

Entwicklung, Untersuchung und Anwendung von
GMR-Sensorarrays für die Zerstörungsfreie Prüfung von
ferromagnetischen Bauteilen

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II
- Physik und Mechatronik -
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Phys. Matthias Pelkner

Saarbrücken

2014

Tag des Kolloquiums: 25.07.2014

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Christian Wagner

Mitglieder des
Prüfungsausschusses: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke (Vorsitz)
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze
Prof. Dr. rer. nat. habil. Marc Kreutzbruck
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Kurzfassung

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) ist ein wichtiges Werkzeug zur Qualitätssicherung sowie zur Überwachung sicherheitsrelevanter Bauteile. In der industriellen ZfP ist das Interesse an innovativen, kostengünstigen und sicherheitssteigernden ZfP-Methoden sehr groß. Die klassische Streuflussmethode ist die Magnetpulverprüfung, die sehr sensitiv auf Mikrorisse ist. Eine zuverlässige, automatische Prüfung ist hier aber nur bedingt und mit großem Aufwand zu erreichen. Die Lösung liegt im Einsatz von Magnetfeldsensoren, die zudem eine Bewertung der Defektgeometrie aufgrund der gemessenen Rissstrefelder ermöglicht. Insbesondere GMR-Sensoren (giant magneto resistance) eignen sich hierfür aufgrund ihrer kleinen Sensorelemente, welche eine hohe Ortsauflösung ermöglichen, und der sehr guten Feldempfindlichkeit. Jedoch sind kommerzielle GMR-Sensoren nicht an die Bedürfnisse der ZfP angepasst. Daher wurden während dieser Arbeit GMR-Sensoren dahingehend optimiert, dass sie für eine automatisierte Prüfung infrage kommen. Neben dem Design und der Charakterisierung der angepassten Sensoren wurden Messungen zur Detektionswahrscheinlichkeit durchgeführt. Um die Praxistauglichkeit zu untermauern, erfolgte ein quantitativer Vergleich mit alternativen ZfP-Oberflächenmethoden, der Wirbelstrom-, Magnetpulver- und Thermografieprüfung. Zusätzlich konnte der erfolgreiche Einsatz der GMR-Streuflussprüfung in einer industriellen, automatisierten Prüfeinrichtung unter Beweis gestellt werden.

Abstract

Non-destructive testing is important for both quality control and maintenance of safety-related components. Modern industry steadily undergoes competition and cost pressure. Therefore, new innovative testing methods are key to increase safety and cost-effectiveness. The conventional magnetic flux leakage testing method (MFL) using magnetic particle inspection (MP) is a manual procedure which is very sensitive in terms of the detection of micrometer-scaled cracks. An automated reliable testing however calls for adapted magnetic field sensors. Additionally the quantification of stray fields allows an evaluation of defect geometry. GMR sensors (giant magneto resistance) are particularly well-suited for this purpose. Their low costs, excellent field sensitivity, and capacity to be miniaturized lead to high resolution test results. However, drawbacks exist for commercial GMR sensors which include non-adaption for NDT applications. To overcome this drawback one objective of this thesis was to optimize the geometry of the sensing elements for a GMR sensor array. After characterization, the new sensor arrays were used for validation and investigation of a probability of detection. In addition, by comparing GMR-MFL with other testing methods related to surface breaking defects (eddy current testing, MP, thermography), it was possible to classify in a first step GMR MFL testing in NDT. Finally, an automated GMR was tested successfully established for industrial purposes.

Aktualisierte Auflage 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1	Magnetismus	3
2.2	Magnetisches Streufeld	4
2.2.1	Analytische Modelle zur Berechnung des Streufeldes	5
2.2.2	Finite Element Methode - FEM	9
2.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	10
2.3.1	Die klassische elektromagnetische ZfP-Methode - Die Magnetpulverprüfung MT	11
2.3.2	Wirbelstromprüfung ET	12
2.3.3	Aktive Thermografie	13
2.4	Magnetfeldsensoren	14
2.4.1	GMR - Riesenmagnetwiderstand	16
2.4.2	Weitere MR-Sensoren	20
2.5	Magnetfeldsignale beim Einsatz von GMR-Sensoren in der Streuflussprüfung	23
2.6	POD - Probability of Detection	24
3	Experimenteller Aufbau & GMR-Sensoren	35
3.1	Experimenteller Aufbau	35
3.1.1	Granittisch und Verfahrenskomponenten	36
3.1.2	Messkarten und Elektronik	38
3.2	GMR-Sensoren der <i>Sensitec GmbH</i>	42
3.2.1	Mögliche Anordnungen der Widerstandselemente und Auswirkung auf das Messsignal	43
3.2.2	GMR-Sensoren empfindlich auf die normale Feldkomponente	43
3.2.3	3D-Sensor	49
3.2.4	Zusammenfassung	50
3.2.5	Zusätzliche Anmerkungen zu den betrachteten GMR-Sensoren	51
4	Voruntersuchungen	53
4.1	Magnetische Hintergrundfelder am Messstand	53
4.2	GMR-Sensoren für Nahfeldapplikationen in der Streuflussprüfung	55
4.2.1	Probekörper - künstliche Fehler	55
4.2.2	Probekörper - natürliche Fehler	64
5	ZfP-angepasste GMR-Sensorarrays	69
5.1	Parameterstudie	69
5.1.1	Einleitung	69
5.1.2	Einfluss der Sensorgeometrie auf die Streufeldmessung	70
5.1.3	Vergleich Messung und Simulation	86

5.2	ZfP-angepasste Sensorarrays	88
5.2.1	Sensorlayout	88
5.2.2	Sensor-Maske	89
5.2.3	Platinen	92
5.3	Charakterisierung der angepassten GMR-Sensorarrays - Kennlinie und Rauschen . . .	96
5.3.1	Kennlinie	96
5.3.2	Rauschen	97
5.3.3	Temperaturabhängigkeit der GMR-Sensoren	100
5.4	Messungen mit den angepassten Sensorarrays	101
5.4.1	Rissplatte 1	101
5.4.2	Lagerschalenringe	103
6	Vergleich GMR-Sensorarrays mit anderen ZfP-Verfahren	115
6.1	Prüfmethoden	116
6.2	Versuchsreihe Rissplatte 1	119
6.2.1	Magnetpulverprüfung - MT	119
6.2.2	Thermografie - TT	120
6.2.3	Wirbelstromprüfung - ET	124
6.2.4	GMR-Streufussprüfung - Vergleich verschiedener GMR-Sensoren	127
6.3	Platte mit Kreuznut - Bestimmung der Ortsauflösung	129
6.3.1	Magnetpulverprüfung - MT - Ortsauflösung	130
6.3.2	Thermografie - TT - Ortsauflösung	131
6.3.3	Wirbelstromprüfung - ET - Ortsauflösung	133
6.3.4	GMR-Streufussprüfung - Ortsauflösung	135
6.4	Platte mit Rampennut	139
6.4.1	Magnetpulverprüfung - MT - Detektionsgrenze Defekttiefe	140
6.4.2	Thermografie - TT - Detektionsgrenze Defekttiefe	140
6.4.3	Wirbelstromprüfung - ET - Detektionsgrenze Defekttiefe	141
6.4.4	GMR-Streufussprüfung - Detektionsgrenze Defekttiefe	143
6.5	Platte mit natürlichen Fehlern	145
6.6	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	146
7	Lokale Magnetisierungseinheit	151
7.1	Prototyp und FEM-Simulation	152
7.2	Anwendung der lokalen Anregung am Beispiel des Lagerschalenrings	155
7.2.1	Vergleich zwischen Messung und analytischen Gleichungen	155
7.2.2	Abhebeeffekt Sonde - Oberfläche	158
7.2.3	Streifeld in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit	160
7.2.4	Auswirkung der Bewegung auf den Motorstrom	161
7.3	Angepasste Sondenhalterung	161
7.3.1	Erweiterungen zum bisherigen Aufbau	161
7.3.2	Streifeld in Abhängigkeit von der Sensorposition	163
8	Automatisierte Streufussprüfung mit GMR-Sensoren	167
8.1	Prüfsonde	167
8.2	Labormodell	169
8.3	Software	170

9	Auffindwahrscheinlichkeiten von Defekten beim Einsatz von GMR-Sensoren	173
9.1	Ringe und Verteilung der Defekte	173
9.2	Durchführung der Messreihen und Kriterien für die POD-Berechnung	177
9.2.1	Messreihen und Auswertung	177
9.2.2	$\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ -Modell	179
9.2.3	Hit/Miss	181
9.3	Auffindwahrscheinlichkeit - „ $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ “	181
9.3.1	Parameterberechnung	181
9.3.2	POD-Kurven	182
9.4	Auffindwahrscheinlichkeit - Hit/Miss	185
9.5	Falschalarmrate (PFA) und ROC-Kurve	189
10	Zusammenfassung und Ausblick	193
	Literaturverzeichnis	197
	Abkürzungsverzeichnis	211
	Danksagung	213
	Veröffentlichungen	215

Abbildungsverzeichnis

2.1	Magnetisches Streufeld	5
2.2	Modell Förster	6
2.3	Modell Shcherbinin	7
2.4	Magnetpulverprüfung - Vergleichskörper 1	11
2.5	Wirbelstrom - Prinzip	12
2.6	TT - Schema	13
2.7	Magnetfeldsensoren allgemein	14
2.8	Magnetfeldsensoren Empfindlichkeitsbereich	15
2.9	GMR - Zwischenschichtkopplung	16
2.10	GMR - Effekt	17
2.11	GMR - Schichtaufbau	19
2.12	GMR - Kennlinien	20
2.13	AMR - Anisotroper Magnetwiderstand	21
2.14	TMR - Tunnelmagnetwiderstand	22
2.15	MR - Anwendungen	23
2.16	POD-PFA-ROC	25
2.17	POD und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	27
2.18	POD - Beispiel	31
3.1	Ablauf der Messsteuerung	35
3.2	Messtisch	37
3.3	Drehfutter	39
3.4	NI-Messkarte	40
3.5	Schema Elektronik	41
3.6	Spinventil - Schichtstruktur	42
3.7	GMR-Sensoren GMR7, GF792 und GF790b	44
3.8	GMR-Sensoren GMR7, GF792 und GF790b - Aufbau	45
3.9	GMR-Sensoren GMR7, GF792 und GF790b - Widerstandsbrücken	47
3.10	GMR-Sensoren GMR7, GF792 und GF790b - Kennlinien	48
3.11	3D-Sensor - Aufbau	49
3.12	3D-Sensor - Kennlinie	50
3.13	GF792 - Durchstrahlungsaufnahme	52
4.1	Magnetischer Hintergrund x -Tisch	54
4.2	Rissplatte 1 - Schema	55
4.3	Rissplatte 1 - Profil der 44 μm tiefen Nut	56
4.4	Rissplatte 1 - Oberflächenrauigkeit	58
4.5	Rissplatte 1 - GMR7 - Linienscan	59
4.6	Rissplatte 1 - GMR7 - Magnetfeldstärke vs. Defekttiefe	60
4.7	Rissplatte 1 - GMR7 - Permeabilitätsschwankungen	61
4.8	Rissplatte 1 - 3D-Sensor	62

4.9	Ring 1 - GF792	63
4.10	Schiene	65
4.11	Vergleichskörper 1	66
4.12	Schleifrisse	67
5.1	Streufeld	70
5.2	Sensoranordnungen	72
5.3	Sensoranordnungen - Defektsignale	73
5.4	Simulation - Parameter und Ausrichtung	75
5.5	Magnetfeld eines Defekts	76
5.6	Auswirkung Gradient Sensorfläche	77
5.7	Sensoranordnung 1 - Sensorfläche	78
5.8	Sensoranordnung 1 - Liftoff	79
5.9	Sensoranordnung 1 - Position vs. Feld	80
5.10	Sensoranordnung 2 - Sensorfläche	80
5.11	Basislänge	82
5.12	Sensorarray Anordnung	83
5.13	Array - Anordnung 1	84
5.14	Array - Anordnung 2	85
5.15	Simulation vs. Messung - Basislänge BL	87
5.16	ZfP-angepasste Sensoren - Wafermaske	91
5.17	Sensorarrays - Design Typ 4, 12, 13-15	92
5.18	Sensortyp 8B - REM	93
5.19	Sensorplatinenkanten	94
5.20	Sensorplatine mit 48 Elementen	95
5.21	ZfP-angepasste Sensoren - Kennlinie	96
5.22	Rauschspektren der ZfP-angepassten Sensorarrays	98
5.23	DC-Rauschen Elemente	99
5.24	Temperaturabhängigkeit GMR	100
5.25	Asymmetrie von Typ A und B	101
5.26	Asymmetrie - Sensorhysterese	102
5.27	Messung Ring 1 mit Sensor 4A	104
5.28	Asymmetrisches Signal Nut 170 μm - 1	106
5.29	Asymmetrisches Signal - Arbeitspunkt Sensor	107
5.30	Simulation verkippter Sensor	108
5.31	Asymmetrisches Signal Nut 170 μm - 2	109
5.32	FFT Defektsignale	110
5.33	Wiederholgenauigkeit	111
5.34	POD-Ring Nut 11 μm	113
6.1	Thermografie - Messaufbau	117
6.2	Rissplatte 1 - Doppelriss	119
6.3	Rissplatte 1 - MT	120
6.4	Rissplatte 1 - TT	122
6.5	Rissplatte 1 - TT - Doppelnut	123
6.6	Rissplatte 1 - ET - Ausschnitt	124
6.7	Rissplatte 1 - ET - Absolut- und Differenzsonde	125
6.8	Rissplatte 1 - GMR - Typ A, B und NVE	128

6.9	Probekörper - Kreuznut	129
6.10	Probekörper - Kreuznut 2	130
6.11	Kreuznut - MT	131
6.12	Kreuznut - TT	132
6.13	Kreuznut - TT- Auflösungsvermögen	133
6.14	Kreuznut - ET	134
6.15	Kreuznut - GMR - GMR7 - 4A	136
6.16	Kreuznut - GMR - 12A - 14	137
6.17	Probekörper - Rampennut	139
6.18	Rampennut - MT	140
6.19	Rampennut - TT	141
6.20	Rampennut - ET	142
6.21	Rampennut - GMR - GMR7 - 4A - 12A	144
6.22	Platte mit natürlichen Fehlern	145
7.1	Lokale Anregung - Prototyp	152
7.2	Lokale Anregung - FEM-Simulation	153
7.3	Normale Magnetfeldstärke zwischen den Jochpolen	154
7.4	Lokale Anregung - Ring 1	156
7.5	Lokale Anregung - Abhebeeffekt 1	158
7.6	Lokale Anregung - Abhebeeffekt 2	159
7.7	GMR-Signal vs. Geschwindigkeit	161
7.8	Spulenstrom vs. Motorstrom	162
7.9	Lokale Anregung	162
7.10	Lokale Anregung - Magnetfeld H_x	163
7.11	Lokale Anregung - H_{\max} (Position, Kanal)	165
8.1	Design Sensorkopf	167
8.2	Prüfsonde	168
8.3	PLR-Platine	168
8.4	Labormodell	169
8.5	Labormodell - Software	170
9.1	POD-Ringe: Verteilung der Nuten	174
9.2	Ring 2: Streufelder	175
9.3	Ring 3: Streufelder	176
9.4	Schema Auswertung	178
9.5	Entscheidung zur Regressionsgeraden	180
9.6	Regression der POD-„ $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ “	182
9.7	POD „ $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ “	183
9.8	POD-Punkte der einzelnen Kanäle	184
9.9	POD-Kurve Hit/Miss 1	186
9.10	POD-Kurve Hit/Miss 2	187
9.11	PFA-Kurve und ROC-Kurve	190

1 Einleitung

Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) ist ein wichtiger Faktor sowohl in der industriellen Fertigung, z.B. für die Qualitätssicherung, als auch in der Wartung von sicherheitsrelevanten Bauteilen. Da im industriellen Umfeld ein starker Konkurrenzdruck herrscht, sind Unternehmen aufgrund wirtschaftlicher Aspekte bestrebt, zuverlässige und zugleich kostengünstige Prüfverfahren einzusetzen. Neue Ansätze für ZfP-Verfahren bieten hier die Möglichkeit für die Industrie, dem Kostendruck bei zusätzlicher Steigerung des Detektionsvermögens entgegenzuwirken. Der Anspruch hierbei ist, fehlerhafte Komponenten früh zu erkennen, um sie rechtzeitig austauschen bzw. um Maßnahmen zur Behebung der Defekte für eine Verlängerung der Lebensdauer ergreifen zu können und insbesondere um Personen- und Sachschäden zu vermeiden. Für die Zuverlässigkeit von sicherheitsrelevanten Bauteilen spielt die Detektion von Oberflächenrissen eine besondere Rolle, da oftmals die Kraftverteilung an der Oberfläche die größten Werte annimmt (z.B. bei Materialübergängen). Bei zyklischen Belastungen können dann kleine Mikrorisse durch verstärkte Kerbwirkung beginnen zu wachsen.

Neben den klassischen Methoden wie der Durchstrahlungs- und Ultraschallprüfung werden gerade für Oberflächenfehler mit Abmessungen im μm -Bereich in magnetischen bzw. elektrisch leitfähigen Materialien die elektromagnetischen Prüfverfahren angewandt - die Wirbelstrom- (ET; engl.: *eddy current testing*) bzw. die Magnetpulverprüfung (MT; engl.: *magnetic particle testing*). Als untere Grenze sollten hierbei Risse mit einer Größe von $\text{Tiefe} \times \text{Klaffung} \times \text{Länge} = 50 \times 2 \times 500 \mu\text{m}^3$ sicher detektiert werden.

Die Wirbelstromprüfung im klassischen Sinne basiert auf einfachen Spulensystemen, allerdings sind mittlerweile auch verstärkt andere Magnetfeldsensoren wie Hallsensoren [1] in reiner Siliziumtechnik im Einsatz. Hallsensoren können kleine aktive Flächen besitzen, sie sind robust und lassen sich kostengünstig in vielen verschiedenen Ausführungen beziehen. Jedoch ist die Magnetfeldempfindlichkeit gegenüber den magnetoresistiven Sensoren geringer. SQUID-Sensoren (Superconducting Quantum Interference Device) hingegen besitzen die beste Magnetfeldempfindlichkeit aller bekannten Magnetfeldsensoren, weshalb auch sie in speziellen ZfP-Anwendungen eingesetzt wurden [2–4]. Da sie aber aufgrund der notwendigen Kühlung (Flüssigstickstoff bzw. Helium) zu kosten- und energieintensiv sind und es sich um unhandliche Systeme handelt, ist ein großflächiger Einsatz dieser Technik nicht wirtschaftlich und bleibt daher weitgehend auf Laborsysteme beschränkt. Weitere Magnetfeldsensoren mit hervorragender Feldempfindlichkeit sind die Förstersonden, auch Fluxgates oder Saturationskern-Sonden [5] genannt. Diese basieren auf einem Spulensystem mit weichmagnetischem Kern. Diese Spulen besitzen einen verhältnismäßig großen Querschnitt, wodurch die Förstersonden im Vergleich zu Hall- und magnetoresistiven Sensoren eine schlechtere Ortsauflösung besitzen. Exotischere, elektromagnetische Prüfmethoden sind magnetooptische Verfahren [6] bzw. die Magnetkraftmikroskopie (MFM; engl.: *magnetic force microscopy*) [7], allerdings sind sie ähnlich zu den SQUIDs nicht praxistauglich.

Magnetfeldsensoren, welche auf einem magnetoresistiven Effekt beruhen, ändern ihren elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von einem externen Magnetfeld. Der AMR-Sensor (Anisotroper Magnetwiderstand; engl.: *anisotropic magneto resistance*) als Vertreter der magnetoresistiven Sensoren wird schon sehr lange als Magnetfeldsensor eingesetzt, auch in der elektromagnetischen ZfP [8,9]. Jedoch ist der AMR gegenüber anderen MR-Effekten (Magnetwiderstand; engl.: *magneto resistance*) vergleichsweise feldunempfindlich.

Die Entdeckung der MR-Effekte in Mehrlagenschichtsystemen führte zu neuen Magnetfeldsensoren, die im Hinblick auf die Detektion magnetischer Streufelder aufgrund von Mikrorissen hervorragende Eigenschaften besitzen. Namentlich sind dies der GMR (Riesenmagnetwiderstand; engl.: *giant magneto resistance*), 1988 unabhängig voneinander von Peter Grünberg [10] und Albert Fert [11] entdeckt, und der TMR (Tunnelmagnetwiderstand; engl.: *tunnel magneto resistance*), welcher schon 1975 erstmals von Julliere nachgewiesen [12], aber erst nach der Entdeckung des GMR-Effektes wieder Bestandteil der Forschung wurde. Es handelt sich bei diesen beiden Magnetwiderständen um quantenmechanische Grenzflächeneffekte.

Der GMR-Effekt selbst fand schon sehr früh nach seiner Entdeckung Anwendung in verschiedensten Bereichen. GMR-Magnetfeldsensoren werden in der Festplattenindustrie, im Bereich Automotive, u.a. als Strom-, Winkel- und Geschwindigkeitssensoren, sowie als Kompasssensoren verwendet. Zudem wurden sie sehr schnell für den Einsatz in der ZfP vorgeschlagen. Hier wurden sie sowohl in der Streufluss- [13–18] als auch in der Wirbelstromprüfung [17, 19–25] verwendet. Insbesondere ihre hervorragende Feldempfindlichkeit verbunden mit der Möglichkeit, sie ohne Verlust dieser Empfindlichkeit zu miniaturisieren, sind Argumente für ihren Einsatz in der ZfP.

Insbesondere die Möglichkeit zur Miniaturisierung ist in Bezug auf die Ortsauflösung von Bedeutung. Für eine spätere Bewertung von Rissignalen im Rahmen einer Rekonstruktion müssen Streufelder ortsgenau detektiert und quantifiziert werden können [26]. Hierfür sind GMR-Sensoren hervorragend geeignet und können zudem in automatisierten Prüfanlagen eingesetzt werden. Allerdings sind solche Sensoren, obwohl in hoher Stückzahl für verschiedenste Anwendungen verfügbar, nicht an die Bedürfnisse der ZfP angepasst. In den meisten Fällen sind sie nicht auf Anwendungen im Nahfeldbereich ausgelegt, wodurch deren aktive Flächen zu weit von den magnetischen Streufeldquellen entfernt sind. In manchen Fällen besitzen sie zudem ungeeignete Hystereseckennlinien.

Um den speziellen Anforderungen, die die Streuflussprüfung an einen kleinen Magnetfeldsensor stellt, gerecht zu werden, wurde während dieser Arbeit eine Optimierung für ein ZfP-angepasstes Sensorlayout durchgeführt. Des Weiteren ist es von Vorteil, mit Blick auf Kosten und Zeitersparnis Arrays zu designen, wodurch eine große Fläche automatisiert in kürzester Zeit geprüft werden kann (ZfP-angepasste GMR-Sensoren, Kap. 5). Die Magnetfeldanregung kann hierbei global durch vorherige Aufmagnetisierung erfolgen, aber auch der Einsatz von lokalen Anregungseinheiten mit integriertem Sensor, welche über das zu prüfende Objekt mit Laufrollen geführt werden, sind denkbar (Kap. 7). Schließlich sind Komplettsysteme zu erproben (Kap. 8).

Da der Einsatz von GMR-Sensoren in der ZfP ein experimentelles Vorstadium in den meisten Anwendungsfällen nicht überschritten hat, wird zusätzlich ein Vergleich der GMR-Streuflussprüfung mit anderen gängigen Prüfmethode (Kap. 6) sowie eine statistische Untersuchung zur Auffindwahrscheinlichkeit von Mikrorissen im Rahmen einer POD-Analyse (Probability of Detection) realisiert (Kap. 9). Die Motivation hierfür ist, eine fundierte Datenbasis zum Einsatz von GMR-Sensoren zu generieren. Gerade diese beiden Punkte, welche während dieser Arbeit zum ersten Mal in dieser Weise genauer untersucht wurden, stellen wichtige Schritte dar, um den Weg der GMR-Sensoren in die industrielle ZfP-Anwendung zu ebnen.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis dieser Arbeit nötigen Grundlagen des Elektromagnetismus, insbesondere die Entstehung von Streufeldern an Grenzflächen sowie deren Berechnung anhand von analytischen Modellen, und der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) vorgestellt. Da es sich bei dem betrachteten ZfP-Verfahren um ein elektromagnetisches Verfahren handelt, werden zudem verschiedene Magnetfeldsensoren vorgestellt. Ein Schwerpunkt wird auf die magneto-resistiven Sensoren gelegt. Ihre Eigenschaften, wie die Möglichkeit der Miniaturisierung bei einer annähernd gleichbleibend hohen Feldempfindlichkeit, bieten gerade für die Streuflussprüfung von Mikrorissen ein erhebliches Potenzial, die lokal entstehenden Magnetfelder ausreichend genau messen zu können. Erst durch die Quantifizierung der Streufelder, verbunden mit einer hohen Ortsauflösung, wird eine Charakterisierung bzw. Rekonstruktion von Defekten hinsichtlich ihrer räumlichen Ausdehnungen möglich [26].

Da es sich bei dem Einsatz von GMR-Sensoren in der ZfP um ein Prüfverfahren handelt, welches bis jetzt kaum in der industriellen Materialprüfung zum Einsatz kommt und die ZfP-Industrie als konservativ angesehen werden kann, sind statistische Untersuchungen zur Auffindwahrscheinlichkeit im Rahmen einer POD-Analyse (Probability of Detection) nötig, um Vorurteile gegenüber einem „neuen“ Verfahren abzubauen. Hierfür wird in dieser Arbeit eine erste Untersuchung, die Auffindwahrscheinlichkeit bei einer GMR-Streuflussprüfung betreffend, durchgeführt. Die dafür benötigten Grundlagen werden ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt.

2.1 Magnetismus

Magnetismus war bereits im 1. Jahrtausend n. Chr. ein bekanntes Phänomen. Die magnetischen Eigenschaften von z.B. Magnetit wurden schon im alten China ausgenutzt. Hier setzte man zum ersten Mal magnetische Kompassnadeln zur Navigation von Schiffen über das Chinesische Meer ein. Im Verlauf der letzten Jahrhunderte führten verschiedene Experimente und Theorien dazu, dass Maxwell im Jahr 1861 seine theoretische Arbeit auf dem Gebiet des Elektromagnetismus veröffentlichen konnte. Als erster erkannte er den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern. Seine phänomenologisch aufgestellten Gleichungen bilden die Basis für die moderne Physik der Elektrodynamik. Die zu seinen Ehren nach ihm benannten Maxwell-Gleichungen der Magnetostatik, zu finden in den Standardwerken von J. Jackson sowie anderen [27–29], lauten:

$$\nabla \mathbf{D} = \rho, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0. \quad (2.4)$$

Hierbei handelt es sich um die Stromdichte \mathbf{J} und die Ladungsdichte ρ sowie um die dielektrische Verschiebung \mathbf{D} , das elektrische Feld \mathbf{E} , die magnetische Feldstärke \mathbf{H} und die magnetische Induktion \mathbf{B} . Diese Größen sind im Vakuum bzw. in Materie wie folgt miteinander verknüpft:

im Vakuum :

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

in Materie :

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.6)$$

ϵ_0 ist die Dielektrizitätskonstante und μ_0 die Permeabilität im Vakuum. Befindet sich Materie innerhalb der elektromagnetischen Felder, sind zusätzlich in den Gleichungen die materialspezifischen Parameter ϵ_r und μ_r enthalten und es gilt:

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H}), \quad (2.8)$$

mit den Größen Polarisation \mathbf{P} und Magnetisierung \mathbf{M} . Wird Gleichung 2.8 mit Gleichung 2.4 verknüpft, ergibt sich im Gegensatz zum quellenfreien \mathbf{B} -Feld (es gibt keine magnetischen Monopole, \mathbf{B} ist ein reines Rotationsfeld), dass sich das \mathbf{H} -Feld aufgrund von $\nabla \mathbf{H} = -\nabla \mathbf{M}$ verhält, als wenn magnetische Monopole als Quelle existieren würden, und es ergibt sich für einen magnetischen Monopol ein H -Feld im Abstand r von [30]:

$$H = \frac{q}{4\pi r^2}. \quad (2.9)$$

Dieser Zusammenhang wird bei der Entwicklung geeigneter analytischer Modelle zur Berechnung von Streufeldern eingesetzt (siehe Abschnitt 2.2.1).

Weiterhin ist gerade für das Verständnis von Streufeldern wichtig, das Verhalten der magnetischen Felder an Grenzflächen zu betrachten. An den Grenzen zwischen zwei Medien mit verschiedenen magnetischen Eigenschaften ergeben sich folgende Grenzflächenbedingungen (siehe z.B. [31]):

$$H_{t1} = H_{t2}, \quad (2.10)$$

$$B_{n1} = B_{n2}. \quad (2.11)$$

Die Tangentialkomponente des \mathbf{H} -Feldes parallel bzw. die Normalkomponente des \mathbf{B} -Feldes senkrecht zu einer Grenzfläche sind stetig. Durch diese Eigenschaft der Felder führen Inhomogenitäten in magnetischen Medien zu Streufeldern an den Grenzflächen, z.B. bei Stahl und Luft, wenn die beiden Medien unterschiedliche magnetische Eigenschaften besitzen.

2.2 Magnetisches Streufeld

In einem ferromagnetischen Material ist die magnetische Induktion \mathbf{B} viel größer als z.B. in einer um das Material liegenden Luftdomäne. Das Magnetfeld nimmt bevorzugt den Weg durch das ferromagnetische Medium. Wird innerhalb des Materials (mit $\mu_r \gg 1$) durch eine Inhomogenität, z.B. ein mit Luft gefüllter Riss ($\mu_r \approx 1$), der Weg des Magnetfeldes gestört, erfolgt aufgrund der Grenzflächenbedingung zwischen Medium und Defekt eine Verdrängung des internen Magnetfeldes um die Inhomogenität herum. Angedeutet ist dies durch Magnetfeldlinien in Abb. 2.1.

Ein Teil der Feldlinien wird innerhalb des Materials unterhalb des Defektes vorbeigeführt, wodurch es auf kleinem Raum zu einer Stauchung der Magnetfeldlinien kommt. Der andere Teil in der Nähe der

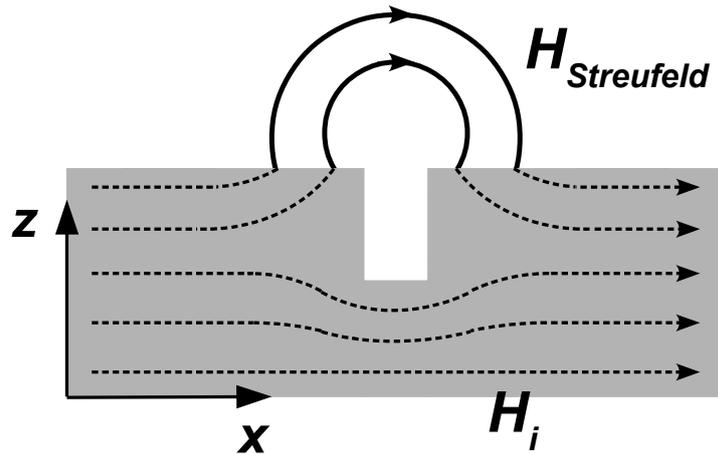


Abbildung 2.1: Schema des magnetischen Streufeldes in Luft (weiß), hervorgerufen durch einen Fehler in einem durch H_i aufmagnetisierten ferromagnetischen Medium (grau).

Oberfläche wird aus dem Material heraus gedrängt. Es entsteht über der Inhomogenität ein Streufeld. Die Stärke des Streufeldes ist abhängig von der Stärke des internen Magnetfeldes, vom Unterschied der Permeabilitäten sowie von der Größe der Inhomogenität selbst. Nehmen die Unterschiede in der Permeabilität bzw. die Größe der Inhomogenitäten zu, so führt dies zu einem viel stärkeren Streufeld über der Inhomogenität.

Um die Stärke des Streufeldes in Abhängigkeit von den Permeabilitäten bzw. der Defektgröße zu berechnen, sind verschiedene Berechnungsmethoden möglich. Zum Einen lassen sich analytische Näherungsformeln für einfache Defektgeometrie anwenden, zum Anderen kann die Berechnung gerade für eine komplexere Geometrie mit der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt werden.

2.2.1 Analytische Modelle zur Berechnung des Streufeldes

Analytische Formeln bieten einen einfachen und insbesondere schnellen Weg, das magnetische Streufeld, hervorgerufen durch einen Riss im Material, näherungsweise zu berechnen. Dadurch lassen sich quantitative Vorhersagen treffen, mit denen unter anderem Sensorsignale simuliert und Rekonstruktionen von Rissparametern [32] durchgeführt werden können.

Pioniere auf diesem Gebiet waren Förster [33, 34] und Shcherbinin, Zatsypin und Pashagin [35, 36]. Ihnen ist es gelungen, einfache analytische Ausdrücke für das Streufeldproblem eines Risses aufzustellen. Dabei unterscheiden sich allerdings ihre Ansätze grundlegend, auch wenn sie mit ihren Formeln annähernd die gleichen Ergebnisse erzielen.

Modell nach Förster

Der von Förster gewählte Ansatz [33] basiert auf komplexen Berechnungen unter Anwendung der Schwarz-Christoffel-Transformationsgleichungen. Die so erhaltenen Ergebnisse verwendete er zur Ableitung von Näherungsformeln. Als Approximation wurde ein unendlich tiefer Riss durch einen stromdurchflossenen Leiter, welcher sich mit Zentrum (Mitte der Rissöffnung) am Rissaustritt befindet, gefunden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.2 oberes Bild skizziert. Die schwarze Linie im Schaubild stellt für einen gewissen Liftoff LO zum Material (Abstand Sensorelement zur Prüfobjektoberfläche) im benachbarten Diagramm den Feldverlauf für die Normalkomponente H_z qualitativ dar.

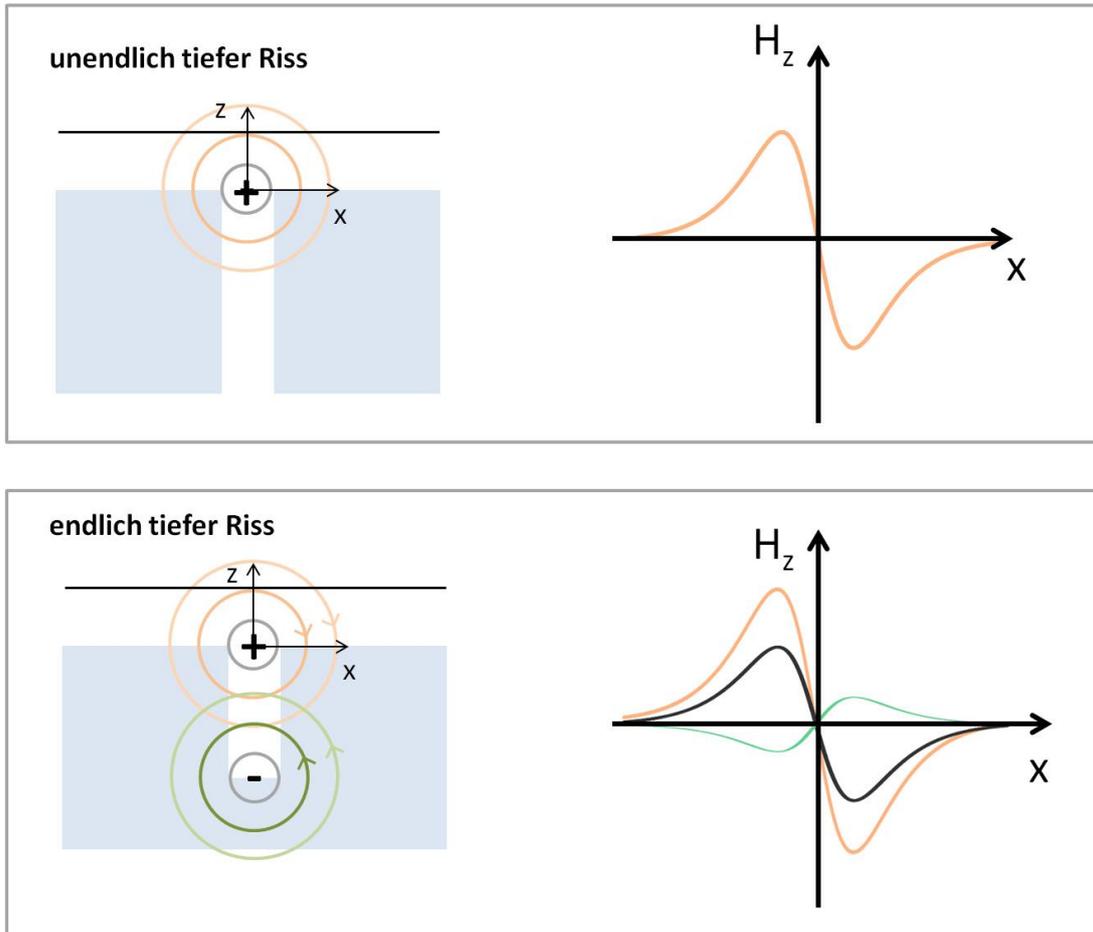


Abbildung 2.2: Modell Förster mit stromdurchflossenen Leitern zur Approximation des Streufeldes. Die Stromrichtung wird mit + und - symbolisiert. Die Felder sind kreisförmig um die Leiter abgebildet. Rechts: Anschauliche Darstellung der Magnetfelder senkrecht zur Oberfläche.

Der Vergleich zwischen den Lösungen der Transformationsgleichungen und der von Förster aufgestellten Formeln ergab ab einem Liffstoff von $LO/Klaffung \geq 3$ eine Abweichung von lediglich $\leq 1,1\%$. Für größere LO nimmt die Abweichung weiter ab. Unterhalb dieser Grenze ist die Näherungsformel anhand des stromdurchflossenen Leiters nur mit einem nicht zu vernachlässigenden Fehler anwendbar. Bei $LO \approx Klaffung$ beträgt der Fehler schon annähernd 10%.

Besitzt der Riss eine endliche Tiefe, so verringert sich das an der Oberfläche austretende Magnetfeld. Ein großer Anteil des magnetischen Flusses wird unterhalb des Risses entlang geführt, da hier der magnetische Widerstand im Vergleich zur Luft viel geringer ist. Dieser Sachverhalt wird durch einen zweiten Leiter, welcher sich am unteren Rissende im Material befindet, approximiert (siehe Abb. 2.2 unteres Schaubild). Der Strom fließt in diesem Leiter in die entgegengesetzte Richtung (verdeutlicht durch ein Minus-Zeichen). Das dadurch erzeugte Magnetfeld (grüner Linienvorlauf im Diagramm) ist dem Magnetfeld des oberen Leiters (orangene Kurve) entgegengesetzt, wodurch das resultierende Feld über dem Riss (schwarze Kurve im dazugehörigen Diagramm) kleiner ist als bei dem unendlich tiefen Riss. Für die Feldkomponenten $H_{\text{tangential}}$ und H_{normal} eines endlich tiefen Risses ergeben sich folgende Näherungsformeln nach Förster:

$$\begin{aligned}
H_{\text{tangential}} &= H_s \frac{w}{\pi} \left[\frac{z}{x^2 + z^2} - \frac{z+t}{x^2 + (z+t)^2} \right] \\
H_{\text{normal}} &= H_s \frac{w}{\pi} \left[\frac{x}{x^2 + z^2} - \frac{x}{x^2 + (z+t)^2} \right] \\
\text{mit } H_s &= H_a \frac{\frac{2t}{w} + 1}{\frac{1}{\mu_r} \frac{2t}{w} + 1}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Hierbei ist w die Rissklaffung und t die Risstiefe. Das anregende Magnetfeld im Material ist gegeben durch die magnetische Feldstärke H_a . Jedoch ist anzumerken, dass die Approximation mit stromdurchflossenen Leitern weder unmittelbar über der Rissöffnung noch für Risse mit einer großen Rissklaffung w im Vergleich zur Risstiefe t anwendbar ist. Zusätzlich wird die Länge l des Risses bei diesem Modell nicht mit berücksichtigt, wodurch lediglich das Streufeldverhalten in der Mitte des Risses näherungsweise bestimmt werden kann.

Modell nach Shcherbinin

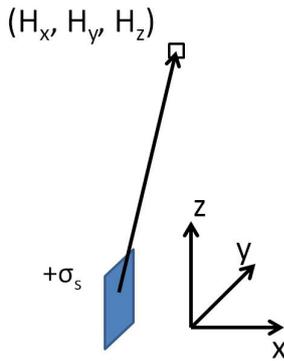


Abbildung 2.3: Modell nach Shcherbinin

Zatsepin und Shcherbinin [35] approximierten das Streufeld eines unendlich langen, rechteckigen Risses durch Streifendipole. Shcherbinin und Pashagin [36] erweiterten dieses Modell auf Risse endlicher Länge. Das Modell wurde zudem durch experimentelle Daten verifiziert. Eine Auflistung und Anpassung an SI-Einheiten der Formeln lässt sich in dem Beitrag von Edwards und Palmer [37] finden. Zudem bietet es im Gegensatz zum Förster-Modell die Möglichkeit, das Streufeld in einem 3D-Raum zu berechnen. Weitere experimentelle Bestätigungen der Modelle nach Shcherbinin bzw. Edwards und Palmer lieferten Mandal und Atherton [38].

Grundlage des Modells sind Streifendipole, die durch die magnetische Ladungsdichte σ_s quantitativ beschrieben werden können (siehe Abb. 2.3). Dabei wird zunächst das Feld ausgehend von einer rechteckigen Fläche, welche die konstant magnetische Ladungsdichte σ_s trägt, im 3D-Raum an einem festen Ort \vec{r} berechnet. Diese Fläche kann zum Beispiel die Flanke eines quaderförmigen Defektes sein. Das Magnetfeld einer Punktladung (eines magnetischen Monopols, siehe Abschnitt 2.1) wird berechnet durch $\vec{H} = \sigma_s \vec{r}' / (4\pi |\vec{r}'|^3)$. Durch Integration über die gesamte Fläche ergeben sich für die magnetische Feldstärke an einem beliebigen Ort \vec{r} im 3D-Raum folgende Ausdrücke:

$$\begin{aligned}
H_x &= \int_{-b}^0 \int_{-c}^{+c} \frac{\sigma_s x \partial y' \partial z'}{4\pi \{x^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2\}^{3/2}}, \\
H_z &= \int_{-c}^0 \int_{-b}^0 \frac{\sigma_s z \partial z' \partial y'}{4\pi \{x^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2\}^{3/2}}, \\
H_y &= \int_{-b}^0 \int_{-c}^{+c} \frac{\sigma_s (y-y') \partial y' \partial z'}{4\pi \{x^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2\}^{3/2}}.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Mit diesen Gleichungen kann nun das Streufeld eines Risses mit der Länge $l = 2c$, der Klaffung $w = 2a$ und der Tiefe $t = b$ berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass sich an den beiden Defektflanken senkrecht zur Magnetisierungsrichtung eine gleich starke magnetische Ladungsdichte mit unterschiedlichen Vorzeichen befindet. Die Ladungsdichte ist direkt proportional zum Feld H_{Riss} innerhalb des Risses. Dieses Feld wiederum hängt von der Geometrie des Risses (l , w und t), der Permeabilität μ_r des Materials und dem internen Feld im Material H_i ab. Man erhält folgenden Ausdruck für die magnetische Ladungsdichte σ_s [34]:

$$\sigma_s = \frac{H_{\text{Riss}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{b/a + 1}{(1/\mu_r)b/a + 1} \cdot H_i. \quad (2.14)$$

Um nun die Streufeldkomponenten zu berechnen, müssen die Felder der einzelnen Seitenflächen addiert werden:

$$\tilde{H}_{x,y,z} = H_{x-a,y,z} + H_{x+a,y,z}. \quad (2.15)$$

Dieses Modell gilt im Gegensatz zum Modell von Förster für Risse endlicher Länge und für Risse, deren Aspektverhältnis b/a nicht größer als 1 ist. Zudem ist es mit diesem Modell möglich, GMR-Sensorsignale für einen endlich ausgedehnten Riss im 3D-Raum zu simulieren (siehe Kap. 5).

Berechnung des Magnetfeldes entlang einer Sensorfläche

Die magnetischen Streufelder an der Oberfläche sind lokal begrenzt und nehmen mit zunehmendem Abstand zur Defektöffnung ab. In der Nähe der Rissöffnung ist die Abnahme linear und wird bei zunehmendem Abstand mehr und mehr quadratisch in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Klaffung und Tiefe des Defektes [33]. Das bedeutet, dass der Feldgradient in einem kleinen Rauminhalt über dem Defekt große Werte annehmen kann. Gerade bei der Betrachtung von Mikrorissen und deren Streufeldern, welche mit Magnetfeldsensoren gemessen werden sollen, muss dieser Feldgradient berücksichtigt werden, da die aktiven Flächen der Magnetfeldsensoren selbst eine endliche Ausdehnung besitzen. Dies führt zu unterschiedlichen Magnetfeldern je nach Ort des aktiven Elementes bzw. der Teilfläche des Elementes, welche betrachtet wird, und muss bei der Berechnung von Sensorsignalen berücksichtigt werden.

Die oben angegebenen Formeln führen zu einem berechneten Magnetfeldwert für einen infinitesimal kleinen Bereich an einem beliebigen Ort im Raum. Wird die Fläche der Magnetfeldsensoren mit in die Berechnung einbezogen, müssen die Magnetfelder über die gesamte Fläche berechnet und anschließend gemittelt werden, da das Sensorsignal lediglich einen integralen Wert, z.B. in Form eines Spannungssignals, ausgibt.

Um dieses Verhalten von Magnetfeldsensoren bezüglich Magnetfeldgradienten von Streufeldern zu berücksichtigen, werden die obigen Formeln von Shcherbinin über die Sensorfläche $dS_i \cdot dS_j$ mit $(i, j) = (x, y, z)$ integriert und anschließend wiederum durch die Fläche selbst geteilt:

$$\begin{aligned} H_x^S(x_0, y_0, z_0) &= \frac{1}{dS_i dS_j} \int_{-x_0+dS_i/2}^{-x_0-dS_i/2} \int_{-z_0+dS_j/2}^{-z_0-dS_j/2} H_x(x, y, z) dx dy, \\ H_y^S(x_0, y_0, z_0) &= \frac{1}{dS_i dS_j} \int_{-x_0+dS_i/2}^{-x_0-dS_i/2} \int_{-y_0+dS_j/2}^{-y_0-dS_j/2} H_y(x, y, z) dx dy, \\ H_z^S(x_0, y_0, z_0) &= \frac{1}{dS_i dS_j} \int_{-x_0+dS_i/2}^{-x_0-dS_i/2} \int_{-z_0+dS_j/2}^{-z_0-dS_j/2} H_z(x, y, z) dx dy. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Durch diese Gleichungen lassen sich die gemittelten Magnetfelder, die ein Magnetfeldsensor detektiert, berechnen. Für die Parameterstudie in Kap. 5 werden diese Formeln eingesetzt, um optimale Flächen eines Magnetfeldsensors für die Detektion von Streufeldern aufgrund von Mikrorissen zu bestimmen.

Erweiterungen und Grenzen der analytischen Modelle

Die vorher beschriebenen analytischen Modelle beziehen sich lediglich auf quaderförmige Defekte. Allerdings finden sich solche Defekte nicht in der Natur. Aus diesem Grund wurden verschiedenste Versuche unternommen, die analytischen Lösungen so zu erweitern, dass auch andere einfache Geometrien, welche die Realität näher beschreiben, berücksichtigt werden können. Erweiterungen der analytischen Lösungen umfassen elliptische [37], sphärische [39] bzw. zylinderförmige und viereckige Geometrien [40–42]. Die beschriebenen Fehler sind zudem Oberflächendefekte. Für oberflächennahe Fehler entwickelten Bowler und Bowler [43] eine Lösung. Durch die Erweiterung der analytischen Modelle um einen integralen Ansatz können auch hier komplexere Geometrien numerisch in einem iterativen Prozess berücksichtigt werden [44, 45]. Dadurch lassen sich den Autoren folgend jegliche Arten von Defektgeometrien analytisch berechnen. Förster erweiterte zudem sein Modell dahingehend, auch schräge Defekte und ihr Streufeld berechnen zu können [33]. Hierfür verglich er sein Modell mit dem Shcherbinin-Modell und experimentellen Daten. Er kam zu dem Schluß, dass für die Streufeldberechnung schräger Defekte sein Modell geeigneter ist als das von Shcherbinin.

Bei den oben beschriebenen Ansätzen konnten in den meisten Fällen nur schmale Defekte mit kleiner Klaffung näherungsweise berechnet werden. Eine Erweiterung hierzu liefert Marinescu [46], der ein 2D-Modell entwickelte, um ausgedehnte Inhomogenitäten zu berechnen. Hierfür verwendete er den Ansatz der Greenschen Funktion.

Die meisten Ansätze für die analytischen Lösungen gehen von einem homogen anliegenden, internen Magnetfeld und somit einer homogenen magnetischen Ladungsdichte an den Flanken der Defekte aus, weshalb auch die Feldverteilung innerhalb des Risses überall gleich ist. Nichtlinearitäten werden in den meisten Fällen nicht berücksichtigt. Altschuler *et al.* [47] entwickelten hierfür ein einfaches numerisches Modell, um das Problem der konstanten Permeabilität zu umgehen, indem sie die Stetigkeitsbedingungen und die Formeln von Förster [48] bezüglich der Nichtlinearität in einem numerischen Prozess berechneten.

Des Weiteren weist Förster [48, 49] darauf hin, dass zusätzlich unterhalb des Defektes, wo sich das interne Magnetfeld staucht, ein magnetischer Dipol entsteht. Dieser erzeugt ein zusätzliches Magnetfeld, welches dem internen Rissmagnetfeld H_{Riss} entgegengesetzt ist. Wird der entstehende Dipol zu groß, kann dies das berechnete Ergebnis erheblich beeinflussen. Förster entwickelte hierfür empirische Formeln, die die Abschwächung des internen Magnetfeldes berücksichtigen.

Um diese Einschränkungen der konstanten magnetischen Ladungsdichte an den Flanken von Defekten zu lösen, erweiterten Muzhitskii und Shcherbinin [50] die Modelle, die Shcherbinin entwickelt hatte. Hierzu berücksichtigten sie über die Bestimmung der Entmagnetisierungsterme die Geometrie der Defekte, d.h. das Verhältnis von Länge, Breite und Tiefe, die sich unterschiedlich stark auf die Ladungsdichte auswirkt. Daraus ermittelten sie angepasste Ladungsdichten je nach Längenverhältnis.

2.2.2 Finite Element Methode - FEM

Die beschriebenen analytischen Modelle stellen Näherungen der physikalischen Prozesse an den Grenzflächen zwischen Medium und Defekten dar. In den meisten Fällen lassen sich mit diesen Modellen bezüglich einfacher Geometrien gute Übereinstimmungen mit Experimenten erzielen. Allerdings sind die Modelle neben ihrer Beschränkung auf simple Geometrien (quader-, zylinder- und kugelförmig) meist nur im Fall eines homogenen Magnetfeldes im Material korrekt anzuwenden. Zudem wird die

Permeabilität als konstant angenommen, wodurch die Streufelder in einem linearen Regime berechnet werden. Empirisch versuchte Förster, diese Schwierigkeit durch das Hinzufügen eines Terms, der die Nichtlinearitäten einbezieht, zu umgehen [48, 49]. Auch Altschuler [47] entwickelte ein numerisches Modell, um die Nichtlinearität des Magnetfeldes zu berücksichtigen.

Wird gefordert, die Nichtlinearität exakt ortsbezogen mit in die Berechnung aufzunehmen bzw. eine komplexe Rissgeometrie zu simulieren, sind geeignetere Werkzeuge nötig. Eine Möglichkeit, dem zu entsprechen, ist der Einsatz von FEM-Berechnungssoftware. Hierfür sind als Beispiele OPERA der Fa. *Vectorfields*, COMSOL der Fa. *FEMLAB* oder MAXWELL der Fa. *Ansys* zu nennen.

Bei der Berechnung komplexer Geometrien unter Anwendung eines FEM-Modells wird jedoch im Vergleich zu den analytischen Lösungen eine hohe Rechenkapazität benötigt, was je nach Komplexität sehr lange dauern kann. Die zuvor stattfindende Erstellung eines geeigneten Netzes (englisch: mesh) stellt zudem den Anwender vor Schwierigkeiten, die nicht unterschätzt werden sollten. Insbesondere wenn verschiedene Komponenten mit teils unterschiedlichen Dimensionen (z.B. die gemeinsame Simulation eines Jochs zur Feldanregung (Größenordnung mm) sowie das Streufeld eines Mikrorisses (im μm -Bereich)) simuliert werden, wird die Erstellung des Netzes komplexer. Durch die Fortschritte in der Computerindustrie sind diese Herausforderungen heutzutage verglichen mit den ersten Arbeiten in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts beherrschbar.

Pioniere auf dem Gebiet der FEM-Anwendung für Streufeldprobleme sind Hwang und Lord [51]. Sie beschäftigten sich als Erste mit der Anwendung einer FEM-Berechnung von Streufeldern, bei denen die Nichtlinearität des Materials mit berücksichtigt wurde. Zudem verglichen sie ihre Modelle mit experimentellen Daten. Anwendungen von FEM für Streuflussprobleme mit einer experimentellen Bestätigung stellten Kikuchi *et al.* [52] und Li *et al.* [53] vor.

Chen *et al.* [54] entwickelten ein erweitertes Hybridmodell, in dem sie FEM und BEM (englisch: Boundary Element Method) miteinander verknüpften, um die Probleme des großen Rechenaufwandes zu minimieren. Hierbei simulierten sie eine Feldanregung durch ein Joch sowie die dadurch an einem Riss hervorgerufenen Streufelder. Sie erhielten im Vergleich zu konventionellen FEM-Methoden eine Zeitersparnis in einer Größenordnung von mehr als 90%.

2.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die Zerstörungsfreie Prüfung findet in verschiedensten Teilbereichen der Industrie statt. Ziel ist es, strukturelle Fehlstellen wie Oberflächenrisse aufzufinden und so neben einer Lebenszeitabschätzung mögliche Schadensfälle im Betrieb zu vermeiden. ZfP-Verfahren werden zur Kontrolle in der Produktion (wie z.B. bei der Herstellung von Lagerschalenringen für ICE-Radlager) oder innerhalb eines Wartungszyklus von sicherheitsrelevanten Bauteilen eingesetzt. Weitere Aufgabenbereiche der ZfP sind neben der Sicherheitsüberprüfung u.a. die Qualitätskontrolle, Materialcharakterisierung bzw. ein Langzeit-Monitoring.

Die zerstörungsfreien Prüfmethoden umfassen die Röntgen-, Ultraschall-, Magnetpulver- und Wirbelstromprüfung sowie die Farbeindring-, Sicht- bzw. Thermografieprüfung. Geregelt werden die Prüfmethoden in nationalen wie internationalen Normen und Standards (z.B. DIN EN ISO 15549:2011-03 für die Wirbelstromprüfung [55]). Da die klassische Methode zur Detektion von Streufeldern die Magnetpulverprüfung ist, wird sie im folgenden Unterabschnitt beschrieben. Zudem werden die Oberflächenverfahren Wirbelstromprüfung und aktive Thermografie näher vorgestellt, da sie im Laufe der Arbeit als vergleichende Prüfmethoden zur GMR-Streuflussprüfung eingesetzt wurden.

2.3.1 Die klassische elektromagnetische ZfP-Methode - Die Magnetpulverprüfung MT

Die klassische Streuflussprüfung ist die Magnetpulverprüfung (MT; magnetic particle testing). Im Abschnitt 2.2 wurde das magnetische Streufeld, wie es in magnetisierten Materialien an Defektstellen auftritt, beschrieben. Das interne Magnetfeld wird entweder über äußere Magnetfelder oder über elektrische Ströme im Material erzeugt. Das magnetische Streufeld an der Oberfläche wiederum wirkt auf kleine magnetische Partikel mit einer Größe von wenigen μm anziehend. Die von einem Streufeld ausgehende Magnetkraft ist lokal in der Nähe der Ecken eines Defektes am größten. Hier sammeln sich die magnetischen Partikel an, wodurch der Defekt sichtbar gemacht wird. Neben schwarzen Eisenpartikeln werden auch fluoreszierende Magnetpulver zur Prüfung eingesetzt, bei denen an den ferritischen Partikeln unter UV-Licht aktive Farbpartikel angelagert sind. Mit dieser Methode lassen sich für ein geübtes Auge sehr feine Oberflächenrisse mit einer Klaffung von wenigen μm und Tiefen im Bereich von einigen $10\ \mu\text{m}$ finden.

In Abb. 2.4 ist ein Foto des *Vergleichskörpers 1*, wie er zur Überprüfung des Magnetpulvers nach EN 9934-2 [56] eingesetzt wird, abgebildet. Auf dem Foto sind feine Oberflächendefekte zu sehen, welche im betrachteten Fall durch ein fluoreszierendes Pulver sichtbar gemacht wurden. Bei den Defekten selbst handelt es sich um Schleifrisse (grobe Strukturen) und Spannungsrisskorrosion (sehr feine Linien).

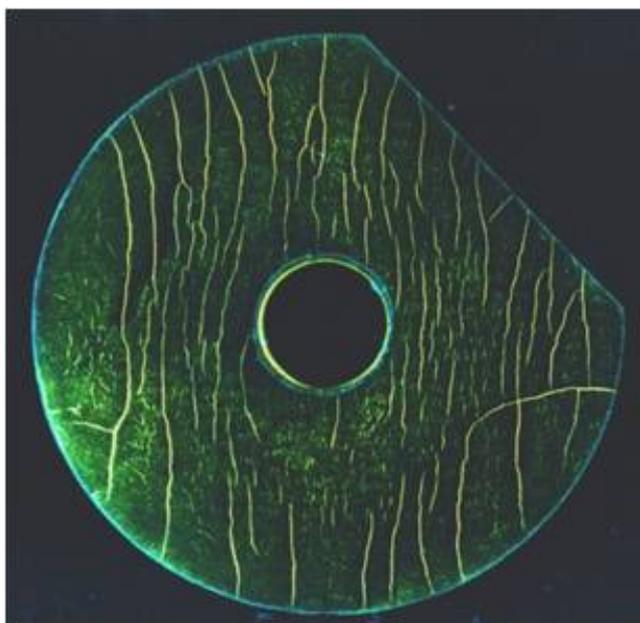


Abbildung 2.4: *Vergleichskörper 1* für die Überprüfung des Magnetpulvers in der Magnetpulverprüfung (nach EN 9934-2 [56]). (Quelle BAM, FB 8.4)

Zwar wird die voll automatisierte Magnetpulverprüfung stellenweise eingesetzt, allerdings stößt dieses Verfahren im Fall komplexer Komponenten schnell an seine Grenzen. Für einfache Fehler jedoch sind Anwendungen mit Kamerasystemen und einer automatischen Fehlerdetektion realisiert worden [57]. Für mikroskopische Fehler sind aber bis zum heutigen Tage Kamerasysteme sowie die Auswertungsprogramme nicht in der Lage, mit den Erfahrungen eines Prüfers zu konkurrieren. Hier sind Magnetfeldsensoren mit ihrer Eigenschaft, das Magnetfeld zu quantifizieren (siehe Abschnitt 2.4), geeignet, neue Lösungen im Bereich der Automatisierung der Streuflussprüfung zu finden. Dabei werden zunehmend neben den Hall-Sensoren [1, 58–64] und Förstersonden [5] auch GMR-Sensoren eingesetzt [14, 16, 65–68].

Neben dem klassischen Magnetpulververfahren oder dem Einsatz von Magnetfeldsensoren wie Hall, SQUID oder MR finden sich auch immer mehr exotischere Prüfverfahren. Für die magnetooptischen

Verfahren zur Detektion von Streufeldern werden z.B. Nano- bzw. Ferrofluide [69] oder dünne magnetooptische Filme [70] eingesetzt. Die Verfahren beruhen auf der Rotation eines linear polarisierten Lichtstrahls (Faraday-Effekt). Zudem wird die Bragg-Reflexion ausgenutzt, bei der die Aufspaltung des Lichtstrahls in seine unterschiedlichen Farben in Abhängigkeit vom vorherrschenden Magnetfeld erfolgt [71]. Auch der Einsatz von Permanentmagneten (PM) ist möglich. Hierbei wird ein PM über ein zu untersuchendes Objekt verfahren. Fährt man über einen Defekt, ändert sich der magnetische Widerstand. Dadurch ändern sich auch die magnetischen Felder im Magneten, was durch eine Spule detektiert werden kann [72]. Ein ähnliches Verfahren nutzt die Lorentz-Kraft aus. Hier wird, gleich zu dem vorherigen Beispiel, ein PM über eine Platte bewegt. Die Wirbelströme ändern sich beim Auftreten eines Defektes. Dadurch verändert sich auch die Kraft, die bestimmt wird [73]. Eine weitere Methode erinnert zwar mehr an die Farbeindringprüfung, aber auch hier werden magnetische Felder ausgenutzt. Jun und Lee [74] verwenden für paramagnetische Testkörper ein magnetisches Fluid, welches in Oberflächendefekte eindringt. Nach einer Reinigung der Oberfläche, die magnetischen Partikel im Defekt selbst werden dadurch nicht entfernt, können die Defekte über Magnetfelder durch den Einsatz eines Jochs und Hall-Sensoren detektiert werden.

2.3.2 Wirbelstromprüfung ET

Das zweite elektromagnetische Prüfverfahren ist die Wirbelstromprüfung (ET; eddy current testing). Hier wird allerdings im Gegensatz zur MT ein magnetisches Wechselfeld zur Erzeugung einer Rissanzeige eingesetzt. Die hier verwendeten Frequenzen liegen für Oberflächenrisse meistens im kHz- bis MHz-Bereich. Erzeugt werden die Wechselfelder in der Mehrzahl der Fälle über eine Erregerspule¹. Im Gegensatz zur MT muss das zu prüfende Bauteil nicht zwingend magnetische Eigenschaften besitzen. Bedingung für Wirbelströme sind elektrisch leitende Materialien.

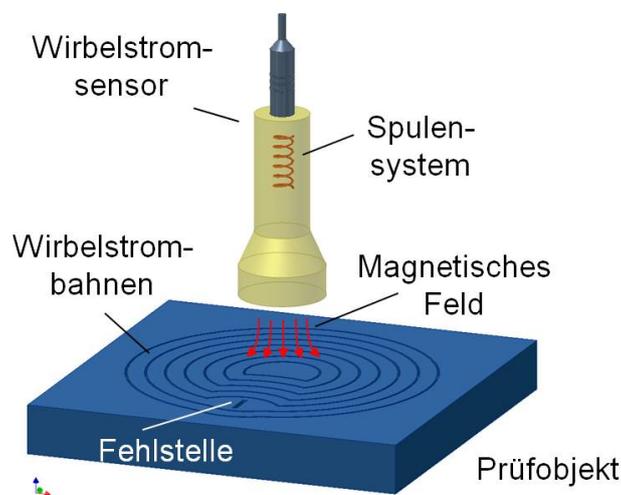


Abbildung 2.5: Prinzip der Wirbelstromprüfung. (Quelle BAM, FB 8.4)

In Abb. 2.5 ist die klassische Prüfmethode mit Spulensystemen skizziert (Beispiele für Spulenanwendungen [75, 76]). Durch das Wechselfeld wird in einem leitenden Material aufgrund der Flussänderung ein in sich geschlossener elektrischer Strom induziert (Elektromagnetische Induktion). Im ungestörten Fall fließt der Strom im Material auf einem durch die Spulengeometrie vorgegebenen Pfad. Dieser Strom wiederum erzeugt ein nach der Lenzschen Regel dem anregenden Feld entgegengesetztes Magnetfeld,

¹Auch eine Erzeugung der Wirbelströme durch einen sich schnell bewegenden Permanentmagneten ist möglich.

welches z.B. über die Messung der Spulenimpedanz als Messgröße dient. Wird der Weg des induzierten Stroms durch einen Defekt gestört (siehe Abb. 2.5), verändert sich das durch den Wirbelstrom erzeugte Gegenfeld. Dadurch wird bei Verwendung einer Spule als Empfänger die Impedanz derselben verändert und man erhält eine Rissanzeige.

Das Wirbelstromverfahren ist ein sehr empfindliches Verfahren, das auch kleinste Defekte zu registrieren vermag. Allerdings ist je nach Material die Tiefenwirkung der Methode sehr stark eingeschränkt. Dies liegt an der Eindringtiefe des Magnetfeldes. Durch das erzeugte Gegenfeld schwächt sich das Anregungsfeld immer stärker ab. Bei einer Tiefe von (siehe hierzu z.B. [27])

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (2.17)$$

ist es auf $1/e$ abgefallen. Hierbei handelt es sich um die Eindringtiefe δ . Die Eindringtiefe ist abhängig von den Materialparametern Leitfähigkeit σ , der Permeabilität $\mu = \mu_0\mu_r$, wobei μ_0 die Permeabilitätskonstante und μ_r die relative, materialabhängige Permeabilität sind, sowie von der Frequenz des Anregungsfeldes $f = \omega/(2\pi)$. Da alle Größen im Nenner der Gleichung stehen, wirkt sich eine Zunahme reziprok auf die Eindringtiefe aus. Für Aluminium mit einer Leitfähigkeit von $\sigma = 24 \text{ MS/m}$ liegt die Eindringtiefe z.B. für eine Frequenz von 100 kHz bei etwa 0,3 mm. Dadurch wird deutlich, dass Fehler unterhalb dieser Grenze nur schwer detektierbar sind, insbesondere bei Verwendung einer Spule als Empfänger, da das Spulensignal von der Frequenz abhängt. Mit niedrigeren Anregungsfrequenzen im Hz-Bereich werden tiefere Stellen im Material erreicht. Für diesen Fall eignen sich dann frequenzunabhängige Magnetfeldsensoren, wie z.B. MR- [8, 21, 23, 77, 78], Hall- [79] oder SQUID-Sensoren [3, 4, 80].

2.3.3 Aktive Thermografie

Eine weitere Methode zur Detektion von Oberflächen- bzw. Volumenfehlern stellt die aktive Thermografie dar. Hierbei handelt es sich im Vergleich zu den klassischen Methoden um ein neueres ZfP-Verfahren. Abb. 2.6 skizziert das Grundprinzip der aktiven Thermografie.

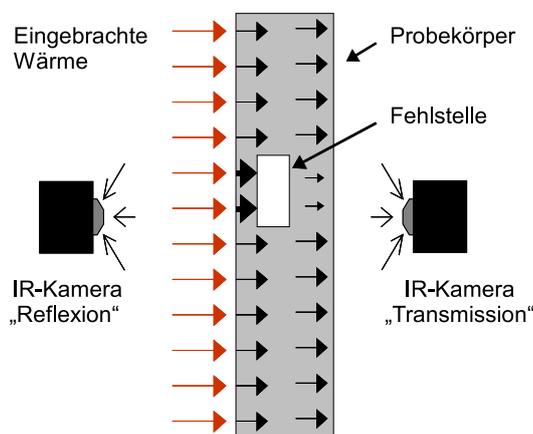


Abbildung 2.6: Schema zur aktiven Thermografie (aus [81]).

Hierbei wird durch eine Licht erzeugende Quelle mit einer hohen Leistungsdichte, z.B. Blitzlichtlampen, ein Testkörper angestrahlt. Das Licht wird hierbei zum Teil reflektiert bzw. durch das Material selbst absorbiert. Der absorbierte Teil diffundiert durch das Material (durch die Pfeile in der Abbildung angedeutet) und wird an den Oberflächen des Körpers emittiert. Verwendet werden für die radiometrischen Temperaturmessungen die Wellenlängenbereiche 3 bis 5 μm (MWIR: mid-wavelength infrared)

und 8 bis 14 μm (LWIR: long-wavelength infrared) [81]. Die abgestrahlte Wärme wird über Infrarotkameras zeitlich detektiert. Aus der abgestrahlten Wärme lässt sich der zeitliche Verlauf der Wärmeleitung im Material nachverfolgen. Dabei werden bei der aktiven Thermografie zwei unterschiedliche Prinzipien angewandt. Einerseits kann sich die Wärmekamera auf der Seite der Lichtquelle befinden (es wird die Reflexion der thermischen Energie ermittelt). Befindet sich die Kamera auf der gegenüberliegenden Seite des Werkstückes bezüglich der Anregungsquelle, wird andererseits die Transmission der Wärme durch das Material betrachtet.

Liegt auf dem Weg der thermischen Energie eine Defektstelle, kommt es zu einem Wärmestau und zu einer Reflexion der thermischen Energie. Wird im Reflexionsmodus gemessen, ist die abgestrahlte Wärme über einer Defektstelle am größten. Im Fall der Transmission stellt sich der umgekehrte Effekt ein und die emittierte Strahlung besitzt ein Minimum aufgrund des Rückstaus der Wärme.

Neuere Methoden verwenden als Quelle einen Laserspot, der über die Oberfläche bewegt wird. Dadurch lässt sich der laterale Wärmefluss sehr genau untersuchen. Zudem ist in diesem Fall eine Schwärzung des Körpers zur verbesserten Absorption nicht nötig. Mittels geeigneter Auswerteverfahren lassen sich hierbei kleinste Oberflächenfehler sehr fein darstellen und charakterisieren. Dieses Verfahren sowie der Aufbau eines lasergestützten Thermografie-Systems werden im Detail in Kap. 6 betrachtet.

2.4 Magnetfeldsensoren

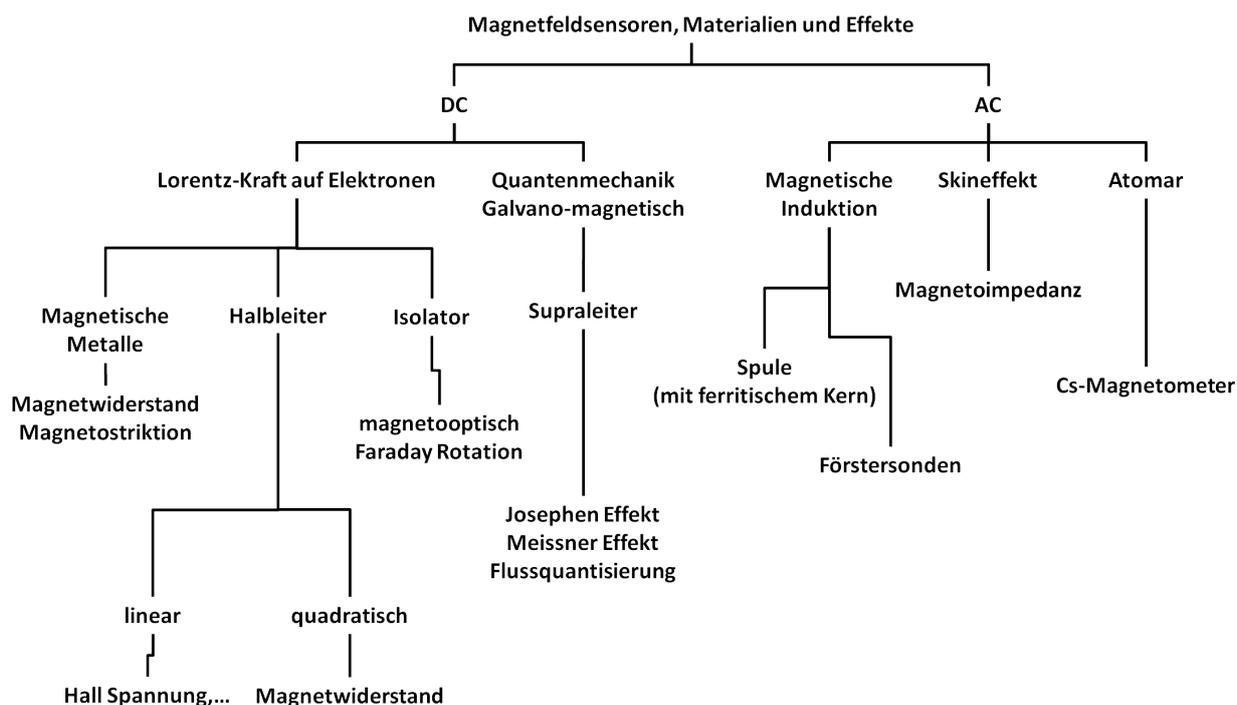


Abbildung 2.7: Magnetische Effekte, die zum Aufbau eines Magnetfeldsensors verwendet werden können (nach [82]).

Magnetfeldsensoren [83–86], je nach Typ, basieren auf ganz unterschiedlichen magnetischen Effekten (illustriert in Abb. 2.7). So können Magnetfelder zu einer Spannungsveränderung aufgrund der Lorentz-Kraft führen (Hall-Sensoren) oder den Widerstand eines Materialsystems verändern, wie dies bei den MR-Sensoren (MR: magneto resistance, Magnetwiderstand) der Fall ist. Sie sind in vielen Bereichen unseres alltäglichen Lebens einsetzbar - in der Automobilindustrie, in Festplatten, als Kompass, zur

Bestimmung der Position bzw. Geschwindigkeit, aber auch in der Medizin, in Luft- und Raumfahrt und vieles mehr. Weitere Magnetfeldsensoren basieren z.B. auf der Magnetoimpedanz [87–90] oder den magnetooptischen Effekten.

Nicht alle Magnetfeldsensoren eignen sich gleichermaßen für eine spezielle Anwendung. Hier spielen insbesondere die Größe des zu detektierenden Magnetfeldes und seine räumliche Ausdehnung eine Rolle. Bezüglich der Detektion von räumlich lokal begrenzten Streufeldern in der ZfP mit ihren kleinen Magnetfeldwerten im Bereich von wenigen A/m bis zu einigen kA/m (in Tesla: μT - mT) werden Magnetfeldsensoren benötigt, die miniaturisierbar sind und eine hohe Feldempfindlichkeit in diesem Feldbereich besitzen. Um einen Eindruck über die Empfindlichkeit verschiedener Sensoren zu bekommen, sind in Abb. 2.8 der Arbeitsbereich sowie die unterste Detektionsgrenze verschiedener Magnetfeldsensoren dargestellt. Zusätzlich ist der magnetische Bereich der Streufelder in das Schaubild eingezeichnet.

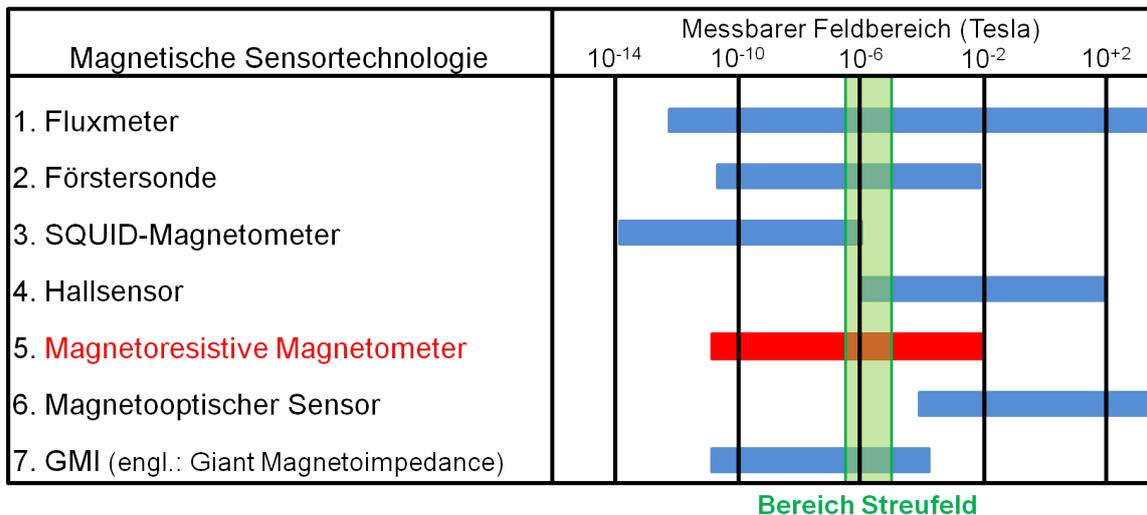


Abbildung 2.8: Empfindlichkeitsbereich gängiger Magnetfeldsensoren (nach [82]).

Die empfindlichsten Magnetfeldsensoren sind SQUID-Magnetometer [2, 91, 92], deren kleinste Feldempfindlichkeit bei wenigen fT (10^{-15} T) liegt [93]. Jedoch ist das SQUID-Magnetometer zum Einen teuer in der Anschaffung und im Betrieb, zum Anderen sind sie aufgrund ihres komplexen Aufbaus und der für ihren Betrieb benötigten niedrigen Temperaturen (high- T_c -SQUID bei 77 K) nicht uneingeschränkt einsetzbar. Auch ist für viele ZfP-Anwendungen eine so gute Feldauflösung nicht notwendig und der Aufwand, ein SQUID-System in der Streuflussprüfung einzusetzen, in den meisten Fällen nicht gerechtfertigt.

Alternativen zu SQUID-Magnetometern stellen die kostengünstigeren Förster-, Hall- und MR-Sensoren dar. Hierbei ist die Förstersonde [94–97] die Empfindlichste, weist allerdings im Vergleich mit den beiden anderen Sensortypen ein für ZfP-Anwendungen von Mikrorissen ungeeignetes räumliches Auflösungsvermögen auf. Hallsensoren [98] besitzen die schlechteste Feldempfindlichkeit im Bereich von einigen mT. In manchen Fällen wurden allerdings für sehr kleine Strukturen im μm^2 -Bereich schon Empfindlichkeiten von bis zu $2\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei hohen Frequenzen nachgewiesen [99].

Die MR-Sensoren besitzen je nach Effekt unterschiedliche Empfindlichkeitsbereiche. Zudem lassen sie sich im Allgemeinen bei geringem Verlust ihrer Feldempfindlichkeit sehr stark miniaturisieren (z.B. als Anwendung für Festplattenleseköpfe). Die bekanntesten magneto-resistiven Effekte sind AMR (anisotroper Magnetwiderstand), TMR (Tunnelmagnetwiderstand, engl.: tunnel magneto resistance) und GMR (Riesenmagnetwiderstand, engl.: giant magneto resistance) [100–102]. Diese werden in den folgenden

Abschnitten näher betrachtet. Weitere MR-Effekte sind CMR (kolossaler, engl.: colossal) [103, 104], EMR (außergewöhnlicher, engl.: extraordinary) [105, 106] und LMR (linearer, engl.: linear) [107–109] mit teils erheblichen feldabhängigen Widerstandsänderungen.

2.4.1 GMR - Riesenmagnetwiderstand

Der GMR-Effekt wurde von Peter Grünberg [10] und Albert Fert [11] unabhängig voneinander im Jahr 1988 entdeckt. Hierfür wurden beide 2007 mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet. Das Nobelpreis-Komitee würdigte hierbei die schnelle Entwicklung von der Grundlagenforschung hin zu industriellen Anwendungen, die gerade in der Festplattentechnologie zu einem erheblichen Innovationsschub hin zu Datenspeichern mit einer hohen Datendichte führte.

Der GMR-Effekt

Der als GMR bezeichnete Effekt tritt in einer mehrlagigen Schichtstruktur aus mindestens zwei voneinander getrennten ferromagnetischen Schichten (FM) auf. Zwischen beiden Schichten befindet sich eine nichtmagnetische, leitende Schicht. Aufgrund der Zwischenschichtkopplung der ferromagnetischen Schichten zueinander richten sich die Magnetisierungen beider FM gegenseitig aus. Dabei kann es zu einer parallelen oder einer antiparallelen Ausrichtung kommen. Diese unterschiedlichen Ausrichtungen der Magnetisierungen zueinander hängen von der Dicke der Zwischenschicht ab.

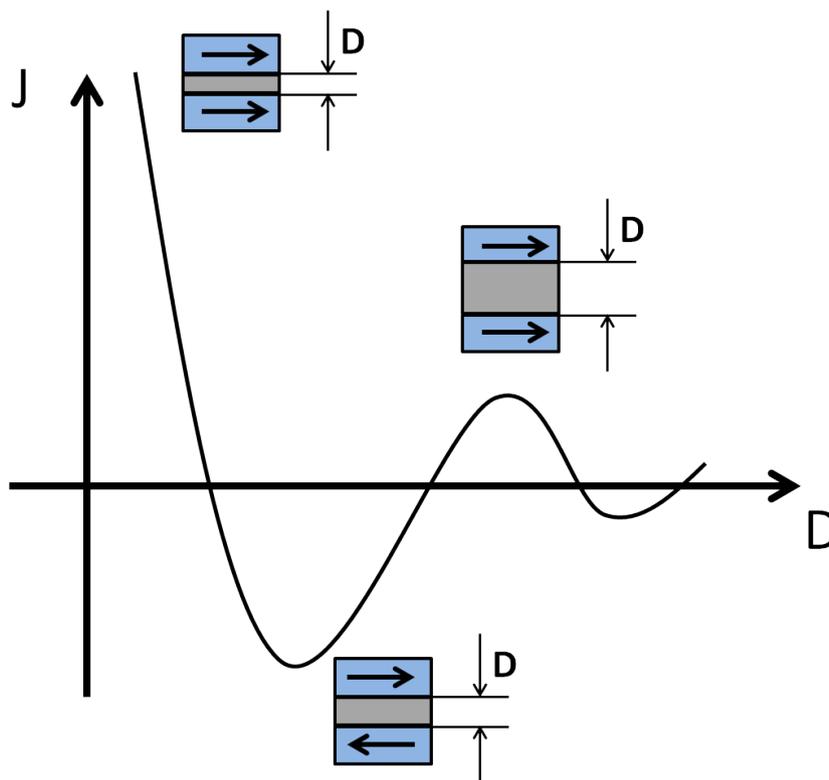


Abbildung 2.9: Zwischenschichtkopplung zwischen den beiden ferromagnetischen Schichten in Abhängigkeit von der Dicke der nichtmagnetischen Zwischenschicht (nach [110]).

In Abb. 2.9 ist der Zusammenhang zwischen der oszillierenden Zwischenschichtkopplung $J(D)$ und der Zwischenschichtdicke D dargestellt. Dieses Verhalten wurde 1986 von Grünberg *et al.* [111] in FeCr-Schichtsystemen beobachtet. Die Dicke der Zwischenschicht befindet sich hierbei im Bereich von

wenigen nm. Im Beispiel von Abb. 2.9 liegt für sehr kleine Zwischenschichtdicken D eine parallele Ausrichtung vor, da hier die Zwischenschichtkopplung positive Werte erreicht. Wird D vergrößert, nimmt J ab. Sobald J negative Werte erreicht, stellt sich eine antiparallele Ausrichtung ein. Bei weiterer Zunahme der Zwischenschichtdicke durchfährt J ein Minimum bis es danach wieder positive Werte annimmt und die Magnetisierungen wiederum parallel zueinander stehen. Hier ist es besonders wichtig, dass die einzelnen Schichten sehr genau hergestellt werden. Kleinste Fehler beim Schichtwachstum können zu unerwünschten Effekten wie „Orangepeeling“ (wellenförmige Oberflächenstruktur) oder „Pinholes“ (magnetischer Kurzschluss) und damit zu einer Aufhebung der Zwischenschichtkopplung führen. Erst die Fortschritte in der Dünnschichttechnologie (z.B. MBE: Molekular-Strahl-Epitaxie) begünstigten die Entdeckung des GMR-Effektes und ermöglichten dessen großflächigen Einsatz als Magnetfeldsensor.

Betrachtet man den elektrischen Widerstand einer solchen Schichtstruktur, kann beobachtet werden, dass bei einer antiparallelen Ausrichtung der Widerstand größer ist als bei einer parallelen Ausrichtung:

$$\rho_{ap} > \rho_p. \quad (2.18)$$

ρ ist der spezifische Widerstand des gesamten Elementes. Die Indizes beziehen sich auf „p“ parallele und „ap“ antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen.

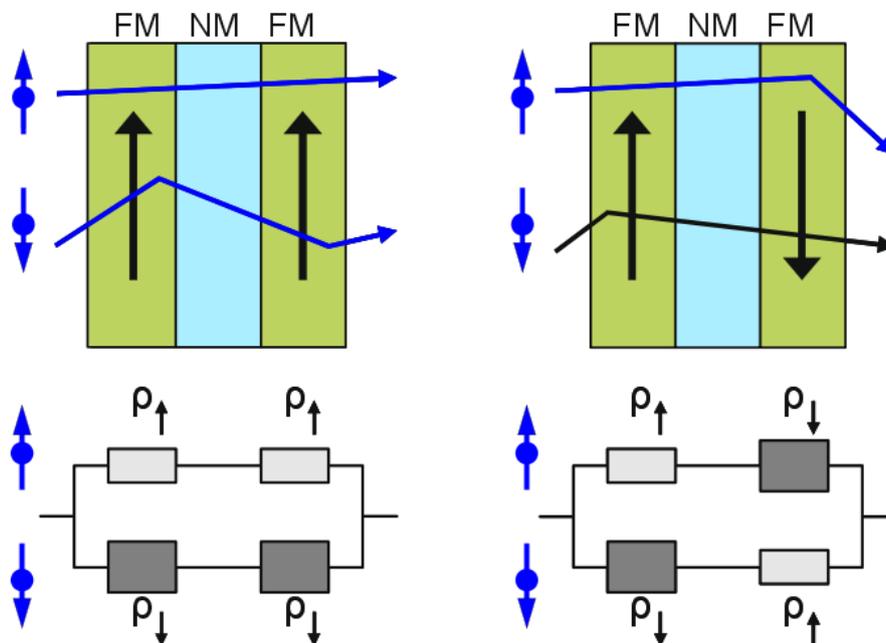


Abbildung 2.10: GMR-Effekt: Ersatzschaltbild nach dem Zweispinkanal-Modell (nach [110]).

Zur Erklärung des Effektes kann vereinfacht das Zweispinkanal-Modell herangezogen werden. Dieses Modell ist in Abb. 2.10 skizziert. Beim Anlegen einer Spannung fließt ein Strom durch das Schichtsystem. Der Strom besteht zur Hälfte aus spin-up- bzw. spin-down-Elektronen (gekennzeichnet im Schema von Abb. 2.10 durch einen Pfeil nach oben bzw. unten) und wird in zwei parallele Ströme aufgeteilt. Da ferromagnetische Materialien an dem Fermi-niveau eine unterschiedliche Zustandsdichte für spin-up- bzw. spin-down-Elektronen aufweisen, kommt es an den Grenzflächen zwischen der ferromagnetischen und der nichtmagnetischen Schicht zu einer unterschiedlichen Streuung der Elektronen je nach Spin-Richtung (Streuung von Elektronen ist gleichbedeutend mit einem Widerstand). Hierbei handelt es sich um einen quantenmechanischen Streueffekt. Ist der Spin parallel zur Magnetisierung, ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron an der Grenzfläche gestreut wird, gering. Ist hingegen

die Ausrichtung antiparallel, nimmt die Streuung der Elektronen zu. Dadurch wird der elektrische Widerstand für diesen Elektronentyp erhöht. Es gilt an den Grenzflächen $\rho(\uparrow\uparrow) < \rho(\downarrow\uparrow)$.

Werden nun beide Elektronenströme sowie die vier Grenzflächenübertritte zusammengefasst betrachtet, lässt sich eine Parallelschaltung von jeweils zwei in Serie geschalteten Widerständen für den Gesamtwiderstand aufstellen (Abb. 2.10 untere Schaltbilder). Liegt eine parallele Ausrichtung vor, ist der Widerstand für die parallel bzw. antiparallel ausgerichteten Elektronen und für den Gesamtwiderstand gegeben durch:

$$\rho(e^- \uparrow) = 2 \cdot \rho(\uparrow\uparrow), \quad (2.19)$$

$$\rho(e^- \downarrow) = 2 \cdot \rho(\downarrow\uparrow), \quad (2.20)$$

$$\rho_p = \frac{2 \cdot \rho(\uparrow\uparrow) \cdot \rho(\downarrow\uparrow)}{\rho(\uparrow\uparrow) + \rho(\downarrow\uparrow)}. \quad (2.21)$$

Liegt eine antiparallele Ausrichtung der FM-Schichten vor, ergeben sich die Widerstände zu:

$$\rho(e^- \uparrow) = \rho(\uparrow\uparrow) + \rho(\downarrow\uparrow), \quad (2.22)$$

$$\rho(e^- \downarrow) = \rho(\downarrow\uparrow) + \rho(\uparrow\uparrow), \quad (2.23)$$

$$\rho_{ap} = \frac{\rho(\uparrow\uparrow) + \rho(\downarrow\uparrow)}{2}. \quad (2.24)$$

Hierbei ist zu erkennen, dass der antiparallele Widerstand der gesamten Widerstandsschaltung größer ist als der parallele Widerstand und es stellt sich der Zusammenhang von Gl. 2.18 ein. Der GMR ist des Weiteren definiert zu

$$\text{GMR} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_p + \rho_{ap}} \cdot 100\%. \quad (2.25)$$

Bei tiefen Temperaturen von 4,2 K werden hierbei Werte von bis zu 50% erreicht [112]. Bei Raumtemperatur sind Widerstandsänderungen von bis zu 10% üblich.

Neben einer Schichtstruktur aus zwei ferromagnetischen Schichten mit antiparalleler Magnetisierung (siehe Abb. 2.11 (a)) lassen sich weitere Schichtsysteme realisieren, welche nicht direkt auf einer Zwischenschichtkopplung beruhen.

In Abb. 2.11 (b)-(e) sind Schichtsysteme, welche einen GMR-Effekt besitzen, abgebildet. (b) bezieht sich auf ein System, bei dem die beiden ferromagnetischen Schichten aus Materialien mit unterschiedlichem Hystereseverhalten bestehen. Der free layer ist hier ein weichmagnetisches Material mit einer geringeren Koerzitivfeldstärke als die hartmagnetische Schicht. Dadurch kann die Magnetisierung dieser Schicht rotieren, wohingegen bei der zweiten Schicht das anliegende Magnetfeld noch nicht ausreicht, um deren Magnetisierung signifikant zu beeinflussen. Durch die Drehung der Magnetisierung des free layers ändert sich der Widerstand der gesamten Schichtstruktur.

In (c) ist ein Schichtsystem abgebildet, bei dem zwei voneinander getrennte FM-Schichten antiferromagnetisch koppeln. Auch bei Magnetfeldern, welche die Zwischenschichtkopplung nicht aufbrechen,

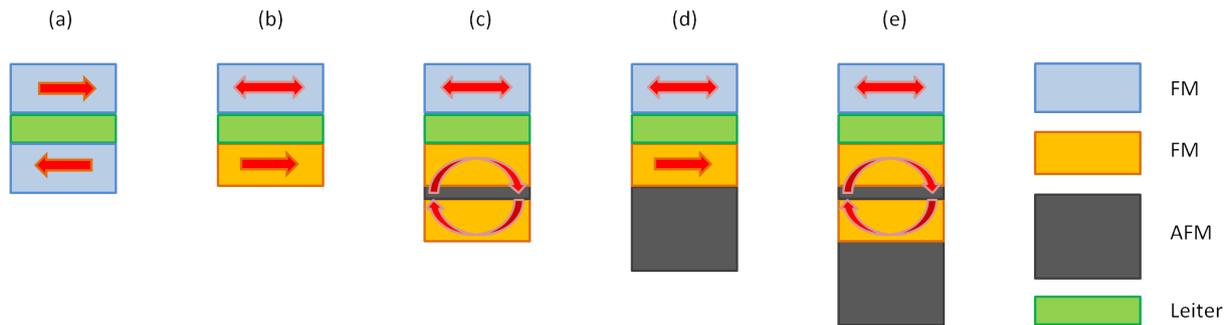


Abbildung 2.11: Verschiedene Schichtstrukturen, die zu einem GMR-Effekt führen. (a) Antiferromagnetisch gekoppeltes Schichtsystem aus ferromagnetischen Schichten (FM). (b) Schichtsystem aus ferromagnetischen Schichten mit unterschiedlichen Koerzitivfeldstärken bzw. unterschiedlicher Hysterese. (c) Die unteren ferromagnetischen Schichten sind antiferromagnetisch gekoppelt. Der obere „free layer“ ist unabhängig von der unteren Kopplung. (d) Spinventil mit einem Antiferromagneten (AFM), der die untere ferromagnetische Schicht „pinned“. Obere Schicht ist unabhängig von der unteren (keine Zwischenschichtkopplung). (e) Erweitertes Spinventil aus (c) und (d) zusammen (nach [113]).

behalten diese Schichten ihre Magnetisierungsrichtung bei. Darüber angebracht ist, durch eine spacer-Schicht getrennt, eine weitere ferromagnetische Schicht. Da der spacer so dick ist, dass die Zwischenschichtkopplung nicht mehr wirkt, ist deren Magnetisierung durch ein externes Feld frei rotierbar und der Widerstand kann sich je nach Feldrichtung verändern.

(d) wird als Spinventil (engl. spin valve) bezeichnet. Hier wird ein bias layer, ein Antiferromagnet, verwendet, um die Magnetisierung der darüber liegenden FM-Schicht über eine Austauschwechselwirkung festzuhalten (pinned layer). Dadurch wird die Magnetisierung bei geringen Feldern, deren Energie kleiner ist als die Austauschwechselwirkung, nicht beeinflusst. Durch einen spacer von der gepinnten FM-Schicht getrennt, befindet sich die auf äußere Felder empfindliche FM-Schicht, deren Magnetisierung beeinflusst werden kann. (e) ist ein System aus (c) und (d).

Spinventil-Sensoren

Die Spinventilsensoren besitzen gegenüber herkömmlichen GMR-Sensoren den Vorteil, dass eine FM-Schicht durch die Kopplung mit einer AFM-Schicht sehr genau ausgerichtet werden kann. Dieny *et al.* [114] realisierten 1991 als erste ein Spinventil. Durch die AFM-FM-Kopplung der unteren Schichten lässt sich im Vergleich zu herkömmlichen GMR-Sensoren der Effekt besser steuern und es ergibt sich je nach Material- und Schichtsystem ein linearer Kennlinienverlauf.

Wird die antiferromagnetische Zwischenschichtkopplung zur Realisierung eines auf dem GMR-Effekt basierenden Sensors verwendet, lassen sich zwar Felder mit diesem Sensortyp bestimmen, allerdings kann nicht festgestellt werden, ob ein positives oder negatives Feld am Sensor anliegt. In beiden Fällen nimmt der Widerstand mit zunehmendem Feld ab. Die Magnetisierungen werden von einer antiparallelen Ausrichtung nach und nach parallel ausgerichtet. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.12 (a) dargestellt.

Die zweite Abbildung in (b) stellt ein Spinventil dar, welches im Nullfeld eine senkrecht zueinander stehende Magnetisierungsrichtung der beiden FM-Schichten besitzt. Durch ein äußeres Feld wird die obere Magnetisierung gedreht. Je nachdem wie das externe Magnetfeld angelegt wird, stellt sich eine parallele bzw. antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen ein. In diesem Fall wird eine lineare Kennlinie im Bereich zwischen den Sättigungen erreicht, wodurch die Stärke eines externen Magnetfeldes und im Gegensatz zu Fall (a) auch dessen Richtung bestimmt werden können.

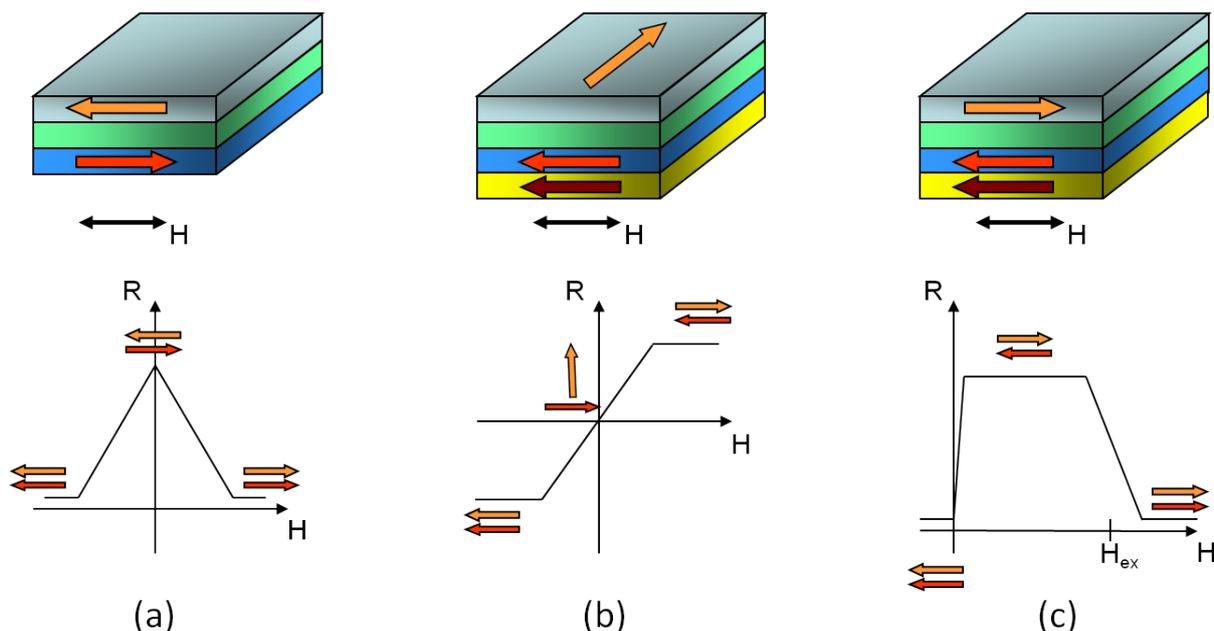


Abbildung 2.12: Mögliche Kennlinien verschiedener Schichtstrukturen. (a) Zwei ferromagnetische Schichten, die im Nullfeld eine antiparallele Ausrichtung besitzen. (b) Spinventil mit senkrecht zueinander stehenden Magnetisierungen bei $H_z = 0$ A/m. (c) Spinventil: Austauschwechselfeld H_{ex} zwischen Antiferromagnet und Ferromagnet kann ausgenutzt werden, um die Kennlinie in hohe Feldbereiche zu verschieben.

Eine weitere Möglichkeit zur Verwendung eines Spinventils ist in (c) gezeigt. Auch hier lässt sich die AFM-Kopplung ausnutzen. Durch diese wird der Arbeitspunkt hin zu einem Magnetfeld (hier H_{ex}) verschoben, ab dem die Energie des externen Feldes groß genug ist, die AFM-Kopplung aufzubrechen. Dadurch beginnt die Magnetisierung der zweiten FM-Schicht zu rotieren, wodurch sich der Widerstand der Struktur ändert, bis wieder eine parallele Ausrichtung vorliegt.

Weitere unterschiedliche Kennlinien lassen sich zudem über Schichtbreiten, Materialien und Ausrichtung der Magnetisierungen im Nullfeld zueinander erreichen. Zudem besitzen MR-Sensoren, da es sich um ein magnetisches Material handelt, eine eigene Hysterese. Diese hängt sehr stark vom Material, dem Aufbau (z.B. beeinflusst die Breite der GMR-Streifen die Formanisotropie) oder den Schichtdicken ab [115].

In dieser Arbeit werden Spinventil-Sensoren des in Abb. 2.12 (b) gezeigten Aufbaus verwendet. Diese Sensoren werden in Kap. 3 und 5 vorgestellt.

