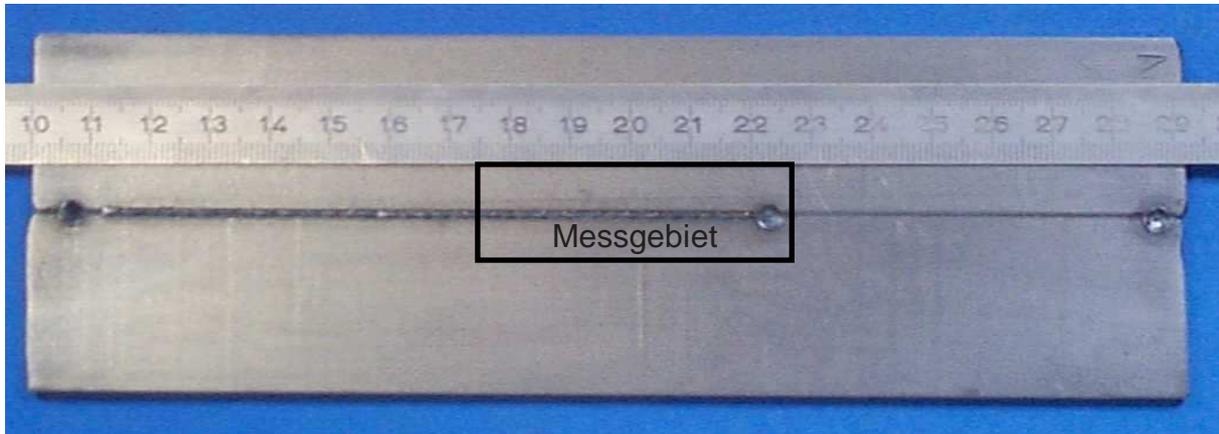


Bild 83: Probekörper mit Laserschweißnaht

Die Probe wurde mit Hilfe des Manipulators unter dem Sensor verfahren, dabei betrug der Messpunkt Abstand parallel und senkrecht zur Schweißnaht 0,2 mm. Das vermessene Gebiet betrug 50 mm mal 20 mm und als Anregungsfrequenz wurde eine Frequenz von 1 kHz eingesetzt. Bild 84 zeigt den Messbefund mit dem aufgeweiteten Strahl (Durchmesser: 5 mm) in Form einer Grauwertdarstellung.

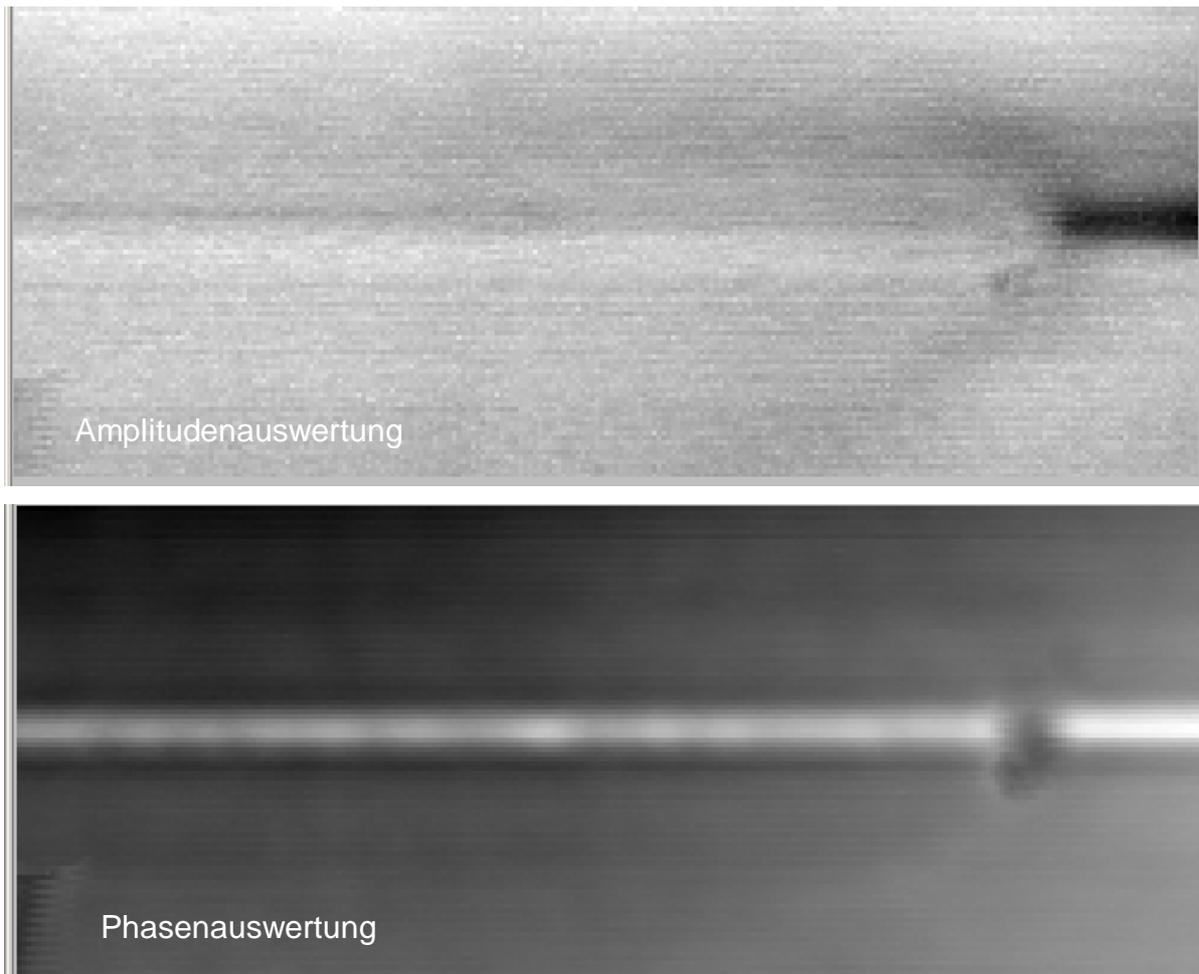


Bild 84: Messung mit aufgeweitetem Laserstrahl; Durchmesser: 5 mm

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 Phasenauswertung, sind im Bild 85 ebenfalls in einer Grauwertdarstellung abgebildet.

