

# Untersuchung zur 3D-Magnetotomographie in der Drahtprüfung mittels hochauflösendem GMR-Wirbelstromprüfsystem

Marc von KREUTZBRUCK, Hendrik BERNAU, Kai ALLWEINS, Chris STRACKBEIN,  
Institut für Angewandte Physik, Justus-Liebig-Universität Giessen, Giessen

**Kurzfassung.** Aufgrund eines anhaltenden Trends der Miniaturisierung von Bauteilen sowie eines gesteigerten Qualitätsanspruches in Fertigung und Instandhaltung, besteht ein wachsender Bedarf für hochauflösende zerstörungsfreie Prüfverfahren. Ein derzeit vielversprechender Lösungsansatz in der elektromagnetischen Prüfung wird durch die magnetischen Mikrosysteme eröffnet. Insbesondere GMR-Sensoren bieten eine hohe Feldempfindlichkeit und können zugleich mit Schichtabmessungen bis in den nm-Bereich hergestellt werden. Hierdurch werden magnetische Feldverteilungen bei der Wirbelstromprüfung oder der Streuflussprüfung mit einem gegenüber Spulensystemen erhöhten Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) und einer verbesserten Ortsauflösung gemessen. Das Potential der MR-Technologie in der Materialprüfung wird anhand der Wirbelstromprüfung von Drähten verdeutlicht. Hierbei wird ein kreuzförmiges GMR-Sensor-Array um den zu untersuchenden Draht positioniert. Jeder einzelne GMR-Sensor misst dabei mit einer Feldempfindlichkeit von etwa  $200 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  und einer Ortsauflösung von  $100 \mu\text{m}$ . Der Nachweis von im Durchmesser etwa  $200 \mu\text{m}$  großen Defekten in einer Tiefenlage von  $200 \mu\text{m}$  unterhalb der Drahtoberfläche gelingt mit einem SNR von über 400. Oberflächendefekte ähnlicher Größenordnung können mit einem SNR von nahezu  $10^4$  detektiert werden. Ein derart hohes SNR birgt in Kombination mit der hohen örtlichen Auflösung Potential für eine 3D-Fehlerlokalisierung. Unter Verwendung eines analytischen Ansatzes sowie auf FEM beruhende Dateninversionsalgorithmen können Defekte mit einer Abmessung von größer  $200 \mu\text{m}$  auf einige  $10 \mu\text{m}$  exakt lokalisiert werden.