2.4.2 Weitere MR-Sensoren

AMR - Anisotroper Magnetwiderstand

Ein weiterer Magnetwiderstand ist der anisotrope Magnetwiderstand (AMR, engl. anisotropic magnetoresistance), der schon im 19. Jh. von William Thompson entdeckt wurde. Er lässt sich in allen ferromagnetischen Materialien finden. Der AMR beruht auf einer anisotropen Streuung der Leitungselektronen an den Atomorbitalen.

Die Ladungsverteilung der Elektronen in der Atomhülle ist aufgrund der Spin-Bahn-Wechselwirkung asymmetrisch. Bei magnetischen Werkstoffen werden die Spins durch ein Magnetfeld ausgerichtet, wodurch sich ebenfalls die Ladungsverteilungen drehen. In Abb. 2.13 ist dieser Zusammenhang darge-

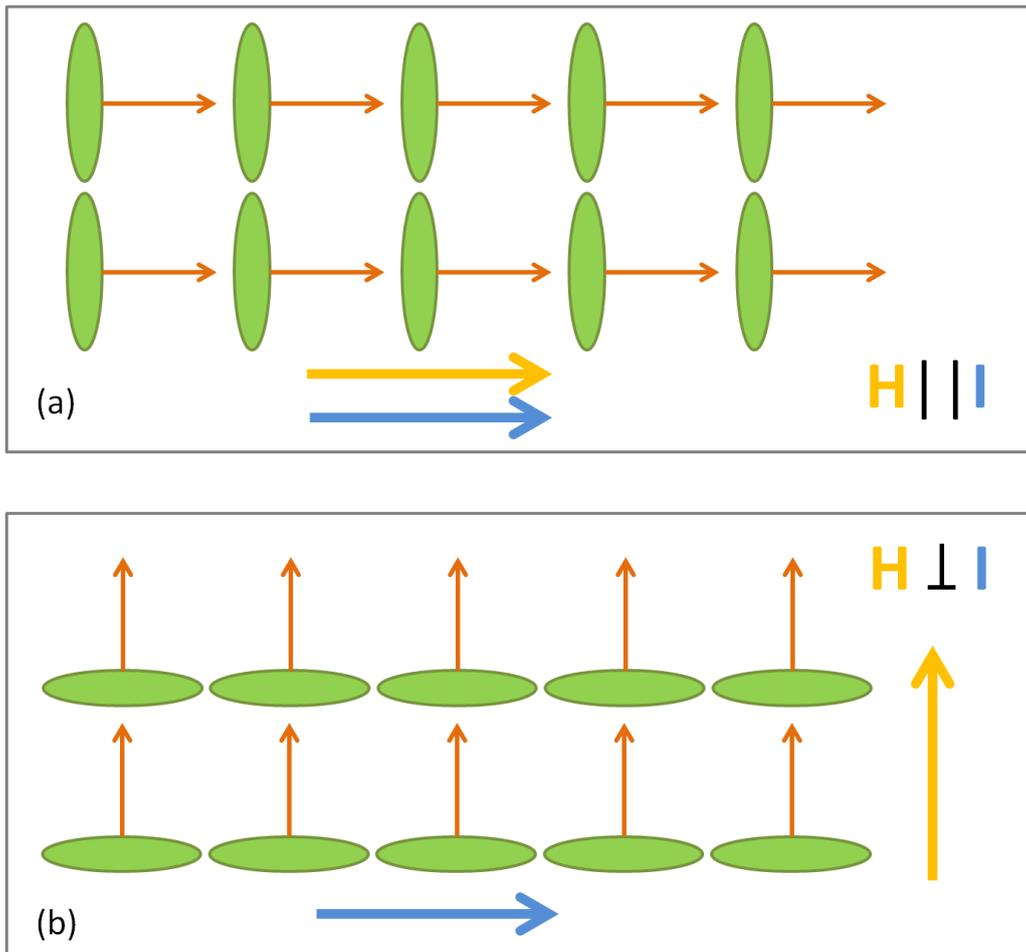


Abbildung 2.13: AMR-Effekt: Drehung der Atomorbitale (grüne Ellipsen) aufgrund der Spin-Bahn-Wechselwirkung durch ein externes Magnetfeld (orangener Pfeil). Dadurch verändert sich der Streuquerschnitt für die Leitungselektronen (Stromrichtung angedeutet durch den blauen Pfeil). In (a) sind Strom und Magnetfeld parallel ausgerichtet. (b) Magnetfeld ist 90° gedreht zu (a). Dadurch erfolgt eine Drehung der Orbitale und der Streuquerschnitt ändert sich bei gleichbleibender Stromrichtung (nach [116]).

stellt. Je nach Magnetfeldrichtung verändert sich für eine Stromrichtung der Querschnitt und somit die Streuwahrscheinlichkeit der Leitungselektronen. Dies wiederum führt zu einem unterschiedlichen Widerstand. Im Gegensatz zum GMR-Effekt besitzt der AMR eine 180° -Periode. Der AMR-Effekt kann bis zu 2-3% betragen [117, 118]. Allerdings handelt es sich im Vergleich zu den anderen MR-Effekten um eine kleine prozentuale Widerstandsänderung. Gleichwohl sind mit Sensoren, basierend auf dem AMR-Effekt, Feldempfindlichkeiten von bis zu $200 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 Hz [119] bzw. bei Frequenzen von 1 kHz sogar bis zu $12 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ [120] möglich. Zudem besitzt der AMR-Sensor bei niedrigen Frequenzen eine bessere Rauschempfindlichkeit verglichen mit GMR- und TMR-Sensoren [121]. Die Hysterese von AMR-Sensoren ist über einen großen Bereich nicht-linear. Durch den Einsatz von Barberpoles lassen sich hier lineare Kennlinienverläufe realisieren [100].

TMR - Tunnelmagnetwiderstand

Der GMR besitzt als Zwischenschicht einen nichtmagnetischen Leiter. Wird stattdessen ein Isolator als Zwischenschicht verwendet, stellt dieser eine Barriere für die Leitungselektronen dar (auch Supraleiter werden mittlerweile als Zwischenschicht eingesetzt [122]). In Abb. 2.14 (a) ist das TMR-Schichtsystem dargestellt. Der TMR wurde 1975 erstmals von Julliere vorgestellt [12]. Hier beeinflussen die Magnetisierungsrichtungen der ferromagnetischen Schichten zueinander die Tunnelwahrscheinlichkeit der Leitungselektronen, wodurch sich ähnlich zum GMR-Effekt der Widerstand ändert.

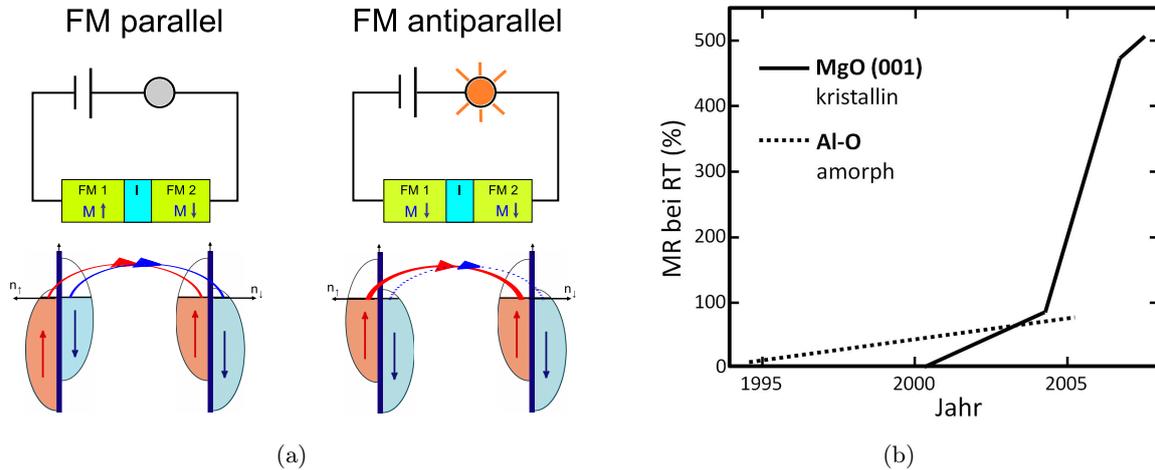


Abbildung 2.14: (a) Prinzip des TMR-Effektes. (b) Chronologie des TMR-Effektes in % für AlO- bzw. MgO-Isolatorschichten (nach [123]).

Wiederum kann das Zweispin Kanalmodell zur Erklärung der unterschiedlichen Widerstände herangezogen werden. Antiparallele Ausrichtung führt zu einem hohen Widerstand, parallele Ausrichtung zu einem niedrigen Widerstand. Dies liegt daran, dass am Fermi level bei ferromagnetischen Materialien für die Spinrichtungen der Elektronen unterschiedlich viele Zustände zur Verfügung stehen (siehe Abb. 2.14 (a) unten). Dadurch wird je nach Spin- und Magnetisierungsrichtung die Streuung größer oder kleiner, je nachdem wie sich die Zustandsdichte ändert. Dadurch ergeben sich unterschiedlich große Widerstände.

In (b) sind in einem zeitlichen Verlauf die prozentualen Widerstandsänderungen von TMRs mit unterschiedlichen Isolator-Zwischenschichten gezeigt. Die ersten TMR-Strukturen besaßen als Isolator eine AlO-Schicht, mit der bei Raumtemperatur Widerstandsänderungen von 24% und mehr erreicht wurden [124, 125]. Gegenwärtig verwendet man vor allem MgO-Isolationsschichten, welche einen wesentlich höheren Effekt erzielen [126, 127]. Der Grund hierfür ist der amorphe Zustand der AlO-Schicht. Hingegen sind MgO-Barrieren kristallin und besitzen eine geordnete Struktur, wodurch gerade bei der antiparallelen Ausrichtung die Tunnelwahrscheinlichkeit stark abnimmt. Dadurch werden auch höhere TMR-Effekte erzielt. Bei Raumtemperatur (RT) sind Werte von 500% möglich [123]. Hierdurch ist trotz des höheren elektrischen Widerstandes, und des damit verbundenen höheren Nyquist-Rauschens, eine Auflösung im pT-Bereich mit TMR-Sensoren ohne weiteres möglich [128, 129]. Wird SrTiO₃ als Tunnelbarriere eingesetzt, sind nach Tsymbal *et al.* [130] bei tiefen Temperaturen TMR-Effekte von bis zu 1800% möglich.

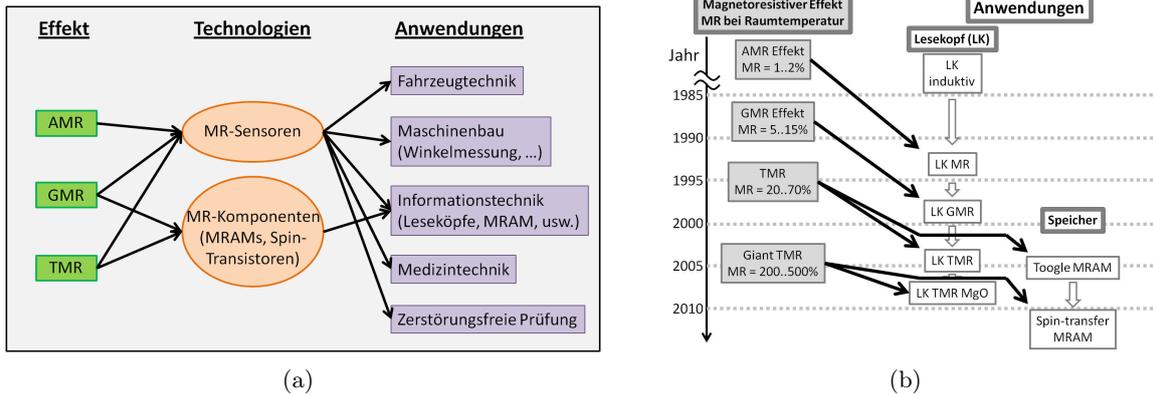


Abbildung 2.15: (a) Mögliche MR-Anwendungen (nach [116]). (b) Chronologische Auflistung der einzelnen MR-Effekte und ihr Einsatz als Leseköpfe in der Festplattentechnologie (nach [123]).

Einsatz von MR-Sensoren - allgemein

Eingesetzt werden die MR-Sensoren in vielen Bereichen als Magnetfeldsensoren [131, 132] wie z.B. in der Automobilindustrie [113, 133] u.v.m. (siehe Abb. 2.15). Allerdings traten die MR-Sensoren ihren Siegeszug vor allem als Leseköpfe in der Festplattenindustrie an [134–137]. Als Beispiel hierfür ist in Abb. 2.15 (b) die Nutzung der einzelnen MR-Effekte in der HDD-Technologie chronologisch aufgeführt.

Daneben finden sich Anwendungen im Bereich der magnetischen Biosensorik [138–141], zur Strommessung [142, 143] oder zur Positionsbestimmung [144] und als Winkel- und Geschwindigkeitsmesser [145]. Zudem lassen sich MR-Sensoren als Vibrationssensor [146] oder z.B. zum Mapping von Permanentmagneten [147] verwenden. Beispiele für den Einsatz von MR-Sensoren in der ZfP sind im folgenden Abschnitt aufgeführt.

2.5 Magnetfeldsignale beim Einsatz von GMR-Sensoren in der Streuflussprüfung

Der Einsatz von GMR-Sensoren zur Detektion von Streufeldern führt zur Aufzeichnung von Magnetfeldern, die neben dem eigentlichen „Nutzsignal“ zusätzliche Informationen in Form von Stör- und Hintergrundsignalen beinhalten:

$$H_{\text{Signal}} = H_{\text{Nutzsignal}} + H_{\text{Störsignale}} + H_{\text{Hintergrund}} \quad (2.26)$$

Die Magnetfeldgröße $H_{\text{Nutzsignal}}$ stellt die eigentlich zu messende Größe dar. In der Streuflussprüfung ist dies das Streufeld, welches durch einen Defekt an der Oberfläche entsteht (siehe hierzu Abschnitt 2.2 in diesem Kapitel). Damit eine Detektion der Defekte stattfinden kann, ist Bedingung, dass dieses Nutzsignal - das Streufeldsignal nimmt je nach Größe der Defekte und des anregenden Feldes Werte im Bereich von wenigen A/m bis zu kA/m an - größer sein muss als die zusätzliche Komponente $H_{\text{Störsignale}}$ des gemessenen Signals. Das Hintergrundfeld $H_{\text{Hintergrund}}$ wirkt als ein zusätzlicher Offset. Verursacht werden Hintergrundfelder z.B. durch die Formanisotropie bzw. das Magnetfeld einer aufmagnetisierten Platte. Dies kann insbesondere bei der Verwendung von Magnetometern (Messung des Magnetfeldes absolut) zu einer geringeren Datenaufösung führen. Gradiometer hingegen ermöglichen es, durch die Messung einer Magnetfelddifferenz statische Hintergrundfelder aus dem Signal zu entfernen.

Das Störsignal $H_{\text{Störsignale}}$ wiederum setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Diese Anteile können sehr stark in Amplitude und Frequenz schwanken. Zu ihnen gehören:

- magnetisches Rauschen der GMR-Sensoren,
- elektronisches Rauschen (MR-Elemente, elektronische Bauteile),
- „Prüfteilrauschen“ (Permeabilitätsschwankungen, Oberflächenrauheit),
- Vibrationen Messtisch,
- Anregungsrauschen (Abstand Joch, Spulenstrom, ...).

Das magnetische Rauschen ist besonders in der Nähe des Koerzitivfeldes am stärksten. Hier können spontane magnetische Umklappprozesse zu einer Erhöhung des magnetischen Rauschens innerhalb von MR-Strukturen führen [129,148]. Elektronisches Rauschen beinhaltet insbesondere Nyquist-Rauschen, $1/f$ -Rauschen und temperaturabhängiges Rauschen elektronischer Bauteile [149–151]. Diese Rauschanteile sind statistischer Natur.

Hingegen ist das in der Auflistung folgende „Prüfteilrauschen“ nicht im eigentlichen Sinne als Rauschen zu verstehen. Permeabilitätsschwankungen an der Materialoberfläche sowie Rauheit treten lokal auf und besitzen einen festen Bezugspunkt. Jedoch sind gerade bei einem unbekanntem Probekörper diese Anteile am Störsignal nicht bekannt und können die Messung und insbesondere die Signalauffö- sung erheblich beeinflussen.

Durch Bewegung auf dem Messtisch sowie durch äußere Vibrationen können sich ebenfalls Rauschgrößen ergeben. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, den Messplatz durch geeignete Gegenmaßnahmen vor diesen Einflüssen zu schützen (siehe Kap. 3). Dieser befindet sich auf einer vibrationsgedämpften, schweren Granitplatte, um diese Einflüsse weitestgehend zu minimieren.

Das Anregungsrauschen wird durch Abhebung einer Anregungseinheit verursacht, z.B. durch zu ungenau gefertigte Laufrollen. Die Folge davon ist, dass sich der magnetische Widerstand ständig verändert, wodurch auch das Signal beeinflusst wird. Zudem wird ein Spulensystem eingesetzt, um das anregende Magnetfeld zu erzeugen (siehe Kap. 7). Auch hier wird Rauschen in das System integriert, welches die Messungen stört.

Einige „Rauschgrößen“, z.B. das Anregungsrauschen durch ungleichmäßig gefertigte Laufrollen bzw. die Permeabilitätsschwankungen, können mithilfe geeigneter Filter aufgrund ihrer Natur aus dem Signal extrahiert werden, falls dies nötig wird. So induzieren z.B. ungenaue Laufrollen ein zusätzliches Sinussignal, welches gleichmäßig im Signal enthalten ist. Permeabilitätsschwankungen lassen sich ebenfalls aufgrund ihrer Clusterbildung berücksichtigen.

Um jedoch weitere Rauschgrößen und deren Wirkung auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu berücksichtigen, sind zusätzliche Gegenmaßnahmen nötig. Hier kann eine sensornahe Verstärkung durchgeführt werden. Eine Möglichkeit liegt im Einsatz von Filtern, welche Frequenzen außerhalb des Frequenzbereiches eines Defektes (siehe Abschnitt 5.4.2 in Kap. 5) dämpfen. Jedoch lassen sich nie alle Einflüsse unterdrücken, wodurch immer eine untere Grenze existiert, ab der die interessanten Messsignale nicht mehr messbar sind. Hier gilt es zu versuchen, das System mit geeigneten Gegenmaßnahmen zu unterstützen, damit diese Schwelle so niedrig wie möglich gehalten wird.

2.6 POD - Probability of Detection

Für die Validierung eines neuen Prüfsystem ist zusätzlich zu einem Vergleich mit etablierten Prüfmethoden (Kap. 6) eine Untersuchung zur Detektionswahrscheinlichkeit (Kap. 9) bezüglich verschiedener Rissparameter, wie z.B. der Risstiefe, nötig. Zur Detektionswahrscheinlichkeit gehört zudem eine Analyse der Falschalarmrate, welche, sollte sie zu hoch sein, zu unnötigen Kosten führen kann. Im folgenden Abschnitt werden hierzu die Werkzeuge zur Aufstellung einer POD (engl.: Probability of Detection) sowie der Falschalarmrate (PFA; engl.: Probability of False Alarm) vorgestellt.

Allgemeine Vorbemerkungen

Die Detektion sehr kleiner Risse (Fehler im Material) ist von großer Bedeutung, um die Sicherheit verschiedenster Komponenten zu gewährleisten. Das bedeutet, dass ein Verfahren sicherstellen muss, diese Fehler im Rahmen der Anforderungen zuverlässig zu finden.

Allerdings ist gerade im unteren Bereich der Detektionsgrenze eines Verfahrens bezogen auf einen speziellen Defektparameter der Umstand gegeben, dass nicht alle Fehler gleicher Größe gleichermaßen gefunden werden. Dies begründet sich auf Messunsicherheitsfaktoren wie internes Auflösungsvermögen (elektrisches Rauschen, sensorabhängige Einflussgrößen, Vibration, thermische Drift usw.). Auch kann eine Wiederholung der Prüfung dazu führen, dass derselbe Fehler bei der einen Messung detektiert wird, aber bei einer weiteren Prüfung übersehen werden kann. In dem Fall ist keine genaue Aussage für diesen Defekt zu treffen. Ebenfalls können ähnliche Fehler zu einer unterschiedlichen Detektionswahrscheinlichkeit führen.

Um ein Maß für die Detektionswahrscheinlichkeit bestimmter Fehler in einem Material zu erhalten, bieten sich statistische Untersuchungen an, mit denen POD-Kurven erstellt werden. Mit diesen Kurven lässt sich dann abschätzen, ob ein Fehler gefunden wird bzw. mit welcher Wahrscheinlichkeit das der Fall ist. Früher wurden für die Aufstellung solcher Kurven zahlreiche Versuchsreihen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Fehler (weit über hundert verschiedene Fehler) benötigt, damit zum Beispiel bezüglich der Risttiefe eine Aussage getroffen werden konnte. Hier wurden alle Defekte geprüft und je nachdem, ob sie gefunden wurden, als „Hit“ gezählt, ansonsten als „Miss“. Dadurch erhielt man bei einer hohen Anzahl an Defekten in Abhängigkeit von der zu untersuchenden Größe eine Wahrscheinlichkeit, diesen Fehlertyp zu finden. Diese Methode besitzt auch heute die größte Aussagekraft.

Steht eine hohe Anzahl von Fehlern nicht zur Verfügung, dies ist aus Kostengründen meistens der Fall, lassen sich statistische Methoden anwenden, um dennoch eine Detektionswahrscheinlichkeit aufstellen zu können. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass diesen Verfahren enge Grenzen gesetzt sind. Eine Mindestanzahl an Fehlern in einem gewissen Detektionsbereich ist nötig, damit die Aussage Bestand hat.

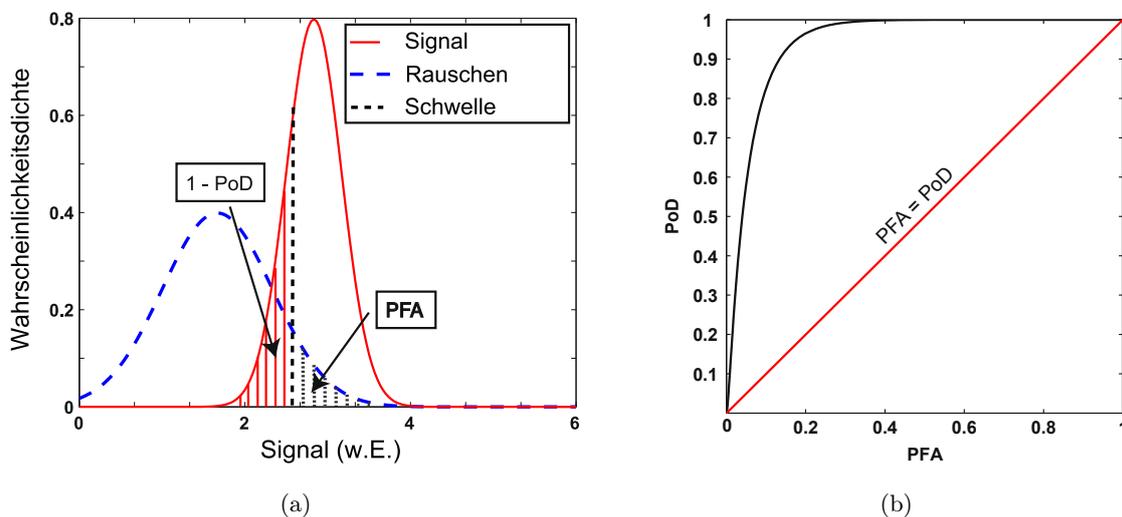


Abbildung 2.16: (a) Darstellung der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Rauschens und des Signals hervorgerufen durch einen Defekt. Je nach Setzen einer Schwelle werden oberhalb dieser neben den Defektsignalen auch „falsche“ Signale als Defekt registriert. (b) ROC-Kurve: POD-Werte für einen bestimmten Defektparameter (z.B. die Defekttiefe) als Funktion der PFA-Werte für unterschiedliche Detektionsschwellen (nach [152]).

Neben der POD-Kurve (die Theorie von POD-Kurven wird weiter unten in diesem Abschnitt ausführlich erläutert) ist auch die Betrachtung der Falschalarmrate (PFA) nötig. Diese setzt sich aus detektierten Ereignissen zusammen, deren Ursache nicht ein Defekt, sondern zum Beispiel ein über einer Schwelle liegender Rauschwert im Messsignal ist. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.16 (a) abgebildet. Hier ist die Wahrscheinlichkeitsdichte des Rauschens (blaue, gestrichelte Kurve) und des Defektsignals (rote Kurve) normalverteilt als Funktion der Amplitude des Messsignals dargestellt. Je nach Setzen einer Detektionsschwelle (gestrichelte Linie im Diagramm) setzen sich die Ereignisse über dieser Schwelle zu unterschiedlichen Anteilen aus Defektsignalen und Rauschsignalen (in der Abbildung mit PFA kenntlich gemacht), die als Defektsignale detektiert werden, zusammen [152]. Wird die Schwelle erhöht, nimmt die Falschalarmrate zwar ab (die meisten Rauschsignale liegen nun anteilmäßig unterhalb der Schwelle), allerdings wird hierdurch ebenfalls die Detektionswahrscheinlichkeit von Defekten reduziert. Wird die Schwelle herabgesetzt, werden zwar zunehmend kleine Defekte registriert, es werden hierdurch aber auch Rauschsignale als Defekt ereignis detektiert. Dies kann dazu führen, dass fehlerfreie Komponenten als Ausschuss aussortiert werden. Gerade dieser Punkt ist für die Industrie wichtig, da er einen erheblichen Kostenfaktor darstellen kann. Das genaue Maß zum Setzen der Schwelle zu finden, wird maßgeblich durch die POD und die PFA beeinflusst und es muss abgewogen werden, ab welcher Schwelle sich Kosten versus Sicherheit die Waage halten.

In dieser Arbeit werden die PFA-Kurven ermittelt, indem falsche Positivanzeigen (ein Rauschsignal über einer Detektionsschwelle wird als Defekt gewertet) in Abhängigkeit von der gewählten Schwelle gezählt und schließlich in Prozent der gesamten Anzahl aller Messwerte angegeben werden. Ist man im Besitz einer POD und einer PFA lässt sich hieraus eine ROC-Kurve (engl.: Receiver Operating Characteristic; Grenzwertoptimierungskurve), wie sie in Abb. 2.16 (b) dargestellt ist, erstellen. Dabei wird die POD für einen festen Wert, wie z.B. die Risstiefe, als Funktion der PFA dargestellt. Eine Zunahme der PFA ist gleichbedeutend mit einem Herabsetzen der Detektionsschwelle, wodurch Defekte definierter Größe zunehmend registriert werden können und sich die POD-Kurve der 100% Detektionswahrscheinlichkeit annähert. Im idealen Fall stellt die ROC-Kurve den Zusammenhang dar, dass bei jedem PFA-Wert 100% Detektionswahrscheinlichkeit auftritt. Dies ist aufgrund der Zusammensetzung der Messsignale aus Defekt- und Rauschsignalen nicht möglich. Die ROC-Kurve dient aber als Bewertung eines Verfahrens, bei dem PFA und POD in einen Zusammenhang gesetzt werden. Eine Verbesserung eines Systems ist hierbei gleichbedeutend mit einer Zunahme der POD bei gleichen PFA-Werten, weshalb ROC-Kurven gerade für die industrielle Anwendung eines Prüfverfahrens wichtig sind.

Im Folgenden werden nun verschiedene Methoden zur Aufstellung einer POD-Kurve dargestellt. Zusätzlich werden Grenzen angegeben, die es gilt, bei der POD-Analyse einzuhalten. Die benötigten statistischen Methoden, welche in den folgenden Absätzen dieses Grundlagenkapitels beschrieben werden, sind auf die Publikation von Berens [153] zurückzuführen.

Statistisches Verhalten der ZfP-Prozesse

Allgemein:

Viele Faktoren beeinflussen die korrekte Entscheidung „Riss“, oder „kein Riss“. In der ZfP führt die Anregung (zum Beispiel ein Magnetfeld) zu einer Signalantwort und schließlich zu einer Interpretation der Antwort. Wiederholungen der Prüfung können wegen Unterschieden im Aufbau, der Kalibrierung usw. zu unterschiedlichen Ergebnissen bzw. Interpretationen führen. Unterschiedliche Fehler gleicher Größe können unterschiedliche Signale wegen unterschiedlicher Materialeigenschaften, Rissgeometrien und Rissorientierungen liefern. Zusätzlich ist die Interpretation der Ergebnisse beeinflusst vom Prüfer selbst.

Zwei Methoden zur Analyse der Detektionswahrscheinlichkeit finden in der Praxis Anwendung:

Methode 1: Hit/Miss-Analyse: Wird ein Fehler erkannt oder nicht, führt dies zu einer binären Entscheidung: 0 oder 1. Hier wird für die POD-Kurve die Binomialverteilung eingesetzt

Methode 2: In der Signalantwort ist allerdings weit mehr Information enthalten als nur die Aussage, ob sich das Signal über einer Detektionsschwelle befindet oder nicht. Die Signalantwort kann z.B. mit der Größe (Tiefe) des Defektes korrelieren. Dieses Verfahren wird dann in \hat{a} vs. $\ln a$ -Methode genannt. Für die statistische Analyse wird hier die Normalverteilung verwendet.

POD Hit/Miss-Daten:

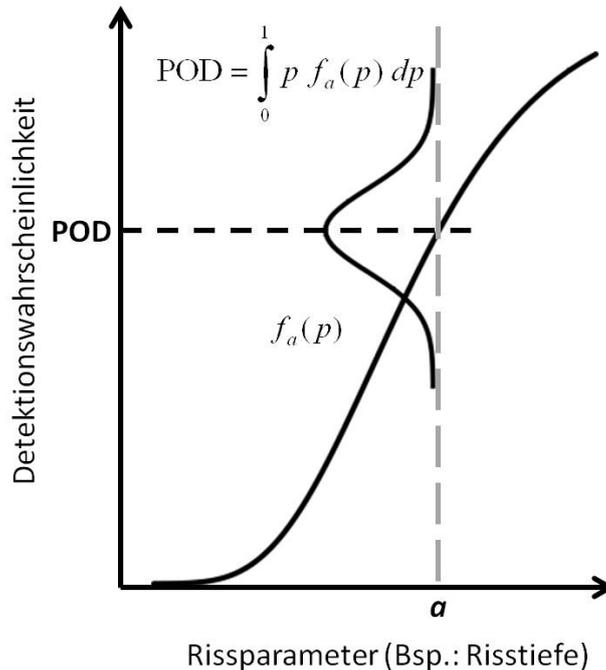


Abbildung 2.17: Darstellung einer POD-Kurve mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für einen festen Defektparameter a , z.B. der Risslänge (nach [153]).

Die $POD(a)$ -Funktion ist definiert als Wahrscheinlichkeit für alle Defekte gleicher Tiefe a , mit einem speziellen ZfP-Verfahren detektiert zu werden. Wird angenommen, dass alle Fehler ihre eigene Detektionswahrscheinlichkeit p besitzen und die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Detektionswahrscheinlichkeit durch $f_a(p)$ gegeben ist (siehe Abb. 2.17), ist die bedingte Wahrscheinlichkeit eines zufällig ausgewählten Fehlers aus der Menge aller mit der gleichen Tiefe a gegeben durch $pf_a(p)dp$. Die nicht bedingte Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Fehlers ist:

$$POD(a) = \int_0^1 pf_a(p)dp \quad (2.27)$$

Daraus folgt, dass $POD(a)$ der Mittelwert der Detektionswahrscheinlichkeit für Fehler der Größe a ist. Die Gleichung impliziert zudem, dass die POD-Funktion die Kurve ist, die durch die Mittelwerte von individuellen Dichtefunktionen der Detektionswahrscheinlichkeiten geht. Diese Kurve ist zudem die Regressionsgleichung und bereitet die Basis für verschiedene POD-Modelle. Hierbei hat sich für die ZfP-Daten die Verwendung des Logarithmus' des Quotienten aus der Wahrscheinlichkeit p , dass

ein Ereignis eintritt, und der Wahrscheinlichkeit, dass dies nicht der Fall ist, $\log \frac{p}{1-p}$, als bestes Modell bewährt und wird mit dem Begriff „log-odds“ bezeichnet [154].

Zwei mathematisch äquivalente Ausdrücke lassen sich aufstellen:

$$\text{POD}(a) = \frac{\exp(\alpha + \beta \ln a)}{1 + \exp(\alpha + \beta \ln a)}, \quad (2.28)$$

sowie nach Umformung:

$$\ln \left[\frac{\text{POD}(a)}{1 - \text{POD}(a)} \right] = \alpha + \beta \ln a. \quad (2.29)$$

In der zweiten Formel sind die log-odds eine lineare Funktion. Bei einer großen Datenmenge können die Parameter mit einer Regressionsanalyse bestimmt werden. Wenn nur wenige Datenpunkte vorhanden sind, muss die Abschätzung der Regressionsparameter mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode gefunden werden. α und β lassen sich nicht physikalisch interpretieren. Eine mathematisch äquivalente Form zu Gl. 2.29 ist:

$$\text{POD}(a) = \left\{ 1 + \exp - \left[\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (2.30)$$

Hier gilt $\mu = \ln a_{0,5}$, d.h. es handelt sich um die Größe a der Defekte, bei der 50% der Fehler detektiert werden. σ im Nenner bedeutet, dass je kleiner der Wert ist, desto steiler wird die Kurve. Diese Parameter sind mit denen von Gl. 2.29 folgendermaßen verknüpft:

$$\mu = \frac{-\alpha}{\beta}, \quad (2.31)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\beta\sqrt{3}}. \quad (2.32)$$

POD von Signalgröße a

Wird die Signalantwort \hat{a} quantifiziert, bei der magnetischen Streuflussmethode mit GMR-Sensoren wird das austretende Magnetfeld (also $\hat{a} = H_{\text{Streu}}^{\text{feld}}$) gemessen, und ist diese abhängig von der Defektgröße (z.B. der Tiefe), dann folgt daraus, dass \hat{a} eine Bewertung zur Defektdetektion liefert. Wird zusätzlich eine untere Signalgrenze a_{dec} , ab der der Defekt als detektiert angesehen wird, bestimmt, so wird beim Erreichen bzw. Übertreten dieser Schwelle der Fehler als gefunden angesehen.

Die POD-Funktion wird in diesem Fall durch die Beziehung zwischen \hat{a} und a bestimmt. Die Funktion $g_a(\hat{a})$ gibt die Wahrscheinlichkeitsdichte von \hat{a} -Werten für eine feste Größe der Defekte a an. Dann gilt:

$$\text{POD}(a) = \int_{\hat{a}_{\text{dec}}}^{\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a}. \quad (2.33)$$

Die Korrelation zwischen \hat{a} und a definiert den Mittelwert von $g_a(\hat{a})$:

$$\hat{a} = \mu(a) + \delta. \quad (2.34)$$

$\mu(a)$ ist der Mittelwert von $g_a(\hat{a})$ und δ ist ein Zufallsfehler für Unterschiede zwischen \hat{a} und $\mu(a)$. Eine lineare Beziehung zwischen a und \hat{a} mit normalverteilten Abweichungen muss bestimmt werden (für die Bestimmung der Parameter mittels einer Regression). Je nach Streuung der Messwerte um die Regressionsgeraden, welche konstant sein müssen, wird zwischen nicht-logarithmischer, halb-logarithmischer bzw. logarithmischer Darstellung der Daten \hat{a} vs. a ausgewählt. In den meisten Fällen

bewährt sich für die Betrachtung der ZfP-Daten die logarithmische Darstellung, $\ln a$ bzw. $\ln \hat{a}$. Jedoch muss von Fall zu Fall neu entschieden werden, welche Darstellung, ob a oder $\ln a$ bzw. \hat{a} oder $\ln \hat{a}$, die geringste Streuung besitzt und somit zur Aufstellung der Regressionsgeraden verwendet werden kann [155]. Bezüglich der logarithmischen Darstellung gilt:

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(a) + \delta. \quad (2.35)$$

Hierbei ist δ normalverteilt mit dem Mittelwert 0 und konstanter Standardabweichung σ_δ . Daraus ergibt sich für die POD-Funktion:

$$\text{POD}(a) = \text{P} [\hat{a} > \hat{a}_{\text{dec}}] \quad (2.36)$$

$$\text{POD}(a) = \text{P} [\ln(\hat{a}) > \ln(\hat{a}_{\text{dec}})] \quad (2.37)$$

$$\text{POD}(a) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(\hat{a}_{\text{dec}}) - \beta_0 + \beta_1 \ln(a)}{\sigma_\delta} \right] \quad (2.38)$$

Φ ist die Verteilungsfunktion der Standardverteilung. Aufgrund der Symmetrieeigenschaften von Φ ergibt sich:

$$\text{POD}(a) = \Phi \left\{ \frac{\ln(a) - [\ln(\hat{a}_{\text{dec}}) - \beta_0]/\beta_1}{\sigma_\delta/\beta_1} \right\} \quad (2.39)$$

mit dem Erwartungswert und der Varianz:

$$\mu = \frac{\ln(\hat{a}_{\text{dec}}) - \beta_0}{\beta_1} \quad (2.40)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_\delta}{\beta_1}. \quad (2.41)$$

Diese Parameter gilt es über eine Regression zu ermitteln, um die POD-Kurve aufstellen zu können.

Maximum Likelihood

Da bei der POD-Analyse meistens nur eine vergleichsweise geringe Anzahl an Defekten zur Verfügung steht, müssen die Parameter über das Maximum-Likelihood-Verfahren (MLH) folgendermaßen bestimmt werden: X_i repräsentiert die Ausbeute aus der i -ten Prüfung und $f(X_i; \boldsymbol{\theta})$ die Wahrscheinlichkeit X_i zu erhalten. Hierbei ist $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)'$ ein Vektor mit insgesamt k -Parametern des Wahrscheinlichkeitsmodells. Bei einer Hit/Miss-Analyse wäre X_i 1 oder 0 und $\boldsymbol{\theta} = (\mu, \sigma)'$. Bei der \hat{a} vs a Analyse ist X_i der \ln der Signalantwort und $f(X_i; \boldsymbol{\theta})$ ist die Dichtefunktion der Normalverteilung mit dem Erwartungswert und der Standardabweichung $\boldsymbol{\theta} = (\beta_0 + \beta_1 \ln a, \sigma_\delta)'$. X_1, \dots, X_n sind unabhängige Messungen von insgesamt n Defekten. Für ein bestimmtes Ergebnis ist die Likelihood-Funktion gegeben durch:

$$L(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^{i=n} f(X_i; \boldsymbol{\theta}). \quad (2.42)$$

X_i ist bekannt, weshalb Gleichung 2.42 eine Funktion von $\boldsymbol{\theta}$ ist. Der MLH-Erwartungswert ist der Wert, der die Funktion $L(\boldsymbol{\theta})$ maximal werden lässt. Da bei der ZfP innerhalb der POD-Analyse meistens mit den logarithmischen Werten gerechnet wird, wird auch die Likelihood-Funktion logarithmisch betrachtet und es ergibt sich:

$$\log L(\boldsymbol{\theta}) = \sum \log f(X_i; \boldsymbol{\theta}). \quad (2.43)$$

Die Maximum-Likelihood-Erwartungswerte sind dann für ein Gleichungssystem aus k Gleichungen gegeben durch:

$$\frac{\partial \log L(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} = 0; i = 1, \dots, k. \quad (2.44)$$

Für die Modelle zur Zuverlässigkeitsprüfung innerhalb der ZfP sind die MLH-Erwartungswerte invariant, konsistent und effizient. Des Weiteren sind sie asymptotisch normalverteilt mit den Erwartungswerten gegeben durch θ_i . Die Varianz-Kovarianz-Matrix ist gegeben durch:

$$\mathbf{V} = \mathbf{I}^{-1}. \quad (2.45)$$

Hierbei ist \mathbf{I} die Informationsmatrix, deren Elemente I_{ij} die Erwartungswerte sind:

$$I_{ij} = -E \left[\frac{\partial^2}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \log f(X_i; \boldsymbol{\theta}) \right]; i, j = 1, \dots, k. \quad (2.46)$$

Je nach der Auswahl des POD-Modells (Hit/Miss oder $\ln \hat{a}$) werden hier die einzelnen Funktionen (siehe oben) der Maximum-Likelihood-Bestimmung und der Berechnung des Konfidenzbereiches zugrunde gelegt. Eine weitere Ausführung der Berechnung ist von Berens [153] detailliert geschildert.

Konfidenzkurven einer POD-Funktion

Der untere Konfidenzbereich einer POD-Kurve ist ein konservatives Maß für die Empfindlichkeit einer Prüfmethode bzw. eines Prüfungssystems bezüglich der Anzahl und Größe der Defekte, die untersucht werden. Mit Hilfe der Varianz-Kovarianz-Matrix, der Erwartungswerte und den zur POD-Kurve gehörenden Modellfunktionen lassen sich diese Bereiche berechnen.

Im Fall der Hit/Miss-POD sind nach Gl. 2.29 bzw. Gl. 2.32 zwei Erwartungswerte zu berechnen, weshalb die Informationsmatrix in diesem Fall eine 2×2 -Matrix ist. Bei der Ermittlung der Informationsmatrix im Fall des POD-Modells, bei dem die Grundlage die Signalamplitude \hat{a} ist, werden nach Gl. 2.35 drei Erwartungswerte benötigt. Hierdurch ergibt sich für die Informationsmatrix eine 3×3 -Matrix.

Am Beispiel der Hit/Miss-Analyse liegt der POD eine logarithmische Funktion der Normalverteilung zugrunde, deren Parameter die Erwartungswerte $\boldsymbol{\theta} = (\mu, \sigma)'$ sind. Daraus ergibt sich die Informationsmatrix zu:

$$\mathbf{I}(\mu, \sigma) = \frac{n}{\sigma^2} \begin{bmatrix} k_0 & -k_1 \\ -k_1 & k_2 \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

n gibt die Anzahl der Defekte an. Die Parameter k_0 , k_1 und k_2 werden im Fall der Hit/Miss-Analyse direkt über die Informationsmatrix Gl. 2.46 berechnet. Im Fall des „ $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ “-Modells lassen sich die Werte k_0 , k_1 und k_2 ebenfalls unter Berücksichtigung aller drei Erwartungswerte bestimmen. Für Details und Herleitung wird hierzu auf die Publikation von Berens verwiesen [153].

Die untere Konfidenzkurve ergibt sich zu:

$$\text{POD}_\alpha(a) = \Phi(\hat{z} - h) \quad (2.48)$$

mit der kumulativen Standardverteilung $\Phi(z)$ und

$$\hat{z} = \frac{\ln(a) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (2.49)$$

$$h = \left\{ \frac{\gamma}{nk_0} \left[1 + \frac{(k_0\hat{z} + k_1)^2}{(k_0k_2 - k_1^2)} \right] \right\}^{0,5} \quad (2.50)$$

wobei hier γ für unterschiedliche Konfidenzlevel (α : Angabe in %, meistens wird das 95%-Band betrachtet) und Anzahl der Defekte berechnet werden muss derart, dass gilt [156]:

$$\text{POD}(Q \leq \gamma) = \alpha \quad (2.51)$$

mit $Q = \theta_1^2 + \theta_2^2$. Für Hit/Miss gilt $\theta = (\mu, \sigma)'$ und für „ln \hat{a} vs. ln a “ $\theta = (\beta_0 + \beta_1 \ln a, \sigma_\delta)'$ (siehe Absatz „Maximum Likelihood“ in diesem Abschnitt).

Für die Berechnung der POD-Kurve in dieser Arbeit sowie der Erwartungswerte und der Konfidenzbereiche wird nach dem Militärstandard mh1842 [157] verfahren, wie dies in der POD-Community üblich ist. Zudem wird die Software von Annis [158], einem auf dem Programm „R-Project“ [159] basierenden Softwaretool, eingesetzt, welche alle für die Berechnung einer POD benötigten Funktionen besitzt.

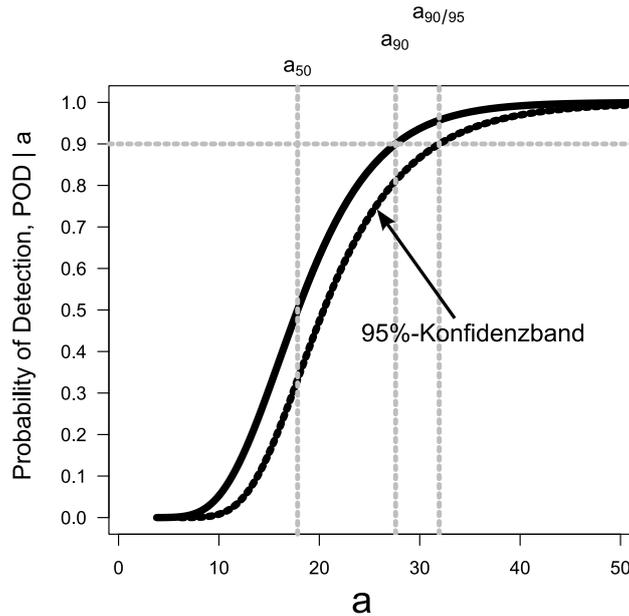


Abbildung 2.18: POD-Kurve mit den drei POD-Werten a_{50} , a_{90} und $a_{90/95}$.

In Abbildung 2.18 ist eine POD-Kurve mit den für die Analyse wichtigen Parametern der Kurve, a_{50} , a_{90} , $a_{90/95}$, dargestellt. a_{50} ist der Erwartungswert μ der Defektgröße, bei dem die POD-Kurve den Wert 0,5 annimmt. Da es sich um eine logarithmische Betrachtung handelt, gilt hier $a_{50} = \exp(\hat{\mu})$. a_{90} entsprechend ist der Erwartungswert bei einem POD-Wert von 0,9 mit $a_{90} = \exp(\hat{\mu} + 1,282\hat{\sigma})$. $a_{90/95}$ entspricht dem Erwartungswert bei $\text{POD} = 0,9$ im unteren Konfidenzband von 95%.

Für einen Vergleich von POD-Analysen muss die Prüfung stets nachvollziehbar sein und ihre Faktoren bzw. die Ausführung muss konsistent zu weiteren Prüfungen mit der gleichen Methode sein (Material, Anordnung der Prüfköpfe, etc.). Nur dann ist ein Vergleich zulässig. Besonders ist hierbei zu berücksichtigen, dass k Prüfungen bei n Fehlern nicht gleich ist zu einer Prüfung mit $k \cdot n$ unterschiedlichen Fehlern.

Die wichtigsten Ursachen, die die POD-Kurve und somit ihre Übertragbarkeit auf andere Untersuchungen beeinflussen, sind:

- unterschiedliche physikalische Materialeigenschaften bei gleich großen Fehlern,
- Reproduzierbarkeit der Defektsignale,
- Faktor Mensch,
- unterschiedlich eingesetzte Geräte.

Aus der Aufstellung folgt, dass insbesondere für den Vergleich einer Prüfmethode mit einer anderen die gleichen Testkörper verwendet werden müssen. Ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Probekörpern, insbesondere auch bei unterschiedlichen Materialien, führt zu einer sinnlosen Aussage und kann nicht gewertet werden. Wenn des Weiteren Defekte der gleichen Größe zu unterschiedlichen Signalen führen, sind viele Wiederholungen der Prüfungen notwendig, um eine Aussage treffen zu können.

Bei den meisten POD-Anwendungen wird die Anzahl an Defekten eher durch die Wirtschaftlichkeit beeinflusst als durch die Erfordernisse einer POD. Dadurch kann die Genauigkeit einer POD nachlassen. Eine POD-Funktion allerdings lässt sich durch die Verwendung der MLH-Funktion schon für eine geringe Anzahl von Defekten erzeugen, jedoch ist die Berechnung der Konfidenzbereiche abhängig von asymptotischen Eigenschaften und somit von einer gewissen Anzahl an Defekten. Bei einer zu geringen Anzahl führt dies zu einer Vergrößerung der Konfidenzbereiche. Eine hohe Anzahl führt zu einer verbesserten Genauigkeit. Liegt nur eine geringe Anzahl vor, können Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden, um die fehlenden Fehlergrößen auszugleichen [160].

Bei **Hit/Miss** sind mindestens 60 Fehler nötig [154, 155, 158]. Bei 30 Fehlern ist zwar Konvergenz bei Erzeugung der Parameter mit Hilfe einer Regression möglich, allerdings kann sich durch fehlende Defekte der Konfidenzbereich verschlechtern. Des Weiteren sollten die Fehler für die Hit/Miss-POD im Intervall zwischen 3 - 97%-Auffindwahrscheinlichkeit liegen [161] (auch schwächere Aussagen lassen sich in der Literatur finden: $a_{0,1}$ bis $a_{0,9}$ [153]). Außerhalb des Intervalls ergibt sich kaum ein Zugewinn für die Hit/Miss-Analyse. Das bedeutet allerdings nicht, dass solche Fehler vollkommen unbrauchbar für die POD wären.

Bei der $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ -Methode können oft schon 30 Fehler ausreichend sein. Hier ist die genaue Wahl des Modells (Darstellung der Messdaten zur Defektgröße log oder nicht-log) für die Bestimmung der Parameter entscheidend. Im Vergleich zur Hit/Miss-Analyse gewinnt man durch die Berücksichtigung der Signalamplitude mehr Informationen, wodurch eine gewisse Flexibilität im Design der Experimente erreicht wird. Dadurch lassen sich, wenn nötig, Datenpunkte leichter extrapolieren, wodurch ein Zugewinn erreicht werden kann. Deshalb ist in diesem Fall die Anzahl als nicht so kritisch anzusehen wie bei der Hit/Miss-POD. Auch sind zusätzlich Fehler mit sicherer Detektion von über 97% nicht uninteressant, da sie wegen der Korrelation zwischen Signal und Größe über Information verfügen. Allerdings sollte die Anzahl auch hier eine Schwelle nicht unterschreiten. Diese wird meistens mit mindestens 30 Fehlern angegeben. Eine höhere Anzahl ist wünschenswert und führt immer zu einem vertrauensvolleren Ergebnis. Sollten Fehler mit $>97\%$ -Auffindwahrscheinlichkeit allerdings ein gesättigtes Signal liefern, wodurch eine Regressionsgerade mit konstanter Streuung für alle Messpunkte um diese nicht mehr erreicht wird, müssen diese Fehler für die Analyse zensiert werden.

Sollten bei einer Prüfung nur Ergebnisse auftreten, bei denen Defekte unterschiedlicher Größen zu 100 % bzw. zu 0 % gefunden werden, lassen sich keine Erwartungswerte mehr berechnen. In diesem Fall ist die Aufstellung einer POD-Kurve nicht mehr möglich. Zusätzlich sollte zu einer Aussage immer ein Kontrollkörper ohne Fehler geprüft werden, damit eine Falschalarmrate abgeschätzt werden kann. Falschalarmraten sind gerade für die Industrie interessant, da sie einen hohen wirtschaftlichen Einfluss besitzen. Wenn etwas ausgemustert wird, was hätte eingesetzt werden können, ist das ein zusätzlicher Kostenfaktor.

Für einen Vergleich zwischen verschiedenen Prüfsystemen ist wichtig, dass nur an gleichen Referenzkörpern Untersuchungen durchgeführt werden. Nur dann sind POD-Kurven miteinander vergleichbar. Grundsätzlich ergibt sich bei diesem Vorgehen, dass immer ein Prüfsystem für die gewählte Fehlerart und das gewählte Material am Besten geeignet ist [162]. Bei unterschiedlichen Materialien ergeben sich immer auch unterschiedliche POD-Kurven für die gleichen Fehler [163]. Zudem können sich auch unterschiedliche POD-Kurven ergeben, wenn das statistische Verfahren bei der Hit/Miss-Analyse geändert wird [164]. Dies ist wichtig für die darauffolgende Interpretation der Kurven [165].

Neben einem Vergleich zweier Prüfmethoden, bei dem immer eine für den zu untersuchenden Fall besser abschneiden wird als die andere, können auch beide Verfahren über Datenfusion zusammen betrachtet werden. Hierdurch wird insgesamt eine POD-Kurve erreicht, die besser ist als die einzelnen Ergebnisse der jeweiligen Prüfverfahren [166]. Zudem kann eine POD auch ganz praktisch angewandt werden, wenn über den zeitlichen Verlauf die Signale der Defekte aufgezeichnet werden. Hier können Risswachstumsprozesse in die POD mit einfließen, wodurch anhand der POD-Kurven entschieden werden kann, ab wann ein Fehler ausgebessert werden sollte [167].

3 Experimenteller Aufbau & GMR-Sensoren

3.1 Experimenteller Aufbau

Um hochpräzise, vibrationsarme Messungen mit GMR-Sensoren durchführen zu können, existiert an der BAM ein GMR-Messstand. Dieser besteht aus einem vibrationsgedämpften Hartgesteintisch, aus mehreren Verfahreinheiten für planare und rotationssymmetrische Prüfobjekte und einer Messelektronik, die zum Teil an der BAM entwickelt wurde. Die Steuerung sowie die Koordinaten-korrelierte Datenerfassung der Messungen erfolgen mittels LabVIEW-Programmen.

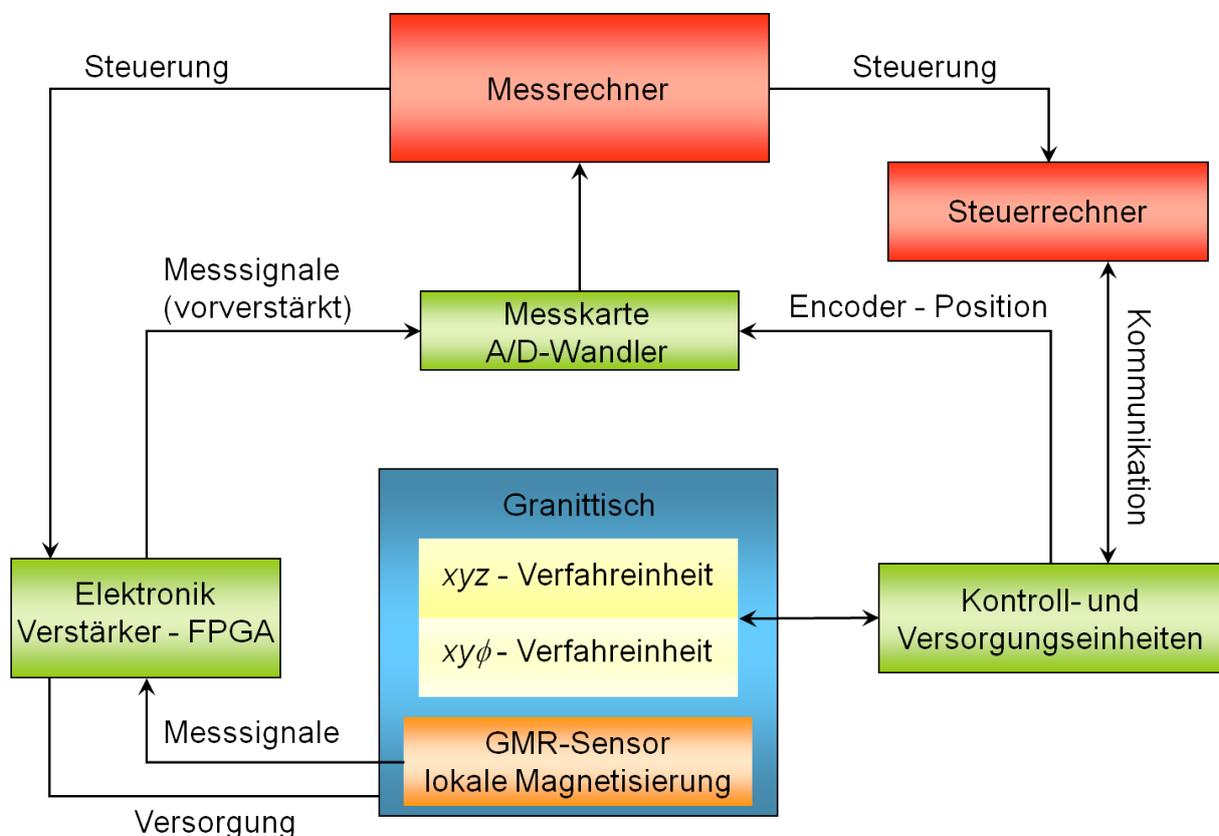


Abbildung 3.1: Flussdiagramm zum Ablauf der Steuerung und Messung des GMR-Messstandes.

In Abb. 3.1 ist ein Schema der Komponenten des Messaufbaus und ihr Zusammenspiel dargestellt. Vom Messrechner aus wird die gesamte Anlage indirekt gesteuert, indem die Steuerbefehle für die Verfahreinheiten an einen separaten Steuerrechner gesendet werden. Hier erst erfolgt das Senden der entsprechenden Befehle an die Versorgungs- und Kontrolleinheiten (Ndrive HLe 20-40, Aerotech Inc.). Diese Einheiten setzen die Verfahrtische in den Betriebszustand bzw. führen die Steuerung und Kontrolle der Bewegung intern durch.

Die Datenerfassung der GMR-Messsignale im Messrechner erfolgt über eine Messkarte mit A/D-Wandler. Die Ansteuerung der Messelektronik sowie die Inbetriebnahme der Vorverstärkerelemente und

Multiplexer findet ebenfalls über den Messrechner statt und wird einmalig vor der Messung durchgeführt. Zusätzlich werden von der Messkarte zur schnelleren Bestimmung der Position die Encodersignale der Kontrolleinheiten direkt ausgelesen. Die Position kann auch softwaregestützt vom Steuerrechner protokolliert und an den Messrechner gesendet werden. Allerdings können hier keine hohen Verfahrensgeschwindigkeiten erreicht werden. Zudem sind diese softwaregestützten Positionswerte bei schnellen Bewegungen nicht äquidistant. Die Aktualisierungsgeschwindigkeit der Software ist hierfür zu langsam und zu ungenau.

Die Verwendung von zwei Rechnern lässt eine Trennung in Datenerfassung mit einem Rechner und Steuerung mit dem zweiten Rechner zu. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Rechnerkapazitäten jeweils nur für einen Bereich der Messdurchführung, Datenaufnahme bzw. Steuerung eingesetzt werden und so insgesamt eine höhere Leistung bezüglich Datenrate und Verfahrensgeschwindigkeit erzielt werden kann.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Messaufbaus sowie ihre Eigenschaften vorgestellt. Neben den hochpräzisen Verfahrenseinheiten sind für die weitere Verarbeitung der Sensorsignale Messkarten, Verstärker und Filter nötig, um neben einer hohen Ortsauflösung auch ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR; engl. signal-to-noise ratio) der Rissignale zu erzeugen.

3.1.1 Granittisch und Verfahrkomponenten

In Abb. 3.2 ist der Granittisch mit den darauf angebrachten Manipulatoren dargestellt. Das Messsystem besteht aus zwei Einheiten, die am Tisch angebracht sind. Dabei handelt es sich zum Einen um eine xyz -Einheit bestehend aus drei Lineareinheiten für planare Objekte und zum Anderen um eine $\phi y_r z_r$ -Einheit für rotationssymmetrische Objekte. Die yz - bzw. $y_r z_r$ -Einheiten positionieren den Sensor. Der x -Tisch und die Rotationseinheit verfahren während der Messung die Prüfobjekte. Bei der Inbetriebnahme wurde darauf geachtet, dass alle Komponenten aufeinander abgestimmt an den Tisch angebracht wurden. Die Ausrichtung erfolgte mit präzise gefertigten Messbalken, wodurch bis auf geringe Fehler innerhalb des tolerierbaren Bereichs eine 90° -Ausrichtung der einzelnen Achsen zueinander erreicht wurde.

Granittisch

Um die GMR-Messungen vor äußeren Vibrationen zu schützen, wurden die Linear- und Rotationseinheiten auf einen etwa 1,7 Tonnen schweren Granittisch aus blauschwarzem, südafrikanischem Naturhartgestein (Impala) aufgebaut. Dieses Material eignet sich insbesondere wegen seiner geringen Wärmeausdehnung als Messgeräteuntergrund. Der Tisch besteht hierbei aus zwei Platten - einer Grundplatte mit einem Gewicht von 1140 kg und einem darauf befestigten u-förmigen Portal mit einem Gewicht von 540 kg. Diese sind dauerhaft miteinander verklebt und montiert. Auf der Grundplatte sind der x -Tisch und die Rotationseinheit angebracht. Am U-Portal selbst sind die yz - bzw. $y_r z_r$ -Sensorverfahrenseinheiten befestigt, welche die Sensoren in eine feste Position verfahren. Beim Messvorgang selbst werden diese Einheiten nicht bewegt, damit die Sensoren nicht unnötigen Vibrationen ausgesetzt sind. Lediglich der x - bzw. Rotationstisch ist während der Messungen in Bewegung.

Da es sich um hochpräzise Verfahrensmotoren handelt (siehe weiter unten), werden auch hohe Anforderungen an die Ebenheit der Granitplatten gestellt. Die Platten wurden nach DIN 876/00 bearbeitet. Laut Messprotokoll ist die Ebenheit der Grundplatte $3,43 \mu\text{m}$ (gefordert ist $< 6 \mu\text{m}$) bzw. des U-Portals $2,10 \mu\text{m}$ (gefordert $< 4 \mu\text{m}$). Der 90° -Winkel zwischen Portal und Grundplatte hat eine Genauigkeit von $8,82 \mu\text{m}$ auf einer Länge von 1000 mm. Dies entspricht einem Winkel von $5,05 \cdot 10^{-4}^\circ$. Der Tisch selbst befindet sich auf einem luftgepolsterten Gestell.

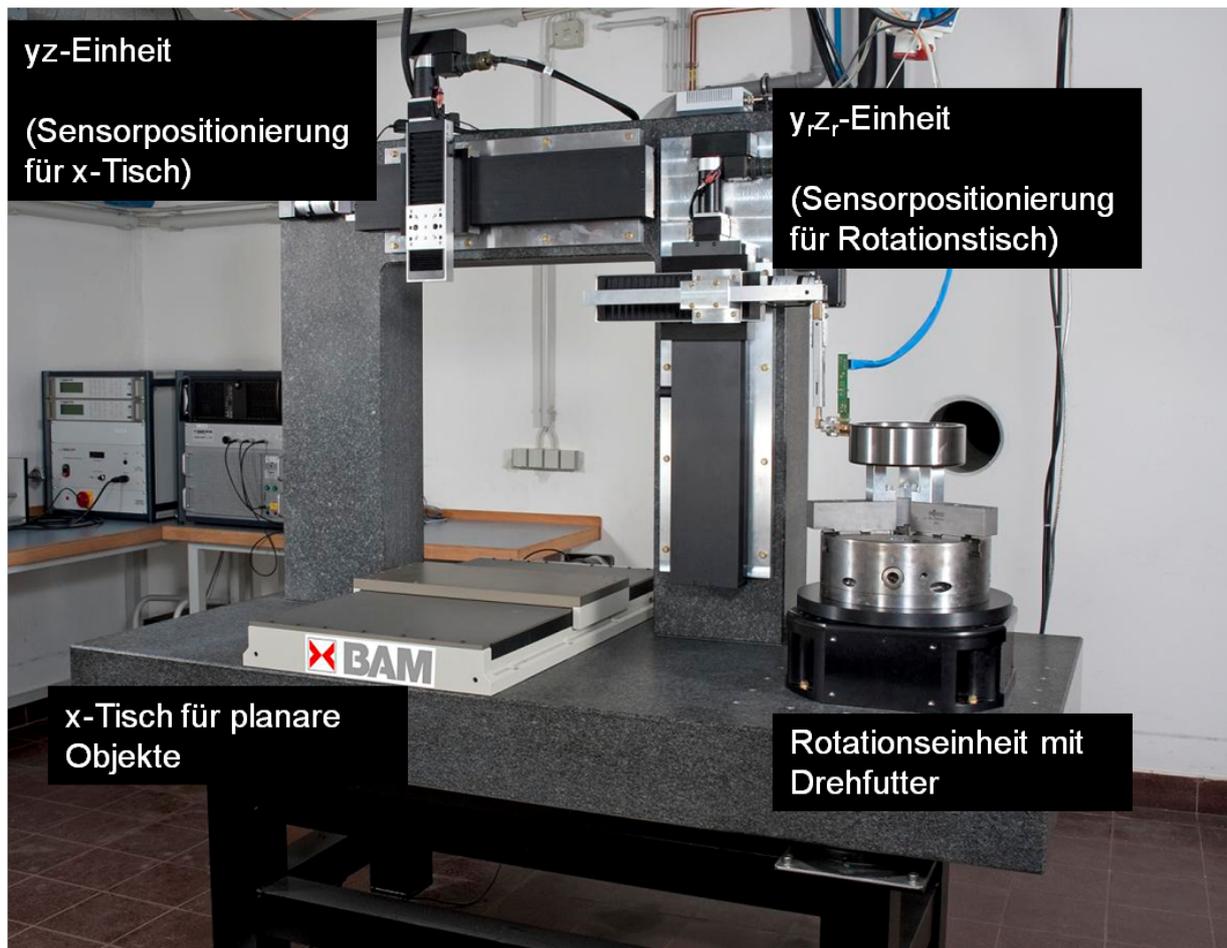


Abbildung 3.2: Granittisch aus Naturhartgestein mit Verfahreinheiten. Jeweils drei Verfahreinheiten ergeben ein Messsystem für planare (xyz -Einheit) bzw. rotationssymmetrische Objekte ($\phi y_r z_r$ -Einheit). (Quelle BAM)

Verfahreinheiten

Messungen mit einer örtlichen Auflösung im μm -Bereich stellen hohe Anforderungen an die eingesetzten Verfahreinheiten. Der Messplatz besteht aus zwei Systemen - einem xyz -Verfahrtisch für planare und einem $\phi y_r z_r$ -Tisch für rotationssymmetrische Objekte - mit insgesamt sechs hochpräzisen Manipulatoren (*Aerotech Inc.*). Die Steuerung der Manipulatoren findet über die Software *NView* (Version 2.55) von *Aerotech Inc.* statt bzw. kann mittels mitgelieferten VIs (virtual instruments) über *LabVIEW* von *National Instruments* durchgeführt werden. In Tab. 3.1 sind die Parameter Auflösung, maximaler Verfahrweg, maximale Geschwindigkeit und für die tragenden Verfahreinheiten die maximal zulässige Last aufgelistet.

Manipulator	Auflösung	Wiederhol- genauigkeit	max. Verfahrweg	max. Geschwindigkeit	max. Last
<i>xyz-System</i>					
<i>x</i> -Tisch <i>ATS50060WB</i>	1 μm	$\pm 1,0 \mu\text{m}$	600 mm	100 mm/s	80 kg
<i>y</i> -Tisch <i>ATS10045</i>	1 μm	$\pm 1,0 \mu\text{m}$	450 mm	100 mm/s	
<i>z</i> -Tisch <i>ATS100-200</i>	0,5 μm	$\pm 0,7 \mu\text{m}$	200 mm	100 mm/s	
<i>y_rz_rϕ-System</i>					
ϕ -Tisch <i>ALAR-200-SP</i>	0,06 μrad	$\pm 2,4 \mu\text{rad}$	-	1 U/s	450 kg
<i>y_r</i> -Tisch <i>ATS100-200</i>	0,5 μm	$\pm 0,7 \mu\text{m}$	200 mm	100 mm/s	
<i>z_r</i> -Tisch <i>ATS10050</i>	1 μm	$\pm 1,0 \mu\text{m}$	500 mm	100 mm/s	

Tabelle 3.1: Auflistung der einzelnen Verfahreinheiten mit Areotech-Bezeichnung und ihrer Parameter [168–171].

Drehfutter

Um die rotationssymmetrischen Probekörper, z.B. einen Lagerschalenring, hochgenau einspannen zu können, wurde ein Drehfutter der *Röhm GmbH* auf dem Rotationstisch installiert. Das Gewicht des Drehfutters beträgt 57,5 kg. Nach den Herstellerangaben ist eine Einstellgenauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ möglich. Da auch das Drehfutter zentrisch auf dem Rotationstisch angebracht werden muss, ist in Abb. 3.3 die mittlere Auslenkung des Drehfutters für eine Umdrehung nach der manuellen Justierung dargestellt. Die maximale Abweichung beträgt $\pm 17 \mu\text{m}$. Die Messung wurde mit einem Laser-Abstandssensor, dessen Auflösung im Bereich von $\pm 0,1 \mu\text{m}$ liegt, durchgeführt.

3.1.2 Messkarten und Elektronik

NI-Messkarte

Die Messkarte NI 6289 von *National Instruments* ist ein System mit integriertem A/D-Wandler und einer ADC-Auflösung von 18 Bit. Die maximale Samplingrate beträgt im single-channel-mode 625 kS/s und 500 kS/s, wenn mehrere Kanäle gleichzeitig ausgelesen werden. Insgesamt lassen sich sieben Bereiche für die Analogeingänge einstellen (von $\pm 10 \text{ V}$ bis $\pm 0,1 \text{ V}$). Neben acht differentiellen Analogeingängen verfügt diese Messkarte noch über Digital- und Countereingänge sowie Analogausgänge.

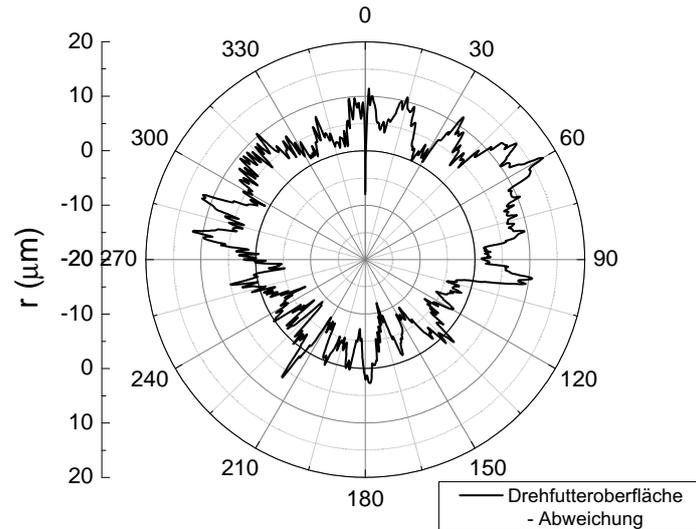


Abbildung 3.3: Polarplot von der mittleren Auslenkung des Drehfutters.

In Abb. 3.4 (a) und (b) ist die Quantisierung für einen kurzgeschlossenen Analogeingang dargestellt. Es wurden Daten für drei verschiedene Zeitintervalle ($t = 10, 25$ und 100 ms) aufgenommen. Die ermittelte Spannung zwischen zwei Bit beträgt $80 \mu\text{V}$ für die Einstellung ± 10 V bzw. $8 \mu\text{V}$ für ± 1 V. Diese Werte entsprechen einer Auflösung von 18 Bit. Das Rauschen selbst liegt im Bereich von 2-3 Bit, sodass für die eigentliche Datenaufnahme etwa 15 Bit verbleiben. In Abb. 3.4 (b) ist zudem ein Offset der Messkarte von etwa $80 \mu\text{V}$ zu erkennen. Dieser Wert umgerechnet in Magnetfeldwerte (siehe hierzu z.B. Abschnitt 3.2.2, Absatz „Kennlinien“) ergibt eine Magnetfeldstärke von $\Delta H(\text{Offset}) \approx 10$ A/m. Da zur Verbesserung des SNR Vorverstärker (zwischen 20 dB und 46 dB) und eine Brückenspannung von bis zu 10 V eingesetzt werden, verringert sich das zusätzliche Signal des Offsets auf $\Delta H(\text{Offset}) \leq 100$ mA/m. Detektierbare Streufelder liegen in der Größenordnung von 10 A/m und mehr (siehe als Beispiel Abb. 4.5 in Kap. 4), sodass der zusätzliche Offset beim kleinsten detektierbaren Streufeld unterhalb 1% liegt und sich nicht auf die Berechnung der Streufelder aus den gemessenen Spannungssignalen auswirkt. Beim Einsatz einer Brückenspannung von 10 V und einer Verstärkung von 40dB liegt er unterhalb der möglichen Magnetfeldauflösung und innerhalb des mit aufgezeichneten Rauschens der eingesetzten Sensoren.

Verstärker-Elektronik

Die Kennlinie der GMR-Sensoren (siehe Abschnitt 3.2) befindet sich bei einer angelegten Spannung von bis zu 10 V im Bereich von maximal ± 200 mV. Die GMR-Messsignale aufgrund von Rissstrefeldern liegen im Bereich von einigen zehn mV; teilweise sind sogar Messsignale an den GMR-Brücken kleiner 1 mV möglich. Da als Messgröße die Spannung ermittelt wird, ist es von Vorteil, die Messspannungen aufgrund sehr kleiner magnetischer Streufelder vor der Digitalisierung zu verstärken, um eingefangenes Rauschen auf dem Weg (bis zu zwei Meter lange Kabelverbindungen sind vom GMR-Sensor bis zur Datenerfassung möglich) zum A/D-Wandler zu minimieren und somit das SNR zu erhöhen. Das bedeutet wiederum, dass eine Vorverstärkung der Signale sensornah erfolgen sollte. Hierzu lassen sich verschiedenste kommerzielle Produkte einsetzen. Allerdings wurde an der BAM zusätzlich Verstärkerelektronik entwickelt, die auf das GMR-Prüfproblem konditioniert ist. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Systeme, deren Grundaufbau gleich ist (siehe auch [172]).

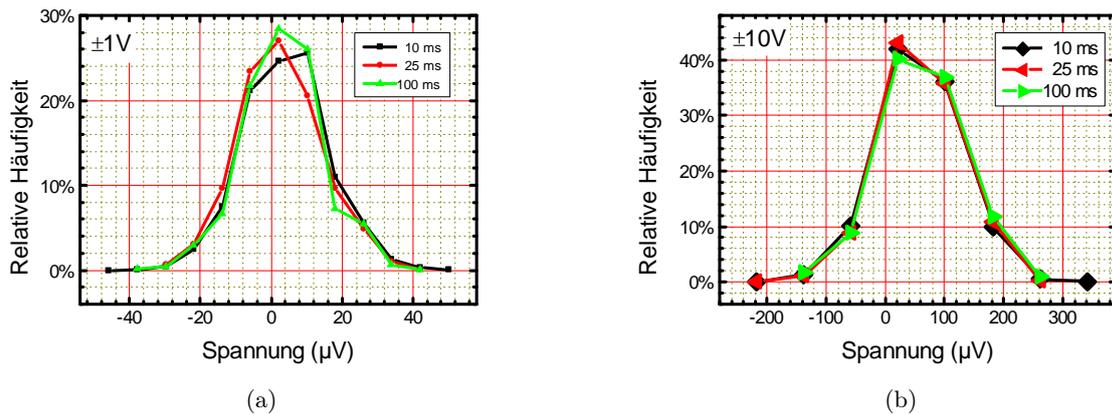
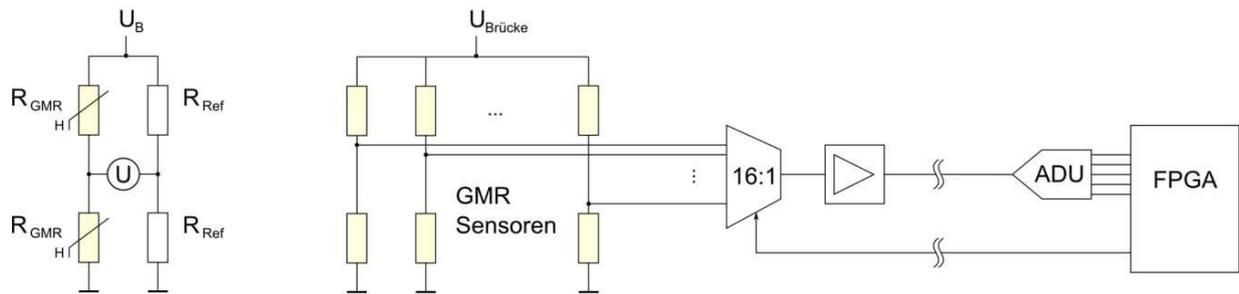


Abbildung 3.4: Verteilung der Messwerte für einen kurzgeschlossenen Analogeingang bei einem Messbereich von (a) ± 1 V und (b) ± 10 V für drei verschiedene Zeitintervalle.

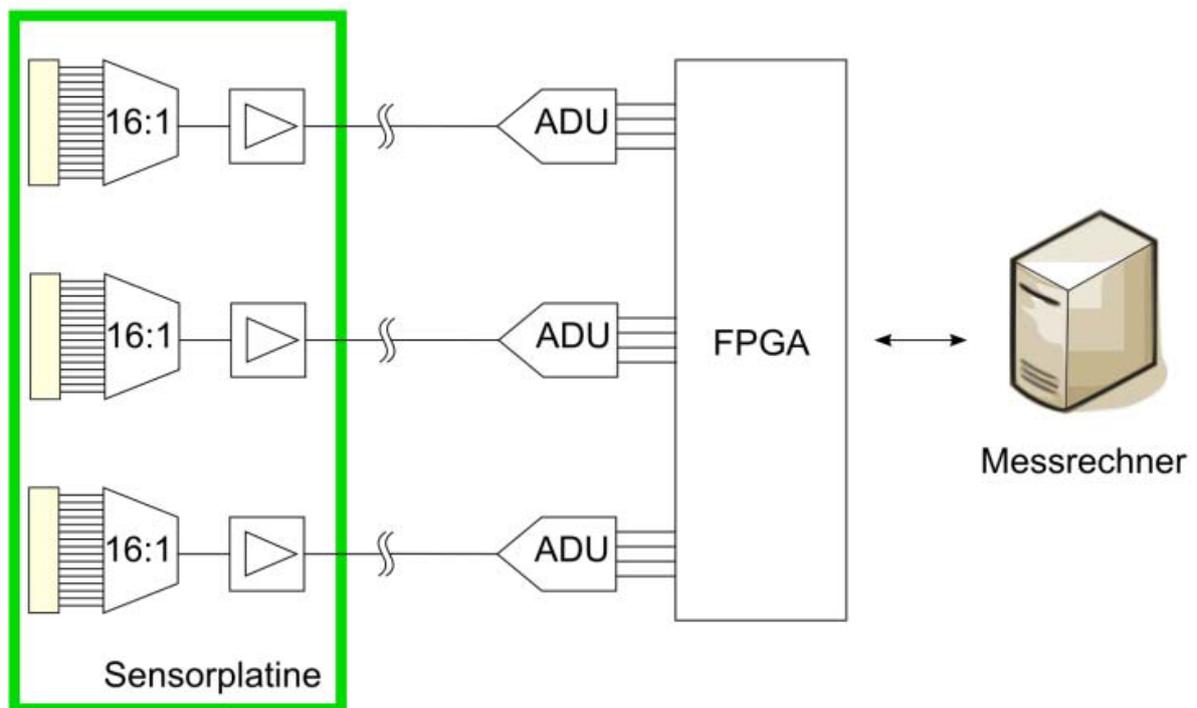
8-Kanal-Verstärkerbox: In einer ersten Version wurde an der BAM eine 8-kanalige Verstärkerbox entwickelt. Das Gerät wird über eine LAN-Schnittstelle mit dem Computer verbunden und kann über diese Schnittstelle je nach Bedarf und Anwendung konfiguriert werden. Die Box selbst besitzt insgesamt acht Karten, auf denen für je einen GMR-Sensor verschiedene Verstärkerstufen und eine Offset-Korrektur realisiert wurden. Die Sensoren werden zudem über eine rauscharme Gleichstrom-Versorgung mit 5 V versorgt. Die Verstärkung lässt sich in fünf Stufen zwischen 20 - 46 dB einstellen. Die Offset-Korrektur wiederum wurde implementiert, um Sensoren mit unterschiedlichem Spannungsoffset bei Nullfeld auszugleichen. Durch Verwendung dieser Box lassen sich die elektronischen Rauscheinflüsse reduzieren, wodurch ein verbessertes SNR erreicht werden kann.

Multikanalelektronikkarte: Die 8-Kanalelektronik ist derart aufgebaut, dass für jeden Sensor bzw. für jedes Element in einem Sensorarray (max. acht) eine Karte mit Elektronikbausteinen zur Signalverstärkung verwendet wird. Dieses Vorgehen ist allerdings für eine weit höhere Anzahl von Kanälen nicht geeignet. Sensorarrays mit 32 und mehr Elementen verlangen nach einer verkleinerten und leistungsfähigeren Vorverstärkerelektronik. In einem Industrieprojekt wurde das Ziel verfolgt, mit den zuvor gewonnenen Erfahrungen eine platzsparende Mehrkanalelektronik sensornah zu realisieren. Sensornah bedeutet hier, dass die nötige Elektronik auf einer angepassten Verstärkerplatine integriert werden soll, welche sich wiederum direkt mit der Sensorplatine verbinden lässt (z.B. über Steckverbindungen). Sensorplatinen mit direkt auf der Platine integrierter Elektronik wurden ebenfalls entwickelt.

In Abb. 3.5 (a) ist in einer Skizze das Prinzip der Mehrkanal-Elektronik dargestellt. Hierbei finden neben einer festen Verstärkung Multiplexerbausteine Verwendung, um die hohe Anzahl von Kanälen verarbeiten zu können. Das Design wurde auf die für die ZiF optimierten GMR-Sensorarrays (siehe Kap. 5) zugeschnitten. Neben einer festen Vorverstärkung werden bis zu 16 Kanäle mittels eines Multiplexers nacheinander auf eine Leitung geschaltet, die wiederum über einen A/D-Wandler vom Computer ausgelesen wird. Insgesamt werden bis zu drei Multiplexer eingesetzt, um maximal 48 Kanäle auszulesen. Um die Multiplexer zu steuern, wird ein FPGA-Controller (engl. field programmable gate array) des PXI-Systems verwendet (siehe Abb. 3.5 (b)). Die Verstärkung liegt je nach Anwendung bzw. Aufbau bei 42 dB bzw. 47 dB. Versorgt werden die Sensoren mit einer rauscharmen Gleichspannung von 10 V, welche sich ebenfalls mit auf der Verstärker- bzw. Sensorplatine befindet.



(a)



(b)

Abbildung 3.5: (a) Links: Widerstandsbrücke aus vier Widerstandselementen (hier zwei GMR-Elemente in Reihe und parallel dazu zwei Referenzwiderstände). Gemessen wird die Brückenspannung. Rechts: Aufbau des Multiplexerkonzepts bestehend aus einem Multiplexer für 16 Leitungen und einem Verstärkerelement. (b) Erweiterung des Konzepts auf Platinen mit insgesamt drei 16er-Arrays (aus [172]).

3.2 GMR-Sensoren der *Sensitec GmbH*

Die in diesem Kapitel vorgestellten GMR-Sensoren sind Sonderanfertigungen der *Sensitec GmbH*, welche auf Nahfeldapplikationen ausgelegt sind. Es handelt sich dabei sowohl um Gradiometer, die einen Feldgradienten bezüglich einer bestimmten Länge zwischen zwei aktiven Flächen, der Basislänge, messen, als auch um Magnetometer, die das Magnetfeld am Ort der aktiven Fläche absolut messen. Gradiometer besitzen hierbei den Vorteil, dass konstante Hintergrundfelder im Messsignal nicht enthalten sind, wodurch eine bessere Feldauflösung bei der Digitalisierung im Vergleich zu Magnetometern erreicht werden kann.

Üblicherweise messen die vorgestellten Sensoren die normale Feldkomponente in Bezug auf die zu untersuchenden Proben und deren Oberfläche. Sie können nur senkrecht zur Oberfläche angeordnet werden, damit der Abstand der empfindlichen Flächen zur Oberfläche, der Lift-off LO , möglichst klein ist. Eine Ausnahme stellt hierzu ein von der *Sensitec GmbH* hergestellter 3D-Sensor dar. Dieser Sensor ist in der Lage, alle drei Raumkomponenten des Magnetfeldes gleichzeitig für denselben Lift-off absolut zu messen.

Bei den eingesetzten GMR-Sensoren handelt es sich um sogenannte Spinventile (siehe auch Kap. 2). In Abb. 3.6 ist eine mögliche Schichtstruktur eines Spinventils dargestellt. Im Vergleich zu den Erläuterungen im Grundlagenkapitel sind die Schichtstrukturen meistens sehr komplex und es bedarf eines langen Entwicklungsprozesses, bis alle Parameter für das Schichtwachstum bekannt sind, damit ein funktionstüchtiges Spinventil-Sensorelement entsteht.

Die Schichten selbst werden auf einen Si-Wafer aufgebracht. Der Prozess umfasst Lithografie, Belaggen, Ätzen und Bedampfen mit den einzelnen Schichten (Sputtern). Zusätzlich ist bei einigen Prozessschritten das Vorhandensein eines externen Magnetfeldes zur Ausrichtung der Magnetisierung einzelner Schichten nötig.

Auf der Trägerplatine, dem Si-Wafer, werden im Beispiel von Abb. 3.6 zuerst drei Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung aufgebracht, die als „seed“ dienen. Beim Wachstum der nachfolgenden antiferromagnetischen Schicht (AFM), hier eine 15,4 nm dicke PtMn-Schicht, wird zusätzlich ein Magnetfeld erzeugt, welches für die Ausrichtung der Spins sorgt. Auf die AFM-Schicht werden zwei voneinander getrennte ferromagnetische Schichten (FM) aufgebracht. Die Magnetisierung der unteren Schicht wird durch eine Wechselwirkung mit dem AFM ausgerichtet. Die Magnetisierung der oberen FM-Schicht wird über die oszillierende Wechselwirkung antiferromagnetisch zur unteren FM-Schicht ausgerichtet. Hier ist ein genaues Schichtwachstum der Ru-Schicht wichtig, da eine zu dicke bzw. zu dünne Schicht die AFM-Ausrichtung der beiden Schichten zueinander verhindert und stattdessen eine FM-Kopplung entsteht (siehe auch Grünberg *et al.* [111]). Als weitere Schicht wird im Beispiel Cu als nichtmagnetische Leitungsschicht aufgebracht. Darüber befinden sich zwei FM-Schichten, deren Magnetisierungen frei sind und somit durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst werden.

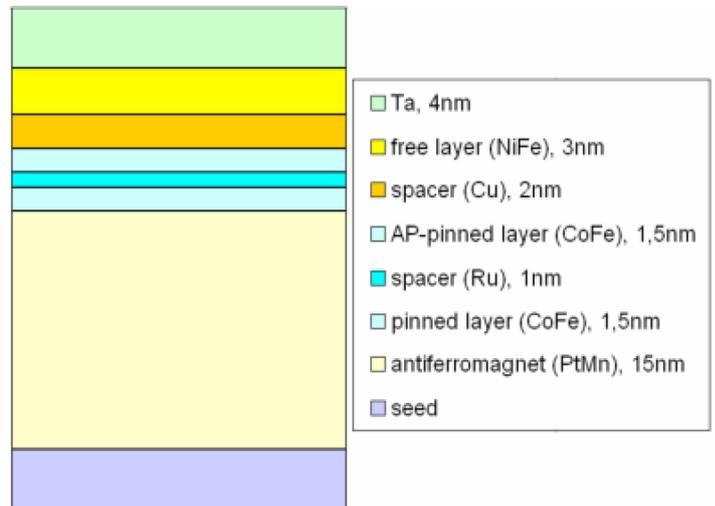


Abbildung 3.6: Beispiel für Aufbau der Schichten der verwendeten GMR-Spinventile der *Sensitec GmbH* (aus [173]).

Ist das externe Magnetfeld hoch genug, im Bereich von 10 kA/m und mehr, kann die Wechselwirkung zwischen den beiden FM-Schichten, die antiferromagnetisch gekoppelt sind, bzw. zwischen AFM und der unteren FM-Schicht zerstört werden. Dann ist auch hier die Magnetisierung vom externen Feld beeinflussbar. Die Magnetfelder, die in der ZfP bei der Streuflussprüfung auftreten, sind jedoch klein gegenüber der benötigten Energie, um die AFM-Kopplung aufzubrechen. Die Schichten werden zum Schutz schließlich mit einer Ta-Schicht passiviert.

3.2.1 Mögliche Anordnungen der Widerstandselemente und Auswirkung auf das Messsignal

Ein externes Magnetfeld führt zu einer Widerstandsänderung in GMR-Schichtstrukturen bzw. Spinventilen (siehe Kap. 2). Da während der Prüfung ein konstantes, anregendes Magnetfeld vorliegt und die Messgeschwindigkeiten bei typischen Anwendungen im Bereich von < 1 m/s liegen, befinden sich die Frequenzanteile der Defektstrefelder im Messsignal im unteren Frequenzbereich zwischen 100 Hz bis zu einigen kHz (siehe Abb. 5.32 in Kap. 5, hier $f_{\text{Streueldsignal}} \leq 400$ Hz für $v \approx 10$ mm/s). Somit sind in der GMR-Schicht keine kapazitiven Effekte, wie sie bei zu hohen Frequenzen auftreten, zu erwarten und der GMR-Widerstand lässt sich sehr leicht über das Ohm'sche Gesetz bestimmen. Die GMR-Widerstandselemente können als Einzelwiderstand oder üblicherweise als Brücken aus zwei oder vier Elementen (Wheatstone-Brücke) in einem Sensor aufgebaut werden.

Der Einzelwiderstand besitzt gegenüber den anderen beiden Varianten den entscheidenden Nachteil, dass Widerstandsänderungen aufgrund von Temperatureffekten im gemessenen Signal voll enthalten sind. Diese Temperaturveränderungen führen zu einer Drift des Messsignals und können bei Nichtberücksichtigung der Temperatur zu einer verfälschten Datenauswertung führen. Verwendet man zwei bzw. vier Widerstandselemente und misst die Brückenspannung, so werden die Temperatureinflüsse prinzipiell eliminiert und können bei kleinen Temperaturveränderungen am Ort der Elemente vernachlässigt werden (siehe hierzu Abschnitt 5.3.3). Ein weiterer Vorteil, besonders in Bezug auf die Digitalisierung der Daten, ist bei Widerstandsbrücken das um „Null“-liegende Spannungssignal des Zwischenabgriffs. Das bedeutet allerdings für eine Halbbrücke aus zwei Elementen, dass parallel zu diesen eine weitere Referenzbrücke integriert werden muss. Dies wird in der Regel mit zwei gleich großen Widerständen aus demselben Material (wegen der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes) realisiert.

3.2.2 GMR-Sensoren empfindlich auf die normale Feldkomponente

Aufbau

Der GMR7, abgebildet in Abb. 3.7 links, ist ein laterales Gradiometer, welches die Normalkomponente des Magnetfeldes in Bezug auf eine Probenoberfläche misst, $\frac{\partial B_z}{\partial x}$. Das Foto zeigt die Sensorplatte, auf der die Si-Chips mit den GMR-Elementen unter einer Epoxidharzschicht (schwarze Schutzschicht) aufgeklebt sind. Das Gradiometer besteht aus insgesamt vier GMR-Elementen. Die vier Elemente bilden zusammen eine Wheatstone-Brücke. In Abb. 3.8 (a) ist der geometrische Aufbau der Wheatstone-Brücke des GMR7 dargestellt. Der Gradient bzw. die Magnetfelddifferenz wird bei diesem Sensor in der Ebene horizontal zur abgescannten Oberfläche gebildet. Der Abstand der aktiven Flächen, die Basislänge, beträgt $BL = 250 \mu\text{m}$ und die Größe der aktiven Flächen ist $70 \times 60 \mu\text{m}^2$. Die aktiven Flächen selbst bestehen aus jeweils zwei mäanderförmig angeordneten GMR-Leiterstreifen, die ähnlich wie Zahnräder den Zwischenraum des jeweils anderen Mäander ausfüllen (siehe Ausschnitt der Mäanderstruktur des Sensors GMR7 in Abb. 3.8 (a)). Die Widerstände sind so angeordnet, dass sich innerhalb der Wheatstone-Brücke immer die zwei gegenüberliegenden Elemente am selben Ort befinden. Im Beispiel von Abb. 3.8 (a) sind dies R1 und R3 bzw. R2 und R4.

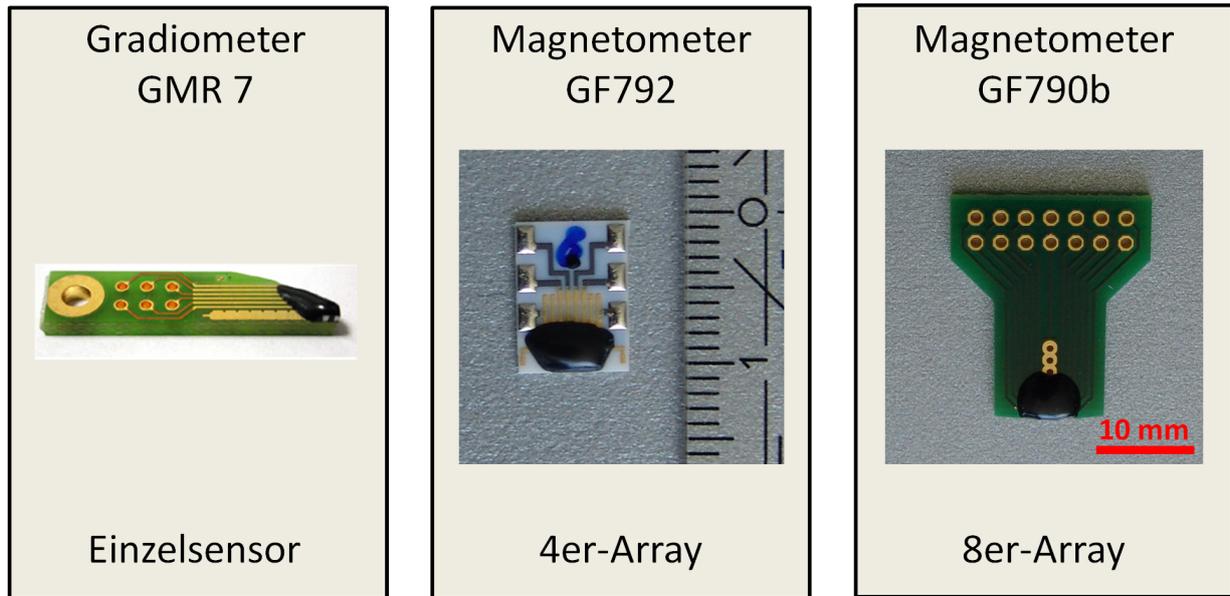


Abbildung 3.7: Abbildungen der untersuchten, kommerziellen GMR-Sensoren. Es handelt sich im linken Bild um das Gradiometer GMR7, das mittlere Bild beinhaltet das 4er-Magnetometerarray GF792 und rechts das 8er-Magnetometerarray GF790b. Alle drei Sensoren messen in Bezug auf die Probenoberfläche die normale Komponente der magnetischen Feldstärke H_z .

Der Sensor GF792 ist ein Magnetometer-Sensorarray mit insgesamt vier Sensoren. In Abb. 3.7 ist im mittleren Bild ein Foto der Keramikplatine zu sehen, auf der das 4er Array aufgeklebt ist. Die vier Sensoren bestehen jeweils aus einer Halbbrücke mit zwei räumlich voneinander getrennten GMR-Widerstandselementen. In Abb. 3.8 (b) ist ein Schema mit den GMR-Leiterbahnen (rot) dargestellt. Die aktiven Flächen besitzen eine Ausdehnung von $17 \times 20 \mu\text{m}^2$ und sind ebenfalls mäanderförmig in Streifen aufgebaut. Das zweite Element, welches weiter von der Messkante entfernt ist, wird durch eine hochpermeable Schicht (shield) gegen äußere Magnetfelder abgeschirmt, wodurch der Widerstand des zweiten GMR-Elements konstant bleibt. Dadurch wird die Brückenspannung lediglich durch das GMR-Element an der Sensorkante beeinflusst. Der Abstand zwischen den einzelnen GMR-Sensoren beträgt bei diesem 4er-Array 156 bzw. 180 μm . Zusätzlich ist die Feldrichtung angezeigt, auf die der Sensor empfindlich ist. Wie beim GMR7 ist dies die Normalkomponente der magnetischen Feldstärke H_z . Um eine Brückenspannung zu messen, ist eine weitere Serienschaltung aus gleich großen Widerständen, die als Referenz dienen, nötig. Diese wird parallel zu den GMR-Widerstandselementen angebracht. Es handelt sich somit um eine Viertelbrücke. Falls kein Magnetfeld anliegt, liegt dadurch ein Spannungssignal um 0 V vor. Für eine spätere Digitalisierung der Messsignale ist dies vorteilhaft, da eine Verstärkung in diesem Fall ohne Offsetkompensation möglich ist.

Das Magnetometerarray GF790b besteht aus insgesamt acht GMR-Halbbrücken, die parallel auf der Platine in einem Abstand von 125 μm angeordnet sind. In Abb. 3.7 rechts ist der Chip und in Abb. 3.8 (c) ist der Aufbau der GMR-Elemente, Flusskonzentratoren und Pads schematisch dargestellt. Die einzelnen Sensoren bzw. ihre Elemente bilden mit den GMR-Referenzwiderständen (rot), die durch ein Shield vom äußeren Magnetfeld abgeschirmt werden, eine Wheatstone-Brücke. Das Besondere an diesem Sensor ist, dass er mit Flusskonzentratoren (an einem Element zur besseren Darstellung grün hervorgehoben) ausgestattet ist, die nicht zur Abschirmung, sondern zur Verstärkung und Umlenkung des zu messenden Magnetfeldes eingesetzt werden. Die Flusskonzentratoren besitzen an der Platinenkante eine Breite von 18 μm .