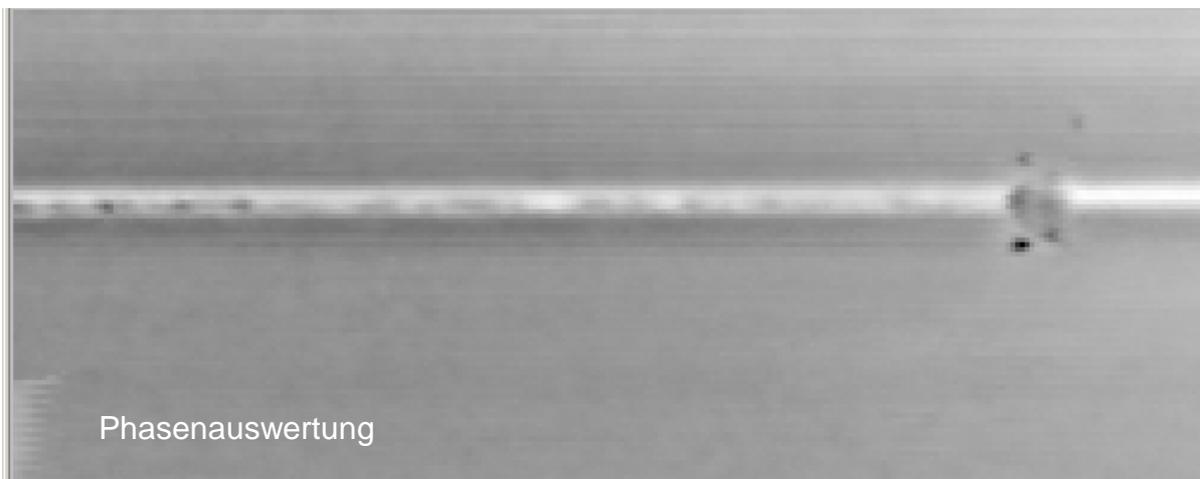
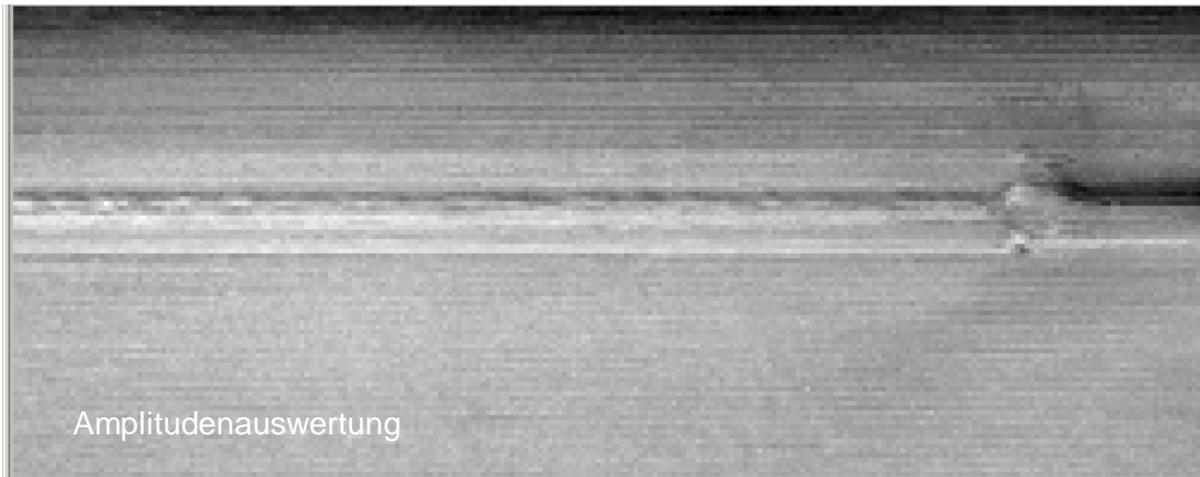


Bild 85: Messung mit fokussiertem Laserstrahl; Durchmesser: 0,5 mm

Im Gegensatz zur ersten Messung sind sowohl bei der Amplituden- als auch bei der Phasenauswertung wesentlich mehr Details der Naht zu erkennen.

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.

### 6.1.2 Untersuchungen an einem Rissfeld

Um das laterale Auflösungsvermögen der Systeme zu überprüfen, wurde ein Testkörper mit feinen Rissen ausgewählt, welche dicht nebeneinander liegen oder sich kreuzen. Der Testkörper Nr. 3 nach MTU, welcher zur Überprüfung von Prüfsystemen wie der Magnetpulverprüfung oder der Farbeindringprüfung eingesetzt wird, zeigt ein solches dichtes Rissfeld. Im Bild 86 ist ein Foto des Probekörpers abgebildet.



Bild 86: Testkörper Nr. 3 nach MTU (Stahlkörper mit Rissfeld)

An der ringförmigen Oberfläche des Körpers wurden unterschiedliche Risse (z.B. Schleifrisse, Spannungsrisskorrosion, ...) eingebracht.

Für die Messung wurde der Testkörper unter dem Sensor, der mit einer Frequenz von 1 kHz betrieben wurde, verfahren. Während der Messung betrug der Laserdurchmesser ca. 0,5 mm und war mittig in der Sendespule positioniert. Aufgenommen wurden mit Hilfe des Lock-In-Verstärkers die Amplitude und Phase des Empfangssignals. Im Bild 87 ist links die Amplitude und rechts die Phase in Form einer Grauwertdarstellung abgebildet.

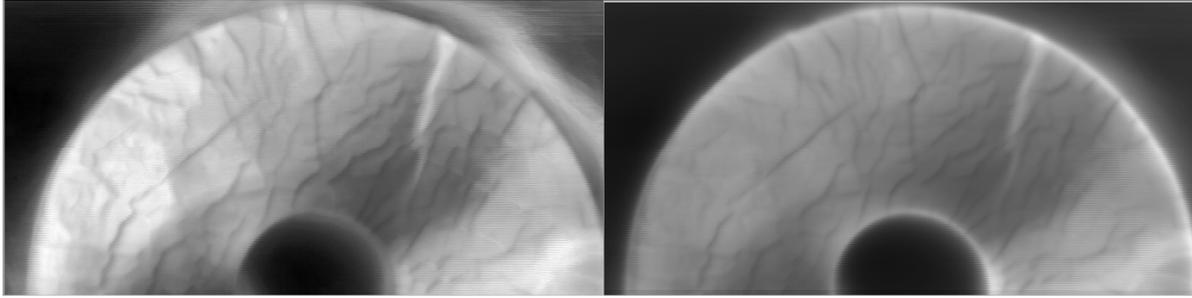


Bild 87: Auswertung des Empfangssignals (links: Amplitude; rechts: Phase)

Auch im nicht nachträglich bearbeiteten Amplituden- und Phasenbild ist der Testkörper mit seinem Rissfeld deutlich zu erkennen. Das laterale Auflösungsvermögen reicht also, um die feinen, eng zusammen liegenden Risse zu trennen. Die Untersuchungen an den Nuten mit Stahlkörper (siehe Kapitel 5.2) ergaben, dass das Kamerasystem die höchste laterale Auflösung besitzt. Aus diesem Grund wurde diese Untersuchung mit dem Kamerasystem wiederholt.

## 6.2 Messungen mit dem CCD-Kamerasystem

Schwerpunkt dieser Untersuchung ist es, das hohe Auflösungsvermögen zur exakten Beschreibung von Fehlern zu nutzen. Da die Magnetfeldinformation im Laserstrahl vorliegt, ist es möglich, mit Hilfe eines Mikroskopobjektivs, analog zum Lichtmikroskop, eine Vergrößerung zu realisieren. Diese Möglichkeit wird im Folgenden untersucht.

### 6.2.1 Untersuchungen an einem Rissfeld

Vermessen wurde, wie im Fall des Diodensystems, der Testkörper Nr. 3 nach MTU, welcher ein feines Rissfeld besitzt. Hierzu wurde der Testkörper unter dem Sensor positioniert und dabei das Kamerabild ausgewertet. Mit dem System wurden nun einzelne Bereiche untersucht, wovon in dem folgenden Bild 88 exemplarisch einige Befunde gezeigt werden.

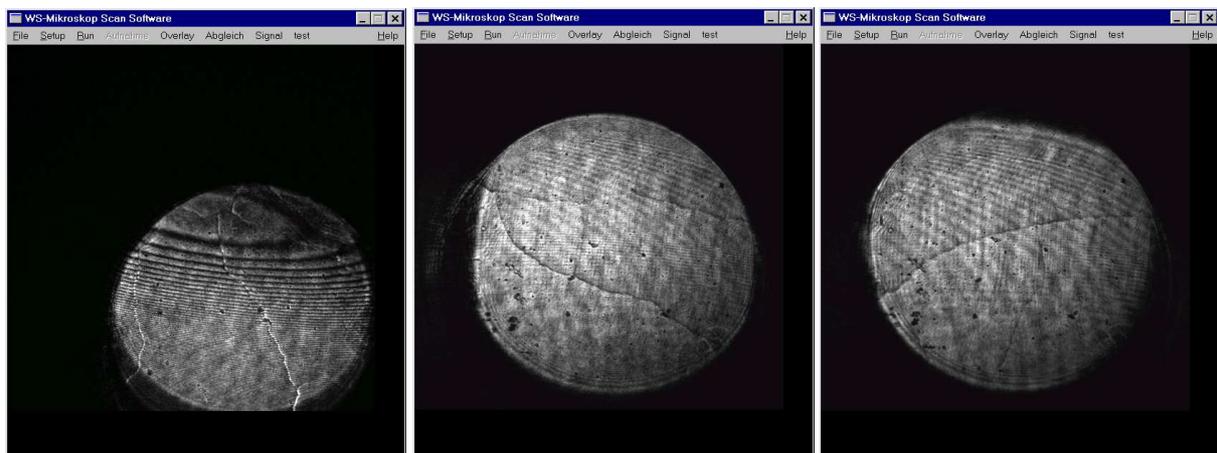


Bild 88: Befunde zum Stahlkalibrierkörper mit Rissfeld

Wie bei den Untersuchungen an Stahlkörpern mit Modellfehlern erfolgte keine Messdatenbearbeitung. Abgebildet sind also die reinen Kamerabilder. Für die Wirbelstromanregung wurde eine Frequenz von 16 kHz eingesetzt.