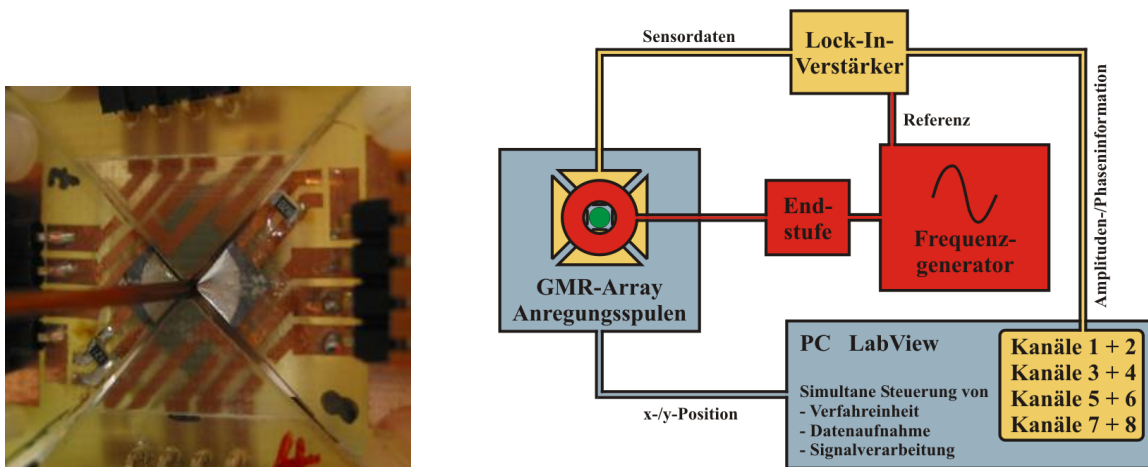
## 1. Einführung

Zunehmendes „Downscaling“ von Bauteilen und Systemkomponenten verlangt im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung nach Verfahren, die den fortgeschrittenen Qualitätsansprüchen gerecht werden. Im Sektor der elektromagnetischen Prüfverfahren - preisgünstig und einfach zu handhaben- stoßen für gewöhnlich eingesetzte Spulensysteme bei zunehmender Verkleinerung mit ihrem Detektionsvermögen an ihre physikalischen Grenzen. Es werden deshalb Sensorsysteme benötigt, die neben guter Ortsauflösung auch eine ausreichend hohe Feldempfindlichkeit zur Verfügung stellen. Um elektromagnetische Prüfverfahren weiterhin gemäß dem Trend der Miniaturisierung und Integration erfolgreich einsetzen zu können, erscheinen magnetoresistive Sensoren auf der Basis des Giant-(GMR) und/oder des Tunnel (TMR) magnetoresistiven Effektes als eine sehr vielversprechende Alternative. Erste Pilot-Projekte verliefen mit großem Erfolg und belegen das bislang nicht ausgeschöpfte Potential der MR-Sensorik in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Hierin wurden erfolgreich der Einsatz von GMR-Sensoren oder -Sensorarrays für diverse Prüfmethoden, wie der Wirbelstromprüfung oder der

magnetischen Streuflussprüfung nachgewiesen. Solche Verfahren haben sich in einem breiten Applikationsspektrum als standardisierte Prüftechnik etabliert (z.B. Anlagenbau, Kraftwerkstechnik, Fertigungstechnik, Verkehrstechnik, Medizintechnik) und können mittels hochauflösender MR-Sensorik noch leistungsfähiger gestaltet werden. Es überrascht demnach nicht, dass in den beiden letzten Jahren eine rasant ansteigende Anzahl von Publikationen beobachtet werden konnte, bei denen GMR-Technologie als Schlüsselement der elektromagnetischen Materialprüfung zum tragen kommt [1-4]. Dies verdeutlicht, dass die magnetischen Mikrosystemtechnik mit der GMR-Technologie in der zerstörungsfreie Prüfung einen neuen innovativen methodischen Ansatz darstellt und in den kommenden Jahren ein steigender Bedarf an adaptierten GMR-Sensorsystemen zu decken sein wird.

## 2. Prüfkongfiguration

Für die Messungen an Drähten wird eine Konfiguration bestehend aus vier GMR-Sensoren eingesetzt. Die Sensoren sind ringförmig um den zu untersuchenden Draht positioniert (an den Positionen 0°, 90°, 180°, 270°, siehe Abb. 1) und messen das magnetische Feld in senkrechter Richtung zur Drahtoberfläche, welches von Materialdefekten und der dort modifizierten Stromverteilung im Draht verursacht wird. Die Feldempfindlichkeit der GMR-Sensoren beträgt  $200 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  für Frequenzen größer 1 kHz und ihre Ortsauflösung entspricht den Abmessungen der aktiven Sensorschicht von etwa 100  $\mu\text{m}$ . Die GMR-Strukturen wurden seitens des IPHT Jena (Dr. Roland Mattheis) hergestellt.



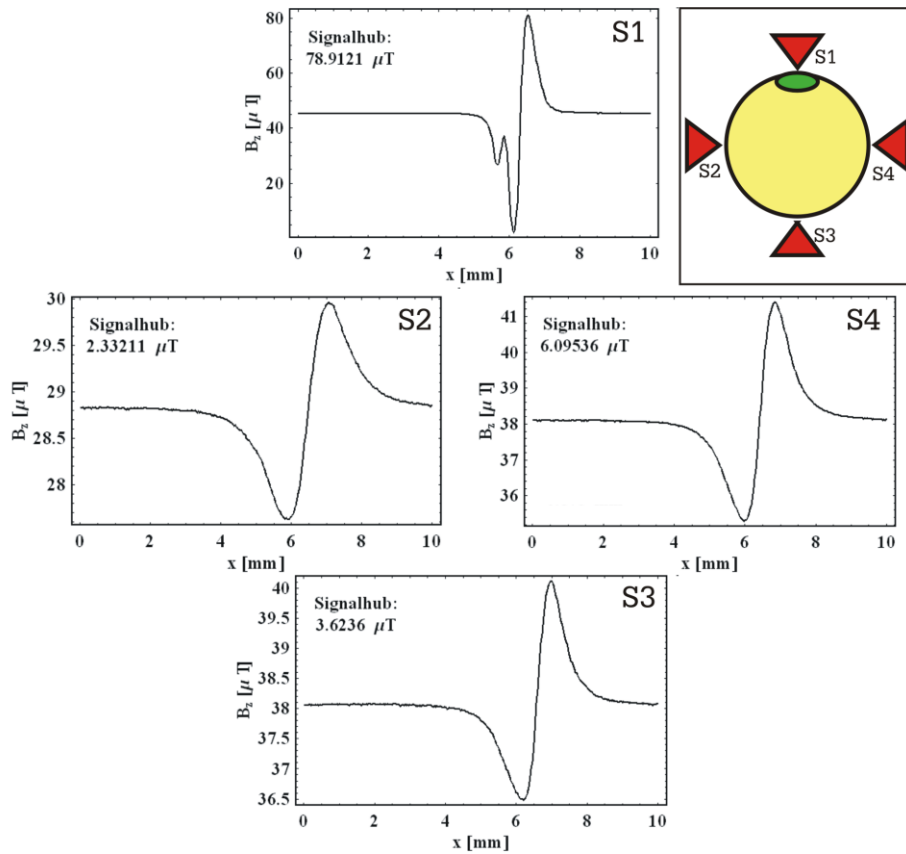
**Abb. 1. Links:** Positionierung der vier GMR Sensoren (hergestellt im IPHT Jena) am zu vermessenden Draht (Anregungsspule nicht abgebildet). **Rechts:** Skizze der Messkonfiguration bei der Drahtprüfung.

