Miniaturisierte Mehrkanalelektronik für die magnetische Streuflussprüfung

Thomas ERTHNER, Norbert BERTUS, Elmar DOHSE, Andreas NEUBAUER, Matthias PELKNER, Marc KREUTZBRUCK Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) Fachbereich 8.4, Akustische und Elektromagnetische Verfahren Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Kontakt: thomas.erthner@bam.de

Kurzfassung. Hohe Empfindlichkeit und Ortsauflösung sowie eine kurze Prüfzeit sind Anforderungen an ein leistungsfähiges Prüfsystem basierend auf magnetischen ZfP-Verfahren für die Oberflächenprüfung. Dieses soll das sichere Auffinden feinster Risse mit Tiefen von weniger als 50 Mikrometern gewährleisten.

Um eine gute Ortsauflösung zu gewährleisten, müssen in der Regel der Defektgröße angepasste Sensoren zum Einsatz kommen. Speziell im Fall von Risslängen kleiner als ein Millimeter sollten die Sonden für die Streuflussprüfung ebenfalls Wirkbreiten kleiner als ein Millimeter aufweisen. Durch die daraus folgenden geringen Spurbreiten ergeben sich allerdings lange Prüfzeiten. Der begrenzten Prüfzeit und präzisionsbedingten mechanischen Grenzen in der Verfahr-Geschwindigkeit einer Sonde kann mit einem Multikanalansatz begegnet werden. Eine hohe Anzahl an Kanälen wiederum führt zu einem Platzproblem in der Prüfsonde, schließlich erfordert die Verstärkung schwacher Signale im eine Reihe von aktiven Bauelementen.

Der Schlüssel zur Auflösung dieses Konflikts ist der Einsatz moderner Schaltkreise wie Multiplexer und FPGA. In diesem Beitrag stellen wir am Beispiel eines 48 kanaligen Testaufbaus für die GMR-basierte Streuflussprüfung ein flexibles miniaturisiertes Elektronikkonzept vor. Dabei gehen wir auf die einzelnen Komponenten zur Ansteuerung der Sensoren und zur Signalkonditionierung ein. Wir berichten vom Design, Aufbau und der Charakterisierung des Multikanalmoduls und seiner Erprobung im realen Prüfeinsatz.

Einführung

Schon bald nach der Entdeckung des GMR-Effekts (englisch: giant magnetoresistance) im Jahr 1988 durch Grünberg und Fert wurde versucht, diesen für Anwendungen in der ZfP nutzbar zu machen. GMR-Sensoren ändern ihren elektrischen Widerstand unter Einfluss eines Magnetfeldes. Sie lassen sich so präzise und in kleinen Dimensionen fertigen, dass mit ihnen das magnetische Streufeld an Oberflächenrissen von ferromagnetischen Materialen gemessen werden kann (Abbildung 1). Dabei sind die Wirkbreiten von GMR-Sensoren sowohl von den Abmessungen der Sensoren als auch der Geometrie der zu detektierenden Risse abhängig. Will man kleine Risse finden, darf der einzelne Sensor beim Scan nur eine schmale Spur abdecken. Die Prüfung großer Flächen dauert dann entsprechend lange. Das liegt aber nicht allein an den Sensoren, denn diese lassen sich prinzipiell bis in den MHz-Bereich betreiben, was eine hohe Vorschubgeschwindigkeit erlauben würde. Aber nicht jede Mechanik ist für solch schnelle Bewegungen geeignet. Das Prüfproblem welches dieser Arbeit zu Grunde liegt, besteht darin, die Oberfläche von Lagerringen (Durchmesser 215 mm, Höhe 70 mm, Gewicht 4,3 kg) zu prüfen. Im Prüfstand wird der Lagerring in Rotation versetzt und so an einem fest stehenden Prüfkopf vorbei geführt. Die Drehzahl ist zur