Die Befunde geben die Risse sowie deren Verlauf deutlich wieder. Weiterhin zeigen die Messungen, dass eine Vergrößerung, wie sie bei Lichtmikroskopen üblich ist, zur

exakten Untersuchung der Risse sinnvoll ist. Hierzu ist es notwendig, über das zu untersuchende Bauteil ein Lichtmikroskop zu installieren, welches das vom Faraday-Rotator reflektierte Licht vergrößert.

Für diese Untersuchungen wurden statt eines kommerziellen Mikroskopobjektivs zwei Linsen, eine als Objektiv in der Nähe des Sensors und eine als Okular vor der CCD-Kamera, eingesetzt. Um die damit erreichte Vergrößerung zu bestimmen, wurde ein Modellfehler mit einer Breite von 2 mm einmal mit Vergrößerungsoptik und einmal ohne vermessen. Hieraus ergab sich ein Vergrößerungsfaktor von 10. Mit diesem System wurde das Rissfeld erneut vermessen, wobei sowohl Aufnahmen mit als auch ohne Vergrößerung durchgeführt wurden (siehe Bild 89)

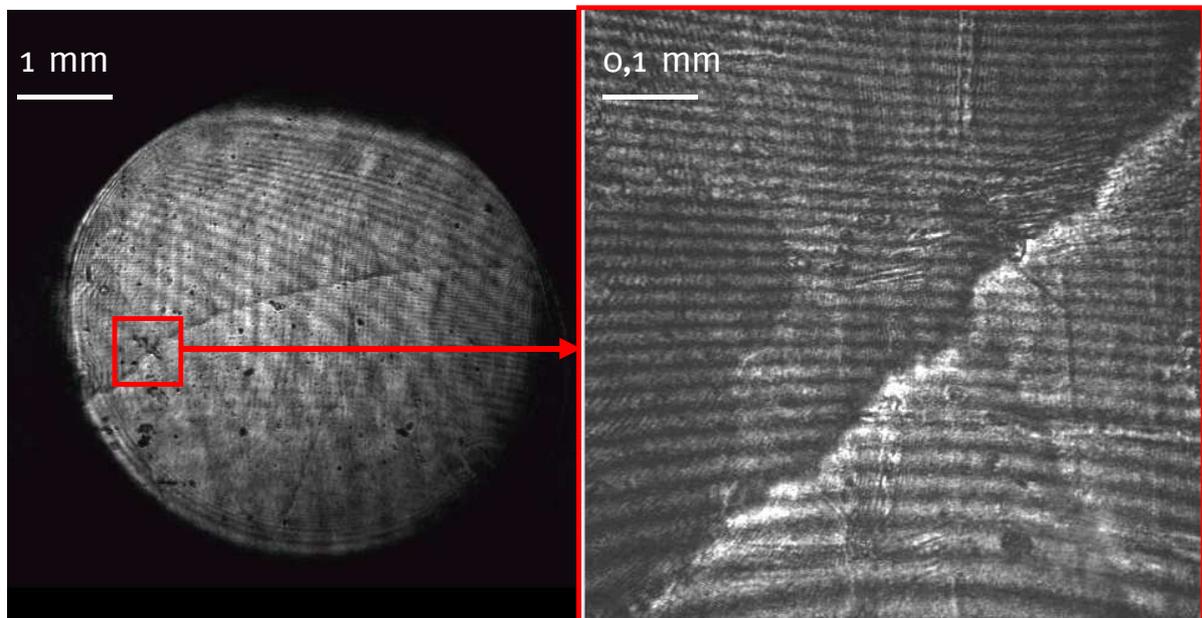


Bild 89: Vergrößerung des Risses (Vergrößerungsfaktor: 10)

Links im Bild ist der Messbefund ohne Vergrößerung, wie bei den vorherigen Messungen, abgebildet. Mit dem integrierten Objektiv und dem Okular ist eine Vergrößerung um den Faktor 10 realisiert worden. Die Aufnahme mit dem integrierten Mikroskop ist rechts abgebildet. Der Befund gibt einen Messbereich von ungefähr 1 mm<sup>2</sup> wieder und ist im linken Befund eingetragen. Die Mikroskopaufnahme gibt den Rissverlauf sowie die Abmaße des Risses deutlich wieder. Diese Messung zeigt, dass mit diesem System eine sinnvolle Vergrößerung eines Messgebietes möglich ist. In beiden Messbefunden sind Interferenzstreifen zu erkennen, die den Messbefund überlagern und das eigentliche Messsignal stören. Die Ursache für diese Interferenzen ist die Art des Aufbaus und die Fertigung der optischen Elemente. Als nächstes wird die Untersuchung einer Zugprobe betrachtet.

## 6.2.2 Untersuchungen an einer Zugprobe

Bei den Messungen am Rissfeld zeigte sich, dass mit dem Kamerasystem die einzelnen Risse auch mit einer 10fachen Vergrößerung untersucht werden konnten. Damit können nun auch einzelne Risse exakt vermessen werden. Diese Möglichkeit wird nun am Beispiel einer Zugprobe untersucht. Hierzu wurde in eine Zugprobe aus VA-Stahl mit Hilfe von Schwingungsbelastungen ein Riss eingeleitet, welcher dann mit dem konventionellen Wirbelstromprüfsystem und dem magnetooptischen Kamerasystem vermessen wurde. Der Messaufbau mit dem Kamerasystem ist im Bild 90 abgebildet.

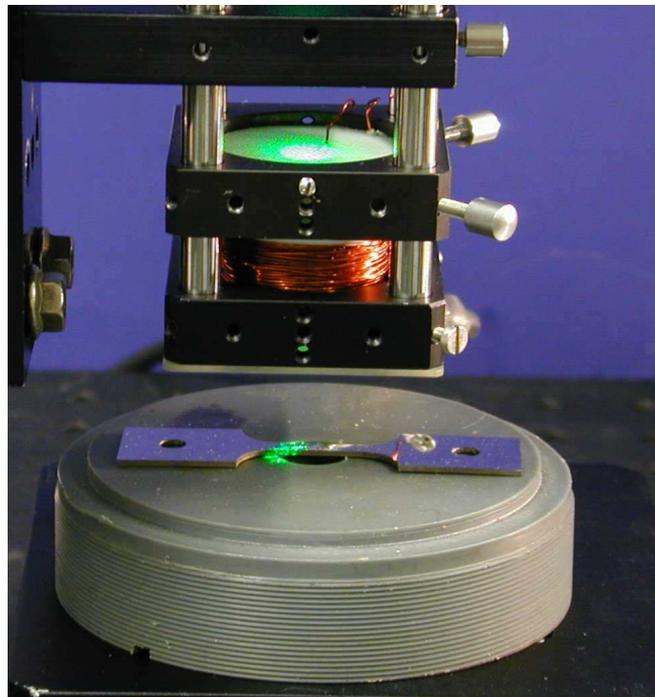


Bild 90: Vermessung einer Zugprobe mit Riss mittels magnetooptischem Kamerasystem

Unterhalb des Sensors befindet sich der magnetooptische Sensor. Zur Messung wurde die Zugprobe unterhalb des Sensors bewegt und mit Hilfe des Online-Kamerabilds wurde nun der Riss detektiert und dann das Kamerabild digital abgespeichert.