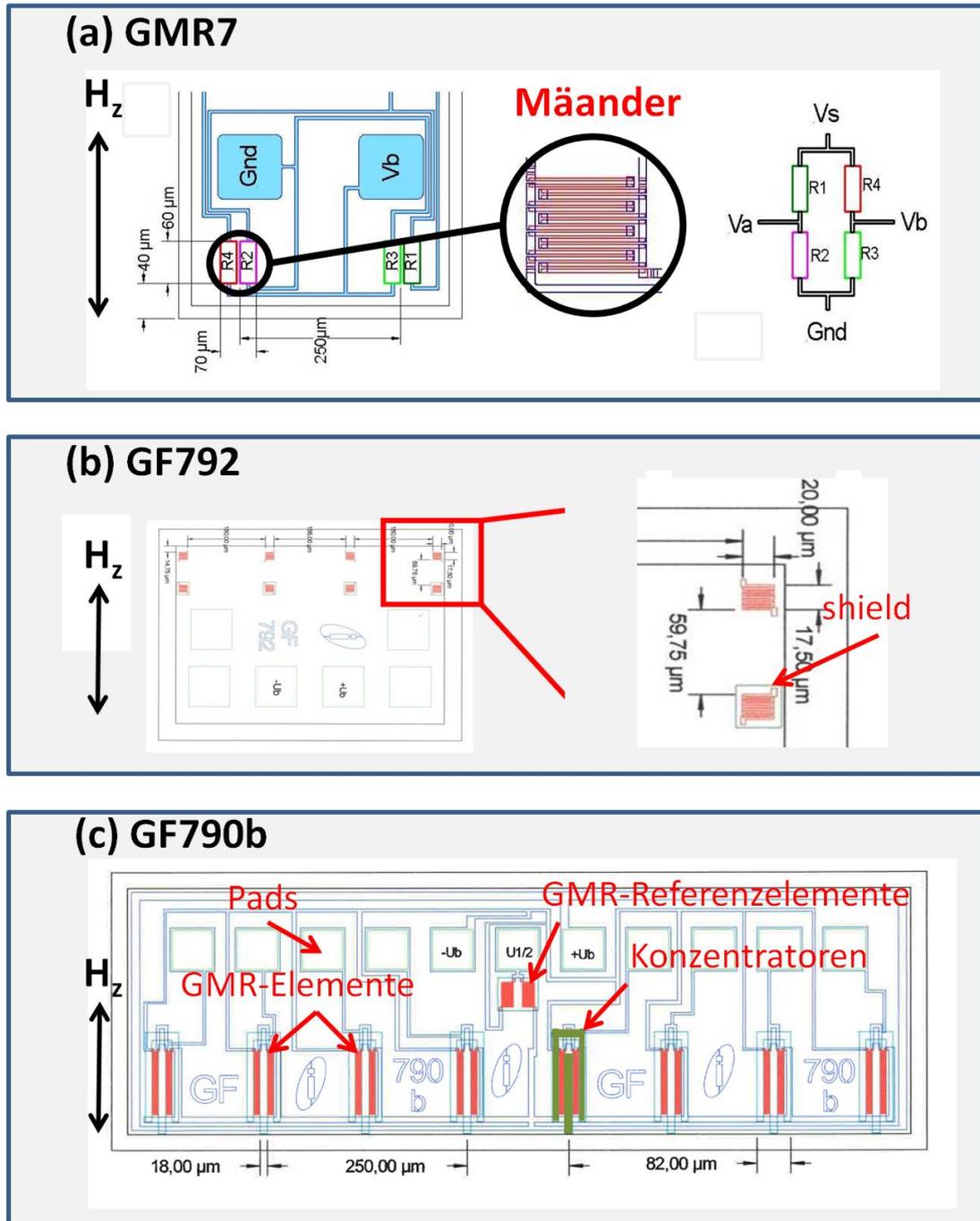


Abbildung 3.8: Aufbauschemata der GMR-Sensoren (a) GMR7 (nach [68] bzw. Handout zum GMR7, *Sensitec GmbH*), (b) GF792 (Schema nach Produktblatt von der *Sensitec GmbH*) und (c) GF790b (Zeichnung nach [174] bzw. Produktblatt von der *Sensitec GmbH*). **GMR7:** Gradientometer mit insgesamt vier GMR-Widerstandselementen, jeweils zwei befinden sich an derselben Stelle (hier R1 und R3 bzw. R2 und R4) und sind in einer mäandrierenden Struktur angeordnet. Die Größe der Flächen beträgt $70 \times 60 \mu\text{m}^2$. Der Gradient wird parallel zur Oberfläche gebildet. **GF792:** Magnetometer mit insgesamt zwei Widerständen in einer Viertelbrücke angeordnet. Der Widerstand an der Kante ist feldempfindlich. Der zweite wird durch eine hoch-permeable Schicht (shield) abgeschirmt. Die Größe der aktiven Elemente ist $17 \times 20 \mu\text{m}^2$. **GF790b:** Magnetometer mit Flusskonzentratoren als Verstärkerelemente. Es handelt sich bei diesem Sensor um eine Wheatstone-Bridge mit je zwei abgeschirmten Referenzwiderständen und zwei Widerständen, welche einem externen Feld ausgesetzt sind. Diese (rot) befinden sich zwischen zwei Flusskonzentratoren (grün). (Siehe hierzu auch [174].)

Eine genaue Abschätzung der aktiven Fläche dieser Sensoren ist aufgrund des Einsatzes von Flusskonzentratoren schwierig. Da die magnetischen Eigenschaften sowie die Dicke der permeablen Schichten nicht bekannt sind und sich zudem bei einer Literaturrecherche keine Publikationen finden ließen, welche die Ortsauflösung von MR-Sensoren mit Flusskonzentratoren behandeln, lässt sich die aktive Fläche nicht bestimmen. Grundsätzlich gilt, dass hochpermeable Materialien das umliegende Magnetfeld anziehen und dies zu einer Verzerrung der Feldlinien im Raum um die Schicht herum führt. Das Magnetfeld ist bestrebt, die Energie zu minimieren und somit den magnetischen Widerstand zu verkleinern. Aus diesem Grund ist die aktive Fläche von Sensoren mit Flusskonzentratoren größer als die Ausdehnung der permeablen Schicht selbst. Zusätzlich wirkt sich hier die Form dieser Schichten auf die Anziehung aus. Sind die Sensoren weit von der magnetischen Quelle entfernt, verringert sich allerdings aufgrund des homogenen Magnetfeldes dieser Effekt. Im Folgenden werden bei Sensoren mit Flusskonzentratoren deren Abmessungen im Zusammenhang mit der aktiven Fläche angegeben, obwohl die eigentliche aktive Fläche bzw. Wirkbreite solcher Sensoren größer ist.

Die zuvor beschriebenen GMR-Sensoren sind alle in Wheatstone-Brücken (teils mit zusätzlichen Widerstandselementen) angeordnet. Dadurch liegt das eigentliche Messsignal, die Brückenspannung zwischen zwei Zweigen, um 0 V. Bei der nachfolgenden Digitalisierung kann deshalb aufgrund eines höheren Verstärkungsfaktors ein besseres Auflösungsvermögen erreicht werden. Die Sensoren GMR7 und GF790b besitzen schon durch ihren Aufbau eine Wheatstone-Anordnung auf dem Chip. Der Sensor GF792 jedoch benötigt eine zusätzliche Referenzbrücke, die extern an den Sensor angebracht werden muss. Beim GMR7 handelt es sich um eine Vollbrücke, d.h. alle Widerstandselemente tragen aktiv durch Veränderung ihres GMR-Widerstandes zum Signal bei. Das Magnetometer GF790b hingegen ist eine Halbbrücke, bei der einige Elemente gegen das äußere Magnetfeld abgeschirmt sind und somit keine Widerstandsveränderungen erfahren. Das Magnetometer GF792 besitzt in der Wheatstone-Brücke lediglich ein GMR-Element, welches von außen beeinflusst werden kann. Die Auswirkungen einer Widerstandsveränderung einzelner Elemente wiederum beeinflussen je nach Anzahl die Brückenspannung, sodass eine geringere Anzahl „aktiver“ Elemente einen geringeren Beitrag zur Brückenspannung bewirkt [112].

In Abb. 3.9 sind die einzelnen Sensoren mit ihren verschiedenen Wheatstone-Brücken skizziert. Dargestellt sind die Elemente, die von externen Magnetfeldern beeinflusst werden (Widerstandselemente mit einem Pfeil), abgeschirmte Elemente (grün umrandete Elemente) und Referenzelemente (grau). Die unterschiedliche Farbkodierung der beeinflussbaren Widerstandselemente stellt unterschiedliche Positionen in einem Gradiometer dar.

Wird eine Widerstandsveränderung von ΔR betrachtet und angenommen, dass alle Elemente bei $H_{\text{extern}} = 0 \text{ A/m}$ einen konstanten Widerstand von $R = R_0$ besitzen, ergeben sich für die drei verschiedenen Brückenkonfigurationen bei einem fest angelegten Magnetfeld und einer vorgegebenen angelegten Spannung U Spannungsänderungen ΔV von:

$$\begin{aligned} \text{Vollbrücke (GMR7): } \Delta V &= U \frac{\Delta R}{R_0}, \\ \text{Halbbrücke (GF790b): } \Delta V &= U \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{2 + \frac{\Delta R}{R_0}}, \\ \text{Viertelbrücke (GF792): } \Delta V &= U \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{2 \left(2 + \frac{\Delta R}{R_0} \right)}. \end{aligned}$$

Da die maximale GMR-Widerstandsänderung für die eingesetzten Sensoren im Bereich von $\pm 5\%$ liegt, folgt $\Delta R \ll R_0$ und es ergibt sich näherungsweise:

$$\Delta V(\text{Vollbrücke}) \approx 2 \cdot \Delta V(\text{Halbbrücke}) \approx 4 \cdot \Delta V(\text{Einzelement}). \quad (3.1)$$

Daraus folgt, dass die Brückenspannung einer Vollbrücke bei gleicher prozentualer Widerstandsänderung ein doppelt bzw. viermal so hohes Signal gegenüber der Halbbrücke bzw. dem Einzelement ergibt. Dadurch wird die Magnetfeldauflösung erhöht.

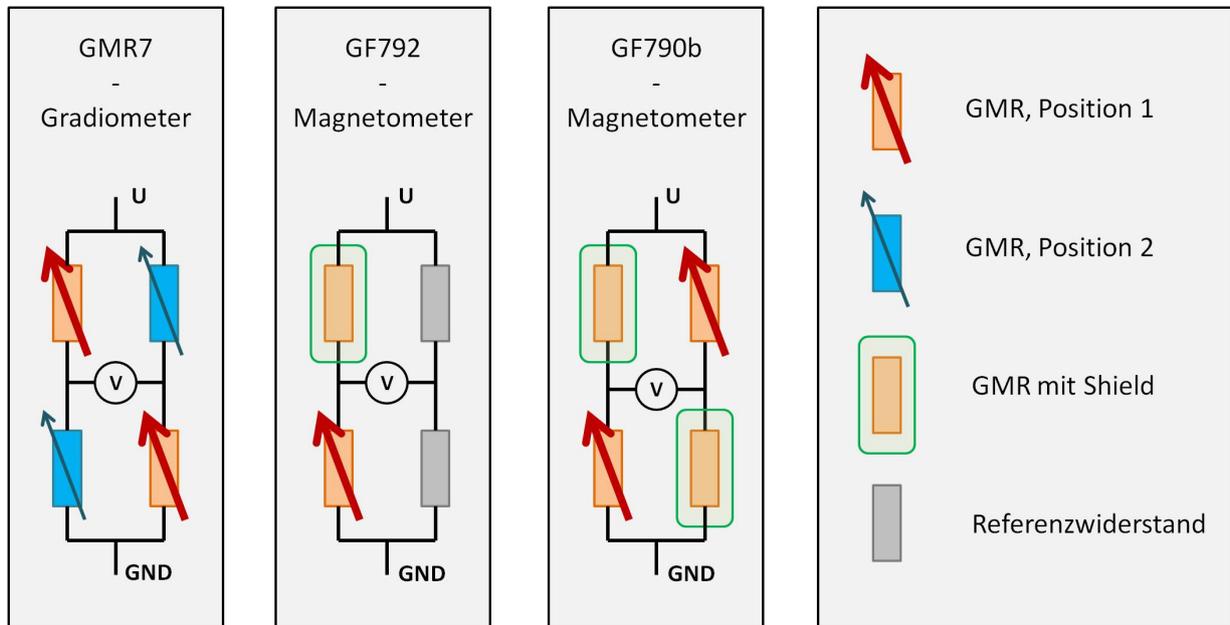


Abbildung 3.9: Schema der Widerstandsbrücken für die GMR-Sensoren GMR7, GF792 und GF790b. Bei allen drei Sensoren werden die Brückenspannungen gemessen und über die zuvor ermittelte Kennlinie einem Magnetfeldwert zugeordnet. Das Gradiometer GMR7 besteht aus einer Vollbrücke, wobei sich die Diagonalelemente am selben Ort befinden; mit roten und blauen Widerständen dargestellt. Das Magnetometer GF792 besteht aus zwei GMR-Widerständen in Serie, wovon ein Widerstandselement durch eine Abschirmung (Shield; mit grüner Box unterlegt) vom externen Magnetfeld unbeeinflusst bleibt. Um eine Brückenspannung um 0 V zu realisieren, ist eine weitere Widerstandsserienschaltung mit zwei Referenzwiderständen nötig (graue Darstellung der Widerstände). Das Magnetometer GF790b ist eine Brücke, bei der die Referenzelemente, zwei abgeschirmte GMR-Widerstände, mit in den Chip integriert werden. Hier tragen wiederum die Diagonalelemente und ihre durch ein Magnetfeld erzeugte Widerstandsveränderung zur Brückenspannung bei. Dadurch erfolgt beim Sensor GF790b eine bessere Magnetfeldauflösung als beim GF792.

Kennlinie

Die Kennlinie eines lateralen Gradiometers kann nicht direkt ermittelt werden, da die gemessene Feldkomponente orthogonal zur räumlichen Gradiometeranordnung liegt. Ein definiertes Gradientenfeld auf so kleinem Raum (der Abstand der Elemente, die Basislänge, beträgt $250 \mu\text{m}$) zu erzeugen, ist schwierig, weshalb die Übertragungsfunktionen nur indirekt bestimmt werden können. Einerseits lässt sich mit Hilfe eines Vorwiderstandes, der in Reihe geschaltet wird, die Veränderung der GMR-Widerstände in einem homogenen Magnetfeld ermitteln, indem die Spannung am Vorwiderstand bei einer fest angelegten Versorgungsspannung gemessen wird. Hierfür setzt man allerdings voraus, dass alle GMR-Widerstände die gleiche Größe ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{\text{GMR}}$) besitzen. Andererseits können die Parallelwiderstände innerhalb der Brücke ermittelt werden. Allerdings sind bei einer Wheatstone-Brücke hierfür vier

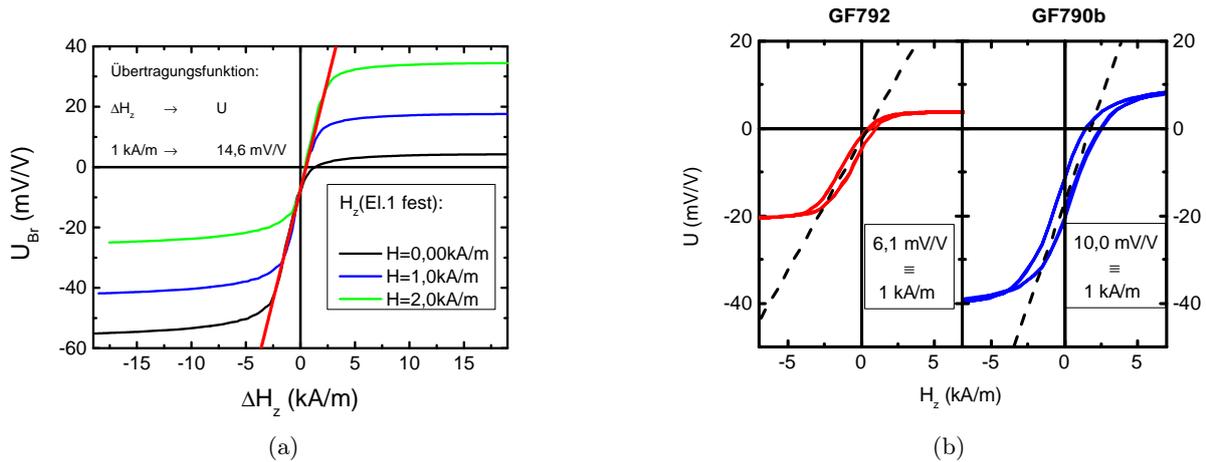


Abbildung 3.10: Kennlinien der GMR-Sensoren (a) GMR7 und (b) GF792 (rot) bzw. GF790b (blau) und die dazugehörigen linearen Übertragungsfunktionen.

aufeinanderfolgende Messungen an den einzelnen Widerständen nötig. Diese müssen dann, da es sich um eine Parallelschaltung aus vier Widerständen handelt (z.B.: $1/\bar{R}_1 = 1/R_1 + 1/(R_2 + R_3 + R_4)$), berechnet werden, indem ein lineares Gleichungssystem aus vier Gleichungen gelöst wird.

In Abb. 3.10 (a) ist die Kennlinie des GMR7 dargestellt. Aufgetragen ist die Brückenspannung als Funktion der Differenz der magnetischen Feldstärke ΔH_z . Die Werte für diese Kennlinie wurden über den Ersten der vorher beschriebenen Wege ermittelt. Mit Hilfe der daraus bestimmten Widerstandsänderung der einzelnen GMR-Elemente lässt sich das Verhalten des GMR-Sensors in einem Gradientenfeld simulieren. Dies wird anhand der drei verschiedenfarbigen Kurven dargestellt. Dabei wurden für zwei GMR-Elemente, welche sich am selben Ort befinden, feste Magnetfeldstärken H_z angenommen (Werte sind in der Grafik enthalten). Die beiden anderen Widerstandselemente sind in der Simulation einem veränderlichen Feld ausgesetzt. Daraus ergibt sich bei angelegter Versorgungsspannung eine theoretisch ermittelte Brückenspannung, die im Diagramm dargestellt ist. Aus den drei exemplarisch abgebildeten Kurven wurde schließlich ein linearer Bereich definiert. Daraus lässt sich die Steigung der Geraden (rot) ermitteln, welche die Transferfunktion darstellt. Für den GMR7 ist die Transferfunktion $\Delta U = 14,6 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}} \cdot \Delta H$.

Neben der Kennlinie besitzt der Sensor im Nullfeld einen Offset (in Abb. 3.10 etwa -7,5 mV/V bei $\Delta H_z = 0$ A/m). Dieser Offset ergibt sich aus nicht gleich langen GMR-Elementen innerhalb der Brücke bzw. aus unterschiedlich langen Versorgungsleitungen zu den Kontaktpads. Von Sensor zu Sensor können die Offsets sehr stark variieren und müssen für jeden Sensor gesondert berücksichtigt werden.

Für die beiden Magnetometer GF792 und GF790b lassen sich die Transferkurven direkt ermitteln. In Abb. 3.10 (b) ist die Kennlinie für das Magnetometer GF792 (die rote Kurve im Diagramm rechts) für einen der vier Kanäle im Array dargestellt. Deutlich lässt sich neben einer Asymmetrie (die Hysterese ist nicht symmetrisch um den Ursprung) auch eine verbreiterte Hysterese erkennen, welche die Bewertung und schließlich auch die Umrechnung der Spannungswerte in Feldwerte erschwert bzw. mit Fehlern behaftet. Wird ein linearer Bereich angenommen, ergibt sich eine Transferfunktion von etwa $U = 6,1 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}} \cdot H_z$. Der lineare Bereich befindet sich bei dem vorgestellten GMR-Sensor GF792 etwa zwischen -2 kA/m und $+0,5$ kA/m, kann allerdings von Sensor zu Sensor herstellungsbedingt variieren.

Die Kennlinie des GF790b ist in Abb. 3.10 (b) als blaue Kurve dargestellt. Der lineare Bereich befindet sich etwa zwischen -2 kA/m und $+2$ kA/m. Im linearen Bereich beträgt die Transferfunktion

$U = 10,0 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}} \cdot H_z$. Dieser Sensor besitzt zwar ebenfalls ein Offset, allerdings ist die Hysterese hier annähernd achsensymmetrisch zur \hat{y} -Achse. Zusätzlich ist dieser Sensor empfindlicher aufgrund des in Abb. 3.9 beschriebenen Widerstandsbrückenaufbaus mit zwei aktiven Elementen und zusätzlichen Flusskonzentratoren. Allerdings wird, obwohl GF790b im Vergleich zum GF792 (Viertelbrücke) aus einer Halbbrücke besteht, der Faktor 2 bezüglich Empfindlichkeit (siehe Gleichung 3.1) aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus nicht erreicht.

3.2.3 3D-Sensor

Aufbau

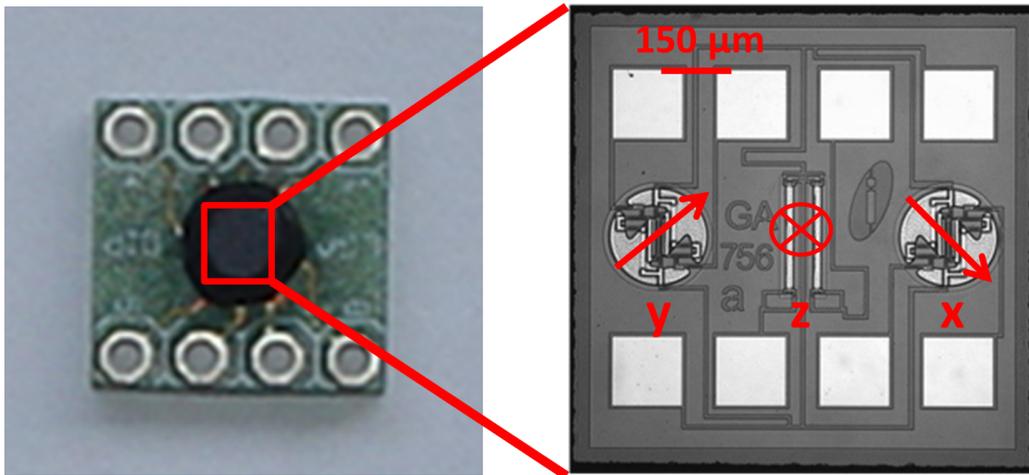


Abbildung 3.11: Aufbau 3D-Sensor. Links: Foto der Platine. Rechts: Si-Chip mit allen drei Komponenten sowie die Richtungen der Feldempfindlichkeit (aus [173]).

Der 3D-Sensor (GA757) ist in Abb. 3.11 dargestellt. Dieser Sensor, ein Prototyp der *Sensitec GmbH* [173], besitzt den großen Vorteil, dass er gleichzeitig alle drei Raumkomponenten des magnetischen Feldes in einer Ebene messen kann. Allerdings kann sich aufgrund der hierfür benötigten Flusskonzentratoren die Ortsauflösung gegenüber den vorher beschriebenen GMR-Sensoren verschlechtern. Der Durchmesser der Flusskonzentratoren für die Tangentialkomponenten beträgt $140 \mu\text{m}$. Da die Flusskonzentratoren das Magnetfeld wegen der hohen Permeabilität sehr stark anziehen, ist die Ortsauflösung bei solchen Sensoren größer als die $140 \mu\text{m}$ Durchmesser der Flusskonzentratoren. Wie beim GF790b ist eine Abschätzung nicht möglich. Die beiden Flusskonzentratoren für die Normalkomponente haben eine Länge von $142 \mu\text{m}$ und sind $30 \mu\text{m}$ voneinander entfernt. Die Sensoren sind ähnlich zum Magnetometer GF790b in einer Wheatstone-Brücke geschaltet. Dabei sind die Elemente für die Tangentialkomponenten des Magnetfeldes als Halbbrücke und die Normalkomponente in z -Richtung als Vollbrücke aufgebaut. Weitere Informationen bezüglich Aufbau und Sensoreigenschaften lassen sich in der Publikation von C. Glenske und U. Loreit finden [173].

Kennlinie

In Abb. 3.12 (a) sind die Kennlinien aller drei Komponenten dargestellt. Die schwarze Kurve entspricht der H_x -, die rote der H_y - und die blaue der H_z -Komponente. Die größere Hysterese bzw. geringere Empfindlichkeit für die z -Komponente, obwohl es sich um eine Vollbrücke im Vergleich zu den Halbbrücken der anderen beiden Komponenten handelt, ist herstellungsbedingt und abhängig vom unterschiedlichen Aufbau (Angabe *Sensitec GmbH* [175]). Dadurch wird eine Umrechnung schwieriger,

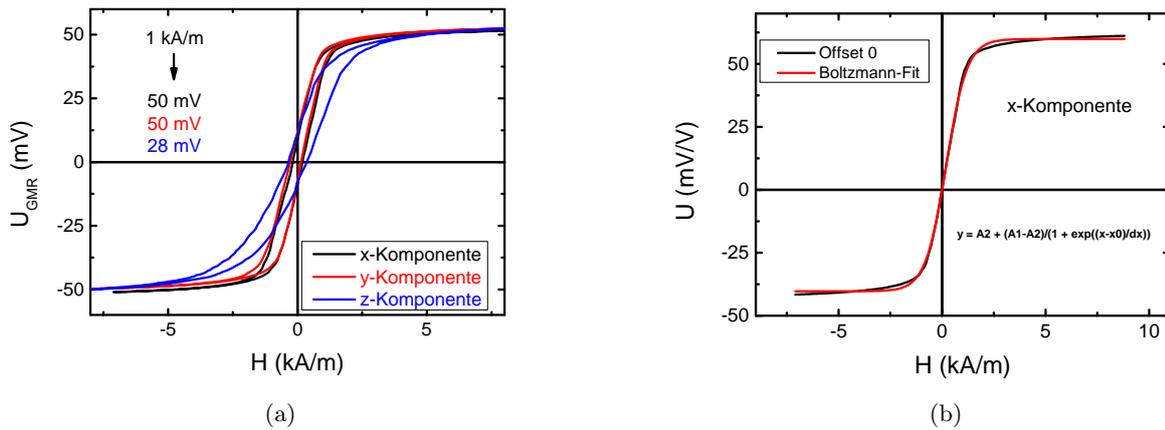


Abbildung 3.12: (a) Kennlinien des 3D-Sensors für alle drei Feldkomponenten. (b) Boltzmann-Fit zur Bestimmung einer Übertragungsfunktion.

d.h. lineare Transferfunktionen besitzen hier einen großen Fehler. Eine Möglichkeit, dies zu umgehen, ist die Nutzung eines Boltzmann-Fits, dargestellt in (b). Dadurch lassen sich die Kurven sehr gut mittels einer nicht-linearen Funktion darstellen, wodurch eine Umrechnung der Spannungswerte mit kleinerem Fehler ermöglicht wird:

$$f(x) = A2 + \frac{A1 - A2}{1 + \exp\frac{x-x_0}{dx}} \quad (3.2)$$

In Abb. 3.12 (b) sind als Beispiel für die x -Komponente ein Ast der Hysteresekennlinie sowie der dazugehörige Boltzmann-Fit mit Parametern dargestellt. Aus der ermittelten Funktion lassen sich die Feldwerte bestimmen. Der Vorteil besteht darin, dass auch der nicht-lineare Bereich der Hysterese übertragbar ist und der Fehler in diesem Bereich im Vergleich zum linearen Fit erheblich verringert wird. Die Verwendung eines Fits zur Umrechnung ist allerdings nur auf Magnetometer anwendbar, da bei Gradiometern aufgrund der Unkenntnis des absoluten Magnetfeldes der Arbeitspunkt auf der Hysteresekennlinie nicht bekannt ist. Zudem wird die Hysterese bei Verwendung des Fits zur Berechnung der Feldwerte nicht mit berücksichtigt, wodurch ein zusätzlicher Umrechnungsfehler erzeugt werden kann.

3.2.4 Zusammenfassung

Die Tabelle 3.2 enthält eine Auflistung der vorhandenen Sensoren (hinter der Typbezeichnung ist hinzugefügt, ob es sich bei dem Sensor um ein Magnetometer (M) oder Gradiometer (G) handelt) und ihrer Feldkomponente, die Anordnung der Widerstände (Halb- oder Voll-Brücke), die Übertragungsfunktion im linearen Bereich und die Größe der aktiven GMR-Flächen. Für Sensoren, welche mit Flusskonzentratoren ausgestattet sind, bezieht sich der Punkt „aktive Fläche“ auf die Länge der unteren Kante bzw. den Durchmesser der Flusskonzentratoren. Ein genauer Abstand der Elemente zur Platinenkante variiert von Sensor zu Sensor, liegt aber im Bereich von 50 bis 100 μm .

Sensor	Feldkomponente	Anordnung Widerstände	H - V -Übertragungsfunktion	aktive Fläche, Flusskonzentrator	Anzahl Elemente
GMR7 (G)	$\partial H_z / \partial x$	Vollbrücke	$14,6 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$	$60 \times 70 \mu\text{m}^2$	1
GF792 (M)	H_z	Viertelbrücke	$6,1 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$	$17 \times 20 \mu\text{m}^2$	4
GF790b (M)	H_z	Halbbrücke	$10 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$	$> 18 \mu\text{m}$	8
3D-Sensor (M)	H_x	Halbbrücke	$50 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$	$> 140 \mu\text{m}$	1
	H_y	Halbbrücke	$50 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$	$> 140 \mu\text{m}$	1
	H_z	Vollbrücke	$28 \frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$	$> 142 \mu\text{m}$	1

Tabelle 3.2: Auflistung der vorhandenen GMR-Sensoren. Für die GMR-Sensoren, die einen Flusskonzentrator in ihrem Aufbau enthalten, kann keine aktive Fläche angegeben werden. In diesem Fall ist die Breite, Länge bzw. der Durchmesser der Flusskonzentratoren, welche sich auf die Ortsauflösung auswirken, angegeben.

3.2.5 Zusätzliche Anmerkungen zu den betrachteten GMR-Sensoren

Abstand - Liftoff

In Abb. 3.13 ist eine hochauflösende Durchstrahlungsaufnahme des Magnetometers GF792 dargestellt. Aufgrund der hohen Energien, die bei der Durchstrahlung angewendet werden, sind die vier GMR-Mäander des Arrays kaum zu erkennen. Deutlich sichtbar sind hingegen die stromführenden Leiterbahnen, die Kontaktpads und die hochpermeablen Schichten zur Abschirmung der zweiten GMR-Struktur eines jeden Sensors im 4er-Array. Aus den bekannten Abständen (siehe hierzu in Abschnitt 3.2.2 Abb. 3.8) lässt sich der Liftoff für diesen Sensor bestimmen.

Der Abstand beträgt etwa $120 \mu\text{m}$ von der Unterkante des GMR-Elementes und der Platinkante. Der Abstand des Elementes zur Si-Chipkante ist etwas kleiner als $40 \mu\text{m}$. Hieraus ergibt sich ein herstellungsbedingter zusätzlicher Abstand durch das zu ungenaue Aufkleben des Chips auf die Platine von etwa $80 \mu\text{m}$. Dieser zusätzliche Abstand kann die Detektion von kleinen Fehlern und somit kleiner Streufelder beeinträchtigen und im schlimmsten Fall sogar dazu führen, dass diese Signale im Rauschen untergehen.

Hierbei sei erwähnt, dass die hier eingesetzten GMR-Sensoren der *Sensitec GmbH* bereits für Applikationen im Nahfeldbereich konzipiert wurden. In der ZfP kamen öfters GMR-Sensoren zum Einsatz, die in einem gekapselten IC-Chip integriert wurden (z.B. NVE AA002 bzw. AB001) und nicht für die Nahfelddetektion von Streufeldern geeignet sind (siehe hierzu Kap. 6, in dem Messungen mit diesen Sensoren vorgestellt werden bzw. [15–17, 65, 177, 178]). Durch die Kapselung erhöht sich der Liftoff z.B. für den NVE-Sensor AB001-02 auf mehr als $\geq 400 \mu\text{m}$ [179]. Dadurch allerdings nimmt das SNR bei der Detektion von Mikrorissen sehr stark ab, weshalb Streufelder von Rissen im μm -Regime nur unzuverlässig detektiert werden können. Der Untersuchung von mm-großen Defekten mit diesen GMR-Sensoren und somit ihrem generellen Einsatz in der ZfP steht dem dennoch nichts entgegen. Allerdings muss für ein ZfP-angepasstes Sensorarray (siehe Kap. 5) darauf geachtet werden, dass der Si-Chip so nah wie möglich an die Platinkante gebracht wird, um den Liftoff klein zu halten und so die Detektion von Mikrorissen zu ermöglichen.

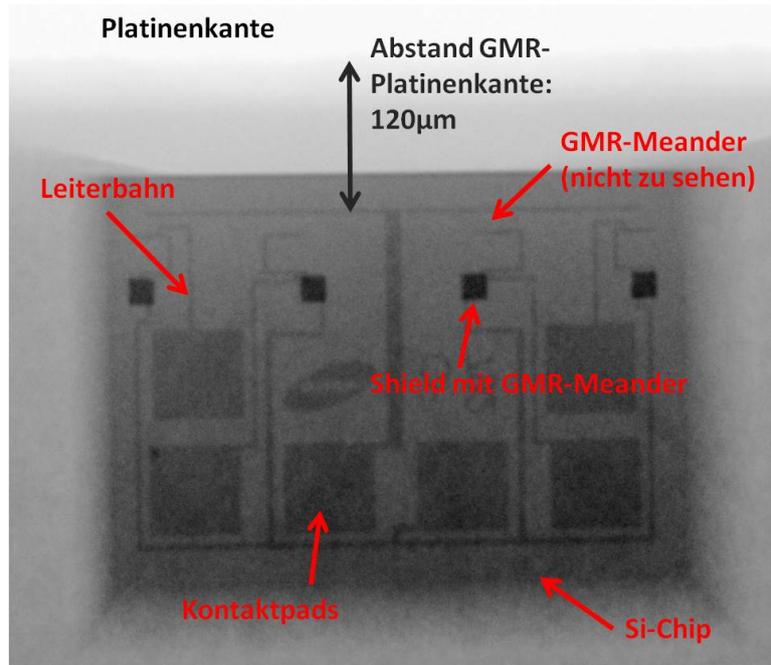


Abbildung 3.13: Durchstrahlung des Magnetometers GF792 (*Sensitec GmbH*) zur Bestimmung des Abstands der empfindlichen Elemente von der Platinenkante (Quelle BAM, FB 8.5, [176]).

Array

Der Einsatz von Arrays mit vielen GMR-Elementen kann zu einer erheblichen Zeitersparnis beim industriellen ZfP-Einsatz führen. In diesem Kapitel wurden zwei Magnetometer vorgestellt die aus 4 bzw. 8 GMR-Elementen bestehen. Da Hintergrundfelder, wie sie z.B. bei der 3D-Messung im folgenden Kap. 4 zu erkennen sind, hohe Werte annehmen können, ist es von Vorteil, in Hinblick auf die Feldauflösung kleinster Streufelder Gradiometer-Arrays zu verwenden. Hierdurch lässt sich bei nachfolgender Verstärkung eine bessere Auflösung der Signale erreichen. Zudem sind bei den vorgestellten Magnetometerarrays die Größen der aktiven Flächen und ihre Anordnung unterschiedlich. Inwieweit sich eine Anpassung der Geometrie der aktiven Flächen auf die Sensorsignale von Streufeldern auswirkt, wird im Kap. 5 mit dem Ziel eines an die ZfP angepassten GMR-Sensorarrays genau untersucht.

4 Voruntersuchungen

In der ZfP werden in den meisten Fällen kommerziell erhältliche GMR-Sensoren [15, 16, 65], z.B. der NVE-Sensore AB001 der Firma *NVE Corporation* eingesetzt, welche für andere Anwendungen, z.B. innerhalb der Automobilindustrie, entwickelt wurden [179]. Zwar liefern solche GMR-Sensoren schon einen ersten guten Eindruck ihrer Leistungsfähigkeit im Hinblick auf ZfP-Anwendungen, allerdings können nicht alle Vorzüge, die der GMR-Effekt bietet, beim Einsatz kommerzieller Sensoren bei ZfP-Anwendungen voll ausgenutzt werden.

Um ein Bild zu bekommen, inwieweit sich Grenzen beim Einsatz von nicht an die ZfP angepassten GMR-Sensoren bemerkbar machen, wurden erste Untersuchungen mit GMR-Sensoren der *Sensitec GmbH* durchgeführt. Diese zeichneten sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu den NVE-Sensoren speziell für Nahfeldapplikationen entwickelt wurden. Die hieraus erworbenen Kenntnisse dienten später der Optimierung eines an die ZfP-Bedürfnisse angepassten GMR-Sensorarrays. Zudem müssen bei der Streufeldprüfung die Hintergrundfelder durch den experimentellen Aufbau berücksichtigt werden und inwieweit diese gegebenenfalls die Messung beeinflussen können.

4.1 Magnetische Hintergrundfelder am Messstand

Da in dieser Arbeit ein elektromagnetisches ZfP-Verfahren, die Streuflussprüfung, behandelt wird, sind neben den mechanischen Eigenschaften des Verfahrtes auch die Kenntnisse der magnetischen Eigenschaften wichtig. Bei der Auswahl des Verfahrtes und seiner Komponenten wurde darauf geachtet, dass diese keine bzw. kaum störende magnetische Quellen besitzen. Dies können u.a. ferromagnetische Teile wie Schrauben aber auch elektrische Leitungen, welche magnetische Felder erzeugen, sein. Inwieweit diese Magnetfelder auf Messungen Einfluss nehmen können, wird im Folgenden näher betrachtet.

Mit einer Förstersonde wurde der x -Tisch in zwei verschiedenen Messungen auf magnetische Hintergrundfelder untersucht. Bei der ersten Messung wurde die Förstersonde fest auf dem x -Tisch installiert. Das bedeutet, dass sie wie eine Probe mit dem x -Tisch verfahren wird. Daraus kann ermittelt werden, ob außerhalb des eigentlichen Sondenbereiches Magnetfelder existieren, die so stark sind, dass diese die magnetischen Eigenschaften des Probekörpers beeinflussen können. Bei der zweiten Messung wurde die Förstersonde wie bei einer Prüfung mit GMR-Sensoren fest an der yz -Einheit montiert. Somit ist während der Messung nur der x -Tisch in Bewegung. Dies entspricht genau der Anordnung, mit der Testobjekte untersucht werden. Die Sondenhalterung wird nur zwischen den Messspuren in eine neue Position bewegt.

Die eingesetzte Förstersonde misst alle drei Raumrichtungen der magnetischen Induktion \mathbf{B} . Die Sensitivität beträgt $100 \mu\text{T/V}$. Allerdings befinden sich die einzelnen Sensorelemente für die drei Feldkomponenten aufgrund ihrer Größe von über 10 mm nicht exakt am gleichen Ort, sondern sind leicht zueinander verschoben angeordnet.

In Abb. 4.1 (a) sind die Messungen mit dem fest auf dem x -Tisch installierten Sensor dargestellt. Hierbei wurden die Sensoren genau auf der Mitte des x -Tisches, dem Ort der Spindel der Verfahrtheit, angebracht. Die schwarze Kurve entspricht der B_x -, die rote der B_y - und die blaue der $-B_z$ -Komponente, zusätzlich enthält das Diagramm den Betrag aus allen drei Komponenten (grün). $-B_z$ wurde gewählt, um den Unterschied zwischen Betrag und B_z deutlicher wiederzugeben.

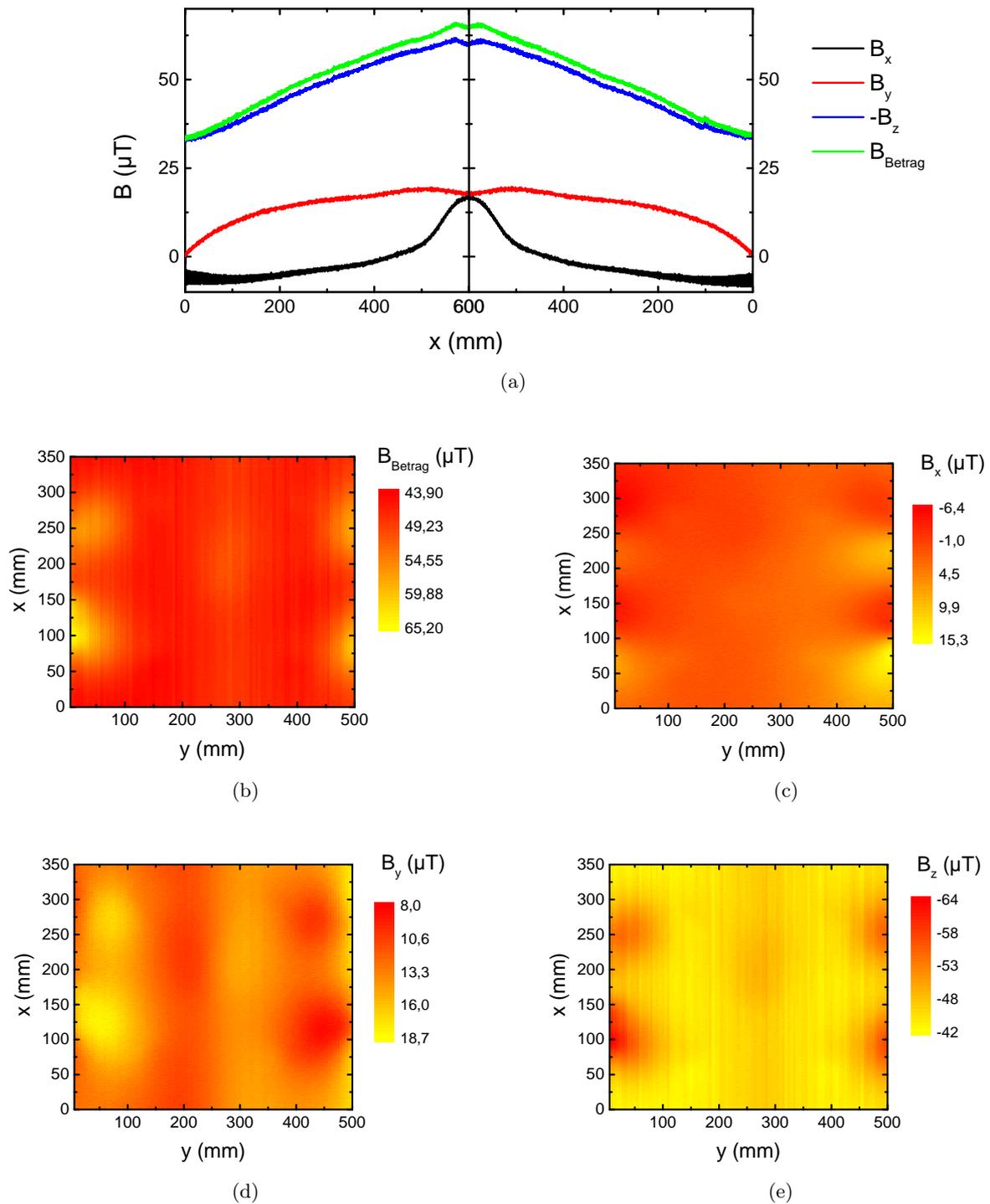


Abbildung 4.1: Hintergrundfelder des x -Tisches (xyz -System): (a) Aufnahme der Hintergrundfelder für den Fall, dass die Förstersonde fest auf der Mittelachse des x -Tisches, der Position eines Probekörpers, angebracht wurde. (b) - (e) Magnetische Hintergrundfelder im Fall der an der yz -Verfahreinheit fest installierten Förstersonde. Dargestellt sind hier der Betrag sowie alle drei Komponenten der magnetischen Induktion \mathbf{B} für einen Flächenscan des x -Tisches.

In allen drei Feldkomponenten sind leichte Schwankungen zu erkennen. Die Schwankungen liegen im Bereich von etwa $10 \mu\text{T}$. Zudem ist an den Offsets der einzelnen Komponenten das Erdmagnetfeld in der Größe von etwa $50 \mu\text{T}$ als konstante magnetische Hintergrundquelle, vor allem in der z -Komponente, zu erkennen. Größere Abweichungen sind nicht vorhanden, sodass eine vormagnetisierte Probe bzw. eine Prüfung mit lokaler Anregung durch diese Hintergrundfelder nicht bzw. nur geringfügig beeinflusst wird.

Für den Fall, dass sich die Förstersonde am Ort der Sondenhalterung befindet, an der später die GMR-Sensoren angebracht werden, sind in Abb. 4.1 (b) - (e) der Betrag der magnetischen Induktion sowie deren Komponenten B_x , B_y und B_z für den Flächenscan des verfahrenen x -Tisches gezeigt. Hier sind wiederum kleine Schwankungen im μT -Bereich sowie das Erdmagnetfeld in den Messungen zu erkennen. Da die Streufelder in den meisten Fällen größer als das Erdmagnetfeld sind, ist auch am Ort des Sensors nur ein geringer Einfluss der statischen Hintergrundfelder zu erwarten. Allerdings können die Streufelder von sehr kleinen Mikrorissen im Bereich von wenigen $\text{A/m} \approx \mu\text{T}$ liegen. Bei einer Gradiometermessung sind homogene statische Hintergrundfelder nicht im Messsignal enthalten. Wird die Messung mit einem Magnetometer durchgeführt, müssen diese Hintergrundfelder bei der Streufeldmessung von sehr kleinen Defekten jedoch hinsichtlich ihres potenziellen Einflusses auf die Mess- und Prüfergebnisse berücksichtigt werden. Das bedeutet im Fall einer Magnetometermessung, dass die Hintergrundfelder vom Messsignal abgezogen werden müssen, um das reine Defektsignal zu erhalten.

4.2 GMR-Sensoren für Nahfeldapplikationen in der Streuflussprüfung

4.2.1 Probekörper - künstliche Fehler

Platte aus Baustahl mit künstlichen Rissen

Für eine Streuflussprüfung kommen nur Probekörper aus ferromagnetischen Materialien in Betracht, damit sich an Defektstellen Streufelder ausbilden können. Für erste Untersuchungen ist es hilfreich, die Größe der Defekte genau zu kennen, damit die Messsignale den Rissparametern, insbesondere der Defekttiefe, zugeordnet werden können. Für die Experimente wurden deshalb Mikronuten in verschiedenen Größen mit niedriger Energie funkenerosiv¹ in eine Stahlplatte aus Baustahl ST37 (neue Bezeichnung: S235JR+AR nach EN 10025-2:2004-10) eingebracht. In Abb. 4.2 sind in einem Schema die Tiefen der Nuten skizziert.

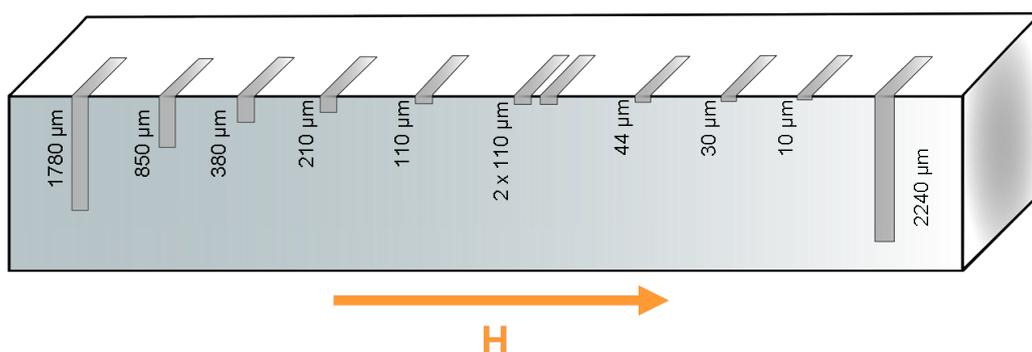
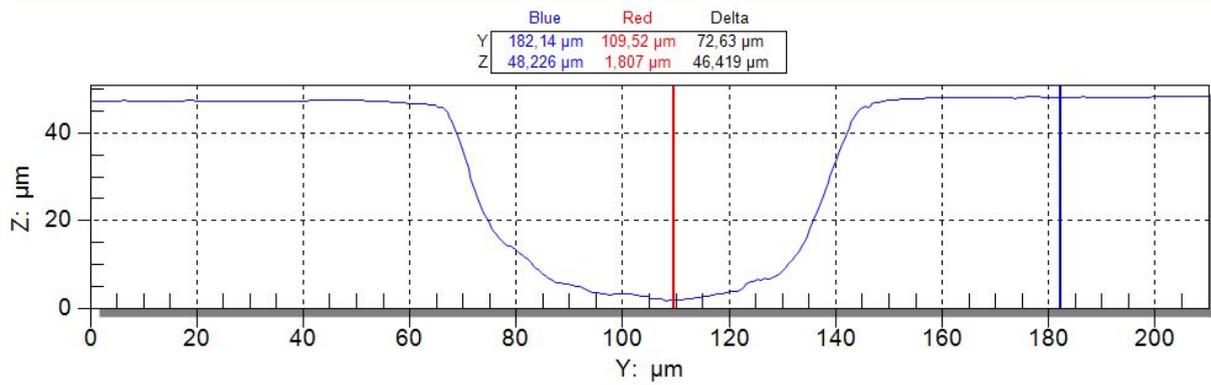
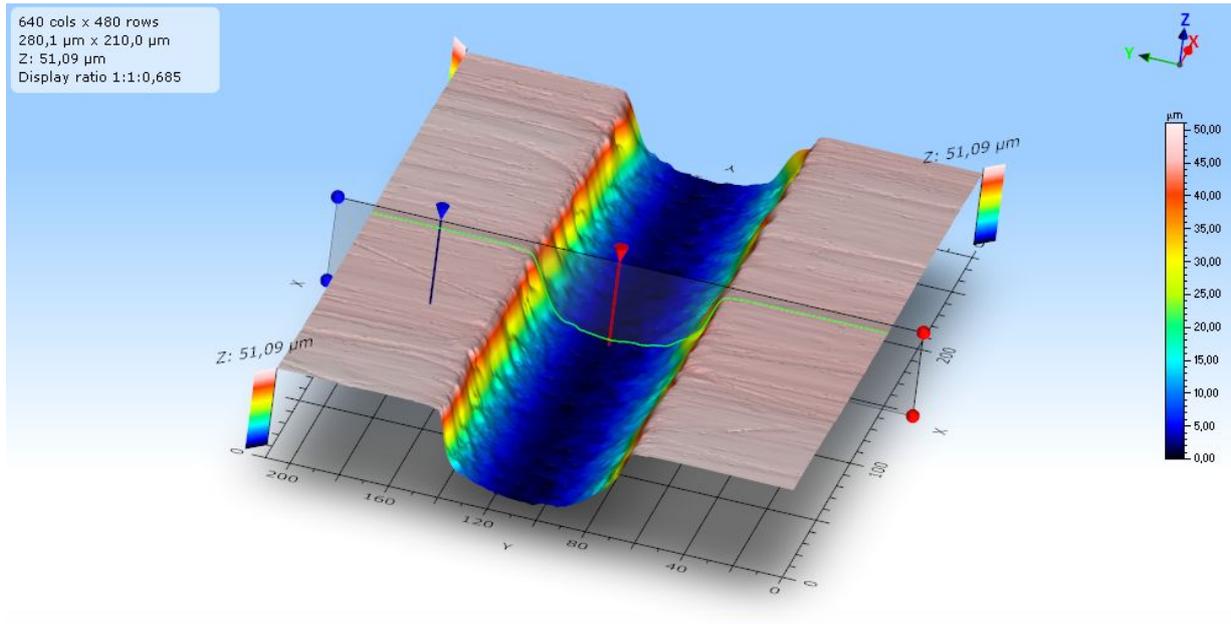
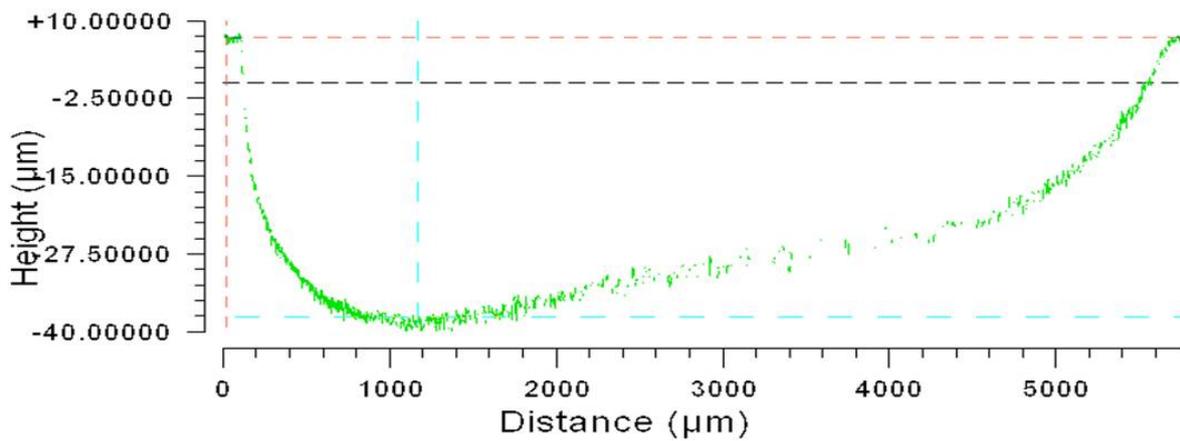


Abbildung 4.2: Schema der Stahlprobe mit funkenerosiv eingebrachten Rissen verschiedener Tiefe (von $10 \mu\text{m}$ bis $2260 \mu\text{m}$).

¹Niedrige Energien bei der Funkenerosion sind nötig, damit die Materialeigenschaften des umliegenden Materials nicht durch einen zu hohen Wärmeeintrag zu stark verändert werden.



(a)



(b)

Abbildung 4.3: (a) Profil der 44 μm tiefen Nut. (b) Verlauf der Tiefe der Nut über deren Länge. (Quelle BAM, FB 6.7, [180])

Die Tiefen der Nuten reichen von $10\ \mu\text{m}$ bis $2240\ \mu\text{m}$ und ihre Klaffungen schwanken zwischen $90\ \mu\text{m}$ und $150\ \mu\text{m}$. Da sich die Klaffung auf den Streufluss geringer auswirkt als die Tiefe [33], fallen diese Schwankungen nicht signifikant ins Gewicht. Die Längen liegen für alle Defekte annähernd bei $5\ \text{mm}$.

In Abb. 4.3 ist das Profil der $44\ \mu\text{m}$ -Nut und der Verlauf der Tiefe der Nut dargestellt. Dabei handelt es sich um eine optische Tiefenbestimmung der Nut. Hierfür eingesetzt wurde ein Weißlichtinterferenzmikroskop (Multisondenmessplatz NewView 5022, Zygo LOT). Die vertikale Auflösung beträgt $1\ \text{nm}$ und die laterale Auflösung, abhängig vom Versuchsaufbau, liegt im vorliegenden Fall bei $\leq 1\ \mu\text{m}$ [180]. Die Gesamtvergrößerung betrug bei den optischen Messungen 500 und es wurde ein Chip mit einer Größe von 640×480 Pixel verwendet. In (b) ist zudem zu erkennen, dass die Erodierfolie nicht perfekt zur Oberfläche ausgerichtet war, wodurch sich eine kontinuierliche Abnahme der Tiefe über die Länge ergab.

Am farblichen Verlauf in der Falschfarbendarstellung und ebenfalls in der Liniendarstellung im unteren Bereich der Abbildung ist zu erkennen, dass die Flanken der Nut nicht geradlinig verlaufen, sondern das Profil vielmehr einen gekrümmten Verlauf besitzt. Die laterale Ortsauflösung der optischen Messungen der Oberfläche liegt im Bereich von einem μm und wird sowohl durch die verwendete Vergrößerungsoptik als auch durch den Chip beeinflusst [180]. Dadurch ist als Ursache für den elliptischen Verlauf nicht die optische Messtechnik, sondern der nicht lineare Abtrag an den Flanken der Nut bei der Funkenerosion verantwortlich.

Neben dem Profil lässt sich mit dem optischen Messverfahren auch die Oberflächenrauheit bestimmen. Hierzu ist in Abb. 4.4 eine Falschfarbendarstellung und darunter ein Linienverlauf (markiert im oberen Teil der Abbildung) gezeigt. Die Messung ergab eine Oberflächenrauheit von maximal $4,3\ \mu\text{m}$. Im Vergleich zu den Defekttiefen sind die Schwankungen also gering. In der Falschfarbendarstellung sind zudem die mechanischen Bearbeitungsspuren an der Oberfläche der Platte zu erkennen. Bevor Fehler in den Probekörper eingebracht wurden, sind beide Seiten der Platte in einem Arbeitsschritt plan parallel abgeschliffen worden.

Für eine Messung mit GMR-Sensoren muss die Platte magnetisiert sein. Dies kann durch eine vor der Messung durchgeführte Aufmagnetisierung oder durch eine lokale Anregung erfolgen. Im vorliegenden Fall wurde die Platte vor der Messung einem starken Magnetfeld senkrecht zum Verlauf der Nuten ausgesetzt, wodurch die Platte nach dem Abschalten des Magnetfeldes remanent magnetisiert war. Hierdurch ergibt sich als Abschätzung aufgrund der Hysterese des verwendeten Stahls ein internes Feld von $\leq 1,2\ \text{kA/m}$, wobei dies eine obere Abschätzung darstellt und durch interne Entmagnetisierungen aufgrund der Geometrie je nach Ort das Feld geringer sein kann. Zudem kann daraus die Permeabilität für die remanente Magnetisierung bestimmt werden. Sie liegt bei $\mu_r = 400$. Diese Magnetisierung bzw. das interne Magnetfeld ist ausreichend, um detektierbare Streufelder an Defekten zu erzeugen.

Abb. 4.5 (a) stellt einen Flächenscan der Stahlplatte als Falschfarbenplot dar. Im oberen Bereich der Abbildung ist die gesamte Fläche gezeigt. Darunter befinden sich Ausschnitte mit angepassten Skalen des Flächenscans zur besseren Darstellung der Signale für die Nuten mit einer Tiefe von 380 , 210 und $44\ \mu\text{m}$. Die Messung wurde mit dem Gradiometer GMR7 durchgeführt. Die Felddifferenz wurde entlang der x -Achse gebildet, d.h. senkrecht zu den Nuten.

Im oberen Bild ist der Hintergrund annähernd einfarbig in cyan abgebildet. Hin zu den Enden der Probe ist das abgebildete Differenzsignal leicht unterschiedlich zum mittleren Bereich der abgescannten Fläche. Da die Platte vormagnetisiert wurde, tritt aufgrund der Form an einem Ende wie bei einem Permanentmagneten Feld aus, welches am anderen Ende wieder in die Platte eintritt (siehe hierzu auch den Linienscan entlang der Defektmitte in Abb. 4.5 (b)). Dadurch wirkt sich an den Enden der Platte der stärkere Gradient des Hintergrundfeldes in der Normalkomponente aus. Zudem sind im Graphen die Streufelder der tiefen Nuten deutlich zu sehen. Die Streufelder der kleineren Nuten lassen sich hier wegen der geringen Auflösung der Farbskala allerdings nicht erkennen. Die Ausschnitte im unteren Bereich der Abb. 4.5 besitzen eine jeweils an die Stärke des Streufeldes angepasste Farbskala. Anhand

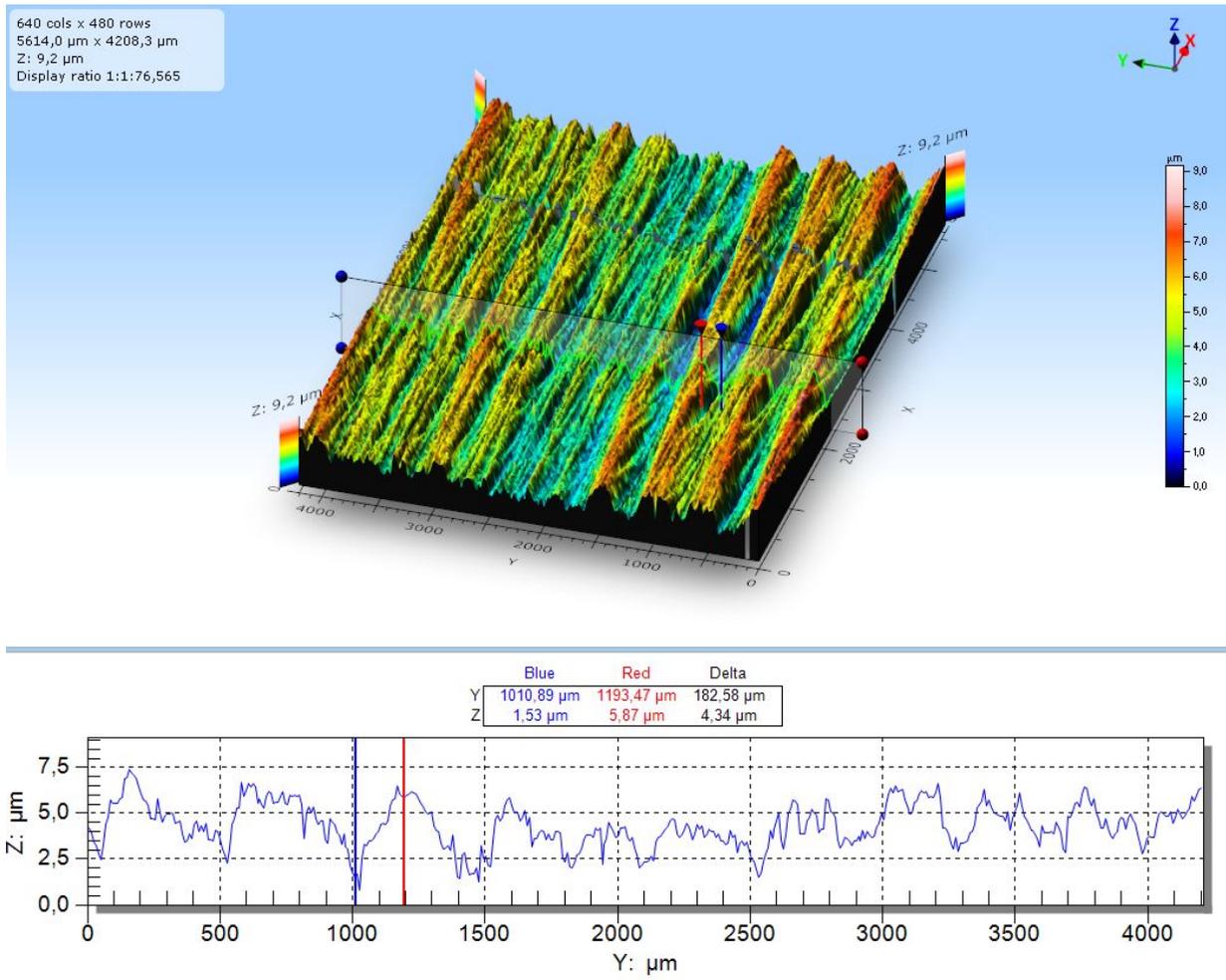


Abbildung 4.4: Oberflächenrauheit der Rissplatte 1. (Quelle BAM, FB 6.7, [180])

der Darstellung der 44 μm tiefen Nut lässt sich zudem erkennen, dass das Streufeld in y -Richtung kontinuierlich zunimmt. Dies liegt an der unterschiedlichen Tiefe der Nut über deren Länge (siehe hierzu Abb. 4.3 (b)).

Die oben erwähnten Linienscans entlang der Nutmitten sind in Abb. 4.5 (b) und (c) für drei verschiedene Liftoffs $z = 50, 100$ und $150 \mu\text{m}$ (Abstände des Sensors zur Prüfobjektoberfläche) gezeigt. Diese Liftoffs entsprechen allerdings nicht dem Abstand der empfindlichen Flächen des GMR-Sensors, sondern dem Abstand der Platinenunterkante von der Oberfläche. Eine genaue Kenntnis der Lage der empfindlichen Flächen für diesen Sensor ist nicht bekannt. Da die Sensorchips nah an der Platinenkante geklebt wurden, sollte der Abstand im Bereich von $50 - 100 \mu\text{m}$ liegen. Aufgetragen ist das Differenzsignal des Gradiometers ΔH_z entlang der Scanrichtung x . In (b) sind die Streufeldsignale der Nuten deutlicher zu erkennen, als dies in den Flächenscans möglich ist. Dabei wird verdeutlicht, wie sich die Tiefe auf die Stärke des Streufeldes auswirkt. Mit zunehmender Tiefe nimmt auch die Stärke des Streufeldes zu. Zusätzlich sind in (c) die Signale der 380 μm tiefen Nut für die drei Liftoffs dargestellt. Wie zu erwarten, nimmt das ermittelte Streufeld mit zunehmendem Abstand (Liftoff LO) zur Prüfobjektoberfläche und somit zur Rissöffnung ab.

Um diesen Zusammenhang nochmals zu verdeutlichen, sind in Abb. 4.6 die Maxima $\Delta H_{z,\text{max}}$ für fünf verschiedene Nuten mit Tiefen von 850, 380, 210, 110 und 44 μm abhängig vom LO , der Distanz

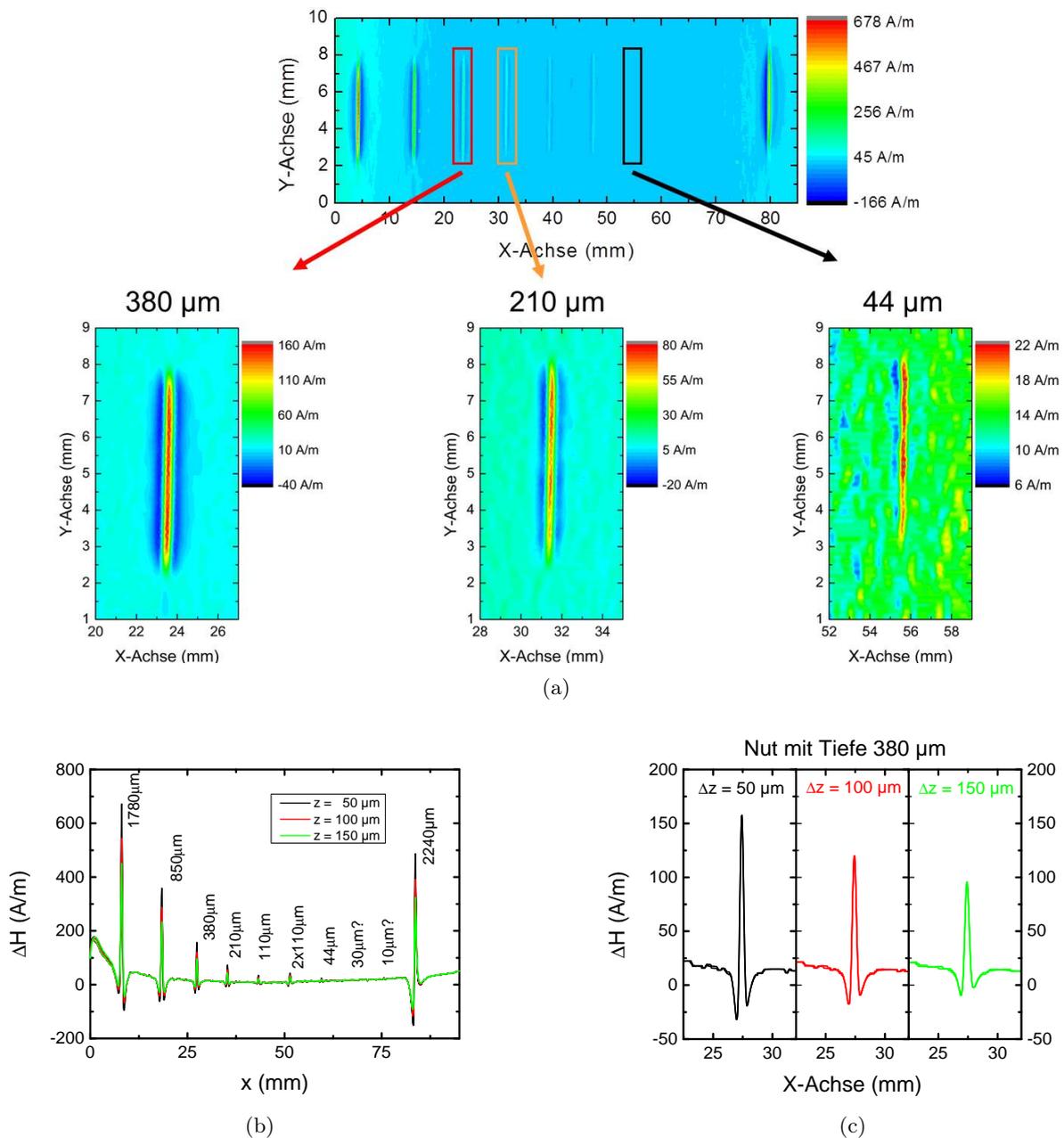


Abbildung 4.5: (a) Oben: Falschfarbendarstellung des GMR7-Gradiometersignals für einen Flächenscan der *Rissplatte 1*. Unten: Ausschnitte des Flächenscans für drei Nuten mit einer Tiefe von 380, 210 und 44 μm . (b) GMR7-Linienscans entlang der Nutmitteln. Aufgetragen ist die gemessene Magnetfeldstärke ΔH_z als Funktion von x für drei verschiedene Abstände des Gradiometers zur Plattenoberfläche. (c) Ausschnitt der Linienscans für die Nut mit einer Tiefe von 380 μm .

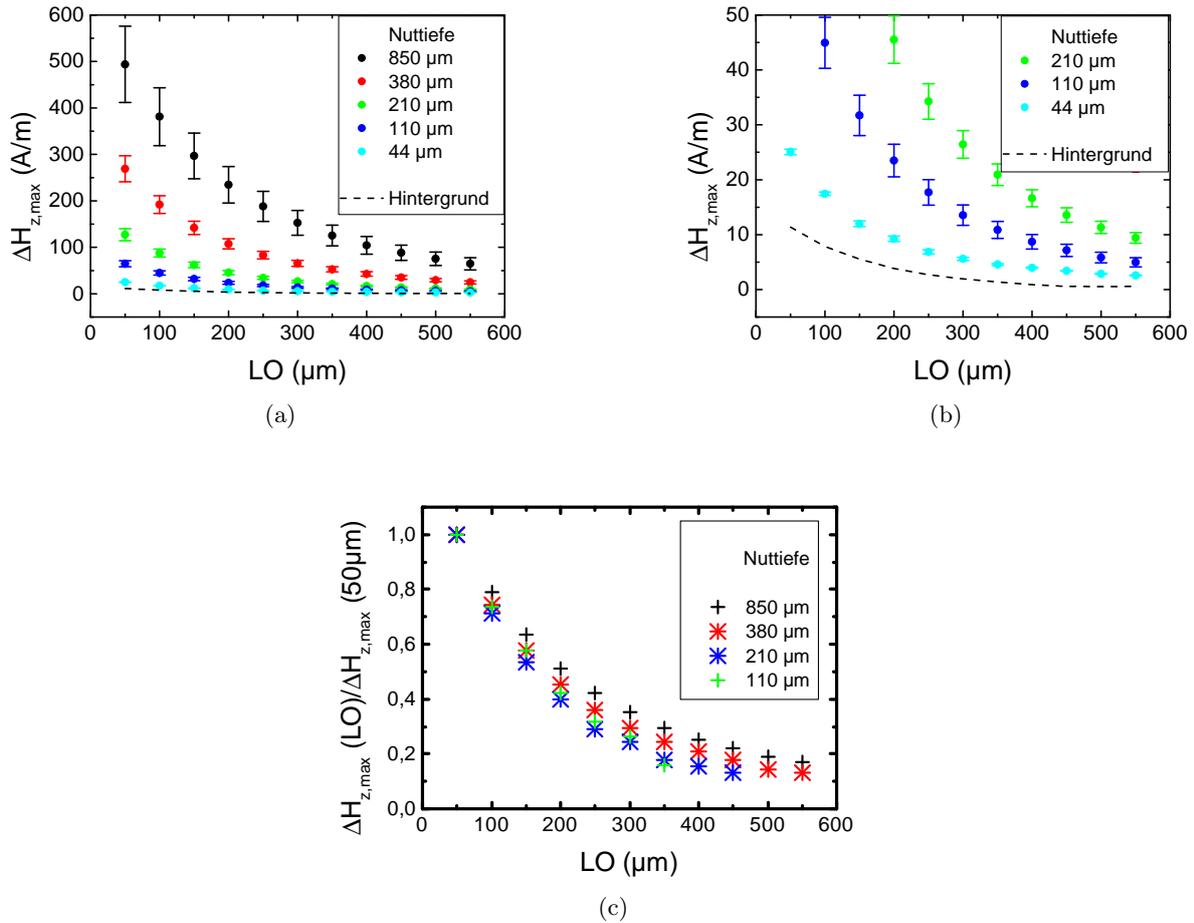


Abbildung 4.6: (a) $\Delta H_{z,\max}$ in Abhängigkeit von dem Liftoff LO für vier Nuten verschiedener Tiefen. Die gestrichelte Linie gibt die untere Grenze der Detektionsmöglichkeit an. (b) Ausschnitt von (a) für den Feldbereich zwischen -5 und 50 A/m. (c) $\Delta H_{z,\max}$ normiert auf die magnetische Feldstärke für $LO = 50 \mu\text{m}$ als Funktion des Liftoffs LO .

des Sensors zur Prüfkörperoberfläche, dargestellt. In (a) sind die Maxima absolut ((b) ist zur besseren Darstellung ein Ausschnitt von (a) für den Feldbereich zwischen -5 und 50 A/m gezeigt) und in (c) normiert auf den ersten Wert bei $z = 50 \mu\text{m}$ abgebildet. Zusätzlich ist in (a) und (b) eine gestrichelte Linie für den Hintergrund, verursacht durch Permeabilitätsschwankungen, eingezeichnet. Diese Kurve gibt die unterste Detektionsgrenze an, ab der ein Defektsignal noch als detektiert angesehen werden kann. Die normierten Werte in (c) zeigen des Weiteren, dass die Abnahme des Feldes in Abhängigkeit von der Distanz nur in geringem Umfang von der Defekttiefe abhängt.

Neben der Streufeldanzeige der $44 \mu\text{m}$ tiefen Nut in Abb. 4.5 sind zusätzlich lokale Magnetfeldanzeigen zu erkennen. Dies wird nochmals in Abb. 4.7 verdeutlicht. Hier sind nebeneinander zwei Messungen des gleichen Bereiches gezeigt. Zusätzlich sind durch zwei Pfeile sowie zwei Kreise markante Gebiete beispielhaft hervorgehoben, welche ein Streufeld von etwa 10 A/m und mehr besitzen. Die Schwankungen sind nicht statistischer Natur (z.B. Rauschen), sondern Eigenschaften des Probekörpers selbst. Die Oberflächenrauheit ist hier zu gering, um detektierbare Streufelder zu erhalten. Durch eine Simulation der Streufelder für die $380 \mu\text{m}$ tiefe Nut und zum Vergleich für die Oberflächenrauheit (Annahme eines Defektes mit $5 \mu\text{m}$ Tiefe und einer Klaffung von etwa $300 \mu\text{m}$) ergibt sich, dass das Hintergrundfeld

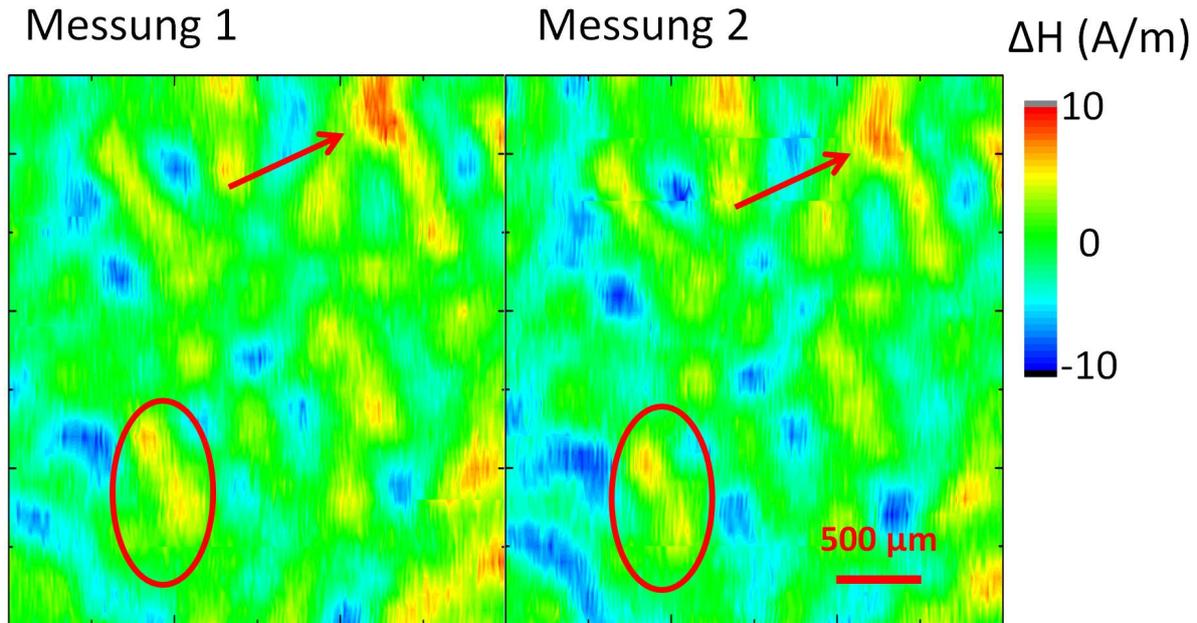


Abbildung 4.7: Messung des magnetischen Hintergrunds der *Rissplatte 1*. Dargestellt sind zwei aufeinanderfolgende Messungen des gleichen Bereiches der *Rissplatte 1*. Beispielfhaft sind zwei markante Bereiche durch einen roten Kreis sowie einen roten Pfeil hervorgehoben.

der Oberfläche, das Topologierauschen, $\Delta H_{\text{Topologierauschen}} < 1 \text{ A/m}$ ist und somit etwa ein Prozent des Streufeldes der $380 \mu\text{m}$ tiefen Nut beträgt (siehe hierzu Abb. 4.5 (c)). Diese Felder sind geringer als die dargestellten Schwankungen in Abb. 4.7 von $\pm 10 \text{ A/m}$. Zusätzlich müssten dann in diesem Fall auch die 10 und $30 \mu\text{m}$ tiefen Nuten noch zu erkennen sein, da die Oberflächenbeschaffenheit kleinere Tiefenschwankungen aufweist als die Fehler. Allerdings ähneln die Schwankungen Clustern, was auf Permeabilitätsschwankungen und Gefügeänderungen hindeutet, die zu einem Austritt des internen Magnetfeldes führen.

Um den Einfluss der Hintergrundfelder durch die aufmagnetisierte Platte selbst zu verdeutlichen, wurden neben Gradiometermessungen auch Messungen mit einem Magnetometer durchgeführt. Hierfür kam der 3D-Sensor zum Einsatz, da mit diesem Sensor alle drei Raumkomponenten zur gleichen Zeit detektierbar sind. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.8 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung sind drei Flächenscans zu erkennen. Der obere Scan zeigt die x -Komponente der magnetischen Feldstärke, in der Mitte ist die y -Komponente und unten die z -Komponente abgebildet. In der x - und z -Komponente ist deutlich das Hintergrundfeld der aufmagnetisierten Platte zu sehen. Dies wird deutlich an den Linienscans in der Abbildung auf der rechten Seite. Zusätzlich zum Hintergrundfeld lassen sich die Streufelder einiger Nuten erkennen.

Im Vergleich zu einem Gradiometer wird im Fall eines Magnetometers das Magnetfeld absolut gemessen, wodurch das Messsignal mehr Information verglichen mit dem Gradiometer enthält (siehe hierzu auch Abschnitt 2.5 in Kapitel 2). Allerdings steht dem Zugewinn an Informationen eine geringere Auflösung der magnetischen Feldstärke gegenüber. Dies liegt daran, dass eine Verstärkung der Sensorsignale im Fall von Magnetometern nicht so hoch ausfallen kann wie bei einem Gradiometer. Da allerdings bei einer Prüfung nicht die Hintergrundfelder von Interesse sind, sondern kleine, lokal auftretende Streufelder, ist es von Vorteil, Gradientensensoren in der ZfP einzusetzen.

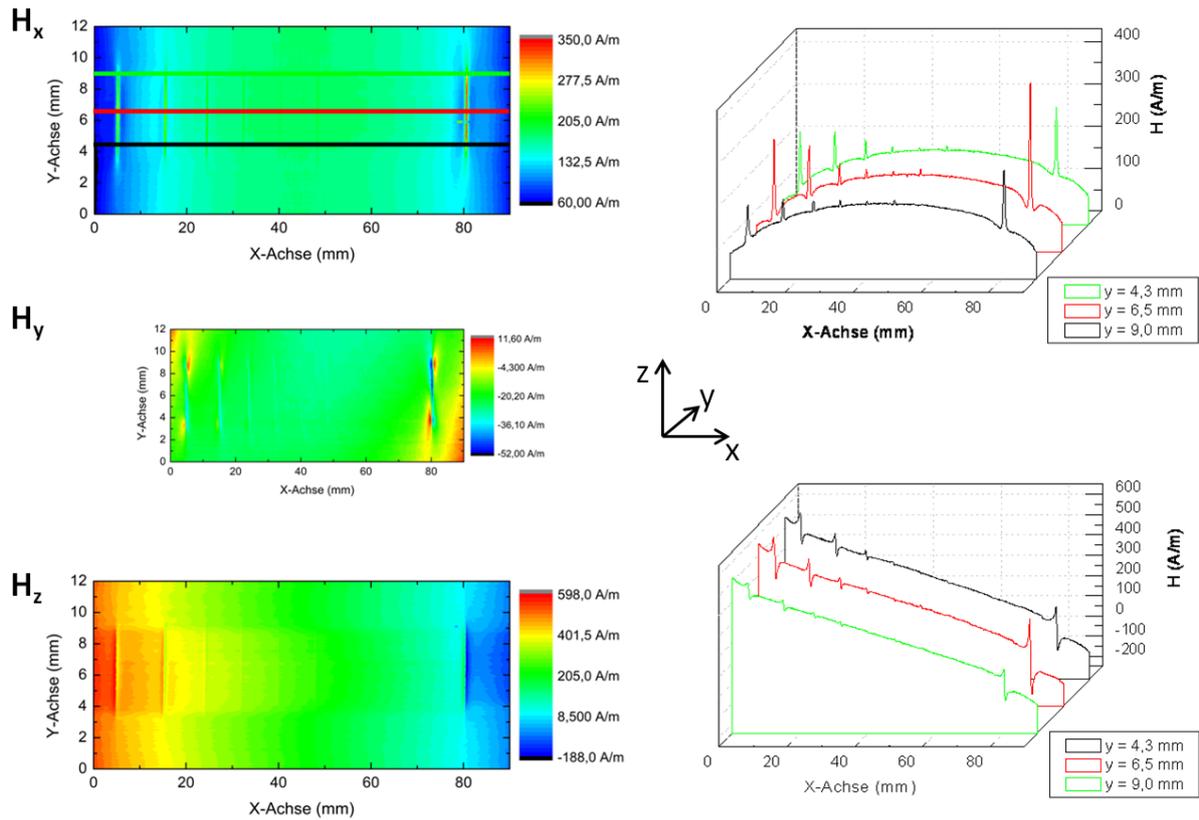


Abbildung 4.8: Einsatz des 3D-Sensors zur Streufeldmessung der Stahlprobe *Rissplatte 1*. Links sind die drei Komponenten der magnetischen Feldstärke als Falschfarbendarstellungen abgebildet (oben H_x , Mitte H_y und unten H_z). Rechts: Linienscans der H_x - und H_z -Komponente entlang der Nutmitte (rote Kurve) bzw. deren Enden (schwarz und grün).

Ring 1

Eine erste industrierelevante Anwendung hatte zum Ziel, kleinste Mikrorisse in Lagerschalenringen, welche z.B. in ICE-Zügen eingesetzt werden, mit Hilfe von GMR-Sensorarrays zu detektieren und zu bewerten. Um erste Ergebnisse an solchen Lagern zu erhalten, wurde ein Lagerschalenring mit kleinen Mikronuten funkenerosiv versehen. Die Nuten hatten Tiefen von 40, 42, 70 und 170 μm . Die Klaffung betrug bei den vier Defekten etwa 90 – 100 μm . Die Nuten wurden an der Außenseite eines Lagerschalenrings mit einem Durchmesser von 215 mm eingebracht. Die 42 μm tiefe Nut wurde zudem in einem Winkel von 45 Grad zur Umlaufrichtung funkenerosiv in den Ring erodiert, die weiteren drei Nuten senkrecht zur Umlaufrichtung.

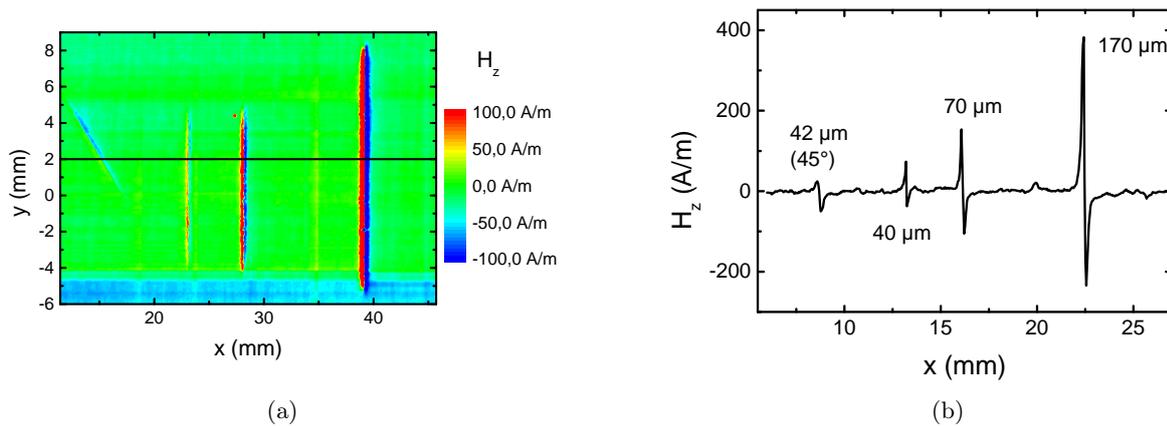


Abbildung 4.9: (a) Falschfarbendarstellung der gemessenen Magnetfeldstärke H_z als Funktion von x für den Defektbereich mit dem Magnetometer GF792. (b) Linienscan entlang der Spur $y = 2$ mm.

In Abb. 4.9 sind Messungen des Lagerschalenrings mit dem Magnetometer GF792 dargestellt. Das Magnetfeld wurde mit einem kleinen Joch erzeugt, in dessen Mitte zwischen den beiden Polen der Sensor integriert wurde (Aufbau der Sonde siehe Kap. 7 Abb. 7.1 bzw. Abb. 7.2). In (a) ist der Bereich der Defekte als Falschfarbenplot und in (b) ein Linienscan für $y = 2,0$ mm gezeigt (schwarze Linie in (a)). Abgebildet sind die gemessenen Magnetfeldstärken der Normalkomponente H_z für einen Liftoff von etwa $LO = 50$ μm . In (a) wurde die Skala des Farbverlaufs angepasst, damit neben den tiefen Defekten auch noch die Signale der kleinen Defekte sichtbar abgebildet werden.

Neben den sich deutlich vom Hintergrund abhebenden Defektanzeigen in (a) ist zusätzlich für den unteren Bereich ein farblicher Unterschied zu den oberen Bereichen ab $y = -5$ mm zu erkennen. Da die Änderung mit dem ersten Auftreten des Streufeldes der tiefsten Nut zusammenfällt, ist die sensoreigene Hysterese des GMR-Magnetometers sowie sein Aufbau als Mäander dafür verantwortlich. Durch hohe Streufelder kann innerhalb der Struktur die Magnetisierung der senkrechten Anteile des Mäanders der freien Schicht um 180 Grad umklappen, wodurch sich der Widerstand um einen konstanten Faktor ändert. Des Weiteren kann sich eine zu hohe Sensorhysterese negativ auswirken und für einen zusätzlichen Offset im Messsignal sorgen. Die Streufeldamplituden der Defektsignale sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Die Streufeldsignale nehmen, wie auch bei der Platte zuvor, mit zunehmender Tiefe zu, allerdings sind hier insbesondere in den Anzeigen für die tieferen Defekte kleine Asymmetrien im Signal zu erkennen. Diese Asymmetrie wird in Kap. 5 genauer betrachtet.

Insgesamt sind alle Defektsignale mit einem sehr guten SNR zu erkennen. Für den kleinsten Defekt ist das SNR etwas besser als 10 dB. Das Rauschen beträgt etwa 25 A/m. Hier sind elektronisches Rauschen

Defekttiefe	$H_{z,\max} - H_{z,\min}$
	[A/m]
170 μm	618
70 μm	260
40 μm	110
42 μm (45°)	73

Tabelle 4.1: Magnetfeldamplituden der einzelnen Nuten.

und Hintergrundschwankungen des Magnetfeldes aufgrund von magnetischen Materialeigenschaften mit einbezogen. Im Gegensatz zur Platte in Abb. 4.5 lassen sich in diesem Probekörper Defekte mit einer Tiefe von 40 μm sehr gut detektieren, was darauf hindeutet, dass auch weniger tiefe Defekte nachweisbar sind. Dabei spielt bei der GMR-Streufungsprüfung das Material, welches untersucht werden soll, eine sehr große Rolle. Der Lagerschalenring besteht aus Saarstahl 100Cr6, zusätzlich ist die Oberfläche ausgehärtet und poliert. Dadurch treten lokale, magnetische Schwankungen verglichen mit der Platte kaum auf und eine Störung, wie z.B. ein Riss, ist mit geringeren Tiefen schon leichter zu registrieren.

4.2.2 Probekörper - natürliche Fehler

Neben künstlichen Fehlern wie funkenerosiv eingebrachte Nuten, ist in der ZfP von besonderem Interesse, wie sich natürliche Fehler und deren Signale von den künstlichen Fehlern unterscheiden. Im Folgenden sind hierzu drei Beispiele angeführt - eine Schiene mit Head Checks, der Referenzprobekörper *Vergleichskörper 1* und eine Platte mit Schleifbrandrissen. Um eine Prüfmethode zu charakterisieren, ist es von Vorteil, viele Proben mit natürlichen Fehlern zu untersuchen. Allerdings stehen solche Proben zumeist nicht in der benötigten Menge zur Verfügung.

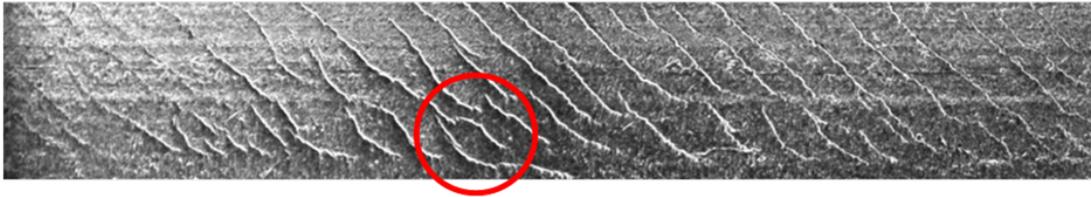
Schiene mit Head Checks

Der erste Probekörper mit natürlichen Rissen ist ein Stück aus einem Schienenbogen (Abb. 4.10 oben). In solchen Schienen sind oft im Außenbogen sogenannte Head Checks zu finden. Das sind Fehler, die durch Rollkontaktermüdung an der Oberfläche entstehen. Sie können zu einem Schienenbruch mit verheerenden Folgen führen, wenn sie nicht rechtzeitig erkannt und behoben werden. Aus diesem Grund werden Schienenabschnitte von der Deutschen Bahn regelmäßig mit Ultraschall und Wirbelstrom geprüft und bei Bedarf Material abgeschliffen, um einem sich entwickelnden Bruch vorzubeugen und die Lebensdauer der Schienen insgesamt zu erhöhen.

Im unteren Bereich der Abb. 4.10 sind eine Magnetpulverprüfung des Schienenstücks und eine GMR-Streufungsmessung mit dem Magnetometer GF790b dargestellt. Ein Bereich ist hier mit einem roten Kreis markiert, um die annähernd gleichen Prüfergebnisse zu verdeutlichen. Allerdings ist die GMR-Messung unvollständig, da die Magnetisierung nur entlang der Scanrichtung anlag. Parallel zur Scanrichtung sind somit keine Defekte zu finden. Ein weiterer Nachteil bei dieser Messung war die gewölbte Form der Schiene. Daraus folgte, dass nach mehreren gefahrenen Scanlinien die Höhe des GMR-Sensors angepasst werden musste. Insgesamt dauerte die Messung der gesamten Fläche weit über eine Stunde. Im Vergleich dazu war ein Ergebnis mit der Magnetpulverprüfung in wenigen Minuten zu erhalten. Wenn eine gebogene Oberfläche gescannt wird, müssen die genauen Maße bekannt sein sowie ein geeignetes, angepasstes Sensorarray zur Verfügung stehen.



Magnetpulverprüfung



GMR (remanente Messung)

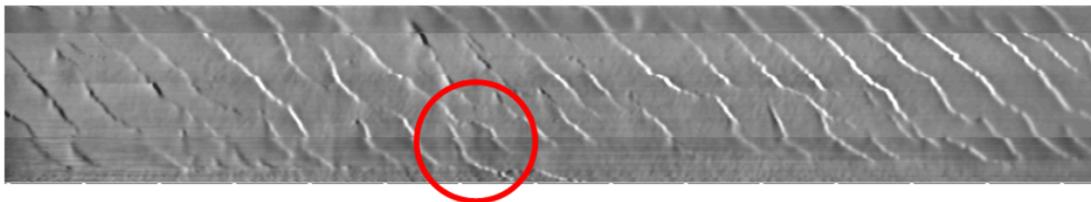


Abbildung 4.10: Oben: Schiene mit Head Checks (rechts), wie sie in den Außenbögen von Eisenbahnschienen auftreten können (links, Quelle BAM, FB 8.4). Mitte: Magnetpulverprüfung (Quelle [81]). Unten: GMR-Streufeldmessung mit dem Magnetometer GF790b

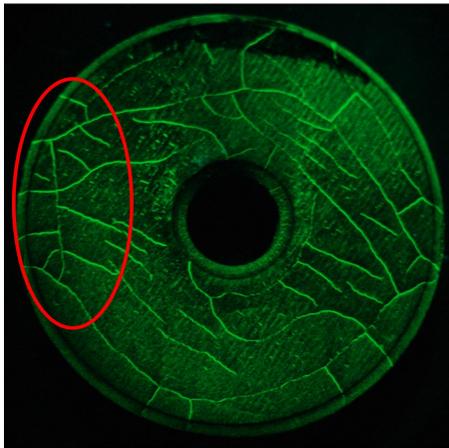
MT - Vergleichskörper 1

Ein weiterer Testkörper mit natürlichen Fehlern ist der *Vergleichskörper 1*, wie er in der Magnetpulverprüfung eingesetzt wird. Hier dient er der Überprüfung der Anzeigeempfindlichkeit des Magnetpulvers. Der Testkörper sowie die Durchführung der Überprüfung sind in der Norm DIN EN ISO 4493-2 [56] geregelt.

Der Testkörper besitzt ein sehr starkes internes Magnetfeld (skizziert in Abb. 4.11 (b) durch den orangefarbenen Kreis). Dieses Magnetfeld wird durch einen stromdurchflossenen Docht, welcher durch das Loch in der Mitte geschoben wird, induziert. An den eingebrachten Rissen - feine Spannungskorrosions- und grobe Schleifbrandrisse - entstehen Streufelder, die entweder durch ein Magnetpulver sichtbar gemacht werden oder durch den Einsatz von Magnetfeldsensoren wie GMR-Sensoren detektiert werden können. Die Spannungskorrosionsrisse besitzen Tiefen von bis zu 1 mm. Die Klaffung beträgt 0,1 bis 3 μm [181]. Schleifrisse können bis zu 10 μm breit sein.

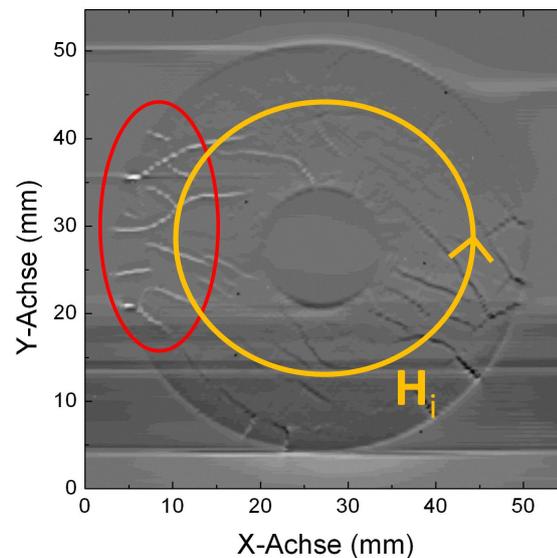
In Abb. 4.11 (a) und (b) sind eine Magnetpulverprüfung sowie eine GMR-Streufeldmessung des gleichen Testkörpers dargestellt. Eingesetzt wurde das laterale Gradiometer GMR7. Der rote Kreis markiert einen Bereich, in dem bei beiden Prüfmethoden deutlich die gleiche Rissstruktur sichtbar wird. Allerdings sind bei der GMR-Streufeldmessung nicht alle Risse zu erkennen. Grund hierfür ist der eingesetzte Sensor, der einen lateralen Feldgradienten in einer Ebene misst. Dadurch werden Risse,

Magnetpulverprüfung



(a)

GMR



(b)

Abbildung 4.11: (a) Magnetpulverprüfung des *Vergleichskörpers 1* (alte Bezeichnung Probekörper *MTU-1*). (b) Gradiometermessung des *Vergleichskörpers 1* mit dem Sensor GMR7. In (a) und (b) ist zusätzlich ein markanter Bereich als Vergleich der Messungen miteinander durch eine rote Ellipse hervorgehoben. In (b) ist zudem der Verlauf der internen Magnetfeldstärke skizziert.

die parallel zur Gradientenachse verlaufen, nur an dessen Enden angezeigt. Für eine komplette Messung muss im Fall der GMR-Streulungsmessung mit dem Sensor GMR7 eine zweite Prüfung durchgeführt werden, bei der entweder der Sensor oder die Probe selbst um 90° rotiert werden muss. Auch ist in der GMR-Messung eine Streifenbildung entlang der Spuren zu erkennen. Diese wird durch sehr starke Streufelder, wie sie z.B. an Kanten auftreten, erzeugt. Hierdurch kann der Sensor gesättigt werden. Befindet sich der Sensor wieder an einer Stelle mit geringerer Magnetfeldstärke, ändert sich aufgrund einer zu großen Hysterese des Sensors der Offset in der Brückenspannung. Das Problem kann umgangen werden, indem kleinere Felder zur Anregung verwendet werden und Störquellen mit hohen Streufeldern, wie Kanten, nicht mit gemessen werden.

Platte mit Schleifbrandrissen

Ein weiterer Probekörper mit Schleifbrandrissen ist in Abb. 4.12 gezeigt. Dieser Testkörper wird in der Wirbelstromschulung eingesetzt. Die Messung wurde wie bei der *Rissplatte 1* ebenfalls in Remanenz durchgeführt. Vor der Messung war die Platte einem Magnetfeld in x -Richtung ausgesetzt. Gemessen wurde mit dem GMR-Sensor GF790b die normale Magnetfeldkomponente H_z . Im Diagramm ist allerdings die gemessene Spannung an der GMR-Brücke (in willkürliche Einheiten, w.E.) gezeigt. In Abb. 4.12 (a) ist der Flächenscan und in (b) ein Linienscan bei $y = 70$ mm dargestellt.

Neben den Defekten lässt sich auch die eingravierte Schrift im rechten oberen Rand der Messung (siehe (a)) erkennen. Die Fehlersignale setzen sich ebenfalls deutlich vom Hintergrund ab. Dies wird deutlich an dem Linienscan in (b).