Als Anregungsinduktor finden zwei vor und hinter den GMR-Sensoren positionierten Ringspulen Verwendung. Der Draht verläuft senkrecht durch den Mittelpunkt der Spulen. Die Spulen besitzen einen Abstand von wenigen mm zueinander, in welchem die vier GMR-Sensoren positioniert werden. Aufgrund des Abstandes der Anregungsspulen zueinander beträgt das Anregungsfeld am Ort der Sensoren etwa 1/3 des Maximalfeldes innerhalb der Spulen. Allerdings kann die vom GMR Sensor detektierte radiale Feldkomponente am Ort der Sensoren bei exakter Positionierung zwischen den beiden Anregungsspulen um bis zu zwei Größenordnungen kompensiert werden. Hierdurch wird der Dynamikbereich des Messsystems nicht vom Anregungsfeld eingeschränkt. Zur Demodulation der Sensorsignale kommt ein 16-Kanal Lock-In-Verstärker zum Einsatz. Bei der hier gewählten Anregung in Umfangsrichtung gilt es zu beachten, dass die Amplituden

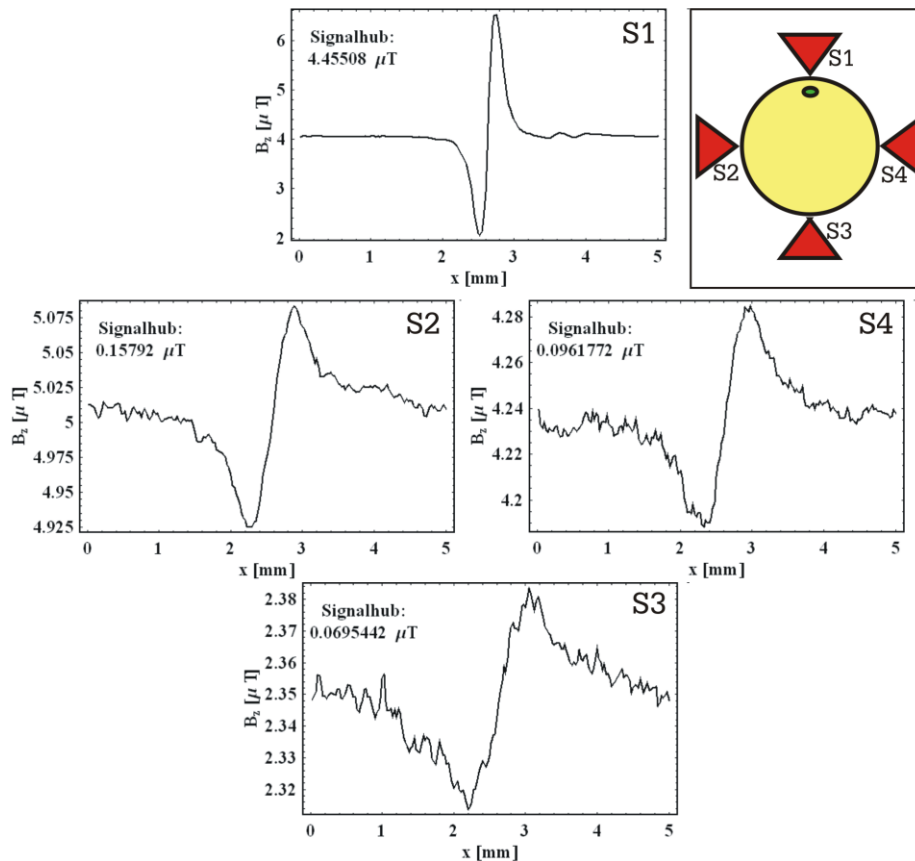
der induzierten Wirbelströme zur Drahtmitte hin linear abnehmen – vorausgesetzt die Anregungsfrequenz wird nicht zu hoch gewählt. Die optimalen Anregungsfrequenzen wurden mittels Finite-Elemente-Simulationen ermittelt. Für Cu-Drahtstärken von 5 mm bis 0.5 mm umfassen diese ein Intervall von etwa 3 kHz bis 300 kHz.