Verminderung des Schlupfes und damit zur Einhaltung der Ortsauflösung auf eine Umdrehung pro Sekunde begrenzt. Erst durch den parallelen Einsatz mehrerer Sensoren im Prüfkopf kann eine für die Fertigungslinie akzeptable Prüfzeit von zwei Minuten erzielt werden. In den vergangen Jahren sind verschiedene Elektronikkonzepte und Realisierungen für GMR-Sensoren vorgestellt und diskutiert worden. Diese verwenden meist eine geringe Anzahl an Einzelsensoren siehe Kloster [1] oder Yashan [2]. Eine mögliche Miniaturisierung ist mit diesen Bausteinen wegen des zusätzlichen Platzbedarfes des Chipgehäuses beschränkt. Aktuelle GMR-Sensoren der US-amerikanischen Firma NVE in der Gehäuseform TDFN-6 benötigen eine Fläche von mindestens 2,5 mm x 2,5 mm. Die Prüfaufgabe dagegen erfordert Abmessungen im Bereich von 200 µm. Smith et al. stellte 2002 mit einem 16-elementigen Lineararray einen Sensor ähnlicher Dimension vor [3]. Auch NVE bietet kundenspezifische Schaltungen mit typisch 20 bis 60 GMR-Sensoren an, die mittels Chip-On-Board Technik aufgebaut werden [4]. In der vorliegenden Arbeit hingegen werden für die Lösung der Prüfaufgabe 16-elementige GMR-Sensorarrays (siehe Kapitel 2) eingesetzt, die in Zusammenarbeit mit der Firma Sensitec entwickelt wurden. Diese Chips erfordern eine Mehrkanalelektronik, deren Entwicklung im Folgenden vorgestellt wird.



Abbildung 1. Schematische Darstellung des magnetischen Streufeldes am Ort eines Risses. Der Sensor wird in geringem Abstand d (d < 0,1 mm) über die Oberfläche geführt. Das gemessene Sensorsignal enthält die gesuchte Information über das magn. Streufeld des Defektes.

1. Schaltung

1.1 Messprinzip für Einzelsensor

Die von uns eingesetzten GMR-Sensoren wurden nach dem Prinzip der Wheatstone'schen Messbrücke verschaltet (Abbildung 2, links). Wobei ein Zweig aus Magnetfeldsensoren (R_{GMR}) und der andere aus Referenzwiderständen (R_{Ref}) besteht. Die Spannung (U) am Mittelabgriff wird gemessen. Die einzelnen Bauteile sind auf einer Leiterplatte (Sensorplatine) verlötet. Die Analog- Digital-Umsetzung findet in einem Gerät zur Datenerfassung statt. Dieses ist über eine fünf Meter lange Messleitung mit der Sensorplatine verbunden. Zur Unterdrückung von kapazitiver/induktiver Einkopplung von Störsignalen wurde eine sensornahe Verstärkung direkt auf der Sensorplatine vorgesehen.

1.2 Konzept für Sensorarray

Aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse auf der Sensorplatine kann der Empfangskanal ab einer gewissen Anzahl an Sensoren unmöglich ausschließlich mit diskreten Bauelementen aufgebaut werden. Wir verwenden daher einen Multiplexer, bei dem genau eines aus sechzehn Eingangssignalen auf den Ausgang durchgeschaltet wird (Abbildung 2, rechts). Nur dieses Ausgangssignal wird verstärkt. Es werden somit fünfzehn Verstärker eingespart. Dieses Konzept hat auch Nachteile. Da die Sensoren im Zeitmultiplex, also nacheinander, ausgelesen werden, der Prüfling aber weiterbewegt wird, stammen die Messwerte nicht mehr vom selben Ort. Dies muss bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt werden.



Abbildung 2. links: Wheatstone'sche Messbrücke, rechts: Über einen Multiplexer wird das Signal einer Halbbrücke selektiert. Danach folgen eine Verstärkerstufe, Messleitung sowie die Datenaufnahme.