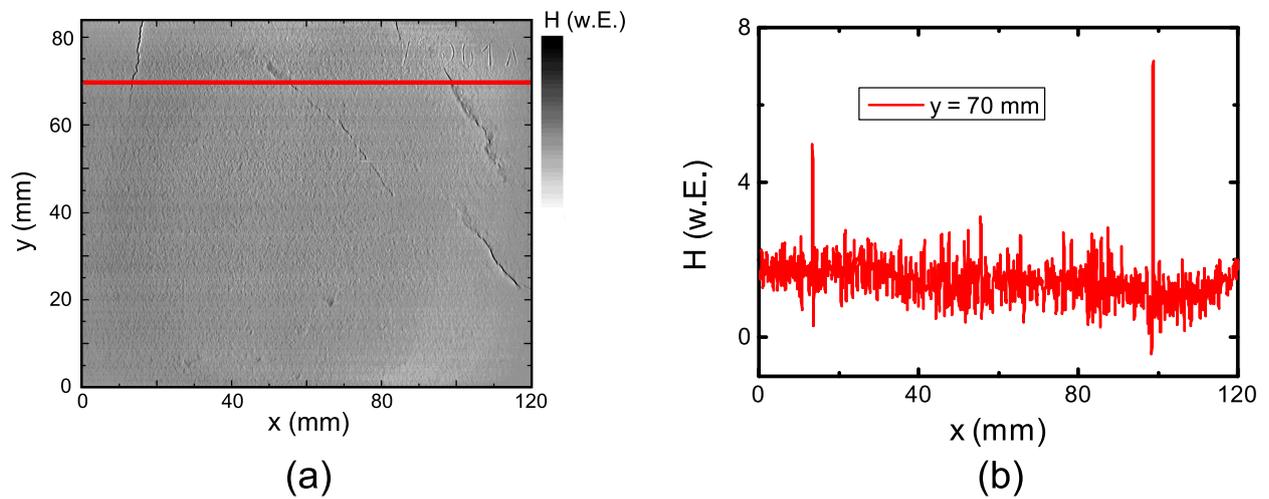


Abbildung 4.12: Platte mit Schleifbrandrissen. (a) Flächenscan mit dem GMR-Sensor GF790b. (b) Linienscan für $y = 70$ mm.

5 ZfP-angepasste GMR-Sensorarrays

In Kap. 3 wurden GMR-Sensoren ausgelegt auf Nahfeldapplikationen vorgestellt. Bezüglich ihrer Magnetfeld-Empfindlichkeit besitzen diese zwar hervorragende Eigenschaften, allerdings sind die empfindlichen Flächen entweder zu groß, wodurch sich die Magnetfeld- bzw. Ortsauflösung verschlechtert, oder sie lassen sich herstellungsbedingt nicht nah genug an der zu prüfenden Oberfläche platzieren; die aktiven Elemente sind somit zu weit von der Quelle des Streufeldes entfernt. Ein größerer Abstand führt zu einer Abnahme der Streufeldstärke bzw. der -amplitude, wodurch Mikrorisse nicht mehr detektiert werden können. Auch verbreitert sich das Rissignal durch eine Zunahme des Abstandes. Hierdurch wird eine spätere Bewertung bzw. eine Abschätzung der Rissgeometrie anhand der Messergebnisse (insbesondere bei einer Rekonstruktion) schwieriger wenn nicht sogar unmöglich [26].

Neben den geometrischen Eigenschaften dieser Sensoren müssen auch messtechnische Zusammenhänge bei einer Optimierung des Designs berücksichtigt werden. Nicht alle Sensoren können für die verschiedensten Rissausrichtungen eingesetzt werden. Zudem spielt gerade in der Industrie der Faktor Zeit eine große Rolle, weshalb der Einsatz von Arrays bevorzugt wird. D.h. neben der Geometrie sind bei der Studie auch die Auswirkungen einer Arrayanordnung zu bedenken - welche Magnetfelder werden von benachbarten Elementen noch detektiert, wenn diese nicht exakt entlang des Risses verfahren werden, und kann daraus auf ein Rissignal geschlossen werden?

In diesem Kapitel wird eine Parameterstudie für eine Sensoroptimierung bezüglich der Geometrien der empfindlichen Elemente vorgestellt, welche die Anforderungen der ZfP berücksichtigt. Dabei werden verschiedene Anordnungen der Sensorelemente, deren Größe sowie mögliche Auswirkungen einer Arraykonfiguration auf die Auswertbarkeit der Messsignale betrachtet. Im Anschluss werden ZfP-angepassten Sensoren vorgestellt und ihre Eigenschaften näher beleuchtet. Um eine vollständige Bewertung dieser Sensoren in Bezug auf ZfP-Anwendungen zu erhalten, folgt eine Betrachtung und Analyse dieser Sensoren im experimentellen Einsatz.

5.1 Parameterstudie

5.1.1 Einleitung

Für die Parameterstudie sind geeignete Modelle nötig, die den Streufluss, der durch Defekte an der Oberfläche entsteht, sehr genau wiedergeben. In Kap. 2.2.1 sind die von Förster und Shcherbinin entwickelten analytischen Modelle aufgelistet und im Detail dargestellt [33,36]. Diese Modelle sind durch Experimente vielfach bestätigt worden, wodurch bis auf wenige Randbedingungen, die eingehalten werden sollten, eine Berechnung der Magnetfeldwerte möglich ist. Auch FEM-Simulationen sind denkbar, wurden jedoch für die Parameterstudie nicht angewandt.

In der Abb. 5.1 ist der Verlauf eines Streufeldes skizziert. In einem magnetisierten ferromagnetischen Bauteil tritt das Magnetfeld an Defektstellen aus. Defekte bzw. Inhomogenitäten sind Bereiche, an denen sich die magnetischen Eigenschaften vom umliegenden Material unterscheiden. Dies können magnetische bzw. nicht-magnetische Einschlüsse, aber auch Risse sein, deren Volumen (bei einem Riss wird dieses Volumen meistens mit Luft ausgefüllt) eine unterschiedliche Permeabilität zum Material des zu untersuchenden Werkstücks aufweisen (z.B. Luft: $\mu_r \approx 1$). Hierdurch erfolgt eine Verdrängung des internen Magnetfeldes im Werkstück, und an der Oberfläche wird durch den Austritt des

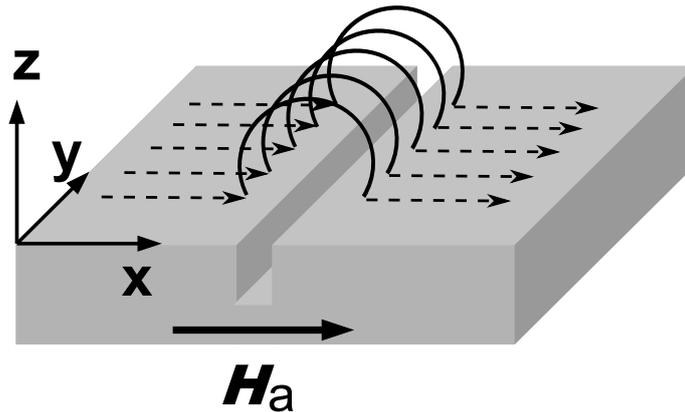


Abbildung 5.1: Streufeld an einem Defekt (z.B. an einem Riss).

Magnetfeldes aus dem Material ein Streufeld erzeugt. Die Stärke dieses Streufeldes hängt sowohl von den geometrischen Eigenschaften der Defektstelle als auch von der Stärke des internen Magnetfeldes ab. Die Abstandsabhängigkeit zur Oberfläche ist im Bereich der Klaffung etwa linear, nimmt aber mit zunehmender Distanz eine quadratische Abschwächung an [33]. Das wiederum bedeutet, dass das Streufeld von Rissen im μm -Regime nur im Abstand kleiner 1 mm zur Oberfläche messbar ist. Aus diesem Grund sind gerade für kleinste Risse angepasste Sensoren nötig, deren empfindliche Flächen nah an das zu untersuchende Bauteil herangebracht werden können.

5.1.2 Einfluss der Sensorgeometrie auf die Streufeldmessung

Auswahl des Sensortyps

In Kap. 3 sind zwei unterschiedliche Typen von Sensoren vorgestellt worden. Hierbei handelte es sich um Magnetometer (Messung der Magnetfeldstärke H absolut) und Gradiometer (Messung einer Differenz der Magnetfeldstärke zwischen zwei verschiedenen Positionen im Raum $\Delta H(x_1, x_2)$). Die empfindlichen GMR-Elemente waren hierbei in Widerstandsbrücken mit teils zusätzlichen Komponenten wie Flusskonzentratoren aufgebaut. Jede GMR-Schicht bzw. die GMR-Streifen sind nur auf eine Raumkomponente des Magnetfeldes empfindlich. Die Anzahl der GMR-Widerstandselemente und deren Anordnung und Aufteilung zu Widerstandsbrücken kann je nach Sensor variieren. Realisieren lassen sich:

1. GMR-Sensoren mit einem Widerstand,
2. Halbbrücken aus zwei in Reihe geschalteten GMR-Widerständen,
3. Wheatstonesche Vollbrücken.

GMR-Sensoren, die nur aus einem einzigen magneto-resistiven Element bestehen, besitzen den Vorteil, dass der Platz, der durch Leiterbahnen, Kontaktpads usw. eingenommen wird, überschaubar bleibt. Allerdings sind einzelne Elemente nur als Magnetometer verwendbar, da ein GMR-Vergleichselement an einem anderen Ort fehlt und so kein Feldgradient direkt auswertbar ist. Lediglich mittels Berechnung einer Differenz von Messwerten an zwei verschiedenen Raumpunkten ist ein Gradientenfeld zu bestimmen.

Ein weiterer Nachteil eines Aufbaus mit nur einem Widerstandselement liegt an der Temperaturabhängigkeit der feldabhängigen Widerstände selbst. Eine Brücke aus zwei gleichartigen Widerständen

wirkt temperaturkompensierend, da in diesem Fall die Temperatur bei einer Messung der Spannung zwischen beiden Elementen nur einen geringen Einfluss besitzt, solange der GMR-Effekt dadurch nicht zu stark beeinträchtigt wird (auch der GMR-Effekt ist temperaturabhängig; siehe Abschnitt 5.3.3 in diesem Kapitel). Dies ist bei einem einzelnen Element nicht gewährleistet. Ist die Temperatur nicht bekannt bzw. ändert sich diese während der Messung, wird das Messergebnis verfälscht. Gerade in einem industriellen Umfeld, in dem es zu großen Temperaturveränderungen über der Zeit kommen kann, ist die Messgenauigkeit ohne zusätzliche Temperaturstabilisierung nicht gewährleistet. Zwar kann ein Temperatormessfühler am Ort des Sensorelementes integriert werden, jedoch würde dadurch gerade die Einfachheit des Aufbaus eines solchen Elementes verloren gehen.

Die unter 2. bzw. 3. genannten Fälle besitzen den Nachteil der fehlenden Temperaturkompensation nicht. Hier werden zwei GMR-Elemente miteinander in Reihe geschaltet. Das bedeutet nicht, dass die beiden Elemente nicht T-abhängig wären, allerdings werden die Elemente gleich von der umgebenden Wärme beeinflusst. Eine sich daraus ergebende Widerstandsänderung findet in den GMR-Elementen gleichermaßen statt und hat einen geringeren Einfluss auf die eigentliche Messung des Magnetfeldes. Jedoch vergrößert sich bei diesen Konfigurationen der Platzbedarf für Leiterbahnen und Kontaktpads. In beiden Fällen lassen sich sowohl Magnetometer als auch Gradiometer realisieren.

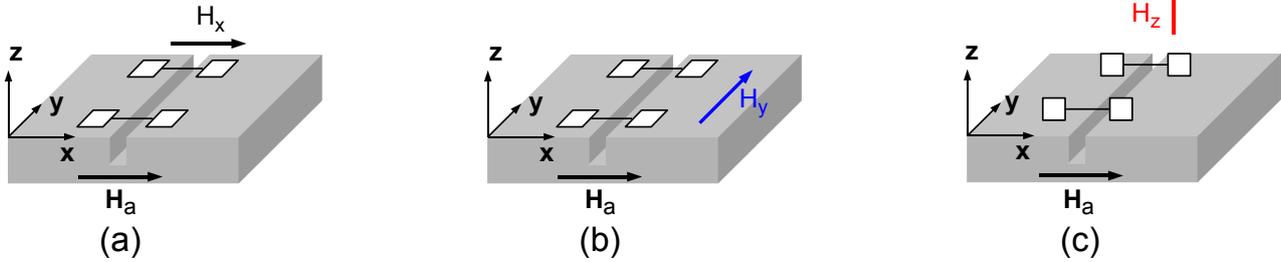
Magnetometer bestimmen zwar das absolute Magnetfeld am Ort des Sensors, aber im Messsignal sind auch alle äußeren magnetischen Störgrößen, z.B. das Erdmagnetfeld oder Hintergrundfelder, wie sie in aufmagnetisierten Bauteilen vorkommen, enthalten. Dies kann zu einer schlechteren Digitalisierung im Vergleich zu Gradiometern führen, wodurch kleinste Defekte im schlimmsten Fall nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden können. Hier können durch den Einsatz von Gradiometern bessere SNR-Werte bei der Digitalisierung erreicht werden, auch wenn sich dieser Vorteil durch den Verlust der absoluten Magnetfeldbestimmung ergibt. Das bedeutet, dass die magnetische Auflösung eines Gradiometers für den Einsatz in der ZfP im Vergleich zu Magnetometern günstiger ist. Für industrielle Anwendungen im Umfeld verschiedenster elektromagnetischer Störungen ist die magnetische Auflösung maßgeblich für die Detektion von Mikrorissen und deren Streufeldern, weshalb für die Optimierung eines ZfP-angepassten GMR-Sensorarrays eine Gradiometeranordnung gewählt wurde.

Sensoranordnung

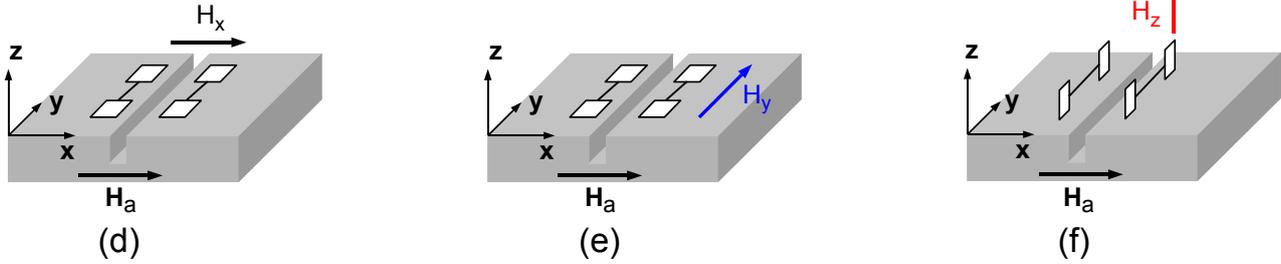
Bei der Auswahl eines geeigneten Gradiometers sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Sowohl die Magnetfeldkomponente, die gemessen werden soll, als auch die Gradientenrichtung im 3D-Raum bestimmen die Funktionsweise eines Gradiometers. Allerdings sind nicht alle geometrisch möglichen Gradiometer für ZfP-Anwendungen geeignet bzw. in ihrer Herstellung technisch realisierbar. In Abb. 5.2 sind neun verschiedene Sensoranordnungen, mit welchen sich magnetische Streufelder bestimmen lassen, dargestellt. Abb. 5.3 zeigt die dazugehörigen charakteristischen Signalverläufe der Gradiometer für einen Linienscan über einen Riss als Funktion des Weges in x -Richtung. Die schwarze (H_x -Komponente), rote (H_y -Komponente) bzw. blaue (H_z -Komponente) Linie entspricht einem Scan über die Rissmitte. Der graue (H_x -Komponente), orangene (H_y -Komponente) bzw. cyan-farbige (H_z -Komponente) Signalverlauf stellt einen Scan entlang eines Rissendes dar. Der simulierte Riss hatte eine Ausdehnung von $Tiefe \times Klaffung \times Länge = 50 \times 2 \times 500 \mu\text{m}^3$. Die Elemente hatten für die Simulation eine Fläche von $50 \mu\text{m}^2$ und die Basislänge betrug $BL = 250 \mu\text{m}$.

Für die Betrachtung eines Arrays, muss neben den Signalverläufen auch berücksichtigt werden, dass Risse, die 90° gedreht sind, noch vom Sensor detektiert werden können. Die Gradienten für die H_x - und H_y -Komponente und deren Signalverläufe sind aufeinander übertragbar, da bei der 90° -Drehung der Probe (Defekt und anregendes Feld) und der Scanrichtung für eine Messung, z.B. über die Rissmitte, gilt:

Gradient in x-Richtung



Gradient in y-Richtung



Gradient in z-Richtung

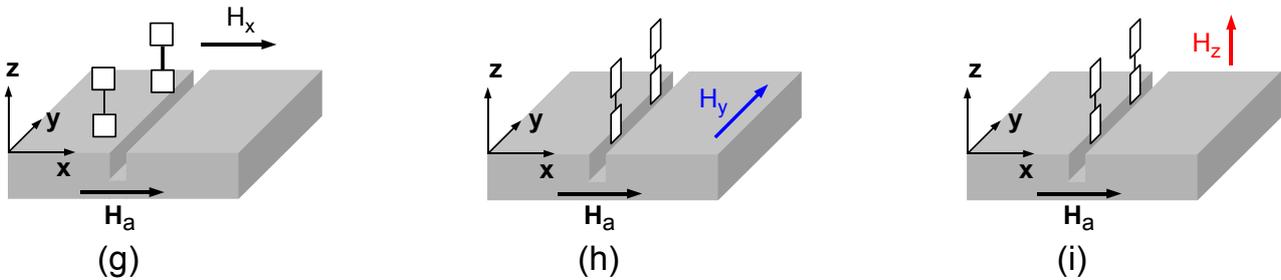


Abbildung 5.2: Mögliche Sensoranordnungen in Bezug auf das detektierte Magnetfeld (Richtung des zu detektierenden Magnetfeldes jeweils mit Pfeil angedeutet) und die Richtung des Gradienten. Laterales Gradiometer, Bildung des Gradienten entlang der x -Achse: (a) $\partial H_x/\partial x$, (b) $\partial H_x/\partial x$ und (c) $\partial H_z/\partial y$. Laterales Gradiometer mit Gradienten entlang der y -Achse: (d) $\partial H_x/\partial y$, (e) $\partial H_y/\partial y$ und (f) $\partial H_z/\partial y$. Axiales Gradiometer, Bildung des Gradienten in z -Richtung: (g) $\partial H_x/\partial z$, (h) $\partial H_x/\partial z$ und (i) $\partial H_z/\partial z$.

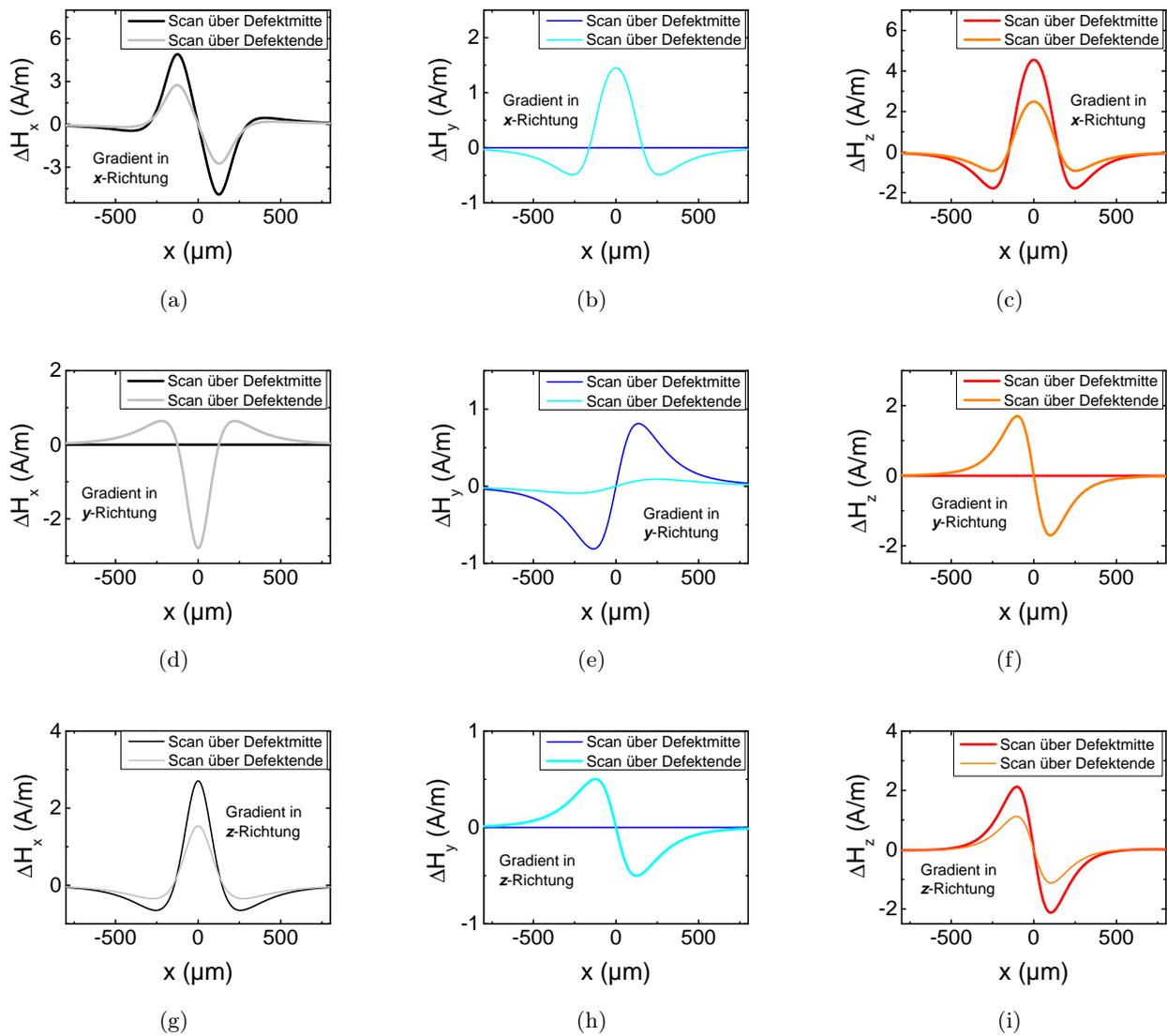


Abbildung 5.3: Simulierte Signalantwort der in Abb. 5.2 dargestellten Sensoranordnungen in Bezug auf einen Defekt, der entlang der y -Achse orientiert ist. Die Scanrichtung ist in x -Richtung. Die dargestellten Kurven beziehen sich auf einen Scan über die Defektmittelpunkt bzw. über ein Ende des Defektes. Laterales Gradiometer, Bildung des Gradienten entlang der x -Achse: (a) $\partial H_x/\partial x$, (b) $\partial H_x/\partial x$ und (c) $\partial H_z/\partial y$. Laterales Gradiometer mit Gradienten entlang der y -Achse: (d) $\partial H_x/\partial y$, (e) $\partial H_y/\partial y$ und (f) $\partial H_z/\partial y$. Axiales Gradiometer, Bildung des Gradienten in z -Richtung: (g) $\partial H_x/\partial z$, (h) $\partial H_y/\partial z$ und (i) $\partial H_z/\partial z$.

$$\frac{\partial H_x(\text{Scan in } x, \text{Riss in } y)}{\partial x} = \frac{\partial H_y(\text{Scan in } y, \text{Riss in } x)}{\partial y} \quad (5.1)$$

Dies ist der Fall für Abb. 5.2 (a) und (e) bzw. (b) und (d). Wenn der Gradient in z -Richtung gebildet wird, sind (g) und (h) für die Tangentialkomponenten des Magnetfeldes ebenfalls durch 90° -Drehung ineinander überführbar. Gleiches gilt für die Normalkomponente in z -Richtung mit der Bildung des Gradienten in der xy -Ebene, Abb. 5.2 (c) und (f).

Die in Abb. 5.2 (a) vorgestellte Anordnung ist empfindlich auf die tangentielle Magnetfeldkomponente (symbolisiert durch die parallele Sensorebene zur Oberfläche). Die Differenz der Magnetfeldstärke wird entlang der x -Richtung gebildet, und der Gradient dieses Sensors ist $\partial H_x/\partial x$. Der Signalverlauf über die Rissmitte bzw. über ein Rissende ist in Abb. 5.7 (a) dargestellt. Für eine solche Konfiguration ergeben sich einige gravierende Nachteile. Zum Einen lassen sich mit solch einem Sensorarray nicht alle Rissrichtungen mit einer Sensorausrichtung erfassen. Senkrecht zum dargestellten Riss wird zwar ein Gradient gemessen, allerdings ist dieser Gradient sehr stark von der Risslänge abhängig und nimmt mit zunehmender Risslänge bzw. abnehmender Basislänge ab, sodass die empfindlichen Flächen annähernd das gleiche Rissfeld erfassen. Dieser Fall wird in Abb. 5.2 (e) und Abb. 5.3 (e) für die y -Komponente behandelt. Für die Risslänge von $500 \mu\text{m}$ ist noch ein vernünftiges Signal (zusätzlich abhängig von BL) zu detektieren, welches sich zu den Rissenden hin umkehrt und sehr kleine Werte annimmt. Zum Anderen ist geometrisch bedingt ein geringer Liftoff für eine Arrayanordnung kaum möglich. So ließen sich zwar die GMR-Schichten sehr nah an die Oberfläche bringen, allerdings müsste berücksichtigt werden, dass die GMR-Sensoren noch eine Schutzschicht benötigen und gebondet werden müssen. Diese notwendigen Fertigungsschritte führen dazu, dass der Abstand zwischen Sensorelement und Prüfoberfläche stark zunimmt und der LO eher im mm- als im μm -Bereich liegen wird. Dadurch sind sehr kleine, räumlich begrenzte Streufelder und somit kleinste Fehler kaum noch mit einem ausreichend hohen SNR zu detektieren. Solche Arrays, die Fälle in Abb. 5.2 (a) und (e) sind gleichermaßen von dieser Unzulänglichkeit betroffen, sind deshalb für ZfP-Anforderungen nicht geeignet.

In Abb. 5.2 (b) ist ein laterales Gradiometer empfindlich auf die Magnetfeldkomponente H_y illustriert. Der Gradient wird im dargestellten Fall entlang der x -Richtung gebildet und das zu erwartende Signal ist $\partial H_y/\partial x$ (siehe Abb. 5.3 (b)). Wird die Probe und Scanrichtung um 90° gedreht, ergibt sich der Fall, welcher in Abb. 5.2 (d) und Abb. 5.3 (d) für die H_x -Komponente dargestellt ist. In einem möglichen Array müssen die Gradiometerelemente hintereinander in y -Richtung angebracht werden. In beiden Fällen, (b) und (d), ergeben sich ähnliche Schwierigkeiten für den Aufbau eines Arrays. Wiederum ist der Aufbau nicht vorteilhaft in Bezug auf einen geringen Liftoff. Des Weiteren, wie in Abb. 5.3 (b) und (d) an den Signalverläufen für die Scans über die Rissmitte (schwarze und blaue Kurven) zu erkennen, werden nur Defekte an deren Enden detektiert. Dies ist für eine zerstörungsfreie Prüfung nicht ausreichend. Aus diesen Gründen kommen auch diese beiden Anordnungen für die ZfP nicht infrage.

Abb. 5.2 (c) und (f) beziehen sich auf laterale Gradiometer, welche die normale Magnetfeldkomponente H_z detektieren. Es ergeben sich die Gradienten zu (c) $\partial H_z/\partial x$ und (f) $\partial H_z/\partial y$. Ein weiteres Mal ist eine komplette Detektion aller Defektrichtungen mit diesen Anordnungen nicht möglich. Beide sind wieder durch Drehung der Probe und Scanrichtung ineinander überführbar. In Abb. 5.3 (c) und (e) sind die Signalverläufe der Differenz des Magnetfeldes dargestellt. Für den Fall in (f) wird der Defekt nicht registriert, wenn genau über die Rissmitte, rote Kurve in Abb. 5.3 (f), gemessen wird. Zudem lassen sich die empfindlichen Elemente herstellungsbedingt nicht in kurzen Abständen ($< 100 \mu\text{m}$) hintereinander auch mittels modernster Dünnschichttechnologie auf einem Chip realisieren. Si-Chips mit einzelnen Sensoren lassen sich zwar hintereinander anbringen, aber aufgrund von Bonddrähten und Schutzschichten wie Epoxidharz sowie der Dicke des Si-Wafers selbst würde der Abstand zwischen den Elementen im mm-Bereich liegen. Das Sensorarray ist dann nicht in der Lage, bei einem Scan

den gesamten Bereich unterhalb der Sensorkante räumlich zu erfassen. Somit sind die vorgestellten Gradiometer in (c) und (f) ebenfalls nicht geeignet für ein ZfP-angepasstes Sensorarray.

Ein weiterer Nachteil aller lateralen Gradiometer, die eine Magnetfelddifferenz in der Ebene parallel zur Prüfobjektoberfläche messen, ist, dass gekrümmte Oberflächen nur mit einem krümmungsbedingten zusätzlichen Abstand vermessen werden können. Durch den zusätzlichen Liftoff sind schwächere Magnetfelder messbar, wodurch Mikrorisse und ihre Streufelder eventuell schon unter die Nachweisgrenze der Sensoren fallen.

Die beiden axialen Gradiometer in Abb. 5.2 (g) und (h) und ihre dazugehörigen Signale in Abb. 5.3 (g) und (h) detektieren in verschiedenen Höhen die tangentialen Feldkomponenten. Hierdurch wird ermöglicht, dass alle Rissrichtungen detektiert werden können. Allerdings müssen beim Aufbau der GMR-Elemente viele Leiterbahnen in z -Richtung realisiert werden. Wie weiter unten in der Simulationsstudie gezeigt, ist eine zu große Ausdehnung der aktiven Elemente in z -Richtung aufgrund des größeren Abstandes des oberen Teils der Elemente nicht förderlich für eine Streufelddetektion, da mit zunehmendem Abstand das Feld sehr stark abnimmt und somit aufgrund der Mittelung über die GMR-Leiter Mikrorisse gegebenenfalls nicht gefunden werden können.

Die letzte in Abb. 5.2 (i) dargestellte Sensoranordnung ist ein Gradiometer, welches empfindlich auf die normale Magnetfeldkomponente ist. Der Gradient wird entlang der z -Achse gebildet und es ergibt sich $\partial H_z / \partial z$. Diese axiale Anordnung besitzt den Vorteil, dass alle Rissrichtungen mit einer Sensorausrichtung detektiert werden können - es existiert hier immer ein Feldgradient entlang der z -Achse unabhängig von der Lage des Defektes (siehe Signalverlauf in Abb. 5.3 (i)). Zudem lassen sich in diesem Fall die empfindlichen GMR-Elemente in einem Array dicht aneinander packen und sehr nah an das zu untersuchende Bauteil platzieren. Aufgrund dieser für die ZfP vorteilhaften Eigenschaften wird im Folgenden die Parameterstudie für diese Anordnung durchgeführt.

Parameter

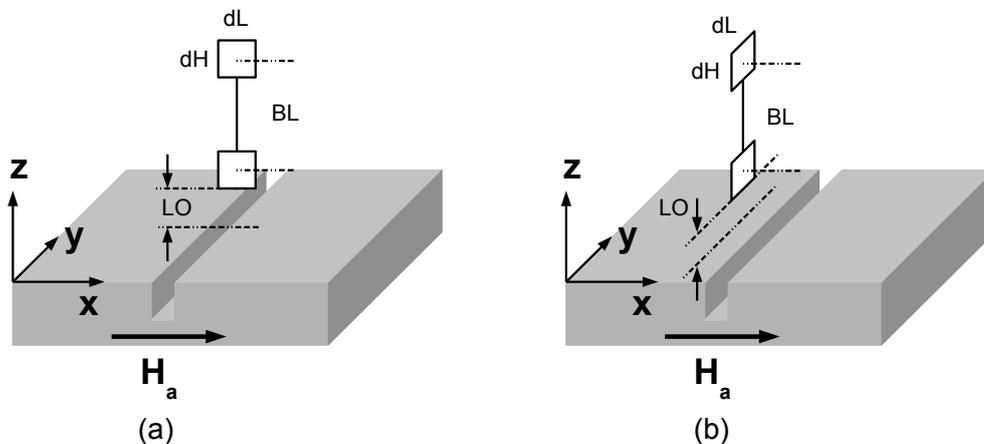


Abbildung 5.4: Darstellung zweier axialer Gradiometer mit den für die Designstudie wichtigen Parametern. Neben der aktiven Fläche $dL \times dH$ sind dies der Liftoff LO und die Basislänge BL , der Abstand zwischen den beiden aktiven Sensorflächen. In (a) und (b) sind zwei verschiedene Ausrichtungen der Sensorelemente bezüglich des Risses dargestellt.

In Abb. 5.4 sind zwei verschiedene Stellungen des Gradiometers bezüglich der Rissorientierung dargestellt. Die Auswirkungen dieser beiden Sensororientierungen auf das Messsignal wurden in der Designstudie näher untersucht. Zusätzlich sind die verschiedenen Parameter, die die Geometrie des Sensors kennzeichnen, in den Abbildungen eingezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Fläche $dL \times dH$ der

empfindlichen Elemente (dL Länge der unteren Kante des Flächenelements, dH Länge der Seitenkante bzw. Höhe des Flächenelementes), die Basislänge BL - der Abstand zwischen den Elementen - und den Liftoff LO . Die beiden Ausrichtungen stellen die Extremfälle für einen Scan dar. So liegt die Flächennormale der Elemente in (a) senkrecht und in (b) parallel zur Risslänge. Im Folgenden werden diese beiden Anordnungen mit *Sensoranordnung 1* bzw. *Sensoranordnung 2* bezeichnet.

Die Anforderungen an das Sensorarray sind neben einer hohen Ortsauflösung insbesondere die Detektion kleinskaliger Defektstrukturen. Für die nachfolgende Parameterstudie wurden die Simulationen der Streufelder für einen Riss mit folgenden Abmessungen durchgeführt: *Tiefe* \times *Klaffung* \times *Länge* = $50 \times 2 \times 500 \mu\text{m}^3$.

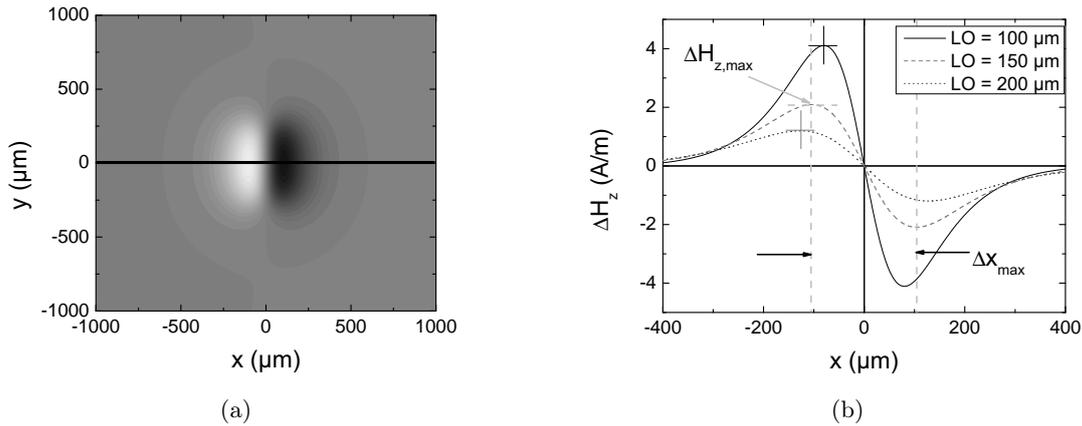


Abbildung 5.5: In (a) ist ein simulierter 2D-Flächenscan eines Streufeldes dargestellt. Der simulierte Riss hat eine Tiefe von $t = 50 \mu\text{m}$, eine Länge von $l = 500 \mu\text{m}$ und ist $b = 2 \mu\text{m}$ breit. Die schwarze Linie gibt den Scanverlauf des in (b) dargestellten Linienscans an. Hier wurde für drei verschiedene LO s das detektierte Gradientenfeld ΔH_z als Funktion von x dargestellt.

In Abb. 5.5 (a) ist beispielhaft für einen Flächenscan die simulierte Streufeldkomponente senkrecht zur Oberfläche H_z dargestellt. Die schwarze Linie entspricht dem Scanverlauf über die Rissmitte in x -Richtung. Diese Linienscans sind in Abb. 5.5 (b) für drei verschiedene Liftoffs ($LO = 100, 150$ und $200 \mu\text{m}$) abgebildet. Da das Streufeld lokal begrenzt ist, nimmt mit zunehmendem LO die maximale Magnetfeldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ ab. Zusätzlich in das Diagramm eingezeichnet sind die Abstände Δx_{max} der Magnetfeldextrema des Streufeldes für die ΔH_z -Komponente. Diese beiden Parameter des simulierten Streufeldes werden im Folgenden für die zwei zuvor beschriebenen Sensoranordnungen und verschiedene geometrische Abmessungen der empfindlichen Elemente des Gradiometers mit dem Ziel analysiert, ein für die ZfP von Meso- und Mikrorissen in ferromagnetischen Materialien angepasstes GMR-Sensorarray zu optimieren.

Bei der Simulation selbst wird das Magnetfeld, welches die Fläche der GMR-Sensorelemente $dL \times dH$ beeinflusst, betrachtet. Da das magnetische Streufeld räumlich sehr begrenzt auftritt und sich für kleine Distanzen im μm -Bereich stark ändern kann, ist das durch die Sensoren detektierte Magnetfeld ein Mittelwert über die gesamte Fläche der Sensorelemente. In der Simulation wird die Sensorfläche in $1 \mu\text{m}^2$ große Teilflächen unterteilt. Alle Magnetfeldwerte werden dann aufsummiert und durch die Fläche bzw. die Anzahl der Teilflächen, geteilt, wodurch das gemittelte Magnetfeld erzeugt wird (siehe Gl. 2.17 in Kap. 2.2.1).

In Kap. 3 wurden verschiedene GMR-Sensoren vorgestellt. Diese Sensoren messen das Magnetfeld, allerdings nicht über eine komplette Fläche, sondern entlang von in Mäanderform angeordneten GMR-Streifen (nur die Streifenanteile parallel zur Oberfläche tragen zum eigentlichen Sensorsignal bei, die

senkrechten werden nicht berücksichtigt). Dies führt aufgrund des nicht linearen Verlaufs des Streufeldes mit zunehmendem Abstand von der Quelle (Mikroriss) dazu, dass eine Mittelung über die gesamte Fläche im Vergleich zur Mäanderstruktur der Sensoren je nach Größe unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen kann.

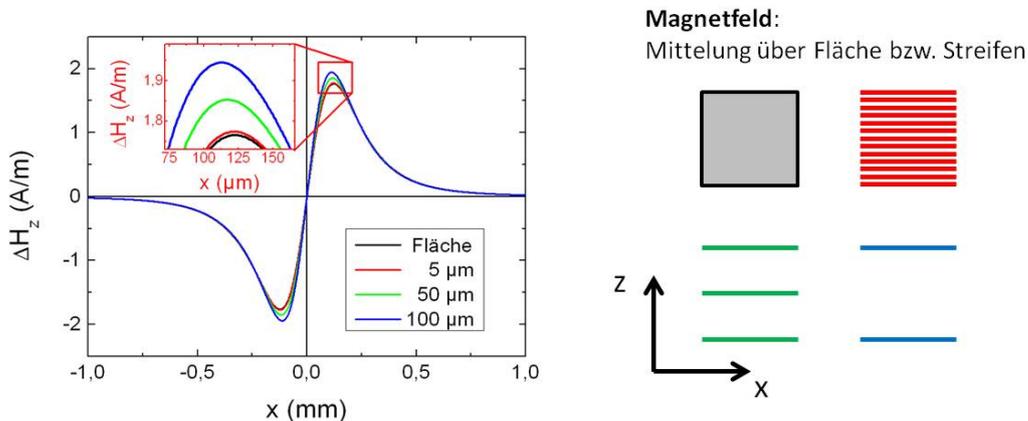


Abbildung 5.6: Magnetfeldstärke ΔH_z als Funktion des Ortes x . Dargestellt ist in vier Kurven die Auswirkung der Mittelung des magnetischen Streufeldes eines Risses über eine Fläche bzw. mehrere parallel zueinander verlaufende Linien. Die schwarze Kurve entspricht einer Mittelung über die gesamte Fläche (grau unterlegtes Quadrat in der Skizze). Die drei weiteren Kurven entsprechen einer Anzahl von 1 μm -breiten, parallel zur Oberfläche orientierten GMR-Streifen (ähnlich der Mäanderstruktur von GMR7, siehe Kap. 3.2). Die rote Kurve entspricht einer Mittelung von 21 Streifen, die jeweils 5 μm auseinander liegen. Grüne Kurve: $\Delta_{\text{Streifen}} = 50 \mu\text{m}$. Blaue Kurve: $\Delta_{\text{Streifen}} = 100 \mu\text{m}$. Das kleine Diagramm entspricht einem Ausschnitt der Maxima.

Um die Abweichungen abzuschätzen, sind in Abb. 5.6 auf der linken Seite Magnetfelder eines Defektes für vier verschiedene Sensorelemente (skizziert in der Abb. 5.6 rechts) dargestellt. Die schwarze Kurve gibt den Mittelwert für eine Fläche von $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ an. Der Betrag der Extremwerte des Streufeldes ist in diesem Fall $\Delta H_{z,\text{max}} = 1,76 \text{ kA/m}$. Die rote Kurve stellt den Fall dar, dass der Sensor in Streifen mit einer Breite von 1 μm mäanderförmig mit einem Abstand von 5 μm parallel zur Oberfläche aufgeteilt ist. Hier wird ein gemitteltes Feld von 1,77 kA/m erwartet. Dies entspricht einer Zunahme von lediglich 0,6% zur Mittelung über die gesamte Fläche. Die blaue und die grüne Kurve stellen die simulierten Streufelder für drei Streifen mit einem Abstand von 50 μm bzw. zwei Streifen mit einem Abstand von 100 μm dar. Hier betragen die Werte 1,85 kA/m (Zunahme um 5,1%) bzw. 1,94 kA/m (Zunahme um 10,2%).

Folgendes Gedankenexperiment dient der Verdeutlichung: Wird angenommen, dass an der unteren Kante das detektierte Magnetfeld 2 und an der oberen Kante 1 beträgt, ergibt sich für den Fall des aus zwei Streifen aufgebauten Elementes (Abb. 5.6 rechts blau) ein detektiertes Feld im Mittel von 1,5. Da die Streufelder nicht linear, sondern eher quadratisch mit dem Abstand zum Prüfobjekt abnehmen [33], wird der ermittelte Magnetfeldwert bei einer Zunahme gleich verteilter Streifen weiter abnehmen. Für eine Mittelung über eine idealisierte gesamte Fläche (Abb. 5.6 rechts grau) ist dann das gemessene Signal erwartungsgemäß am kleinsten.

Für die nachfolgenden Simulationen wurde deshalb über die gesamte Fläche integriert, da zu Beginn der Simulationen hin zu einem ZfP-angepassten Sensordesign nicht klar war, welche Struktur die Elemente schlussendlich besitzen bzw. wie die GMR-Mäander angeordnet sein werden. Da bei einem mäanderförmigen Sensorelement mit einem eher größeren Magnetfeldmesswert gerechnet werden kann, ist die Mittelung über die gesamte Sensorfläche als Vorgehensweise gerechtfertigt.

Sensoranordnung 1; ΔH_z vs. $dL \times dH$

In Abb. 5.6 wurde der Einfluss der Mittelung über die gesamte Fläche bzw. über streifenartige Sensorelemente für eine feste Größe von $100 \times 100 \mu\text{m}$ betrachtet. Unterschiedlich große Sensorelemente $dL \times dH$ haben einen erheblichen Einfluss auf das ermittelte Signal. Je größer ein Element wird, umso kleiner ist bei Annahme einer punktförmigen Streufeldquelle das zu erwartende Streufeldsignal, welches dann noch von dem GMR-Element gemittelt detektiert werden kann. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass sehr kleine Elemente das Magnetfeld am Ort des Sensors genauer erfassen. Allerdings ist mit der Größe der Fläche und somit mit der Länge der GMR-Streifen der Widerstand verbunden. Sehr kleine Elemente besitzen einen geringen Widerstand. Dies kann sich negativ auf die Messung des Magnetfeldes auswirken und wird in Abschnitt 5.2 näher betrachtet.

Für die Simulation der empfindlichen Elemente wird im ersten Fall die maximale Magnetfeldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ in Abhängigkeit von der Größe der Fläche $dL \times dH$ betrachtet. Hierbei entspricht die Ausrichtung der Elemente der in Abb. 5.4 (a) dargestellten *Sensoranordnung 1*, d.h. die Flächennormale der empfindlichen Elemente ist parallel zur x -Achse. Die Sensorparameter Liftoff und Basislänge betragen während der Simulation $LO = 150 \mu\text{m}$ bzw. $BL = 250 \mu\text{m}$. Der gewählte Liftoff LO stellt dabei einen in der Praxis realisierbaren Abstand der empfindlichen Elemente zur Prüfobjektoberfläche dar. Herstellungsbedingt befinden sich die empfindlichen GMR-Schichten auf dem SI-Chip nicht exakt an der Chipkante, und für eine berührungsfreie Messung ist ein gewisser Spielraum aufgrund von materialbedingten Unebenheiten der Testobjekte erforderlich.

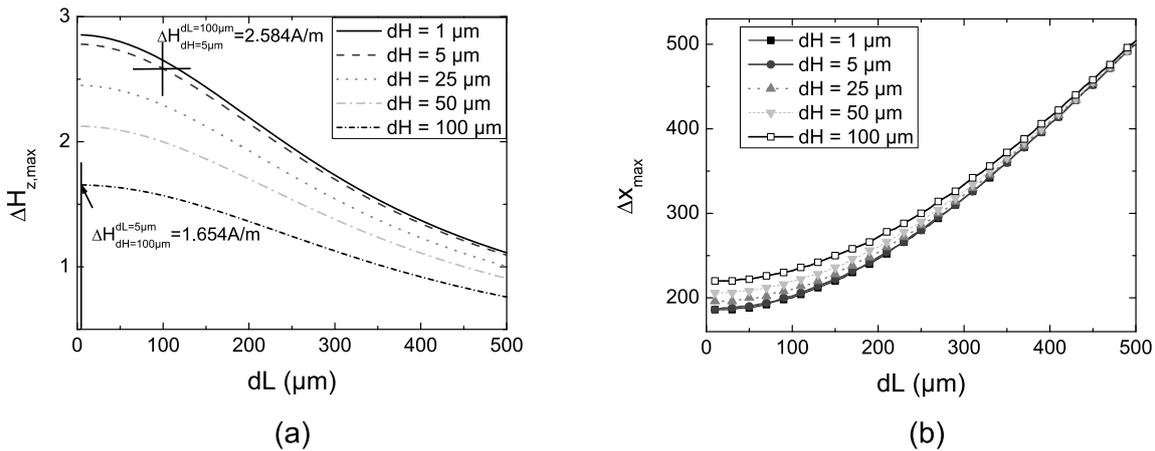


Abbildung 5.7: Simulationsergebnisse für ein Gradiometer, welches die normale Feldkomponente misst. Der Liftoff beträgt $LO = 150 \mu\text{m}$ und die Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$. (a) Maximale Streufeldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ als Funktion von dL , der Länge der unteren Kante des aktiven Elementes, für fünf verschiedene Höhen dH der aktiven Fläche. Zwei Punkte sind hervorgehoben, bei denen dieselbe Fläche aber unterschiedliche dH und dL vorliegen. (b) Abstand der Extremwerte Δx_{max} als Funktion von dL für fünf verschiedene dH .

Die maximale Streufeldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ ist in Abb. 5.7 (a) als Funktion der Länge der Unterkante dL der aktiven Fläche der Elemente für verschiedene Längen der Seitenkante dH , die Höhe des aktiven Elementes, dargestellt. Aufgrund der Mittelung über die gesamte Fläche nimmt mit zunehmender Größe die maximale Feldamplitude ab. Dabei wirkt sich dH stärker auf das Signal aus als dL . Für $dL = 100 \mu\text{m}$ und $dH = 5 \mu\text{m}$ ist die maximale Feldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}} = 2,584 \text{ A/m}$. Wird die gleiche Größe der Fläche mit $dL = 5 \mu\text{m}$ und $dH = 100 \mu\text{m}$ betrachtet, ist $\Delta H_{z,\text{max}} = 1,654 \text{ A/m}$. Förster [33] erwähnte in seiner Publikation, dass mit zunehmendem Abstand zur Rissöffnung die Abnahme des

Streifeldes von einem linearen in einen quadratischen Verlauf übergeht. Dadurch wirkt sich dH stärker auf die Amplitude aus.

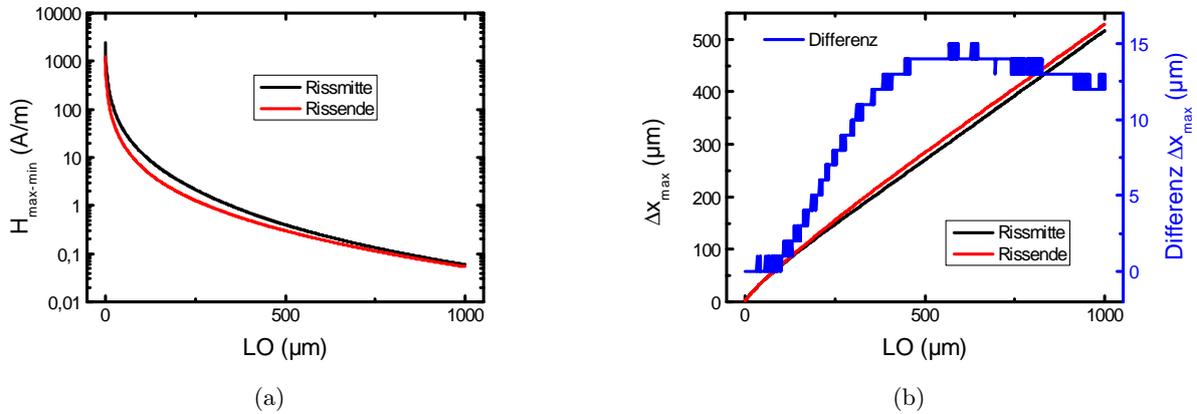


Abbildung 5.8: Simulationsergebnisse der normalen Feldkomponente für ein punktförmiges Sensorelement entlang der Rissmitte (schwarz) und dem Ende des Risses (rot). (a) Peak-to-Peak-Streifeldamplitude $H_{\max-\min}$ als Funktion von LO . (b) Abstand der Extremwerte Δx_{\max} als Funktion von LO für ein punktförmiges Sensorelement. Blaue Kurve entspricht der Differenz der schwarzen und roten Kurve.

Dieser Zusammenhang wird für einen punktförmigen Sensor (in der Simulation gilt hier $dL \times dH = 1 \mu\text{m}^2$) in Abb. 5.8 (a) betrachtet. Hier ist die Magnetfelddifferenz der beiden Streufeldextrema $H_{\max-\min}$ halblogarithmisch als Funktion des LO s dargestellt. Direkt an der Rissöffnung ist das Streufeld maximal und nimmt dann sehr schnell mit größerem LO ab. Das bedeutet für ein Sensorelement $dL \times dH$, dass die oberen Anteile nur noch ein sehr kleines Feld registrieren, wodurch das gemittelte Sensorsignal insgesamt kleinere Werte annimmt.

In Abb. 5.7 (b) ist der Abstand Δx_{\max} der Extremwerte $\Delta H_{z,\max,\min}$ in Abhängigkeit von dL für verschiedene dH abgebildet. Für $dL < 200 \mu\text{m}$ nähert sich der Abstand Δx_{\max} einem konstanten Wert an. Dieser Wert hängt sehr stark vom Liftoff LO ab, wie für einen punktförmigen Sensor in Abb. 5.8 (b) für verschiedene LO s dargestellt. In der Nähe der Risskanten ist das Magnetfeld am stärksten. Mit zunehmendem Abstand entfernen sich die Positionen der Extrema vom Zentrum der Rissöffnung. Aus der Abb. 5.8 (b) ergibt sich, dass für feste LO s die Abstände der Extremwerte des Streufeldes ebenfalls feste Werte annehmen. Kleine Sensorflächen nähern sich in ihrer Größe dem punktförmigen Sensor an und somit auch einem konstanten Abstand der Extrema.

Für den Fall, dass $dL > 200 \mu\text{m}$ ist, wird der Verlauf von Δx linear. Der Grund hierfür ist die Mittelung der Sensorelemente und der Abstand $\Delta x(H_{\max,\min,\text{Defektmitte}})$ zwischen den Extremwerten der Streufelder und dem Zentrum des Defektes, welcher von dem Liftoff abhängt. Wenn dL größer ist als $\Delta x(H_{\max,\min,\text{Defektmitte}})$, korreliert der Abstand mit der Länge der Sensorelemente. Dieses Verhalten ist in einem Schema in Abb. 5.9 veranschaulicht. Hier wird der erste Extremwert erreicht, wenn ein Ende der Sensorelemente genau über der Defektmitte liegt (in Abb. 5.9 Position 1, Scanrichtung in x). An der Position 2 (Verschiebung um $dL/2$) ist das gemessene Magnetfeld gleich 0. Wird der Sensor ein weiteres Mal um die Länge $dL/2$ von Position 2 aus weiterbewegt, wird der Bereich des anderen Extremwertes des Streufeldes erreicht (Position 3). Dadurch erfolgt ein von der Sensorgeometrie abhängiger Abstand der ermittelten Streufeldextrema bei hohen Werten von dL .

Die Anforderungen des Testproblems sowie die technische Realisierung (möglicher Abstand der empfindlichen Sensorelemente zur Oberfläche) beeinflussen die Auswahl der Sensorgeometrie bezüglich der

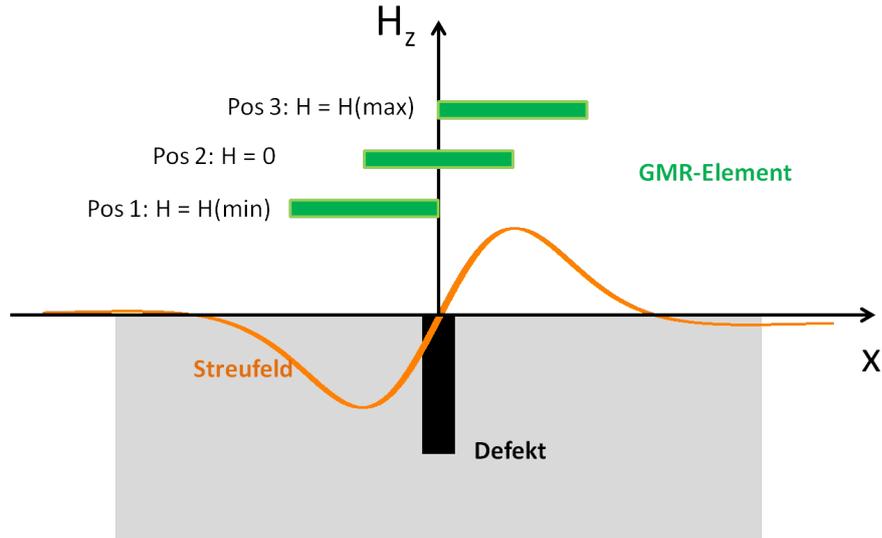


Abbildung 5.9: Schema zur Position und den daraus resultierenden Streufeldern, die vom Sensorelement detektiert werden, für die *Sensoranordnung 1*.

erforderlichen Ortsauflösung. Aus diesem Grund sollte dL den Abstand zwischen Sensorelement und Prüfobjektoberfläche nicht überschreiten. Dies gilt auch für Sensorelemente mit zunehmendem dH .

Sensoranordnung 2; ΔH_z vs. $dL \times dH$

Die zweite Sensoranordnung, die in der vorgestellten Studie untersucht werden soll, betrifft einen Sensor, der zur vorherigen Anordnung um 90° gedreht ist. Dadurch liegt hier die Flächennormale der empfindlichen Elemente entlang der x -Achse (siehe Abb. 5.4 (b)).

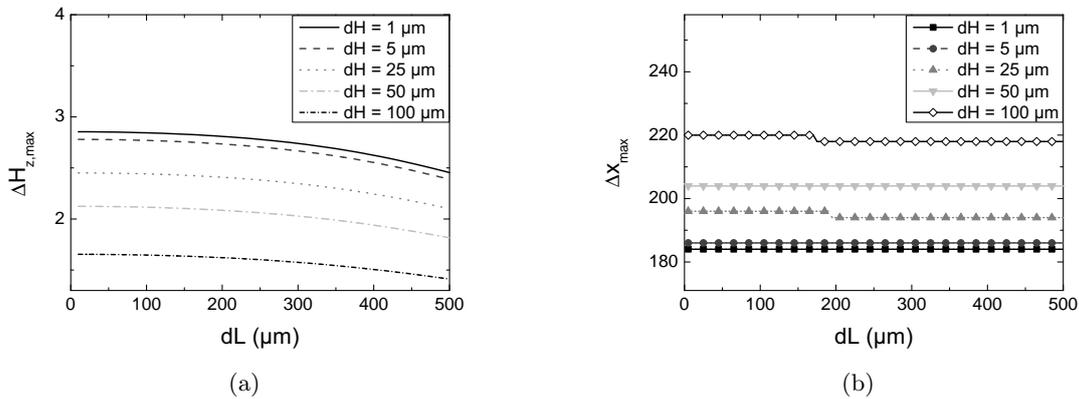


Abbildung 5.10: *Sensoranordnung 2* für einen Liftoff von $LO = 150 \mu\text{m}$ und einer Basislänge von $BL = 250 \mu\text{m}$. (a) Maximale Streufeldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ als Funktion von dL für fünf dH . (b) Abstand der Extremwerte Δx_{max} als Funktion von dL für verschiedene dH .

In Abb. 5.10 (a) ist für den zweiten Fall die maximale Streufeldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ gegen dL für einen Scan in x -Richtung über die Rissmitte dargestellt. Der Liftoff war auch hier $LO = 150 \mu\text{m}$. Im Gegensatz zur *Sensoranordnung 1* nimmt hier das maximale Feld $\Delta H_{z,\text{max}}$ mit zunehmender Länge dL

kaum ab. Erst wenn die Länge dL der empfindlichen Elemente die Länge des Risses erreicht ($dL \approx l_{\text{Riss}}$), nimmt die gemittelte Magnetfeldstärke ΔH_z aufgrund des an den Rissenden kleineren Streufeldes ab.

Hieraus folgt für Sensoren, die länger sind als die Defekte, dass die Ortsauflösung abnimmt. Dadurch sind kleine Risse schwerer zu detektieren bzw. eine spätere Bewertung der Rissgeometrie ist nicht mehr möglich. Deshalb muss für eine geeignete Auswahl der Länge dL der aktiven Elemente die Risslänge, die noch aufgelöst werden muss, mit berücksichtigt werden. Im Fall von Mikrorissen mit einer minimalen Länge von wenigen 100 μm ist es somit vorteilhaft, wenn auch die Länge des Sensorelementes in dieser Größenordnung bzw. unterhalb der Risslänge liegt.

Zusätzlich lässt sich in (a) erkennen, dass ähnlich zur *Sensoranordnung 1* die Höhe dH der aktiven Elemente das messbare Magnetfeldsignal stark beeinflusst. Mit zunehmender Höhe dH nimmt aufgrund der oberen Anteile an der Fläche und des kleineren Feldes in diesem Bereich das detektierte Magnetfeld ab. Dies wirkt sich auch hier stärker aus als die Zunahme der Länge dL .

In Abb. 5.10 (b) ist Δx_{max} als Funktion der Länge dL aufgetragen. Der Abstand der Extremwerte des Magnetfeldes Δx_{max} ist in dieser Anordnung über einen längeren Bereich nahezu konstant. Nur für $dH = 25 \mu\text{m}$ und $dH = 100 \mu\text{m}$ zeigt sich die geringe Abnahme von Δx_{max} in Abhängigkeit von dL . Hier sind aufgrund der gewählten Diskretisierung der Simulation auf 1 μm Sprünge im Diagramm zu erkennen. Zudem ist Δx_{max} abhängig vom Liftoff. Nimmt der Liftoff ab, verkleinert sich die Distanz zwischen den Extremwerten ähnlich zur *Sensoranordnung 1*. dH wirkt wie ein zusätzlicher Liftoff der oberen Flächenanteile, wodurch es zu einer Zunahme von Δx_{max} kommt (siehe Abb. 5.8 (b)).

Zusammenfassend zeigt sich bei der Betrachtung der Größe der empfindlichen Flächen eines GMR-Sensors, dass bei der Untersuchung sehr kleiner, örtlich begrenzter Streufelder von Mikrorissen ein punkartiger Sensor hinsichtlich maximaler Magnetfeldamplitude und Ortsauflösung am besten geeignet ist. Allerdings besitzt ein punkartiger Sensor in Bezug auf seine Realisierung und die tatsächlich zu erwartende Signalausbeute verschiedene Nachteile.

Der Widerstand eines solchen Sensors liegt im Bereich von wenigen hundert Ohm. Da die GMR-Streifen aber nur kleine Ströme mit Stromstärken von wenigen mA vertragen, muss bei einem punkartigen Sensor auch die angelegte Spannung klein sein. Die in Kap. 3 vorgestellten Sensoren besitzen aufgrund der Länge der GMR-Streifen Widerstandswerte von bis zu 10 k Ω und es konnten ohne Bedenken Spannungen von bis 10 V angelegt werden. Besitzt der Sensor allerdings einen Widerstand von etwa 100 Ω , reduziert sich die angelegte Spannung bei konstanter Stromstärke um etwa zwei Größenordnungen. Hierdurch verschlechtert sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis - externe Rauschquellen sind unabhängig von der angelegten Spannung - und die Vorteile hinsichtlich einer verbesserten Ortsauflösung gehen durch die schlechtere Signalausbeute gerade bei Mikrorissen verloren. Es ist bei GMR-Elementen von Vorteil, die Sensoren aus längeren, mäanderförmig angeordneten Streifen aufzubauen, um höhere Spannungen anlegen zu können und so ein besseres SNR zu erreichen. Allerdings erhöht sich hierdurch der Effekt durch dH . Je nach Anwendung müssen die Vor- und Nachteile abgewogen werden, um einen geeigneten Sensor hinsichtlich SNR und Ortsauflösung zu realisieren. Dabei sollte versucht werden, die Höhe dH der aktiven Elemente auf ein Minimum zu reduzieren, ohne nennenswerte Einbußen z.B. des erzielbaren SNRs zu riskieren.

Eine Möglichkeit, kleine punkartige Sensoren zu realisieren, bieten TMR-Sensoren. Diese Sensoren besitzen im Vergleich zu GMR-Sensoren bei kleinen Strukturen einen hohen Widerstand und erreichen einen Widerstandseffekt von weit über 100% (siehe Kap.2.4.2).

Basislänge BL

Die Basislänge BL beeinflusst das Gradiometersignal in zwei wichtigen Punkten: erstens die Stärke des Gradientensignales und zweitens die Fähigkeit, magnetische Hintergrundsignale zu unterdrücken, z.B. statische Magnetfelder eines aufmagnetisierten Probekörpers bzw. sich zeitlich langsam ändernde

elektromagnetische Felder im unteren Frequenzbereich von einigen Hz. Bei hohen Frequenzen elektromagnetischer Störfelder werden die beiden aktiven Flächen eines axialen Gradiometers unterschiedlich stark beeinflusst, wenn sich das Gradiometer in der Nähe eines leitfähigen Werkstoffes befindet. Hier wird die sich näher an der Oberfläche befindliche Fläche aufgrund der induzierten Wirbelströme im Material einem stärkeren Wirbelstromfeld ausgesetzt. Zusätzlich nimmt bei hohen Frequenzen der Phasenfehler zwischen beiden Flächen zu, was in einem höheren Rauschen resultiert. Nur bei niedrigen Frequenzen ist annähernd eine Kompensation zwischen beiden Flächen zu erreichen.

Allgemein sollte die Basislänge der räumlichen Ausdehnung des Rissstreufeldes angepasst werden. Diese ist abhängig von der Rissklaffung sowie vom Liftoff. Nimmt die Basislänge größere Werte als die räumliche Ausdehnung des Streufeldes an, nähert sich das gemessene Signal einem Magnetometersignal an, da das obere Element die Feldquelle in größerer Entfernung mit deutlich abgeschwächtem Signal detektiert. Allerdings erhalten Rausch- und Störgrößen im gemessenen Signal einen stärkeren Einfluss, da bei einer größeren Basislänge die Unterdrückung inhomogener Hintergrundfelder reduziert wird. Im Fall zu kleiner Basislängen BL im Vergleich zur Rissfeldausdehnung werden an beiden aktiven Flächen ähnliche Magnetfelder vorzufinden sein. Dadurch nimmt das SNR des Gradiometersignals ab und Risse mit μm -Ausdehnungen lassen sich so nicht mehr detektieren.

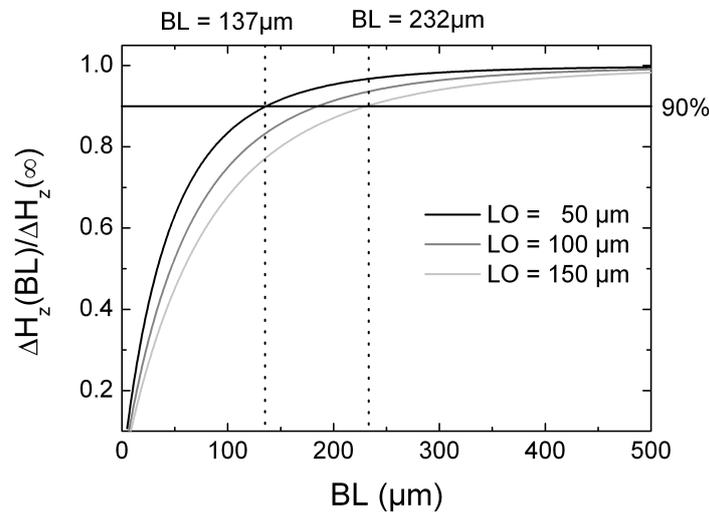


Abbildung 5.11: $\frac{\Delta H_{z,\max}(BL)}{\Delta H_{z,\max}(\infty)}$ als Funktion der Basislänge BL für drei verschiedene LO s. Die aktiven Sensorflächen haben eine Größe von $dL \times dH = 100 \cdot 5 \mu\text{m}^2$. Die schwarze, gerade Linie entspricht 90% des Magnetometersignals $\Delta H_{z,\max}(\infty)$.

In Abb. 5.11 ist das normalisierte Gradientenfeld $\frac{\Delta H_{z,\max}(BL)}{\Delta H_{z,\max}(\infty)}$ als Funktion der Basislänge BL für drei verschiedene Liftoffs $LO = 50, 100, 150 \mu\text{m}$ aufgetragen. Die Größe der aktiven Flächen ist $dH \times dL = 5 \times 100 \mu\text{m}^2$. Der normierte Wert 1 entspricht dem Signal, welches ein vergleichbares Magnetometer, das sich an der Position des unteren GMR-Elementes eines Gradiometers befindet, messen würde. Da sich im Fall von $BL > 500 \mu\text{m}$ die zweite aktive Fläche vom Riss entfernt und somit $H_{z,\max}(\text{zweite aktive Fläche}) \rightarrow 0$ ist, nähert sich der Messwert des Gradiometers näherungsweise einem Magnetometermesswert $\Delta H_{z,\max}(\infty) = H_{z,\max}(\text{Magnetometer})$ an. In diesem Fall wird nur noch die in der Nähe des Risses befindliche Fläche vom Streufeld beeinflusst. Nimmt die Basislänge hingegen ab und nähert sich $BL \rightarrow 0 \mu\text{m}$, so wird der Gradient aufgrund der ähnlich großen Streufelder am Ort der aktiven Flächen kleiner.

Da sich allerdings, wie oben erwähnt, bei zu großen Basislängen BL Störgrößen verstärkt auf das Messsignal auswirken, ist abhängig von den zu untersuchenden Mikrorissen ein Kompromiss für BL

zu finden. In Abb. 5.11 sind in das Diagramm gestrichelte Linien an den Stellen eingetragen, an denen für die verschiedenen LO s der Gradient 90% des Magnetometerwertes annimmt. Für einen Liftoff von $LO = 50 \mu\text{m}$ wird dies bei $BL = 137 \mu\text{m}$ und für $LO = 150 \mu\text{m}$ bei einer Basislänge von $BL = 232 \mu\text{m}$ erreicht.

Wird die Unterdrückung der Hintergrundfelder, welche sich im Allgemeinen proportional zu BL verhalten, berücksichtigt, sind Werte im Bereich von $BL = 200 \mu\text{m}$ im Fall einer Detektion von Mikrorissen eine gute Lösung. Allerdings gilt dies nur (wie in der Abb. 5.11 zu sehen) für $LO \leq 150 \mu\text{m}$. Für größere LO s müssen auch die BL zunehmen, damit ein ausreichend starkes Gradientensignal gemessen werden kann. Eine Faustformel kann grob durch $BL \approx 2 \times LO$ gegeben werden.

Sensorarray

In den vorherigen Unterkapiteln wurde das Verhalten von Einzelsensoren genauer betrachtet. Für industrielle Anwendungen eignen sich allerdings aufgrund der Kosten- und Zeitersparnis Sensorarrays mit vielen Sensorelementen. Dabei ist wichtig, genau abzuschätzen, ob mit der Verwendung von Sensorarrays das Rissfeld genügend erfasst werden kann, um eine Aussage über den Zustand eines zu prüfenden Bauteils treffen zu können¹. Dabei spielen die Größe der Sensorelemente, verglichen mit den Rissdimensionen (vor allem der Risslänge), sowie die Position zum Riss eine entscheidende Rolle für die Auswahl der Sensorgeometrie.

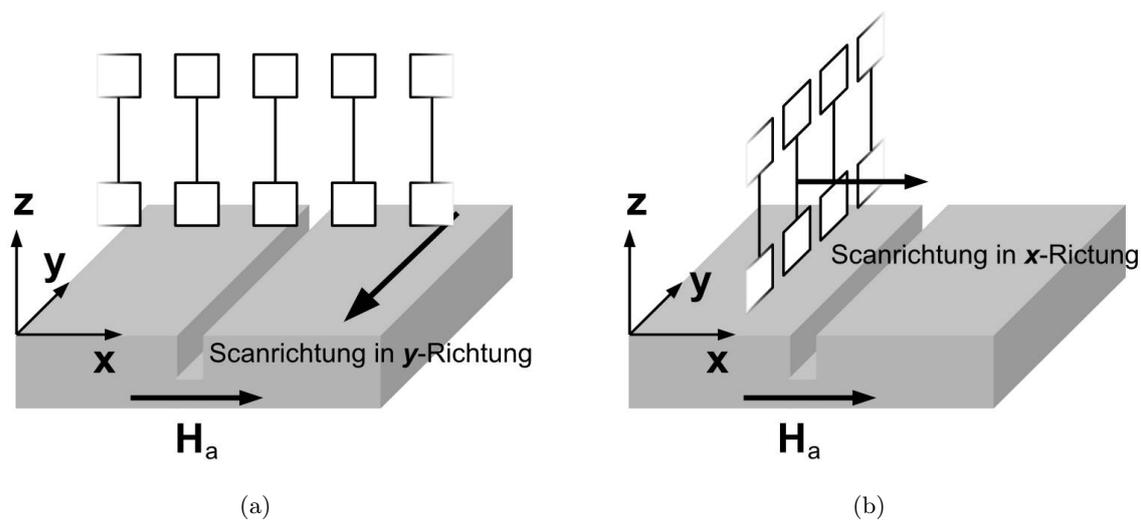


Abbildung 5.12: Sensoranordnungen für ein GMR-Array. (a) Array und Defekt stehen senkrecht zueinander. Bewegungsrichtung des Arrays verläuft parallel zur Defektrichtung. (b) Array und Defekt sind parallel angeordnet und das Array wird senkrecht zur Defektlänge bewegt.

In Abb. 5.12 werden zwei verschiedene Sensoranordnungen bezüglich der Rissrichtung und der Scanrichtung betrachtet. Diese stellen beim Einsatz von Sensorarrays Grenzfälle dar. In (a) wird das Array in Rissrichtung, d.h. in \hat{y} -Richtung, bewegt, wobei die Ebene der empfindlichen Flächen senkrecht zur Rissrichtung steht und im Folgenden mit *Arrayanordnung 1* bezeichnet wird. *Arrayanordnung 2* ist in (b) dargestellt. Hier wird das Array in \hat{x} -Richtung über den Riss (wie in (a) Rissausdehnung in \hat{y} -Richtung) bewegt und die Sensorflächen sind parallel zum Riss ausgerichtet.

¹Diese Überlegungen sind auch auf Einzelsensoren anwendbar, wenn sie nach jedem Linienscan genau um die Länge dL verschoben werden.

Sensorarray - Arrayanordnung 1

Im ersten Fall wird die in Abb. 5.12 (a) dargestellte Anordnung näher betrachtet. Hierbei wird angenommen, dass ein Sensorelement genau über den Riss bewegt wird. Tritt dieser Fall ein, ist der Mittelwert des Rissfeldes für dieses Element null und es wird kein Gradient gemessen. Dies führt dazu, dass die benachbarten Elemente in einem Sensorarray ein genügend hohes Streufeld messen müssen, damit eine Detektion mit anschließender Bewertung möglich ist. Der Abstand der benachbarten Elemente zum Riss und somit zum Element direkt über dem Riss wird definiert als $\text{pitch} = \Delta x_{\text{Sensor-Riss}}$, d.h. von der Mitte der Sensorelemente bis zum Riss (siehe Skizze in Abb. 5.13). Bei der angenommenen Anordnung gilt, dass die Distanz $\Delta x_{\text{Sensor-Riss}}$ größer als die Länge der Sensorelemente dL ist.

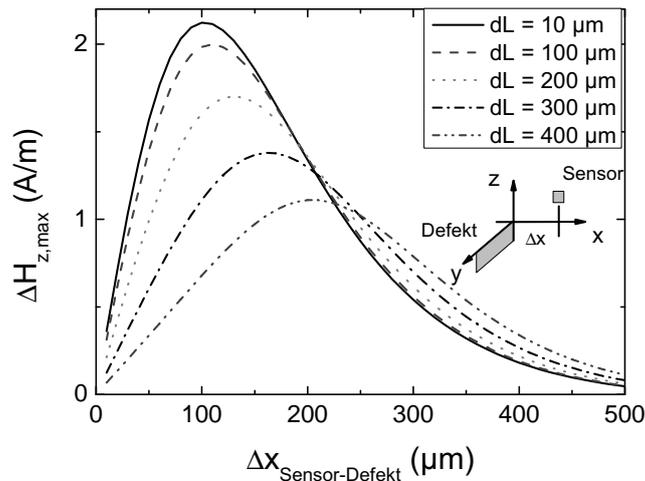


Abbildung 5.13: $\Delta H_{z,\max}$ als Funktion der Distanz $\Delta x_{\text{Sensor-Defekt}}$ zwischen Sensor und Defekt für verschiedene dL . Die Flächennormale der aktiven Flächen steht parallel zur Rissrichtung (siehe Schema innerhalb des Diagramms). Die Scanrichtung ist entlang der y -Achse.

In Abb. 5.13 ist das maximale Magnetfeld $\Delta H_{z,\max}$ als Funktion der Distanz $\Delta x_{\text{Sensor-Defekt}}$ für verschiedene Längen dL aufgetragen. Der Scan wird entlang der y -Achse in Rissrichtung durchgeführt. Der Liftoff beträgt bei dieser Simulation ebenfalls $LO = 150 \mu\text{m}$, die Basislänge ist $BL = 250 \mu\text{m}$ und die Höhe der aktiven Elemente $dH = 50 \mu\text{m}$.

Die Position des Maximums hängt neben dem Liftoff von der aktiven Elementlänge dL ab. Dieses Verhalten wurde schon in Abb. 5.7 (b) beobachtet. Für $dL = 400 \mu\text{m}$ wird $\Delta H_{z,\max} = 1,11 \text{ A/m}$ in einer Distanz von $\Delta x_{\text{Sensor-Defekt}} = 200 \mu\text{m}$ erreicht. Allerdings wurde oben erwähnt, dass sich in der Mitte über dem Riss ein Element befindet und sich somit das benachbarte Sensorelement erst in einer Distanz von mindestens $400 \mu\text{m}$ befinden kann. Hier ist der maximale Magnetfeldwert des gemessenen Streuflusses für einen Sensor mit Länge $dL = 400 \mu\text{m}$ auf $\Delta H_{z,\max} \approx 0,34 \text{ A/m}$ abgefallen. Für die Längen $dL = 300 \mu\text{m}$ und $dL = 200 \mu\text{m}$ reduzieren sich die maximalen Feldamplituden weniger stark und erreichen Werte von $\Delta H_{z,\max}(dL = 200 \mu\text{m}) \leq 1,36 \text{ A/m}$ und $\Delta H_{z,\max}(dL = 300 \mu\text{m}) \leq 0,70 \text{ A/m}$. Nur für Sensoren mit $dL \leq 100 \mu\text{m}$ lassen sich Feldwerte finden, die annähernd der maximalen Streufeldamplitude am Ort der benachbarten Sensorelemente entsprechen.

Aus den Simulationsergebnissen ergibt sich, dass für eine Rissdetektion bei einem Element exakt entlang des Risses scannend die benachbarten Elemente und deren Längen gewisse Maße nicht überschreiten dürfen, damit Defekte detektiert werden können. Der maximale Wert hängt stark von der Rissgeometrie, hier insbesondere der Rissklaffung, und dem Liftoff LO ab. Für den hier betrachteten

Riss ($Tiefe \times Klaffung \times Länge = 50 \times 2 \times 500 \mu\text{m}^3$) sind Sensorarrays mit einer Länge der aktiven Elemente von $dL \leq 200 \mu\text{m}$ am erfolgversprechendsten.

Sensorarray - Arrayanordnung 2

Die zweite Anordnung (siehe Abb. 5.12 (b)) betrifft ein Sensorarray, welches senkrecht über den Riss, hier als Beispiel in \hat{x} -Richtung, bewegt wird und dessen empfindliche Flächen parallel zur Risslänge angeordnet sind. Sind die empfindlichen Elemente zu lang bezüglich der Risslänge bzw. der Abstand untereinander ist zu groß, können Informationen die Risslänge betreffend verloren gehen und eine zuverlässige Längenbestimmung des Risses ist nicht möglich. Je mehr Elemente den Riss erfassen, desto genauer wird die Längenbestimmung.

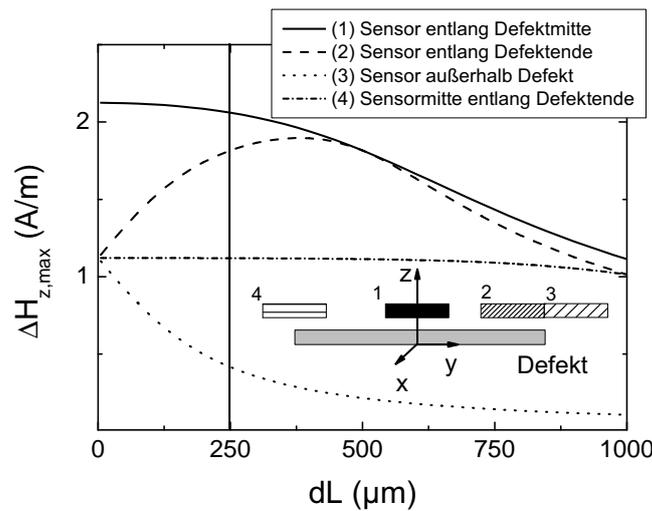


Abbildung 5.14: Sensorscan entlang der x -Richtung über einen Defekt mit einer Länge von $500 \mu\text{m}$. Dargestellt ist die maximale Feldamplitude $\Delta H_{z,\text{max}}$ als Funktion von dL . Im Schema sind vier verschiedene Positionen der aktiven Elemente beim Scan über den Defekt dargestellt.

In Abb. 5.14 ist der maximale Magnetfeldwert $\Delta H_{z,\text{max}}$ als Funktion von dL für vier verschiedene Scanpositionen (im Schema in der Abbildung mit 1 - 4 gekennzeichnet) aufgetragen. Für die Simulation betrug der Liftoff $LO = 150 \mu\text{m}$, die Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$ und die Höhe $dH = 50 \mu\text{m}$.

Die schwarze Kurve (1) repräsentiert hierbei einen Scan in x -Richtung über die Rissmitte als Funktion von dL . Die grau gestrichelte Linie (2) entspricht dem Fall, dass das Sensorelement über den Riss bewegt wird und seine Kante mit dem Rissende abschließt. Der dritte Fall (3) wird durch die gestrichelte-gepunktete Linie veranschaulicht. Hier befindet sich der Sensor außerhalb des Risses und sein Ende schließt mit dem Ende des Risses ab. (4) wird durch eine gepunktete Linie dargestellt. Das Sensorelement scannt den Riss an dessen Ende ab. Dabei befindet sich eine Hälfte über dem Riss, die andere außerhalb.

Im ersten Fall (1) nimmt das Maximum $\Delta H_{z,\text{max}}$ kontinuierlich mit zunehmender Elementlänge dL ab (dieses Verhalten wurde schon bei der Analyse der Sensorflächen, Absatz 5.1.2, beobachtet). Der magnetische Streufluss, der aus dem Bauteil austritt, nimmt zu den Enden des Risses hin ab. Somit wird das gemessene Signal kleiner. Für den Fall (2), bei dem ein Sensorelement über den Riss an dessen Ende bewegt wird, nimmt die Länge der Elemente entlang des Risses zu. Dadurch nimmt auch das ermittelte Streufeld mit dL zu, bis sich bei $dL = 500 \mu\text{m}$ die beiden Kurven (1) und (2) berühren (die Risslänge beträgt $500 \mu\text{m}$), da hier beide Fälle identisch sind und genau entlang der Rissmitte über den

Rissverfahren werden. Nimmt dL weiter zu, ist die Abnahme von (2) stärker als bei (1) aufgrund des größeren Abstandes eines Sensorendes bezüglich des Risses. Für (3) - das Element wird am Riss vorbei bewegt - fällt das Maximum zu Beginn sehr stark ab. Der Fall (4) zeichnet sich durch einen nahezu konstanten Wert aus, da sich je eine Hälfte über dem Riss und eine außerhalb des Risses befindet. Erst bei großen Werten von dL nimmt das Signal ab.

Aus den Simulationen folgt für einen geeigneten Sensor, dass dieser von seinen Dimensionen, genauer seiner Länge dL , nicht die Hälfte der Risslänge des kleinsten noch zu detektierenden Risses übertreffen sollte, da ansonsten die örtliche Auflösung zu gering ist. Dadurch wäre eine zuverlässige Aussage nicht mehr gewährleistet.

Für Sensorelemente mit einer Länge von $dL = 250 \mu\text{m}$ (senkrechter Strich in Abb. 5.14), wobei hier zur Vereinfachung $dL = \text{pitchdesArrays}$ ist, und einer Risslänge von $500 \mu\text{m}$ sind zwei Fälle näher zu betrachten. Zum Einen scannen zwei Elemente genau über den Defekt und schließen mit der Risslänge ab (der Fall (2) liegt für beide Elemente vor). In diesem Fall beträgt das gemessene maximale Feld $\Delta H_{z,\text{max}} = 1,82 \text{ A/m}$. Für die beiden benachbarten Elemente, welche am Defekt vorbei bewegt werden (Fall (3)), ist das gemessene Feld $\Delta H_{z,\text{max}} = 0,42 \text{ A/m}$ um den Faktor 4 gegenüber den beiden vorherigen reduziert. Um eine Aussage über die Ausdehnung des Defektes treffen zu können, ist für die inneren Sensorelemente ein SNR von mindestens 8 erforderlich, um noch genügend Messsignal von den benachbarten Elementen als zusätzliche Information zu erhalten.

Die zweite Variante betrifft den Fall, dass ein Element genau über die Mitte des Defektes bewegt wird (1) und die beiden benachbarten Elemente bei einem $500 \mu\text{m}$ langen Riss genau mit ihrer Mitte über die Rissenden, d.h. eine Hälfte über den Defekt und eine Hälfte am Defekt vorbei, scannen (4). Für das mittlere Element ist der ermittelte, maximale Magnetfeldwert $\Delta H_{z,\text{max}} = 2,06 \text{ A/m}$. Für die beiden benachbarten Elemente reduziert sich in diesem Fall der maximale Magnetfeldwert um etwa die Hälfte auf $\Delta H_{z,\text{max}} = 1,12 \text{ A/m}$. Da durch die erste Anordnung das Minimum an Feldamplitude und somit ein SNR vorgegeben ist, messen die Elemente im zweiten Fall ein ausreichend hohes Signal des Streufeldes, wodurch eine Einordnung und Bewertung des Defektes erfolgen kann.

5.1.3 Vergleich Messung und Simulation

Um die Simulationen zu verifizieren, wären Gradiometer mit unterschiedlichen Abmessungen nötig. Allerdings waren diese im Vorfeld nicht erhältlich. Deshalb ließen sich nicht alle Simulationen der verschiedenen Parameter mit Messergebnissen experimentell vergleichen. Ein Vergleich ließ sich am ehesten für die Basislänge BL realisieren. Hierfür wurde mit einem Magnetometer in verschiedenen Abständen zur Prüfobjektoberfläche, d.h. bei verschiedenen Liftoffs LO , die Normalkomponente des Streuflusses H_z einer erodierten Nut mit bekannten Maßen aufgenommen. Diese Nut hat eine Länge von $5.500 \mu\text{m}$, die Tiefe beträgt $110 \mu\text{m}$ und die Klaffung $90 \mu\text{m}$. Die Platte mit der erodierten Nut wurde vor der Messung aufmagnetisiert und in Remanenz gemessen. Der Gradient wurde aus den verschiedenen Liftoffmessungen bestimmt, indem dieser nach $\Delta H_z(BL = LO1 - LO_n, x) = H_z(LO1, x) - H_z(LO_n, x)$ berechnet wurde. Die so bestimmten Magnetfeldwerte wurden anschließend mit einer Simulation des Streufeldes für die vorliegende Nut und verschiedenen Basislängen verglichen. Als Magnetometer wurde der GMR-Sensor GF792 (siehe Kap 3) der *Sensitec GmbH* verwendet. Dieser hat eine aktive Fläche von $dH \times dL = 20 \times 17 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 3.8 in Kap. 3). Diese Fläche wurde ebenfalls bei der Berechnung der Streufeldwerte in Abhängigkeit von der Basislänge BL verwendet. Berechnet wurde das Signal eines axialen Gradiometers.

In Abb. 5.15 ist der Vergleich der Simulation (schwarze Linie) mit der Messung (schwarze Punkte) des normalisierten Magnetfeldes $\Delta H_{z,\text{max}} / \Delta H_{z,\text{max}}(BL \rightarrow \infty)$ als Funktion der Basislänge dargestellt. Das normalisierte Magnetfeld bietet den Vorteil, dass die Kenntnis sowohl der Materialparameter des Prüfobjektes, insbesondere die magnetische Permeabilität, als auch des internen Magnetfeldes nicht

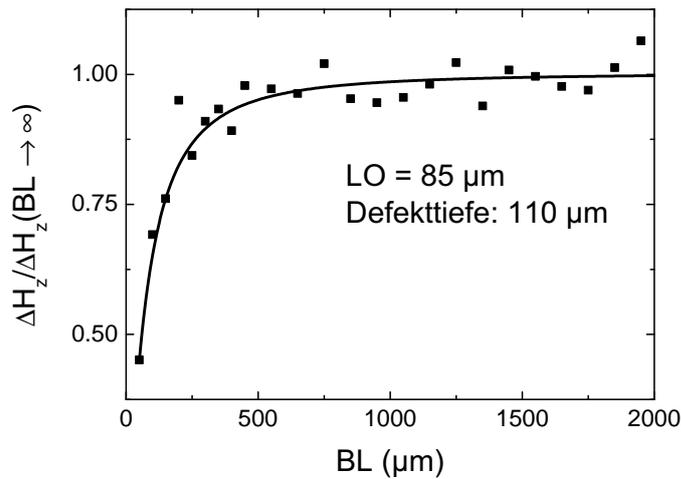


Abbildung 5.15: Normalisiertes Gradiometersignal $\Delta H_{z,\max} / \Delta H_{z,\max}(BL \rightarrow \infty)$ als Funktion der Basislänge BL . Die Linie entspricht dem Simulationsergebnis, die schwarzen Punkte sind die Messergebnisse, welche mit einem Magnetometer für verschiedene Abstände ermittelt wurden. Die künstliche Nut hat eine Länge von $5500 \mu\text{m}$, eine Tiefe von $110 \mu\text{m}$ und eine Klaffung von $90 \mu\text{m}$. Der Liftoff für die kürzeste Distanz der aktiven Flächen des Magnetometers betrug $LO \approx 85 \mu\text{m}$.

notwendigerweise vorliegen müssen (siehe Gl. 2.13 und 2.14 in Kap. 2) und sich in den normalisierten analytischen Gleichungen kürzen. Die kürzeste Distanz zwischen aktiver Fläche des Magnetometers und Prüfobjekt betrug etwa $85 \mu\text{m}$. Dies stellt den Liftoff für die berechneten Basislängen dar. Die Abweichung der experimentell bestimmten Werte vom Simulationsergebnis beträgt bis auf eine Ausnahme weniger als 6%, d.h. die Simulationen geben die tatsächlichen Resultate gut wieder.

5.2 ZfP-angepasste Sensorarrays

5.2.1 Sensorlayout

In der vorangegangenen Parameterstudie wurden die geometrischen Abmessungen eines Gradiometers für einen Riss mit 500 μm Länge, einer Tiefe von 50 μm und einer Klaffung von 2 μm untersucht. Die Ergebnisse der Simulation führen zu teils gegenläufigen Aussagen die Auslegung eines ZfP-angepassten GMR-Sensorarrays betreffend. Im Folgenden wird zudem der Begriff „punktartiges“ Sensorelement eingeführt, dessen maximale Kantenlänge einer Fläche, z.B. dL , viel kleiner als die Länge eines Defektes ist. Im Fall von einem 500 μm langen Defekt wäre dies eine Gesamtfläche für einen punktartigen Sensor von $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ oder kleiner.

Die wichtigsten Punkte der Simulation seien hier nochmals kurz zusammengefasst:

- Eine hohe Ortsauflösung (punktartiger Sensor) lässt sich durch möglichst kleine aktive Sensorflächen $dL \times dH$ erreichen.
- Die Basislänge BL darf weder zu klein (zu geringe Signalamplitude) noch zu groß (verstärkte Rauscheinflüsse durch äußere Störfelder) sein und sollte im Bereich von $BL \approx 2LO$ liegen.
- Sensorarrays lassen sich sowohl mit punktartigen als auch mit ausgedehnten Sensorelementen aufbauen, sollten aber zu sinnvollen elektrischen Widerständen der Flächen im $\text{k}\Omega$ -Bereich führen.

Gerade der erste Punkt, welcher auch Sensorarrays mit punktartigen Elementen betrifft, lässt sich nicht ohne weiteres bzw. ohne Verlust an Signalqualität erreichen. Gerade hier muss die messtechnische Realisierbarkeit berücksichtigt werden.

Die Magnetfelder werden bei GMR-Sensoren indirekt über eine Änderung der Spannung ermittelt (siehe Kap. 3 und Kap. 4). Das wiederum bedeutet, dass eine genügend hohe Spannung angelegt werden muss, um bezüglich der Spannungsmessung über geeignete hochauflösende Messgeräte (z.B. Messkarten (siehe Kap. 3.1.2)) eine hohe Dynamik und somit eine hohe Magnetfeldauflösung zu erreichen. Die Widerstandsänderung liegt bei den für diese Arbeit eingesetzten Sensoren im Bereich von $GMR \leq 10\%$. Der Gesamtwiderstand eines Spinventils ist abhängig von der Länge der Leiterbahn und beträgt z.B. für 0,6 μm breite GMR-Leiterbahnen etwa 33 Ω pro μm und somit für einen punktartigen Sensor (Länge 1 μm) 33 Ω . Die Stromstärke sollte 10 mA nicht überschreiten, da sonst, aufgrund des sehr kleinen Querschnitts der stromführenden Schicht, die im GMR deponierte Wärme zu groß wird und das Sensorelement zerstört werden kann. Dies bedeutet wiederum, dass bei einem maximalen Strom von 10 mA die angelegte Spannung bei einem 1 μm langen Sensorstreifen 330 mV nicht überschreiten sollte. Bei einer maximalen, feldabhängigen Widerstandsänderung von 10% führt dies bei konstanter Stromstärke zu einem Spannungshub von 16,5 mV. Bei den in Kap. 3 vorgestellten Sensoren entsprechen 10% Signaländerung etwa 2 – 3 kA/m zwischen beiden Sättigungsbereichen. Bei 3 kA/m und einer Spannungsänderung von 16,5 mV entspricht 1 A/m etwa einer Spannung von 50 μV . Je nach Aufbau und Anordnung der empfindlichen Elemente sowie der Hysterese kann dieser Wert noch weiter abnehmen. Bei einem Dauerbetrieb der Sensoren ist es jedoch von Vorteil, die Stromstärke auf 1 – 2 mA zu begrenzen. Dadurch verschlechtert sich der Spannungshub weiter und in einfachen Aufbauten und ohne Filter können so nur wenige A/m große Streufelder vom Rauschen nicht mehr unterschieden werden.

Punktartige Sensoren lassen sich somit nur bedingt unter Verlust von Dynamik aufbauen und sind deshalb kaum geeignet, auch wenn eine hohe Ortsauflösung erreicht werden könnte. Vergrößert man den Sensor in einer Dimension, z.B. in der Länge (GMR-Spinventilsensoren sind in einer Mäanderstruktur aufgebaut, siehe Kap. 3), wodurch sich ebenfalls der Widerstand vergrößert, erhält man eine räumliche Ausdehnung, wodurch die Ortsauflösung geringer wird. Ein optimaler Wert hängt hier von der Größe der Defekte, die detektiert werden sollen, und ebenso vom LO ab.

5.2.2 Sensor-Maske

Im Allgemeinen besitzen GMR-Sensoren einen Widerstand im $k\Omega$ -Bereich, die angelegte Spannung liegt bei einigen Volt und die daraus resultierende Stromstärke beträgt etwa 1 – 2 mA. Daraus wiederum ergeben sich Längen der Leiterbahnen von einigen Hundert μm . Diese können in einer Linie oder 2D mäanderförmig angeordnet sein. Bei einem Linienelement wirkt der Sensor in erster Näherung nur in eine Dimension (entlang der Leiterbahn) mittelnd. Bei einer Mäanderstruktur wird das Magnetfeld, welches die mäanderförmige aktive Fläche durchströmt, gemessen. In diesem Fall nimmt ebenfalls die Signalamplitude durch die kleineren Feldanteile bei größerem Abstand von der „Magnetfeld-Quelle“ ab. D.h. obenliegende Streifenleiter des Mäanders tragen weniger zur Änderung des Gesamtwiderstandes bei. Lediglich bei Magnetfeldern, die sich kaum in vertikaler Richtung ändern, sind solche Elemente sinnvoll. Somit sollte die vertikale Gesamtausdehnung des GMR-Mäanders auf die Feldgradienten angepasst sein. Für große Fehler genügen große Sensorelemente, wobei hier auch kleine Elemente eingesetzt werden können. Kleine Fehler allerdings verlangen nach einem an die Ausdehnung des Risses angepassten Element.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Sensorelemente weder zu groß noch zu klein sein dürfen. Des Weiteren ist ein Sensorelement, welches nur in eine Dimension ausgedehnt ist, einem flächigen Element mit Mäanderstruktur vorzuziehen. Die Basislänge sollte für ZfP-angepasste Sensoren für die Detektion von Oberflächenrissen auf der μm -Skala ebenfalls im Bereich von 100 bis 300 μm liegen. Daraus ergaben sich verschiedenste Sensortypen, die für eine Waferproduktion designt wurden. In Tabelle 5.1 sind die neuen Sensoren aufgelistet. Zudem sind die Abmessungen, die Mäanderstruktur, die Widerstände der GMR-Elemente für zwei verschieden empfindliche Sensortypen (mit A und B gekennzeichnet) und die Gesamtgröße der einzelnen Si-Chips zusammengestellt.

Die Längen der aktiven GMR-Elemente variieren von $dL = 25 \mu\text{m}$ bis $dL = 390 \mu\text{m}$. Die Höhen sind sowohl von der Anzahl der Mäanderstreifen als auch von der Dicke der Leiterbahnen (Typ A 0,6 μm und Typ B 3 μm) abhängig und liegen zwischen $dH = 0,6 \mu\text{m}$ (Chip 1 - 6, Typ A) und 32 μm für Chip 11 & 12 vom Typ B. Für die Basislänge wurde der Studie folgend $BL = 150, 250 \mu\text{m}$ gewählt. Dadurch wird auch die Größe des Chips beeinflusst (siehe Tabelle 5.1 letzte Spalte). Zusätzlich wurden Einzelsensoren mit Längen der aktiven Elemente von $dL = 3, 10, 20 \mu\text{m}$ designt (Chip 13 - 15). Diese können zwar nur mit geringen Spannungen versorgt werden, sind aber für Mikro-GMR-Messungen interessant.

In Abb. 5.16 ist die Maske, welche schließlich von der *Sensitec GmbH* in einem Auftrag nach den oben genannten Parametern hergestellt wurde, dargestellt. In der Sensorherstellung werden verschiedene Prozessschritte wie Lithografie, Ätzen und Bedampfen durchlaufen. Die Maske hat eine Größe von $18 \times 20 \text{ mm}^2$. Insgesamt kann diese etwa 20 mal auf einen 4-Zoll Si-Wafer reproduziert werden. Pro Maske werden vom gleichen Sensortyp maximal 5 Sensoren (bei den Versuchssensoren mit sehr kleiner Größe insgesamt 20) und somit auf dem gesamten Wafer insgesamt etwa 100 Sensorchips pro Typ realisiert. Dies entspricht 3600 Chips mit insgesamt 31.600 GMR-Elementen pro Wafer. Setzt man die Kosten an, die für die Herstellung der Wafer aufgebracht werden müssen (ein Wafer kostet etwa 1.000 Euro), ergibt sich ein Preis von weniger als 5 Cent pro GMR-Chip. Dies sind geringe Kosten im Vergleich zu anderen Sensortypen.

In Abb. 5.17 sind die Sensorarrays der Typen 4, 12 und 13 bis 15 vergrößert dargestellt. Die einzelnen Sensorarrays bestehen neben den GMR-Elementen zusätzlich aus Leiterbahnen und Kontaktpads für die elektrische Versorgung sowie dem Abgriff zur Spannungsmessung der einzelnen GMR-Brücken. Die Padgröße schränkt hierbei die minimale Größe der Sensoren ein, da deren Pitch nicht kleiner als 150 μm sein kann. Daraus folgt für Arrays mit einer Länge der GMR-Elemente von 100 μm und kleiner, dass die GMR-Elemente nicht mehr die komplette Chipkante abdecken können. Hierdurch können diese Chips nicht mehr ohne Weiteres zu größeren Arrays ausgebaut werden.