Die Messungen mit dem konventionellen System wurden mit dem Aufbau, welcher im Kapitel 2.3 beschrieben wurde, durchgeführt. Zur Messung wurde ein hoch auflösender konventioneller Sensor eingesetzt, der mit einer Anregungsfrequenz von 2 MHz betrieben wurde.

Im Bild 91 sind sowohl die Ergebnisse mit dem konventionellen System als auch mit dem magnetooptischen System abgebildet.

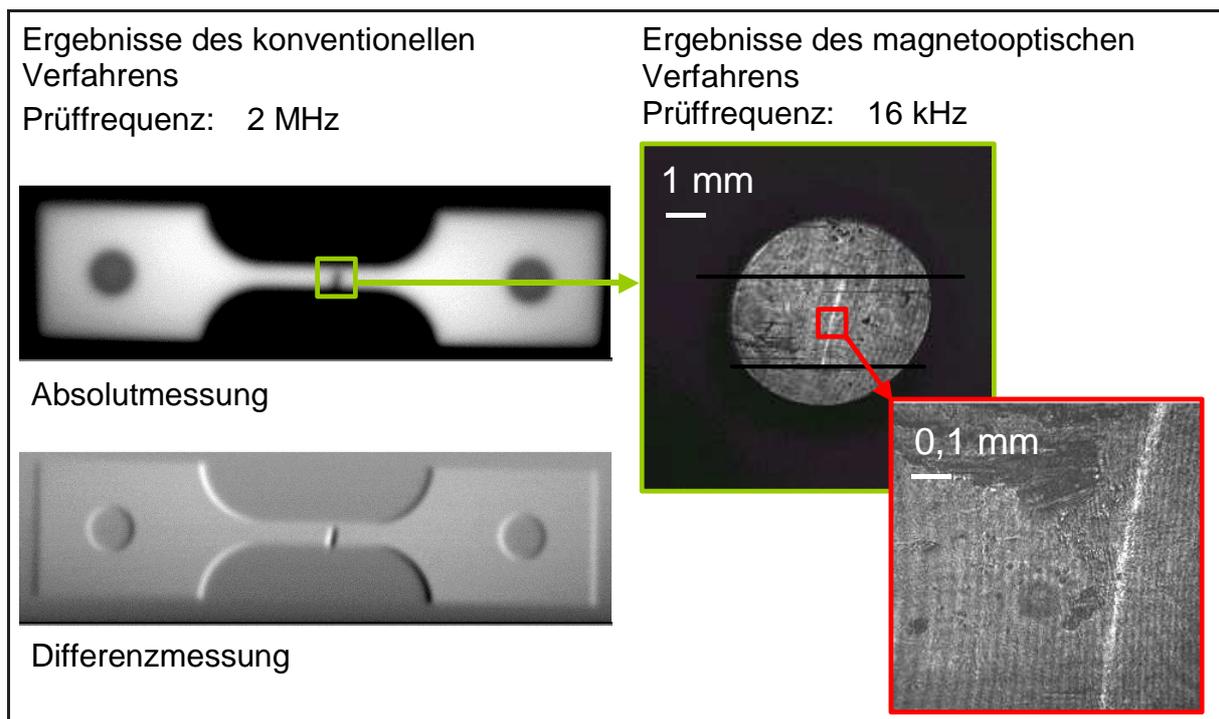


Bild 91: Vermessung einer Zugprobe mit Riss

Links im Bild sind zwei Befunde mit dem konventionellen System dargestellt. Dabei wurde im oberen Bild ein Absolutsensor und im unteren ein Differenzsensor jeweils mit einer Anregungsfrequenz von 2 MHz eingesetzt. Bei beiden Befunden ist der Riss in der Mitte der Zugprobe deutlich zu erkennen, wobei im Fall der Differenzmessung, bei der der Sensor optimal zur Fehlerlage ausgerichtet wurde, eine bessere Anzeige vorliegt.

Der Befund mit dem magnetooptischen System ist rechts abgebildet. Hierbei sind ebenfalls der Riss und sein Verlauf deutlich zu erkennen, wobei im Vergleich zur konventionellen Messung eine wesentlich höhere laterale Auflösung vorliegt. Dabei

ist das Auflösungsvermögen auch von der Auflösung der Kamera, welche 512 mal 512 Pixel beträgt, abhängig. Bei der Messung mit der 10 fachen Vergrößerung wurde ein Messfeld von 1 mm mal 1 mm abgebildet. Damit ergibt sich eine laterale Auflösung von 0,002 mm. Im Messbefund sind die Probenkanten mit schwarzen Linien eingezeichnet, da sie bei den für die Rissdetektion optimalen Prüfparametern (Belichtungszeit und –dauer) nicht mit im Messbefund angezeigt wurden. Zusätzlich wurde auch bei dieser Untersuchung zur genauen Beschreibung des Fehlers eine weitere Vermessung des Risses, jedoch mit einer 10fachen Vergrößerung, durchgeführt. Der entsprechende Befund ist ebenfalls im rechten Teil des Bild 91 dargestellt.

Beide Untersuchungen zeigen, dass auch realistische Fehler detektiert werden können, wobei insbesondere durch den Einsatz als Mikroskop, durch Integration eines Okulars und Objektivs, eine sehr genaue Darstellung des Fehlers möglich ist.

## 7 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Die Untersuchungen sowohl an den Probekörpern als auch an den realitätsnahen Materialfehlern zeigten, dass die magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme ein höheres laterales Auflösungsvermögen besitzen als herkömmliche konventionelle Prüfsysteme. Dies beruht zum einen darauf, dass der magnetooptische Sensor in einem sehr kleinen Bereich das Magnetfeld misst. Die Schichtdicke in der das Magnetfeld gemessen wird ist nur einige  $\mu\text{m}$  groß, und berücksichtigt so nur den für die Detektion von Materialfehlern relevanten Bereich, wie die Simulationen im Kapitel 4.5 zeigen. Zum anderen ermöglicht die Magnetfeldmessung mit Hilfe von Licht theoretisch Untersuchungen mit einem lateralen Auflösungsvermögen, welches in der Größenordnung der eingesetzten Wellenlänge liegt. Die Messungen mit dem magnetooptischen Kamerasystem an dem Rissfeld oder auch an der Zugprobe zeigen das hohe Potential dieses Systems für hoch auflösende Messungen. Dies wurde insbesondere durch die Messungen mit dem magnetooptischen Kamerasystem mit einem Vergrößerungsfaktor von 10 deutlich.

Neben der lateralen Auflösung ist auch die Magnetfeldempfindlichkeit des Sensors für die Wirbelstromprüfung entscheidend. Diese wurden wie im Kapitel 4.2 für die eingesetzten Sensoren vermessen. Die Empfindlichkeit verschiedener Magnetfeldsensoren sind im Bild 92 eingetragen. 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 neben einer höheren lateralen Auflösung auch eine höhere Empfindlichkeit für tief im Bauteil liegende Fehler.