### 3. Messungen

In Abbildung 2 und 3 sind zwei Beispiele für die vom GMR-Array gemessene Feldvariation dargestellt. Die Cu-Drähte wurden jeweils derart eingespannt, dass der Materialdefekt genau in der  $0^\circ$ -Position, also unter Sensor 1, das stärkste Signal erzeugte. Beim Vergleich der vier Defektsignale fällt auf, dass der dem Defekt zugewandte Sensor ein um ein bis zwei Größenordnungen größeres Signal registriert, als der auf der Rückseite des Defekts liegende Sensor. Dies begründet sich auf die lokal am Defekt auftretenden Stromverdrängungen, die durch einen Stromdipol beschrieben werden können, dessen Magnetfeldamplitude einem quadratischem Abstandsgesetz folgt. Die maximal detektierte Signalstärke beläuft sich bei den gemessenen Materialdefekten (Einschlüsse, Fremdmaterialien) auf annähernd  $80 \mu\text{T}$ . Der kleinste gemessene Referenz-Defekt, verursacht von einem etwa  $200 \mu\text{m}$  großen Fremdmaterialieinschluß ohne Beschädigung der Oberfläche, wurde mit rund  $4,5 \mu\text{T}$  gemessen. Im Vergleich zu den bei diesen Proben gemessenen Rauschwerten von  $10 \text{ nT}_{\text{pp}}$  ergeben sich somit extrem hohe SNR-Werte von bis zu 80 dB. Die Auflösungsgrenze des Prüfsystems wird bislang nicht durch die eingesetzten GMR-Sensoren erreicht, sondern durch Parameterschwankungen innerhalb des Drahtes (Drahtradius, Oberflächenstrukturen, Drahtführung etc.). Eine Abschätzung zeigt, dass oberflächennahe Defekte von wenigen  $10 \mu\text{m}$  Größe nachweisbar sind. Wird berücksichtigt, dass das intrinsische Rauschen deutlich unterhalb  $1 \text{ nT}$  liegt, kann die verwendete Bandbreite von  $1 \text{ ms}$  noch auf  $10 \mu\text{s}$  reduziert werden, ohne SNR im Messsignal zu verlieren. Das eröffnet weiteres Potenzial für höhere Messgeschwindigkeiten.



**Abb. 2.** Messung einer hybriden Drahtstruktur (Cu-Draht mit NbTi-Filamenten) mit 0,9 mm Durchmesser. Änderung der magnetischen Flussdichte am Ort der vier GMR-Sensoren als Funktion der Drahtposition. Defektgröße: 400  $\mu\text{m}$  x 350  $\mu\text{m}$  + kleinerer Defekt; beides Oberflächendefekte.



**Abb. 3.** Messung einer hybriden Drahtstruktur (Cu-Draht mit NbTi-Filamenten) mit 1 mm Drahtdurchmesser. Änderung der magnetischen Flussdichte am Ort der vier GMR-Sensoren als Funktion der Drahtposition. Defektgröße: ca. 200  $\mu\text{m}$  Durchmesser in 200  $\mu\text{m}$  Tiefe unterhalb der Oberfläche.