Nr.	Maße in μm		Basislänge	Elemente	MR-Breite:		Chipgröße	
	Länge MR	Raster MR			Mäander	R_A [$\text{k}\Omega$]		R_B [$\text{k}\Omega$]
1	390	400	150	8	1	13	2,6	$3,4 \times 1 \text{ mm}^2$
2	390	400	250	8	1	13	2,6	$3,4 \times 1 \text{ mm}^2$
3	190	200	150	16	1	6,3	1,27	$3,4 \times 1 \text{ mm}^2$
4	190	200	250	16	1	6,3	1,27	$1 \times 1 \text{ mm}^2$
5	190	200	150	4	1	6,3	1,27	$1 \times 1 \text{ mm}^2$
6	190	200	250	4	1	6,3	1,27	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
7	90	100	150	16	2	6	1,2	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
8	90	100	250	16	2	6	1,2	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
9	50	60	150	16	4	6,67	1,33	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
10	50	60	250	16	4	6,67	1,33	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
11	25	35	150	16	8	6,67	1,33	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
12	25	35	250	16	8	6,67	1,33	$2,8 \times 1 \text{ mm}^2$
13	3		50	1	1	0,1		$0,5 \times 1 \text{ mm}^2$
14	10		50	1	1	0,333		$0,5 \times 1 \text{ mm}^2$
15	20		50	1	1	0,667		$0,5 \times 1 \text{ mm}^2$

Tabelle 5.1: Aufistung der angepassten GMR-Sensorarrays und ihrer verschiedenen Parameter: Anzahl der Elemente pro Array, Länge der Elemente, Basislänge, Mäanderstruktur, Breite der Leiterstreifen und Chipgröße.

2A	4A	6A	8A	10A	12A	13	14	15
2A	4A	6A	8A	10A	12A	13	14	15
2A	4A	6A	8A	10A	12A	13	14	15
2A	4A	6A	8A	10A	12A	13	14	15
2A	4A	6A	8A	10A	12A	13	14	15
2B	4B	6B	8B	10B	12B	13	14	15
2B	4B	6B	8B	10B	12B	13	14	15
2B	4B	6B	8B	10B	12B	13	14	15
2B	4B	6B	8B	10B	12B	13	14	15
2B	4B	6B	8B	10B	12B	13	14	15
1A	3A	5A	7A	9A	11A	13	14	15
1A	3A	5A	7A	9A	11A	13	14	15
1A	3A	5A	7A	9A	11A	13	14	15
1A	3A	5A	7A	9A	11A	13	14	15
1A	3A	5A	7A	9A	11A	13	14	15
1B	3B	5B	7B	9B	11B	13	14	15
1B	3B	5B	7B	9B	11B	13	14	15
1B	3B	5B	7B	9B	11B	13	14	15
1B	3B	5B	7B	9B	11B	13	14	15
1B	3B	5B	7B	9B	11B	13	14	15

Abbildung 5.16: Ausschnitt der Wafermaske der ZfP-optimierten Sensorarrays, deren Parameter in Tabelle 5.1 aufgelistet sind.

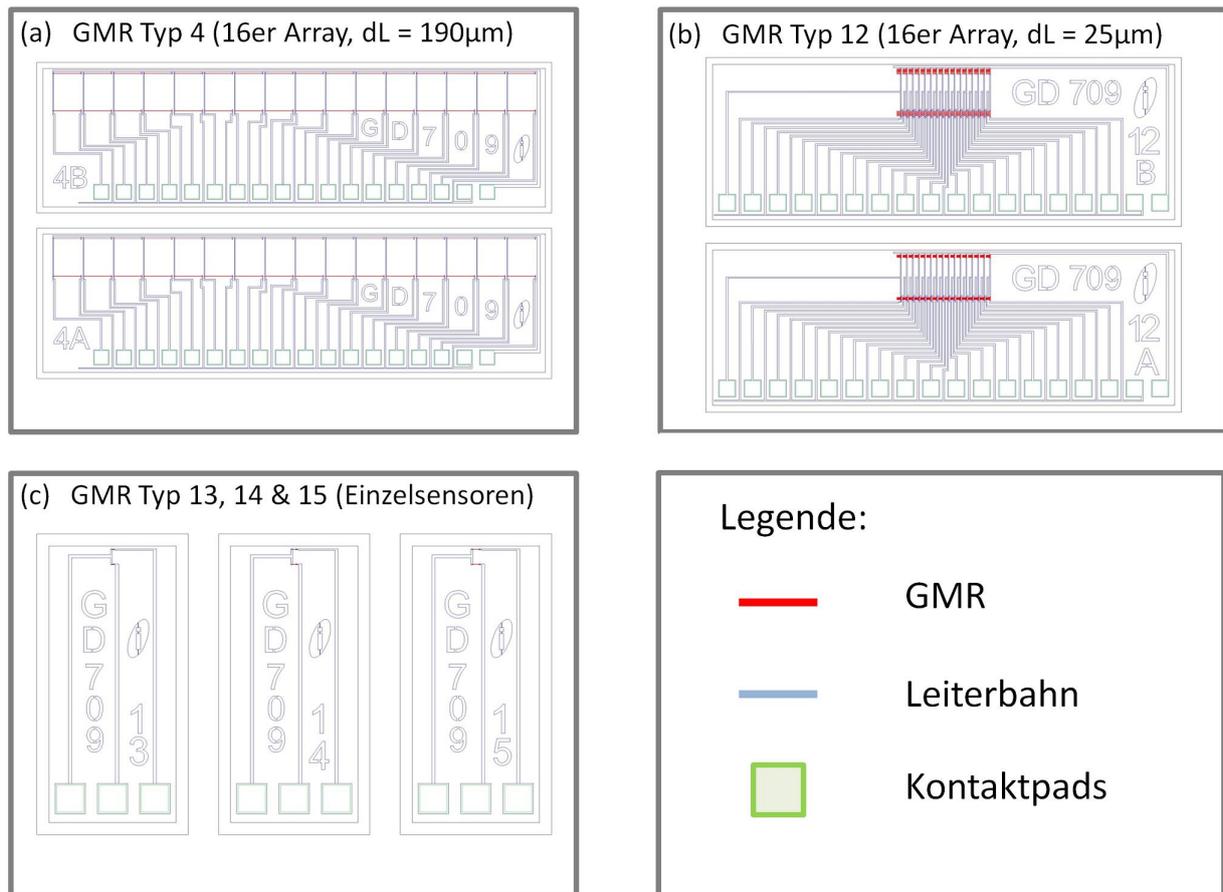


Abbildung 5.17: Als Beispiel Design der Typen 4 (a), 12 (b) und 13-15 (c) vergrößert dargestellt.

In Abb. 5.18 ist ein REM-Bild (REM: Rasterelektronenmikroskop) vom unbearbeiteten Si-Wafer dargestellt. Auf dem Ausschnitt ist der Sensortyp 8B zu erkennen. Für eine weitere Verarbeitung der Chips muss der Wafer schließlich zersägt werden. Aus diesem Grund ist bei der Maskenherstellung auch darauf zu achten, dass hierfür zwischen den einzelnen Chipsegmenten genügend Platz vorhanden ist, damit die Säge die GMR-Elemente und ihre Leiterbahnen nicht beschädigt. Allerdings ist dies mit einem Verlust von Fläche, die für die Chips zur Verfügung steht, verbunden.

5.2.3 Platinen

Die Chipgröße der einzelnen Arrays ist herstellungsbedingt auf etwa 3,2 mm Breite beschränkt, weshalb Sensorchips der unterschiedlichen Typen maximal 16 Elemente besitzen. Jedoch können die Chips auf Platinen nebeneinander aufgeklebt werden, wodurch wesentlich größere Sensorarrays mit mehr als 16 Elementen erreicht werden. In der vorliegenden Arbeit wurden Sensoren mit 16, 32 und 48 Elementen aufgebaut und verwendet. In zukünftigen Designs sollen insgesamt bis zu fünf Chips, das bedeutet eine Anzahl von 80 GMR-Sensorelementen, auf einer Platine zusammengefügt werden, damit in kürzerer Zeit größere Flächen abgerastert werden können.

Das Anbringen bzw. Aufkleben der GMR-Chips auf die Platinen muss sehr genau durchgeführt werden. Die in Kap. 3 vorgestellten GMR-Sensoren wurden zwar nah an den entsprechenden Platinenkanten angebracht, jedoch, wie in Abb. 3.13 dargestellt, ist in manchen Fällen der Abstand der

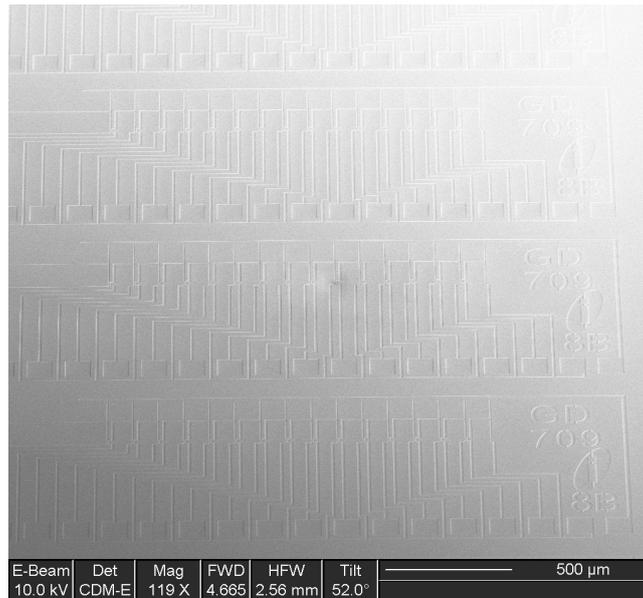


Abbildung 5.18: REM-Bild vom Si-Wafer. Gezeigt ist der GMR-Sensor 8B (Mit freundlicher Genehmigung der *Sensitec GmbH*, [175]).

Chipkante zur Platinkante verhältnismäßig groß. In Abb. 3.13 ergab die Durchstrahlungsprüfung für den untersuchten GMR-Sensor einen zusätzlichen Abstand der Chipkante von 80 µm zur Platinkante.

Ein zu ungenaues Aufkleben führt somit zu einem zu großen Abstand der aktiven GMR-Flächen von der zu prüfenden Fläche. Dieser zusätzliche Abstand und somit größere Lift-off beeinträchtigt nicht nur die messbare Signalamplitude und die Ortsauflösung. Ohne genaue Kenntnis der Lage der GMR-Chips bzw. der empfindlichen Flächen bezüglich der zu untersuchenden Oberfläche ist auch eine spätere Bewertung und Rekonstruktion nur mit zusätzlichen Fehlern durchführbar.

Neben dem präzisen Aufkleben sind die Platinkante und ihre gegebenenfalls herstellungsbedingten Unebenheiten zu beachten. Für einen konstanten und geringen Abstand sollten deshalb Unebenheiten vermieden werden.

Die Kanten lassen sich mit verschiedenen Verfahren bearbeiten, welche versuchsweise von der *Jenaer Leiterplatten GmbH* in einer Auftragsarbeit durchgeführt wurden. In Abb. 5.19 sind diese Verfahren sowie ihre Auswirkungen auf die Ebenheit der Kanten gezeigt. Platine 1 wurde ohne weitere Bearbeitungsschritte gefräst. Hier lässt sich eine gut definierte Kante erreichen, deren Abweichungen im Bereich von 10 µm liegen (siehe Ausschnitt (gelbe Box) der Abbildung für Platine 1). Für Platine 2 wurde Standard-Fräsen mit zusätzlichem Schlichten (0,3 mm) verwendet. Auch hier ist eine für ZfP-Anwendungen gute Platinkante zu erreichen. Schlichten (0,3 mm) mit Gegenlaufräsen war das zur Bearbeitung von Platine 3 verwendete Verfahren. Dieses stellte sich allerdings als zu ungenau heraus und wie in Abb. 5.19 sowie dem dazugehörigen Ausschnitt gezeigt, sind zusätzliche Schädigungen der Platinkanten durch dieses Verfahren möglich (roter Pfeil in der Abbildung von Platine 3). Aus diesem Grund scheidet dieses Verfahren für ZfP-Anwendungen aus. Auch bei Platine 4 (Fräsen mit Gegenlaufräsen) treten zu viele Fehler nach der Bearbeitung an der Kante auf. Wird Nippeln als Bearbeitungsverfahren verwendet (Platine 5), sind die Platinkanten zwar abgerundet, jedoch sind hier die Unebenheiten an der Kante am größten. Sie liegen im Bereich von 30 µm und mehr und sind deshalb für Anwendungen, bei denen präzise gefertigte Kanten von Bedeutung sind, nicht geeignet. Ein weiteres Bearbeitungsverfahren für die Kanten ist Lasern (Platine 6). Auch hier sind die Kanten zu ungenau gefertigt. Abweichungen von mehr als 30 µm sind auch hier möglich. Werden alle Verfah-



Abbildung 5.19: Unterschiedliche Verfahren zur Bearbeitung der Platinenkanten. Zu jedem Bild ist zusätzlich unterhalb des jeweiligen Fotos ein vergrößerter Ausschnitt (entsprechend den gelben Boxen) abgebildet.

ren zusammenfassend betrachtet, kommen für GMR-ZfP-Anwendungen nur „Standard-Fräsen“ bzw. „Standard-Fräsen mit Schichten“ in Betracht.

Neben dem präzisen Bestücken der Platinen mit den GMR-Chips lassen sich weitere Bauteile in das Platinendesign integrieren (siehe hierzu [172]). Die ersten Platinen allerdings wurden zu Versuchszwecken nur mit Leiterbahnen, ähnlich zu den in Kap. 3 vorgestellten GMR-Sensoren, ausgestattet, wodurch ein Abgriff der Spannung möglich wird. In den nächsten Entwicklungsstufen wurden die Platinen neben den GMR-Chips mit elektronischen Bausteinen wie Vorverstärker und Multiplexer zur Verarbeitung der vielen Kanäle bestückt. Dadurch wird eine schnelle, echtzeitfähige Verarbeitung der einzelnen Sensorsignale sensornah ermöglicht. Gerade dieser Schritt ist neben den angepassten Eigenschaften der Sensoren für industrielle Anwendungen wichtig. Mit einem angepassten Platinendesign lassen sich eine große Anzahl von Verdrahtungen sowie nachgeschalteter Elektronik vermeiden, was zusätzlich zu einer Platzersparnis führt.

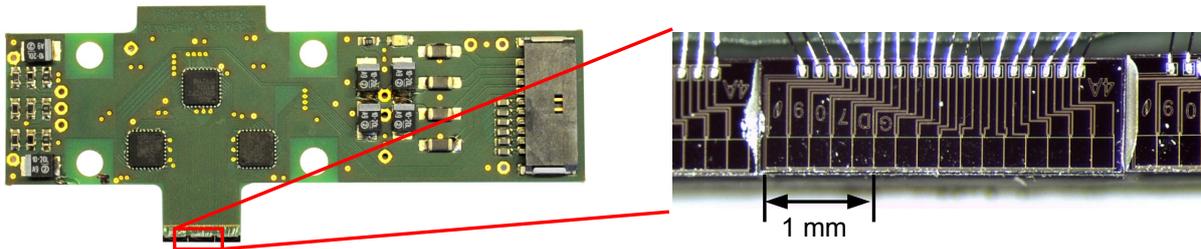


Abbildung 5.20: Links: Sensorplatine mit drei GMR-Chips des Sensortyps 4A (16 Elemente mit $dL = 190 \mu\text{m}$ und $BL = 250 \mu\text{m}$). Rechts: Ausschnitt mit den aufgeklebten und gebondeten GMR-Chips auf der Platine.

In Abb. 5.20 ist auf der linken Seite eine Platine für insgesamt 48 GMR-Sensorelemente dargestellt, wobei es sich hier um drei 16er-Chips des Sensortyps 4A mit einer Elementlänge $dL = 190 \mu\text{m}$ und einer Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$ handelt. Die Trägerplatinen wurden an der Sensorkante gefräst, um eine nahezu planparallele Kante zu erhalten. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein vergrößerter Ausschnitt mit den aufgeklebten GMR-Chips gezeigt. Zu sehen sind neben den Chips die einzelnen Bonddrähte, welche den elektrischen Kontakt zwischen Si-Chip (GMR-Elemente) und den Leiterbahnen auf der Platine herstellen. Im Allgemeinen wurden während dieser Arbeit hauptsächlich GMR-Sensorplatinen ohne zusätzliche Bauelemente eingesetzt. Diese wurden dann mit den in Kap. 3 vorgestellten Verstärkern betrieben.

Die in Abb. 5.20 gezeigte Platine ist eine Erweiterung für das Labormodell (siehe Kap. 8). Neben den GMR-Elementen befinden sich auf der Platine Vorverstärker (gain von 130) und die für die einzelnen Baugruppen benötigten Widerstände. Zudem werden die Signale einzelner GMR-Chips, d.h. immer 16 GMR-Signale, gemultiplext, wodurch eine Reduktion der Ausgänge erreicht wird. Insgesamt werden bei diesem Design die Messsignale über drei Leitungen an eine Messkarte weitergeleitet. Die Messkarte wiederum muss schnell genug sein, um die Schaltraten der Multiplexer zu verarbeiten. Aufgrund der vergleichsweise langsamen Verfahrensgeschwindigkeit der Sensoren von maximal 1 U/s (Kap. 8), was einer Umlaufgeschwindigkeit bei einem Lagerring mit $\varnothing = 215 \text{ mm}$ von etwa 675 mm/s entspricht, und einem Abstand von minimal $50 \mu\text{m}$ zwischen den einzelnen Messpunkten pro Sensorelement, ergibt sich eine Datenrate von ungefähr 200 kS/s . Die maximale Datenrate, die möglich ist, liegt bei 2 MS/s .

5.3 Charakterisierung der angepassten GMR-Sensorarrays - Kennlinie und Rauschen

5.3.1 Kennlinie

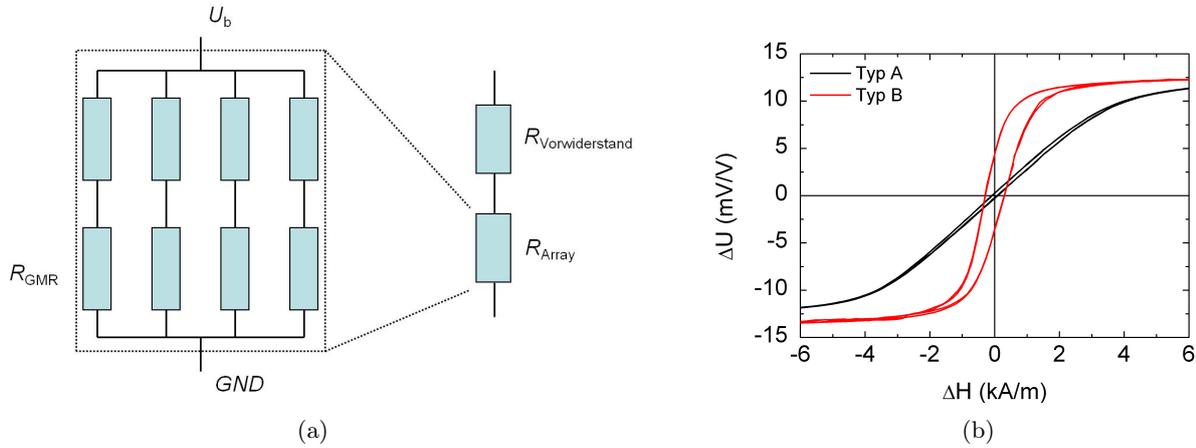


Abbildung 5.21: (a) Widerstandsanordnung zur Bestimmung der Kennlinie eines Gradiometers. (b) Kennlinien der beiden Sensortypen A (schwarz) und B (rot).

Da die neu entwickelten Sensoren Gradiometer sind, lassen sich wie bei Gradiometer GMR7 (siehe Kap. 3.2.2) die Kennlinien nur indirekt bestimmen. Die Spannung, welche am gesamten Sensor abfällt, wird in Abhängigkeit vom angelegten Magnetfeld über einen zusätzlichen Vorwiderstand R_V ermittelt. Hieraus erhält man durch Anwendung des Ohmschen Gesetzes die prozentuale Widerstandsveränderung des GMRs. In Abb. 5.21 (a) ist die Methode zur Bestimmung der Kennlinie am Beispiel der 4er-Arrays der Sensoren Nr. 5 und 6 skizziert. An der gesamten Brücke aus den in Reihe geschalteten Widerständen des Arrays R_{Array} und des Vorwiderstandes R_V ist eine konstante Spannung U_0 angelegt und es folgt:

$$\frac{U_V}{R_V} = \frac{U_0}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{U_{\text{Array}}}{R_{\text{Array}}}, \quad (5.2)$$

wobei hier für den Widerstand des Arrays R_{Array} je nach Sensortyp mit x Elementen ($x = 4, 8$ oder 16) gilt:

$$\frac{1}{R_{\text{Array}}} = \frac{x}{2 \cdot R_{\text{GMR}}} \quad (5.3)$$

mit dem Widerstand R_{GMR} eines jeden Elementes. Hier wird jedoch angenommen, dass die Widerstände der GMR-Elemente gleich sind und sich dementsprechend auch gleich in einem externen Magnetfeld verhalten. Dies ist allerdings fertigungsbedingt nicht möglich, und es wird zwischen den Widerständen der einzelnen Elemente immer zu kleinen Variationen von wenigen Ohm kommen. Für die prozentuale Änderung des GMR-Elements sind die Abweichungen allerdings nicht entscheidend.

Bei der Bestimmung der Kennlinie wird nun die Messung der Spannung am Vorwiderstand bzw. am Array vorgenommen. Dadurch erhält man die Widerstandsveränderung der GMR-Elemente und es lässt sich wiederum der Gradient simulieren, indem ein Element konstant gehalten wird und ein Element sich verhält, als wäre es wie bei der Messung der Spannung am Vorwiderstand einem Magnetfeld ausgesetzt. Mit Hilfe dieser Methode erhält man die in Abb. 5.21 (b) dargestellten Kurven. Aufgetragen sind hier

die Spannungen als Funktion der Magnetfeldstärke ΔH . Die schwarze Kurve entspricht der H-V-Kennlinie des Sensortyps A (GMR-Leiter mit einer Breite von $0,6 \mu\text{m}$) und für Sensortyp B ($3 \mu\text{m}$ breite GMR-Leiterbahn) analog die rote Kurve.

Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, wie sich die unterschiedlichen Breiten der GMR-Schichten auf die Kennlinie auswirken. Die Breiten bestimmen maßgeblich die Formanisotropie der ferromagnetischen Schichten. Die Magnetisierung des free layers wird hiervon unterschiedlich stark beeinflusst. Für die Sensoren vom Typ A (schwarze Kurve) erhält man eine lineare Kennlinie im Bereich von $\pm 2 \text{ kA/m}$ und erreicht den Bereich der Sättigung ab etwa $\pm 5 \text{ kA/m}$. Zusätzlich ist die Hysterese sehr gering. Typ B hingegen besitzt eine ausgeprägte Hysterese aufgrund der breiteren GMR-Bahnen, wodurch die Formanisotropie des Sensors geringer ist und sich die Magnetisierung leichter in einem äußeren Magnetfeld drehen lässt. Daraus gestaltet sich allerdings die Umrechnung der Spannungswerte in Magnetfeldwerte schwierig. Die Sättigung des Sensors wird bei etwa $\pm 2 \text{ kA/m}$ erreicht. Wird ein minor loop durchgeführt, kann im Bereich von $\pm 600 \text{ A/m}$ eine kleinere Hysterese erreicht werden, wodurch die Umrechnungsfehler geringer werden. Zusätzlich lassen sich GMR-Sensoren mit einem AC-Strom betreiben, wodurch eine Verbesserung der Hysterese erreicht werden kann [182].

Für den linearen Bereich der Sensorarrays vom Typ A beträgt die Übertragungsfunktion 3 mV/V pro kA/m . Für Typ B ist hier eine Aussage schwierig. Bei der Verwendung einer linearen Kennlinie muss mit einem Berechnungsfehler gerechnet werden, der sich je nach Aussteuerung des Sensors zunehmend gravierend auswirken kann. Im Bereich geringer Magnetfeldveränderung lassen sich jedoch die Spannungen mit etwa 10 mV/V pro kA/m umrechnen.

5.3.2 Rauschen

Neben den magnetischen Eigenschaften ist die Bestimmung des elektronischen Rauschens der Sensorarrays nötig. Hierfür wurden die Sensorarrays mit einer rauscharmen Batterie betrieben und das Rauschspektrum mit dem Spektrumsanalysator *SR785* der Firma *Stanford Research Systems*, dessen Messbereich von DC bis $102,8 \text{ kHz}$ umfasst, aufgenommen. Es wurden hierbei die Wirkung der unterschiedlich langen Leiterbahnen zu den GMR-Elementen eines Arrays sowie die verschiedenen Sensorarrays (2A , 4A und 10A) miteinander verglichen. Zudem wurde noch ein Vergleich mit Typ 4B, welcher der empfindlichere Sensor ist, durchgeführt. Allerdings sei bei den nachfolgenden Messergebnissen darauf hingewiesen, dass keine Abschirmung externer Störquellen vorgenommen werden konnte und so neben dem Eigenrauschen der Sensoren auch z.B. 50 Hz und die entsprechenden Oberwellen detektiert werden. Je nach Frequenz und Ausrichtung des Sensorelements im Raum lassen sich für bestimmte Frequenzen hohe externe Rauschwerte messen.

In Abb. 5.22 (a) sind Rauschspektren vom Sensorarray 4A (16er Array mit Sensorelementlänge $dL = 190 \mu\text{m}$, Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$ und GMR-Leiterbreite $0,6 \mu\text{m}$) dargestellt. Hier wurde mehrmals derselbe Kanal, Kanal 8, gemessen. Die Kurven wurden für den Frequenzbereich von 0 bis $12,8 \text{ kHz}$ mit einer Linienbreite von 1 Hz aufgetragen. Sie zeigen das typische Verhalten einer Abnahme des Rauschens mit zunehmender Frequenz. Bei niedrigen Frequenzen liegt das Rauschen bei wenigen $(\text{A/m})/\sqrt{\text{Hz}}$. Mit zunehmender Frequenz fällt dieser Wert ab und erreicht bei höheren Frequenzen den Bereich von wenigen Zehntel $(\text{mA/m})/\sqrt{\text{Hz}}$. Dieser Wert, umgerechnet in Tesla, ergibt Rauschwerte von einigen $\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Heute gängige GMR-Sensoren besitzen Rauschwerte von $1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ und besser (siehe Kap. 2.4.1). Daraus ergeben sich bei den hier vorgestellten Sensoren Werte, die in dieser Größenordnung liegen und somit für sehr kleine Streufelder eingesetzt werden können.

Es sei an dieser Stelle ein Bezug zu den früheren ZfP-Messungen mittels hoch empfindlicher Magnetometer hergestellt. Förstersonden oder auch insbesondere SQUIDS erreichen Feldempfindlichkeiten von wenigen $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ und sind damit bis zu drei Größenordnungen empfindlicher als die hier untersuchten GMR-Sensoren. Allerdings besitzen diese Sensoren gegenüber den GMRs den entscheidenden Nachteil,

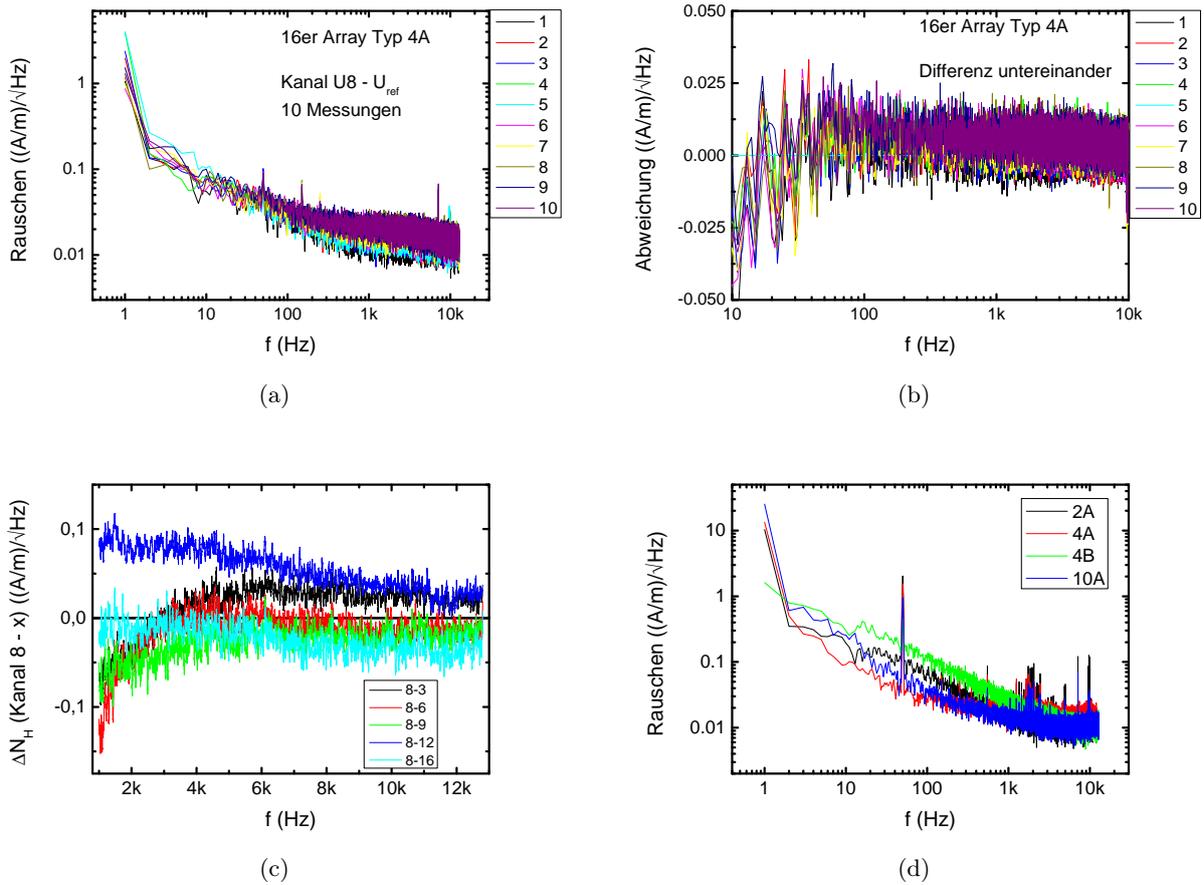


Abbildung 5.22: (a) Sensor 4A: Rauschspektrum für Element 8, insgesamt 10 Messungen. (b) Differenz der Rauschspektren von (a). (c) Differenz von 5 Rauschspektren bezüglich des Elementes 8. (d) Rauschspektren unterschiedlicher Sensortypen (2A, 4A, 4B und 10A).

dass sie groß sind und dadurch einen verhältnismäßig großen Abstand im mm-Bereich zur Magnetfeldquelle besitzen. Dies bedingt ein kleineres, detektierbares Streufeld. Schätzt man das Magnetfeld eines Defektes in Abhängigkeit vom Liftoff ab, ist es aufgrund des hohen Abstands der aktiven Elemente der SQUIDS und Förstersonden um den Faktor 1000 kleiner als bei GMR-Sensoren (Liftoff im Bereich von 100 μm), wodurch nicht nur der Vorteil der hohen Feldempfindlichkeit zunichte gemacht wird, sondern sich auch das SNR in Bezug auf externe Rauschquellen deutlich verschlechtert.

In (b) sind die Differenzen der Messungen zueinander dargestellt. Als Referenzwert wurde die Kurve der fünften Messung verwendet. Die Linien unterscheiden sich bei höheren Frequenzen lediglich um einige $(\text{mA/m})/\sqrt{\text{Hz}}$.

Abb. 5.22 (c) zeigt den Einfluss der unterschiedlich langen Leiterbahnen zu den GMR-Elementen. Dargestellt sind hier zur besseren Veranschaulichung die Differenzen der Spektren zwischen Element 8 des Arrays und einigen ausgewählten Sensorelementen (Element 3, 6, 9, 12 und 16). Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Elemente geringfügig unterscheiden, jedoch ist eine Tendenz der unterschiedlichen Längen der Leiterbahnen aus den Rauschspektren nicht zu erkennen. Die Rauschspektren zeigen vielmehr ein ähnliches Verhalten.

Die Abb. 5.22 (d) stellt die Rauschspektren verschiedener Sensorarrays dar. Verglichen werden hier die Sensorarrays vom Typ 2A, 8er Array mit einer Elementlänge von $dL = 390 \mu\text{m}$ und einer Basislänge

$BL = 250 \mu\text{m}$, Typ 4A und 4B mit $dL = 190 \mu\text{m}$ und $BL = 250 \mu\text{m}$, aber unterschiedlichen Breiten der GMR-Bahnen ($0,6 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m}$), und Typ 10A (Länge der Sensorelemente $dL = 50 \mu\text{m}$ und Mäander mit vier parallelen Leiterbahnen, woraus sich eine Gesamtlänge der GMR-Elemente von etwa $220 \mu\text{m}$ ergibt).

Deutlich ist bei allen Spektren der 50 Hz-peak zu erkennen. Unterschiedlich wirken sich zudem die Breiten und GMR-Längen auf das Rauschen aus. So ist das Spektrum von Typ 4A und 10A annähernd gleich. Diese Sensoren unterscheiden sich nur marginal in der Länge ihrer GMR-Elemente. Nimmt die Länge der Elemente (Typ 2A) jedoch zu (im vorliegenden Fall wird sie fast verdoppelt), so wird auch das Rauschen vergrößert. Die doppelte Länge der Elemente führt annähernd zu einer Verdopplung der Widerstände. Für Typ 4B ist das Rauschen im Bereich von wenigen Hz bis zu einigen kHz leicht verstärkt im Vergleich zu den Sensoren des Typs A. Allerdings kommt hierfür nicht die Zunahme des Widerstands in Betracht. Dieser wird aufgrund der verbreiterten GMR-Leiterbahnen von $0,6 \mu\text{m}$ auf $3 \mu\text{m}$ kleiner. Er entspricht mit $1,27 \text{ k}\Omega$ nur etwa einem Viertel des Widerstands von Typ A ($6 \text{ k}\Omega$). Hier kann sich wegen der geringeren Formanisotropie magnetisches Rauschen durch Domänen in der aktiven Fläche stärker auswirken [183]. Daraus ergibt sich, dass die Sensoren vom Typ B zwar wesentlich empfindlicher als Arrays vom Typ A sind, jedoch auch ein höheres Rauschen besitzen.

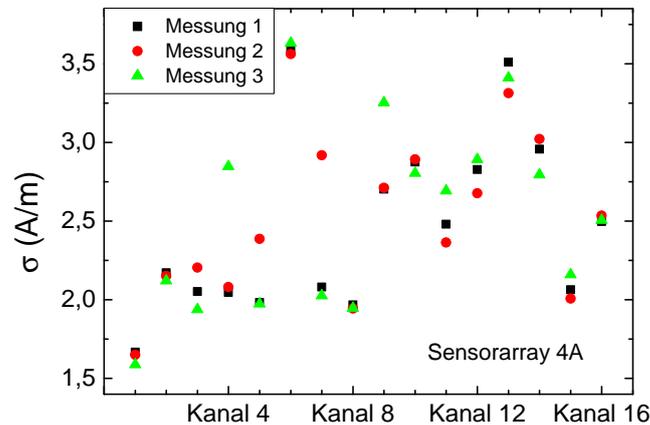


Abbildung 5.23: DC-Rauschen der einzelnen Kanäle für den Sensor 4A.

In Abb. 5.23 ist für die Elemente eines Sensorarrays des Typs 4A die Standardabweichung σ als Rauschen dargestellt. Hierbei wurden über einen Zeitraum von einer Minute 23.245 Messpunkte aufgenommen und daraus die Standardabweichung ermittelt. Diese Messungen wurden für jedes der 16 Sensorelemente dreimal durchgeführt. Das Rauschen schwankt hier je nach Element zwischen $1,6$ bis $3,5 \text{ A/m}$. Hier ist allerdings nicht nur das Rauschen der GMR-Elemente enthalten, sondern vielmehr auch die Einflüsse der nachgeschalteten Elektronik wie Vorverstärker und Multiplexer. Für eine Messung kleinster Fehler liegen die simulierten Werte unterhalb der ermittelten Rauschwerte. Das anregende Magnetfeld kann, falls nötig, erhöht werden, wodurch auch die Streufeldamplituden von Mikrorissen zunehmen. Eine weitere Verbesserung lässt sich durch einen verringerten Liftoff erreichen. Zusätzlich lassen sich Messpunkte mitteln bzw. es können nachgeschaltet Filter eingesetzt werden. Auch während der Datenanalyse sind zur besseren Signalausbeute Tiefpassfilterungen der Messdaten möglich.

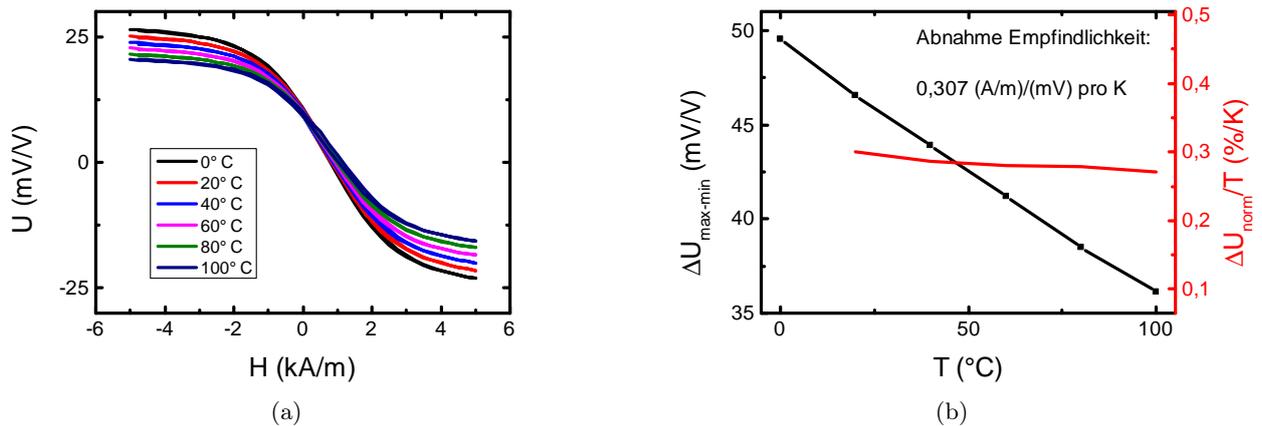


Abbildung 5.24: (a) Temperaturabhängiger Verlauf der Hysterese der GMR-Sensoren in einem Temperaturbereich von 0 bis 100°C. (b) Spannung zwischen Maximum und Minimum als Funktion der Temperatur. Die rote Kurve gibt die prozentuale Abnahme des GMR-Effektes in Abhängigkeit von der Temperatur wieder.

5.3.3 Temperaturabhängigkeit der GMR-Sensoren

In Abb. 5.24 (a) und (b) ist für die Sensoren in zwei Diagrammen die Abhängigkeit des GMR-Effektes von der Temperatur dargestellt. Der Temperaturbereich variiert hier von 0 bis 100°C. Die hier vorgestellten Messungen wurden von C. Glenske von der *Sensitec GmbH* durchgeführt und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt [175].

Abb. 5.24 (a) zeigt den Einfluss der zunehmenden Temperatur auf die Hysterese Kennlinie der GMR-Sensoren. Aufgetragen ist hier die Spannung der Brücke U in mV/V als Funktion der magnetischen Feldstärke H . Mit zunehmender Temperatur beginnend bei 0°C nimmt der GMR-Effekt ab. Dies zeigt sich an einem Abflachen der Hysterese-Kurve der GMR-Sensoren sowie an einer Abnahme der Spannungen im gesättigten Kennlinienbereich.

In (b) wird die Differenz zwischen den gesättigten Bereichen der Hysterese Kennlinien als Funktion der Temperatur dargestellt. Zusätzlich ist in dem Diagramm die prozentuale Änderung des GMR-Effektes normiert auf den Spannungswert bei 0°C pro Kelvin enthalten (rote Kurve). Die Änderung ist über den betrachteten Temperaturbereich nahezu konstant und liegt bei etwa 0,27-0,29 %/K. Bezogen auf 1 mV Spannungsveränderung aufgrund eines externen Magnetfeldes nimmt die Feldempfindlichkeit zwischen 0°C und 100°C um 0,307 A/m pro K ab.

Die temperaturabhängigen Werte für kommerzielle Sensoren „GF705“ und „GF708“ der *Sensitec GmbH* liegen bei 0,1%/K [184,185]. Diese Werte sind leicht besser als die Werte für die hier betrachteten GMR-Sensoren, allerdings ist auch eine Abnahme des GMR-Widerstandseffektes immer noch sehr gering. Die Temperaturen, bei denen die Sensoren eingesetzt wurden, liegen im Bereich der Raumtemperatur von 20°C. Hier nimmt der GMR mit Bezug auf den für 0°C gemessenen Wert um insgesamt etwa 5% ab. Dies bedeutet natürlich im Vergleich eine Verschlechterung der Feldauflösung, ist aber dennoch für ZfP-Anwendungen ausreichend.

5.4 Messungen mit den angepassten Sensorarrays

Neben der Charakterisierung der Sensoreigenschaften müssen die Sensorarrays hinsichtlich ihres Einsatzes in der ZiF untersucht werden. Hierzu werden im Folgenden Messungen an verschiedenen Probekörpern vorgestellt. Um Streufelder an den Defekten zu erzeugen, müssen im Material Magnetfelder angeregt werden. Hierzu wurden die Probekörper entweder global vor den Messungen aufmagnetisiert oder es wurde lokal ein Magnetfeld durch die in Abb. 7.9 vorgestellte Magnetisierungseinheit am Ort des Sensors angeregt. Testkörper waren die *Rissplatte 1* (siehe Kap. 4), welche in Remanenz geprüft wurde, und Lagerschalenringe, bei denen während der Messung die Magnetfeldanregung lokal erfolgte.

5.4.1 Rissplatte 1

In Kap. 4.2.1 wurde der Probekörper *Rissplatte 1*, eine Platte aus Stahl mit funkenerosiv eingebrachten Nuten verschiedener Tiefen, vorgestellt und untersucht. Für die Untersuchungen mit den Sensorarrays wurde die Platte wiederum vor der eigentlichen Messung in gleicher Richtung aufmagnetisiert. Durch die Aufmagnetisierung und der damit einhergehenden Messung in Remanenz sind bei den Untersuchungen neben den Streufeldern auch die Hintergrundfelder der Platte zu berücksichtigen.

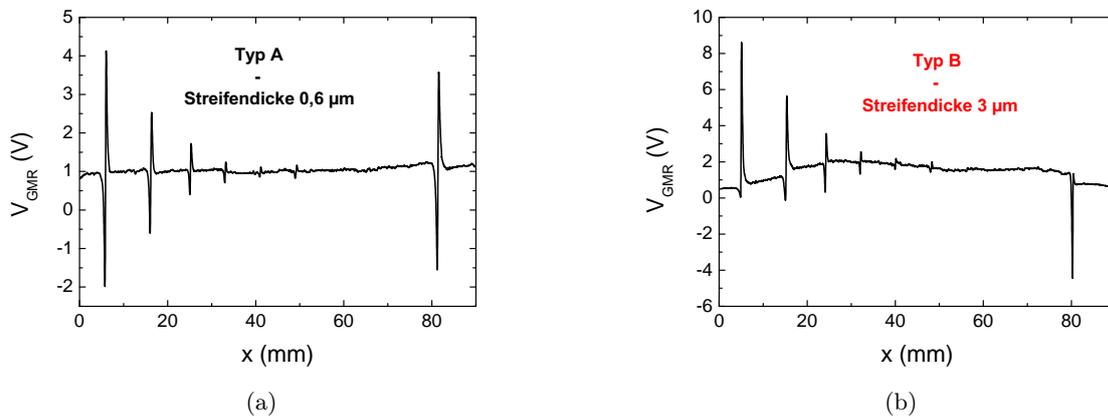


Abbildung 5.25: Streufeldsignale der angepassten Sensoren für (a) Typ A und (b) Typ B. Durch starke Hintergrundfelder sind die Streufeldsignale bei (b) stark asymmetrisch.

In Abb. 5.25 sind zwei Linienscans der *Rissplatte 1* dargestellt. Die Messungen wurden mit Sensoren des Typs 6A (Länge der Elemente $dL = 190 \mu\text{m}$, Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$, Leiterstreifenbreite von $0,6 \mu\text{m}$) und 6B ($dL = 190 \mu\text{m}$, $BL = 250 \mu\text{m}$, Leiterstreifenbreite von $3 \mu\text{m}$) durchgeführt. Da die Platte vor der Messung aufmagnetisiert und somit in Remanenz gemessen wird, entsteht ein starkes Hintergrundfeld, welches durch den Anisotropiefaktor der quaderförmigen Platte generiert wird (siehe 3D-GMR-Messung in Abb. 4.8). In Abb. 5.25 (a) ist die Messung des Typs A und in (b) die von Typ B aufgetragen.

Typ A ist unempfindlicher als Typ B, besitzt aber eine lineare Kennlinie über einen größeren Feldbereich. Hieraus folgt, dass sich die Magnetisierung der „free layer“-Schicht bei Typ B aufgrund der geringeren Formanisotropie schon bei kleinen Magnetfeldstärken vollständig ausrichtet und sich der Arbeitspunkt innerhalb der Hysteresekennlinie somit früher in der Sättigung befindet.

In (a) sind symmetrische Rissignale, wie sie erwartet werden, zu erkennen. Lediglich die beiden an den jeweiligen Enden der Platte eingebrachten Nuten (Positionen $x = 5 \text{ mm}$ und 82 mm) besitzen aufgrund des dort vorherrschenden hohen Hintergrundfeldes in z -Richtung eine Asymmetrie des Feh-

lersignals von 7% bzw. 11%. In (b) jedoch sind die asymmetrischen Signale vor allem an den Enden der Rissplatte viel stärker ausgeprägt. Deren Verläufe kehren sich von einem Ende zum anderen Ende der Platte allmählich um. So ist das Minimum der ersten Nut kaum zu erkennen, das Maximum allerdings sehr stark ausgeprägt. Die letzte Nut wiederum besitzt ein ausgeprägtes Minimum, wobei das Maximum im Vergleich sehr klein ist. Bei den Nuten dazwischen nimmt die Asymmetrie ab und ist im mittleren Bereich symmetrisch. Hier wirken sich die unterschiedlichen Hysteresen der beiden Sensortypen sowie die z -Komponente der Magnetfeldstärke an den Enden der Rissplatte aus.

Kennlinie und Arbeitspunkt aufgrund Hintergrundfelder (Hysterese = 0)

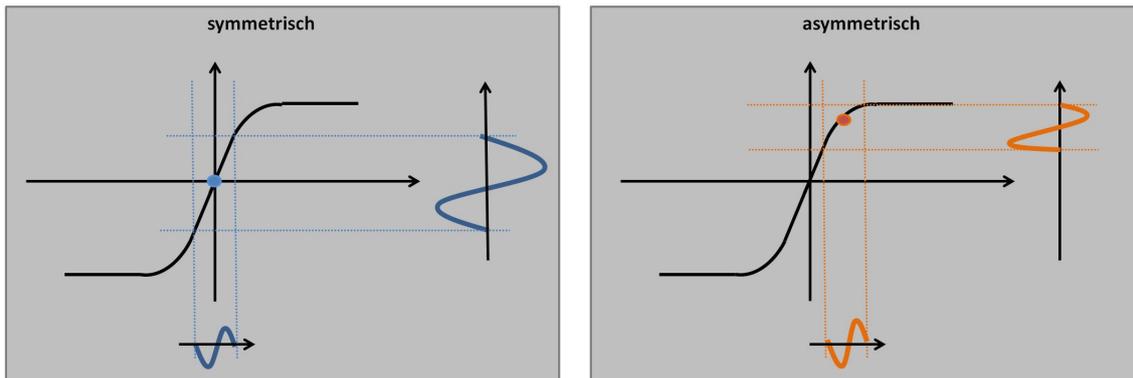


Abbildung 5.26: Auswirkungen der Sensorkennlinie und unterschiedlicher Hintergrundfelder auf das zu erwartende Sensorsignal. Links: Arbeitspunkt liegt im Ursprung der Hysterese (kein Hintergrundfeld). Das symmetrische Streufeld erzeugt ein symmetrisches Sensorsignal. Rechts: Der Arbeitspunkt ist wegen eines Hintergrundfeldes aus dem Ursprung heraus verschoben. Dadurch wird das Sensorsignal bei der Detektion eines symmetrischen Streufeldes asymmetrisch.

Dieser Sachverhalt ist in Abb. 5.26 dargestellt. Da die Kennlinien nicht linear verlaufen, sondern eine für magnetische Materialien typische Hysterese (in der Abbildung ist zur Vereinfachung die Kennlinie ohne Hysterese dargestellt) besitzen, ist nur der um den Ursprung liegende Anteil linear. Für ein Streufeld ohne Hintergrundfelder ergibt sich ein symmetrisches Sensorsignal (siehe Abb. 5.26 links). Nehmen die Hintergrundfelder zu, wird der Arbeitspunkt hin zu den gesättigten Bereichen verschoben. Dadurch kommt es bei einem zu hohen Streufeld bzw. Hintergrundfeld zu asymmetrischen Signalen, da ein Teil der detektierten Felder entlang des nichtlinearen Verlaufs der Sensorkennlinie detektiert wird. Hierdurch ergibt sich, wie im in Abb. 5.26 rechts dargestellten Fall ein asymmetrisches Sensorsignal.

Am Beispiel der Sensoren des Typ B wirkt sich ein Hintergrundfeld viel stärker aus. Deren Kennlinie kann bis zu einem Feld von ± 600 A/m als „linear“ angesehen werden. Danach beginnt der Sättigungsbereich der magnetischen Hystereseurve. Hier ergibt sich ein asymmetrisches Sensorsignal für symmetrische Streufelder. Bei den Typ-A-Sensoren ist das Hintergrundfeld zu gering, um den Arbeitspunkt in den gesättigten Bereich zu verschieben. Der lineare Bereich ist mit etwa ± 2 kA/m groß genug, um asymmetrische Sensorsignale zu verhindern.

Eine Bestimmung des Hintergrundfeldes ist bei einem Gradiometer im Gegensatz zum Magnetometer schwierig. Der nahezu konstante Offset der Messkurve des Sensors A in (a) lässt keine Rückschlüsse auf Hintergrundfelder zu. Bei der Auswahl eines geeigneten Sensors bzw. seiner Empfindlichkeit ist nicht nur die Stärke des Streufeldes der Defekte entscheidend, sondern auch das Hintergrundfeld der Testkörper selbst. Der zielführende Weg ist, soweit dies möglich ist, auf eine globale Magnetisierung zu verzichten und eine lokale Anregung zu verwenden. Allerdings sind auch hier Hintergrundfelder vor allem in der Nähe der Jochpole zu berücksichtigen. Für einen Aufbau mit lokaler Anregung bedeutet

das, dass der Sensor in den Bereich gebracht werden muss, in dem das Hintergrundfeld der Anregungseinheit selbst minimal ist. Im Fall von perfekt symmetrischen Doppel-D-Spulen bzw. eines Jochs ist dies genau im Zentrum zwischen beiden Spulen bzw. Polen der Fall.

Für Sensortyp A sind die Risssignale nahezu symmetrisch. Hieraus kann geschlossen werden, dass das Hintergrundfeld in z -Richtung an den Enden der Platte innerhalb des Bereiches ± 3 kA/m liegen muss, da ab diesen Werten der lineare Bereich der Hystereseckennlinie in den nichtlinearen übergeht (siehe Abbildung 5.21). Im Gegensatz zu Hall-Sensoren, die einen linearen Verlauf der H-V-Kurve besitzen, lassen sich somit GMR-Gradiometer nicht uneingeschränkt einsetzen. Zwischen Typ A und Typ B muss so je nach Anwendung ausgewählt und ein Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Magnetfeldbereich gefunden werden.

Um Hintergrundfelder durch globale Aufmagnetisierung zu vermeiden, sind lokale Anregungseinheiten für die Magnetfelderzeugung, soweit dies möglich ist, einzusetzen. Im folgenden Abschnitt werden mit der in Kap. 7 vorgestellten Anregungseinheit Messungen an Lagerschalenringen beschrieben und untersucht.

5.4.2 Lagerschalenringe

Eine industrielle Anwendung für die angepassten GMR-Sensoren kann z.B. die Untersuchung und Bewertung von Lagerschalenringen mittels einer automatischen Prüfeinrichtung sein. Die hier vorgestellten Messungen sind sowohl an dem bereits beschriebenen Hochpräzisionsmessplatz (Kap. 3) als auch an einem weiteren Prüfstand zur automatisierten Prüfung von Lagerschalenringen (siehe Kap. 8) durchgeführt worden.

Zunächst wird ein Lagerschalenring mit vier Nuten verschiedener Geometrie und Orientierung mit den angepassten Sensoren untersucht. Zusätzlich wurden zwei weitere Ringe mit insgesamt 31 Defekten versehen. Diese werden im Kap. 9 näher betrachtet. Allerdings besitzen diese Ringe Defekte, die wesentlich kleiner sind und somit in diesem Kapitel erwähnt werden sollen.

Lagerschalenring *Ring 1*

In Abb. 5.27 ist ein Flächenscan eines Lagerschalenrings (im Folgenden wird dieser Ring mit *Ring 1* bezeichnet) dargestellt. Der Probekörper *Ring 1* hat einen Durchmesser von 215 mm und besteht aus vollständig durchgehärtetem Saarstahl 100Cr6. Auf seiner Außenfläche befinden sich vier verschiedene Nuten, die funkenerosiv eingebracht wurden. In Tabelle 5.2 sind die Parameter dieser Nuten zusammengefasst. Die nachfolgenden Messungen wurden mit dem Sensor 4A, einem 16er Array mit einer Länge der GMR-Elemente von $dL = 190$ μm , einer Basislänge von $BL = 250$ μm und einer Streifenbreite von $0,6$ μm durchgeführt. Das anregende Magnetfeld im Material wurde über zwei Spulen der lokalen Anregungseinheit erzeugt. An den Spulen mit insgesamt $2 \cdot 100$ Windungen wurde ein Strom mit $I_{\text{Spule}} = 1$ A angelegt. Die Rotationsgeschwindigkeit betrug $v_{\text{Rotation}} = 6$ deg/s ($\approx 11,2$ mm/s).

Nut	Tiefe	Orientierung
1	170 μm	90°
2	70 μm	90°
3	40 μm	90°
4	42 μm	45°

Tabelle 5.2: Auflistung der Parameter der funkenerosiven Nuten im Lagerschalenring *Ring 1*. Die Orientierung ist so gewählt, dass 0° einer Nut in Umlaufrichtung bzw. Scanrichtung entspricht und 90° der senkrecht zur Umlaufrichtung stehenden Nut zugeordnet ist.

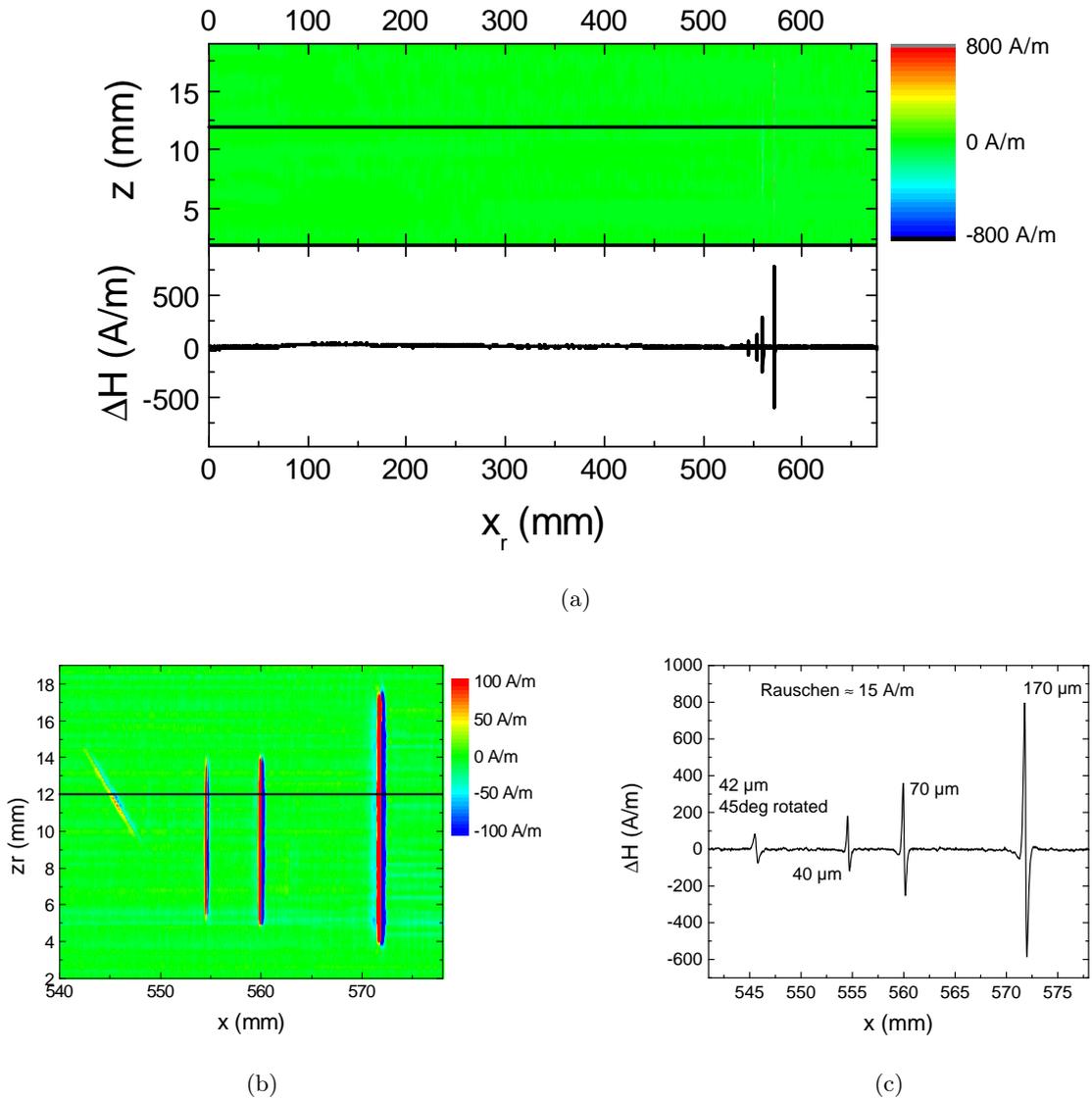


Abbildung 5.27: (a) Flächenscan mit dem GMR-Sensorarray 4A entlang des gesamten Umfangs und auf der Höhe der Fehler des Lagerschalenrings *Ring 1* sowie der Linienscan entlang der Spur $y = 12$ mm. (b) Ausschnitt des Rissbereichs mit angepasster Farbskala. (c) Linienscan des Rissbereichs für $y = 12$ mm.

Defekttiefe	$\Delta H_{z,\max}$	$\Delta H_{z,\min}$	Verhältnis
	[A/m]	[A/m]	
170 μm	795	-585	1 : 0,74
70 μm	359	-252	1 : 0,70
40 μm	180	-118	1 : 0,66
42 μm (45°)	83	-76	1 : 0,92

Tabelle 5.3: Maximales und minimales Streufeld der einzelnen Nuten sowie das Verhältnis der Extremwerte.

Abb. 5.27 (a) oben stellt die Messung der Außenfläche für den Bereich mit den künstlichen Defekten als Falschfarbenplot dar. Die Farbskala variiert innerhalb eines Bereiches von $\Delta H_z = \pm 800$ A/m. Hintergrundfelder sind aufgrund des Einsatzes von Gradiometern kaum zu erkennen. Unterhalb des Falschfarbenplots ist die Magnetfelddifferenz ΔH_z eines Linienscans als Funktion des Umfangs in mm dargestellt. Die Defekte sind hier als scharfe Signalverläufe innerhalb des Linienscans zu erkennen.

In Abb. 5.27 (b) und (c) ist der Bereich der Defekte dargestellt. Die Farbskala des Falschfarbenplots wurde hier auf ± 100 A/m begrenzt, damit auch die Nuten mit einer geringeren Tiefe noch zu erkennen sind. Dabei sind alle vier Nuten deutlich vom magnetischen Hintergrund (Rauschen etwa 15 A/m) zu unterscheiden. Dieses Ergebnis ist für den Einsatz in der ZfP wichtig, da hier die automatisierte Detektion von Defekten oft mittels eines Schwellwertverfahrens erfolgt. Ein zu hohes Hintergrundfeld bzw. zu hohes Rauschen kann dazu führen, dass Defekte von einer Auswertesoftware nicht als diese erkannt und somit nicht protokolliert werden. Zudem kann bei zu geringer Detektionsschwelle die Falschalarmrate sehr stark zunehmen.

Neben den Nuten mit einem senkrechten Verlauf zur Scanrichtung ist ebenfalls der 45°-Defekt vom Hintergrund zu unterscheiden. Dieser Defekt stellt bei einer Streuflussmessung mit zwei 90° zueinander stehenden anregenden Magnetfeldern den Grenzfall dar. Hier ist das anliegende Magnetfeld aufgrund der Orientierung auf $H_{45^\circ} = H_{\text{angelegt}} \cdot \sin 45^\circ = \sqrt{2}/2 H_{\text{angelegt}}$ abgefallen, wodurch sich das Streufeld ähnlich stark abschwächt.

Die Extremwerte der Streufeldsignale für die verschiedenen Nuten sowie deren Verhältnis sind in der Tabelle 5.3 aufgelistet. Das Hintergrundrauschen ist mit 15 A/m im Vergleich zu den Amplituden der Defektstreufelder gering. Für das kleinste detektierte Streufeld, das der 42 μm -tiefen und 45°-rotierten Nut, ist der Signal-Rausch-Abstand der gesamten Streufeldamplitude besser als 20 dB. Diese Werte sind im Vergleich mit den Magnetometer-Messungen des *Rings 1* in Kap. 4 deutlich besser. Dadurch sollte es auch möglich sein, noch kleinere Defekte mit den angepassten Sensoren zu detektieren.

In Abbildung 5.28 ist nochmals die Nut mit einer Tiefe von 170 μm in einem größeren Ausschnitt dargestellt. Das ermittelte Rissignal setzt sich aus verschiedenen Extrema zusammen. Das erste Extremum, im vorliegenden Fall ein lokales Minimum, besitzt eine Magnetfeldstärke von $-54,3$ A/m. Das nachfolgende globale Maximum des Rissfeldes hat einen Wert von 795 A/m und das globale Minimum -585 A/m. Das Verhältnis der Beträge der Extremwerte ist 1:14,7:10,8 und besitzt somit einen asymmetrischen Verlauf. Die Gründe für diese Asymmetrie können sein: zu hohes Hintergrundfeld der lokalen Anregungseinheit, wodurch der Arbeitspunkt des Sensors auf der Kennlinie verschoben wird, die Hysterese des Sensors selbst oder die Bewegung des Jochs.

Eine Verschiebung des Arbeitspunkts durch Hintergrundfelder führt dazu, dass sich Anteile eines zu großen Rissignals im nichtlinearen Hysteresebereich des Sensors befinden. Abb. 5.29 zeigt eine Messung, bei der eine Kalibrierspule eingesetzt wurde, um am Ort des Sensors ein Rissignal ($-1 \text{ kA/m} \leq H_{\text{Riss}} \leq 1 \text{ kA/m}$) sowie ein Hintergrundfeld ($H_{\text{Hintergrund}} = 2 \text{ kA/m}$) zu simulieren.

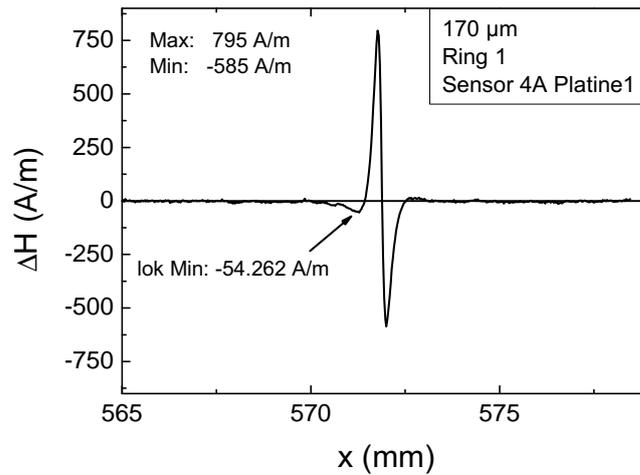


Abbildung 5.28: Nut mit einer Tiefe von $170\ \mu\text{m}$. Zusätzlich zu den Streufeldextrema tritt zu Beginn der Anzeige ein weiteres Minimum mit $\Delta H_z = -54,3\ \text{A/m}$ auf. Die Streufeldanzeige besitzt zudem einen asymmetrischen Verlauf.

Die linke Kurve (schwarz) stellt das Spannungssignal des GMR-Sensors (für diese Untersuchung wurde das Magnetometer GF792 verwendet) beim Durchlaufen des Magnetfeldes dar. Durch die Hysterese des Sensors in diesem Bereich (rote Kurve in der Mitte) wird das gemessene Spannungssignal stark asymmetrisch (unterschiedliche Extremwerte). Die grüne Kurve rechts gibt das um die Hysterese des Sensors korrigierte Signal (symmetrischer Verlauf) an. Ein Gradiometer lässt sich allerdings nicht wie ein Magnetometer in Abb. 5.29 korrigieren, da nicht bekannt ist, wo sich genau auf der Hysteresekehlinie die beiden aktiven Flächen befinden. Zudem ist dieser Verlauf richtungsunabhängig. Das bedeutet im vorliegenden Fall, dass unabhängig davon, von welcher Seite der Defekt bei gleicher Anregungsrichtung des internen Magnetfeldes (somit auch gleicher Hintergrund am Ort des Sensors) abgescannt wird, hier das Maximum immer kleiner sein wird als das Minimum. Wie später weiter unten beschrieben, ist das für die GMR-Messung mit dem Joch nicht der Fall. Die Streuflussmessung ist richtungsabhängig. Ein zu starkes Hintergrundfeld kann eine Ursache für die Asymmetrie sein, ist jedoch hier nicht dafür verantwortlich.

Die vorangegangene Messung erklärt des Weiteren auch nicht die Existenz des ersten lokalen Extremwertes (bei der Streufeldmessung der $170\ \mu\text{m}$ -tiefen Nut war dies ein Minimum), welcher bei einer globalen Aufmagnetisierung nicht auftritt (siehe hierzu weiter oben Messung der *Rissplatte 1*, Abb. 5.25 (a)). Eine Möglichkeit hierfür kann eine Verkippung des Gradiometers sein. In Abb. 5.30 sind Simulationsergebnisse für den Fall dargestellt, dass das Gradiometer in Bezug auf die z -Achse verkippt ist. 0° entspricht hierbei der ungekippten Stellung des Sensors. Für die Simulation der Signalantwort wurden die Parameter des zur vorherigen Messung eingesetzten Sensors 4A verwendet ($dL = 190\ \mu\text{m}$, $BL = 250\ \mu\text{m}$ und Leiterstreifenbreite $1\ \mu\text{m}$). Für die Simulation betrug die Verkippung des Sensors 0° , 10° sowie 20° . Für die Berechnung der Signalantwort (Spannungswerte des Sensors) wurde ein nichtlinearer Ansatz gewählt und die Kennlinie der Sensorelemente aus Abb. 5.21 verwendet. Beide Elemente des Gradiometers wurden einzeln berechnet und danach die Differenz zwischen beiden, wie sie bei einer Messung mit einem Gradiometer vorliegt, gebildet. Aufgetragen ist deshalb die mögliche Spannung eines Gradiometers (hier in w.E.). Die Hysterese und somit die magnetische Vorgeschichte des Sensors selbst wird dabei nicht berücksichtigt.

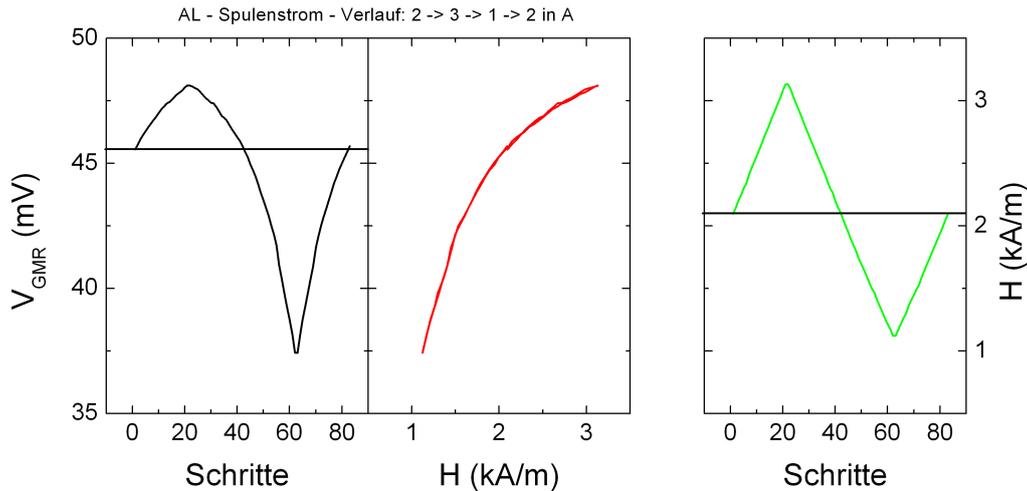


Abbildung 5.29: Simulation asymmetrischer Sensorsignale aufgrund der Sensorkennlinie. Für die Erzeugung der Felder wurde eine Kalibrierspule eingesetzt. Das Streufeld liegt zwischen ± 1 kA/m, das konstante Hintergrundfeld beträgt 2 kA/m. Die schwarze Kurve stellt den Verlauf der Sensorsignale dar, als würde über einen Defekt gescannt. Die rote Kurve ist die zu den Feldwerten dazugehörige Übertragungsfunktion. Die grüne Kurve gibt den um die nicht-lineare Hysterese korrigierten Streufeldverlauf an (gleich zu dem Fall, als existiere kein Hintergrundfeld).

Abbildung 5.30 (a) zeigt die Simulationsergebnisse für fünf verschiedene Hintergrundfelder, die durch das Joch selbst bzw. eine nicht perfekt ausgerichtete Sensorstellung zwischen den beiden Polen hervorgerufen werden können, sowie drei verschiedene Sensorstellungen zur Normalen. Zudem wurde im Fall der cyan-farbenen Kurve das Streufeld, ausgehend von einem Riss, verdoppelt ($2 \times H_z$). Wie oben bereits beschrieben, kann die Asymmetrie im Signal durch ein höheres Hintergrundfeld zunehmen. Die Verkippung des Sensors wirkt sich ebenfalls asymmetrisch auf die Signalantwort aus, wie in Abb. 5.30 (b) genauer dargestellt. In (c) ist ein Ausschnitt von (b) für das erste lokale Extremum gezeigt. Eine Verkippung des Sensors führt zu einem größeren Wert für dieses Extremum. Dies ist durch den Pfeil in (c) skizziert. Allerdings ist der simulierte Wert etwa um den Faktor 5 geringer im Vergleich zu den Werten bei den Messungen. Wiederum ist auch hier der Effekt richtungsunabhängig und kann somit nicht für die Asymmetrie bzw. nur zu einem sehr kleinen Teil verantwortlich sein. Eine mögliche Verkippung des Sensors während der Messung lag zudem unterhalb von 10° .

Als Letztes in Bezug auf die Asymmetrie kommt die Bewegung des Jochs und deren Auswirkung in Betracht. Abb. 5.31 zeigt hierfür vier Messungen mit dem Sensor 4A am *Ring 1*. Dabei wurde zwischen den Messungen die Rotationsrichtung und die Richtung des angelegten Magnetfeldes gedreht. Die schwarze Kurve entspricht einer Rotation in positiver Richtung und einem angelegten Feld in positiver Richtung, dargestellt durch die Pfeile im Diagramm. Die rote Kurve besitzt die gleiche Feldrichtung, aber eine umgedrehte Rotationsrichtung; bei grün war H negativ und $v_{\text{Rotation}} = -6$ deg/s und für blau H negativ und $v_{\text{Rotation}} = 6$ deg/s. In Tabelle 5.4 sind die Amplituden der einzelnen Kurven sowie das Verhältnis der drei Extremwerte zueinander zusammengefasst.

Die Verhältnisse variieren kaum für den Fall, dass die Rotationsrichtung umgekehrt wird. Für den Fall, dass das angelegte Magnetfeld umgedreht wird, sind die Verhältnisse der Extremwerte leicht unterschiedlich. Die unterschiedlichen Extremwerte für unterschiedliche Magnetfeldrichtungen können mit einem internen Magnetfeld, einer Restfeldmagnetisierung, innerhalb des Ringes erklärt werden. Dieser Ring wurde bei früheren Messungen, als keine lokale Magnetisierungseinheit vorhanden war, aufmagnetisiert. Die Ringgeometrie lässt eine vollständige Entmagnetisierung nicht zu.

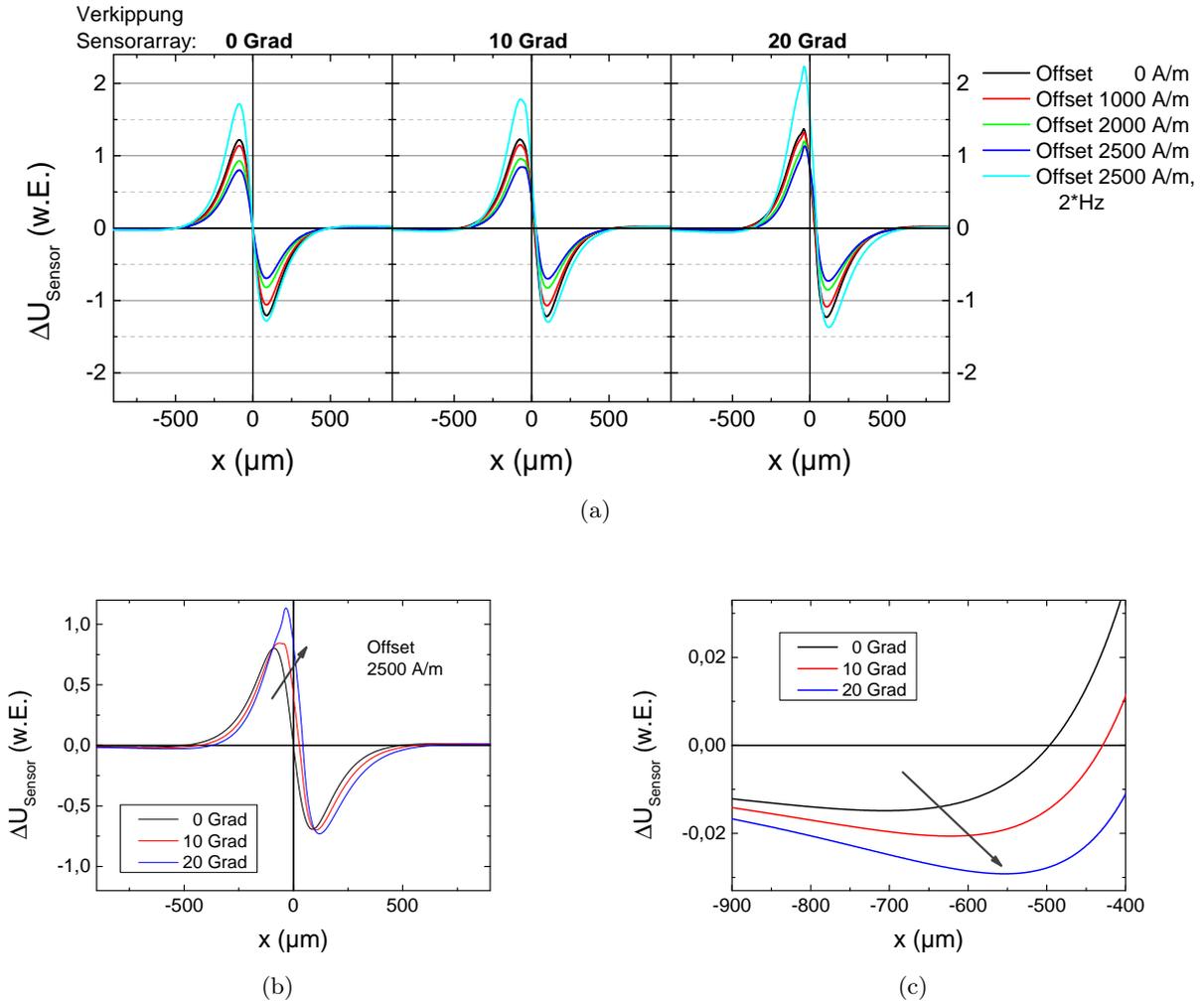


Abbildung 5.30: (a) Simulation der Sensorsignale verschiedener Sensorverkipnungen. Zudem wurde der Offset (das Hintergrundfeld am Ort des Sensors) variiert. Die cyan-farbene Kurve gibt das Verhalten des Sensors für einen Offset sowie einem doppelt so hohen Streufeld ($2H_z$) im Vergleich zu den anderen Simulationen wieder. (b) Simulationsergebnisse für einen Offset von 2.500 A/m für alle drei Verkipnungen. (c) Ausschnitt des Bereichs des lokalen Minimums für die Ergebnisse aus (b).

Für den Fall, dass die angelegte Magnetfeldrichtung gleich bleibt, aber die Rotationsrichtung umgekehrt wird, ergibt sich ein punktsymmetrisches Verhalten (abgesehen von den unterschiedlichen Amplituden). Dieses Verhalten weist darauf hin, dass ein Hintergrundfeld, welches den Arbeitspunkt auf der GMR-Kennlinie verschiebt, nicht der Grund für die Asymmetrie sein kann. Hier müsste sich die Asymmetrie immer gleich auswirken, d.h. im vorliegenden Fall müsste das Maximum den größten Wert einnehmen. Wahrscheinlicher für die Asymmetrie sind Effekte, die durch die Bewegung und die nichtlinearen, magnetischen Materialeigenschaften des Ringes hervorgerufen werden.

In der Literatur lassen sich verschiedene Fälle finden, bei denen in Messungen wie auch in Simulationen Jochanregungen und asymmetrische Signalformen Gegenstand der Forschung waren. Mandayam *et al.* [186] bzw. Park *et al.* [187] zeigten auf, wie aufgrund hoher Geschwindigkeiten die Signalformen bei einer Jochanwendung zunehmend einen asymmetrischen Verlauf erhielten. Auch Zhiye *et al.* [188] sowie Li *et al.* [189, 190] modellierten die Signalantwort aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten in einer Simulation. Durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit wurden die Signale zunehmend

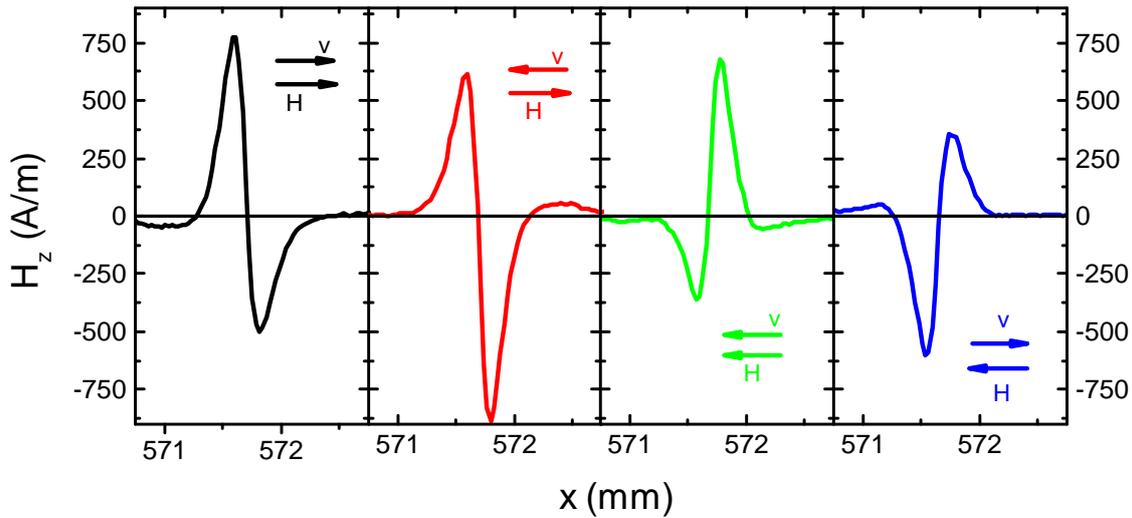


Abbildung 5.31: Richtungsabhängige Messungen zur Asymmetrie. Schwarze Kurve: Bewegung und Feld in positiver x -Richtung (symbolisiert durch die Pfeile im Diagramm). Rote Kurve: Bewegung negativ und Feld positiv. Grüne Kurve: Beide in negativer Richtung. Blaue Kurve: Bewegung positiv, Feld negativ.

Kurve	Rotationsrichtung	Feldrichtung	lokales Extremum (A/m)	globale Extremwerte (A/m)	Verhältnis
schwarz	+	+	-48	776; -498	1 : 0,64 : 0,06
rot	-	+	55	-888; 616	1 : 0,69 : 0,06
grün	-	-	-56	679; -361	1 : 0,53 : 0,08
blau	+	-	49	-602; 352	1 : 0,58 : 0,08

Tabelle 5.4: Auflistung der Streufeldwerte in Abhängigkeit von der Magnetfeldrichtung und der Rotationsrichtung.

asymmetrischer. Dies wurde bei allen auf eine zusätzliche Anregung von Wirbelströmen aufgrund der Bewegung zurückgeführt.

Auf diesen Ergebnissen aufbauend, wurden während dieser Arbeit Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Allerdings ergab sich, dass es sich bei den asymmetrischen Signalen im Fall dieser Arbeit nicht um Geschwindigkeitseffekte und somit nicht um Wirbelstromeffekte handelte. Bei sehr kleinen Rotationsgeschwindigkeiten kleiner 1 mm/s wurden in ähnlicher Weise asymmetrische Signale gefunden. Somit ist hier der Asymmetrieeffekt unabhängig von den Geschwindigkeiten. Wirbelströme aufgrund zunehmender Geschwindigkeit hatten kaum einen Einfluss. Die Herkunft der asymmetrischen Signalform konnte während dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden.

Frequenzanalyse der Streufeldsignale

Um zusätzlich ein Gefühl für die Frequenzanteile eines Risssignals zu bekommen, wurde für Streufeldsignale der einzelnen Nuten eine FFT (Fast Fourier Transformation) durchgeführt. Die Messung hierfür erfolgte bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 6 deg/s. Die aufgezeichneten Signale wurden hier allerdings, um eine FFT durchführen zu können, im Zeitbereich betrachtet. D.h., die Schritte in

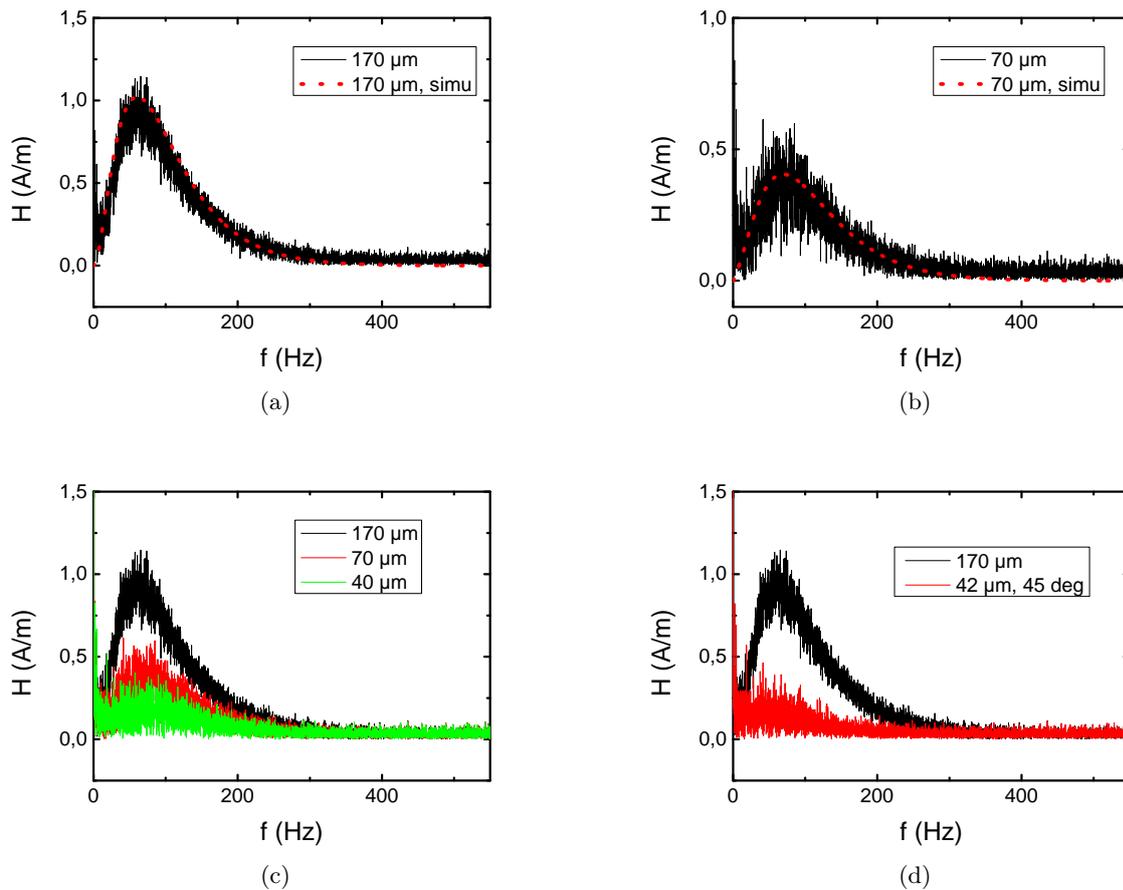


Abbildung 5.32: (a) FFT des Streufeldsignals des 170 μm tiefen Defektes (schwarze Kurve) sowie für die Simulation des Streufeldes (rote Kurve; gestrichelt). (b) ähnlich zu (a) für den 70 μm tiefen Defekt. (c) Vergleich der FFT-Kurven für die Defekte mit einer Tiefe von 170 μm (schwarz), 70 μm (rot) und 40 μm (grün). (d) FFT der 170 μm tiefen Nut und zum Vergleich der um 45° gedrehten Nut mit einer Tiefe von 42 μm .

x -Richtung wurden den entsprechenden Zeitschritten zugeordnet. In Abb. 5.32 sind die Signale in ihre einzelnen Frequenzanteile aufgespalten dargestellt.

Die Rissignale selbst haben eine „zeitliche Ausdehnung“ von etwa 200 ms. Die FFT des 170 μm tiefen Defektes ist in Abb. 5.32 (a) für eine Messung (schwarze Kurve) bzw. eine Simulation (rote Kurve) des Streufeldes dargestellt. Es ergeben sich sowohl für die Messung als auch für die Simulation Frequenzanteile von bis zu 400 Hz. Bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit sind Frequenzanteile von über 400 Hz im Defektsignal enthalten. Zudem ist in den Frequenzanteilen ein Maximum bei $f = 60$ Hz zu erkennen. Für den Defekt mit einer Tiefe von 70 μm ergibt sich bis auf die verringerte Signalamplitude das gleiche Verhalten. Das Maximum liegt auch hier im Bereich von 60 Hz (ebenso für die 40 μm tiefe Nut, siehe Abb. 5.32). Die Signalformen ändern sich hier nicht (die Frequenzanteile bleiben gleich), nur die Amplitude wird durch die Tiefe beeinflusst.

Wird zusätzlich das Signal der 45° gedrehten Nut betrachtet, ist in Abb. 5.32 (d) zu erkennen, wie das Maximum im Frequenzspektrum hin zu kleineren Frequenzen verschoben wird. Hier wirkt sich das im Zeitbereich verbreiterte Signal, verursacht durch die Drehung der Nut, aus. Das Maximum ist hier bei $f \approx 50$ Hz zu finden. Neben den Defekten ist im Frequenzspektrum noch das Rauschen enthalten. Dies

macht sich am starken Anstieg des Signals bei sehr kleinen Frequenzen bemerkbar. Dieses Verhalten ist bei der Simulation nicht zu erkennen, da hier in den Simulationsdaten keine Rauschanteile enthalten sind.

Die vorgestellte Frequenzanalyse betrifft immer die eingesetzte, nachgeschaltete Elektronik. Eine Filterung sowie der Einsatz von Verstärkern darf Streufeldfrequenzanteile nicht unterdrücken, da ansonsten Information verloren geht oder Signale zumindest verzerrt werden. Bei den gegenwärtig eingesetzten Messgeschwindigkeiten sind die Streufeldsignale allerdings noch weit von einer Dämpfung aufgrund der Grenzfrequenzen der verwendeten Elektronikbauteile entfernt (\gg kHz). Wird allerdings eine viel höhere Geschwindigkeit verwendet, müssen je nach Baustein die Frequenzanteile am Streufeldsignal gegebenenfalls mit berücksichtigt werden.

Messungenauigkeit

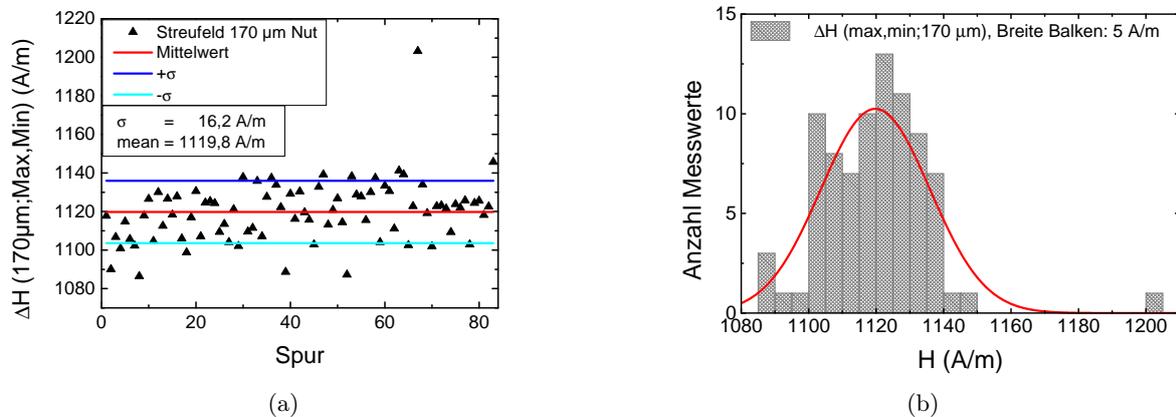


Abbildung 5.33: (a) Differenz der Extremwerte des Streufeldsignals $\Delta H(\max, \min)$ der $170 \mu\text{m}$ tiefen Nut für insgesamt 83 Spuren. Die rote Linie gibt den Mittelwert aller Signale an, die blaue und die cyan-farbene Linie entsprechen der Standardabweichung σ . (b) Histogramm der in (a) dargestellten Messwerte. Zusätzlich ist als rote Kurve die ermittelte Normalverteilung aus den Messwerten dem Diagramm hinzugefügt.

Zusätzlich zur Analyse der detektierten Streufeldsignale muss untersucht werden, wie sich diese Signale bei aufeinanderfolgenden Messungen verhalten. Dies ist in Abb. 5.33 dargestellt. In (a) ist die Differenz zwischen Maximum und Minimum des Streufeldsignals der $170 \mu\text{m}$ tiefen Nut für insgesamt 83 Messungen abgebildet. Die verschiedenen Messungen wurden immer an derselben Stelle am Ring durchgeführt, d.h. der Messaufbau wurde nicht verändert, es erfolgte keine Anpassung. Eingesetzt wurde der GMR-Sensor 12A. Die Anregung des internen Magnetfeldes erfolgte über eine lokale Magnetisierungseinheit (siehe Kap. 7).

Neben den Streufeldsignalen (schwarze Dreiecke) sind im Diagramm drei Linien eingezeichnet. Sie entsprechen dem Mittelwert aller Streufeldamplituden (rote Linie) sowie der Standardabweichung σ (blaue und cyan-farbene Linien). Die Standardabweichung beträgt etwa 1,4% zum mittleren Streufeldsignal. Daraus folgt, dass 66% aller Messwerte innerhalb dieses Bereiches liegen. Die größte Abweichung beträgt 7,4%. Eine Abweichung von weniger als 2% für den Großteil der Messungen liegt in der Größenordnung des Hintergrundrauschens von $36 \text{ mV} \equiv 19,0 \text{ A/m}$, welches bezogen auf den Mittelwert aller Streufeldamplituden etwa 1,7% entspricht. Hieraus ergibt sich eine sehr gute Wiederholgenauigkeit der GMR-Streufeldmessungen. Zusätzlich ist in (b) das Histogramm der Messungen aus (a) dargestellt.

Um zu überprüfen, ob eine Normalverteilung vorliegt, wurde der Shapiro-Wilk-Test angewandt. Wird der Ausreißer in der 67. Messung berücksichtigt, ergibt der Test, dass keine Normalverteilung vorliegt. Wird dieser Messpunkt außer Acht gelassen, kann eine Normalverteilung nicht zurückgewiesen werden. In diesem Fall gibt die rote Kurve eine aus den Messwerten ermittelte Normalverteilung wieder. Da allerdings im Rückblick nicht mehr nachvollzogen werden kann, ob z.B. während der 67. Messung der Messaufbau gestört wurde, ist die Normalverteilung im vorliegenden Fall zurückzuweisen.

Ringe POD

Für weitere Untersuchungen bezüglich der Auffindwahrscheinlichkeit und somit der Einsetzbarkeit von GMR-Sensoren im Bereich der ZfP wurden zwei weitere Lagerschalenringe mit 15 bzw. 16 Nuten verschiedener Tiefen hergestellt. Die Nuten wurden wiederum mit geringer Intensität funkenerosiv in die Ringe eingebracht. Diese Ringe und die ermittelten Streufelder werden im Kap. 9 vorgestellt. Allerdings lassen sich anhand dieser Ringe schon erste Aussagen bezüglich Streufeldern von Nuten mit geringen Tiefen von z.B. 11 μm treffen.

In Abb. 5.34 sind die Messergebnisse einer 11 μm tiefen Nut dargestellt. Die Messung wurde mit dem Sensorarray 12A ($dL = 25 \mu\text{m}$, Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$ und Liftoff $LO \approx 150 \mu\text{m}$) durchgeführt. In (a) ist der Flächenscan der Nut in einer Graustufendarstellung abgebildet. Deutlich zeichnet sich in dem Diagramm das Streufeld der Nut ab. Allerdings kann hier eine automatische Fehlerdetektion nicht durchgeführt werden. Das Rauschen liegt in der gleichen Größenordnung wie die Streufeldamplituden. Dies ist an dem Linienscan in (b) für die Spur $y = 1 \text{ mm}$ (roter Strich in (a)) zu erkennen. Aus diesem Linienscan kann das Defektsignal (gekennzeichnet durch die schwarze Box) nicht vom Rauschen unterschieden werden, auch wenn der typische Signalverlauf (hier Minimum, dann Maximum) schon zu erkennen ist.

Um ein höheres SNR zu erhalten, lassen sich die Messdaten pro x -Wert aufsummieren. In Abb. 5.34 (c) ist das Ergebnis als Linienvverlauf dargestellt. Durch die Mittelung über insgesamt 51 Spuren nimmt das Rauschen außerhalb des Streufeldbereiches ab. Das Streufeldsignal selbst zeichnet sich deutlicher und mit einem gesteigerten SNR ab. Dies führt dazu, dass für eine Rissdetektion sehr kleiner Defekte ein Schwellwertverfahren nicht geeignet ist bzw. je Ortskoordinate mehr Messdaten aufgenommen und eine anschließende Mittelung durchgeführt werden sollte. Daraus resultiert allerdings eine erhöhte Messzeit. Für eine weitere Betrachtung der neuen Sensoren sei abschließend auf die Kap. 6 und Kap. 9 verwiesen.

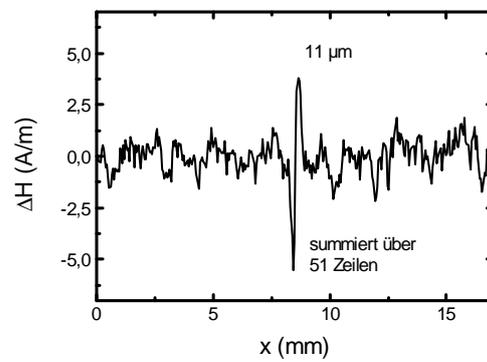
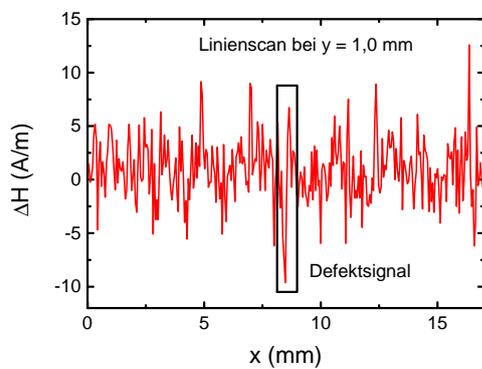
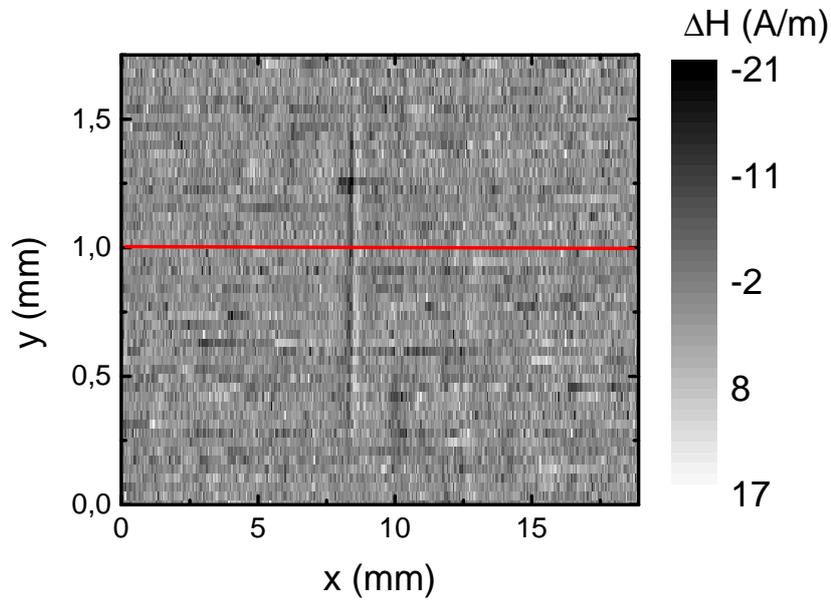


Abbildung 5.34: (a) Flächenscan und (b) Linienscan der 11 μm tiefen Nut. (c) Summation der einzelnen Linien des Flächenscans (a) in y -Richtung.

6 Vergleich GMR-Sensorarrays mit anderen ZfP-Verfahren

Kap. 3 stellte GMR-Sensoren für Nahfeldapplikationen mit unterschiedlichen Eigenschaften vor - Größe und Anordnung der empfindlichen Elemente, Hysteresekennlinien sowie Magnetometer- bzw. Gradiometersensoren. Des Weiteren behandelte Kap. 4 Messergebnisse, die mit diesen Sensoren gewonnen wurden. Aufbauend auf die gesammelten Erfahrungen mit den Nahfeld-GMR-Sensoren thematisierte das Kap. 5 die Auswahl für die ZfP geeigneter GMR-Sensorgeometrien (Gradiometer vs. Magnetometer) sowie eine Optimierung der empfindlichen Elemente der GMR-Sensoren. Insbesondere die räumliche Ausdehnung der empfindlichen Elemente und deren Auswirkung auf das detektierte Streufeldsignal wurde näher beleuchtet, um Sensorarrays zu entwickeln und an die Anforderungen der elektromagnetischen ZfP anzupassen. Eine abschließende Analyse und Charakterisierung dieser ZfP-angepassten Sensorarrays sowie ihr Prüf- und Messeinsatz sind ebenfalls in Kap. 5 aufgeführt.