Insgesamt ergibt sich das im Blockschaltbild (Abbildung 3, links) dargestellte Gesamtkonzept. Die Sensorplatine (grüner Rahmen) enthält für jedes Sensorarray einen Multiplexer sowie einen Verstärker. Die Ausgangssignale werden über eine fünf Meter lange geschirmte Messleitung zur Datenerfassung (PXI-System von National Instruments) geleitet.



Abbildung 3. Links: Signale von 48 GMR-Sensoren werden auf drei Verstärkerkanäle gebündelt und über lange Kabel zum Messrechner geleitet. Rechts: Steuersignale für Multiplexer und A/D-Umsetzer bei wegbasierter Messwertaufnahme

1.3 Steuersignale Multiplexer

Die Ansteuerung des Multiplexers erfolgt synchron zur Datenerfassung durch ein Field Programmable Gate Array (FPGA). Für die Anwendung wurden verschiedene Betriebsweisen implementiert. Messdaten können wegbasiert, d.h. in bestimmten Abständen (hier alle 55 μ m) oder zeitbasiert zu bestimmten Zeiten aufgenommen werden. Als Beispiel sind in Abbildung 3 rechts die Steuersignale der wegbasierten Aufnahme der Messwerte gezeigt. Die Adresse wird zu jedem Wegschritt um eins hochgezählt. Nach Ablauf der Einschwingzeit wird die Konvertierung im A/D-Umsetzer gestartet. Damit die Leiterbahnen (Breite 0,1 mm) für die Sensorsignale kreuzungsfrei verlegt werden konnten, sind die Sensoren nicht in aufsteigender Reihenfolge an die Eingangspins des Multiplexers angeschlossen. In der Software zur Datenerfassung wird diese Verdrehung berücksichtigt.

2. GMR-Sensorarray

Im Rahmen des Projektes BIMAS (BMBF gefördertes Verbundprojekt; Förderkennzeichen 16SV3787; Projektpartner: PLR, AstroFein, SKF) wurden in gemeinsamer Kooperation mit der Firma Sensitec GmbH Arrays aus GMR-Sensoren entwickelt, die für ZfP-Applikationen optimiert wurden [5]. Die Chips werden in einem aufwendigen Dünnschicht-technikprozess hergestellt. Diese Technik bietet eine hohe Präzision, ermöglicht kleine Abmessungen und sorgt für eine hohe Sensitivität. Das ausgewählte Design enthält 16 als Gradiometer ausgeführte Sensoren, die in Sensorelementgrößen von 25µm bis 400 µm dargestellt werden können. Die gradiometrische Anordnung reduziert den Einfluss von störenden Hintergrundfeldern. Die Abmessungen des hier beispielhaft eingesetzten Chips betragen 3,4 mm x 1 mm. Die Schichtlänge eines Sensorelementes liegt hier bei 200 µm. Die Sensitivität beträgt 3 (mV/V)/(kA/m) im Bereich von ± 2 kA/m. Versorgt werden die Sensoren mit einer Gleichspannung (U_B = 5 V). Drei dieser Arrays sind an der 10,2 mm langen Messkante (Abbildung 4) aufgebracht. Diese Kannte wurde sehr präzise ausgeführt, damit die Sensoren möglichst nahe an die Oberfläche des Prüflings geführt werden können.

Tabelle 1. ausgewanite Kennzanien zum Sensorarray			
В	Breite eines Chips	3,4 mm	
R _{GMR}	Brückenwiderstand	6 kΩ	
UB	Versorgungsspannung	5 V	
Ua	maximale Ausgangsspannung bei B _{sat}	U _B /90	
S	Empfindlichkeit (im Bereich ± 2 kA/m)	(mV/V)/(kA/m)	



Abbildung 4. Die Ausschnittvergrößerung rechts zeigt eines der drei Sensorarrays (16 GMR-Sensoren) an der Messkante. Gut zu erkennen sind die Bonddrähte sowie ganz oben die feine Leiterbahnbreite von 0,1 mm.