#### 4. Ansätze zur MR-basierten Magnetotomographie

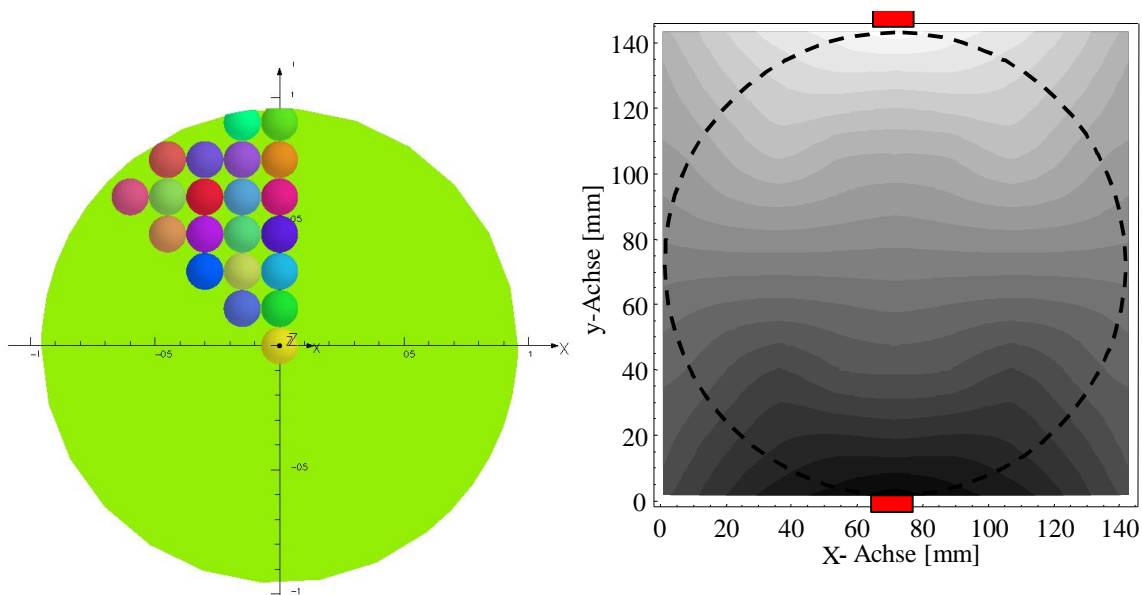
Für eine Aussage, inwiefern ein gemessenes Signal eines Materialdefektes für die Funktion oder den weiteren Herstellungsprozeß als kritisch einzustufen ist, gilt es, Ansätze für das inverse Problem der Wirbelstromprüfung zu finden. Invers bedeutet hierbei, dass das von einem Materialfehler hervorgerufene Magnetfeld gemessen und davon Rückschlüsse auf die im Testobjekt gegenwärtige Stromverteilung gemacht werden können. Hieraus kann wiederum auf die Leitfähigkeit und somit auch auf Defektposition, Defektvolumen und Defektmaterial sowie Geometrie oder Art des Defektes zurückgeschlossen werden. Die Rückrechnung von  $B$  auf  $I$  ist allerdings nur für den zweidimensionalen Fall mathematisch eindeutig. Im 3D-Fall ist es möglich, dass verschiedene Stromverteilungen zur gleichen  $B$ -Feld-Verteilung führen. Es muss dann i. d. R. auf komplexere Rückrechenstechniken zurückgegriffen werden (z. B. Bayes'sche-Statistik). Das hier verwendete 4-Sensor-Array ist ein erster Ansatz, um die Defektposition im Draht zu bestimmen. Natürlich kann ein Sensor durchaus ausreichen, um einen Defekt zu detektieren. Ohne die Daten weiterer Sensoren, die um den Draht verteilt sind, lassen sich jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse darauf ziehen, wo der das Signal verursachende Defekt sitzt und wie groß er ist.

Konventionelle Induktionsspulen in der Wirbelstromprüfung benötigen für eine empfindliche Messung stets eine genügend große Abmessung in Kombination mit hoher Windungszahl. Die in der den Draht umschließenden Detektionsspule induzierte Spannung ist dann aber stets eine gemäß der Fläche der detektierenden Spule integrale Größe, in der die Ortsinformation verloren geht. Hierdurch begründet sich der Einsatz von GMR-

Technologie, bei der die von Defekten erzeugten Feldvariationen lokal am Draht detektiert werden können und eine Messung der Feldverteilung mit hohem SNR und hoher Ortsauflösung ermöglichen.

Im Folgenden wird ein analytisches Modell vorgestellt, welches mit einfachen Mitteln nützliche Rückrechnergebnisse erzielen kann. Die Defektposition lässt sich wie folgt aus den Betragsamplitudendaten gewinnen: Werden die Amplitudenhübe zweier Sensoren (siehe Abbildung 2) betrachtet, so wird der näher am Defekt lokalisierte Sensor eine höhere Signalamplitude messen. Analytische Rechnungen, sowie FEM-Simulationen zeigen, dass ein durch ein Materialdefekt erzeugter Stromdipol im Gegensatz zu einem reinen punktförmigen magnetischen Dipol mit seiner  $1/r^3$ -Abhängigkeit lediglich einem  $1/r^2$ -Gesetz folgt. Für die Sensorsignale gilt also ein quadratisches Abstandsgesetz. Das bedeutet, befindet sich z. B. ein Defekt zweimal so dicht am oberen Sensor ( $S_{y1}$ ) wie am unteren Sensor ( $S_{y2}$ ) entlang der vertikalen  $y$ -Achse, so wird der obere Sensor ein viermal so großes Signal registrieren wie der untere Sensor. Befindet sich der Defekt genau im Zentrum des Drahtes, so messen beide Sensoren einen gleich großen Amplitudenhub.