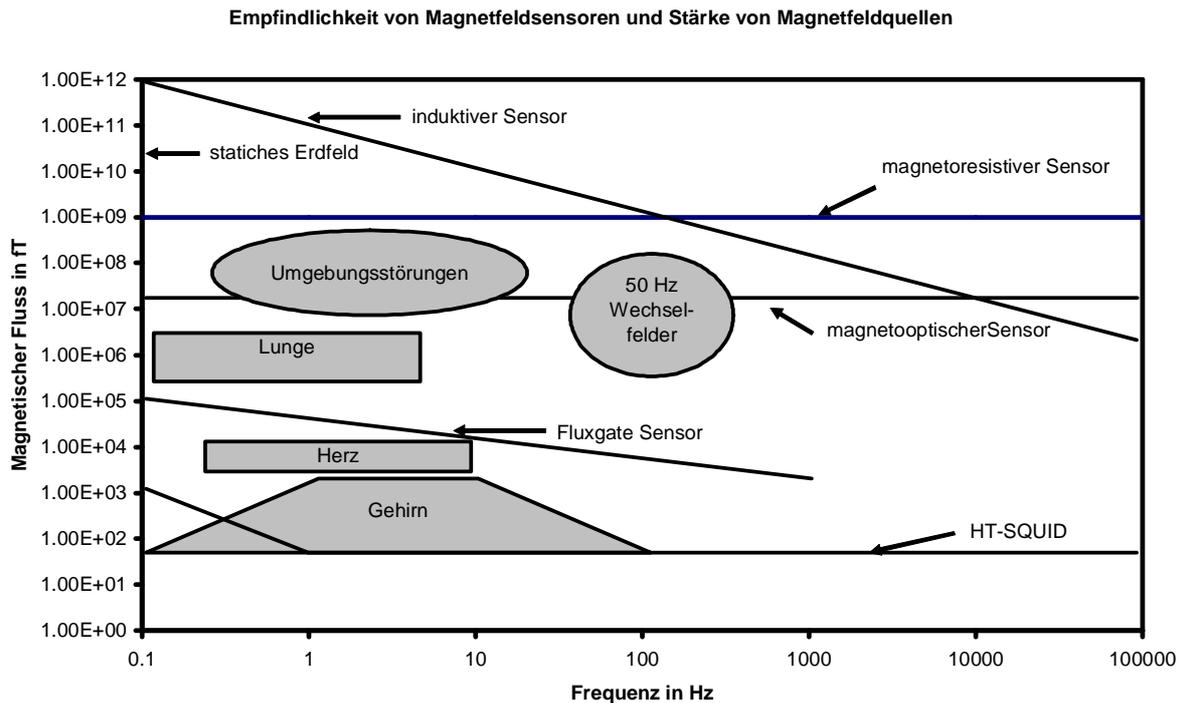


Bild 92: Empfindlichkeit von Magnetfeldsensoren in Abhängigkeit von der Prüffrequenz nach /88/ ergänzt mit den Daten des magnetooptischen Sensors

Die Untersuchungen mit den beiden magnetooptischen Systemen ergaben, dass diese Systeme besonders zur Prüfung von ferromagnetischen Werkstoffen geeignet sind. Dies liegt an der Tatsache, dass diese Materialien das anregende Magnetfeld verstärken und somit ein höheres Messsignal liefern als die nicht ferromagnetischen Werkstoffe, die eine Abschwächung des Magnetfelds bewirken. Trotzdem lassen sich, wie die Messungen an dem Kupfer- und Aluminiumtestkörper zeigen, auch nicht ferromagnetische Bauteile mit diesen Systemen untersuchen, wobei im Fall des Kamerasystems gegebenenfalls noch Bildverarbeitungsalgorithmen wie die Differenzbildung zweier Bilder, wie sie bei den Messungen an dem Kupfertestkörper eingesetzt wurde, notwendig sind. Eine andere Möglichkeit ist die Optimierung der Sendespule bezüglich ihrer erzeugten Magnetfeldstärke. So zeigte sich, dass mit einer optimierten Sendespule, wie sie in den abschließenden Untersuchungen an dem Rissfeld und der Zugprobe eingesetzt wurde, eine Detektion der Nuten auch ohne Differenzbildung zweier Messbefunde erfolgen kann. Eine weitere Möglichkeit

zur Steigerung der Empfindlichkeit der magnetooptischen Sensoren ist die Verbesserung der Faraday-Rotatoreigenschaften. So würde eine Erhöhung der Schichtdicke von jetzt ca. 5  $\mu\text{m}$  auf 50  $\mu\text{m}$  eine Steigerung der Empfindlichkeit um den Faktor 10 ergeben, da die Länge des Rotators linear in die Messgröße eingeht.

Auf Grund des hohen lateralen Auflösungsvermögens der magnetooptischen Systeme sowie der Möglichkeit, die Wirbelstrombefunde online zu visualisieren, ergeben sich interessante Anwendungsbereiche dieser Wirbelstromtechnologie.

Mit Hilfe des magnetooptischen Diodensystems könnten beispielsweise sicherheitsrelevante Bauteile aus dem Bereich der Luftfahrt geprüft werden, bei denen eine exakte Beschreibung der Fehlergeometrie und auch eine Unterscheidung zweier dicht nebeneinander liegender Risse notwendig sind. Hierzu könnte der Sensor an ein vorhandenes konventionelles Ansteuerungs- und Auswertesystem angepasst werden. Bezüglich der Handhabung sowie Auswertung der Messergebnisse würde sich dieser Sensor bis auf die höhere laterale Auflösung wie ein konventioneller Sensor verhalten.

Für das magnetooptische Kamerasystem ergeben sich ebenfalls Anwendungen, die bei der exakten Prüfung von Bauteilen liegen, wie sie bei sicherheitsrelevanten Bauteilen notwendig sind. Im Gegensatz zum Diodensystem sind hier jedoch höhere Kosten für die notwendige Belichtung und die CCD-Kamera zu erwarten. Weiterhin müsste gegebenenfalls das Bedienungspersonal neu geschult werden, da es sich bei diesem System um ein nicht gängiges und bekanntes Prüfsystem handelt. Da dieses System auch eine Vergrößerung einzelner Bereiche durch Integration eines Okulars und eines Objektivs ermöglicht, ist es denkbar, das Bauteil zuerst mit einer geringen Vergrößerung flächenhaft zu prüfen und kritische Bereiche nachträglich mit einer höheren Vergrößerung exakter zu untersuchen. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise ist eine schnellere Prüfung mit hohem lateralem Auflösungsvermögen als mit dem Dioden- oder konventionellen System möglich, dessen Auflösung auch von der Schrittweite des Manipulatorsystems und der Ansteuerungszeit abhängig ist.

Für einen derart praxisnahen Einsatz sind jedoch noch Ergänzungen der hier beschriebenen magnetooptischen Systeme notwendig. So zeigte sich, dass die Faraday-Rotatoren sehr kratzempfindlich sind. Da Beschädigungen der Schicht oder auch der Spiegelschicht einen starken Einfluss auf die Empfindlichkeit des Sensors haben, muss diese Schicht für einen praxisgerechten Einsatz entsprechend geschützt sein. Hierzu bietet sich beispielsweise das Aufbringen von Hartstoffschichten an. Eine andere Möglichkeit wäre, den Faraday-Rotator geschützt innerhalb der Sendespule zu positionieren. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass man die höchste Empfindlichkeit erhält, wenn sich der Sensor möglichst dicht an der Bauteiloberfläche befindet. Des Weiteren ist eine Erhöhung der Empfindlichkeit des Faraday-Rotators sinnvoll, da so der Abstandseffekt oder auch die nicht angepasste Sendespule ausgeglichen werden könnte. Hierzu bietet sich zunächst eine Erhöhung der Schichtdicke an.

Ein hohes Potential für die industrielle Einführung eines magnetooptischen Prüfsystems liegt insbesondere bei dem magnetooptischen Kamerasystem vor. Hierbei steht neben dem hohen lateralen Auflösungsvermögen die Visualisierung der Wirbelstrommessbefunde im Vordergrund. Durch die Visualisierung entfallen umfangreiche Auswertungen von Messdateien, da der Materialfehler direkt vermessen und klassifiziert werden kann. Weiterhin können schon bekannte Bildverarbeitungssysteme wie z. B. die Mustererkennung nachgeschaltet werden.

## 8 Zusammenfassung

In der modernen Konstruktion und Fertigung werden auch aus Gründen einer kostengünstigen Fertigung sicherheitsrelevante Bauteile mit einem Minimum an Rohstoff hergestellt. Dabei wird die Belastungsgrenze des Werkstoffs ausgenutzt, so dass auch kleine Materialfehler zum Versagen des Bauteils führen können. Bei diesen sicherheitsrelevanten Bauteilen ist eine sichere und hoch auflösende zerstörungsfreie Prüfung notwendig. Hierzu ist insbesondere zur oberflächennahen Prüfung von elektrisch leitfähigen Bauteilen das zerstörungsfreie Wirbelstromverfahren geeignet. Zur genauen Beschreibung von Materialfehlern sowie zur Unterscheidung eng benachbarter Fehler, die je nach Lage zueinander und Form unterschiedliche Auswirkung auf die Festigkeit haben, sind Wirbelstromprüfsysteme mit hohem lateralem Auflösungsvermögen notwendig.