Neben den sensortypischen Eigenschaften dieser angepassten Sensoren, wie z.B. Rauschen, Empfindlichkeit usw., ist eine detailliertere Auswertung bezüglich ihres Einsatzes innerhalb der ZfP durchzuführen. Hierfür sind vergleichende Messungen mit gängigen ZfP-Methoden (Magnetpulver-, Wirbelstromprüfung und Thermografie) nötig. Im folgenden Kapitel werden hierzu Prüfkörper¹ mit Defekten, welche sich in Tiefe, Abstand und Klaffung unterscheiden, untersucht und eine Analyse der verschiedenen Methoden durchgeführt.

Für die Magnetpulver- und die GMR-Streufstromprüfung muss der Probekörper magnetisiert werden. Im Fall der GMR-Streufstromprüfung handelt es sich um eine remanente Magnetisierung, wie sie schon bei den Voruntersuchungen im Kap. 4 eingesetzt wurde. Somit waren auch hier Hintergrundfelder der Probekörper in den Messdaten gegebenenfalls zu berücksichtigen. Eine lokale Magnetisierungseinheit, wie sie in Kap. 7 vorgestellt wird, konnte nicht eingesetzt werden, da verschiedenste GMR-Sensoren für den Vergleich verwendet wurden und diese nicht alle in die lokale Anregungseinheit integriert werden konnten. Dadurch wird gewährleistet, dass für alle GMR-Sensoren die gleichen Bedingungen vorliegen und so miteinander vergleichbar sind.

Die Thermografiemessungen wurden von Dr. Ziegler und Dr. Myrach an der BAM durchgeführt. Die hier vorgestellten Thermografieergebnisse entstanden im Rahmen eines Projektes zur „Erarbeitung einer Richtlinie zur zerstörungsfreien Risserkennung mit lokal angeregter Thermografie“, welche mir für meine Arbeit zur Verfügung gestellt wurden. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse zur lokal angeregten Thermografie ist in [181, 191] zu finden.

Das Kapitel gliedert sich in eine Vorstellung der einzelnen Prüfmethode hinsichtlich Prüfaufbau und Durchführung, der Probekörper sowie der Messungen. Daran anschließend wird in Bezug auf Auflösungsvermögen und Einsatz eine Gesamtbewertung der Methoden vorgenommen.

¹Infrage kommen nur ferromagnetische Prüfkörper.

6.1 Prüfmethoden

Magnetpulverprüfung

Die Magnetpulverprüfung wurde gemäß DIN EN ISO 9934 [192] durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgte eine Reinigung der Probekörper, um störende und das Ergebnis verfälschende Schmutzpartikel auf der Oberfläche zu entfernen. Im folgenden Prüfschritt wurde der Prüfkörper in eine Magnetisierungsrichtung eingespannt, welche ein statisches Magnetfeld unterschiedlicher Stärke erzeugen kann. Der Norm zur Magnetpulverprüfung entsprechend lag eine Magnetfeldstärke tangential zur Oberfläche der Prüfkörper von $H_t \geq 2 \text{ kA/m}$ an. Dies wurde während des Magnetisierungsprozesses mit Hilfe einer Hall-Sonde überprüft und protokolliert. Zusätzlich wurde der Prüfkörper so eingespannt, dass zum Zeitpunkt des Magnetisierungsprozesses das Prüfmittel aufgebracht werden und gleichzeitig durch ein schräges Einspannen ablaufen konnte. Dadurch wurde sichergestellt, dass kein überschüssiges Prüfmittel an der Oberfläche zurückbleibt und das Prüfergebn verfälscht. Zum Einsatz kam das schwarze Prüfmittel FerroFLUX[®] 690.2 von *Tiede* mit einer Partikelgröße von etwa $0,2 \mu\text{m}$ [193]. Vor der Prüfung musste eine weiße Kreidestaubschicht auf die Probekörper aufgebracht werden. Nach der Trocknung des Lösungsmittels erfolgte eine digitale Aufnahme der Magnetpulveranzeigen.

Aktive Thermografie

Die hier vorgestellten Thermografiemessungen wurden an der BAM durchgeführt. Die aktive Laserthermografie ist im Vergleich zur Magnetpulver- und Wirbelstromprüfung eine relativ neue Prüfmethode, welche selbst noch nicht großflächig zum Einsatz kommt. Üblicherweise wird zur homogenen Anregung eine Blitzlichtlampe eingesetzt. Dadurch wird ein vertikaler Wärmeeintrag erzielt, weshalb vertikale Oberflächendefekte nicht detektiert werden können. Hierfür ist eine lokale Anregung nötig, damit eine sphärische Wärmeleitung erzeugt wird, wodurch bei vertikalen Defekten ein besserer Kontrast erzielt und schließlich eine Detektion von Oberflächendefekten ermöglicht wird. Zudem besitzt die aktive Laserthermografie für die ZfP ausgezeichnete Eigenschaften in Bezug auf die Ortsauflösung und die Detektionsgrenze hinsichtlich der Defekttiefe (siehe hierzu weiter unten), weshalb sie hervorragend für einen Vergleich mit der GMR-Streulichtprüfung geeignet ist.

Der Aufbau ist in Abb. 6.1 gezeigt. Dabei wurde ein Diodenlaser (Wellenlänge des ausgestrahlten Lichts $\lambda_{\text{Laser}} = 910 \text{ nm}$) zur lokal angeregten Thermografie eingesetzt. Dieser Laser besitzt eine maximale Ausgangsleistung von 93 W im Dauerstrichbetrieb. Über einen Lichtleiter wird der Laser an eine 2-Achsen-Scanneroptik gekoppelt. Der Fokusbereich kann auf zwei Werte fest eingestellt werden und beträgt 1,3 bzw. 0,6 mm je nach ausgewählter Brennweite. Der Scanner bewegt den Laserspot entlang einer vorgegebenen Wegstrecke innerhalb eines begrenzten Prüfbereiches. Hierbei kann die Geschwindigkeit, mit der der Laserspot über die Probenoberfläche verfahren wird, zwischen wenigen mm/s und 10 m/s variiert werden.

Durch den Laser wird thermische Energie in den Prüfkörper eingebracht. Die Wärmestrahlung wird mittels einer InSb-IR-Kamera detektiert (Bildgröße des Chips: $640 \times 512 \text{ Pixel}$; spektrale Empfindlichkeit im MWIR²: $3\text{-}5 \mu\text{m}$). Die Kamera steht mit der Probe in einem festen Bezugssystem. Zusätzlich wird im Strahlengang ein dichroitischer Spiegel eingesetzt, wodurch das von der Probe ausgehende Licht - reflektiertes Laserlicht sowie Infrarot aufgrund der abgestrahlten Wärme - gefiltert wird und lediglich der infrarote Anteil der Strahlung die Kamera erreicht. Der Spiegel ist hoch reflektierend für den Wellenlängenbereich des Diodenlasers. Hierdurch lässt sich die Kamera vor der hochenergetischen Laserstrahlung schützen. Zudem wird die Messung durch das Laserlicht nicht verfälscht.

Ein besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass eine Schwärzung des Probekörpers vermieden werden kann. Bei üblicher Blitzlichtthermografie lässt sich ein ausreichend hoher Wärmeeintrag bei

²MWIR, *englisch*: mid-wave infrared range (mittleres Infrarot)

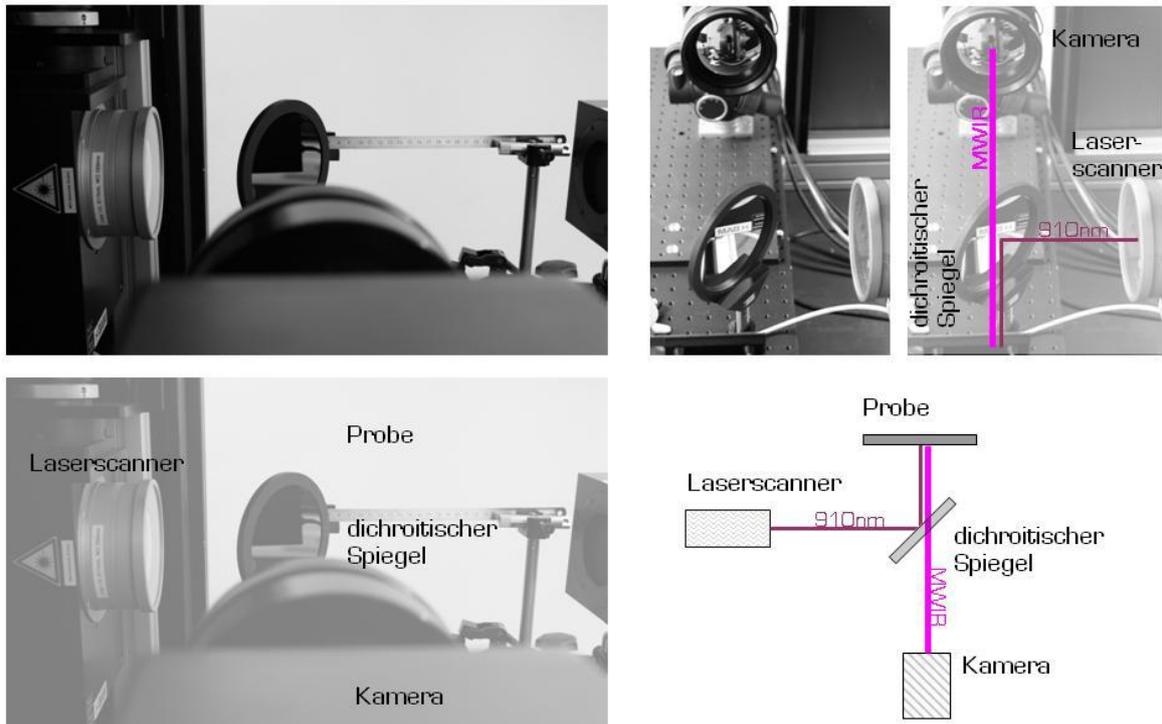


Abbildung 6.1: Aufbau der lokal angeregten Laserthermografie der Arbeitsgruppe Thermografie an der BAM. Im Strahlengang ist ein dichroitischer Spiegel platziert, welcher den Laserstrahl mit der Wellenlänge $\lambda = 910 \text{ nm}$ nahezu spiegelt, jedoch für die Wärmestrahlung der Probe im Infrarotbereich durchlässig ist. Ein Schema des Strahlengangs ist rechts unten abgebildet [194].

glatten, glänzenden Stahloberflächen nur mit einer Schwärzung, zum Beispiel durch ein Graphitspray, erreichen. Durch die Schwärzung wird die Absorption gesteigert.

Wirbelstromprüfung

Die Wirbelstromprüfungen wurden ebenfalls an der BAM durchgeführt. Hierzu erfolgte die Messung an einem Wirbelstromprüfstand, mit dem eine Fläche abgerastert werden kann. Für den nachfolgenden Vergleich wurden zwei verschiedene Wirbelstromsonden verwendet. Diese unterscheiden sich in der Anordnung der Empfängerspulen. Dabei handelt es sich zum Einen um eine kompensierte Absolutsonde und zum Anderen um eine Differenzsonde (richtungsabhängige Messung eines Magnetfeldgradienten ähnlich dem Gradiometer GMR7).

Die Absolutsonde A 05 (eine an der BAM gefertigte Wirbelstromsonde) besteht aus einem Stiftkern, auf dem die Sende- und die Empfängerspule gewickelt sind. *Absolut* bezieht sich darauf, dass die in der Empfängerspule induzierte Spannung als *Absolutwert* gemessen wird. Zusätzlich ist diese Wirbelstromsonde nicht richtungsabhängig. Die das Wechselfeld erzeugende Sendespule besitzt einen Durchmesser von 0,5 - 0,7 mm sowie insgesamt 15 Windungen. Die Empfängerspule (ein System aus zwei Spulen) wurde auf die Sendespule gewickelt. Der Durchmesser beträgt etwa 0,7 - 1,1 mm. Die Anzahl der Windungen des Empfangssystems beträgt $N = 2 \times 15$.

Bei der Differenzsonde handelt es sich um die Wirbelstromsonde „KDS 2-2“ [195] der *Rohmann GmbH*. Dieses Differenzsystem besteht aus insgesamt drei Spulen - einer Erregerspule und zwei transformatorisch geschalteten Differenzspulen mit Ferritkern. Der typische Frequenzbereich dieser Sonde beträgt 500 kHz bis 8 MHz. Der aktive Messbereich (sprich die Wirkbreite des Spulensystems) liegt

nach Datenblatt etwa bei 1,5 mm. Eine weitere detaillierte Beschreibung der Spulengeometrie sowie der Spuleneigenschaften sind dem Datenblatt nicht zu entnehmen.

Um die Daten auslesen zu können, wurde für beide Sonden das Wirbelstromgerät ELOTEST (*Rohmann GmbH*) eingesetzt. Bei diesem Gerät werden alle für die Messung nötigen Parameter wie Prüffrequenz und Phase eingestellt. Zusätzlich kann die Phase, wie es bei einer Wirbelstromprüfung üblich ist, rotiert werden, um eine Unterscheidung zwischen Rissignal und Liftoff im X- und Y-Kanal (Real- bzw. Imaginärteil der Impedanzebene) zu ermöglichen. Auch lassen sich verschiedene Verstärkungsstufen einstellen sowie eine Kompensation der Prüfsonde durchführen. Aufgezeichnet werden der X- und der Y-Kanal.

GMR-Streuf Flussprüfung

Für einen Vergleich mit anderen Prüfmethode n wurden ZfP-angepasste Sensorarrays des Typs 4A und 12A (Kap. 5) sowie das laterale Gradiometer GMR7 (Kap. 3) eingesetzt. Für den Probekörper *Kreuznut* (Absatz 6.3.4) wurden zusätzlich Messungen mit dem experimentellen „punktförmigen“ GMR-Sensor Typ 14 (GMR-Elementlänge $dL = 10 \mu\text{m}$) durchgeführt. Als dazwischengeschaltete Elektronik zur Verstärkung der Sensorsignale wurde die in Kap. 3 vorgestellte Verstärkerbox eingesetzt. Die Versorgungsspannung betrug 5 V und die Verstärkung 40 bzw. 46 dB. Der Abstand zwischen Sensor und Oberfläche der Prüfobjekte lag bei etwa 50 μm , sodass die Distanz der empfindlichen Elemente im Bereich von $100 \pm 20 \mu\text{m}$ lag. Die Einstellung des Liftoffs erfolgte mit Hilfe von Messfühlern.

In der Literatur sind für Streufelduntersuchungen zumeist Sensoren der Firma *NVE* eingesetzt worden. Allerdings lassen sich nur Streufeldmessungen für Defekte mit Dimensionen im mm-Bereich finden [15, 16, 65]. Um auch einen Vergleich zu diesen Sensoren zu erhalten, sind in diesem Kapitel zusätzliche Messungen mit dem NVE-Sensor vom Typ AB001-02 enthalten [179], welcher wie der GMR7 ein laterales Gradiometer ist.

6.2 Versuchsreihe Rissplatte 1

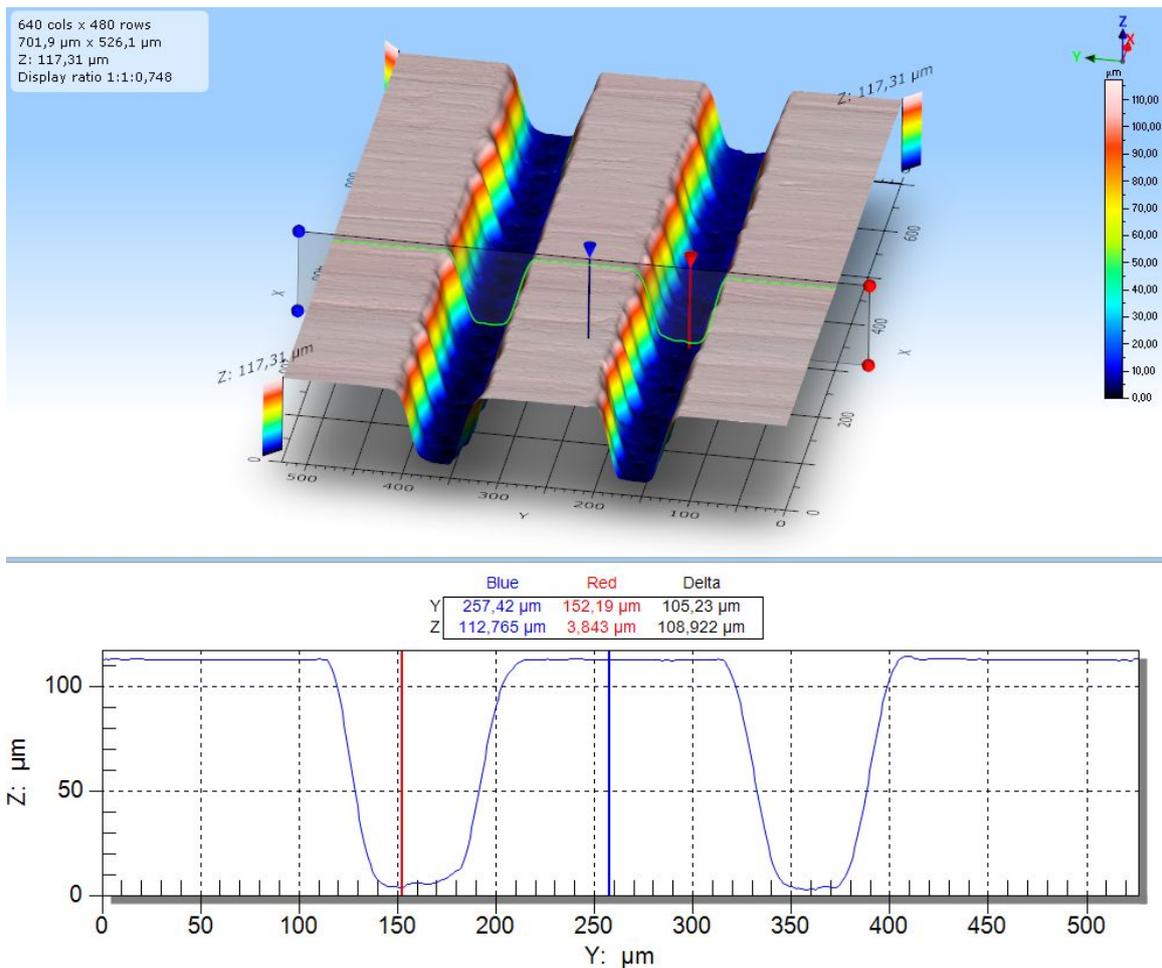


Abbildung 6.2: Profil der Doppelnut des Probekörpers *Rissplatte 1* (Quelle BAM, FB 6.7, [180]).

In Absatz 4.2.1 wurde der Probekörper *Rissplatte 1* vorgestellt (siehe hierzu Abb. 4.2). Dieser Probekörper besitzt künstliche Nuten mit unterschiedlichen Tiefen, beginnend bei 10 μm bis 2240 μm . Die Klaffungen variieren zwischen 81 μm für die 10 μm tiefe Nut und 250 μm im Fall der 850 μm tiefen Nut. Die Längen liegen zwischen 4,8 und 5,7 mm. Er besteht aus ferromagnetischem Baustahl (S235JR+AR, frühere Bezeichnung ST37) und lässt sich mit allen hier betrachteten Prüfmethoden untersuchen.

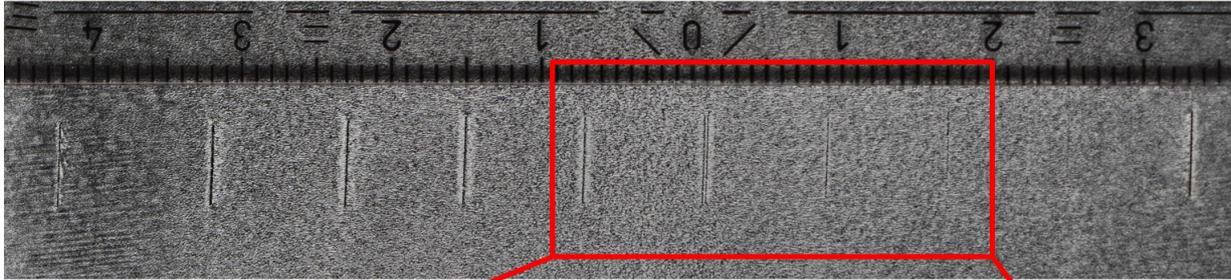
Dieser Probekörper eignet sich dahingehend, einen ersten Anhaltspunkt zu erhalten, inwieweit die Prüfmethoden die Doppelnut örtlich voneinander trennen können. Die Doppelnut (siehe Abb. 6.2) besteht aus zwei 110 μm tiefen Nuten, die parallel zueinander in einem Abstand von ≈ 200 μm in den Probekörper eingebracht wurden. Zudem lässt sich die Auswirkung der unterschiedlichen Nuttiefen auf die Signalamplituden untersuchen.

6.2.1 Magnetpulverprüfung - MT

In Abb. 6.3 sind Aufnahmen der Magnetpulverprüfung der *Rissplatte 1* dargestellt. Fast alle in den Probekörper eingebrachten Nuten, insbesondere auch die 30 μm tiefe Nut, sind zu erkennen und die

Längen werden gut wiedergegeben. Die 10 μm tiefe Nut ist allerdings nicht sichtbar. Anhand der Breite der Magnetpulveranzeige ist eine Tiefenaussage trotz der verbreiterten Anzeigen in Abhängigkeit von der Tiefe nicht möglich. Solche verbreiterten Anzeigen können bei unbekanntem Rissanzeigen auch von einer vergrößerten Klaffung stammen. Eine Auswertung der Rissparameter Tiefe und Klaffung ist bei dem Magnetpulververfahren nicht möglich. Es dient lediglich dazu, sehr kleine Oberflächenfehler sichtbar zu machen. Für eine Parameterabschätzung ist es nötig, andere Verfahren anzuwenden, bei denen durch Messungen physikalischer Größen wie des Magnetfeldes oder der thermischen Leitfähigkeit bzw. Emissivität ein Zusammenhang zwischen Rissgröße und Messwert hergestellt werden kann.

(a)



(b)

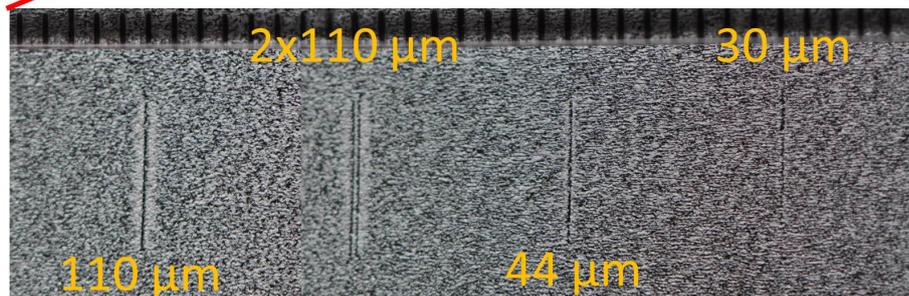


Abbildung 6.3: Magnetpulverprüfung der *Rissplatte 1*. In (a) ist der Bereich aller Nuten dargestellt. (b) zeigt einen Ausschnitt der Nuten mit einer Tiefe von 30 μm , 44 μm , 110 μm und die Doppelnut $2 \times 110 \mu\text{m}$.

In Abb. 6.3 (b) ist ein vergrößerter Ausschnitt der Magnetpulverprüfung für die Defekte mit einer Tiefe von 30 μm und 44 μm , der Doppelnut mit einer Tiefe von 110 μm sowie dem Defekt mit ebenfalls einer Tiefe von 110 μm gezeigt. Das örtliche Auflösungsvermögen des schwarzen Magnetpulvers ist fein genug, um die Doppelnut in ihren Einzelnuten deutlich voneinander trennen zu können. Diese Methode gewährleistet eine empfindliche Prüfung, und die geringe Größe der magnetischen Partikel ermöglicht eine hohe Ortsauflösung.

6.2.2 Thermografie - TT

Die dargestellten Thermografieaufnahmen wurden mittels lokaler Thermografie mit einem Laser als Anregungsquelle erzeugt. In Abb. 6.4 ist das Thermografieergebnis für den Probekörper *Rissplatte 1* gezeigt. Hierbei wurde der Diodenlaser senkrecht zur Nutausrichtung in x -Richtung verfahren. Zeilenweise mit einem Zeilenabstand von ungefähr 1 mm erfolgte so die Aufnahme eines Flächenscans. Der

Laserspot selbst hatte eine Größe von etwa 1,3 mm. Die Thermogramme wurden mit einer Infrarotkamera aufgenommen und nach dem Auswertalgorithmus von Schlichting [81] für die nachfolgende Betrachtung verarbeitet.

Abgebildet sind in Abb. 6.4 (a) drei Flächenscans als Graustufendarstellungen der detektierten Intensität. Der detektierte Rissbereich der *Rissplatte 1* erstreckt sich von der Nut mit einer Tiefe von 10 μm ($x \approx 5$ mm) bis zur 1780 μm tiefen Nut ($x \approx 75$ mm). Die drei Abbildungen unterscheiden sich in einer unterschiedlichen Laser-Scangeschwindigkeit v_{Laser} bei gleichbleibender Laserleistung von insgesamt 93 W. Das bedeutet, dass der Laserspot unterschiedlich schnell über die Oberfläche bewegt wurde und somit die deponierte Energie in der Probekörperoberfläche unterschiedlich hoch war. Die Lasergeschwindigkeit des oberen Flächenscans in Abb. 6.4 (a) betrug $v_{\text{Laser}} = 100$ mm/s gefolgt von $v_{\text{Laser}} = 1000$ mm/s für die mittlere und $v_{\text{Laser}} = 10000$ mm/s für die untere Abbildung. Die Kameraauflösung lag bei 160 μm pro Pixel.

Durch eine geringere Lasergeschwindigkeit lassen sich auch die Nuten mit der geringsten Tiefe detektieren. Bei höheren Geschwindigkeiten von 10 m/s, gleichbedeutend mit einer niedrigeren deponierten Energie, sind nur Nuten mit Tiefen von mindestens 200 μm in ihrer gesamten Länge sicher auffindbar. Nuten mit geringerer Tiefe lassen sich bei hohen Geschwindigkeiten zwar noch detektieren, allerdings wird nicht die volle Länge der Nuten abgebildet. Dadurch war eine Risslängenabschätzung der Nuten mit geringer Tiefe mit der lokalen Laserthermografie nicht mehr möglich. Zusätzlich verringert sich das SNR bei geringerer Energie.

In Abb. 6.4 (b) sind Schnitte in x -Richtung der in Abb. 6.4 (a) gezeigten Flächenscans dargestellt. Aufgetragen sind die Intensitäten in Abhängigkeit von der Position x für die drei verschiedenen Lasergeschwindigkeiten. Dabei ist eine starke Abnahme des SNR mit zunehmender Lasergeschwindigkeit zu erkennen. So lässt sich im unteren Diagramm ($v_{\text{Laser}} = 10000$ mm/s) die 110 μm tiefe Nut ($x = 38$ mm, rechts der Anzeige der Doppelnut) noch deutlich vom Untergrund unterscheiden. Die 44 μm tiefe Nut ($x = 22$ mm, links von der Doppelnut) hingegen ist vom Rauschen nur noch mit einem geringen SNR von 1,8 zu unterscheiden. Mit abnehmender Lasergeschwindigkeit (gleichbedeutend mit einer höheren Energie) lässt sich auch die kleinste in den Probekörper eingebrachte Nut von 10 μm nachweisen. Für die 44 μm tiefe Nut sind die entsprechenden SNR-Werte bei $\text{SNR} = 17,5$ für $v_{\text{Laser}} = 1000$ mm/s (mittleres Diagramm in Abb. 6.4 (b)) bzw. $\text{SNR} = 54,5$ für $v_{\text{Laser}} = 100$ mm/s (oberes Diagramm in (b)). Die Signalbreite, in diesem Fall die Distanz zwischen Start- und Endpunkt des Signals, beträgt für alle drei Verfahrensgeschwindigkeiten v_{Laser} bei $\Delta x(44 \mu\text{m}) \approx 480 \mu\text{m}$ (≈ 4 Pixel).

Neben der Risserkennung sowie der Längenabschätzung ist ein Hinweis auf die Tiefenkorrelation der Signalamplituden von Interesse. Jedoch ist den Diagrammen zu entnehmen, dass eine Tiefenabschätzung abhängig von der Signalamplitude bei dieser Messreihe nicht möglich ist. In allen drei Linienschnitten ist die Amplitude der Doppelnut am größten. Viel tiefere Nuten hingegen besitzen eine zum Teil erheblich kleinere Signalamplitude. Im oberen und mittleren Linienschnitt ($v_{\text{Laser}} = 100$ mm/s bzw. $v_{\text{Laser}} = 1000$ mm/s) ist die Amplitude der 44 μm tiefen Nut größer ausgebildet als bei den 110 bzw. 210 μm tiefen Nuten. Auch ist eine Sättigung zu erkennen, die sich bei noch tieferen Nuten einstellt. So sind die beiden Signale der 850 und 1780 μm tiefen Nuten nicht voneinander zu unterscheiden. Im unteren Diagramm korreliert die Signalamplitude in keinsten Weise mit dem Defektparameter Tiefe. Eine sichere Tiefenaussage ist in diesem Fall nicht möglich.

Die Doppelnut (größter Peak bei 29 mm) lässt sich in diesen Graphen nicht voneinander trennen (der Abstand zwischen den Nutmitten beträgt etwa 200 μm , siehe Abb. 6.2). Dies liegt an der verwendeten Kameraauflösung von 160 μm pro Pixel. Wird die Auflösung der Kamera mit optischen Instrumenten verbessert, wird eine Verbesserung der Ortsauflösung der Prüfmethode insgesamt erreicht. Abb. 6.5 stellt die Ergebnisse mit einer Kameraauflösung von 35 μm pro Pixel für zwei unterschiedliche Scanner-geschwindigkeiten in x -Richtung dar ($v_{\text{L}} = 0,1$ m/s obere und $v_{\text{L}} = 1$ m/s untere Abbildung in (a)). In (b) sind Linienschnitte abgebildet. In (c) ist die Doppelnut als Ausschnitt der $v_{\text{L}} = 0,1$ m/s-Messung

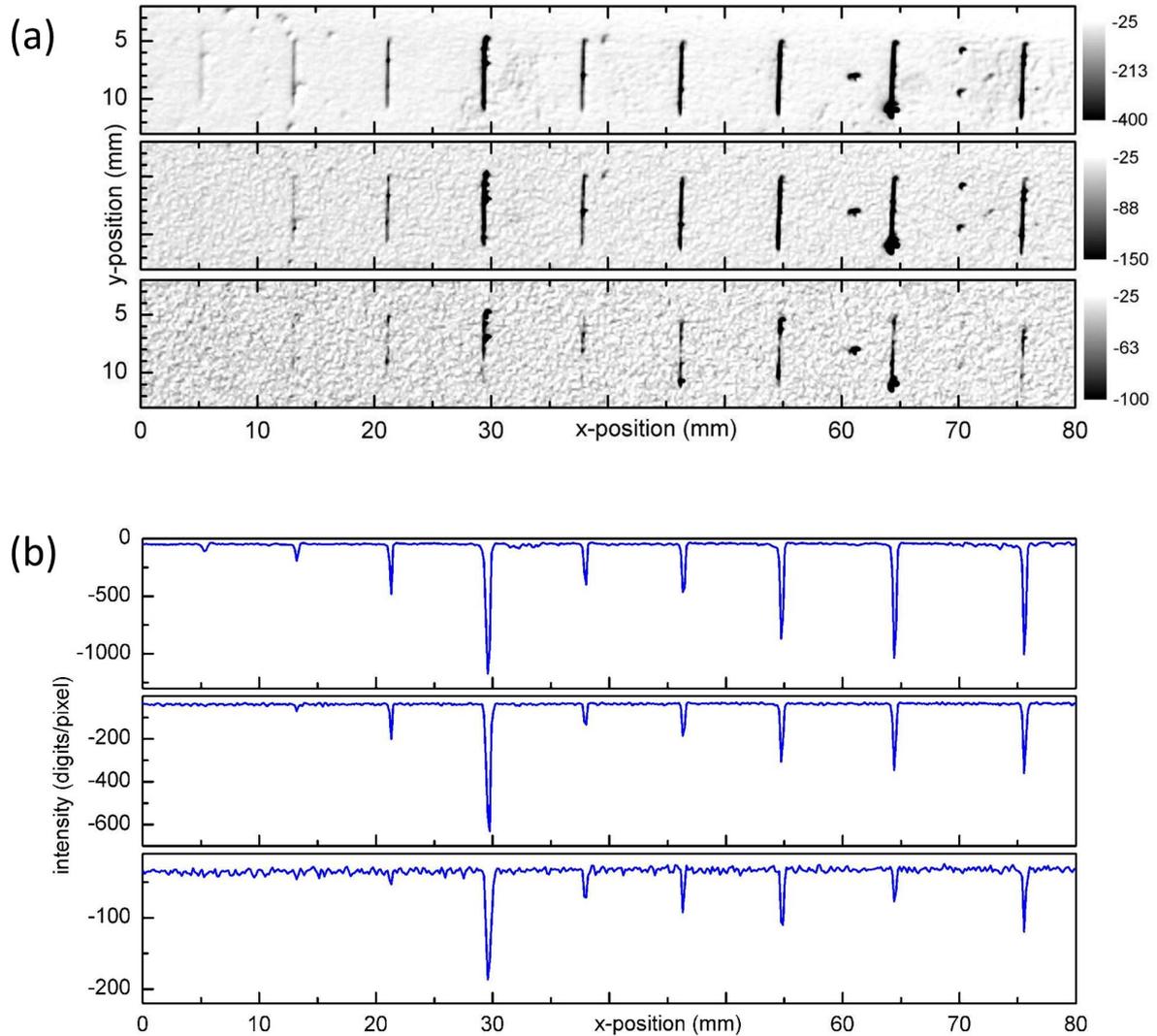


Abbildung 6.4: (a) Thermogramme des Probekörpers *Rissplatte 1* als Graustufendarstellung beginnend bei der Nut $10\ \mu\text{m}$ bis zur Nut mit einer Tiefe von $1780\ \mu\text{m}$ (Nut mit einer Tiefe von $2240\ \mu\text{m}$ fehlt in den Abbildungen). Spurweise Linienscans in x -Richtung mit einer Spurbreite von $1\ \text{mm}$. Die Laserleistung betrug $93\ \text{W}$, die Kameraauflösung war $160\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$ und der Spot hatte einen Durchmesser von $d_L = 1,3\ \text{mm}$. Die Scangeschwindigkeit, von oben beginnend, betrug $v_L = 100\ \text{mm}/\text{s}$ (oben), $v_L = 1000\ \text{mm}/\text{s}$ (mittleres Diagramm) und $v_L = 10000\ \text{mm}/\text{s}$ (unten). (b) Schnitte der in (a) gezeigten Graustufendarstellungen entlang den Nutmitten [181].

gezeigt. Hier ist deutlich die Trennung der beiden Nuten mit einem Abstand von $110\ \mu\text{m}$ zu erkennen, sodass eine örtliche Auflösung kleiner $110\ \mu\text{m}$ möglich ist. Die Signalbreite liegt in diesem Fall aufgrund der besseren Ortsauflösung bei $\Delta x(2 \times 110\ \mu\text{m}) \approx 175\ \mu\text{m}$. Die beiden Signale der Doppelnut besitzen in (c) ein SNR von 12,9 bzw. 18,3. Zudem nimmt bei dieser Messreihe die Tiefenaussage der Signalamplituden zu. Die $44\ \mu\text{m}$ tiefe Nut ist bei weitem kleiner ausgeprägt als die beiden anderen in den Abbildungen gezeigten Defekte. Die Asymmetrie der Signale wird durch die Verfahrrichtung des Laserspots (hier in positiver x -Richtung) und der dadurch ortsbezogen zu unterschiedlichen Zeiten eingebrachten Energie verursacht. Durch die Bewegung wird eine thermische Nachwirkung erzeugt, die sich an den Flanken der Nuten aufstaut. Zusätzlich kann die direkte Einkopplung und Reflexion des Laserlichts in den Nuten zu unterschiedlich stark ausgeprägten Signalamplituden führen [181].

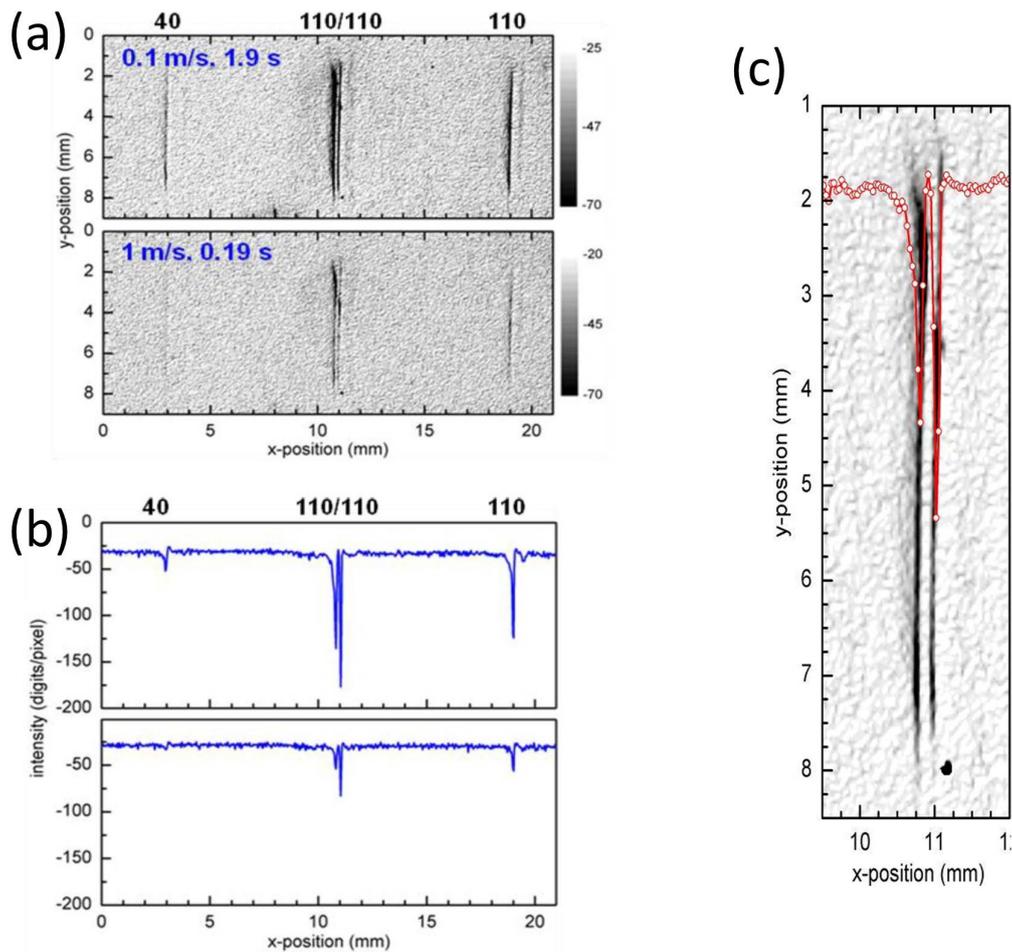


Abbildung 6.5: (a) und (b) Bereich der Doppelnut (Abstand zwischen den Nutmitten ist $200\ \mu\text{m}$) als Graustufenendarstellung und Linienschnitt entlang der Nutmitten bei $y = 5\ \text{mm}$. Hierbei wurde die Lasergeschwindigkeit in x -Richtung verkleinert, wodurch die deponierte Laserleistung ansteigt. In (c) ist die Doppelnut vergrößert für $v_L = 0,1\ \text{m/s}$ zu sehen. Die Kameraauflösung betrug $35\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$ [181].

Die lokal angeregte Laserthermografie ist ein sehr präzises Oberflächenprüfverfahren, mit dem sich auch kleinste Nuten nachweisen lassen. Zusätzlich, beschränkt durch die Auswahl der Optik und der Kamera selbst, lassen sich mit diesem Verfahren eine hohe Ortsauflösung und eine Trennung von Signalen benachbarter Nuten erreichen. Eine Tiefenabschätzung hingegen ist nicht bei jeder Messreihe, abhängig von den gewählten Prüfparametern, möglich.

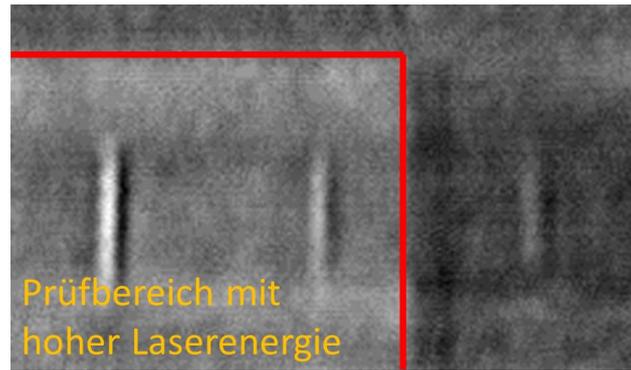


Abbildung 6.6: Ausschnitt der Graustufendarstellung Abb. 6.7 (b) der Differenzsonde KDS 2-2 für die Nuten 2×110 , 44 und $30 \mu\text{m}$. Der scharfe, sich absetzende Bereich in der Graustufendarstellung (durch die rote Linie angedeutet) wird durch einen örtlich begrenzten, zu hohen Wärmeeintrag der Laserthermografie hervorgerufen.

Allerdings muss bei der lokal angeregten Laserthermografie die eingesetzte Laserleistung und die deponierte Energie im Werkstück berücksichtigt werden. Ein zu hoher Energieeintrag kann zu Materialumwandlungen führen. Im folgenden Abschnitt werden Wirbelstrommessungen an der Rissplatte vorgestellt. Diese wurden nach der Thermografieprüfung durchgeführt. Hier sind neben den Defektsignalen Bereiche zu erkennen, bei denen das Wirbelstromsignal einen zusätzlichen Offset besitzt. Ein Ausschnitt der Wirbelstrommessung ist in Abb. 6.6 dargestellt, in der die beiden unterschiedlichen Prüfbereiche aufgrund unterschiedlicher Graustufen gegeneinander abgegrenzt werden können. Während der Thermografieprüfung wurde der Bereich der Nuten mit einer Tiefe von 30 bis $110 \mu\text{m}$ einer höheren Leistung ausgesetzt, wodurch eine viel höhere Energie in die Oberfläche eingebracht wurde (siehe hierzu auch den begrenzten, rechteckigen Bereich in Abb. 6.7 (a) und das Plateau im dazugehörigen Linienscan). Dadurch kann es in diesem Bereich zu einer Materialumwandlung kommen, wodurch sich die Materialeigenschaften verändern. Es ist an dieser Stelle nicht untersucht worden, inwieweit eine Phasenumwandlung im Stahl stattgefunden hat. Allein es wird deutlich, dass sich die elektrische Leitfähigkeit und die magnetischen Eigenschaften geändert haben, was sich bei der Wirbelstrommessung bemerkbar macht (bei den GMR-Messungen ist dieser Bereich nicht zu erkennen). Das bedeutet für den Einsatz der lokal angeregten Thermografie, dass ein zu hoher Energieeintrag, obwohl eine hohe Auflösung kleinster Defekte erreicht wird, zu unerwünschten Nebeneffekten führt. Dies ist bei einem Einsatz der lokal angeregten Thermografie zu berücksichtigen und je nach Material abzuwägen, ob eine hohe Energie nötig ist bzw. ob dieser Effekt sich nur unwesentlich auf sicherheitsrelevante Bauteile und Materialien auswirkt.

6.2.3 Wirbelstromprüfung - ET

Bei der Wirbelstromprüfung wurde die *Rissplatte 1* mit zwei verschiedenen Wirbelstromsonden abgerastert - mit einer Absolut- und einer Differenzsonde. Hierzu wurde die Platte vor der Prüfung mit einer dünnen Folie zum Schutz der Oberfläche beklebt, da die Prüfung im Kontaktmodus durchgeführt wurde. Die Dicke der Folie betrug etwa $100 \mu\text{m}$. Die Sensoren selbst wurden während der Messung spurweise in x -Richtung über die Platte bewegt. Der Abstand zwischen den Spuren betrug $\Delta y = 0,1 \text{ mm}$.

In Abb. 6.7 sind die Ergebnisse der Absolutsonde A05 und der Differenzsonde KDS 2-2 für eine Prüffrequenz von 500 kHz dargestellt. Abgebildet ist der Y-Kanal. Die Bezeichnung Y-Kanal wird in der Wirbelstromprüfung bevorzugt verwendet und entspricht dem imaginären Anteil des Messsi-

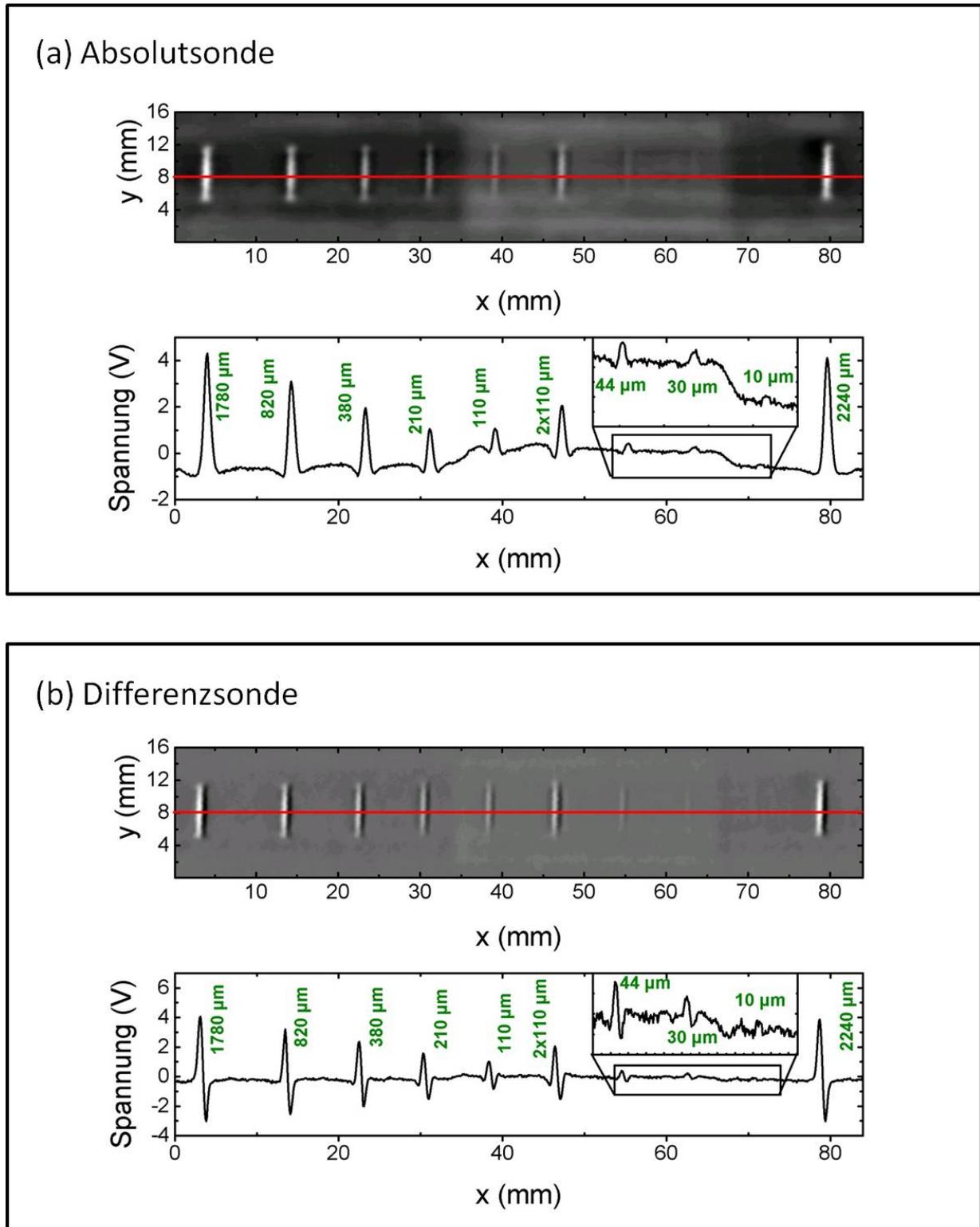


Abbildung 6.7: (a) Graustufendarstellung und Linienscan entlang der Mitte der Nuten in x -Richtung des Y-Kanals einer Wirbelstrommessung mit der Absolutsonde A05 der Rissplatte 1. Die Prüffrequenz betrug 500 kHz. (b) Graustufendarstellung des Y-Kanals einer Wirbelstrommessung mit der Differenzsonde KDS 2-2 der Rissplatte 1. Die Prüffrequenz betrug ebenfalls 500 kHz. Unterhalb der Flächendarstellung befindet sich ein Linienscan des Y-Kanals in Volt entlang der Mitte der Nuten in x -Richtung.

gnals bei einer Impedanzmessung. Vor der Messung wurde eine zusätzliche Drehung der Phase zur Unterscheidung des Liftoffs vom Defektsignal durchgeführt, eine übliche Vorgehensweise in der Wirbelstromprüfung. Dadurch wird erreicht, dass das Defektsignal im vorliegenden Fall nur im Y-Kanal enthalten ist.

In (a) ist der Y-Kanal als Flächenscan in Graustufen und ein Linienscan für die Absolutsonde abgebildet. Der Abstand der Messpunkte beträgt in x - und y -Richtung jeweils 0,1 mm zum benachbarten Messpunkt. Deutlich werden die Defekte bis zu einer Tiefe von 44 μm detektiert. Bei den Defekten mit einer Tiefe von 10 und 30 μm ist eine Interpretation in der dargestellten Graustufendarstellung schwierig.

Im darunter liegenden Linienscan entlang der Nutmitten sowie im dazugehörigen Ausschnitt ist der Peak der 30 μm tiefen Nut mit einem SNR von 3,0 zu erkennen. Die Signalbreite beträgt $\Delta x = 1,8$ mm. Die 44 μm Nut besitzt schon ein SNR von 4,5 sowie eine Signalbreite von $\Delta x = 1,4$ mm. Zusätzlich lässt sich anhand der Amplituden der Messsignale der Einfluss der Nuttiefen feststellen, wobei die Doppelnut aufgrund des geringen Abstands beider Nuten zueinander eine viel größere Signalamplitude erzeugt. Des Weiteren ergeben sich ähnlich große Amplituden für die 1780 μm und 2240 μm tiefen Nuten.

Das Signal der Doppelnut korreliert allerdings nicht direkt mit der Tiefe der Nut. Hier wird die Signalstärke durch die beiden Nuten beeinflusst. Die Signalamplitude liegt in der Größenordnung der 210 μm tiefen Nut. Hier wirkt sich der Effekt der Verdrängung des Wirbelstroms an die Oberfläche aus. Da die Nutflanken ebenfalls Oberflächen darstellen, fließt der Strom an der Nutflanke entlang nach unten ins Material und auf der anderen Flankenseite wieder nach oben. Bei der Doppelnut muss der Strom so zweimal den Weg entlang der Nutflanken nehmen, bevor er sich wieder schließen kann. Dadurch erscheint das Defektsignal in der Größenordnung der 210 μm tiefen Nut. Es ist sogar leicht stärker.

Eine Trennung der Doppelnut ist allerdings nicht möglich. Hier spielt insbesondere die Größe der Spulen eine entscheidende Rolle. Die detektierte Größe ist bei der Wirbelstromprüfung die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses $\Phi = B \cdot A$. Die Fläche A der Spule gibt die Geometrie vor und beeinflusst die Wirkbreite. Die Integration über diese Fläche führt zu einer Mittelung. Die Wirkbreite einer Spule ist größer als der Durchmesser der Spulen selbst. Hierdurch können Fehler mit Abständen kleiner als die Wirkbreite nicht mehr voneinander getrennt werden (Der Abstand der Nuten beträgt etwa 200 μm).

Eine Differenzsonde wurde ebenfalls eingesetzt. Die Prüffrequenz betrug auch hier 500 kHz. In Abb. 6.7 (b) ist der Flächenscan als Graustufendarstellung gezeigt. Ähnlich wie bei der Absolutsonde sind bei dieser Darstellung die Nuten bis zu einer Tiefe von 44 μm zu erkennen. Im dazugehörigen Schnitt unterhalb des Flächenscans in Abb. 6.7 (b) ist ein Linienscan dargestellt. Hier lassen sich zwar bis zu einer Defekttiefe von 44 μm (SNR = 8,7 und $\Delta x = 0,7$ mm) Signalamplituden deutlich vom Untergrund unterscheiden, die Signale der Nuten mit einer Tiefe von 30 μm (SNR = 4,7 und $\Delta x = 0,5$ mm) bzw. 10 μm hingegen sind zwar noch zu erkennen, jedoch ist ein typisches Defektsignal, gerade bei der 10 μm Nut, mit einem lokalen Signalmaximum und einem lokalen Signalminimum hier nicht so stark ausgeprägt.

Für die Doppelnut erhält man, da es sich um den gleichen Effekt handelt, das gleiche Verhalten wie bei der Absolutsonde. Auch hier liegt das Signal der Doppelnut in der gleichen Größenordnung der 210 μm tiefen Nut. Eine Trennung ist nicht möglich.

6.2.4 GMR-Streuf Flussprüfung - Vergleich verschiedener GMR-Sensoren

Ergebnisse, die sowohl mit dem GMR-Sensor GMR7 als auch den während dieser Dissertation entstandenen Sensorarrays gewonnen wurden, sind in den vorherigen Kapiteln (siehe Kap. 4 und 5) ausführlich beschrieben worden. Deshalb soll an dieser Stelle lediglich eine kurze Zusammenfassung der für diesen Vergleich wichtigen Ergebnisse gegeben sowie die Flächenscans für die Sensorarrays 3A, 4A und 4B (Sensorbezeichnung siehe Kap. 5) und des NVE-Sensors AB001 [179], einem lateralen Gradiometer empfindlich auf die tangentielle Magnetfeldstärke H_x , vorgestellt werden.

In Abb. 6.8 sind Linienscans entlang der Nutmitten für die GMR-Sensorarrays Typ 4A (rot, oben), 3A (schwarz, Mitte) und 4B (blau, unten) dargestellt. Die Platte wurde vor der Messung aufmagnetisiert und in Remanenz vermessen. Wie schon bei der GMR7-Messung in Kap. 4 lässt sich die Doppelnut auch mit diesen Sensoren nicht auflösen. Eine Trennung der beiden Nuten ist erst dann möglich, wenn die empfindlichen Elemente einen Abstand von wenigen μm zur Oberfläche haben. Bei der 4B-Messung sind zudem wiederum asymmetrische Signalverläufe an den Enden der Platte zu erkennen, da hier die Hintergrundfelder aufgrund der Aufmagnetisierung sehr stark sind (siehe hierzu auch Kap. 5.4.1).

Zusätzlich ist in den Diagrammen die $44\ \mu\text{m}$ tiefe Nut in einem Ausschnitt vergrößert dargestellt. Aufgrund des Materials des Probekörpers sowie dessen Oberflächenbeschaffenheit kann dieser Defekt mit den Sensoren 3A und 4A gerade noch mit einem SNR von 2,6 bzw. 3,3 und einer Signalbreite von $\Delta x = 0,25\ \text{mm}$ bzw. $0,35\ \text{mm}$ aufgelöst werden. Die Nuten mit einer Tiefe von 30 bzw. $10\ \mu\text{m}$ jedoch sind auch hier nicht vom magnetischen Hintergrundrauschen der Platte zu unterscheiden. Da die GMR-Sensoren auf Schwankungen der Materialeigenschaften empfindlicher reagieren als die beiden anderen Verfahren (hier insbesondere magnetische Eigenschaften wie Permeabilitätsschwankungen), können bei der Rissplatte kleinere Defekte nicht aufgelöst werden. Im Fall von ausgehärteten und polierten Oberflächen, wie am Beispiel der Lagerschalenringe aus Stahl 100Cr6 in Kap. 5.4.2 zu sehen, sind auch Defekttiefen kleiner $44\ \mu\text{m}$ nachweisbar. Bei der 4B-Messung konnte der $44\ \mu\text{m}$ -Defekt nicht aufgelöst werden. Hier ist zudem ein Sprung im Signal zu erkennen, welcher durch magnetische Eigenschaften der GMR-Streifenmagnetisierungen verursacht werden kann. Dadurch ist der Typ-B-Sensor im vorliegenden Fall als unzuverlässig anzusehen.

Zum Vergleich mit einem kommerziellen Sensor ist im untersten Diagramm der Abb. 6.8 ein Linienscan (grau-schwarz) mit dem Gradiometer AB001 (NVE) dargestellt. Hier ist eine Auflösung der $44\ \mu\text{m}$ Nut nicht möglich. Aufgrund des gekapselten Chips wird der Liftoff erhöht, wodurch das messbare Signal der Streufelder abnimmt und die Signalbreite zunimmt. Für die Nut mit einer Tiefe von $380\ \mu\text{m}$ ist das $\text{SNR} = 1,7$ und die Signalbreite $\Delta x = 0,83\ \text{mm}$.

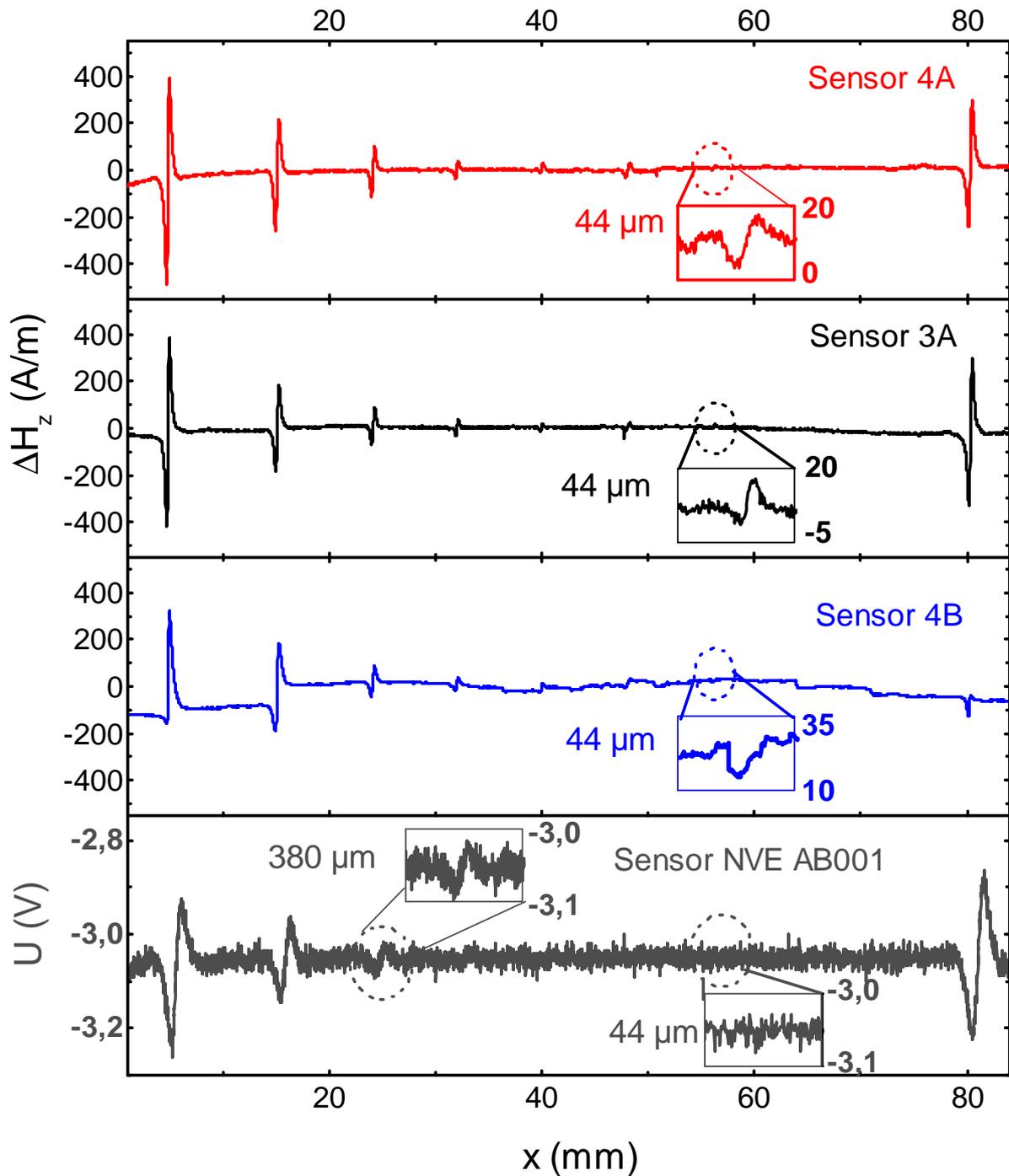


Abbildung 6.8: GMR-Streifeldmessungen der *Rissplatte 1*. Dargestellt sind Linienscans für die Sensoren 4A (rot, oben), 3A (schwarz, Mitte oben) und 4B (blau, Mitte unten). Zusätzlich ist in jedem Diagramm ein Ausschnitt der 44 μm tiefen Nut eingefügt. Das untere Diagramm beinhaltet als grau-schwarze Kurve die Messung der *Rissplatte 1* mit dem Gradiometer AB001 von NVE. Als Ausschnitt ist hier die Nut mit einer Tiefe von 380 μm in das Diagramm eingefügt sowie der Bereich, in dem sich die 44 μm tiefe Nut befinden sollte.

6.3 Platte mit Kreuznut - Bestimmung der Ortsauflösung

In einem Probekörper aus Kaltarbeitsstahl (90MnCrV8) wurden funkenerosiv zwei sich kreuzende Rechtecknuten eingebracht. Der Winkel zwischen diesen beträgt etwa 7° . Der Probekörper misst $70 \times 70 \times 20 \text{ mm}^3$. In Abb. 6.9 (a) und (b) sind eine Skizze bzw. ein Foto des Probekörpers dargestellt. In (b) sind neben den beiden Nuten zudem die Schleifspuren auf der Oberfläche sowie korrodierte Stellen zu erkennen, wodurch sich eine sehr raue Oberflächenstruktur ergibt. Die Oberflächenrauheit selbst ist nicht bekannt.

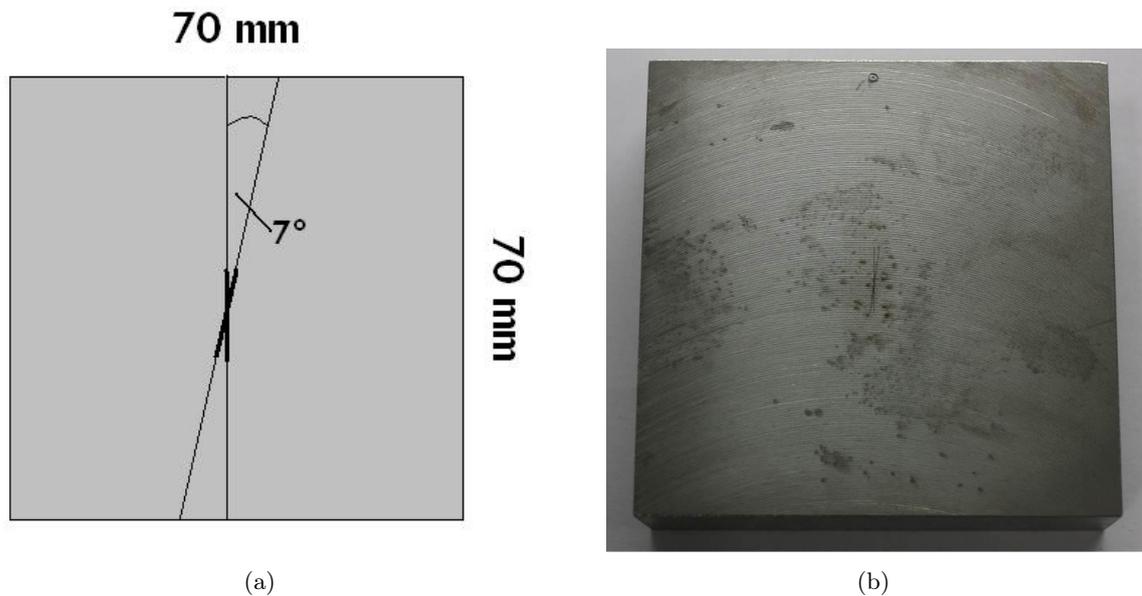


Abbildung 6.9: (a) Schematische Zeichnung des Probekörpers mit den beiden sich in einem Winkel von 7° kreuzenden Nuten. (b) Foto des Probekörpers (Quelle BAM, FB 8.4).

Mit diesem Probekörper wurde das Ziel verfolgt, die örtliche Auflösung eines Laser-gestützten Thermografieprüfsystems zu untersuchen. Da dieser Probekörper aus ferromagnetischem bzw. leitfähigem Material besteht, lässt sich mit diesem auch das räumliche Auflösungsvermögen von auf Wirbelstrom bzw. Streufluss basierenden Prüfsystemen untersuchen.

Bei Abb. 6.10 handelt es sich um ein aus mehreren Mikroskopaufnahmen zusammengesetztes Bild der sich kreuzenden Nuten. Die Nuten besitzen eine Länge von 10 mm, die Klaffungen beider Nuten variieren zwischen 30 und $37 \mu\text{m}$. Die Tiefe der erodierten Nuten beträgt $111 - 119 \mu\text{m}$. An den Enden der Nuten beträgt der Abstand zwischen beiden Nuten $590 \mu\text{m}$ bzw. $718 \mu\text{m}$.



Abbildung 6.10: Zusammengesetzte Mikroskopaufnahmen der sich kreuzenden Nuten (Bild Philipp Myrach, Fachbereich Thermografie, BAM).

6.3.1 Magnetpulverprüfung - MT - Ortsauflösung

In der Einleitung wurde erwähnt, dass die Größe der magnetischen Partikel des schwarzen Magnetpulvers $0,2 \mu\text{m}$ beträgt. Dadurch war es möglich, die Doppelnut im Probekörper *Rissplatte 1* optisch zu trennen, da die beiden Nuten einen Abstand von $200 \mu\text{m}$ besitzen und das Magnetpulver direkt auf der Oberfläche an den Orten starker Feldgradienten - also dicht an den Nutflanken - sowie über die Nut selbst entlang der Streufeldlinien akkumuliert.

Die Oberfläche des Probekörpers *Kreuznut* wurde vor der Magnetpulverprüfung wiederum mit weißem Kreidestaub versehen, um einen hohen Kontrast zu erreichen. Während des Besprühens des Probekörpers mit Magnetpulver lag ein Magnetfeld senkrecht zur Nutorientierung vor. In Abb. 6.11 sind die Ergebnisse der Magnetpulverprüfung der *Kreuznut* dargestellt. In (a) sind die beiden Nuten abgebildet. Die Fotos wurden mit einer Digitalkamera aufgenommen. Neben der Nut ist ein Lineal angebracht, um die Größen abschätzen zu können. Zusätzlich sind die Bereiche markiert, welche in den benachbarten Bildern vergrößert dargestellt sind. Es wird hierbei eine Pixelgröße von $15 \mu\text{m}$ erreicht.

Die Abb. 6.11 (b) und (c) zeigen die Bereiche, die die Auflösungsgrenze der Kamera bzw. der Magnetpulverprüfung hinsichtlich der Trennung beider Nuten darstellt. Der Ausschnitt in (b) (rote Box in (a)) zeigt den Bereich oberhalb der Kreuzung beider Nuten. Eingezeichnet ist zudem der Abstand, bei dem eine Trennung optisch sicher erreicht wird. Bei dem vorliegenden Kamerasystem sind dies 6 Pixel. Dies entspricht einer Länge von $90 \mu\text{m}$. Ebenfalls in (c) ist der untere Bereich abgebildet (orangene Box in (a)). Es deutet sich an, dass mit einem Kamerasystem höherer Auflösung eine sichere Trennung bei einem kleineren Abstand der Nuten erreicht werden kann. Die Grenzen der Trennung sind hier nicht durch das Pulver, sondern durch die verwendete Optik gegeben.

Neben den sich kreuzenden Nuten sind Anzeigen in den Bildern enthalten, welche auch mit der GMR-Streufeldprüfung detektiert werden (siehe weiter unten). Diese Anzeigen, kleine, lokale Ansammlungen des schwarzen Pulvers auf der Oberfläche, entsprechen Streufeldern, die aufgrund von Permeabilitätsunterschieden im Material und einer rauen Oberfläche auftreten.

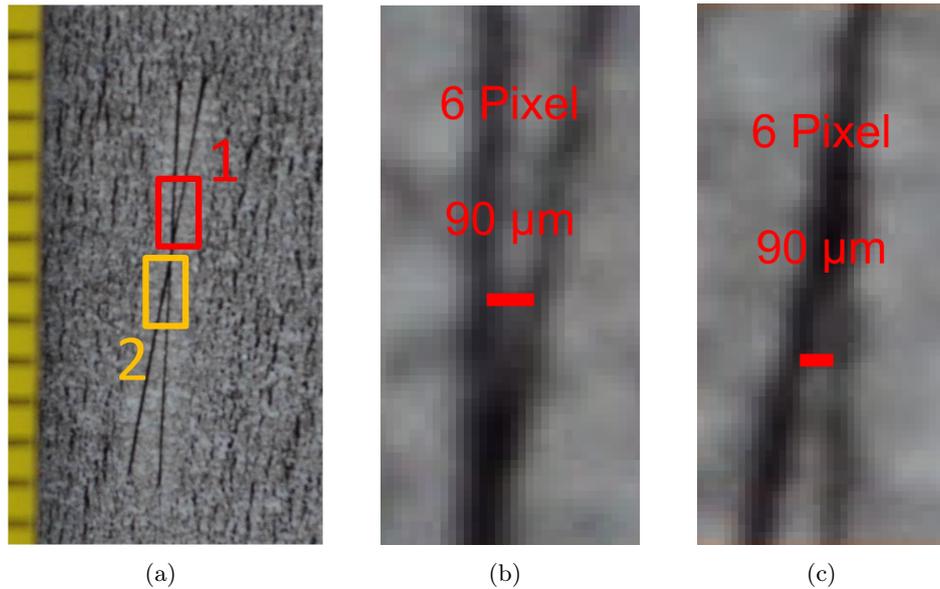


Abbildung 6.11: (a) Digitalaufnahme der *Kreuznut* mit schwarzem Magnetpulver auf weißem Hintergrund. (b) und (c) stellen die in (a) mit den Rechtecken markierten Bereiche vergrößert dar. Zusätzlich wurden diese Aufnahmen zur besseren Veranschaulichung mit einem Raster versehen, welches der Pixelgröße entspricht. Die roten Balken geben den Mindestabstand an, ab dem eine sichere Trennung beider Nuten möglich ist.

6.3.2 Thermografie - TT - Ortsauflösung

Im Abschnitt 6.2.2 konnte gezeigt werden, dass lokal angeregte Thermografie eine sehr hohe Ortsauflösung besitzt und die Nuten bei ausreichender Vergrößerung des optischen Kamerasystems voneinander getrennt werden konnten. Durch den Probekörper *Kreuznut* wurden in [181, 191] die Grenzen der Ortsauflösung untersucht.

In Abb. 6.12 sind die Ergebnisse der *Kreuznut* für die lokal angeregte Laserthermografie dargestellt. Die Laserleistung betrug 93 W. Als Lasergeschwindigkeit wurde $v_L = 100$ mm/s gewählt. (a) bildet als Graustufendarstellung die ermittelte Intensität der Infrarotstrahlung ab. Der in (a) eingezeichnete orangene Balken markiert den in (b) gezeigten Schnitt. Aufgetragen ist hier die Intensität in Abhängigkeit von der Position in Pixeln. Als Kriterium für eine sichere Rissseparation wählten Ziegler und Myrach [194], dass zwischen zwei Intensitätsextrema (in der Abbildung sind dies im vorliegenden Fall Minima) mindestens drei Messpunkte liegen müssen, wobei hier das lokale Extremum dazwischen dem Offset des Hintergrunds entsprechen soll (hier ist dies ein lokales Maximum in Abb. 6.12 (a)).

Bei einer Pixelauflösung des Kamerasystems mit Vergrößerungsoptik von $53 \mu\text{m}$ wird somit eine sichere Trennung zwischen zwei benachbarten Nuten mit einer Tiefe von etwa $110 - 119 \mu\text{m}$ bei einem Abstand von ca. $155 \mu\text{m}$ erreicht, dem vierfachen Wert der Kameraauflösung. Wird die Auflösung weiter verbessert bzw. das System angepasst, lässt sich eine Trennung schon bei Werten im Bereich von etwa $100 \mu\text{m}$ erreichen (siehe Rissplatte oben).

In Abb. 6.13 ist der lineare Zusammenhang zwischen Kameraauflösung und Rissseparation gezeigt. Hierbei wird deutlich, dass die limitierenden Größen die verwendete Optik sowie das Kamerasystem selbst sind. Werden Kameras mit einer verbesserten Auflösung (größerer Chip) sowie eine angepasste Vergrößerungsoptik (ähnlich zur Digitalaufnahme bei der MT) verwendet, lässt sich ein weit besseres Auflösungsvermögen erreichen. Die extrapolierten Werte beziehen sich auf Kameraauflösungen, bei

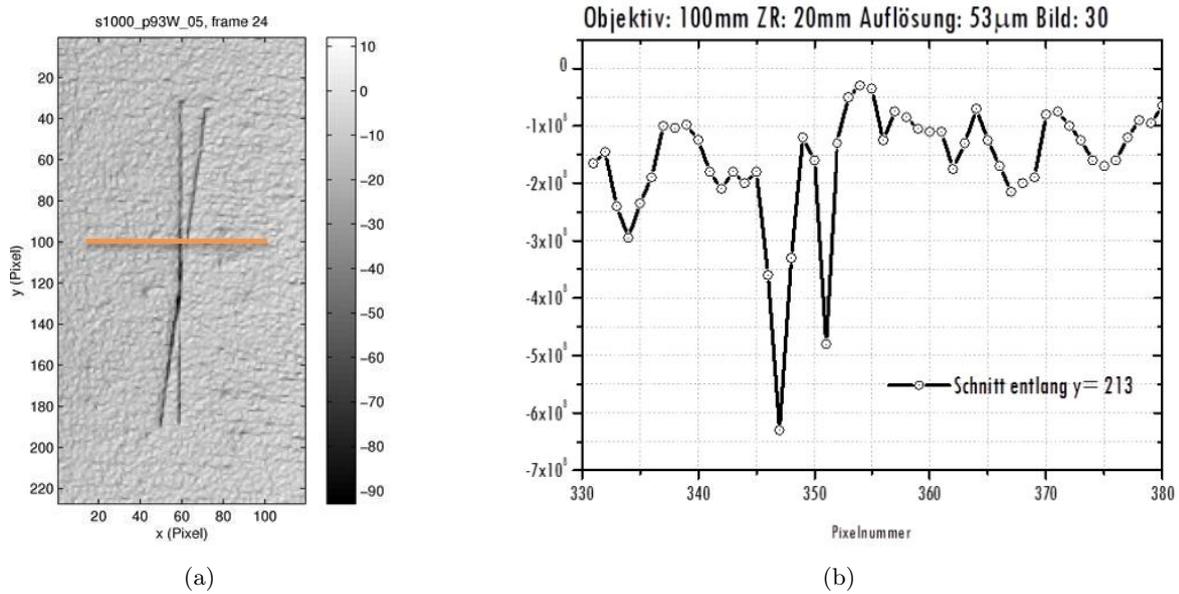


Abbildung 6.12: (a) Rissanzeige der Kreuznut. Die Pixelgröße (die Ortsauflösung der Kamera) beträgt hier $53 \mu\text{m}/\text{Pixel}$. Die orangene Linie zeigt den Schnitt an, der in (b) zu sehen ist. Dieser Schnitt gibt den Mindestabstand an, der nach [194] für eine sichere Trennung der Nuten nötig ist [191, 194].

denen Ziegler und Myrach keine Separation der *Kreuznut* mehr erreichten und somit den minimalen Abstand für eine Trennung aus den zur Verfügung stehenden Daten extrapolierten [194].

Allerdings zeigen die Thermografie-Messungen, dass die Fehlersignatur auch eine Peakbreite besitzt, die durch den thermischen Wechselwirkungsmechanismus auf etwa $100 \mu\text{m}$ bestimmt werden kann. An dieser Stelle ist noch nicht abschließend geklärt, inwieweit die klassische Wärmeverdrängung und das Selbstleuchten des Defektes zum Gesamtsignal beitragen [181, 194]. Es ist aber angesichts der bisherigen Messungen zu vermuten, dass noch kleinere Strukturen bei Laserspotdurchmessern von 1 mm zu finden sind. Dieser Bereich ist aktuell Bestandteil der Forschung auf dem Gebiet der lokalen Laserthermografie.

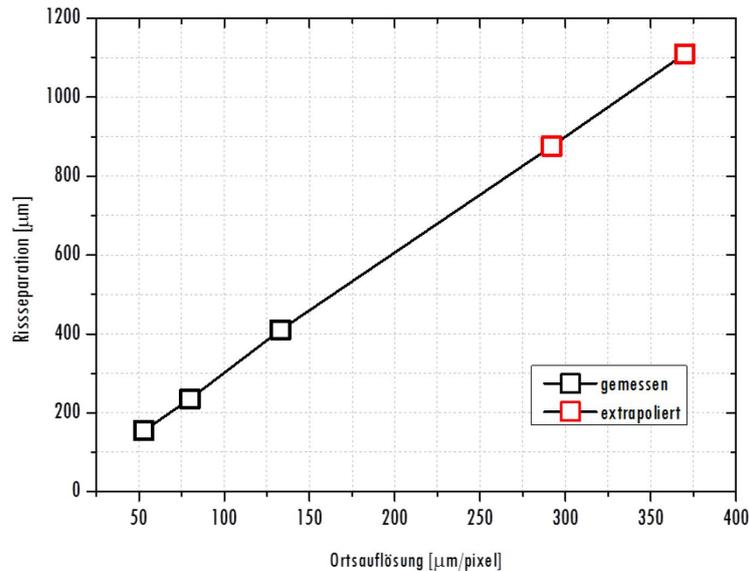


Abbildung 6.13: Gemessene bzw. extrapolierte Defekttrennung in Abhängigkeit von der Ortsauflösung des verwendeten Kamera- und Optiksystems (aus [191]).

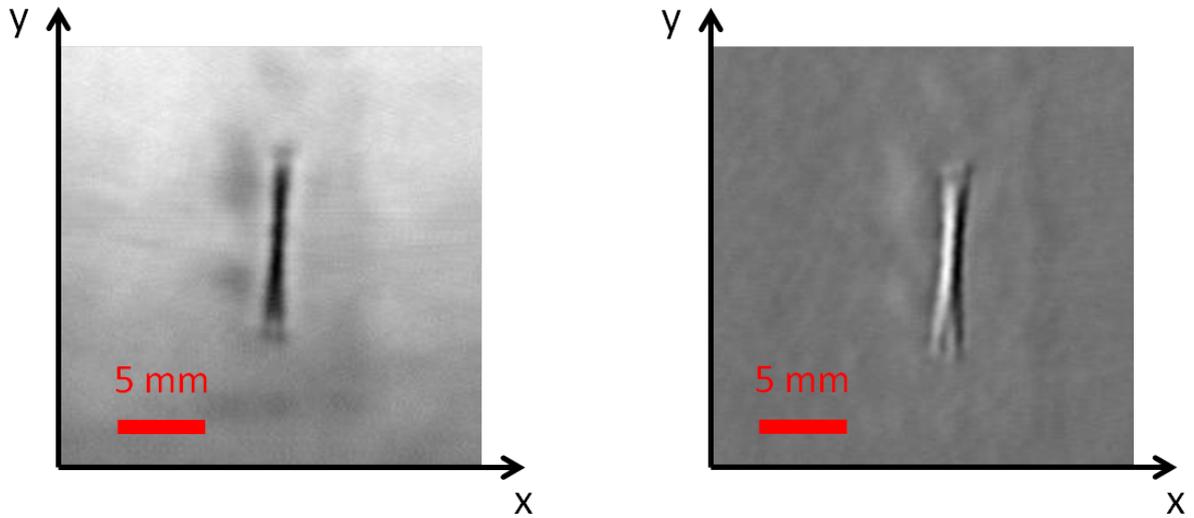
6.3.3 Wirbelstromprüfung - ET - Ortsauflösung

Wie schon die *Rissplatte 1* wurde auch der Probekörper *Kreuznut* mit zwei Wirbelstromsonden untersucht. In Abb. 6.14 (a) und (b) sind Flächenscans für die Absolutsonde A05 bzw. für die Differenzsonde KDS 2-2 als Graustufenbild des Y-Kanals dargestellt. Die Prüffrequenz bei beiden Messungen betrug jeweils $f = 490$ kHz. Wiederum wurde der Probekörper vor den Messungen mit einer $100 \mu\text{m}$ dicken Folie zum Schutz der Oberfläche versehen, wodurch die Signalamplitude geringfügig abnimmt. Jedoch ist dieser Liftoff nicht so kritisch wie bei der GMR-Prüfung.

Auch hier sind im Hintergrund leichte Veränderungen der Grauwerte beschränkt auf ein Rechteck, in dessen Mitte sich die *Kreuznut* befindet, zu erkennen. Wie schon bei der *Rissplatte 1* lassen sich mit der Wirbelstromprüfung die Bereiche, die mit lokal angeregter Laserthermografie untersucht wurden, nachträglich finden. Dies zeigt wiederum, wie sich durch zu hohen Wärmeeintrag die Materialeigenschaften an der Oberfläche verändern.

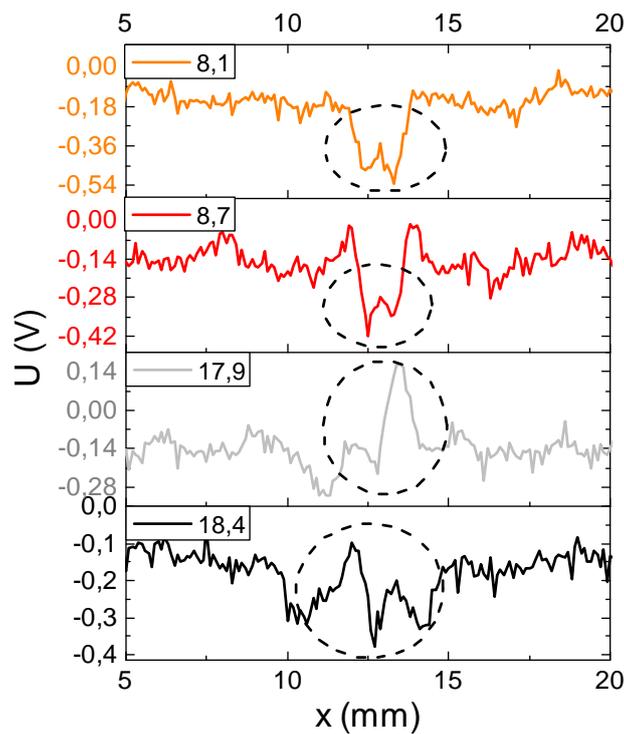
Neben diesen Auffälligkeiten ist bei beiden Messungen die *Kreuznut* deutlich mit den für die jeweilige Sonde charakteristischen Rissignalformen zu erkennen (globales Maximum - schwarz - für die Wirbelstromsonde A05 und Min-Max-Verlauf (weiß - grau) bei der Sonde KDS 2-2). Schon in den Flächenscans ist deutlich zu sehen, dass eine Trennung der sich kreuzenden Nuten nur an deren Enden möglich ist. Wie schon bei der Doppelnut in *Rissplatte 1* ist aufgrund der Spulengeometrie und deren Größe eine Trennung im sich kreuzenden Bereich nicht möglich. Erst wenn der Abstand zwischen beiden Nuten in die Größenordnung der Wirkbreite der Empfängerspulen kommt, ist eine Separation möglich.

In Abb. 6.14 (c) sind Linienverläufe des Y-Kanals der Differenzsondenmessung in x -Richtung für vier Spuren dargestellt. Als Kriterium zur Unterscheidung beider Nuten ist die Ausbildung zweier Defektsignale erforderlich. Für einen Differenzsensor kennzeichnet dies den Bereich, in dem deutlich ein Minimum und ein Maximum pro Defektsignal zu erkennen sind. In Abb. 6.14 (c) sind die Bereiche der Trennung bei den Positionen $y \approx 8,7$ mm und $y \approx 17,9$ mm mit Kreisen markiert. Die Distanz zwischen beiden Nuten beträgt hier ungefähr $0,6$ mm. Zusätzlich muss hier die Länge der Signale in y -Richtung betrachtet werden. Die Signallänge beträgt in y -Richtung bei den Wirbelstrommessungen



(a)

(b)



(c)

Abbildung 6.14: Graustufendarstellung des Y-Kanals für die Wirbelstrommessung der *Kreuznut* für (a) den Absolutsensor A05 und (b) den Differenzsensor KDS 2-2. Die Prüffrequenz betrug in beiden Fällen $f = 490$ kHz. Abgerastert wurde ein Bereich von 240×240 mm². (c) Wirbelstromsignale des Y-Kanals für den in Abb. 6.14 (b) dargestellten Flächenscan (Differenzsonde KDS 2-2) für die Spuren $y = 8,1$ mm, $8,7$ mm, $17,9$ mm und $18,4$ mm.

im Fall der Differenzsonde 11,3 mm. Dies sind 1,3 mm mehr als die tatsächliche Länge der Nuten, bzw. an den Enden der Nut entspricht dies jeweils einem zusätzlichen Abstand von 0,6 - 0,7 mm. Hierfür verantwortlich ist die Größe, der Abstand zum Prüfbjekt und somit die Wirkbreite der Spulen.

6.3.4 GMR-Streulflussprüfung - Ortsauflösung

Für die GMR-Streulflussprüfung der *Kreuznut* werden die GMR-Sensoren GMR7 (laterales Gradiometer (siehe Abb. 6.15 (a)), $dL \times dH = 60 \times 70 \mu\text{m}^2$, Basislänge $BL = 250 \mu\text{m}$), 4A (axiales Gradiometer (siehe Abb. 6.15 (b)), Länge $dL = 190 \mu\text{m}$, Basislänge $250 \mu\text{m}$) und 12 A (axiales Gradiometer, Länge $dL = 25 \mu\text{m}$, Basislänge $250 \mu\text{m}$) sowie der Einzelsensor 14 mit einer aktiven Elementlänge von $10 \mu\text{m}$ eingesetzt. Eine Messung mit dem NVE-Sensor AB001-02 wurde zwar ebenfalls durchgeführt, jedoch wurden hierbei, aufgrund des zu großen Liftoffs, keine Streufelder detektiert. Wie *Rissplatte 1* wurde der Probekörper vor der Messung aufmagnetisiert, wodurch eine remanente Magnetisierung während der Messung vorlag. Der Liftoff wurde mit einem $20 \mu\text{m}$ -Abstandsstreifen eingestellt und kontrolliert und liegt für die empfindlichen GMR-Elemente im Bereich von etwa $150 \mu\text{m}$.

In Abb. 6.15 sind in (c) und (d) der Flächenscan bzw. ein Ausschnitt als Graustufendarstellung der gemessenen Magnetfeldwerte für den Sensor GMR7 und in (e) vier Linienscans der in (d) durch orangene Linien gekennzeichneten Spuren entlang der x -Richtung dargestellt. Im Flächenscan (c) ist die sich kreuzende Nut deutlich zu erkennen. Jedoch ist die Hintergrundinformation in Form von magnetischem „Rauschen“ des Probekörpers (lokal begrenzte Magnetfeldcluster) sehr groß. Dennoch lassen sich die Längen der beiden Nuten sehr gut abbilden. Die Längen betragen im Fall der GMR7-Messungen für Nut 1 und Nut 2 etwa 10 mm und entsprechen den Angaben der mikroskopischen Untersuchung.

Eine Trennung der beiden Nuten ist erst möglich, wenn sich im Fall des Gradiometers GMR7 zwei lokale Extremwerte gleicher Art im Signal ausbilden. Im vorliegenden Fall sind dies zwei Minima. Dies ist der Fall für die Spur $y = -2 \text{ mm}$ (grau) und $y = 2 \text{ mm}$ (rot) in Abb. 6.15 (e). Für die Linien der Spuren $y = -2,6 \text{ mm}$ (schwarz) und $y = 2,6 \text{ mm}$ (orange) ist die Trennung noch deutlicher zu erkennen. Diese Bereiche sind in den Liniendarstellungen der Messung durch einen grauen Kreis markiert. Die sich trennenden Defektsignale sind etwa 2 mm von der Kreuzung der Nuten entfernt. Eine Trennung ist somit für einen Abstand der beiden Nuten von ca. $244 \mu\text{m} (= \sin(7^\circ) \cdot 2 \text{ mm})$ möglich. Dieser Wert für die örtliche Auflösung ist um den Faktor zwei besser als der der Wirbelstrommessung, jedoch etwa 1,6 mal schlechter als das Auflösungsvermögen der lokal angeregten Laserthermografie (Rissseparation nach Ziegler bei etwa $155 \mu\text{m}$ bei einer Kameraauflösung von $53 \mu\text{m}$). Hier spielt insbesondere der Gradient des Sensors in x -Richtung eine nicht unwesentliche Rolle. Die Basislänge beträgt beim GMR7 $250 \mu\text{m}$ und entspricht somit bei dem geringen Liftoff von $LO \approx 150 \mu\text{m}$ der örtlichen Auflösung des GMR7. Der eingestellte Liftoff ist kleiner als die Basislänge BL und somit im vorliegenden Fall des GMR7 nicht die limitierende Größe. Die Größe der empfindlichen Flächen beträgt $60 \times 70 \mu\text{m}^2$. Hier sind die gemessenen Magnetfeldwerte der einzelnen GMR-Elemente des Sensors entscheidend. Erst wenn der Abstand der Nuten im Bereich der Basislänge ist, bilden sich zwei Defektsignale aus. Für eine kleinere Ortsauflösung sind bei Sensoren mit gleicher Anordnung der empfindlichen Elemente wie beim GMR7 viel kleinere Basislängen nötig.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gradiometer 4A und 12A, deren Gradient senkrecht zur Oberfläche in z -Richtung gebildet wird, für die Messung vorgestellt. Beide Sensoren besitzen die gleiche Basislänge von $250 \mu\text{m}$ jedoch eine unterschiedliche empfindliche Fläche. Die Sensoren sind so ausgerichtet, dass sie der Sensorkonfiguration 2 (siehe S. 75 bzw. Schema in Abb. 6.15 (b)) entsprechen. Das bedeutet, dass die aktiven Flächen parallel zur Nut in y -Richtung und senkrecht zur Verfahrrichtung orientiert sind.

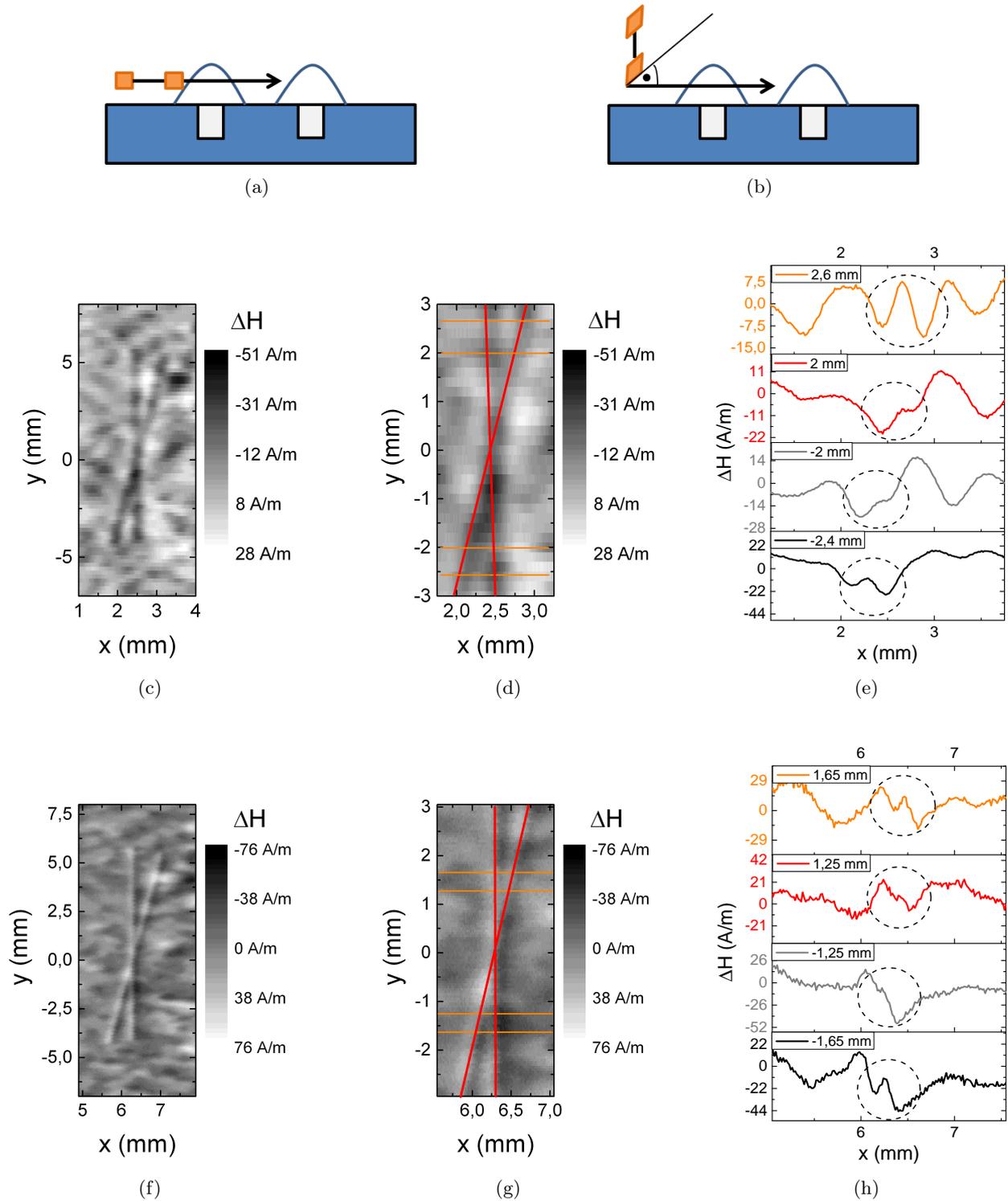


Abbildung 6.15: Schema der empfindlichen GMR-Elemente bezüglich der Nuten im Fall von (a) dem lateralen Gradiometer GMR7 und (b) den ZfP-angepassten axialen Gradiometern vom Typ 4A, 12A und 14 (beide in Abb. 6.16). (c) GMR-Streifefeldmessung der *Kreuznut* mit dem Gradiometer GMR7. In (d) ist ein Ausschnitt von (c) und in (e) sind Linienscans der Messung für vier verschiedene Spuren y dargestellt (markiert in (d) mit orangenen Linien). Die Kreise symbolisieren den Bereich der Defektsignale. (f) GMR-Streifefeldmessung der *Kreuznut* mit dem Gradientensensor 4A. In (g) und (h) sind ein Ausschnitt des Flächenscans bzw. vier Linienscans dargestellt. Die grauen Kreise geben den Bereich der Defektsignale an.

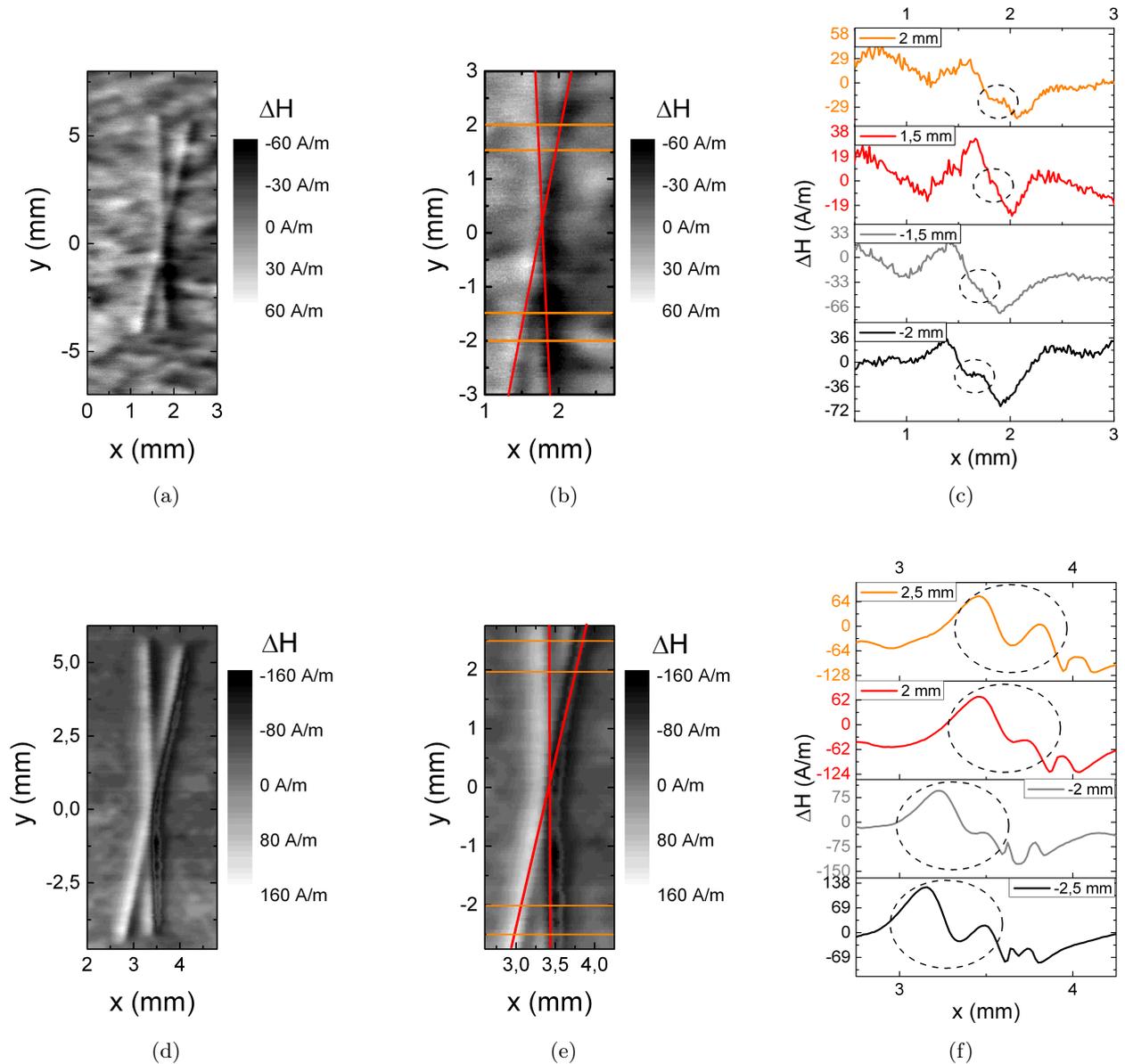


Abbildung 6.16: (a) GMR-Streufeldmessung der *Kreuznut* mit dem Gradiometersensor 12A. In (b) ist ein Ausschnitt dargestellt. Die Nuten sind mit roten Linien entlang der Streufeldminima veranschaulicht. Die orangenen Linien deuten die Spuren an, die in (c) als Linienscans dargestellt sind. Die grauen, gestrichelten Kreise markieren die Bereiche der Defektsignale. In (d)-(f) sind die Ergebnisse für den Einzelsensor 14 abgebildet.