2.1 Anordnung im Prüfkopf

Die Sensorplatine wird in einem Prüfkopf befestigt. Der mechanische Teil des Prüfkopfes wurde von der Berliner Firma Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH konzipiert und hergestellt. Er besteht aus einer U-förmigen Halterung, die mit einer pneumatischen Andruckeinheit an den Prüfling gedrückt wird. Mit drei Laufrollen stützt sich der Kopf auf der Oberfläche ab. An der Halterung sind die Vorrichtung zur lokalen Magnetisierung, bestehend aus Eisenkern (S235) mit Spulen, sowie die Sensorplatine angebracht (Abbildung 5). Über zusätzliche Komponenten wie Doppel-Kardanrahmen, Justiergabel, Spureinstellungspins und Stellschrauben wird eine hochgenaue Positionierung erreicht. Der Aufbau ist aufwendig, weil er für drei verschiedene Flächenformen des Prüflings ausgelegt ist. Die einfachsten Bedingungen sind in der äußeren Fläche gegeben. Die kreisförmige Fahrspur

auf der Stirnfläche erfordert eine Spureinstellung zur Verringerung von Querkräften, die durch die Schubwirkung entstehen können. Im Innern des Prüflings ist die Manipulation wegen der beengten Platzverhältnisse am schwierigsten, wodurch die Abmessungen der Sensorplatine bestimmt werden. Die Höhe ist auf 20 mm und die Breite in eine Richtung auf 10 mm über die Aufhängung hinausragend beschränkt. Die Aufhängung in der Justiergabel bestimmt auch die Position der Bohrlöcher, welche den Platz für Bauteile auf der Platine weiter einschränken.



Abbildung 5. Verschiedene Ansichten des AstroFein-Prüfkopfes, links: von schräg oben, rechts oben: Frontansicht, rechts unten: Seitenansicht

2.2 Entwicklungsstufen der Miniaturisierung

Im Laufe des Projektes wurden verschiedene Platinen (Abbildung 6) hergestellt. Dabei wurde zu Beginn ein modular aufgebauter 8-Kanal-Differenzverstärker für GMR-Brückensensoren entwickelt, der für acht Sensoren ausgelegt ist. Jeder Kanal verfügt über eine einstellbare Verstärkung (20-46 dB) sowie eine einstellbare Offset-Korrektur (\pm 5 V). Das Gerät wird über eine LAN-Schnittstelle (100BASE-T, IEEE 802.3) konfiguriert und arbeitet intern mit einem I²C-Bus. Es eignet sich besonders für präzise Messungen und wurde zur Charakterisierung der ersten GMR-Sensoren eingesetzt.

Mit der zweiten Entwicklungsstufe konnten erstmalig die neuen Sensorarrays betrieben werden. Zu deren Evaluierung wurden verschiedene Chips (16 Designs) auf sechs Sensorplatinen aufgebracht. Um die Kosten gering zu halten, sind Sensorträger und Verstärkerelektronik getrennt. Ein weiterer Grund für die Aufteilung ist die durch ein Steckfeld im Standardraster von 2,54 mm ermöglichte einfache Handhabung der Sensoren im Labor. Die Elektronik wurde auf Verstärkung und Leitungstreiber für 2 Kanäle ausgelegt. Damit können zwei Arrays mit maximal je 16 Elementen betrieben werden.

Die dritte Version verfügt nun über drei Verstärkerkanäle und ist von den Abmessungen auf den Prototypen zur Prüfung der Lagerringe abgestimmt. Für die Verkleinerung der Platine wurden Multiplexer in einer kleineren Baugröße (LFCSP) eingesetzt und auf das Steckfeld verzichtet. Stattdessen werden zwei Steckverbinder im Raster 1,27 mm verwendet.