In Rahmen der Arbeit wurde zunächst auf den Stand der Technik für den Bereich der zerstörungsfreien Wirbelstromprüfung eingegangen. Hier wurden neben dem der Wirbelstromprüfung zu Grunde liegenden physikalischen Prinzip insbesondere die Möglichkeiten zur Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens mit Hilfe der Signalanregung, der Messdatenauswertung sowie die Entwicklungen in der Sensorik analysiert.

Sie weisen auf Möglichkeiten zur Steigerung des lateralen Auflösungsvermögens von Wirbelstromprüfsystemen hin. Dabei zeigte sich, dass der magnetooptische Sensor, dessen Messprinzip auf dem Faraday-Effekt beruht, prinzipiell für Messungen mit hohem lateralem Auflösungsvermögen geeignet ist.

Zunächst wurden Simulationen zum magnetooptischen Sensor durchgeführt. An Hand der Ergebnisse wurden nun magnetooptische Sensoren erstellt. Diese wurden bezüglich der Sendespule als auch des Faraday-Rotators, welcher vom Partner IPHT Jena für die Wirbelstromprüfung optimiert wurden, weiter verbessert. Mit diesen Sensoren wurden anschließend magnetooptische Prüfsysteme erstellt. Zum einen wurde eine Fotodiode zur Aufnahme der Messinformation und zum anderen eine

CCD-Kamera, welche online die Magnetfeldverteilung innerhalb der Sendespule angibt, eingesetzt. Beide Systeme wurden anhand einer einfachen Prüfsituation erfolgreich auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft.

Nach dem Aufbau und der Funktionsüberprüfung der beiden erstellten Systeme wurden nun Modellfehler wie Bohrungen und Nuten in verschiedenen Materialien vermessen. Dabei zeigte sich, dass die magnetooptischen Systeme im Vergleich zu konventionellen Systemen ein wesentlich höheres laterales Auflösungsvermögen besitzen. Dieses lässt sich im Fall des Diodensystems durch Variation des Laserstrahldurchmessers dem Prüfproblem anpassen. Weiterhin wurde analysiert, wie sich diese Sensoren mit konventionellen Wirbelstromprüfgeräten, wie der CS-Impulswirbelstromtechnik, kombinieren lassen. Im Fall des magnetooptischen Kamerasystems wurde durch Integration eines Mikroskops in das Prüfsystem eine 10fache Vergrößerung des Messgebiets realisiert.

Mit diesen magnetooptischen Wirbelstromprüfsystemen wurden abschließend Messungen an realitätsnahen Materialfehlern durchgeführt. Hierzu wurden zum einen ein Rissfeld, eine Laserschweißnaht und zum anderen ein Riss in einer Zugprobe untersucht. Auch hier zeigte sich das hohe laterale Auflösungsvermögen der beiden magnetooptischen Wirbelstromprüfsysteme, wobei im Fall des Kamerasystems eine laterale Auflösung von bis zu 0,002 mm erreicht wurde.

## 9 Literaturverzeichnis

- /1/ DIN 54140, Teil 1: Induktive Verfahren (Wirbelstromverfahren), April 1976
- /2/ DIN 54140, Teil 2: Induktive Verfahren (Begriffe), März 1984
- /3/ DIN 54140, Teil 3: Induktive Verfahren (Darstellung und allgemeine Eigenschaften von Spulensystemen) , Januar 1989
- /4/ Küpfmüller, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 11. Auflage, Springer Verlag Berlin 1984, S.448, ISBN 3-540-12075-0
- /5/ Becker, R.: Über die Prüfung auf Fehler in metallischen Werkstoffen und Bauteilen mittels eines zerstörungsfreien Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Prüfverfahrens. Dissertation 1980, Saarbrücken
- /6/ Förster, F.: Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren. I. Das Tastspulenverfahren. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 43 (1952) S.163-171
- /7/ Förster, F.; Breitfeld, H.: Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren. II. Praktische Ergebnisse und industrielle Anwendung des Tastspulenverfahrens. Zeitschrift für Metallkunde Bd. 43 (1952) S.172-180
- /8/ Förster, F.; Stambke, K.: Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. III: Verfahren mit Durchlaufspule zur quantitativen zerstörungsfreien Werkstoffprüfung Zeitschrift für Metallkunde Bd. 45 (1954) S.166-179
- /9/ Förster, F.; Breitfeld, H.: Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren. IV: Praktische Wirbelstromgeräte mit Durchlaufspule zur quantitativen zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Zeitschrift für Metallkunde Bd. 45 (1954) S.188-187
- /10/ Förster, F.; Breitfeld, H.: Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren. V: Die quantitative Rissprüfung von metallischen Werkstoffen mit Durchlaufspule. Zeitschrift für Metallkunde Bd. 45 (1954) S.188-193
- /11/ Maaß, M.: Bestimmung von richtungsabhängigen Werkstoffeigenschaften und Rissverläufen mit dem Wirbelstromprüfverfahren, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik Nr. 912, ISBN 3-18-391208-2
- /12/ Betzhold K.; Becker R.: Mathematisch-numerisch und experimentelle Untersuchungen zur Wirbelstromprüfung. Materialprüfung 18,9,1976, S. 345-348

- /13/ Betzhold K.; Becker, R.: Grundlagen, Anwendungen und Prüfsystemoptimierung bei der Mehrfrequenzwirbelstromprüfung. FhG-Berichte 4-78, S. 17-23
- /14/ Becker, R.: Über die Prüfung auf Fehler in metallischen Werkstoffen und Bauteilen mittels eines zerstörungsfreien Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Prüfverfahrens. Dissertation 1980, Saarbrücken
- /15/ Thomas, H.-M.: Erzeugung sowie analoge und digitale Aufbereitung von Signalen zum Nachweis von Materialfehlern mit dem Impuls-Wirbelstromprüfverfahren. Material und Technik, März, 1981
- /16/ Thomas, H.-M.: Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstrom-Verfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung. Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, Juli 1986, Forschungsbericht 124, ISBN 3-88314-538-6
- /17/ Wittig, G.; Thomas, H.-M.; Maser, D. Wenke, H.: Untersuchungen zum Nachweis von Korrosionsschäden an austenitischen Komponenten mit dem Impuls-Wirbelstromverfahren. Materialprüfung 25 (1983) Nr. 12
- /18/ Wittig, G.; Thomas, H.-M.; Grigulewitsch, W.; Maser, D.: Untersuchungen zur Anwendung des Impulswirbelstromverfahrens für die zerstörungsfreie Prüfung von kerntechnischen Komponenten. Abschlußbericht für das Förderungsvorhaben RS 299, Forschungsprogramm Reaktorsicherheit 1980
- /19/ Crostack, H.-A., W. Oppermann, J. Nehring : Einsatz von Korrelationsimpulsen (CS-Technik) zur Wirbelstromprüfung. Materialprüfung 26 (1984), Nr. 1/2 S. 16-20
- /20/ Crostack, H.-A.: Verfahren und Vorrichtung für die Erzeugung von Wirbelstromfeldern. Offenlegungsschrift DE 3217519 A1
- /21/ Crostack, H.-A., J. Nehring : Untersuchungen zur Anwendung eines CS-Impulswirbelstromverfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung. Materialprüfung 25 (1983) Nr. 9. September,
- /22/ Nehring, J.: Untersuchungen zum Einsatz problemangepasster Prüfpulse (CS-Technik) bei der Wirbelstromprüfung. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe Nr.132, VDI-Verlag, Düsseldorf 1987, ISBN 3-18-143205-9
- /23/ Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik, 20. Auflage. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main 1983, ISBN 3-87144492-8
- /24/ Crostack, H.- A.; Bischoff, W.; Jahnel, W.; Maaß M.: Verbesserte Fehlerauflösung in thermischen Spritzschichten mit dem CS- Impulswirbelstromverfahren. Schweißen & Schneiden, DVS-Verlag, Düsseldorf, ISSN 0036-7184, 47 (1995) Heft 4, S. 278 – 287
- /25/ Crostack, H.-A.; Nehring, J.; Bischoff W.: Oberflächenrissprüfung ferritischer Brammen mittels problemangepasster Sendeimpulse (CS-Technik). Jahrestagung der DGZfP 1987, 25.-27.05. 1987, Lindau