In Abb. 6.15 (f)-(h) sind die Ergebnisse für das Sensorarray 4A dargestellt. Wiederum ist in (f) und (g) der Flächenscan der *Kreuznut* als Graustufendarstellung der Magnetfeldwerte gezeigt. Die Spuren liegen hierbei $\Delta y = 50 \mu\text{m}$ auseinander. Auch in diesem Flächenscan ist das örtliche, magnetische Hintergrundrauschen des Probekörpers zu erkennen. Vergleicht man auffällige Bereiche in beiden Flächenscans, lassen sich dieselben lokalen Anzeigen erkennen.

Die Linienscans in Abb. 6.15 (h) repräsentieren die Bereiche der Nutseparation. Ähnlich wie beim GMR7 ist das Kriterium der Trennung ein Auftreten von zwei Defektsignalen. Im Fall der Sensorarrays sind dies pro Defektsignal ein Maximum und ein Minimum. Das bedeutet, es müssen nacheinander zwei Max-Min im Linienscan vorkommen. Dies ist im Ansatz für die Spuren $y = 1,25 \text{ mm}$ (rote Kurve) und $-1,25 \text{ mm}$ (graue Kurve) der Fall. Die Mitte der Nutkreuzung befindet sich bei $y = 0 \text{ mm}$. Daraus ergibt sich eine Trennung für zwei benachbarte Nuten ab einem Abstand von $x_{\Delta\text{Nut1-Nut2}} \approx 152 \mu\text{m}$. Dieser Wert ist um $100 \mu\text{m}$ besser als das erreichte Ergebnis für Sensor GMR7 und liegt im Bereich des Auflösungsvermögens der Thermografie für den Fall, dass die Kameraauflösung $53 \mu\text{m}$ beträgt.

Die Ergebnisse des Sensors 12A bei einem $LO \approx 150 \mu\text{m}$ sind in der Abb. 6.16 (a)-(c) dargestellt. In (a) sind die gemessenen Magnetfeldwerte des Flächenscans der *Kreuznut* mit Sensor 12A als Graustufendarstellung abgebildet. (b) zeigt hierbei einen Ausschnitt von (a), in dem die sich kreuzenden Nuten näher betrachtet werden. Die Minima der Streufelder der beiden Nuten sind mit zwei roten Linien in das Diagramm eingezeichnet. Die orangenen Linien geben die Linienscans wieder, die in (c) gezeigt werden. Die Linien der Spuren $-1,5 \text{ mm}$ (grauer Plot) und $1,5 \text{ mm}$ (rot) zeigen im Linienscan einen Verlauf, bei dem eine klare Trennung der beiden Signale und somit der beiden Nuten räumlich schwer möglich ist. Hingegen bilden sich bei -2 mm (schwarz) und 2 mm (orange) Plateaus im Linienvverlauf heraus. Hier ist eine Trennung der beiden Nuten durch eine Magnetfeldmessung mit dem Sensor 12A möglich. Die Distanz der beiden Nuten beträgt bei 2 mm und -2 mm etwa $244 \mu\text{m}$, für die Spuren $-1,5 \text{ mm}$ und $1,5 \text{ mm}$ beträgt der Abstand $183 \mu\text{m}$. Eine Verbesserung gegenüber dem Sensor 4A wird trotz der kürzeren Seitenkante der GMR-Elemente nicht erreicht. Vielmehr wirkt sich die zusätzliche Höhe von $30 \mu\text{m}$ des Sensors 12A negativ auf die Messsignale aus.

Abb. 6.16 (d)-(f) zeigt die Ergebnisse für den experimentellen Einzelsensor Typ 14 ($dL = 10 \mu\text{m}$, $LO \approx 150 \mu\text{m}$). Hier wurde nur das untere GMR-Element des Gradiometers, welches am nächsten an der Oberfläche ist, verwendet, wodurch im Gegensatz zu den anderen GMR-Kreuznut-Messungen ein Magnetometersignal erreicht wurde. Dies funktioniert nur für den Einzelsensor. Zudem wurde hier eine Widerstandsmessung des einzelnen GMR-Elementes durchgeführt. Grund hierfür war ungenügende Signalauflösung aufgrund der kleinen Widerstandselemente. Die Widerstandsmessung führte zu einem verbesserten SNR, allerdings waren die Einzelsensormessungen verglichen mit den vorherigen GMR-Messungen um ein vielfaches langsamer aufgrund der eingesetzten Datenerfassung zur Widerstandsmessung. Obwohl das GMR-Element gegenüber den Sensoren vom Typ 4A klein ist, war eine Verbesserung der Nutseparation nicht zu erkennen. Im Gegenteil verschlechtern sich die Resultate im Vergleich zu den Ergebnissen des Typs 4A. Der Abstand für den Beginn der Trennung ($y = -2 \text{ mm}$ und $y = 2 \text{ mm}$) beträgt etwa $244 \mu\text{m}$. Ursache hierfür kann ein zu großer Abstand der aktiven Fläche sein bzw. durch die kurzen Leiterbahnen ist es möglich, dass der GMR zusätzliche geometriebedingte Entmagnetisierungseffekte besitzt, die einer Verbesserung der Auflösung entgegenwirken.

6.4 Platte mit Rampennut

Der Probekörper mit einer *Rampennut* besteht ebenfalls wie der in Abschnitt 6.3 vorgestellte Probekörper aus Kaltarbeitsstahl. In diesen Körper wurde eine Nut funkenerosiv eingebracht, deren Tiefe von 0 bis 477 μm kontinuierlich zunimmt. Die Länge beträgt wiederum etwa 10 mm und die Breite variiert zwischen 35 und 40 μm . Die zunehmende Breite in Abhängigkeit von der Tiefe ist herstellungsbedingt, liegt aber in der gleichen Größenordnung wie bei dem Probekörper mit der Kreuznut. Bei einer nicht perfekt senkrecht zur Oberfläche des Prüfkörpers angebrachten Elektrode kommt es mit zunehmender Tiefe an den Flanken der Nut zu einem zusätzlichen Materialabtrag.

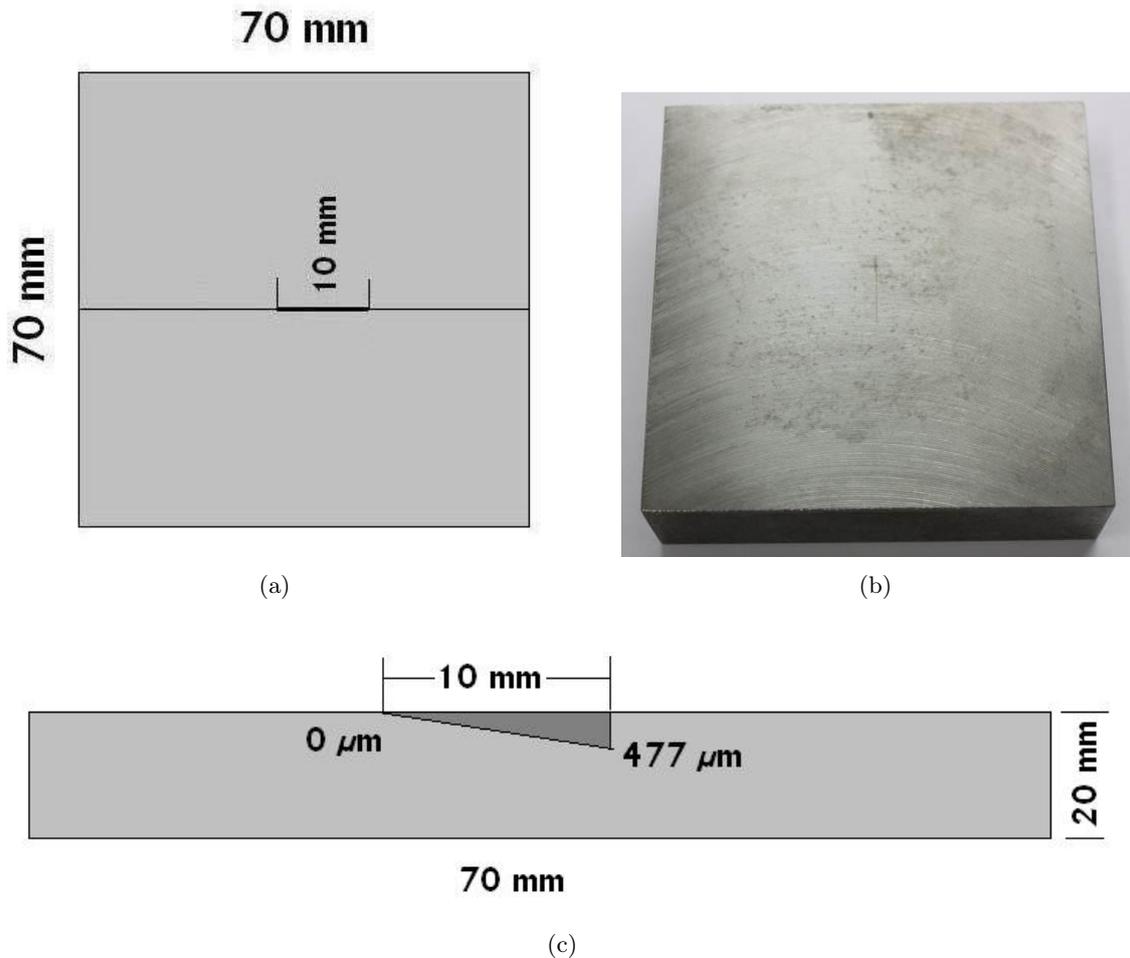


Abbildung 6.17: (a) Schematische Zeichnung des Probekörpers mit der Rampennut. (b) Foto des Probekörpers (Quelle BAM, FB 8.4). (c) Schema des Verlaufs der Nuttiefe.

In Abb. 6.17 (a) und (b) sind ein Schema bzw. ein Foto des Probekörpers dargestellt. Der Verlauf der *Rampennut* in (c) ist hierbei linear eingezeichnet. Es wird angenommen, dass der Materialabtrag über die Länge der Nut konstant verlaufen ist. Auch hier sind Bearbeitungsspuren wie Schleifriefen und ebenfalls korrodierte Stellen auf der Oberfläche zu erkennen.

6.4.1 Magnetpulverprüfung - MT - Detektionsgrenze Defekttiefe

Für die Magnetpulverprüfung wurde wiederum mit einem schwarzen Pulver auf weißem Untergrund gearbeitet. In Abb. 6.18 ist ein Foto mit Längenangabe gezeigt. Die Länge der Nut kann bei diesem Verfahren sehr genau abgeschätzt werden. Daraus folgt, dass dieses Verfahren sehr empfindlich auf die Tiefe ist. Schon bei sehr geringen Tiefen und den hier entstehenden Streufeldern ist eine Magnetpulveranzeige zu erkennen. Eine Abschätzung der Tiefe aufgrund der unterschiedlichen Anhäufung des Magnetpulvers in Abhängigkeit von der Tiefe, und somit in Abhängigkeit von der Stärke des Streufeldes, ist allerdings wiederum verfahrensbedingt nicht möglich. Auch kann keine genaue Angabe gemacht werden, ab welcher Tiefe eine Detektion möglich ist. Die Grenze ist unterhalb der 30 μm tiefen Nut, die noch beim Probekörper *Rissplatte 1* sicher detektiert werden konnte, zu finden, und sollte im Bereich von 10 bis 30 μm liegen.

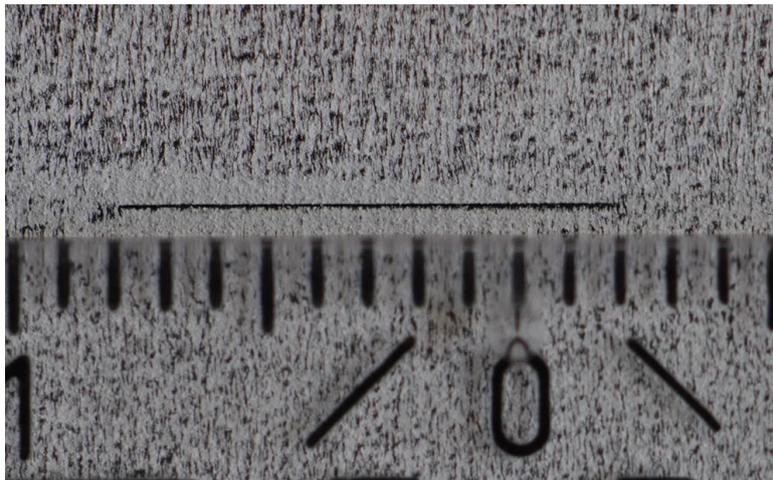


Abbildung 6.18: Magnetpulveranzeige der Rampennut.

6.4.2 Thermografie - TT - Detektionsgrenze Defekttiefe

In Abb. 6.19 links ist ein Flächenscan mit Rissanzeige der *Rampennut* für lokal angeregte Thermografie dargestellt. Dabei nimmt die Stärke der Rissanzeige parallel zur Tiefe der Nut ab. Hierfür ist die Aufstauung der Wärme an den Flanken der Nut verantwortlich. Die Intensität der Wärmestrahlung hängt hierbei von der Tiefe der Nut ab. Nimmt die Tiefe der Nut ab, kann die Wärme besser in das umliegende Material „abfließen“ bzw. sich im Probekörpervolumen verteilen. Dadurch wird weniger Wärme in Richtung der Kamera abgestrahlt. Bei tiefen Defekten hingegen kommt es zu einer starken Aufstauung der Wärme an der Nutflanke. Sie kann nicht ins gesamte Volumen diffundieren, wodurch sich mehr Wärme lokal an den Nutflanken konzentriert und somit die abgestrahlte Wärme größer wird.

In Abb. 6.19 rechts ist ein Schnitt entlang der *Rampennut* dargestellt. Die Anzeige korreliert hierbei mit der Tiefe. Allerdings ist zu erkennen, dass die Linie nicht linear verläuft. Zu geringeren Tiefen hin wird ein kleines Maximum erreicht. Danach ist ein weiteres lokales Minimum im Signalverlauf zu erkennen, bevor das Signal aufgrund einer noch geringeren Tiefe im Rauschen verschwindet. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten ist ein nicht perfekt linearer Abtrag bei der Funkenerosion. Hierbei können die Tiefen aufgrund lokaler Materialunterschiede sowie einer fehlerhaften Erodierfolie schwanken.

Die Aussage der lokal angeregten Laserthermografie bezüglich einer Detektionsgrenze für die Defekttiefe ist nach Ziegler [194] sehr stark von der Lasergeschwindigkeit und der Laserleistung abhängig. Hier

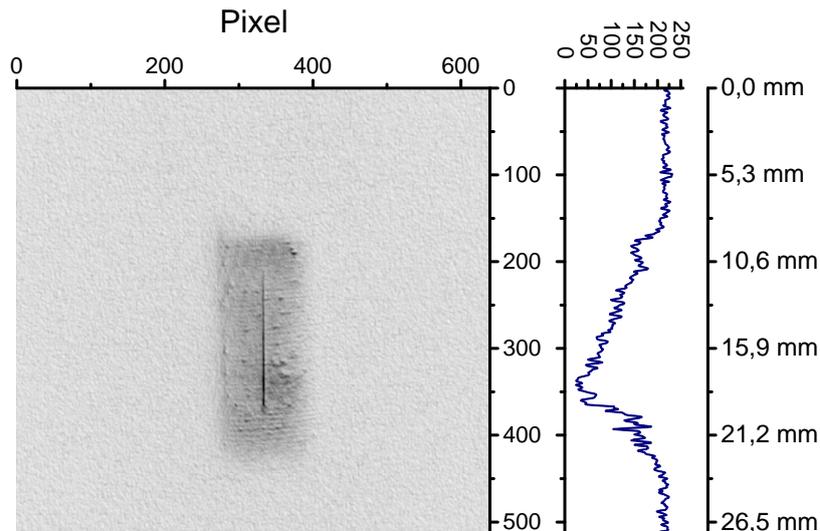


Abbildung 6.19: Links: Rissanzeige für eine Laserleistung 20 W bei einer Verfahrensgeschwindigkeit des Lasers von $v_L = 0,1$ m/s. Die Pixelgröße liegt bei $53 \mu\text{m}$. Rechts: Schnitt entlang der *Rampennut* (Quelle [194]).

wirken sich niedrige Lasergeschwindigkeiten im Vergleich zur Ortsauflösung als kontraproduktiv aus. Eine genaue Aussage bezüglich einer unteren Detektionsgrenze wird von Ziegler und Myrach nicht angegeben. Jedoch ist eine Rissdetektion für Tiefen von etwa $10 \mu\text{m}$ möglich; siehe hierzu Abschnitt 6.2.2. Der Unterschied zwischen der *Rissplatte 1* und der *Rampennut* liegt im verwendeten Material, wodurch sich eine unterschiedliche Tiefenaussage ergibt. Dies muss bei einer Prüfung sowie einer Bewertung der Ergebnisse mit berücksichtigt werden.

6.4.3 Wirbelstromprüfung - ET - Detektionsgrenze Defekttiefe

Abb. 6.20 zeigt in (a) und (b) Flächenscans des Probekörpers mit der Absolutsonde A05 bzw. KDS 2-2 für eine Prüffrequenz von $f = 490$ kHz. Die Fläche wurde wiederum spurweise in x -Richtung abgerastert. Abgebildet ist der Y-Kanal (imaginärer Anteil der Impedanz) als Graustufendarstellung. Auch in diesem Fall wurde der Probekörper vor der Messung mit einer schützenden Folie versehen. Darunter sind in (c) und (d) jeweils für beide Sonden Schnitte der Defektsignale der *Rampennut* in y -Richtung dargestellt. Aufgetragen sind die Extrema der Defektsignale als Funktion der y -Position.

In Abb. 6.20 (a) ist das Ergebnis der Absolutsonde dargestellt. Die Abbildung besitzt in y -Richtung eine kontinuierliche Veränderung der Graustufen. Die Ursache für diesen Verlauf ist eine Temperaturdrift während der Messung. Noch deutlicher ist dieser Verlauf in Abb. 6.20 (c) anhand der schwarzen und roten Kurven zu erkennen. Da der Differenzsensor temperaturkompensierend wirkt, lassen sich in (b) bzw. (d) die Änderungen aufgrund der Drift, wie sie in (a) bzw. (c) für die y -Richtung auftreten, nicht beobachten.

Die Abschätzung der Länge der *Rampennut* erfolgt in (c) und (d). In den Graphen eingezeichnet ist ein Dreieck mit der Ausdehnung innerhalb des Probekörpers beginnend bei einer Tiefe von $0 \mu\text{m}$ und dann linear zunehmend bis zu einer Tiefe von $477 \mu\text{m}$ (in der Tiefe nicht maßstabsgetreu dargestellt). Das Dreieck ist bei der Absolutsonde so platziert, dass das Signal erst $0,6$ mm nach dem Ende der Nut auf Null abgefallen ist. Dies entspricht etwa der Wirkbreite der Sonde. Da der genaue Aufbau der Differenzsonde nicht bekannt ist, wird hier dasselbe Kriterium wie bei der Absolutsonde angesetzt. Dabei ist zu erkennen, dass die Signallängen die Längen der Nuten geringfügig überschreiten. Hier ist

wieder die Wirkbreite der Sonden für die Überschreitung der Länge verantwortlich. Bei der Absolut- und ebenso bei der Differenzsonde lassen sich Defekttiefen ab etwa $10\ \mu\text{m}$ und mehr auflösen. Neben der Magnetpulverprüfung und der Thermografie reagiert auch die Wirbelstromprüfung sehr empfindlich auf die Tiefe eines Defektes. Eine Sättigung der Signalamplitude wird bei dieser Messreihe nicht erreicht. Dies wäre erst bei tieferen Defekten bzw. höheren Prüffrequenzen der Fall (Verringerung der Eindringtiefe).

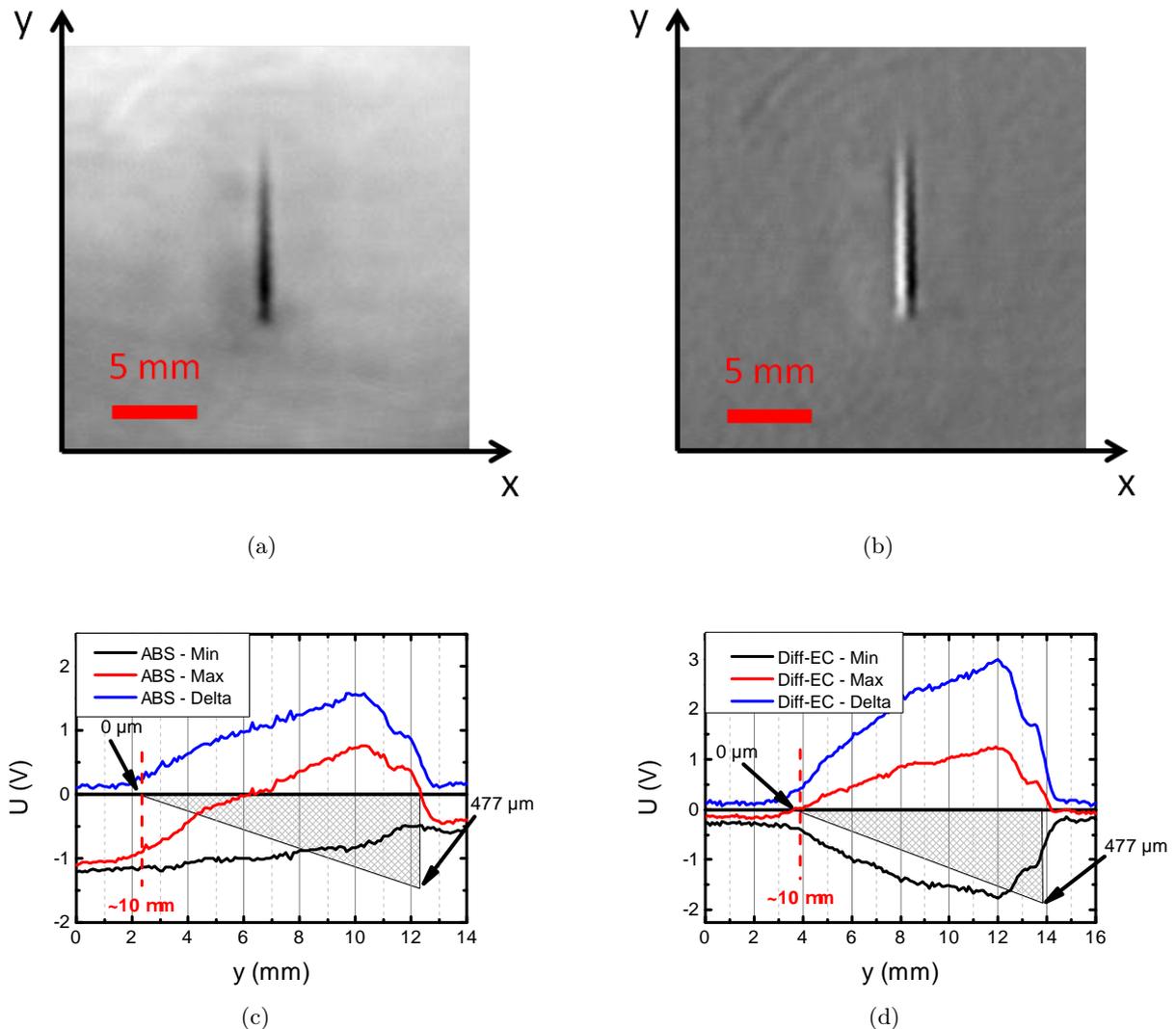


Abbildung 6.20: Graustufendarstellungen des Y-Kanals für die Wirbelstrommessung der *Rampennut* für (a) den Absolutsensor A05 und (b) den Differenzsensor KDS 2-2. Die Prüffrequenz betrug in beiden Fällen $f = 490\ \text{kHz}$. Abgerastert wurde ein Bereich von $24 \times 24\ \text{mm}^2$. (c) Schnitt entlang des Maximums bzw. des Minimums des Defektsignals sowie der Differenz zwischen beiden. Zusätzlich ist die *Rampennut* als grau-schraffiertes Dreieck entsprechend ihrer Position in das Diagramm eingezeichnet. Hierbei ist die Tiefe nicht maßstabsgetreu. Ein entsprechendes Diagramm für den Gradientensensor KDS 2-2 ist in (d) gezeigt.

6.4.4 GMR-Streuf Flussprüfung - Detektionsgrenze Defekttiefe

Um eine Tiefenaussage für die GMR-Streuf Flussprüfung zu erhalten, wurde der Probekörper mit der *Rampennut* ebenfalls mit den Sensoren GMR7, 4A und 12A untersucht. Wiederum wurde der Probekörper vor der Messung magnetisiert und der Liftoff mit dem 20 μm -Streifen eingestellt. Die Ausrichtung der Sensorarrays 4A und 12A entsprach während der Messung der Sensoranordnung 2 (siehe Kap. 5 bzw. Schema in Abb. 6.15 (b)).

In Abb. 6.21 (a) und (c) sind für die Sensoren GMR7 und 4A die Flächenscans als Graustufendarstellung der gemessenen Magnetfeldwerte abgebildet. In beiden Fällen lässt sich die Nut deutlich vom Hintergrund unterscheiden. Allerdings sind auch bei diesem Probekörper Permeabilitätsschwankungen im Material lokal zu erkennen. Die Schwankungen treten in den Abbildungen nicht so deutlich auf, da die Skala an die hohen Streufeldwerte für die tieferen Bereiche angepasst ist.

Um die Länge abschätzen zu können, sind in Abb. 6.21 (b) und (d) Schnitte durch die Extremwerte des Streufeldes der *Rampennut* in y -Richtung dargestellt. Zusätzlich enthalten die Graphen ein Dreieck, um die Geometrie der *Rampennut* zu skizzieren (wiederum in der Tiefe nicht maßstabsgetreu gezeichnet).

Mit zunehmender Tiefe nimmt das Streufeld der *Rampennut* zu. Das Ende der *Rampennut* mit einer Tiefe von 477 μm befindet sich an der Stelle, an der die Amplitude des Streufeldes auf die Hälfte des Maximums abgefallen ist. Ausgehend von diesem Punkt nimmt das Streufeld parallel zur Tiefe ab (Abfall in Richtung kleiner werdender y -Werte). Jedoch erreichen die gemessenen Feldwerte bei beiden Messungen das Hintergrundrauschen schon bei einer Tiefe von 170 μm . Ähnlich zur Thermografie kann die Ursache für den nahezu abrupten Abfall ein nicht-linearer Abtrag der Nut während der Funkenerosion sein, wodurch ein gewölbter und nicht linearer Verlauf der Nut verursacht werden kann. Eine nachträglich Bestimmung der Tiefe war bei diesem Probekörper nicht möglich, da aufgrund der Historie die Nut eine starke Verschmutzung aufwies.

Zusätzlich zu den vorgestellten GMR-Messungen wurde ebenfalls der Sensor 12A eingesetzt. Dieser zeichnet sich, wie oben erwähnt, durch eine Fläche mit einer kürzeren Seitenkante parallel zur Oberfläche aus ($dL \times dH = 25 \times 35 \mu\text{m}^2$). In Abb. 6.21 (e) und (f) sind die Ergebnisse der 12A-Streuf Flussmessung für die *Rampennut* dargestellt. (e) zeigt den Flächenscan der *Rampennut* als Graustufendarstellung. In (f) sind die Schnitte durch die Maxima und Minima dargestellt. Bei einer Tiefe von etwa 172 μm ist eine klare Unterscheidung zwischen Rissignal und magnetischem Hintergrundrauschen nicht mehr möglich. Da der Sensor 12A zusätzlich in der Höhe über die Feldwerte mittelt ($dH = 30 \mu\text{m}$) und dies einen starken Einfluss auf das detektierte Sensorsignal hat, ist in diesem Fall trotz kleinerem dL keine Verbesserung gegenüber Sensor 4A zu erreichen. Eher verschlechtert sich das Ergebnis durch die zunehmende Höhe der Sensorelemente. Dies bestätigen die in Kap. 5 durch Simulationen gewonnenen Ergebnisse bezüglich der Höhe der aktiven Elemente.

Eine Messung mit dem NVE-Sensor ergab, dass kein Streufeld der *Rampennut*, welches sich vom Hintergrund abhebt, detektiert werden konnte. Das Rauschen und insbesondere der Abstand der empfindlichen Elemente war in diesem Fall zu groß für eine Detektion der geringen Streufelder.

Vergleicht man die Ergebnisse der Sensoren 4A und 12A mit den Messergebnissen der Lagerschalenringe aus Kap. 5, hängt die Detektionsgrenze der GMR-Streuf Flussprüfung sehr stark vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Bei den Lagerschalenringen konnten Nuten mit Tiefen von 40 μm und weniger mit einem hohen SNR nachgewiesen werden. Für die *Rampennut* ist die Detektionsgrenze aufgrund der Hintergrundsignale allerdings geringer. Daraus folgt für GMR-Sensoren, dass nicht nur Defekte, sondern auch magnetische Materialeigenschaften an der Oberfläche untersucht werden können. Zudem sind die Hintergrundsignale bei der Prüfung unterschiedlicher Materialien zu berücksichtigen, damit die Grenzen hinsichtlich der Detektion von Defekten geringer Tiefe je nach Material bekannt sind.

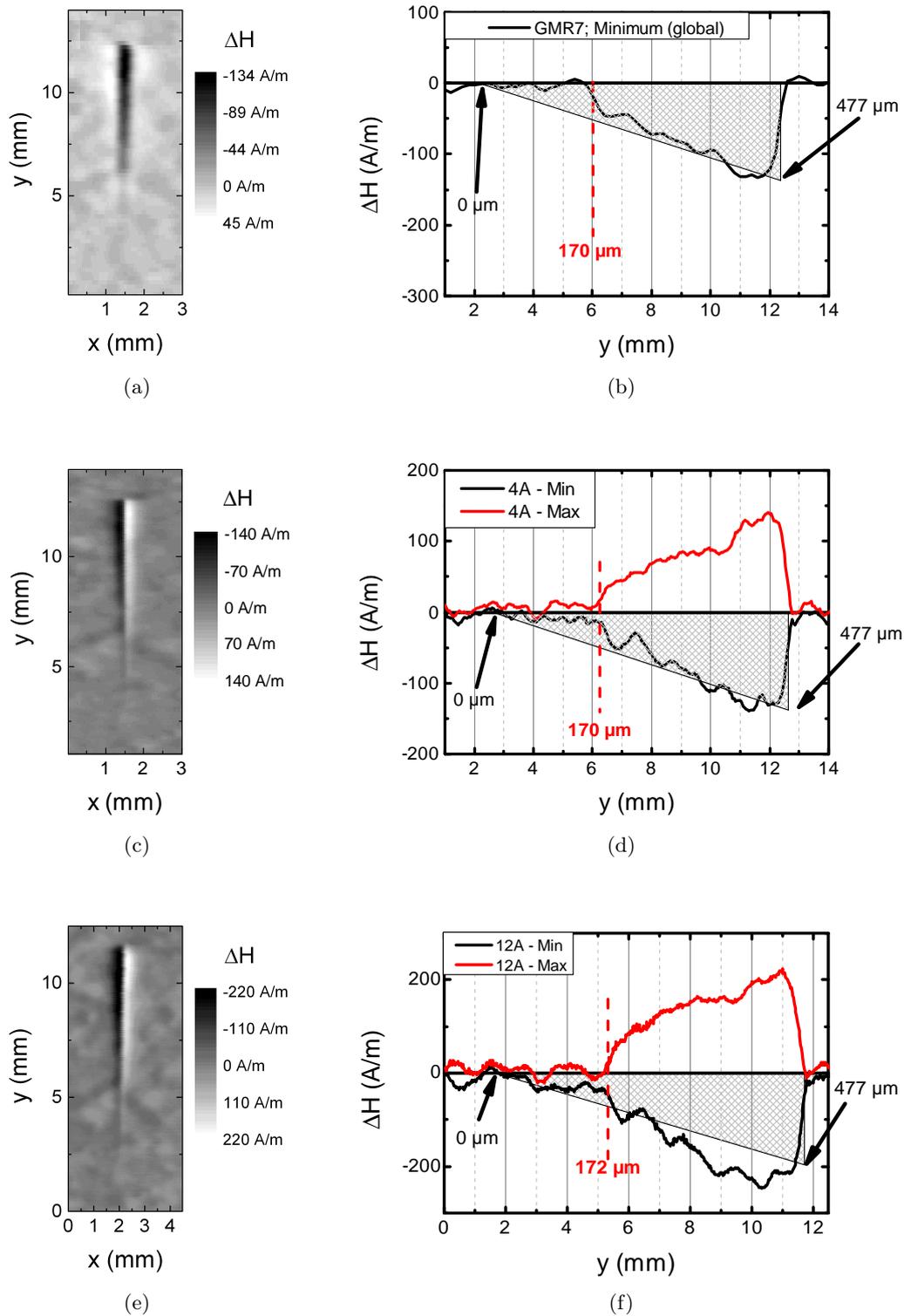


Abbildung 6.21: GMR-Streufeldmessungen der *Rampennut* als Flächenscans sowie Abbildung der Maxima und Minima der Defektsignale in Abhängigkeit von y für die Gradientensensoren GMR7 (a) & (b), 4A (c) & (d) und 12A (e) & (f).

6.5 Platte mit natürlichen Fehlern

Neben Probekörpern mit künstlich eingebrachten Fehlern ist eine Platte mit natürlichen Fehlern, wie sie bei Wirbelstromschulungen eingesetzt werden, mit drei Verfahren - Magnetpulver-, Wirbelstrom- und GMR-Streufeldprüfung - untersucht worden. Siehe hierzu Abb. 6.22.

Damit ein Vergleich aller drei Verfahren unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden konnte, wurde nur eine Feldrichtung angelegt. Da der Wirbelstromsensor KDS 2-2 ein Gradientensensor ist, ist auch dieser nur auf eine Richtung empfindlich. Mit allen drei Verfahren lassen sich markante Rissbereiche auf beiden Seiten der Platte (in der Abbildung mit Seite 1 und Seite 2 benannt) detektieren, welche in der Abbildung durch rote Ellipsen hervorgehoben sind. Die Magnetpulverprüfung und die GMR-Prüfung sind empfindlicher auf die Materialeigenschaften, jedoch besitzen sie auch aus diesem Grund ein größeres Rauschen, welches der Prüfer von wirklichen Defektsignalen unterscheiden muss.

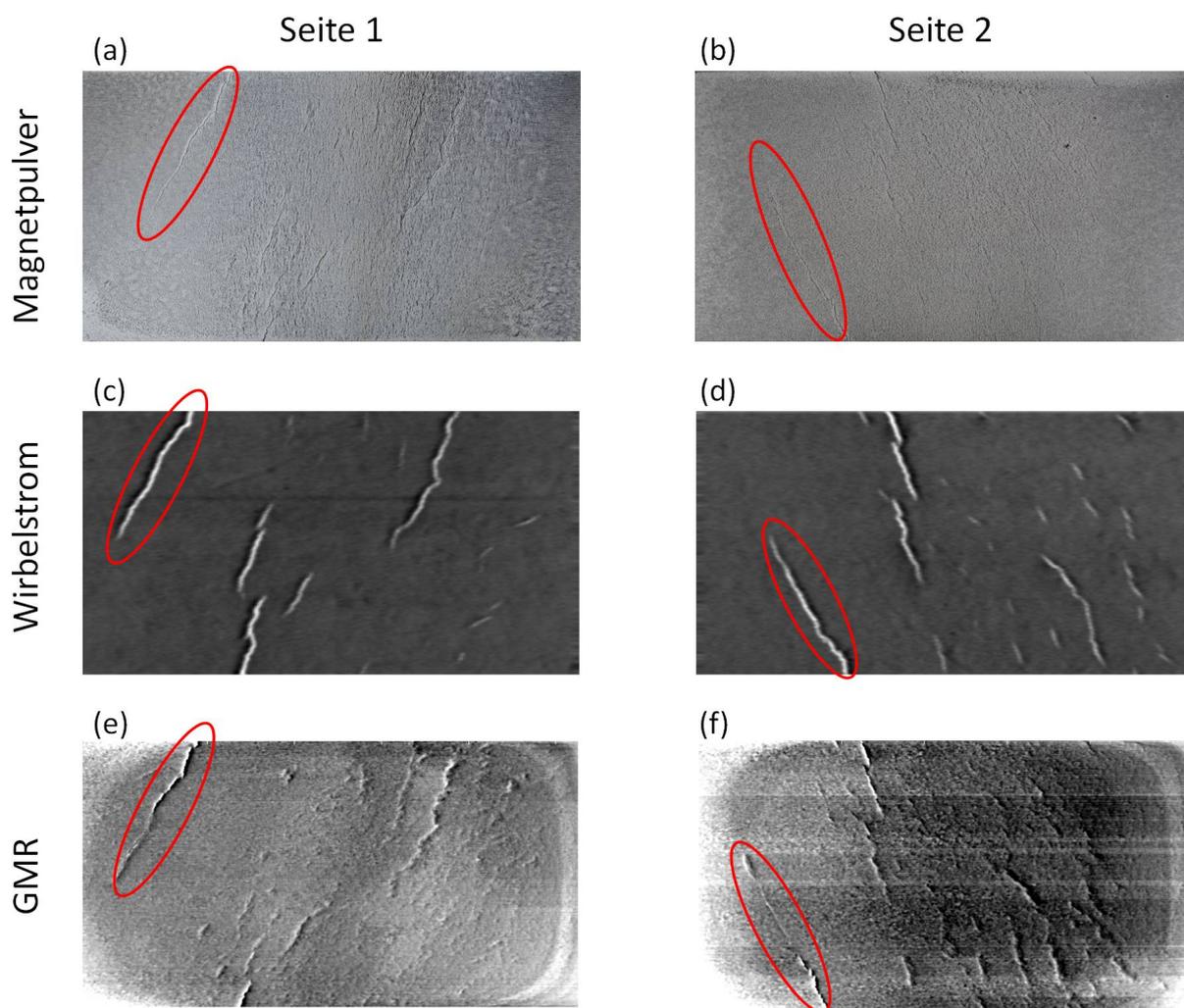


Abbildung 6.22: Rissplatte mit natürlichen Schleifbrandrissen in der Oberfläche: (a) und (b) Magnetpulverprüfung der beiden Seiten. Wirbelstrommessungen mit dem Gradientensensor KDS 2-2 bei einer Prüffrequenz von $f = 490$ kHz sind für den Y-Kanal als Graustufendarstellung für die Seite 1 in (c) bzw. für Seite 2 in (d) dargestellt. (e) und (f) sind die entsprechenden GMR-Streufeldmessungen mit dem Gradientensensor 4A.

6.6 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

Werden die verschiedenen Verfahren miteinander verglichen, ergeben sich Tendenzen hinsichtlich verschiedener Kriterien, die die Grenzen eines Verfahrens darstellen. Dies sind z.B. die Ortsauflösung, die Detektionsgrenze in Bezug auf die Defekttiefe und die Fähigkeit, die Prüfung automatisiert einzusetzen, bzw. der zur Prüfung benötigte Messaufbau. Des Weiteren ist bei jeder Prüfung sowie dem zu prüfenden Werkstoff zu berücksichtigen, dass Eigenschaften wie die Oberflächenbeschaffenheit, Materialparameter und Messaufbau in Bezug auf Distanz zum Objekt, Geschwindigkeit bzw. Prüfeinstellung der eingesetzten Instrumente die Detektion von Oberflächendefekten hinsichtlich Ortsauflösung und Detektionsgrenze (Defekttiefe) sehr stark beeinflussen können. Auch kann nicht mit jeder Methode gleichermaßen eine kostengünstige, schnelle automatisierte Prüfeinrichtung, gerade für die industrielle Anwendung ist dies von Bedeutung, realisiert werden.

In den vorhergehenden Abschnitten wurden vier verschiedene Prüfmethode auf Ortsauflösung und Detektionsgrenze (Defekttiefe) hin untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vergleichs zusammengefasst dargestellt. Zusätzlich werden Aussagen zu den Signalen und ihre Weiterverarbeitung und -bewertung getroffen sowie die Komplexität der Prüfmethode selbst im Vergleich der Methoden beleuchtet. Zudem werden die wichtigsten Punkte in der Tabelle 6.1 hervorgehoben.

Ortsauflösung: Die Magnetpulverprüfung ist bezüglich ferromagnetischer Probekörper ein Verfahren, welches eine sehr gute Ortsauflösung besitzt. Mit diesem Verfahren lassen sich Defekte, deren Abstand etwa $90\ \mu\text{m}$ beträgt, trennen. Grund für dieses sehr gute Auflösungsvermögen ist die Partikelgröße des eingesetzten Magnetpulvers. Diese Partikel, deren Durchmesser kleiner als $1\ \mu\text{m}$ ist, lagern sich direkt an den Rissen an. Die lokal angeregte Thermografie verfügt ebenfalls über eine sehr gute Ortsauflösung. Hier sind das Kamerasystem und die gewählte Optik sowie die eingesetzte Laserleistung und Scangeschwindigkeit die limitierenden Größen. Eine Trennung, die als sicher gilt, wurde von Dr. Ziegler für den Probekörper *Kreuznut* mit $150\ \mu\text{m}$ angegeben. Allerdings konnte anhand der *Rissplatte 1* festgestellt werden, dass wesentlich geringere Abstände zwischen Defekten noch trennbar waren. Die beiden Nuten der Doppelnut hatten einen Abstand zwischen den Defektflanken von etwa $110\ \mu\text{m}$. Dieser Abstand konnte bei der richtigen Wahl der Messparameter wie Laserleistung sowie einer höher auflösenden Optik erfolgreich separiert werden. Bei der GMR-Streulflussprüfung beträgt der Liftoff $LO \approx 150\ \mu\text{m}$, wodurch die Auflösung bzw. die Separation von Defekten beeinflusst wird. Im Fall der GMR-Prüfung hängt die Auflösung zudem sehr stark von dem gewählten Sensortyp ab. Defekte mit einem Abstand von $150\ \mu\text{m}$ (GMR Typ 4A) bzw. $180\ \mu\text{m}$ (GMR Typ 12A) konnten mit den ZfP-angepassten Sensoren räumlich getrennt werden. Der Unterschied zwischen den Sensoren liegt in der unterschiedlichen Höhe der aktiven Flächen. Da es sich bei der GMR-Streulflussprüfung um das gleiche Prinzip wie bei der Magnetpulverprüfung handelt, ist durch eine Verringerung des Liftoffs LO eine weitere Verbesserung möglich, die im Bereich der Magnetpulverprüfung liegen sollten, wenn nicht sogar bessere Werte zu erreichen sind. Werden die neuen GMR-Sensorarrays (allesamt axiale Gradiometer) mit dem lateralen Gradiometer GMR7 (Trennung erfolgte ab etwa $244\ \mu\text{m}$; dies entspricht der Basislänge BL des Sensors) verglichen, ergibt sich, dass durch das verbesserte Design angepasst auf ZfP-Anwendungen die Ortsauflösung insgesamt verbessert werden konnte. Bei einem lateralen Gradiometer ist die Auswirkung der Basislänge bei $LO < 150\ \mu\text{m}$ entscheidend für die Trennung. Die Wirbelstromprüfung lieferte aufgrund der Querschnittsfläche der eingesetzten Spulen Werte für die Auflösung von über $600\ \mu\text{m}$ Distanz von Fehler zu Fehler.

Detektionsgrenze Defekttiefe: Die Detektionsgrenze in Bezug auf die Defekttiefe schwankt in Abhängigkeit von den Messparametern und dem geprüften Material erheblich. Für die Magnetpulverprüfung können Tiefen ab $30\ \mu\text{m}$ sicher detektiert werden, wobei auch geringere Tiefen ab $10\ \mu\text{m}$ im

Ansatz zu detektieren sind. Mit der Wirbelstromprüfung lassen sich bei den verwendeten Probekörpern Defekttiefen ab $10\ \mu\text{m}$ sowohl mit einer Spezialsonde der BAM als auch mit einem kommerziellen Sensor (KDS 2-2, Rohmann) detektieren. Bei der Thermografie ist eine sichere Aussage in Bezug auf die Tiefe der Defekte nur im Zusammenhang mit den gewählten Prüfparametern möglich. Je nach Lasergeschwindigkeit und -leistung schwanken die Werte erheblich. Bei angepasster Wahl der Parameter an das Prüfproblem sind aber schon Tiefen von etwa $10\ \mu\text{m}$ aufzufinden. Die Detektionsgrenze bei der GMR-Streufungsprüfung hängt sehr stark vom Material ab. Hier wirken sich magnetische Einflüsse wie Permeabilitätsschwankung sowie die Oberflächenbeschaffenheit auf die Detektion aus. Im Fall des Probekörpers *Rampennut* beträgt die Detektionsgrenze $170\ \mu\text{m}$. Bei der *Rissplatte 1* (Baustahl ST37), deren Oberfläche poliert wurde, war die Detektion der $44\ \mu\text{m}$ tiefen Nut mit den GMR-Sensoren GMR7 (laterales Gradiometer) sowie den Sensorarrays 12A, 4A und 3A (axiale Gradiometer) möglich. Mit dem GMR-Sensor 4B, obwohl empfindlicher als die Sensoren des Typs A, war erst ab einer Nuttiefe von $110\ \mu\text{m}$ eine sichere Detektion möglich. Bei dem NVE-Sensor AB001-02 (kommerzieller GMR-Sensor, welcher nicht auf ZfP-Anwendungen (oberflächennahe Detektion) ausgelegt ist) ließen sich die Nuten erst ab einer Tiefe von $380\ \mu\text{m}$ mit einem SNR von 1,7 nachweisen. Werden hingegen Materialien mit gehärteten Oberflächen, wie z.B. die Lagerschalenringe, untersucht, lassen sich Defekte mit Tiefen in der Größenordnung von etwa $10\ \mu\text{m}$ finden (siehe hierzu das noch folgende Kap. 9).

Bewertung der Signale: Bei der GMR-Streufungsprüfung tritt im Vergleich zur TT und ET keine Sättigung der Streufeldamplitude in Abhängigkeit von der Tiefe auf (lediglich die empfindlicheren Sensoren des Typs B weisen eine Sättigung bzw. Asymmetrie der Signale auf). Das bedeutet, dass sich die GMR-Messdaten für eine Rekonstruktion der Rissgeometrie sehr gut eignen. Zudem weisen die GMR-Messdaten im Vergleich zur TT nur eine geringe Abhängigkeit von der Messgeschwindigkeit auf. TT und ET können je nach Prüfanordnung und -parametern sehr schnell zu gesättigten Signalen führen, obwohl eine unterschiedliche Tiefe der Nuten vorliegt. Zwar kann eine Anpassung durchgeführt werden, allerdings sind vor einer Prüfung die Grenzen meistens nicht bekannt, sodass bei anschließender Bewertung nicht gesichert ist, dass das Signal mit einer bestimmten Defektgröße korreliert. Die MT scheidet bei der Bewertung der Anzeigen in Bezug auf die Rissgeometrie aus. Nur die Länge kann mit diesem Verfahren abgeschätzt werden. Es ist somit das einzige Verfahren, das quantitativ keinen direkten physikalischen Zusammenhang zur Defektgeometrie, insbesondere die Tiefe, liefern kann. Die Anhäufung von Partikeln ist zu ungenau und kein Maß für die Stärke des Feldes, welches abhängig von der Defektgeometrie ist.

Messaufbau: Unterschiedlich ist ebenfalls die Komplexität der Messaufbauten, die für die einzelnen Verfahren benötigt werden. Für die Magnetpulverprüfung wird wie bei der GMR-Prüfung eine Magnetfeldquelle benötigt. Die GMR-Prüfung erfordert zudem ein zusätzliches Auslesegerät für die Messsignale. Ein großer Vorteil der GMR-Prüfung liegt in der Verwendung von Arrays. Hierdurch können Prüfzeiten erheblich verkürzt werden. Vorteilhaft ist zudem, dass die GMR-Streufungsprüfung eine im Vergleich zur ET sehr einfache Elektronik zur Signalverstärkung benötigt. Dadurch lassen sich Kosten sehr stark reduzieren - ein wichtiger Punkt für eine industrielle Anwendung. Im Fall der ET ist ein Wirbelstrom-Auslesegerät ausreichend, um die Messdaten aufzuzeichnen. Allerdings gibt es auf dem Markt nur wenige Geräte, die Mehrkanalwirbelstrom verarbeiten können. Geräte, die bis zu 32 Kanäle gleichzeitig verarbeiten, sind sehr teuer und somit für viele Anwendungen nicht rentabel, obwohl durch die Verwendung eines Arrays die Prüfzeit erheblich verringert werden könnte. Bei der TT ist ein Laser mit einer hohen Leistung nötig. Das bedeutet, dass dieser Laser nur in speziell gesicherten Bereichen eingesetzt werden darf und im Vergleich zu den anderen Methoden nicht im freien Gelände angewandt werden kann. Aufgrund der hohen Laserleistungen müssen Maßnahmen für den Arbeitsschutz ergriffen werden. Zudem können die hohen Energien, die zur Anregung eingesetzt werden, zu unerwünschten

Nebeneffekten wie einer Materialumwandlung führen. Auch ist die Detektionsgrenze sehr stark von der Lasergeschwindigkeit abhängig. Im Vergleich hierzu hat sich bei der GMR-Prüfung gezeigt, dass mit höherer Messgeschwindigkeit eine leichte Zunahme der Streufeldsignale erreicht wird; das genaue Gegenteil zur TT, bei der eine Zunahme zu einer Verschlechterung der Detektion von Mikrorissen führt

Insgesamt betrachtet hat jedes Verfahren Stärken und Schwächen. Es ist dem Anwender je nach Prüfproblem sowie den Erfordernissen an die Prüfgenauigkeit schlussendlich überlassen, welches Verfahren für ihn die geeignete Wahl ist. Allerdings ist die GMR-Streufeldprüfung in Bezug auf eine Rissbewertung, die die Fehlergeometrie mit einbezieht, zuverlässiger als die anderen vorgestellten Verfahren. Zudem lassen sich mit diesem Verfahren auch Oberflächenstrukturen sowie Permeabilitätsschwankungen feststellen. Solche Schwankungen, z.B. aufgrund von Gefügeänderungen, können auch Hinweise geben, an welchen Stellen Defekte entstehen. Das Verfahren kann demzufolge für eine Früherkennung sowie zur Untersuchung von Rissentstehung eingesetzt werden.

Verfahren	MT	TT	ET	GMR
Ortsauflösung	90 μm	150 μm [194] < 100 μm bei <i>RPI</i>	600 μm (Spule)	150 μm (4A) 244 μm (GMR7) abhängig von <i>LO</i> & <i>BL</i>
Detektionsgrenze Defekttiefe	$\approx 30 \mu\text{m}$ bei <i>RPI</i>	$\approx 10 \mu\text{m}$ bei <i>RPI</i> stark abhängig von v_L und Laserleistung	$\approx 10 \mu\text{m}$ mit Spezialsonde	44 μm bei <i>RPI</i> abhängig von <i>LO</i> 170 μm bei Rampe mit GMR7, 4A, 12A 380 μm mit NVE AB001-02 10 μm bei POD-Ringen (Kap. 9)
Signalbewertung Rissgeometrie	nur Länge	abhängig von Laserleistung und -geschwindigkeit	abhängig von Anregung Sättigung früh möglich	geeignet für Rekonstruktion abhängig von Sensortyp und Anregung
exp. Aufbau	Einheit zur Magnetisierung Prüfmittel	Laser (Schutzklasse) Kamera und opt. Instrumente	Spulensystem Auslesegerät	GMR-Sensor lokale Anregung Auslesegerät
Kommentare	FM	hohe Energien Material- umwandlung	Leitfähigkeit	FM

Tabelle 6.1: Vergleich der verschiedenen Verfahren hinsichtlich Ortsauflösung und Tiefenaussage. Die Abkürzung *RPI* ist die Bezeichnung für den Probekörper *Rissplatte 1* (siehe Abschnitt 6.2). FM bezieht sich darauf, dass bei der Streufeldprüfung nur ferromagnetische Werkstücke infrage kommen.

7 Lokale Magnetisierungseinheit

Bei der Magnetpulverprüfung muss der Prüfkörper stark aufmagnetisiert werden. Dies geschieht, indem dieser in eine Magnetisierungsbank eingespannt und global ein Magnetfeld angelegt wird. Die Norm DIN EN ISO 4493-2 [56] schreibt vor, dass während des Besprühens mit Magnetpulver eine tangentielle Magnetfeldstärke von mindestens 2 kA/m an der Oberfläche vorliegen muss. Dies hat zur Folge, dass nach der Prüfung in den meisten Fällen eine Entmagnetisierung durchgeführt werden muss.

Im Fall der GMR-Streufussprüfung wurden die Probekörper in den Voruntersuchungen (siehe Kap. 4) ebenfalls einem starken Magnetfeld ausgesetzt und im Anschluss die remanente Magnetisierung als intern anliegendes Magnetfeld für die Erzeugung von Streufeldern ausgenutzt. GMR-Sensoren sind empfindlich genug, um bei schwächeren remanenten Feldern zu messen. Die Nachteile dieser Methode sind geometriebedingte starke Hintergrundfelder des Prüfkörpers¹ und die Unkenntnis des sich tatsächlich am Ort des Defektes befindlichen Magnetfeldes. Gerade die Hintergrundfelder sind beim Einsatz von Magnetfeldsensoren zu berücksichtigen. Durch hohe Hintergrundfelder wird der Arbeitspunkt der Sensorkennlinie hin zum gesättigten Bereich verschoben. Dadurch ist bei zu hohen Feldern der Verlauf der Kennlinie nicht mehr linear und führt zu asymmetrischen Signalformen (siehe hierzu Kap. 4 bzw. Kap. 5). Zusätzlich können in einem weiteren Arbeitsschritt die gesammelten Daten genutzt werden, um eine Rekonstruktion der Rissparameter durchzuführen. Hierfür ist die Kenntnis der magnetischen Eigenschaften des Prüfkörpers und der Stärke des am Defekt anliegenden Magnetfeldes nötig [32, 196]. Ist dies nicht bekannt, nimmt die Aussagekraft der Rekonstruktion sehr stark ab.

Um diese beiden Probleme zu umgehen, werden in diesem Kapitel lokale Anregungseinheiten (Joch) mit integriertem GMR-Sensor vorgestellt, wodurch die Steuerung des internen Magnetfeldes unterhalb der GMR-Sensoren möglich ist. Zudem werden Simulationen und Messungen miteinander verglichen. Die Simulationen wurden zum Teil mit der kommerziellen FEM-Software Opera von *Vectorfields* durchgeführt. Die Joche sowie die Halterungen wurden an der BAM designt und gefertigt. Ziel hierbei war es, insbesondere für eine industrielle Anwendung, geeignete Anregungseinheiten herzustellen.

¹Eine aufmagnetisierte Platte verhält sich ähnlich zu einem Permanentmagneten mit Nord- und Südpol.

7.1 Prototyp und FEM-Simulation

Für erste Voruntersuchungen wurde ein Joch aufgebaut, welches in Abb. 7.1 gezeigt ist. Dieses Joch besteht aus Baustahl S235JR+AR (alte Bezeichnung ST37). Die Fläche der Pole beträgt $Länge \times Breite = 10 \times 5 \text{ mm}^2$ und der Abstand zwischen den beiden Polen beträgt 12 mm. Im Zwischenraum ist als Sonde ein auf einer kleinen Platte befestigter GMR-Sensor integriert. Um ein Magnetfeld zu erzeugen, befindet sich an der Oberseite des Jochs eine Spule mit insgesamt 100 Windungen.

Für eine Simulation müssen neben der Geometrie des Jochs die magnetischen Parameter berücksichtigt werden, damit die simulierten Ergebnisse die Realität abbilden, z.B. die Nichtlinearität der magnetischen Eigenschaften. Neben der Hysterese des Jochmaterials, welche einen erheblichen Einfluss auf die Anregung hat [197], ist die Kenntnis der Materialeigenschaften des zu prüfenden Objekts, im vorliegenden Fall ein Lagerschalenring aus Saarstahl 100Cr6, für die Simulation wichtig.

In Abb. 7.2 (a) ist die Prüfanordnung, wie sie in die FEM-Software eingegeben wurde, abgebildet. Im unteren Bereich ist in orange der Lagerschalenring zu erkennen. Darüber befindet sich das Joch. In diesem ist das angeregte Magnetfeld mit magentafarbenen Vektorpfeilen abgebildet. Da das Magnetfeld bestrebt ist, die magnetische Energie zu minimieren, verdichtet es sich an der Innenseite des Jochs - insbesondere an den Ecken zu erkennen. Damit sich der magnetische Kreis schließt und der magnetische Widerstand so klein wie möglich ist, konzentriert sich das Magnetfeld innerhalb des Lagerschalenrings zwischen den Polen. Dies ist durch die leichte Färbung (magenta) zu erkennen. Allerdings sind im Lagerschalenring die Vektoren nicht so ausgeprägt wie im Joch. Dies liegt an den unterschiedlichen magnetischen Materialeigenschaften. Nicht eingezeichnet in das Schaubild ist die Luftdomäne mit einer geringen Permeabilität von $\mu_r \approx 1$. Die Permeabilität des Rings und des Jochs betragen zum Vergleich $\mu_{\text{Ring}} \approx 80$ bzw. $\mu_{\text{Joch}} \approx 1500$ (in Opera voreingestellte Hysterese „tenten“ für Jochmaterial (Baustahl) verwendet). Der angelegte Strom an der Spule, welche aus $N = 100$ Windungen bestand, betrug 1 A.

In der Abbildung (b) ist zusätzlich ein Ausschnitt der FEM-Simulation (allerdings mit anderer Farbcodierung des Rings; hier grün) dargestellt. Hier ist der Unterschied des Magnetfeldes in Form von verschieden großen Vektorpfeilen aufgrund der unterschiedlichen Permeabilität und Magnetfeldstärke deutlicher zu erkennen. Auch bildet sich die Magnetfeldverdichtung an den Polecken hin zur Mitte deutlicher ab. Im Ring selbst ist der Verlauf des Magnetfeldes in der Nähe der Pole am größten und fällt dann sehr stark ab. Zudem ist hier der Verlauf nicht homogen, sondern sehr stark vom Abstand zu den Polen abhängig.

Da für eine Auswertung der Defekte und ihrer Streufelder das anliegende Magnetfeld tangential zur Prüfobjektoberfläche $H_x(z)$ in Abhängigkeit von der Tiefe in z -Richtung im Material wichtig ist, sind in Abb. 7.2 (c) zwei Kurven der tangentialen Magnetfeldstärke als Funktion der x' -Position für zwei verschiedene y' -Werte ($y' = 0 \text{ mm}$ (schwarz) und $y' = 5 \text{ mm}$ (rot)) dargestellt. Um eine Verwechslung mit einer verfahrenen Sonde zu vermeiden, werden die Positionen der Elemente innerhalb des Jochs mit y' bezeichnet. Wird die Sonde (Joch und GMR-Sensorarray) in y -Richtung verschoben, werden die

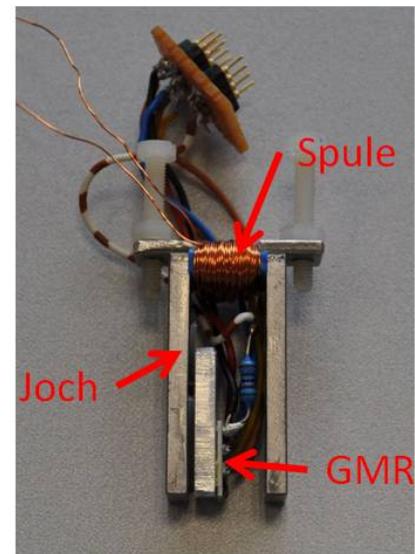


Abbildung 7.1: Prototyp der lokalen Magnetisierungseinheit mit Anregungsspule, Joch und GMR-Sensor zwischen den beiden Polen des Jochs.

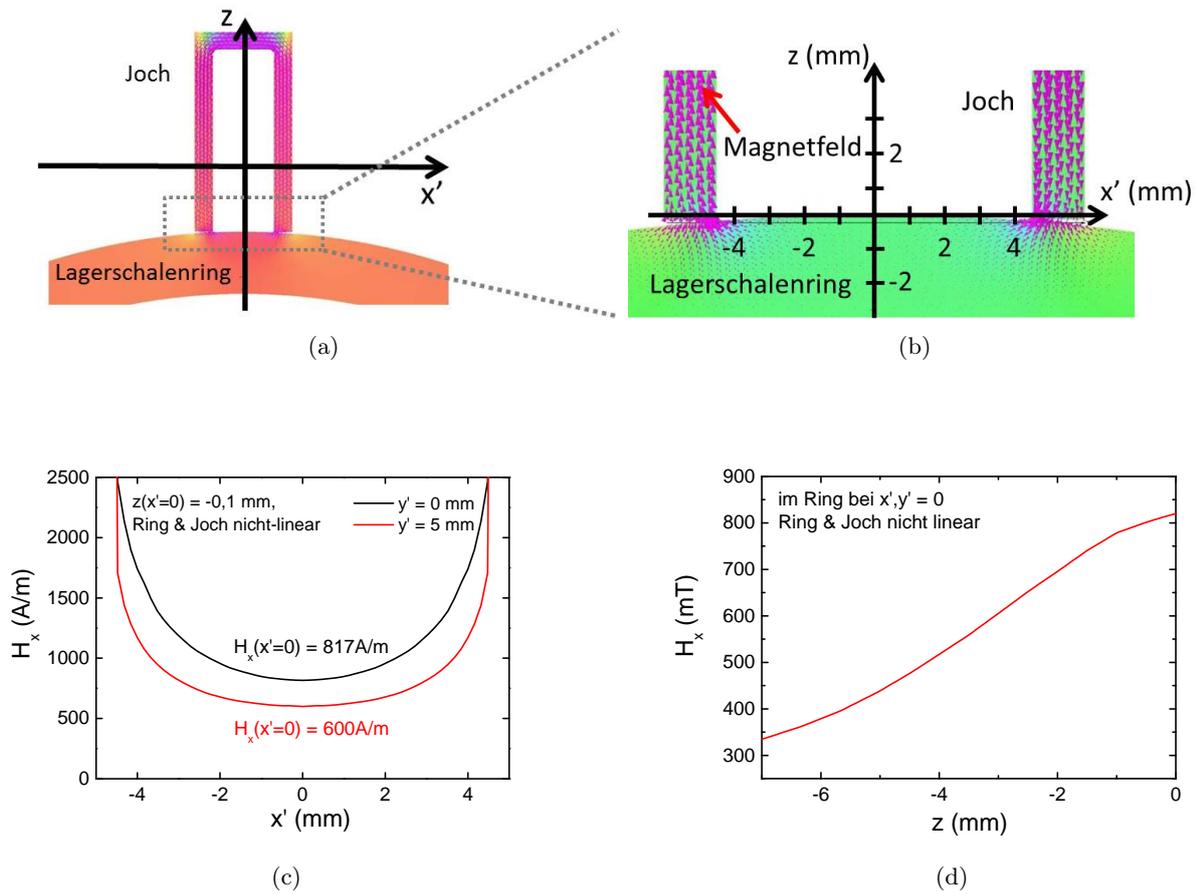


Abbildung 7.2: (a) FEM-Simulation der lokalen Anregungseinheit und eines Lagerschalenrings. (b) Ausschnitt der Simulation (andere Farbcodierung als (a)) für den Bereich der Pole. In orange (a) bzw. grün (b) ist unterhalb des Jochs der Lagerschalenring dargestellt. Innerhalb des Jochs ist das Magnetfeld, welches hier im Uhrzeigersinn verläuft, mit Vektorpfeilen (magenta) abgebildet. Der angelegte Strom zur Erzeugung des Magnetfeldes betrug bei einer Spule mit 100 Windungen $I = 1$ A. (c) Tangentiale Komponente der Magnetfeldstärke H_x in Abhängigkeit der Position x' in einer Tiefe von $z = -0,1$ mm für zwei verschiedene Spuren $y = 0$ mm und 5 mm. In das Diagramm eingefügt ist die tangentielle Magnetfeldstärke an den Positionen $y'(x' = 0 \text{ mm}, z = -0,1 \text{ mm}) = 0$ mm und $y'((x' = 0 \text{ mm}, z = -0,1 \text{ mm}) = 5$ mm. (d) Verlauf der magnetischen Feldstärke H_x in Abhängigkeit von der Tiefe z an der Position $x', y' = 0$ mm.

Positionen mit y angegeben. Gleiches gilt für die x - bzw. x' -Positionen. $x' = 0$ mm und $y' = 0$ mm, der Koordinatenursprung bezüglich des Jochs und der Sensorelemente, befinden sich genau zwischen den beiden Polen in der Mitte. Das bedeutet für $y' = 5$ mm, dass der Schnitt entlang den Polen in x -Richtung verläuft. Die Schnitte entsprechen einer Tiefe an der Position $x' = 0$ mm von $z(x' = 0) = -0,1$ mm. Durch den kürzeren Abstand zu den Polen nehmen die dargestellten H_x -Werte sehr stark zu. Dies liegt daran, dass hier das Magnetfeld durch das Joch lokal in den Ring eingebracht wird. Danach jedoch ist der Feldverlauf von Pol zu Pol nicht homogen, sondern verteilt sich im Ringvolumen, weshalb an der Stelle $x' = 0$ mm das Magnetfeld den kleinsten Wert annimmt.

Die Sensoren selbst sollen sich, wenn möglich, genau in der Mitte zwischen beiden Polen befinden. An der vorgesehenen Sensorposition ($x' = 0$ mm und $-(\text{BreitePol})/2 < y' < (\text{BreitePol})/2$) ist die tangentielle Magnetfeldstärke in einer Tiefe von $z = -0,1$ mm für $y = 0$ mm $H_x \approx 817$ A/m und für $y' = 5$ mm $H_x \approx 600$ A/m (siehe Abb. 7.2 (c)) abgebildet. In Abb. 7.2 (d) ist die tangentielle Magnetfeldstärke H_x in Abhängigkeit von der Tiefe in z -Richtung an der Position $x' = 0$ mm und $y' = 0$ mm dargestellt. Direkt an der Oberfläche des Lagerschalenrings ist das stärkste Feld zu erwarten. Da mit zunehmender Tiefe auch der Weg des Magnetfeldes von Pol zu Pol zunimmt und sich somit der magnetische Widerstand erhöht, verringert sich das Magnetfeld in Abhängigkeit von der Tiefe. Kleinere Defekte besitzen somit an ihren Flanken im Mittel ein größeres Magnetfeld als tiefere Defekte. Hierdurch werden ebenfalls die Streufeldamplituden beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist gerade für eine Rekonstruktion wichtig, da nicht mehr, wie im Fall einer globalen Magnetisierung, von einer homogenen Magnetfeldverteilung im Prüfbjekt ausgegangen werden kann.

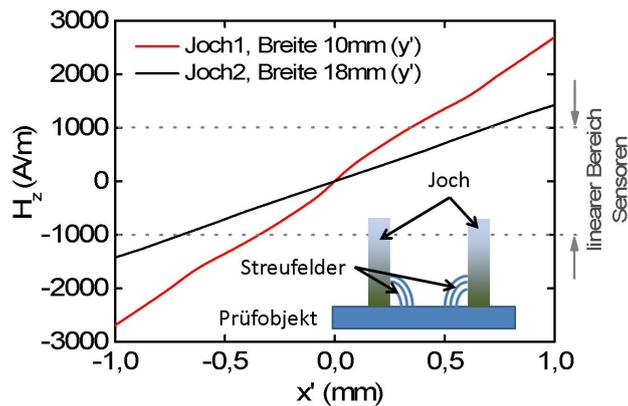


Abbildung 7.3: Normale Magnetfeldstärke H_z in einer Höhe von $z = 0,1$ mm über der zu untersuchenden Oberfläche als Funktion von der Position x' zwischen den beiden Polen. Dargestellt sind zwei Kurven für eine Breite des Jochs in y -Richtung von $d = 10$ bzw. 18 mm. Zusätzlich ist als eine untere Grenze der linearen Kennlinienbereich der GMR-Sensoren bei $H_z = \pm 1000$ A/m eingezeichnet.

Neben der Magnetfeldstärke im Material sind auch Streufelder im Luftzwischenraum der beiden Pole zu berücksichtigen. Es wurde erwähnt, dass sich die GMR-Sensoren in der Mitte zwischen den beiden Polen befinden sollen. In Abb. 7.3 ist die Normalkomponente der Magnetfeldstärke (die für die lokale Anregung eingesetzten GMR-Sensoren sind empfindlich auf H_z) entlang einer horizontalen Linie über der Oberfläche in x -Richtung für zwei verschiedene Polbreiten (rot: $d = 10$ mm, schwarz: $d = 18$ mm) dargestellt.

Genau in der Mitte zwischen den Polen, $x' = 0$ mm, befindet sich der Nulldurchgang der Normalkomponente. Mit zunehmendem Abstand von der Mitte nimmt der Betrag der Feldstärke sehr stark zu. Dieses Hintergrundfeld wird durch die Geometrie der Pole, den Übergang Pol-Material und die Sättigungen innerhalb der Polecken verursacht. Gerade die Sättigung des Feldes an den Polecken führt

aufgrund der Hysterese zu einer viel kleineren Permeabilität in diesem Bereich des Jochs. Dadurch wird der Übergang zwischen Luft und Material günstiger. Zudem wirkt sich der Liftoff zwischen Joch und Lagerschalenring auf die Streufelder aus. Dem Diagramm ist zur Veranschaulichung eine Skizze hinzugefügt, die das Streufeld am Joch abbildet.

Da die während dieser Arbeit verwendeten Sensoren eine Kennlinie besitzen, deren Sättigung bei Magnetfeldstärken von etwa ± 1 kA/m (Typ A-Sensoren erst ab ± 2.3 kA/m, siehe Kap. 5) einsetzt, ist eine genaue Platzierung der Sensoren an der Position $x' = 0$ mm wichtig. Schon kleine Verschiebungen von wenigen 100 μm führen zu einer Verschiebung des Sensorarbeitspunktes in der Hysterese-Kennlinie hin zur Sättigung. Dadurch ist nicht mehr gewährleistet, dass die zusätzlich auftretenden Streufelder von Defekten noch im linearen Kennlinienbereich liegen. Gerade bei Gradiometern, bei denen keine Kenntnis der Hintergrundfelder vorliegt, wird so eine Umrechnung der Spannungswerte in Feldwerten erschwert bzw. fehlerhaft.

7.2 Anwendung der lokalen Anregung am Beispiel des Lagerschalenrings

Im folgenden Abschnitt werden Messergebnisse vorgestellt, die mit dem Prototyp einer lokalen Anregungseinheit gewonnen wurden. Darauf aufbauend konnte eine Weiterentwicklung der lokalen Magnetisierungseinheit vorgenommen werden.

7.2.1 Vergleich zwischen Messung und analytischen Gleichungen

In Abb. 7.4 (a) ist ein Ausschnitt der GMR-Streufeldmessung des Rissbereichs von dem Probekörper *Ring 1* als Falschfarbendarstellung abgebildet. Dargestellt sind die mit dem GMR-Sensor GF792 gemessenen Magnetfeldstärken. Zur Felderzeugung wurde das in Abb. 7.1 gezeigte Joch verwendet. Der Strom der Spule mit 100 Windungen war auf $I = 1$ A eingestellt. Die Anzahl der Windungen betrug $N = 100$. Die Messung fand im Kontaktmodus statt. Um die Oberfläche vor Schleifspuren und anderen Beschädigungen zu schützen, wurde ein Tesafilm an den Polen angebracht, wodurch der Abstand der Pole zur Oberfläche etwa 10 μm betrug.

Bei der verwendeten Farbskala lassen sich alle vier Defekte (Nuten mit einer Tiefe von 42 (45° verdreht), 40, 70 und 170 μm) erkennen. Zudem ist im unteren Bildabschnitt ein blauer Streifen zu erkennen. Dieser wird durch die Kennlinie des GMR-Sensors hervorgerufen. Die Messung startete bei negativen y -Werten. Wenn der Sensor das erste Mal dem hohen Streufeld der 170 μm tiefen Nut ausgesetzt ist, kommt es innerhalb der Mäanderstruktur zu Umklappprozessen, wodurch sich der Zustand im Nullfeld verändert. Dadurch ändert sich der GMR-Widerstand und der konstante Offset verschiebt sich.

Zusätzlich ist im Graphen eine schwarze Linie über die vier Nuten eingezeichnet. Diese Linie stellt den Linienscan in Abb. 7.4 (b) dar. Die 45° -rotierte Nut wird in diesem Linienscan gerade noch aufgelöst. Die anderen drei Nuten heben sich deutlich vom Hintergrund ab. Die Signale, vor allem für die 170 μm Nut, zeigen jedoch ein asymmetrisches Verhalten. Siehe hierzu für weitere Details zur Asymmetrie der Messsignale Kap. 5.

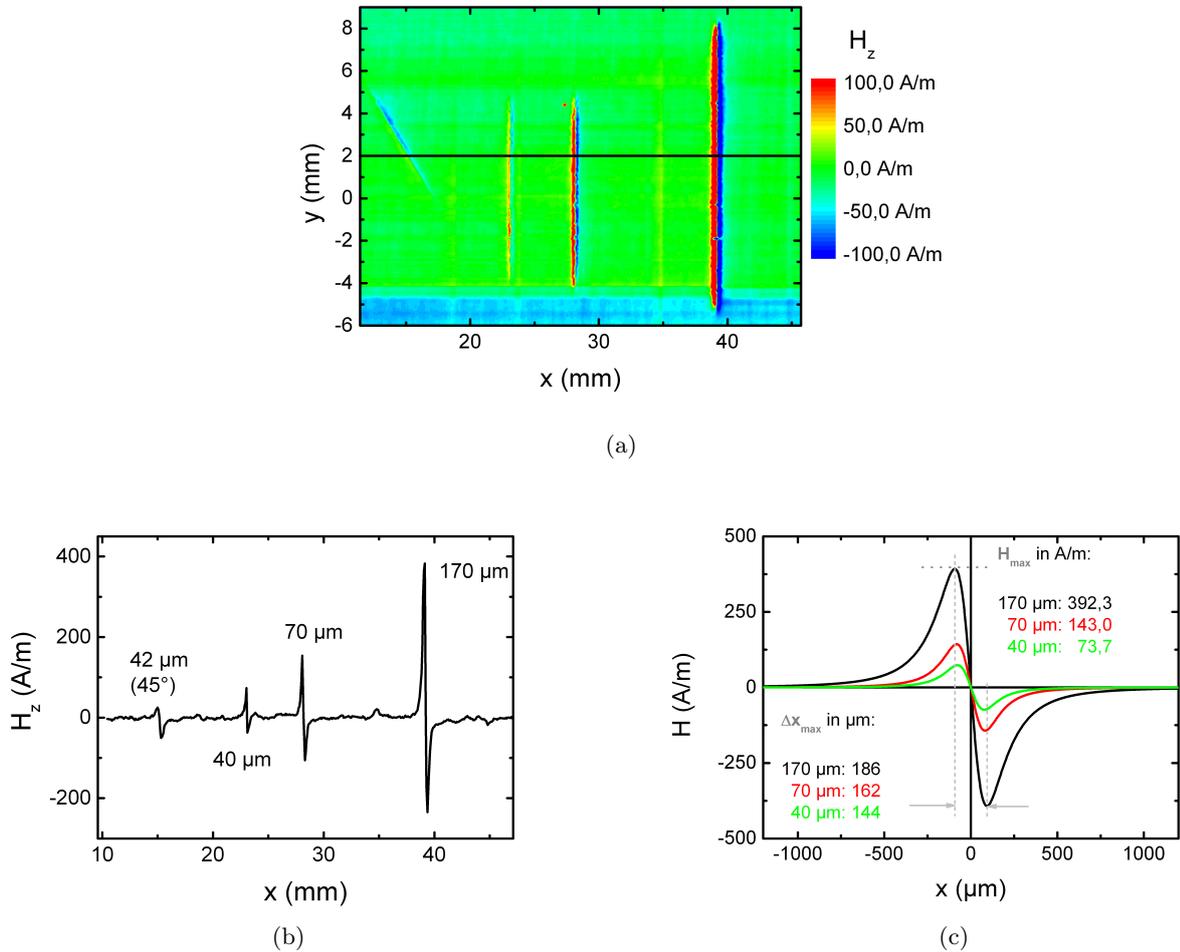


Abbildung 7.4: (a) Ausschnitt eines Flächenscans vom Rissbereich des Probekörpers *Ring 1* als Falschfarbendarstellung. Für die Messung wurden das Magnetometer GF792 und die lokale Anregungseinheit verwendet. Bei $y = 2$ mm ist eine schwarze Linie eingezeichnet. Diese bezieht sich auf den in (b) dargestellten Linienscan. Hier ist die normale Komponente der Magnetfeldstärke H_z als Funktion von x für $y = 2$ mm dargestellt. (c) zeigt simulierte Feldverläufe für die Nuten mit einer Tiefe von 40 (grün), 70 (rot) und 170 μm (schwarz). Diese magnetischen Streufelder wurden mit den analytischen Gleichungen von Shcherbinin simuliert (Kap. 2).

In der Abb. 7.4 (c) sind die analytisch simulierten Streufelder der drei senkrechten Nuten gezeigt. Die schwarzen Kurven entsprechen dem Streufeldverlauf der 170 μm tiefen Nut, die roten der 70 μm und die grünen der 40 μm tiefen Nut. Für die analytischen Gleichungen wurde eine Permeabilität von $\mu_r = 80$ und ein tangential anliegendes Feld von 817 A/m angenommen (anliegendes Feld im Material in einer Tiefe von 0,1 mm; berechnet durch FEM, siehe Abb. 7.2). Bei dem verwendeten Wert des internen Magnetfeldes muss für die analytischen Simulationen angenommen werden, dass das Magnetfeld im Material homogen verteilt ist (Kap. 2.2.1). Dies ist allerdings bei einer Jochanregung mit zunehmender Materialtiefe nicht der Fall und kann zu Abweichungen zwischen analytischer Simulation und Messung führen.

Tiefe der Nut	$H_{z,\text{Experiment}}$ (A/m)	$\Delta x_{\text{Experiment}}$ (μm)	$H_{z,\text{Simulation}}$ (A/m)	$\Delta x_{\text{Simulation}}$ (μm)
170 μm	385 ± 71	256 ± 69	392	188
70 μm	151 ± 30	234 ± 88	143	162
40 μm	55 ± 9	188 ± 143	74	144

Tabelle 7.1: Amplituden der maximalen magnetischen Feldstärke H_z und Abstände der Extrema Δx der experimentellen GMR-Streufeldwerte des Rings 1 für die Nuten mit einer Tiefe von 40, 70 und 170 μm im Vergleich zu den durch Simulationen (analytisch) berechneten Werten.

In Tabelle 7.1 sind die Streufeldmaxima H und die Abstände zwischen den Extrema Δx für die Messung und die Simulation aufgelistet. Die Streufelder der 170 μm und 70 μm tiefen Nuten können sehr gut wiedergegeben werden und liegen für die Messung und die Simulation lediglich 3,2% bzw. 4,7% auseinander. Für die Nut mit einer Tiefe von 40 μm ergibt sich ein Unterschied von 34,5%. Hierbei ist allerdings der stärkere Einfluss des Rauschens zu berücksichtigen.

Eine Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulationen bei den Abständen Δx ist allerdings für alle drei Nuten nicht zu erreichen. Die Abweichungen betragen 23,4% bis 30,8%. Hierfür ursächlich ist zum Einen die Annahme, dass die Nuten einen perfekten Quader darstellen. Allerdings besitzen die Nuten leicht abgerundete Seitenkanten im unteren Nutbereich, wodurch sich der Verlauf des anliegenden Feldes leicht verändert und schwächer wird. Zum Anderen ist der Liftoff der Elemente des GMR-Sensors GF792 nicht genau bekannt, da der Sensor aufgeklebt ist und nicht justiert werden kann (siehe zur Position der Elemente bezüglich der Platinenkante auch Abb. 3.13 in Kap. 3). Die Differenzen der Δx -Werte weisen darauf hin, dass der Liftoff größer ist, da mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche auch Δx zunimmt. Das wiederum bedeutet, dass das interne Feld größer sein muss, damit annähernd gleiche Streufeldwerte erreicht werden können. Zusätzlich muss bei der Verwendung der analytischen Lösungen berücksichtigt werden, dass die analytischen Gleichungen nur für den Fall gelten, dass ein homogenes Magnetfeld im Material anliegt. Bei der Verwendung einer Anregungseinheit nimmt allerdings das Magnetfeld mit zunehmender Tiefe ab. Eine Simulation basierend auf den analytischen Formeln, die bis auf wenige Prozent die Werte des Experiments wiedergeben, ist deshalb bei Verwendung eines Jochs als Anregung für unterschiedlich tiefe Nuten nicht möglich.

Für eine Weiterentwicklung der Anregungseinheit sind somit verschiedene Faktoren wichtig. Der Liftoff und somit die genaue Position der GMR-Elemente auf den Platinen muss bekannt sein, gerade

wenn die Daten für eine Rekonstruktion verwendet werden sollen. Der Abstand der gesamten Prüfsonde muss deshalb genauer eingestellt werden können. Hierbei ist es von Vorteil, wenn Sensorplatine und Joch separat voneinander justiert werden können. Dadurch kann auch das anregende Magnetfeld durch Änderung des Jochabstands variiert werden.

7.2.2 Abhebeeffekt Sonde - Oberfläche

In Abb. 7.4 (a) und (b) sind beidseitig neben den Rissanzeigen sehr schwach weitere markante Signale parallel zu den Defektsignalen in einem festen Abstand zu erkennen. Für eine verbesserte Ansicht ist in Abb. 7.5 der Flächenscan mit einer reduzierten Graustufenskala dargestellt. Zusätzlich wurden die markanten Stellen parallel zu den Nutanzeigen mit Pfeilen hervorgehoben. Diese befinden sich in festen Abständen zu den Streufeldanzeigen. Die Abstände zu den Nuten betragen hierbei 4,3 mm (schwarzer Pfeil) bzw. 5,5 mm. Der Abstand dieser beiden Anzeigen zueinander beträgt etwa 9,8 mm (entspricht dem Abstand der Pole zueinander). Darüber hinaus sind die Signale länger als die Nuten und zwar wiederum um etwa die Hälfte der Polbreite von 10 mm. Daraus folgt, dass das Joch selbst durch die Defekte beeinflusst wird. Zudem ist der unterschiedliche Abstand ein Zeichen dafür, dass sich der Sensor nicht genau in der Mitte zwischen den beiden Polen befindet. Im vorliegenden Fall handelte es sich bei den Anzeigen um Verschmutzungen innerhalb der Defekte, welche zu Abhebeeffekten der Pole führten und somit zu einem zusätzlichen Magnetfeldsignal.

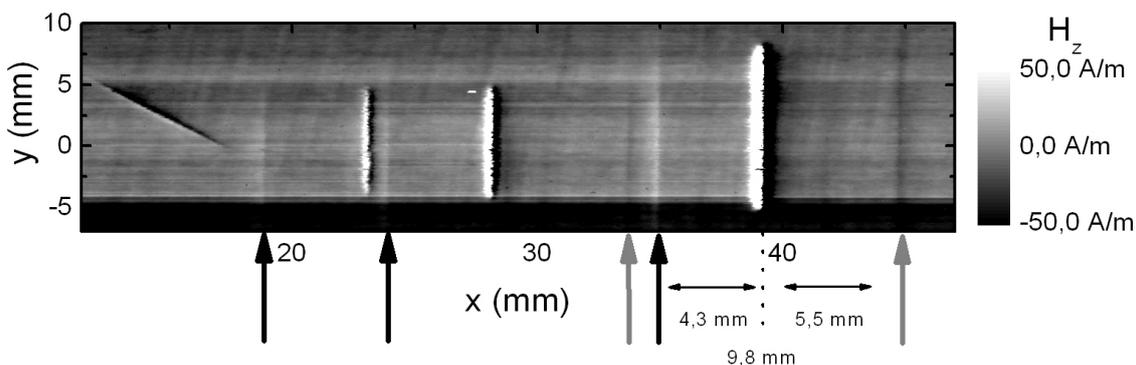


Abbildung 7.5: Flächenscan des *Rings 1* mit der lokalen Anregung und dem GMR-Sensor GF792. Die parallelen Anzeigen zu den Nuten (hervorgehoben durch zusätzliche Pfeile) werden durch Verschmutzungen im Defekt und den daraus resultierenden Abhebeeffekten der Pole hervorgerufen.

In Abb. 7.6 (a) ist ein Schema zum Abhebeeffekt und den dadurch erzeugten Hintergrundfeldern am Ort des Sensors skizziert. Abb. 7.6 (b) zeigt einen Linienscan über die Nuten. Dargestellt sind die gemessenen Magnetfeldstärken für einen Umlauf. Zum Einsatz kam wiederum das vorgestellte Joch mit dem GMR-Sensor GF792. An der Spule lag wie oben ein Strom von 1 A an. Zusätzlich wurden auf der Außenfläche des Lagerschalenrings drei Bereiche mit einer 10-lagigen Tesafilmschicht versehen. Die Dicke einer Tesafilmschicht beträgt im Mittel 10 μm , sodass insgesamt ein Abhebeeffekt von etwa 100 μm realisiert wurde.

Zwei Bereiche in Abb. 7.6 (b), der Bereich mit den Nuten und der Tesafilmbereich, sind mit roten Rechtecken markiert. Außerdem ist ein oranger Kreis eingezeichnet, an dem sich vor der Messung und somit vor der Rotation das Joch befand, als der Strom eingeschaltet wurde. Dadurch wird eine starke Magnetisierung im Ring eingepreßt, die auch nach einem Umlauf mit eingeschaltetem Joch nicht komplett verschwindet. Eine ähnlich starke Magnetisierung tritt auch auf, wenn das Joch vor

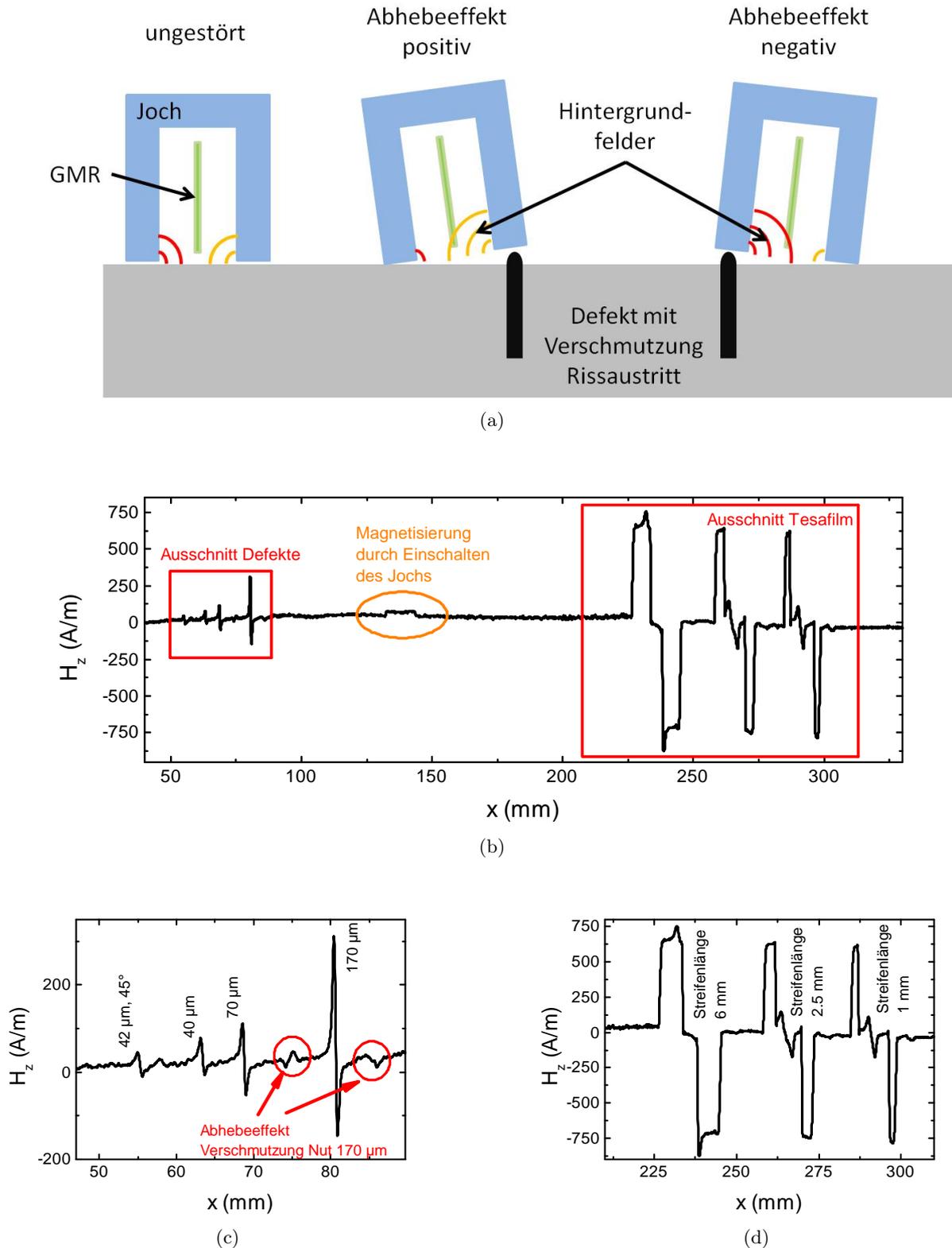


Abbildung 7.6: (a) Schema der Hintergrundfelder durch die Abhebung des Jochs. (b) Verlauf der Magnetfeldstärke H_z entlang der Nuten sowie dreier Bereiche mit Tesafilm (Streifenlänge 6 mm, 2,5 mm und 1 mm) zur Simulation des Abhebeeffekts aufgrund von Verschmutzungen der Nuten. Dargestellt ist der Linienscan für einen Abschnitt des Ringumfangs. (c) Ausschnitt des Bereichs der Nuten. Zusätzlich sind mit roten Kreisen die Bereiche hervorgehoben, bei denen sich das Joch aufgrund der Verschmutzung der Nut 170 μm von der Oberfläche abhebt. (d) Bereich mit den Tesafilmstreifen (Höhe der Streifen etwa 100 μm).

dem Aufsetzen eingeschaltet wird. Um die Aufmagnetisierung im Ring zu verhindern, ist, während sich der Ring in Bewegung befindet, eine langsame Erhöhung des Spulenstroms von Vorteil.

In Abb. 7.6 (c) sind die Rissanzeigen der Nuten dargestellt. Mit roten Kreisen sind die Bereiche hervorgehoben, bei denen der GMR-Sensor die Abhebeeefekte durch die Verschmutzung registriert. Die Signale sind etwa 4,3 mm vor und 5,5 mm nach den Defekten zu sehen. Dies entspricht der schon oben erwähnten Distanz zwischen Sensor und Pol. In Abb. 7.6 (d) ist der Bereich der drei Tesafilme abgebildet. Die Bereiche unterscheiden sich in der Breite der Tesafilmstreifen von 6 mm, 2,5 mm und 1 mm.

Das Abhebesignal besitzt wie ein Defektsignal sowohl ein Maximum als auch ein Minimum, allerdings sind diese räumlich voneinander getrennt und zwar genau um dem Abstand der Pole zueinander. Da die Tesafilme etwa 100 μm hoch sind und die Verschmutzungen der Nuten nur geringfügig über die Oberfläche hinausgehen, werden im Fall der Tesafilme viel größere Hintergrundfelder am Ort des Sensors gemessen. Die Hintergrundfelder werden dadurch erzeugt, dass sich durch den zusätzlichen Liftoff eines Pols mehr Feld im Luftraum verteilt, wodurch die Verteilung asymmetrisch wird und zusätzliche Streufelder am Ort des Sensors auftreten (siehe Abb. 7.6 (a)). Neben diesen Abhebeeefekten sind noch zwei weitere Abhebeeefekte bei den Tesafilmen zu erkennen. Diese werden durch den Sensor bzw. die Sensorplatine hervorgerufen. Dadurch erfolgt ebenfalls eine leichte Verkippung des gesamten Aufbaus Joch-Sensor, wodurch ein Hintergrundfeld erzeugt wird. Da Abhebeeefekte der Jochpole lokal auftreten und im Gegensatz zum Defektstreufeld die Maxima von den Minima getrennt sind, lassen sich Abhebesignale von Streufeldsignalen trennen. Allerdings sollten sich keine Defekte an diesen Positionen befinden, da ansonsten die Defektstreufelder zusätzlich durch die Abhebung beeinflusst werden. Außerdem kann der Liftoff des Jochs einen erheblichen Einfluss auf die interne Feldanregung besitzen. Ein zusätzlicher Liftoff führt zu einer Verringerung der internen Magnetfeldstärke [198] und muss bei einer Prüfung vermieden werden.

7.2.3 Streufeld in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

Zusätzlich zur Steuerung der Magnetfeldstärke muss untersucht werden, wie sich verschiedene Geschwindigkeiten auf die Messungen auswirken. Die Bewegung einer lokalen Anregung verursacht im Ring an einer festen Position auf der Oberfläche einen sich zeitlich verändernden magnetischen Fluss. Dadurch können Wirbelströme, wenn auch sehr kleine, erzeugt werden. Hier gilt es zu untersuchen, ob das Streufeldsignal durch die zusätzlichen Wirbelströme negativ beeinflusst wird.

Für diese Untersuchung wurden die gemessenen Streufelder der 170 μm tiefen Nut für drei verschiedene Geschwindigkeiten miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 7.7 dargestellt. Aufgetragen sind die gemessenen Magnetfeldwerte für Rotationsgeschwindigkeiten von $v = 60, 120$ und 160 deg/s . Für die Messung eingesetzt wurde in diesem Fall das Magnetometer GF792, welches empfindlich auf die Normalkomponenten der magnetischen Feldstärke H_z ist. Der Spulenstrom zur Anregung des Magnetfeldes im Lagerschalenring betrug während der Messung 1 A.

Die unterschiedlichen Offsets zwischen den Messungen können durch ein leichtes Verkappen des Jochs aufgrund der Bewegung auftreten. Da das eingesetzte Magnetometer auch stationäre Hintergrundfelder misst, sind so Verkippungen des Jochs und somit unterschiedliche Hintergrundfelder im Messsignal enthalten. Zusätzlich ist zu erkennen, wie mit zunehmender Geschwindigkeit die Signalamplitude $\Delta H_z(\text{min}, \text{max})$ ebenfalls höhere Werte annimmt. Der Anstieg zwischen der 60 deg/s-Messung und der 160 deg/s-Messung beträgt etwa 11%. Diese Ergebnisse wurden in weiteren Messungen mit noch höheren Geschwindigkeiten bestätigt, wobei eine weitere Zunahme der Geschwindigkeit das Rissignal um ca. 30% verstärkt. Gründe hierfür sind Wirbelstromeffekte im Material.

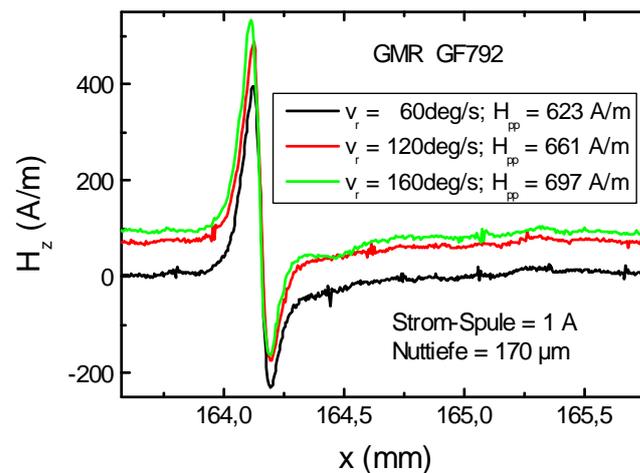


Abbildung 7.7: GMR-Signalverlauf als Funktion der Position an der Stelle einer 170 μm tiefen Nut für drei verschiedene Geschwindigkeiten.

7.2.4 Auswirkung der Bewegung auf den Motorstrom

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass durch die Bewegung der lokalen Anregungseinheit über die Probekörperoberfläche die Streufeldamplitude beeinflusst wird. Wirbelstromeffekte treten in allen leitfähigen Materialien auf, die einem sich zeitlich veränderndem Magnetfeld ausgesetzt sind. Neben dem Einfluss der entstehenden Wirbelströme auf die Messsignale muss untersucht werden, ob sich diese Wirbelströme über magnetische Kräfte bremsend auf die Bewegung auswirken. Hierzu wurde ein Lagerschalenring im Kontaktmodus mit der in Abb. 7.1 gezeigten Anregungseinheit bei einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit und verschiedenen Spulenströmen zur Anregung des Magnetfeldes bewegt. Aufgezeichnet wurde während der Messungen der mittlere Motorstrom, mit dem die Rotationsseinheit betrieben wurde, um die Bewegung zu erzeugen.

In Abb. 7.8 ist der Motorstrom als Funktion des Spulenstroms dargestellt. Hier ist für eine konstante Rotationsgeschwindigkeit in x -Richtung von $v = 6 \text{ deg/s}$ eine Zunahme des benötigten Motorstroms hin zu höheren Spulenströmen zu erkennen. Diese Zunahme ist allerdings weniger den Wirbelstromeffekten geschuldet als viel mehr den höheren Reibungsverlusten durch die stärkere Anziehung des Jochs an die Oberfläche des Lagerschalenrings. Die Wirbelstromeffekte wirken sich bei niedrigen Geschwindigkeiten von $v = 6 \text{ deg/s}$ kaum bremsend auf die Bewegung aus. Eher ist wichtig, dass die Anregungseinheit nicht im Kontaktmodus über die Oberfläche bewegt wird, sondern mit Laufrollen versehen werden sollte, wodurch die Reibung wesentlich geringer und die Bewegung kaum beeinflusst wird.