Abbildung 6. Entwicklungsstufen der Sensorplatine, links: Präzisionsgerät für 8 Sensoren, rechts oben: Version Stand Januar 2012 für 32 Sensoren, rechts unten: Version Stand Juni 2012 für 48 Sensoren

2.3 Erprobung

Die ersten Messergebnisse, die an künstlich hergestellten Nuten (Breite: 90 μ m, Tiefen: 170, 70, 40, 42 μ m, Länge: ca. 10-14 mm) gewonnen wurden, bestätigen die Leistungsfähigkeit der Schaltung. Das Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) ist ausreichend groß. Es liegt in der Beispielmessung (Abbildung 7) für den Riss der Tiefe 40 μ m bei 18 dB. Erkennbar sind Asymmetrien der Signale, z.B. beträgt die positive Amplitude der ersten Anzeige 1,35 V, die negative dagegen lediglich -1,04 V (Riss mit einer Tiefe von 170 μ m). Vermutlich liegt die Ursache hierfür in Sättigungseffekten oder Unterschieden in der Feldstärkeverteilung an den Sensoren.

Tabelle 2. Kennzahlen für Beispielmessung			
v	Verstärkung	257	
f	Schaltrate Multiplexer	100 kHz	
В	Bandbreite pro Kanal	3 kHz	
UR	Amplitude Messwertrauschen	25 mV	
U _{el}	elektronisches Rauschen an 50 Ω	2 mV	
U	Amplitude Riss (Tiefe 40 µm)	200 mV	



Abbildung 7. Linienscan eines GMR-Sensors über vier in einen Lagerring eingebrachte künstliche Risse der Tiefen 170 μm, 70 μm, 40 μm, 42 μm (im Winkel von 45°)



Abbildung 8. Flächenscan eines Sensorarrays bestehend aus 16 GMR-Sensoren über ein Rissfeld, blaue Linie markiert das Signal des Sensors Nr. 8 aus dem Linienscan oben

3. Zusammenfassung

Die Nutzung der Verstärker im Zeitmultiplexverfahren bringt einen erheblichen Platzgewinn auf der Sensorplatine. Dies ermöglicht eine höhere Anzahl an Sensoren an der Messkante, was zu einer größeren Flächenabdeckung beim Scannen und letztendlich zu kürzen Prüfzeiten führt. Testmessungen zeigten, dass das Signal-Rausch-Verhältnis trotz zusätzlicher Bauelemente ausreichend zur Detektion von 40 µm tiefen Rissen ist. Mit der im Prüfkopf des Labormodells verbauten Sensorplatine wurde die automatisierte Streuflussprüfung am Testkörper validiert.

4. Ausblick

Durch die Platzierung der A/D-Umsetzer auf der Sensorplatine ließe sich der Aufwand für die Verdrahtung zusätzlich reduzieren. Darüber hinaus kann eine Verringerung der Prüfdauer durch simple Vervielfachung der Schaltung, also durch Erhöhung der Kanalzahl, erzielt werden.

Einen deutlichen Schritt zur noch stärkeren Miniaturisierung würden die beiden folgenden Vorschläge bedeuten: Zum einen könnte die Integration von Multiplexer und Verstärker in einem ASIC den Bauteileaufwand reduzieren, und zum anderen könnte die Vereinigung von Sensorarray und Multiplexer die Platzierung der Leiterbahnen vereinfachen. Dies wäre allerdings nur mit entsprechender Aufbau- und Verbindungstechnik realisierbar.

Referenzen

- [1] A. Kloster, Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren, Saarbrücken, 2008.
- [2] A. Yashan, Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren, Saarbrücken: IZFP, 2008.
- [3] C. H. Smith and R. W. Schneider, CHIP-SIZE MAGNETIC SENSOR ARRAYS, Eden Prairie, 2002.
- [4] NVE Corporation, GMR Sensor Catalog, Eden Prairie, Minnesota, 2012.
- [5] M. Pelkner, A. Neubauer, V. Reimund and M. Kreutzbruck, *Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing*, 2012.