- /26/ Maaß, M.; Crostack, H.-A.; Bischoff, W.; Nordhaus, B.: Verbesserung der Beschreibung von Fehler an beschichteten Bauteilen durch Einsatz eines CS-Impulswirbelstrom- Mikroskops. TS 1996, 6.- 8.3.1996, Essen
- /27/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.: Universität Dortmund, Maaß M.: Institut Dr. Förster, Dortmund: Auf den Dreh gekommen Fehlerbeschreibung mit der Drehfeld-Wirbelstromprüfung. Qualität und Zuverlässigkeit 8/2001 1057- 1061
- /28/ Mensching; Stegemann Innenrohrprüfung mit Wirbelstrom Materialprüfung 35 (1993) 6
- /29/ Bischoff, W.: Untersuchungen zum Nachweis von Wärmebehandlungszuständen geschmiedeter Bauteile durch Wirbelstromprüfung. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe Nr.349, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993, ISBN 3-18-334905-1
- /30/ N.N.: Residual stresses and hardening depth measurements: an on line approach to mechanical part 100% production testing . Sythesis Report for Publication. BRITE EURAM 4108-90, July 97
- /31/ Maaß, M.; Crostack, H.-A.; Bischoff, W.: Zerstörungsfreie Härtetiefenmessung an Stahlteilen aus der Automobilindustrie. VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik "Effizienzsteigerung durch innovative Werkstoffe", Werkstofftag 1995, Tagung Aachen, 15. u. 16.3.95, VDI-Berichte 1151, S.825-829, VDI-Verlag
- /32/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Maaß, M.; Bischoff, W.; Universität Dortmund: Kontrolle der Härtetiefe mit dem CS-Impulswirbelstromprüfsystem – Ein Prototyp für die online Prüfung in der Produktionslinie DGZfP Jahrestagung 1999 in Celle
- /33/ Haberäcker, P.: Digitale Bildverarbeitung. C. Hanser Verlag, München 1985, ISBN 3-446-14442-0
- /34/ Pavlidis, T.: Algorithms for Graphics and Image Processing, Computer Science Press, Rockville, 1982 , ISBN 0-914894-65-X
- /35/ Huang,T.S.: Picture Processing and Digital Filtering, 2<sup>nd</sup> edition, Springer Verlag, New York, 1979, ISBN 0-387-09339-7
- /36/ Tietze, M.: Computertechnik und Bildverarbeitung bei der Wirbelstromprüfung an Flugzeugen. Materialprüfung, bd.33 (1991), Heft 6, S. 162-165
- /37/ Thomas, H.-M.: Bildverarbeitung unterstützt Wirbelstromprüfung, Teil 1: Eine spezielle Tastsonde bewertet Oberflächenkorrosion quantitativ, Materialprüfung, 1992, Band 34, Heft 5, S. 135-138
- /38/ Jahnel W.: Untersuchungen zur Wirbelstromprüfung von metallischen Schutzschichten. Dissertation Universität Dortmund 1996

- /39/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Maaß, M.; Universität Dortmund; Mook G., Simonin J., Universität Magdeburg: Testkörper zur Einschätzung des Auflösungsvermögens von Wirbelstromsystemen. DGZfP Jahrestagung 1999 in Celle
- /40/ Bednorz J. G.; Müller, K.A.: Possible High-Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. Zeitschrift. Physik B, Condensed Matter 64, 1986
- /41/ Maaß, M.; Crostack, H.-A.; Bischoff, W.; Zielke, R., Universität Dortmund; Hinken J.; Klinger, M.; Bad Salzdetfurt Einsatz von Hochtemperatur-Supraleiter-SQUIDs als empfindliche Magnetfelddetektoren in Wirbelstromsensoren DGZfP Jahrestagung 1996 in Lindau
- /42/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Bischoff, W.; Maaß, M.; Universität Dortmund; J. Hinken, M. Klinger, Forschungsges. für Informationstechnik, Bad Salzdetfurt Entwicklung und Realisierung eines empfindlichen SQUID-Wirbelstrom-Prüfsystems. Wissenschaftliches Kolloquium "Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung" DGZfP Berichtsband 55, Dortmund (MTQ), 13.11.1996
- /43/ Maaß M.; Crosatck H.-A.; Bischoff W.: Hochtemperatur-SQUIDs als Wirbelstromdetektoren. Entwicklung neuer Sensoren für die Wirbelstromprüfung, Teil 1. Materialprüfung 38 (1996) 10, S. 431-434, Carl Hanser Verlag, München
- /44/ Black, R. C.; Wellstood, F. C.; Dantsker, E.; Milklich A. H.; Kingston, J. J.; Nemeth, D.T. Clark J.: Eddy current microscopy using a 77-K superconducting sensor. Appl. Phys. Lett. 64(1), 3.January 1994, American Institute of Physics
- /45/ Junger, M.: ZfP an Flugzeugen mit SQUID-Verfahren – Der Stand der Technik nach drei Jahren F&E. DGZfP-Jahrestagung 1998, 7.-9. September 1998, Bamberg, S. 423-425, ISBN 3-931381-23-4
- /46/ Fritzpatrick, Gerald L.: Imaging near surface flaws in ferromagnetic materials using magneto-optic detectors. Review of progress in quantitative non-destructive evaluation, La Jolla, California, July 1984
- /47/ Fritzpatrick, Gerald L.: Imaging near surface flaws in ferromagnetic materials using magneto-optic detectors. Review of progress in quantitative non-destructive evaluation, La Jolla, California, July 1984
- /48/ Fritzpatrick, Gerald L.: Verfahren und Anordnung zur Bestimmung von Rissen, Sprüngen, Blasen, Diskontinuitäten o. dgl. In einem nicht vormagnetisierten Target-Material Patentschrift DE 3423958 C2
- /49/ Fritzpatrick, Gerald L.: Flaw Imaging in ferrous and nonferrous materials using mangetooptic visualization. U.S. Patents 4,625,167 and No. 4,755,752, and associated forgein patents and other patents pending
- /50/ Hirsch, H., Koch, A.; Peier, D.: Faseroptische Stromwandler mit optisch analoger Messsignalübertragung; SENSOR 93 Kongreßband IV