Liegt nun bei einer Messung ein bestimmtes Amplitudenverhältnis vor, so lässt sich eine Isolinie angeben, auf welcher der Defekt liegen muss. In gleicher Weise gilt dies auch für die Sensoren  $S_{x1}$  und  $S_{x2}$  entlang der horizontalen  $x$ -Achse. Die mittels FEM berechnete Isolinienkarte der Amplitudenverhältnisse in Abb. 4, rechts ist für diese Sensoren lediglich um  $90^\circ$  zu drehen. Sind die Amplitudenwerte aller vier Sensoren bekannt, so lassen sich durch die Amplitudenverhältnisse jeweils zweier gegenüberliegender Sensoren zwei Isolinien angeben, auf denen der Defekt liegen muss. Die Isolinie der Sensoren  $S_{y1}$  und  $S_{y2}$  verläuft hierbei hauptsächlich horizontal, die Isolinie der Sensoren  $S_{x1}$  und  $S_{x2}$  im wesentlichen vertikal. Der Defekt muss dann im Schnittpunkt beider Geraden liegen.



**Abb. 4 Links:** Darstellung des FEM-Modells und der unterschiedlichen Defektpositionen im Drahtquerschnitt. **Rechts:** Darstellung des Amplitudenverhältnisses  $B_{s1}/B_{s3}$  (Isolinien) zweier gegenüberliegender Sensoren (oben und unten am Draht ( $D=1,4$  mm)) für unterschiedliche Defektpositionen (Luft Einschluss,  $r = 75 \mu\text{m}$ ). Die Grauwertskala für die Amplitudenverhältnisse  $S1/S3$  reicht von 1.530 (weiß) bis zu  $6,54 \cdot 10^{-4}$  (schwarz).

Die Berechnung der Defektposition aus den Amplitudendaten kann aber auch mittels einem einfachen analytischem Ansatz vorgenommen werden. Die detektierte Amplitude wurde

mittels FEM-Simulationen für einen breiten Parameterraum bestimmt und kann mit folgender Funktion approximiert werden.

$$B_{\perp} = \frac{\mu_0 j_0}{1.354} \left( \frac{\beta - 1}{\beta + 2} \right) \frac{r^3}{z^2} \quad (1)$$

Hierbei gilt:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Tm/A,  $j_0$ : Wirbelstromdichte am Ort des Defekts,  $\beta = \sigma_{\text{Def}}/\sigma_{\text{Mat}}$ : Verhältnis aus Leitfähigkeit Defekt / Leitfähigkeit Matrix,  $z$ : Abstand zwischen Defekt und Sensor,  $r$ : mittlerer Defektradius.

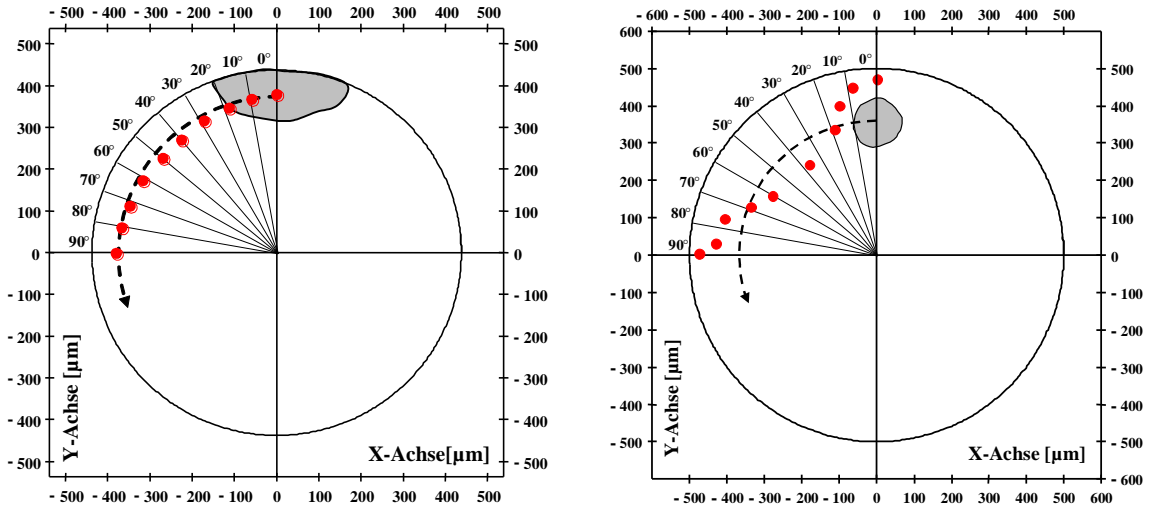
Bildet man das Verhältnis der gemessenen  $B$ -Felder zweier gegenüberliegender Sensoren, so sind die Größen  $j_0$ ,  $\beta$  und  $r$  für beide Sensoren identisch und können deshalb heraus gekürzt werden. Das Verhältnis kann somit allein durch die beiden Abstände von Defekt zu Sensor beschrieben werden und die vertikalen und horizontalen Isolinien berechnet werden. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Rückrechnung bei Verwendung dieses einfachen analytischen Ansatzes.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen beispielhaft die Ergebnisse der Rückrechnung für die beiden Drähte A und B mittels analytischem Ansatz. Die Drähte wurden nach den Messungen zerstörend geprüft und die Tiefenlagen und Defektgrößen bestimmt. Zur Untersuchung der analytischen Rückrechnung wurden die Drähte nach jeder Messung in  $10^\circ$ -Schritten rotiert, mittels den vier GMR-Sensoren vermessen und anschließend die Defektposition über den analytischen Ansatz bestimmt. Es ergeben sich somit zehn Defektpositionen von  $0^\circ$  -  $90^\circ$ . Anhand der Defektpositionen wurde auch mittels Gleichung 1 auf das Defektvolumen zurückgerechnet. Als Ergebnis der Rückrechnungen läßt sich für 4 vermessene Drähte, die nachfolgend zerstörend geprüft wurden, folgendes festhalten:

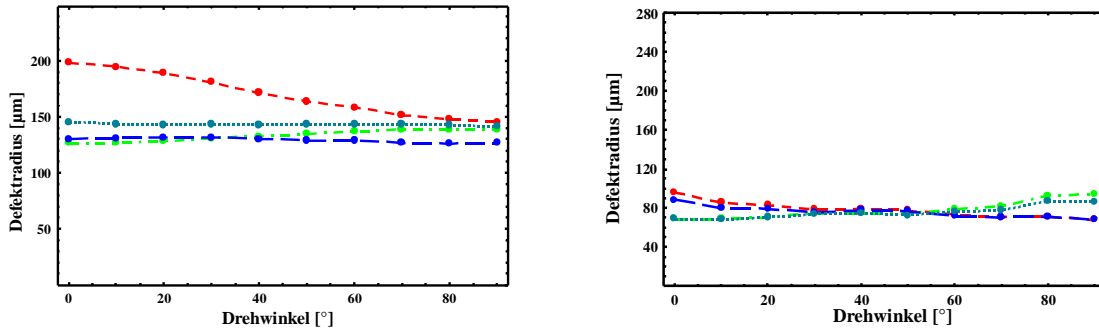
1. Die Defektposition wird im richtigen Quadranten wiedergegeben.
2. Der Winkelfehler (Winkel im Drahtquerschnitt zwischen den beiden Linien Sensor-Drahtmittelpunkt und Defekt-Drahtmittelpunkt) ist für große Defekte kleiner als 2 %. Für den kleinen Defekt ergeben sich Winkelfehler in der  $45^\circ$  Lage von über 10 %.
3. Die  $x/y$ -Position bzw.  $r$ -Position des Defektes wird für die vier Drähte im Intervall der zehn gemessenen Winkellagen des Defektes von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 20 \mu\text{m}$ ,  $\pm 30 \mu\text{m}$ ,  $\pm 10 \mu\text{m}$  und  $\pm 60 \mu\text{m}$  wiedergegeben.
4. Die Bestimmung des Defektvolumens wird durch die komplexe Defektgeometrie erschwert. Ferner zeigt sich, dass die Position der Sensoren auf mindestens  $10 \mu\text{m}$  bekannt sein sollte. Das Defektvolumen wurde unabhängig von der Winkellage des Defektes mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 50\%$  bestimmt. Dies entspricht einem relativen Fehler des mittleren Defektradius von ca. 15%. Hier gilt aber zu berücksichtigen, dass die Form der Defekte von einer Kugelform abweichen.