- /51/ Harjes, B., Peier, D., Senftleben, H.: Faseroptische Strommessung in Energiekabeln für neuartige Schutzkonzepte; Elektrotechnische Zeitschrift Heft 19/1993, Seite 1190 – 1196
- /52/ Andrä, W.; Geier, K.-H.; Hergt, R.; Taubert, J.: Magnetooptik für die Materialcharakterisierung. Materialprüfung 36 (1994), Nr. 7-8, Carl Hanser Verlag, München
- /53/ Born M.: Optik. Ein Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie. Springer Verlag 1990; ISBN 3540059547
- /54/ Bergmann; Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 3 Optik, Walter de Gruyter, Berlin New York, 9. Auflage 1993 S. 536 – 549, S. 595 – 597, S. 598
- /55/ Gerthsen, Vogel: Physik. 19. Auflage, Springer, ISBN 3-540-62988-2, S. 552 – 553,
- /56/ Radtke, U.; Zielke, R.; Rademacher, H.-G.; Crostack, H.-A.; Universität Dortmund, Hergt, R.; IPHT Jena e.V Application of magneto-optical method for real-time visualisation of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing Optics and Lasers in Engineering 36 (2001) 251-268
- /57/ Radtke, U.; Crostack, H.-A.; Maaß, M.: Detection of eddy currents with a new laser supported eddy current sensor. European Symposium on Lasers and Optics in Manufacturing III 16 - 20 June 1997, Fairgrounds, Munich, FR Germany, Paper No.: 3098-42
- /58/ Maaß M.; Costack H.-A.; Radtke U.; Grafe A.: Laseroptische Wirbelstromsensoren – Entwicklung neuer Sensoren für die Wirbelstromprüfung, Teil 3; Materialprüfung 39 (1997) 11-12, S.477-482, Carl Hanser Verlag, München, ISSN 0025-5300
- /59/ Fritzpatrick, Gerald L.: Direct flux leakage imaging. Journal of nondestructive testing communications, Gordon & Breach (1985)
- /60/ Fritzpatrick, Gerald L.: Imaging near surface flaws in ferromagnetic materials, Eleventh World Conference on nondestructive testing, ASNT (1985)
- /61/ Fritzpatrick, Gerald L.: Flaw Imaging in nonferromagnetic conductors using magneto-optic detection methods. Final report, national science foundation grant number ECS-86-04228, 1989
- /62/ Fritzpatrick, Gerald L.: New magneto-optic/eddy-current inspection methods for aging Aircraft. Proceedings of the 1989 structural integrity program conference, San Antonio, TX, december 5-7, 1989. WRDC-TR-90-4051, p.608
- /63/ Fitzpatrick, C.L.; Thome, D.K.; Skaugset, R.L.; Shih, E.Y.C.: The present status of magneto-optic eddy current imaging technology. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 12, Plenum Press, New York, 1993

- /64/ Heptner H.; Stroppe H.: Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, VLN 152-915/77/73
- /65/ Palanisamy, R.; Lord, W.: Finite Element Analysis of Eddy Current Phenomena. Materials Evaluation / October 1980, S.39-43
- /66/ Ida, N.; Palanisamy, R.; Lord, W.: Eddy Current Probe Design Using Finite Element Analysis. Materials Evaluation / November 1983, Bd. 41, S.1389-1394
- /67/ Dodd, C.V.: Solutions to electromagnetic induction problems. Dissertation Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1967
- /68/ Dodd, C.V.; Deeds, W.E.: Analytical solutions to eddy current probe coil problems. Applied Physics 39, No. 6, 1968, pp. 2829-2838
- /69/ Dodd, C.V.; Deeds, W.E.; Luquire, J.W.: Integral solution to some eddy current problems. International Journal of NDT, Vol.1, 1969, S.29-90
- /70/ Kneubühl F. K.: Repitorium der Physik. B.G. Teubner Stuttgart, ISBN 3-519-23012-7
- /71/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Bischoff, W.; Maaß, M.; Hinken, J.; Klinger, M.: Entwicklung und Realisierung eines empfindlichen Wirbelstrom-Prüfsystems. Wissenschaftliches Kolloquium Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung. MTQ'96 Dortmund, 13.11.1996, DGZfP-Berichtsband 55, S.179-186, ISBN 3-931381-10-2
- /72/ Schott: Technische Informationen optisches Glas Nr. 17 1985
- /73/ Piller H.: Faraday-Rotation in Semiconductors and Semimetals. Vol. 8 1972, Eds. : R. K. Willardson and A. C. Beer
- /74/ Williams P. A.: Applied Optics, Vol. 30 Nr. 10, April 1990
- /75/ Porter C. S.; Spencer E. G.; LeCraw R. C.: Transparent Ferromagnetic Light Modulator using Yttrium Iron Garnet. Journal of Applied Physics, Vol. 29, Nr. 3, March 1958
- /76/ Hergt, R., Pfeiffer, H., Görnert, P., Wendt, M., Keszei, B., Wandlik, J.: Kinetic Segregation of Lead Impurities in Garnet LPE Films. Phys. stat. sol. (a) 104 (1987) 769
- /77/ Görnert, P., Simsa, Z., Simsova, J., Thomas, I., Hergt, R., Kub, J.: Growth and Properties of (Y,Pb)-(Fe,Co,Ti,Ga)-Garnet LPE Films. Phys. stat. sol. (a) 95 (1986) 613
- /78/ Scott G. B., Lacklison D. E.: Magneto optic Properties and Applications of Bismuth Substituted Iron Garnet. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag 12, Nr. 4, July 1976

- /79/ Jones R. C.: A New Calculus for the Treatment of Optical Systems. I ,II, III, Journal Opt. Soc. Am. 31, 1947
- /80/ Yarv A., Yeh P.: Optical Waves in Crystals. Propagation and Control of Laser Radiation. John Wiley & Sons, 1983
- /81/ Weiland, T.: Recent Advances and Applications of the MAFIA Codes. Computational Accelerator Physics, AIP Conference Proceedings 297, American Institute of Physics, 1994, pp.291-302
- /82/ Weiland, T.: Ein allgemeines Verfahren zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen und seine Anwendung in Physik und Technik. Physikalische Blätter, Vol. 41(1986), p. 380.
- /83/ Weiland, T.: Solving Maxwell's Equations in 3D and 2D by Means of MAFIA. Proc. of the Conference on Computing in Accelerator Physics (CAP), Los Alamos, Jan. 1990, LA-11857-C, pp. 3-26.
- /84/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Universität Dortmund; Oppermann, W.; Keller, H. P.; TÜV-Rheinland, Köln: Anwendung des Simulationsprogramms MAFIA zur Kalibrierung und Optimierung der Potentialsonden-Messtechnik für die Betriebsüberwachung insbesondere von Schweißnähten. DGZfP Jahrestagung 1998 in Bamberg
- /85/ Zielke, R.; Yaramis, S.; Crostack, H.-A.; Universität Dortmund, Keller, H. P.; TÜV Rheinland / Berlin-Brandenburg: Simulationen zum Potentialsondenverfahren mit dem Softwarepaket MAFIA, DGZfP Jahrestagung 2003 in Mainz
- /86/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Schoon, H.; Universität Dortmund, Lorenz, A.; Görnert, P.; Innovent Jena Magnetooptische Wirbelstromprüfsysteme DGZfP Jahrestagung 2003 in Mainz
- /87/ Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Schoon, H.; Universität Dortmund, Hergt, R.; IPHT Jena: Erprobung magnetooptischer Sensoren für die Wirbelstromprüfung DGZfP Jahrestagung 2002 in Weimar
- /88/ Wagner, R.; Bousack, H.: Hochempfindliche SQUID-Gradiometer zur Messung biomagnetischer Signale und für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Informationsblatt des Forschungszentrums Jülich GmbH 1995

## 10 Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name: Reiner Zielke  
Geburtsdatum: 16.02.1965  
Geburtsort: Dortmund  
Familienstand: verheiratet, 2 Kinder  
E-Mail: Reiner.Zielke@gmx.de

### Schulbildung:

1971 - 1975 Grundschule Reichshofschule in Dortmund  
1975 - 1976 Hauptschule Am Westheck in Dortmund  
1976 - 1986 Geschwister-Scholl-Gymnasium der Stadt Dortmund  
Abschluss: Abitur

### Wehrdienst:

01.07.1986 - 30.09.1987 Als Flugabwehrradarkanonier bei der  
Heeresflugabwehrschule in Rendsburg  
Dienstgrad: Obergefreiter

### Universitätsausbildung:

01.10.1987 - 31.08.1994 Studium Physik an der Universität Dortmund  
Studienschwerpunkte: Festkörperphysik,  
Elektronik, Teilchendetektoren und Werkstoffe  
Hauptdiplom-Gesamturteil: sehr gut

### Berufstätigkeit:

01.09.1994 - 31.10.1995 Wissenschaftliche Hilfskraft bei der  
Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten  
Fertigung (RIF e.V.)  
01.11.1995 - 31.08.2003 Wissenschaftlicher Angestellter  
am Lehrstuhl für Qualitätswesen  
Seit 01.09.2003 Abteilungsleiter am Lehrstuhl für Qualitätswesen  
Bereich: Prüfungsentwicklung