Die in Abbildung 4 berechneten Isolinien zeigen, dass sich die vertikale Position entlang der Isolinie für der Drahtoberfläche oder der Drahtmitte nahe liegende Defekte kaum ändert. Hingegen weichen die Isolinien für Tiefenlagen von etwa einem halben Drahtradius deutlich von einer horizontal verlaufenden Geraden ab, wodurch die mittelmäßige Lokalisierung des Defektes in Draht B erklärt werden. Draht B stellt mit einem kleinen Defekt deutlich unterhalb der Drahtoberfläche den „worst case“ dar. Größere Defekte mitteln die vertikalen Schwankungen der Isolinien heraus. Für eine genauere Rückrechnung der Position des Defektes im Drahtquerschnitt muß dieser Einfluß berücksichtigt werden

und in die verwendeten Gleichungen integriert werden. Die Feldstärke am Ort des Sensors kann dann nicht nur als Funktion des vertikalen Abstandes beschrieben werden, sondern stellt eine 2-dimensionale Funktion der Koordinaten  $x$  und  $y$  dar. Als Alternative kann die am Sensor auftretende Feldstärke auch mittels aus FEM gewonnenen Datensätze durchgeführt werden. Die Auswertung weiterer Merkmale der von Defekten erzeugten  $B$ -Felder läßt einen Rückschluß auf die Defektlänge zu. Zudem können mittels einer höheren Anzahl von Sensoren auch zuverlässige Aussagen über die Breite des Defektes gemacht werden. Somit kann neben der Position eines dreidimensionalen Defektes im Drahtquerschnitt auch das Aspektverhältnis des Defektes rekonstruiert werden.



**Abb. 5.** Analytisches Modell: Zurückgerechnete Defektpositionen (Kreise) im Draht für 10 unterschiedliche Winkellagen des Defektes (in  $10^\circ$ -Schritten). Links: Draht A, rechts: Draht B.



**Abb. 6.** Analytisches Modell: Zurückgerechnete Defektradien als Funktion der Winkellage des Defektes. Amplitudenwerte Sensor S1 (Striche), S2 (Punkte-Striche), S3 (lange Striche), S4 (Punkte). Links: Draht A, rechts: Draht B



## 5. Ausblick

Der Einsatz einer noch größeren Anzahl von den Draht umschließenden Sensoren eröffnet auch den Einsatz komplexerer und mathematisch anspruchsvolleren inverser Rückrechenverfahren, die gegenwärtig untersucht werden und Rückschlüsse auf die Form oder die Art des Defektes zulassen. Dies eröffnet neue Wege in der Qualitätssicherung genaue Aussagen über die Position und die Größe von Defekten vornehmen zu können. Die hier vorgestellten Ergebnisse belegen, dass sicherheitsrelevante Bauteile z. B. für die Medizintechnik, hochreine Halbzeuge für moderne Verbundwerkstoffe sowie Präzisionskomponenten für die Mikrotechnologie mittels hochauflösender elektromagnetischer Prüfung zuverlässig und relativ preisgünstig auf ihre Integrität untersucht werden können. Insbesondere die nahezu uneingeschränkten Möglichkeiten GMR-Schichtsysteme (und zukünftig auch TMR) bis auf die untere Nanometerskala zu miniaturisieren ebnet den Weg für magnetische nano- und Mikrosysteme auf GMR- oder TMR-Basis als zukünftige Technologie mit dem Miniaturisierungstrend mit zu wachsen. Somit besitzt die MR-Technologie das Potential die „Mikrolücke“ in den elektromagnetischen Prüfverfahren zwischen magnetischen Rasterkraftverfahren auf der Nanometerskala und den auf Induktionsspulen beruhenden Wirbelstrom- und Streuflussverfahren zur Prüfung makroskopischer Gefügeschädigungen zu schließen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der in den letzten Jahren eingesetzte Trend GMR-Technologie in der Prüftechnik einzusetzen sich auch zukünftig weiter fortsetzen wird und MR-basierte Mikrosysteme in der elektromagnetischen Materialprüfung sich als Schlüsseltechnologie etablieren werden.

## 6. Danksagung

Die beiden vorgestellten Beispiele zur Materialprüfung mittels GMR-Technologie wurden im Rahmen von Verbundprojekten durchgeführt. Wir danken dem BMWI (Projektträger AIF (Projekt Schweißnahtprüfung, Partner: Uni Gießen, Uni Siegen, und Hundt GmbH) und der Stiftung Industrieforschung (Projekt Drahtprüfung, Partner: Uni Gießen, IPHT Jena, WSK Messtechnik GmbH und EAS GmbH) für finanzielle Unterstützung.

## 7. Literatur

- [1] W. Ricken, J. Liu, W. J. Becker, EMSA 2000, Dresdner Beiträge zur Sensorik 13, 71-72 (2000)
- [2] C. H. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru, S. T. Smith, Rev. Prog. in QNDE, 22, 419-426, (2003)
- [3] B. Wincheski, M. Namkung, Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval. 509, 465 (2000)
- [4] Dogaru, T and Smith, S. T, *IEEE Trans. Magn.*, 37, 3831 (2003)
- [5] K. Allweins, M. von Kreutzbruck, G. Lembke, J. Appl. Phys. 97, 10Q102 (2005)