7.3 Angepasste Sondenhalterung

7.3.1 Erweiterungen zum bisherigen Aufbau

Aufbauend auf Teile der Ergebnisse im vorherigen Abschnitt wurde ein angepasster Aufbau der lokalen Anregung entwickelt (siehe Abb. 7.9), welcher mehrere Verbesserungen beinhaltet. Wiederum wurde ein Aufbau aus Stahl gewählt, damit Jochformen beliebig herstellbar sind. Gerade dieser Punkt ist für den späteren Aufbau einer automatischen Prüfanlage wichtig, da das Platzangebot hier beschränkt ist und die Konstruktion flexibel anpassbar sein muss. Zusätzlich wurden Laufrollen in den Aufbau integriert, um Reibung zu minimieren und über die Rollen den Abstand vor der Messung genau justieren

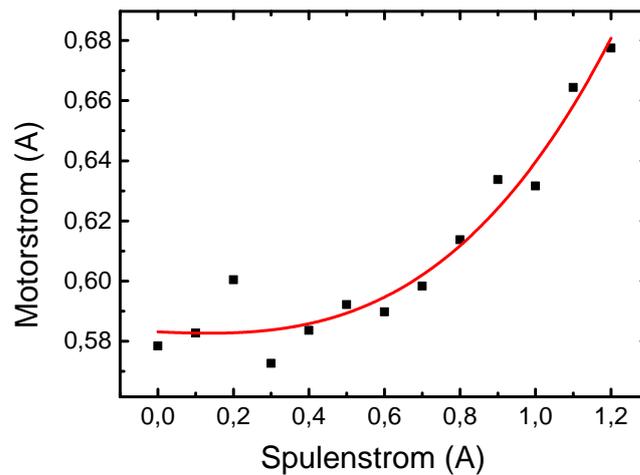


Abbildung 7.8: Motorenstrom des Rotationstisches als Funktion des angelegten Spulenstroms am Joch. Die Messung mit einer Rotationsgeschwindigkeit in x -Richtung (Umlaufrichtung) von $v = 6 \text{ deg/s}$ wurde im Kontaktmodus ohne Rollen durchgeführt.

zu können. Die Rollen wiederum sollten, soweit dies möglich ist, aus nicht-magnetischen Materialien bestehen, um einen Einfluss auf die Messung zu verhindern. Zusätzlich müssen sie eine hohe Rundlaufgenauigkeit besitzen. Damit auch die Platine justiert und in ihrer Höhe, in z -Richtung, verstellt werden kann, sind zusätzlich in die Platinenhalterung zwei Justierschrauben integriert. Eine Veränderung der x -Position der Sensoren ist nach Einbau des Sensors in das Joch nicht mehr möglich. Abb. 7.9 zeigt ein Foto der lokalen Anregungseinheit, wie sie auch später bis auf wenige Modifikationen im Labormodell eingesetzt wird (siehe Kap. 8).

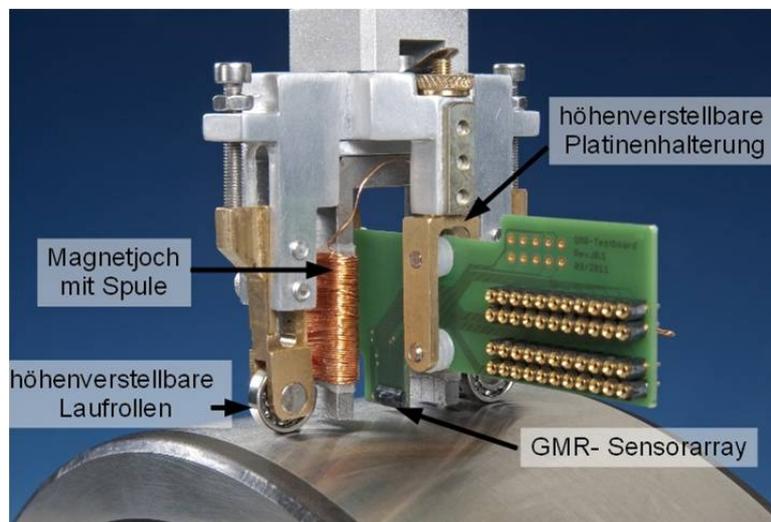


Abbildung 7.9: Erweiterter Prototyp der lokalen Anregung eingespannt in eine Halterung. Diese lässt sich über verstellbare Laufrollen in der Höhe variieren. Zusätzlich ist eine unabhängige, höhenverstellbare Platinenhalterung integriert.

7.3.2 Streufeld in Abhängigkeit von der Sensorposition

Da während der automatischen Streuflussprüfung mit diesem Joch GMR-Sensorarrays eingesetzt werden - diese befinden sich zwischen den Polen -, wird im Folgenden überprüft, ob unterhalb der Sensoren das gleiche Magnetfeld im Material vorherrscht. Falls dies nicht der Fall ist, stellt sich die Frage, inwieweit sich Abweichungen in Abhängigkeit von der Position bemerkbar machen und sich das Magnetfeld räumlich im Prüfobjekt zwischen den beiden Polen verteilt. In Abb. 7.2 (a) und (b) (siehe Abschnitt 7.1) ist das FEM-Modell der lokalen Anregung gezeigt. Betrachtet wird im Folgenden der Bereich zwischen den beiden Polen.

Damit der magnetische Widerstand klein wird, wird das Magnetfeld im Ring direkt und somit auf kürzestem Weg zwischen den beiden Polen in x -Richtung verlaufen. Allerdings breitet sich das Magnetfeld nicht geradlinig aus, sondern verteilt sich im Volumen. In Abb. 7.10 (a) ist ähnlich zur Abb. 7.2 (b) der Verlauf der magnetischen Feldstärke in einer Tiefe von 0,1 mm in x -Richtung für verschiedene y' -Positionen dargestellt. In y -Richtung, d.h. parallel zu den Polen, besitzt das anliegende Feld H_x im Zentrum ($x', y' = 0$ mm) ein Maximum und nimmt dann bei einer Verschiebung in $\pm y$ -Richtung bei fester x' -Position ab. Markiert wurden diese Positionen durch rote Punkte. Diese Punkte deuten die Positionen der GMR-Elemente eines Sensorarrays in der lokalen Anregung an (siehe hierzu auch das Schema Abb. 7.11 (a)). Das Sensorarray befindet sich parallel zu den Polen der Anregung. An diesen Stellen, siehe Abb. 7.10 (b), schwankt die Magnetfeldstärke in einer Tiefe von $z = -0,1$ mm zwischen $H_x = 600$ A/m an den Rändern ($x' = 0$ mm und $y' = \pm 5$ mm) und 817 A/m in der Mitte bei $x', y' = 0$ mm.

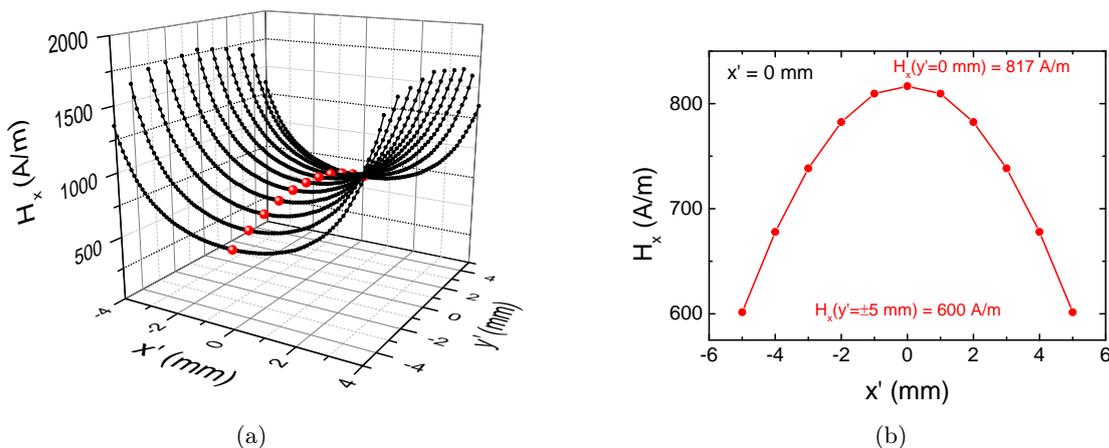


Abbildung 7.10: (a) FEM-Simulation der Magnetfeldstärke im Lagerschalenring zwischen den beiden Polen eines Jochs mit einer Breite von $d(y) = 10$ mm (siehe auch Abb. 7.2 (a)). Dargestellt ist der Verlauf der Magnetfeldstärke in Abhängigkeit von x' und y' in einer Tiefe von $z = -0,1$ mm. Die roten Punkte markieren die tangentielle Magnetfeldstärke H_x an der Position $x' = 0$ mm, abgebildet im Diagramm in (b). Dieser Verlauf entlang y' stellt die späteren Positionen der Sensorelemente eines Arrays innerhalb des Jochs dar. Die tangentielle Magnetfeldstärke variiert von 600 A/m an den Rändern ($y' = \pm 5$ mm) bis zu maximal 817 A/m in der Mitte ($y' = 0$ mm).

Die Feldverteilung im Material lässt sich experimentell jedoch nicht direkt bestimmen. Hierfür ist der Umweg über eine Messung der Streufelder abhängig von der Position der GMR-Elemente innerhalb des Jochs nötig. In Abb. 7.11 sind ein Schema der GMR-Sonde und die Ergebnisse der Streufeldmessungen für eine Nut mit einer Tiefe von $354 \mu\text{m}$ und einer Länge von 1 mm, eingebracht in einen Lagerschalenring, dargestellt. Der Ring wurde in x -Richtung derart abgerastert, dass für jedes GMR-Element

des Sensors (bzw. Kanal) ein vollständiger Flächenscan vorhanden ist, d.h. zwischen den Messspuren beträgt der Abstand $\Delta y = 0,2$ mm. Eingesetzt wurden Sensoren des Typs 4A (siehe hierzu Kap. 5) empfindlich auf die normale Feldkomponente H_z . Die betriebenen GMR-Elemente decken im vorliegenden Fall nicht die komplette Platinkante von 10,2 mm ab. Nur zwei 16er-Arrays mit einer Länge von insgesamt 6,8 mm konnten aufgrund der Messelektronik eingesetzt werden. Dies ist allerdings ausreichend, da zum Einen das angeregte Magnetfeld symmetrisch verteilt ist und zum Anderen, beginnend von der Mittelposition bei $x', y' = 0$ mm der Platine innerhalb des Jochs bis zur Position $y' = -5$ mm (einem Ende der Pole in y -Richtung), immer mindestens ein GMR-Element vorhanden ist.

Abb. 7.11 (b) zeigt die maximal gemessene Magnetfeldstärke in z -Richtung ΔH_{\max} für jede Spur y und jeden Kanal in einer Falschfarbendarstellung, auch für Spuren, in deren Verlauf das Sensorelement nicht über eine Nut bewegt wird und somit kein Streufeld detektiert (blauer Hintergrund $\Delta H_{\max} \approx 0$). Der farbige Streifen, eingebettet in blau, gibt die maximale Stärke des Magnetfeldes ΔH_{\max} der Nut in Abhängigkeit von der Spur y an. Hiervon wird für jeden Kanal das maximale Streufeld der Nut $\Delta H_{\max, \text{Streufeld}}$ bestimmt und in Abb. 7.11 (c) als Funktion des Kanals aufgetragen. Die Punkte entsprechen den ermittelten Werten für das maximale Streufeld pro Kanal. Die rote Kurve gibt den Verlauf des maximalen Streufeldes näherungsweise wieder.

Kanal 8 und 9 befinden sich links und rechts der Mitte der Platine, an der das höchste Feld im Material angeregt wird. Die maximalen Streufelder für die Kanäle 7 - 10 betragen $\Delta H_{z, \max, \text{Kanal 7}} = 376$ A/m, $\Delta H_{z, \max, \text{Kanal 8}} = 374$ A/m, $\Delta H_{z, \max, \text{Kanal 9}} = 384$ A/m und $\Delta H_{z, \max, \text{Kanal 10}} = 434$ A/m. Entfernt man sich auf der Platine von der Mitte, nimmt das angelegte Magnetfeld im Material ab (Abb. 7.10). Dies führt dazu, dass auch das Streufeld kleinere Werte annimmt. Kanal 32 befindet sich am Ende der Platine und somit projiziert auf die Pole auch an deren Ende. Hier ist das Magnetfeld im Bereich zwischen den Polen am kleinsten und das Streufeld beträgt nur noch 130 A/m. Der Abfall des Streufeldes ist stärker als der Abfall der simulierten Magnetfelder im Material ($z = -0,1$ mm) an den roten Punkten in Abb. 7.10.

Das bedeutet, dass das Magnetfeld im Material zu höheren y -Positionen stärker streut und auch in der Tiefe stärker abnimmt. Dadurch nimmt das am Defekt anliegende Magnetfeld im Mittel stärker ab, wodurch die Streufelder an diesen Positionen viel kleinere Werte annehmen werden. Dies muss für eine spätere Bewertung der Defektsignale mit berücksichtigt werden, da die Position im Joch somit einen direkten Einfluss auf die Detektionswahrscheinlichkeit von kleinen Defekten hat (siehe hierzu Kap. 9).

Ein homogeneres Magnetfeld am Ort der GMR-Elemente kann durch ein breiteres Joch mit einer größeren Ausdehnung in y -Richtung verglichen zur Länge der Messkante der Platinen erreicht werden. Für die Prüfaufgabe der in Kap. 8 vorgestellten automatischen Prüfeinrichtung war es jedoch nötig, dass die Sensorelemente die komplette Platinkante abdecken, um eine vollständige Prüfung aller zugänglichen Flächen zu ermöglichen.

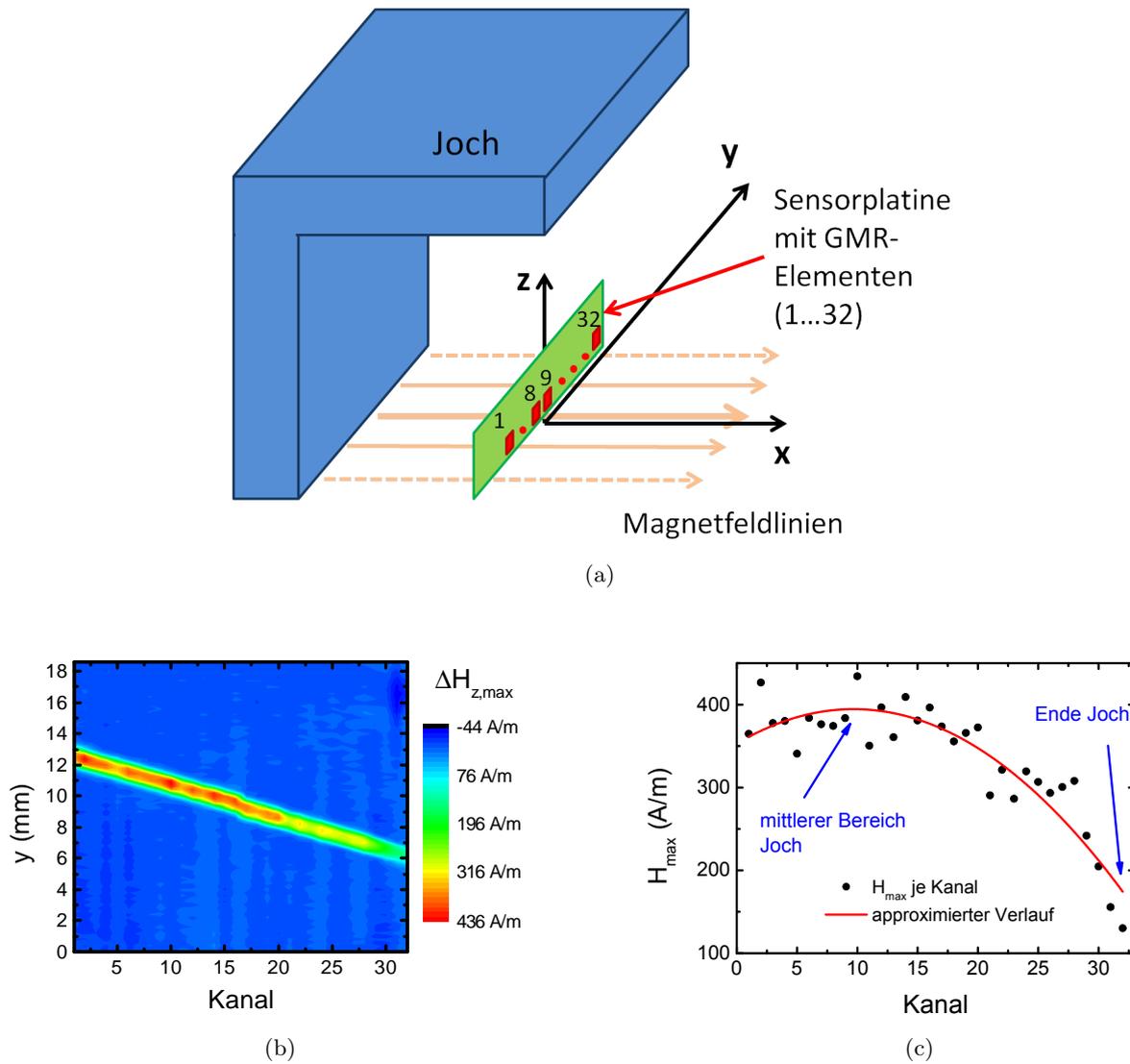


Abbildung 7.11: (a) Schema der GMR-Sonde sowie der Positionen der GMR-Elemente bezüglich des Jochs. (b) H_{\max} in Abhängigkeit vom Kanal (GMR-Elemente) und von der Position y als Falschfarbendarstellung für eine Nut mit einer Tiefe von $354 \mu\text{m}$. (c) H_{\max} für jeden Kanal. Die rote Kurve gibt den Verlauf des maximalen Feldes innerhalb des Jochs an.

8 Automatisierte Streuflussprüfung mit GMR-Sensoren

Mit dem Aufbau einer lokalen Magnetisierungseinheit (Kap. 7) mit integrierten GMR-Sensoren wurde das Ziel verfolgt, eine automatisierte Streuflussprüfung für Lagerschalenringe zu realisieren. Hierfür sollten neben einer angepassten Sondenhalterung die während dieser Arbeit optimierten GMR-Sensorarrays (Kap. 5) eingesetzt werden. Der Anspruch an die automatisierte Prüfung war, Defekte mit einer Größe von $Klaffung \times Tiefe \times Länge = 2 \times 50 \times 500 \mu\text{m}^3$ zu finden (nach Absprache mit industriellen Partnern als typische minimale Fehler klassifiziert), sowie alle Flächen des Lagerschalenrings innerhalb von 2 Minuten komplett zu prüfen. Im Folgenden wird die GMR-Prüfanlage, welche in einem Labormodell erfolgreich aufgebaut werden konnte, vorgestellt sowie auf einige Komponenten näher eingegangen.

8.1 Prüfsonde

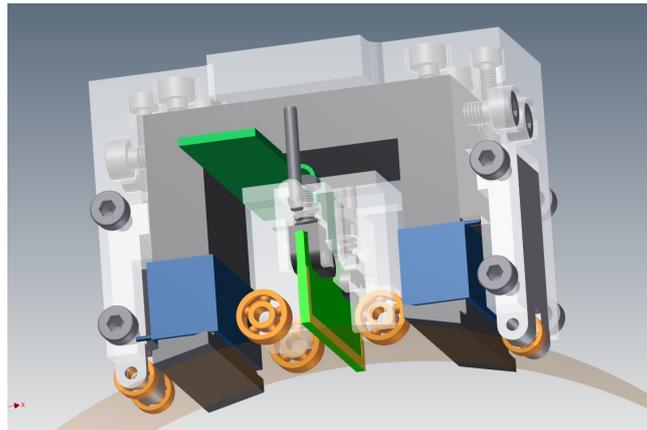


Abbildung 8.1: Entwurfsskizze der Prüfsonde mit einer lokalen Magnetfeldanregung für das Labormodell. Dargestellt ist die Sonde für die Außenfläche der Lagerschalenringe. Die Spulen sind blau, das Joch dunkelgrau, die Platinen grün und die Laufräder orange abgebildet [199]

Die Prüfsonde ist zentraler Bestandteil der Prüfanlage. Hier findet die Anregung des internen Magnetfeldes und die Messung über GMR-Sensorarrays statt. Neben diesen Eigenschaften der GMR-basierten Streuflusssonde muss diese zudem sehr nah an die Prüfobjektoberfläche herangebracht werden, d.h. der Abstand zwischen Joch bzw. Sensor und Oberfläche muss so gering wie möglich sein. Er sollte $100 \mu\text{m}$ nicht überschreiten.

Basierend auf den Ergebnissen, die zum Teil während dieser Arbeit entstanden (siehe Kap. 5 und 7), designte und fertigte der industrielle Partner *Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH* (siehe hierzu auch [200]) verschiedene Prüfsonden für unterschiedliche Flächen der Lagerschalenringe (Innen- und Außenfläche) an, welche die Radien und somit die Krümmung der Ringe berücksichtigen. In Abb. 8.1 ist ein Entwurf einer Sonde für die Außenseite eines Lagerschalenrings dargestellt. Um das dunkelgraue

Joch aus Stahl werden Spulen (blau) zur Magnetfeldanregung angebracht. Dazwischen sind, in grün dargestellt, die Platinen integriert. Da eine kontaktlose Prüfung zeitlich aufgrund ihrer Komplexität während der Projektlaufzeit als nicht umsetzbar galt, wurde die Sonde mit präzise gefertigten Rollen (orange) versehen. Diese Rollen besitzen eine hohe Rundlaufgenauigkeit, um periodische Abhebeeffekte während der Prüfung zu vermeiden. Zusätzlich zu den beschriebenen Eigenschaften besitzt die Sonde eine Kardanaufhängung, wodurch die Sonden sehr genau und plan-parallel an die Oberfläche gebracht werden können.

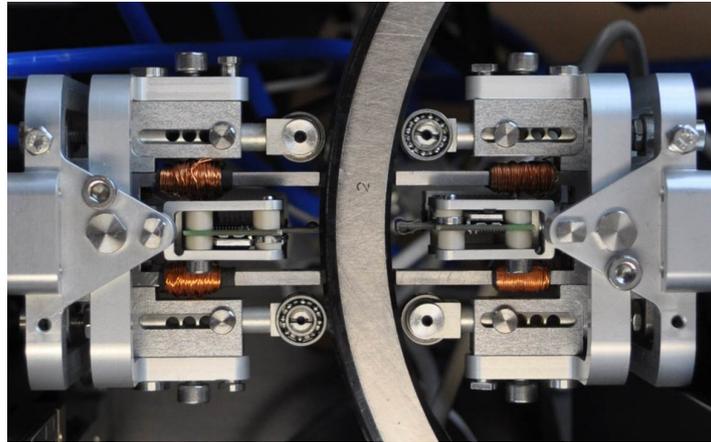


Abbildung 8.2: Prüfsonden der Innen- und Außenfläche eines Lagerschalenrings. Neben dem Joch mit Spulen und dazwischen befindlicher Messplatine sowie den Laufrädern ist die Kardanaufhängung der Sonde zu sehen.

Abb. 8.2 zeigt ein Foto der von der *Astro- und Feinwerkstechnik Adlershof GmbH* gefertigten Sonden für die Innen- und Außenfläche eines Rings. Dabei sind die Joche zu sehen, die nach den Angaben der BAM gefertigt und mit Spulen versehen wurden. Die Rollen sind an höhenverstellbaren Stiften angebracht. Ebenfalls höhenverstellbar sind die in die Sonden integrierten Messplatinen. Die Joche sowie die Platinen werden vor dem Einsatz an einem Ring ausgerichtet und so auf einen Abstand von $100\ \mu\text{m}$ justiert. Die Sonde selbst wird während der Prüfung über Lineareinheiten zwischen den spurweise stattfindenden Messungen positioniert und pneumatisch an die Ringoberfläche gedrückt.

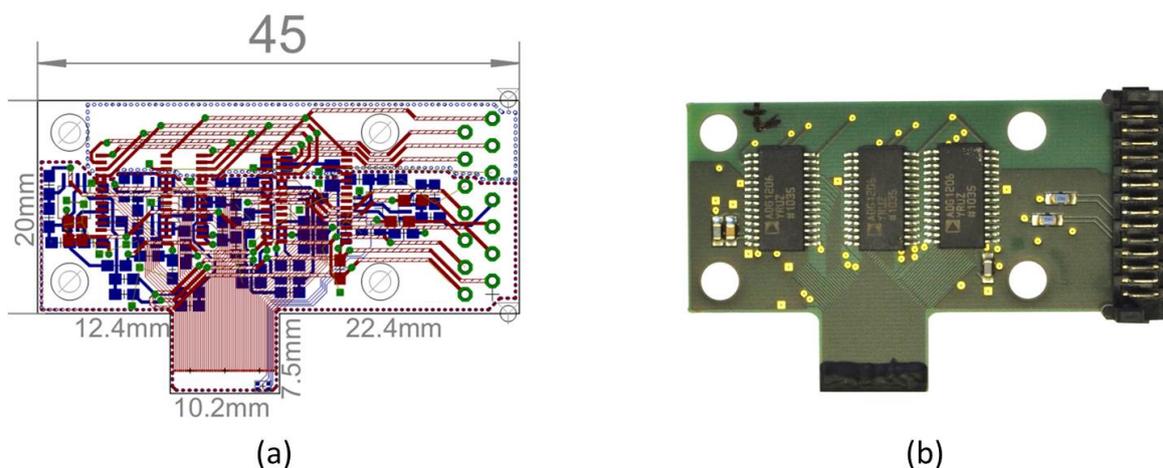


Abbildung 8.3: (a) Schema der *PLR*-Platine für das Labormodell (aus [201]). (b) Foto der *PLR*-Platine.

Neben den mechanischen Komponenten ist genau in der Mitte zwischen den Polen des Jochs die Messplatine befestigt. In Abb. 8.3 sind rechts das Schema und links die gefertigte Messplatine für die Prüfanlage gezeigt. Wie schon bei den an der BAM designten und schließlich gefertigten Messplatinen wurden auf den *PLR*-Platinen neben drei Sensorarrays mit jeweils 16 GMR-Sensorelementen zur sensornahen Verstärkung der Messsignale Vorverstärker integriert (siehe hierzu [201]). Um die hohe Anzahl an Signalleitungen zu minimieren, wurde das Multiplexer-Konzept von der BAM in das Design der Platine für das Labormodell übernommen [172].

8.2 Labormodell

Die Prüfsonden, befestigt an Lineareinheiten, sind auf einen Tisch fest montiert. Zusätzlich sind Halterungen - pneumatische Anpresseeinheiten und Rollenlager - für den Lagerschalenring vorgesehen, in denen während der Messung der Ring eingespannt wird. Eine weitere Antriebsrolle, ebenfalls pneumatisch in Position gebracht, sorgt für die Rotation des Ringes.

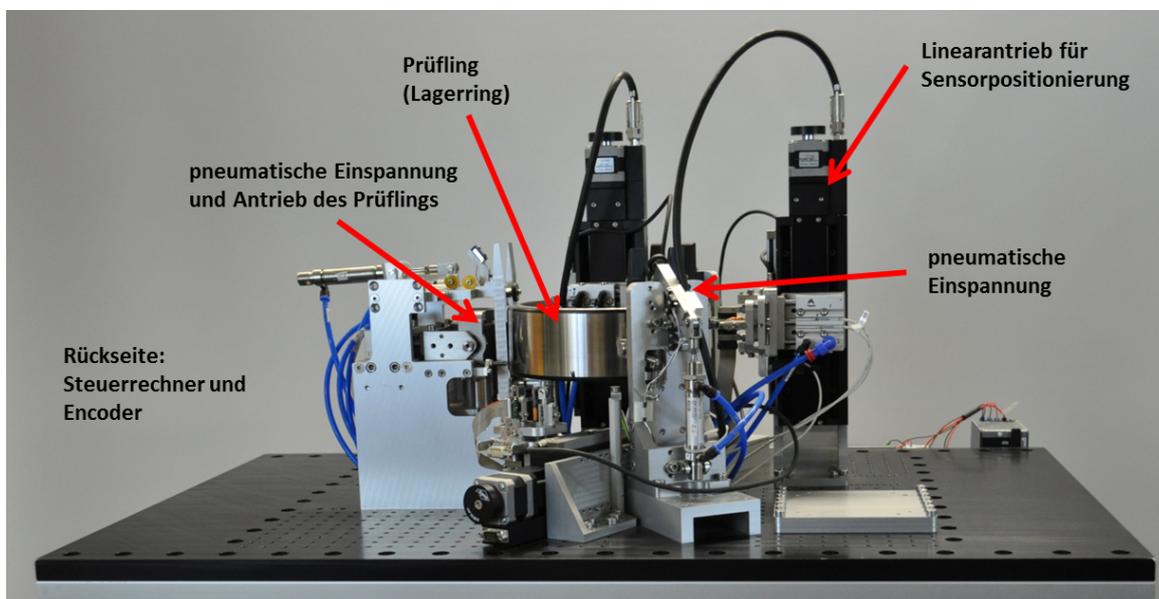


Abbildung 8.4: Foto des Labormodells. Auf dem Tisch montiert sind die Linearverfahreinheiten der Sensoren, die Halterung des Lagerschalenrings sowie dessen pneumatische Spannvorrichtungen, ein Encoder zur Positionsbestimmung und die Elektronik für den Fahrbetrieb.

In Abb. 8.4 ist der von der *Astro- und Feinwerkstechnik Adlershof GmbH* gefertigte Prototyp (ohne Sensoreinheiten) dargestellt. Neben den Einspannvorrichtungen und der Antriebseinheit sind Steuereinheiten für die Bewegung und die Pneumatik fest an den Tisch montiert sowie ein Encoder zur Positionserfassung in den Aufbau integriert. Die Auflösung des Encoders entspricht in etwa $50\ \mu\text{m}$. Dies führt zu etwa 13500 Messpunkten pro Kanal für die Umdrehung eines Lagerschalenrings mit einem Durchmesser von 215 mm. Bei einem 48er Array ergeben sich insgesamt 648.000 Messpunkte und für eine Messung z.B. der gesamten Außenfläche (bei z.B. sieben Spuren) etwa 4,5 Mio. Datenpunkte. Eine Streufeldanzeige selbst hat einen minimalen Abstand der Extrema von etwa $300\ \mu\text{m}$ (abhängig vom Abstand Sensor zur Oberfläche und von der Rissklaffung). Dies führt dazu, dass mindestens sechs Messpunkte bei einer Auflösung von $50\ \mu\text{m}$ zwischen den Extrema erfasst werden können. Dies ist ausreichend für eine Rissbewertung. Die Steuereinheiten sind wiederum mit einem Computer verbunden.

Die höchste Rotationsgeschwindigkeit liegt bei diesem Aufbau bei 1 U/s. Die Höhe der zu untersuchenden Lagerschalenringe beträgt etwa 70 mm, sodass bei einer Sensorkante von 10,2 mm insgesamt sieben Spuren zur vollständigen Flächenabtrasterung gefahren werden müssen. Daraus folgt ein Zeitaufwand für die eigentliche Messung von 7 s. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass zwischen jeder Spur die pneumatische Anpressung der Sensoren gelöst wird, damit der Verfahrensvorgang der Sonde kontaktfrei stattfindet. Diese Prozedur benötigt derzeit mehr als 10 s, wodurch sich eine Gesamtdauer von etwas mehr als einer Minute für die komplette Abtastung der Oberfläche ergibt. Für eine vollständige Streuflussprüfung sind zwei Messungen mit zwei orthogonal zueinander stehenden Magnetisierungsrichtungen nötig, damit alle Risse gefunden werden können. Eine Magnetisierungseinheit, die das Magnetfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung erzeugt, ist hierzu mit in den Aufbau integriert. Dies hat zur Folge, dass nach derzeitigem Stand der Prüfeinrichtung eine Prüfung der Laufflächen mehr als zwei Minuten benötigt und somit noch zu langsam ist. Jedoch ergaben Messreihen, dass bei den Zwischenschritten ein erhebliches Einsparpotenzial besteht, und somit die Messungen insgesamt für beide Magnetisierungsrichtungen schneller erfolgen könnten.

8.3 Software

Neben der Steuersoftware von *Astrofein* und der Datenerfassung von *PLR* ist eine geeignete Software zur Datenaufbereitung und -verarbeitung für das Labormodell nötig. Hierfür wurde ein Programm für die automatische Streuflussprüfung basierend auf GMR-Sensoren an der BAM entwickelt.

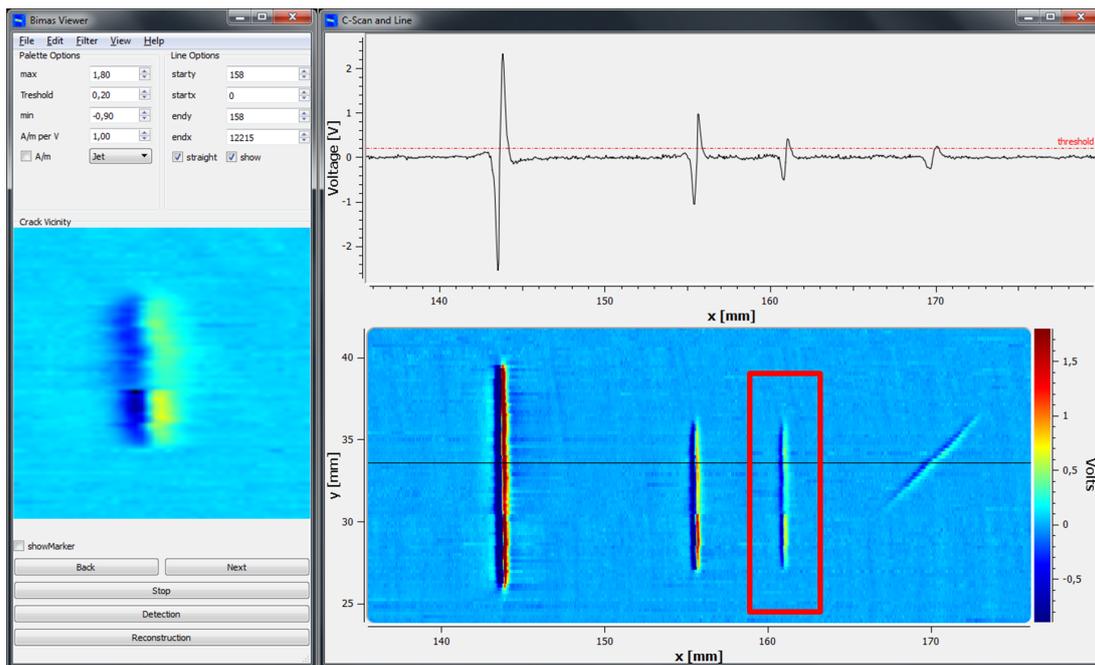


Abbildung 8.5: Grafische Oberfläche der Prüfsoftware BIMASViewer.

In Abb. 8.5 ist die grafische Oberfläche des „*BIMASViewer*“ gezeigt. Neben der grafischen Darstellung der Messungen lassen sich verschiedene Filterfunktionen auf die Messdaten anwenden, wodurch eine Aufbereitung der Messdaten durchgeführt werden kann. Zudem ist eine automatische Fehlerdetektion in das Programm integriert. Mittels eines Schwellwertverfahrens lassen sich Defekte verschiedener Tiefe automatisch finden. Hierzu müssen allerdings die Grenzen im Vorfeld der Prüfung festgelegt werden, damit Fehler mit kleinen Risstiefen nicht übersehen werden. Das bedeutet, dass das System auf

genaue Betriebsparameter wie anregendes Feld, Abstand der Sensorarrays und des Jochs eingestellt werden muss. In Abb. 8.5 ist dieser Schwellwert exemplarisch mit der roten Linie im oberen, rechten Linienscan dargestellt. Je nach Auswahl des „threshold“ lässt sich somit das Kriterium für die Rissdetektion im Programm über ein Amplitudenauswahlverfahren festlegen. Eine einfache Bewertung der Rissgeometrie nach [32] ist mit dem derzeitigen Entwicklungsstand möglich. Eine Erweiterung auf komplexere Rekonstruktionsalgorithmen [26] in das vorhandene Programm soll in Zukunft noch integriert werden. Neben der Darstellung der Messdaten lassen sich diese auch als Matrix-Datei in verschiedenen Formaten abspeichern. Auch eine Ausgabe der Bilder ist im Programm enthalten. So lassen sich die Prüfergebnisse im Hinblick auf die Auswertung protokollieren.

9 Auffindwahrscheinlichkeiten von Defekten beim Einsatz von GMR-Sensoren

Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der GMR-Streuf Flussprüfung treffen bzw. einen Vergleich mit anderen Verfahren anstellen zu können, ist ein geeignetes Mittel die Aufstellung einer POD-Kurve (engl.: Probability of Detection; Auffindwahrscheinlichkeit von Defekten). Durch diese statistische Aufbereitung der Prüfergebnisse lassen sich für ausgewählte Parameter, wie z.B. die Defekttiefe oder -länge, Wahrscheinlichkeiten bestimmen, inwieweit ein Defekt detektiert wird oder nicht.

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, ist allerdings eine hohe Anzahl von Defekten nötig [154, 155, 161]. Gerade für die Hit/Miss-Analyse sind mehr als 60 Fehler wünschenswert. Bei dem $\ln \hat{a}$ vs $\ln a$ -Modell sind oft schon 30 Fehler definierter Größe ausreichend, um eine zuverlässige Auffindwahrscheinlichkeit zu erhalten. Jedoch gilt: je mehr Fehler zur Verfügung stehen, desto besser ist die Auffindwahrscheinlichkeit.

Für die im Folgenden vorgestellten statistischen Untersuchungen wurden zwei Ringe mit Nuten verschiedener Tiefen hergestellt. Das bedeutet, dass für die POD die Größe „Tiefe“ untersucht wurde. Die Defekte wurden funkenerosiv an der BAM hergestellt. Länge und Klaffung variieren nur minimal. Allerdings standen schlussendlich nur 31 Fehler für die statistische Analyse der Auffindwahrscheinlichkeit zur Verfügung. Aus diesem Grund sind die ermittelten POD-Kurven mit einigen Unsicherheiten versehen, gerade den $a_{90/95}$ -Punkt betreffend. Dennoch ergeben die Kurven eine gute Einschätzung der Einsatzgrenzen der GMR-Streuf Flussprüfung an Lagerschalenringen aus oberflächengehärtetem Saerstahl 100Cr6. Die Kenntnis des Materials bzw. die Oberflächenbeschaffenheit ist wichtig, da unterschiedliche Materialien auch zu unterschiedlichen Detektionswahrscheinlichkeiten für dieselbe Defekttiefe führen (siehe auch Kap. 5 und 6). Z.B. konnte der 44 μm tiefe Defekt im Probekörper *Rissplatte 1* gerade noch detektiert werden, in den Lagerschalenringen allerdings können sogar Fehler mit geringerer Tiefe deutlich vom Hintergrund unterschieden werden (siehe Kap. 5). Die Rissplatte weist somit ein viel höheres Materialrauschen im Vergleich zu den Lagerschalenringen auf.

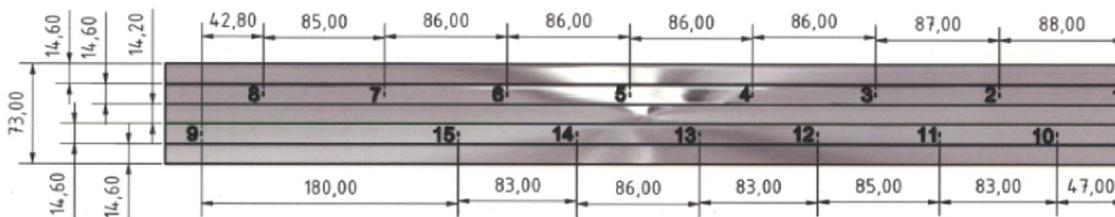
Für die Berechnung der POD-Kurven wurde die von Charles Annis erstellte Software, basierend auf dem Programm R, verwendet [158]. Dieses Programm beruht auf jahrelanger Erfahrung des Autors auf dem Gebiet der POD und findet in der ZfP-Community breiten Einsatz. Neben der Ermittlung der Regressionsdaten und daraus der Erwartungswerte - Mittelwert und Varianz - lassen sich mit dem Programm die Kurvenparameter berechnen und Hit/Miss- bzw. $\ln \hat{a}$ -vs- $\ln a$ -POD-Kurven erstellen.

9.1 Ringe und Verteilung der Defekte

Für eine statistische Auswertung der Auffindwahrscheinlichkeit und somit der Einsetzbarkeit von GMR-Sensoren im Bereich der ZfP wurden zwei weitere Lagerschalenringe mit insgesamt 31 Nuten verschiedener Tiefen hergestellt. In Abbildung 9.1 sind die Verteilung und die Positionen der Nuten auf den Außenflächen der Ringe, welche als *Ring 2* und *Ring 3* bezeichnet werden, dargestellt.

Für die Auffindwahrscheinlichkeit können verschiedene Defektparameter ausgewählt werden. Da die Herstellung solcher Nuten zeit- und kostenintensiv ist (die Kosten für eine Nut liegen im Bereich von 800 Euro und mehr), wurde lediglich die Tiefe als Parameter für die Analyse ausgewählt, da diese den stärksten Einfluss auf die Streufeldamplitude besitzt. In *Ring 1* (siehe Kap. 4) wurden Nuten mit

Ring 2



Ring 3

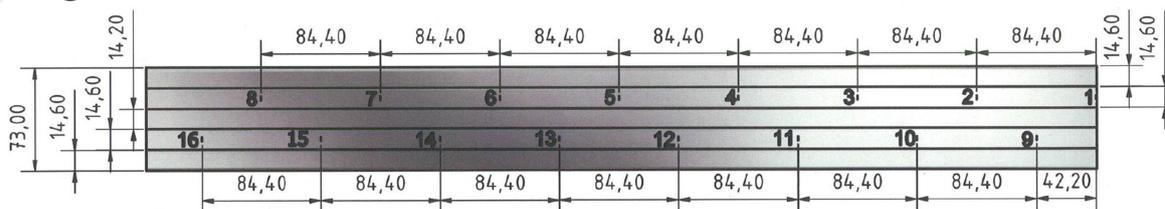


Abbildung 9.1: Verteilung der 31 Nuten auf den äußeren Mantelflächen zweier Lagerschalenringe mit einem Durchmesser von 215 mm.

Tiefen zwischen 40 und 170 μm eingebracht. Hier waren die Risssignale mit einem sehr guten Signal-zu-Rausch-Abstand detektierbar. Für eine POD sind aber gerade die Bereiche interessant, innerhalb derer die Auffindwahrscheinlichkeit abnimmt, bis schließlich eine Defekttiefe erreicht wird, bei der eine Detektion unmöglich wird. Aus diesem Grund wurden Nuten mit Tiefen von 11 μm bis 354 μm gleicher Länge (1 mm) und, soweit möglich, gleicher Klaffung (Variation innerhalb 25 und 51 μm) eingebracht.

Abb. 9.2 und 9.3 stellen beispielhaft die magnetischen Streufelder der einzelnen Nuten unter gleichen Bedingungen dar. Unterhalb der einzelnen Abbildungen sind in den Tabellen 9.1 und 9.2 jeweils die Parameter Länge, Klaffung und Tiefe der verschiedenen Nuten für beide Ringe aufgelistet. Eingesetzt wurde für die POD-Untersuchung der GMR-Sensor Typ 4A mit einer Basislänge von $BL = 250 \mu\text{m}$ und einer Länge der GMR-Streifen von $dL = 190 \mu\text{m}$. Dieser Sensor wurde ebenfalls bei dem Labormodell zur automatisierten Streuflussprüfung eingesetzt (Kap. 8).

Damit die einzelnen Darstellungen der Nuten miteinander vergleichbar sind, wurde eine einheitliche Farbskala gewählt. Die meisten Nuten sind hierbei deutlich vom Hintergrund zu unterscheiden. Die Nuten mit einer Tiefe kleiner 30 μm sind allerdings zunehmend schwerer zu entdecken, und somit gerade für eine POD interessant. Allerdings wäre es wünschenswerter, eine höhere Anzahl an Nuten zu besitzen, bei denen die Streufeldsignale kaum bzw. gar nicht vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden sind. Gerade bei der Hit/Miss-Analyse, bei der die Signalamplituden nicht berücksichtigt werden, sind Fehler im Bereich von 3% bis 97% der Auffindwahrscheinlichkeit von Vorteil. Nuten mit Tiefen kleiner 10 μm sind jedoch nicht definiert mit der hier vorliegenden Methode herstellbar. Um feinere Risse zu erhalten, müsste mit Lasern bzw. mit der FIB-Methode (Focused Ion Beam) gearbeitet werden.

Vielmehr zeigt sich, dass das Material und die Beschaffenheit der Ringe für die GMR-Prüfung hinsichtlich der Detektion auch kleinster Defekte geeignet ist. Vor der Herstellung der Fehler wurde erwartet, dass Tiefen kleiner 30 μm kaum zu detektieren wären. Es stellte sich jedoch heraus, dass auch noch Defekte mit einer Tiefe von 20 μm mit einem vernünftigen SNR detektierbar waren. Dennoch lässt sich eine POD durchführen, auch wenn die Datenbasis für nicht auffindbare Defekte gering ist.

Ring 2

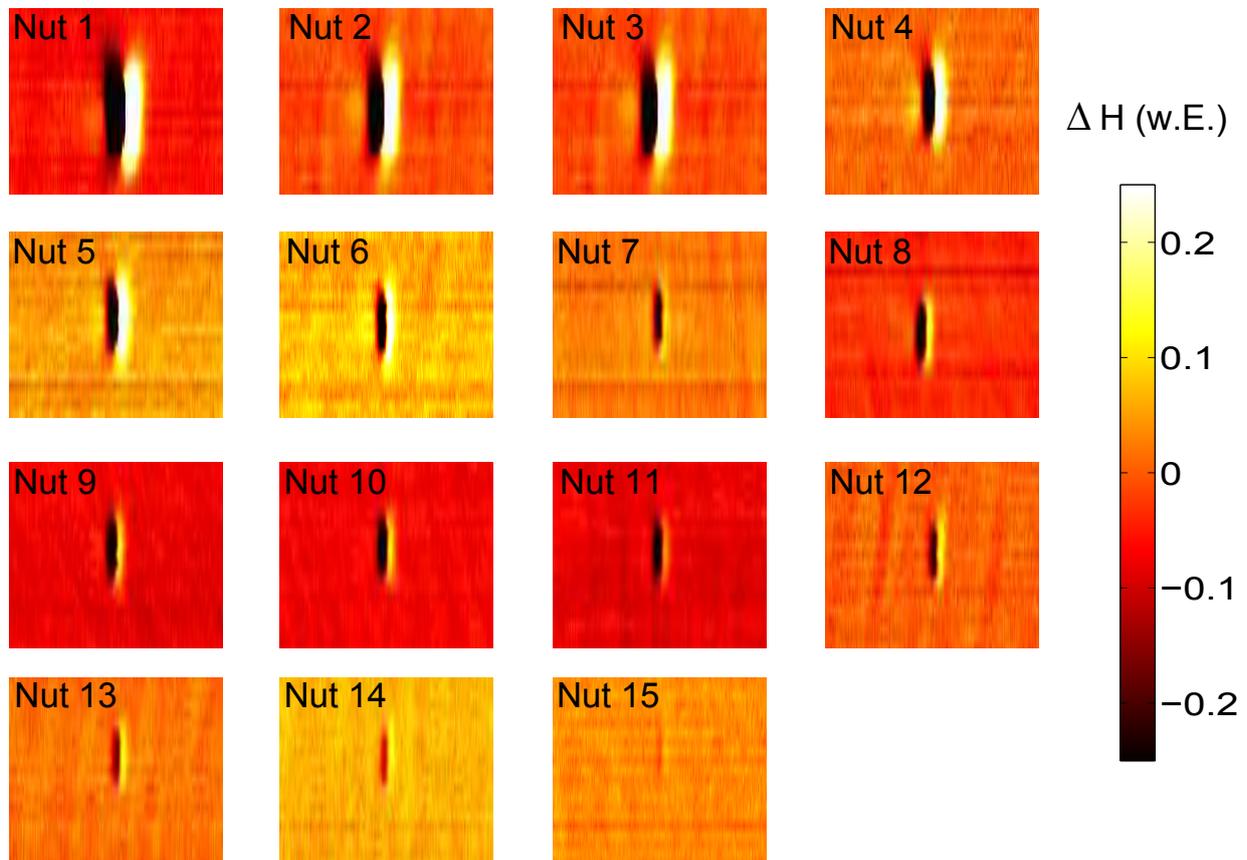


Abbildung 9.2: *Ring 2*: Falschfarbendarstellungen der Streufelder der einzelnen Nuten. Für einen besseren Vergleich ist die Farbskala für alle 15 Nuten gleich.

Nut	Länge [mm]	Klaffung [μm]	Tiefe [μm]
1	1,034	51	354
2	1,023	36	224
3	1,025	36	170
4	1,030	34	105
5	1,023	33	82
6	1,022	30	60
7	1,029	36	57
8	1,029	33	53

Nut	Länge [mm]	Klaffung [μm]	Tiefe [μm]
9	1,034	33	43
10	1,023	36	40
11	1,029	33	39
12	1,023	33	27
13	1,031	32	29
14	1,027	28	20
15	1,014	25	11

Tabelle 9.1: Auflistung der geometrischen Parameter Tiefe, Klaffung und Länge der funkenerosiv eingebrachten Nuten in *Ring 2*. Die Längenangaben besitzen nach Messprotokoll eine Toleranz von $\pm 2\%$ allerdings mindestens $\pm 5 \mu\text{m}$.

Ring 3

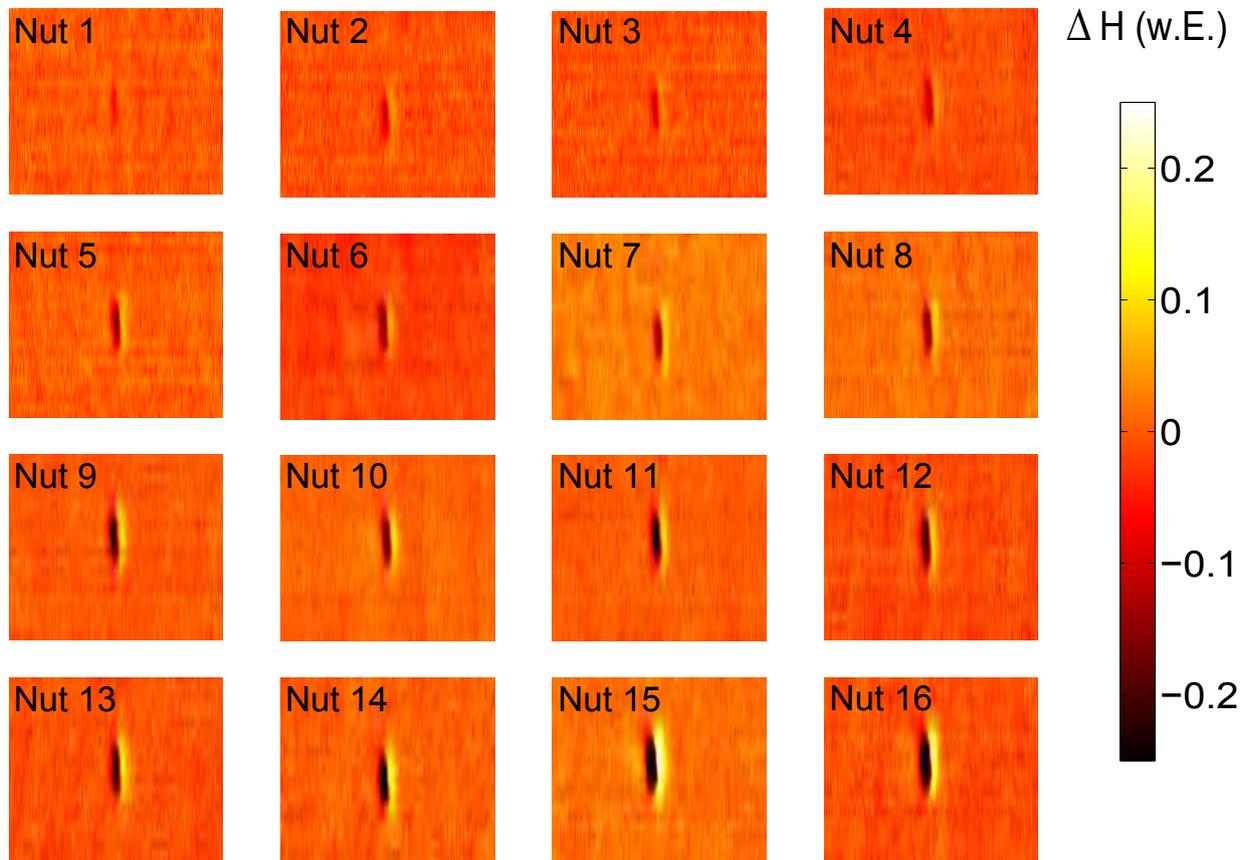


Abbildung 9.3: *Ring 3*: Falschfarbendarstellungen der Streufelder der einzelnen Nuten. Für einen besseren Vergleich ist die Farbskala für alle 16 Nuten gleich.

Nut	Länge [mm]	Klaffung [μm]	Tiefe [μm]	Nut	Länge [mm]	Klaffung [μm]	Tiefe [μm]
1	0,946	29	12	9	0,945	33	28
2	0,948	28	14	10	0,947	33	28
3	0,945	27	15	11	0,946	33	31
4	0,947	28	19	12	0,946	33	32
5	0,946	29	20	13	0,944	35	33
6	0,945	31	22	14	0,951	35	35
7	0,945	31	24	15	0,952	38	54
8	0,947	32	26	16	0,948	37	54

Tabelle 9.2: Auflistung der geometrischen Parameter Tiefe, Klaffung und Länge der funkenerosiv eingebrachten Nuten in *Ring 3*. Die Längenangaben besitzen nach Messprotokoll eine Toleranz von $\pm 2\%$ allerdings mindestens $\pm 5 \mu\text{m}$.

9.2 Durchführung der Messreihen und Kriterien für die POD-Berechnung

Die Anzahl der Messreihen sowie die Auswahl verschiedener Kriterien wie unterschiedliches SNR oder benachbarte Messspuren über einen Defekt, die zusammen in die Bewertung einfließen, können sich erheblich auf die Gestalt einer POD-Kurve auswirken. Zusätzlich werden für die Verarbeitung der großen Datenmenge geeignete Auswerteprogramme benötigt, die sowohl die Kriterien berücksichtigen als auch die Datenmenge auf ein vernünftiges Maß beschränken.

9.2.1 Messreihen und Auswertung

Für die Messreihe wurden Sensorarrays des Typs 4A eingesetzt. Zum Einsatz kamen zwei 16er-Arrays (insgesamt 32 Kanäle), die mit der Multiplexerelektronik ausgelesen wurden. Im oberen Teil der Abb. 9.4 ist der Zusammenhang der Datenaufnahme skizziert. Statt die Außenfläche wie bei einer Prüfung mit einem Abstand von 6,4 mm, der Länge der beiden 16er-Arrays zusammen, zwischen den einzelnen Scans abzurastern, wurde als Raster die Länge der GMR-Elemente plus dem Abstand der GMR-Elemente zueinander verwendet. Daraus ergibt sich ein Abstand von $190\ \mu\text{m} + 10\ \mu\text{m} = 200\ \mu\text{m}$ zwischen den Messspuren. Das wiederum führt dazu, dass pro Messung insgesamt 32 Flächenscans, d.h. pro Kanal ein Scan, erreicht werden. Diese Prozedur wurde insgesamt fünfmal durchgeführt, wodurch sich pro Defekt 160 Datensätze ergeben und eine ausreichend hohe Datenbasis für die Berechnung einer POD-Kurve erreicht werden kann. Jeder Kanal des Arrays wird somit wie ein eigenständiger „Prüfer“ angesehen.

Bei der Auswertung der großen Datenmenge (mittlerer Bereich in Abb. 9.4) wurden sowohl das Rauschen für jeden Kanal als auch die Signalamplitude an der Position der Defekte bestimmt. Oft werden in der Bestimmung der POD-Kurven über das „ $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ “-Modell die Signalamplituden bestimmt und aufgetragen, um die Regressionsgerade zu bestimmen. Da im Fall des GMR-Arrays jedoch das Rauschen zwischen den einzelnen Kanälen leicht variieren kann und ebenfalls die Bedingungen des anliegenden, internen Magnetfeldes von der Position innerhalb der Magnetisierungseinheit abhängen (siehe Kap. 7), wurde als zu analysierende Größe das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) bestimmt. Diese Größe dient als Vergleich der einzelnen Kanäle untereinander für die Ermittlung der POD-Kurven. Mit der Bestimmung des SNR werden nun bei beiden Modellen alle benötigten Parameter berechnet, wodurch schließlich die POD-Kurven erstellt werden können.

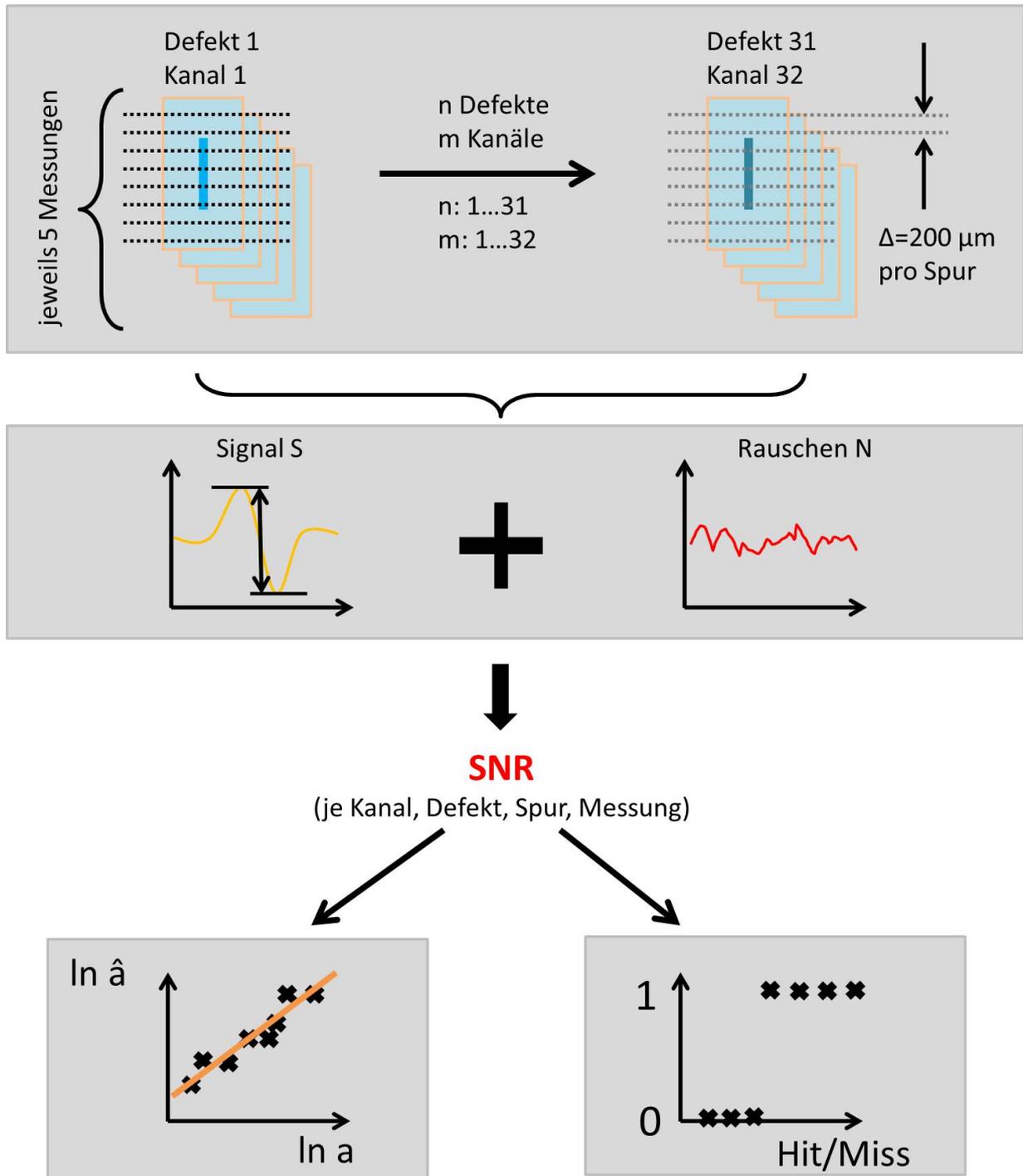


Abbildung 9.4: Schema der Durchführung der Messreihen und des Ablaufs der Verarbeitung der gesammelten Daten. Die Erzeugung der Größe SNR (Signal-zu-Rausch-Verhältnis) führt schließlich zu den beiden verschiedenen POD-Modellen $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ und Hit/Miss, die im Rahmen der Analyse zur Auffindwahrscheinlichkeit eingesetzt wurden.

9.2.2 In \hat{a} vs. In a -Modell

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, wird als Größe für das „In \hat{a} vs. In a “-Modell nicht die Signalamplitude, sondern das SNR verwendet, und es gilt $\hat{a} = SNR$. Die Größe, die untersucht werden soll und somit als Grundlage der POD dient, ist die Tiefe der Nuten; $a = Tiefe(\text{Nut})$.

Für die Erstellung der POD-Kurven wird eine Normalverteilung berechnet. Bei der POD-Kurve selbst handelt es sich um die Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$:

$$\Phi_{\mu, \sigma^2}(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (9.1)$$

Die Größe x bezieht sich im Fall der POD je nach Modell zur Bestimmung der Regressionsgeraden auf die Größe a bzw. In a und somit auf die Tiefe der einzelnen Nuten. μ wird als Erwartungswert bezeichnet und σ^2 ist die Varianz. Gerade der letzte Parameter, die Varianz, ist entscheidend für die Richtigkeit einer POD (siehe hierzu auch Kap. 2 Abschnitt 2.6). Die ermittelten Signale dürfen nicht zu sehr um eine Regressionsgerade streuen, d.h. die Varianz muss über den ermittelten Bereich hin konstant sein. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 9.5 näher betrachtet.

Die vier Graphen in Abb. 9.5 geben die vier möglichen Darstellungen der Messergebnisse $\hat{a} = SNR$ (hier sind alle Messwerte der gesamten Datenmenge dargestellt) mit linearen bzw. logarithmischen Achsen wieder. Aufgrund der unterschiedlichen Auswahl der Achsen und der daraus resultierenden Verteilung der Messwerte wird deutlich, dass nicht jedes Modell geeignet ist, eine Regressionsgerade mit konstanter Streuung der Messdaten zu berechnen. Dieses Kriterium wird allerdings für die Bestimmung der Parameter Erwartungswert μ und Varianz σ^2 benötigt. Fehlerhafte Parameter führen zu Falschaussagen der POD.

Der Graph links oben lässt zwar eine Gerade, welche durch die Messpunkte gelegt werden kann, zu, aber die Streuung ist, abhängig von der Defekttiefe, unterschiedlich groß. Somit ist dieser Ansatz nicht geeignet. Die beiden halb-logarithmischen Graphen sind ebenfalls nicht anwendbar, da eine Gerade durch alle Punkte mit konstanter Varianz zu legen nicht möglich ist. Das letzte Diagramm mit logarithmischen Achsen ist im vorliegenden Fall die geeignete Wahl zur Durchführung einer Maximum-Likelihood-Bestimmung der Regressionsparameter. Innerhalb der ZfP und der hier erstellten POD-Kurven tritt dieser Fall am häufigsten ein. Sind die Regressionsparameter bestimmt, lassen sich nach den Gleichungen 2.40 und 2.41 in Abschnitt 2.6 die Parameter der Normalverteilung bestimmen. Zusätzlich muss bei der Bestimmung noch entschieden werden, ab welcher Signalgröße ein Schwellwert verwendet wird. Ein $SNR \geq 2$ als Schwelle ist im vorliegenden Fall sinnvoll.

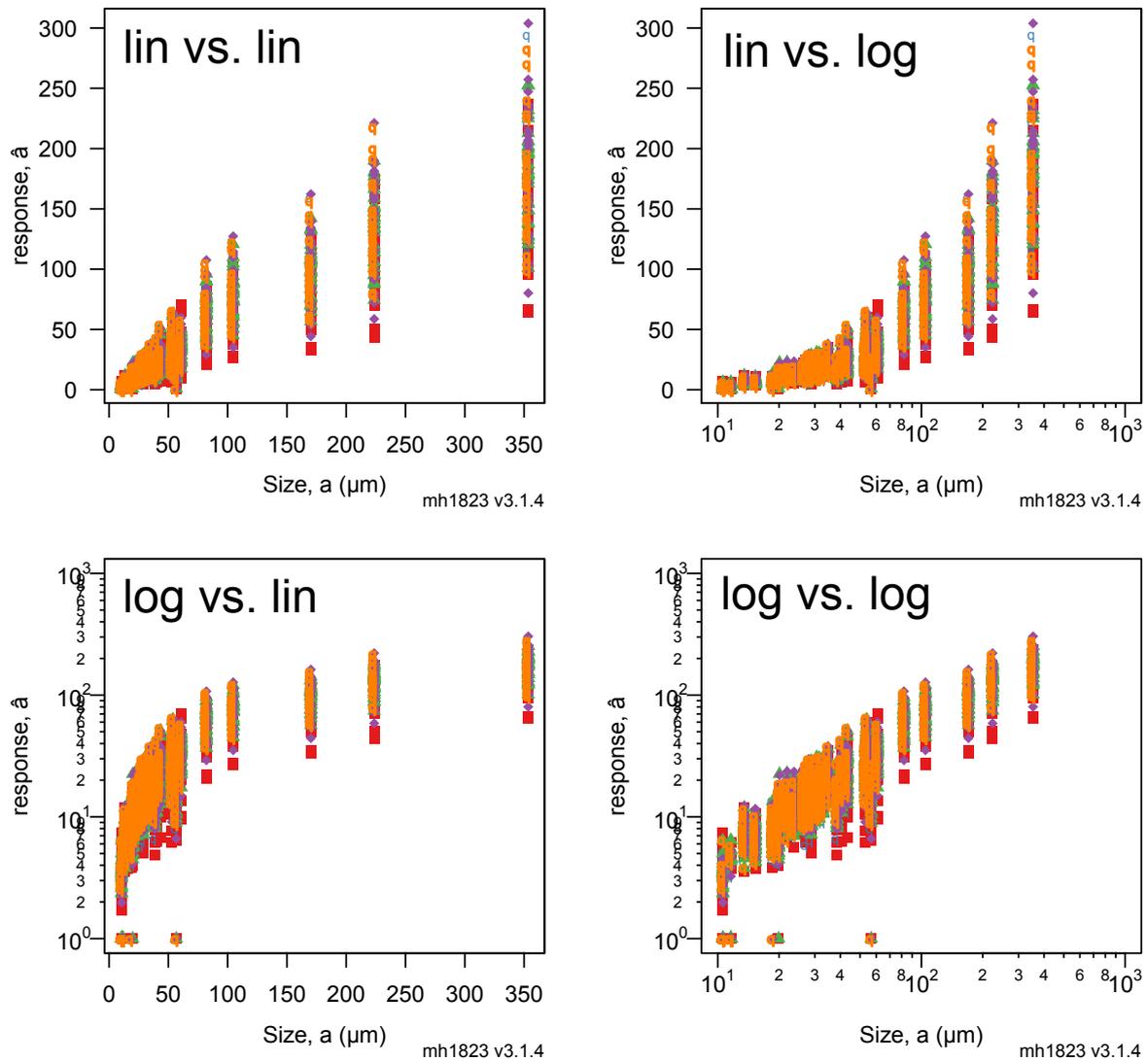


Abbildung 9.5: Das geeignete Modell zur Erstellung der Regressionsgeraden wird anhand von vier verschiedenen Graphen ermittelt. Dabei werden die Signale als Funktion der zu untersuchenden Größe a logarithmisch, linear oder halblogarithmisch dargestellt. Entschieden wird nach linearem Verlauf und Streuung der Daten entlang einer gedachten Linie durch die Punkte. Die Graphen wurden mit der POD-Software *mh1842* von Annis [158] und dem Programm „R“ erstellt.

9.2.3 Hit/Miss

Bei einer Hit/Miss-Analyse wird nicht die Normalverteilung sondern die Binomialverteilung verwendet. Entweder führt der Messwert zur Detektion, dann bedeutet das Hit und Wahrscheinlichkeit 1, oder er führt zu einer Nichtdetektion (Miss) mit einem Wahrscheinlichkeitswert gleich 0.

Ähnlich zum vorherigen Modell wurden die Daten aufbereitet und je nachdem, ob das SNR größer als eine bestimmte Schwelle war, wurde dieser Wert als Hit gezählt, sonst als Miss. Allerdings lässt die Hit/Miss-Analyse weitere Kriterien zu, als lediglich die Spur über den Riss mit dem größten Defektsignal zu betrachten. Für die im Abschnitt 9.4 dargestellten POD-Kurven wurden insgesamt vier Kriterien betrachtet, für die der Defekt als Hit zählt:

- Kriterium 1.1: eine Spur und $SNR \geq 2$,
- Kriterium 1.2: eine Spur und $SNR \geq 3$,
- Kriterium 2.1: Spur mit dem größten Signal plus die beiden Benachbarten mit jeweils $SNR \geq 2$,
- Kriterium 2.2: Spur plus die beiden Benachbarten mit $SNR \geq 3$.

Die Auswahl der verschiedenen Kriterien führt zu unterschiedlichen Verteilungen und somit zu verschiedenen POD-Kurven. Durch eine Erhöhung der Schwelle bzw. eine zusätzliche Gewichtung weiterer Spuren werden die Grenzen der Auffindwahrscheinlichkeit für die Punkte a_{50} , a_{90} und $a_{90/95}$ zu höheren Werten hin verschoben. Dies bedeutet schließlich eine Verminderung der Auffindwahrscheinlichkeit. Dadurch werden insgesamt eher konservative Werte erreicht. Gerade weil nicht, wie z.B. von Annis [158] gefordert, mehr als 60 Fehler zur Verfügung standen, ist ein konservativer Ansatz für die POD geeignet.

9.3 Auffindwahrscheinlichkeit - „ $\ln \hat{a}$ vs. $\ln a$ “

Zuerst mussten die für die POD-Kurven nötigen Parameter μ und σ über eine lineare Regression (GLM: Generalized Linear Model) ermittelt werden. Aus den dadurch generierten POD-Kurven wurden für das verwendete ZfP-System, hier GMR-Streufungsprüfung, die Detektionswahrscheinlichkeiten für die Punkte a_{50} , a_{90} und $a_{90/95}$ bestimmt. Dadurch kann ein Vergleich zwischen einzelnen Sensorelementen eines Arrays bzw. eine Gesamtbetrachtung aller Elemente zusammen erfolgen.

9.3.1 Parameterberechnung

Für die lineare Regression ist, da es sich um eine relativ kleine Anzahl von Defekten handelt, die Anwendung der Maximum-Likelihood-Parameterabschätzung (Kap. 2.6) nötig. Diese Abschätzung ist im Programm von Annis enthalten [154].

In Abb. 9.6 (a) und (b) sind zwei Diagramme gezeigt, die neben den Messwerten der einzelnen Defekttiefen die Parameter der linearen Regression beinhalten. Dargestellt sind die fünf verschiedenen Messungen der Ringe 2 und 3 durch fünf in Farbe und Form unterschiedliche Symbole. Dabei werden die ermittelten SNR-Werte aus dem Messdatensatz als Funktion der Tiefe der 31 Nuten logarithmisch aufgetragen.

In (a) werden die Messwerte aller Defekte zusammen als ein Satz von Daten betrachtet. Dieser schließt alle fünf Messungen jedes einzelnen Elements des 32er-Arrays mit ein. Dabei ist zwischen den einzelnen Kanälen des GMR-Sensorarrays mit seinen insgesamt 32 Elementen eine große Streuung zu erkennen. Zwei Aspekte spielen eine Rolle. Zum Einen ist aufgrund der unterschiedlichen Position der Elemente auf der Platine das anregende Magnetfeld unterhalb dieser Elemente unterschiedlich groß

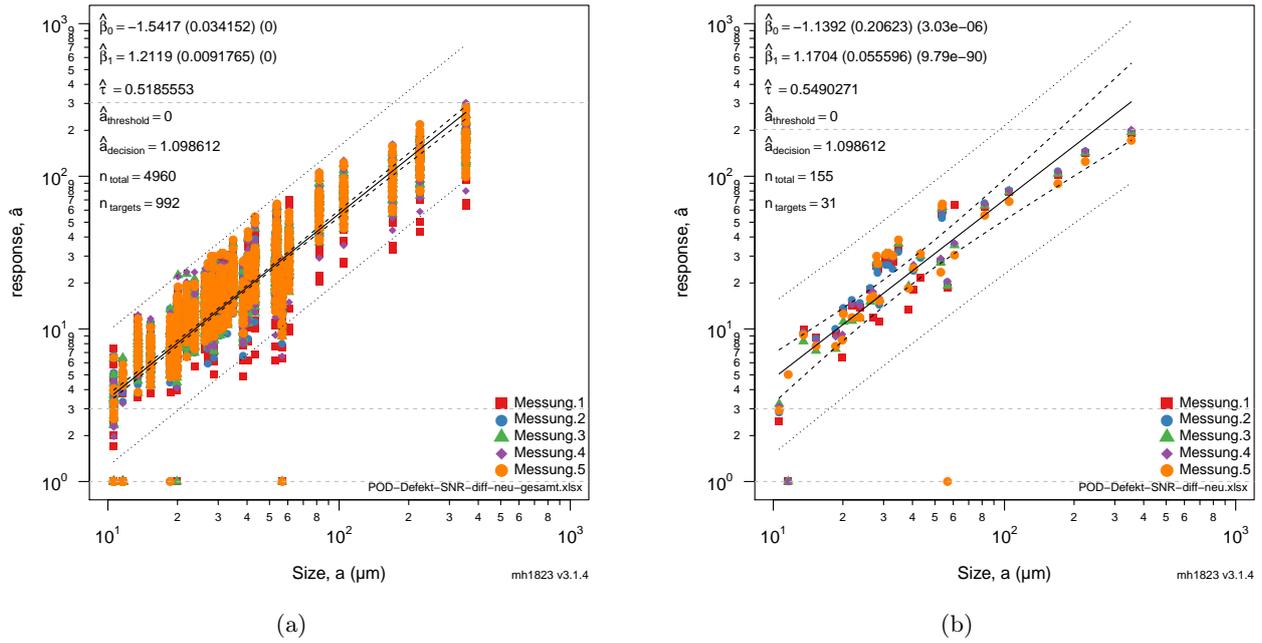


Abbildung 9.6: Regressionsgeraden mit $\text{SNR} = 3$ für (a) den gesamten Datensatz und für (b) Kanal 1.

(siehe Kap. 7). Dadurch nimmt das SNR mit zunehmendem Abstand der Elemente von der Mittelposition auf der Platine ab. Zum Anderen ist das Rauschen der einzelnen Elemente unterschiedlich (z.B. unterschiedliches DC-Rauschen der einzelnen Kanäle, siehe Abb. 5.23 in Kap. 5.3.2), wodurch sich zusätzlich Abweichungen bzw. eine Streuung der Messwerte ergeben können.

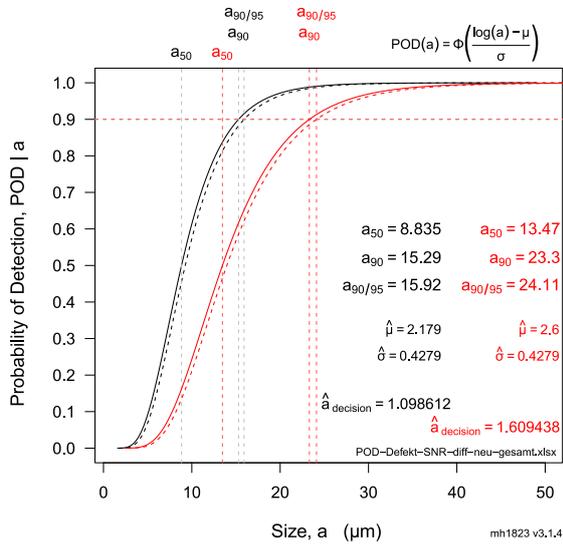
Durch die logarithmischen Achsen, sowohl für die Tiefe der Nuten als auch für die SNR-Werte, wird erreicht, dass sich bei der linearen Regression eine konstante Varianz ergibt. Dies ist Bedingung für vertrauenswürdige Parameter β_0 , β_1 und τ , aus denen dann schließlich μ und σ berechnet werden. Für die hier angegebenen Parameter war der Schwellwert $\hat{a}_{\text{decision}} = \ln(\text{SNR}) = \ln 3 = 1.098612$.

In (b) sind die Ergebnisse der linearen Regression als Beispiel für ein einzelnes Element, hier für Kanal 1, abgebildet. Die Streuung der Messwerte der einzelnen Tiefen ist sehr schwach, da das anregende Feld im Material für alle Messwerte gleiche Werte annimmt, was bei (a) nicht der Fall war. Für die restlichen 31 Kanäle lassen sich analog zu Kanal 1 ebenfalls die Parameter für die POD-Kurven bestimmen.

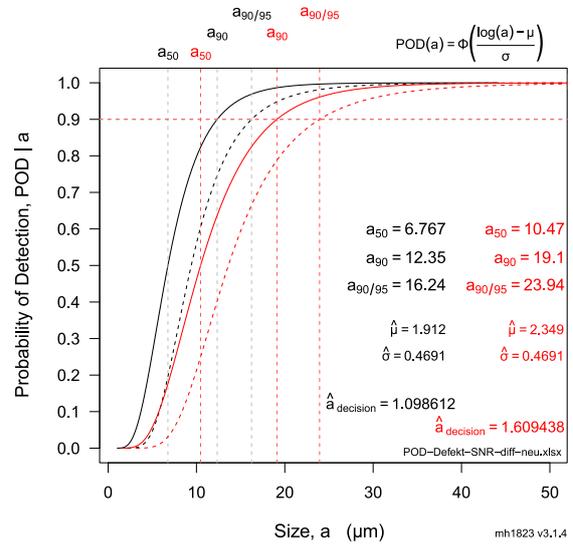
9.3.2 POD-Kurven

Nachdem für alle relevanten Datensätze - sowohl für einzelne Kanäle als auch für den gesamten Datensatz aller Kanäle zusammen - die Parameter bestimmt wurden, lassen sich die POD-Kurven erstellen. In Abb. 9.7 sind verschiedene POD-Kurven dargestellt. Dabei handelt es sich um zwei POD-Kurven für den gesamten Datensatz (a), zwei für Kanal 1 (b) und zwei für Kanal 32 (c). Es wurden POD-Kurven für zwei verschiedene SNR als Schwelle ermittelt. Die Schwellwerte lagen bei $\text{SNR} = 3$ und $\text{SNR} = 5$ bzw. in logarithmischer Form $\hat{a}_{\text{decision}} = \ln 3 = 1.098612$ und $\hat{a}_{\text{decision}} = \ln 5 = 1.609438$.

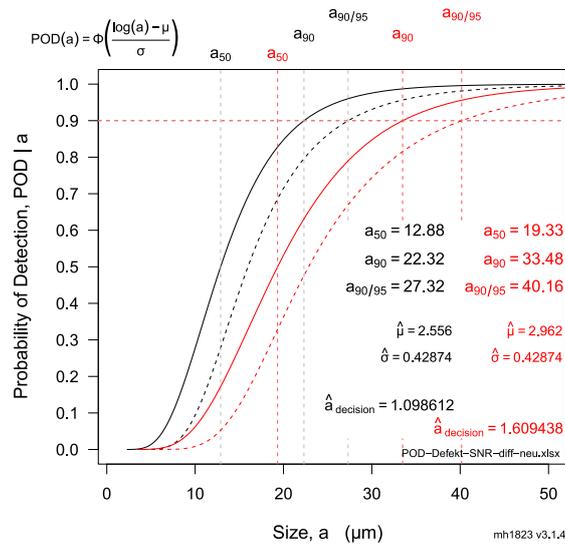
Abb. 9.7 (a) stellt die POD-Kurven des gesamten Datensatzes dar. Die schwarze Kurve entspricht der POD-Kurve für ein $\text{SNR} = 3$, rot wurde für ein $\text{SNR} = 5$ gewählt. Durch die höhere Schwelle ($\text{SNR} = 5$, rote Kurve) nehmen die Werte für die relevanten POD-Punkte a_{50} , a_{90} und $a_{90/95}$ zu. Für $\text{SNR} = 3$ betragen diese $a_{50} = 8,835 \mu\text{m}$, $a_{90} = 15,29 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 15,92 \mu\text{m}$ und für $\text{SNR} = 5$



(a)



(b)



(c)

Abbildung 9.7: POD-Kurven mit SNR = 3 (schwarze Kurven) und SNR = 5 (rote Kurven) für (a) den gesamten Datensatz, (b) Kanal 1 und (c) Kanal 32.

$a_{50} = 13,47 \mu\text{m}$, $a_{90} = 23,3 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 24,11 \mu\text{m}$. Zusätzlich werden durch die Erhöhung der Schwelle die Kurven - POD-Kurve und 95%-Konfidenzband - flacher; ihr Anstieg ist geringer. Auch ist zu erkennen, dass die Konfidenzbänder nahezu parallel zur eigentlichen POD-Kurve in geringem Abstand verlaufen. Dies liegt an der hohen Menge an Daten, die für die Erstellung der POD-Kurve verwendet wurden.

Hingegen sind für die einzelnen Kanäle, exemplarisch wurden die Kanäle 1 und 32 aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Detektionswahrscheinlichkeit zur Veranschaulichung ausgewählt, aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Messpunkten (32mal kleiner als bei der Gesamtbetrachtung aller Messwerte) die Abstände der Konfidenzbänder erheblich größer (siehe (b) und (c)). Des Weiteren sind die Schwankungen der POD-Punkte zwischen einzelnen Kanälen sehr groß. Für Kanal 1 in (b) ergeben sich $a_{50} = 6,767 \mu\text{m}$, $a_{90} = 12,35 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 16,24 \mu\text{m}$ für $\text{SNR} = 3$ (schwarze Kurve) bzw. $a_{50} = 10,47 \mu\text{m}$, $a_{90} = 19,1 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 23,94 \mu\text{m}$ für $\text{SNR} = 5$ (rote Kurve). Respektive sind die Werte für Kanal 32 in (c) $a_{50} = 12,88 \mu\text{m}$, $a_{90} = 22,32 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 27,32 \mu\text{m}$ für $\text{SNR} = 3$ (schwarze Kurve) und $a_{50} = 19,33 \mu\text{m}$, $a_{90} = 33,48 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 40,16 \mu\text{m}$ für $\text{SNR} = 5$ (rote Kurve).

Die Kurven der einzelnen Kanäle ergeben, dass die Empfindlichkeiten untereinander sehr stark schwanken können. Hier ist insbesondere die unterschiedliche Anregung des internen Magnetfeldes durch die lokale Magnetisierung hauptverantwortlich. Weitere Einflüsse ergeben sich durch unterschiedliches Rauschen, herstellungsbedingte Abweichungen einzelner Elemente, die die Messung des Magnetfeldes beeinflussen können, und gegebenenfalls unterschiedliche LOs der einzelnen Elemente zur Oberfläche der Ringe.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen zudem, dass die Kurven je nach Position der GMR-Elemente innerhalb des Jochs und ihrer Eigenschaften entweder bessere oder schlechtere Werte für die Auffindwahrscheinlichkeit im Vergleich mit der POD-Kurve aller Messpunkte annimmt. Da es sich bei der Darstellung des gesamten Datensatzes wie bei einem Mittelwert aus verschiedenen Punkten verhält, sind die einzelnen Ergebnisse aller Kanäle von Interesse.

Abb. 9.8 betrachtet die POD-Punkte der einzelnen Kanäle. Dargestellt sind hier in (a) für $\text{SNR} = 3$ a_{50} (schwarz), a_{90} (rot) und $a_{90/95}$ (blau) in Abhängigkeit vom Kanal und somit schließlich auch von der Position des GMR-Elementes innerhalb des Jochs. In (b) ist der POD-Punkt $a_{90/95}$ für drei unterschiedliche Schwellen abgebildet; schwarz für $\text{SNR} = 2$, rot für 3 und blau für 5. Die durchgezogenen Linien entsprechen den Werten des gesamten Datensatzes.

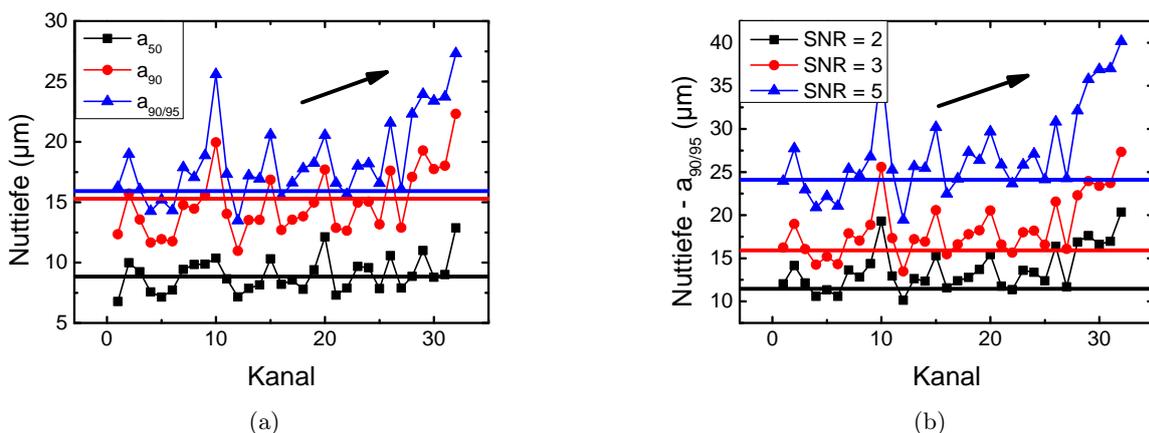


Abbildung 9.8: (a) POD-Werte a_{50} (schwarz), a_{90} (rot) und $a_{90/95}$ (blau) für alle 32 Kanäle des GMR-Sensors für $\text{SNR} = 3$. (b) $a_{90/95}$ -Punkt für die drei SNR von 2 (schwarz), 3 (rot) und 5 (blau).

Beide Diagramme zeigen eine leichte Tendenz zu höheren Werten in Abhängigkeit von der Position des GMR-Elementes innerhalb des Arrays und somit auch bezüglich der Position innerhalb des Jochs. Wie in Kap. 7 beschrieben, nimmt das anregende Magnetfeld innerhalb des Materials von der Mitte der Platine (Element 8 und 9, sie befinden sich bei der verwendeten Platine genau in der Mitte des Jochs) hin zu den Rändern ab. Dadurch wird auch das zu erwartende Streufeld kleiner. Eine Detektion kleinster Fehler wird schwieriger und die Auffindwahrscheinlichkeit insgesamt nimmt ab, was sich in einer flacheren POD-Kurve bemerkbar macht. Allerdings fällt insbesondere das Verhalten von Element 10 auf. Hier sollte eigentlich aufgrund der Position des Elementes in der Nähe der Mitte ein sehr guter Wert bezüglich der Auffindwahrscheinlichkeit kleinster Defekte erreicht werden. Jedoch ist dies für Kanal 10 nicht der Fall. Hier sind herstellungsbedingte Fehler innerhalb der Arrays, die die Empfindlichkeit beeinträchtigen sowie zu einem höheren Rauschen führen können, der Grund für die Abweichung.

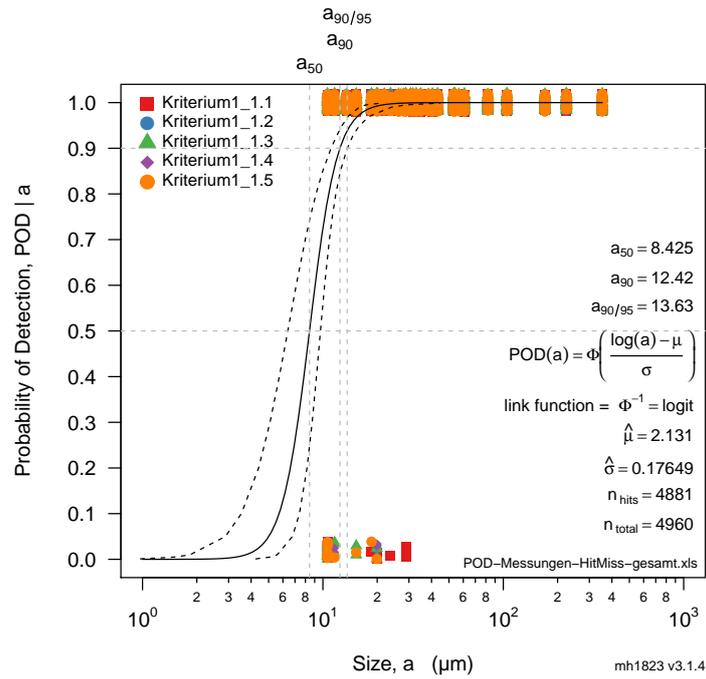
Wie bei einer Betrachtung einzelner Prüfer und ihrer Fähigkeiten lassen sich die einzelnen Elemente in einer Gesamtbetrachtung einordnen. Zwar ist der gesamte Datensatz, die POD-Punkte betreffend, ein Maß für die Auffindwahrscheinlichkeit von Defekttiefen mit GMR-Sensoren, allerdings sollte für die Detektion das schlechteste Element als Maßstab herangezogen werden, da im vorliegenden Fall zu wenige Nuten im interessanten Übergangsbereich vorhanden waren. Dies stellt eine konservative Herangehensweise dar. In der hier vorgestellten Analyse wurden für alle Elemente Flächenscans durchgeführt. In einer regulären Prüfung, bei der Zeit ein großes Kostenpotenzial darstellt, wird die Fläche durch das gesamte Array abgedeckt, wodurch jedes Element nur jede n-te Spur bei einem Array aus n Elementen zum Flächenscan beisteuert. Es besteht die Möglichkeit, dass gerade das Element mit der schlechtesten Auffindwahrscheinlichkeit über einen möglichen Riss scannt und im schlimmsten Fall zur Nicht-Detektion führt. Zwar würden im Fall der POD-Ringe mindestens vier GMR-Elemente des verwendeten Arrays über die 1 mm langen Nuten geführt, wodurch auch benachbarte Elemente mit einer guten Detektionswahrscheinlichkeit zur Risserkennung beitragen, allerdings können bei einer Prüfung Defekte, die wesentlich kürzer sind, Bereiche von unterhalb 0,5 mm Länge sind möglich, auftreten. Aus diesen Gründen ist hier die Betrachtung der schlechtesten Konstellation, nicht die der besten Elemente, gerechtfertigt. Zusätzlich werden bei dem „ $\ln \hat{a}$ -vs.- $\ln a$ “-Modell nur einzelne Spuren, die mit dem besten SNR eines jeden Defektes, betrachtet. Die benachbarten Spuren werden nicht berücksichtigt. Eine entsprechende Analyse kann durch das Hit/Miss-Modell, wie sie im folgenden Abschnitt vorgestellt wird, erreicht werden.

9.4 Auffindwahrscheinlichkeit - Hit/Miss

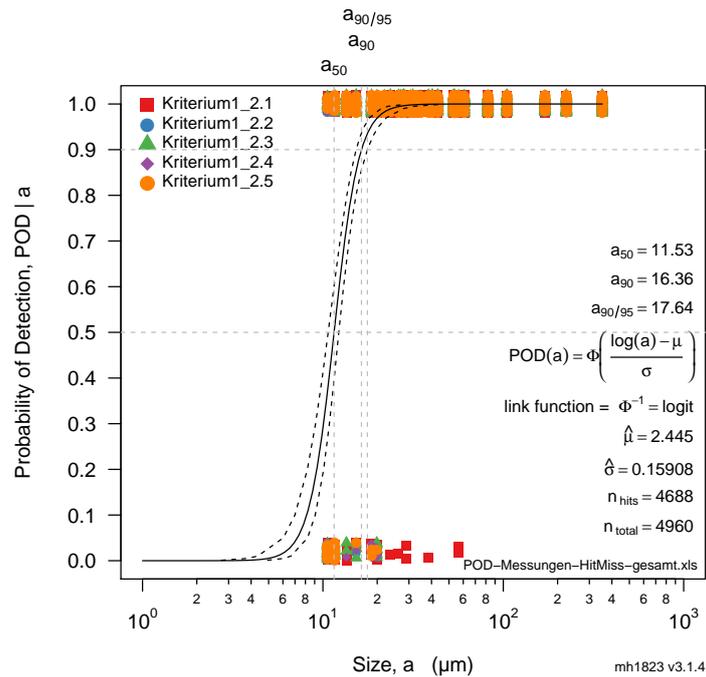
Ebenfalls müssen bei der Hit/Miss-Analyse die Parameter für die POD-Kurven berechnet werden. Hierfür werden allerdings, da den POD-Kurven die Binomial-Verteilung zugrunde liegt, bei der Maximum-Likelihood-Parameterabschätzung andere Formeln verwendet. In Kap. 2 sowie im Beitrag von Berens [153] sind hierzu Ausführungen zu finden. Sind die Parameter gefunden, lassen sich auch hier die POD-Kurven mit ihren Konfidenzbändern erzeugen.

Für die Erstellung der Kurven wurde der gleiche Datensatz wie schon im vorherigen Abschnitt für die „ $\ln \hat{a}$ -vs.- $\ln a$ “-Analyse verwendet. Annis et al. [161] weisen in ihrer Publikation darauf hin, dass für eine Hit/Miss-Analyse die Anzahl der Defektgrößen ausreichend groß sein muss (mindestens 60) und, wenn möglich, sich alle in einem Intervall zwischen 3% und 97% Auffindwahrscheinlichkeit befinden sollten. Gerade der zweite Punkt ist gegenüber dem $\ln \hat{a}$ -vs.- $\ln a$ -Modell ein Nachteil. Hier haben auch Defekte, deren Größen eine Auffindwahrscheinlichkeit von weit über 97% ermöglichen, einen Einfluss auf die POD-Analyse.

Bei der in diesem Abschnitt vorgestellten POD-Analyse konnten allerdings beide zuvor genannten Punkte nicht eingehalten werden. Zum Einen war die Defektanzahl mit 31 Defekten unterschiedlicher

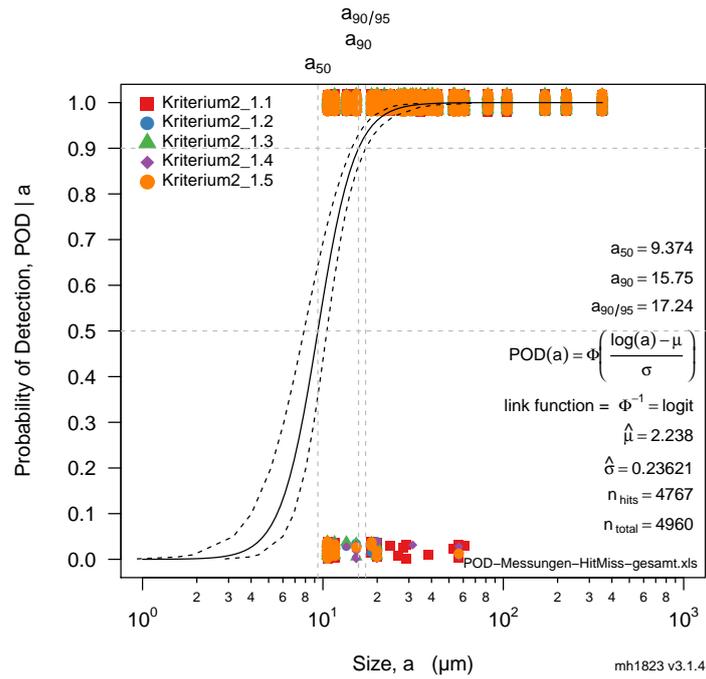


(a)

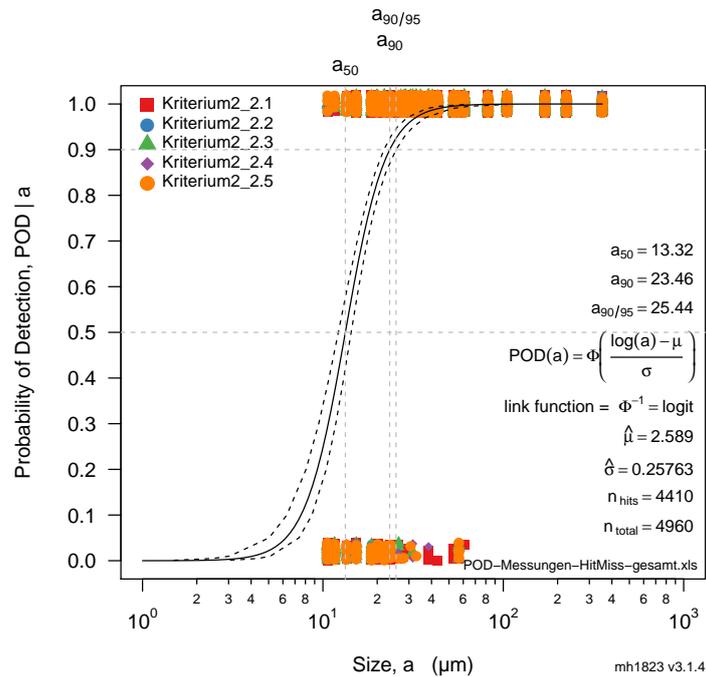


(b)

Abbildung 9.9: Hit/Miss-POD-Kurven für die Kriterien (a) 1-1 und (b) 1-2.



(a)



(b)

Abbildung 9.10: Hit/Miss-POD-Kurven für die Kriterien (a) 2-1 und (b) 2-2.

Tiefe zu klein. Zum Anderen konnten im Vorfeld die genauen Grenzen des 3%-97%-Bereiches nicht ermittelt werden. Da die Herstellung von kleinsten Mikrorissen aufwendig und teuer ist, soll deshalb die Hit/Miss-POD-Analyse als eine Tendenz dienen. Die Aussagen, die im Folgenden getroffen werden, lassen sich nur dahingehend interpretieren, wie sich die Auffindwahrscheinlichkeiten für verschiedene Ansätze der Datenanalyse auf die einzelnen Kurven auswirken. Dies ist allerdings ein entscheidender Vorteil gegenüber dem „ $\ln \hat{a}$ -vs.- $\ln a$ “-Modell, da bei der Hit/Miss-Analyse auch benachbarte Messwerte sehr einfach mit in die Verarbeitung einfließen können.

In Abb. 9.9 und 9.10 sind die POD-Kurven für die in Abschnitt 9.2.3 erwähnten Kriterien dargestellt. In Abb. 9.9 (a) werden die Fehlersignale mit einem SNR von 2 als Hit angesehen, die restlichen Defekte, deren Signalamplituden die Schwelle nicht überschreiten, sind folglich nicht gefundene Defekte und somit als Miss gewertet. Abb. 9.9 (b) stellt die gleiche Prozedur für ein SNR von 3 dar. Bei Abb. 9.10 (a) und (b) werden die benachbarten Spuren zusätzlich zur Bestimmung der POD-Kurven mit in die Analysen einbezogen; bei (a) für $\text{SNR} = 2$ und bei (b) für $\text{SNR} = 3$ für alle drei betrachteten Spuren. In Tabelle 9.3 sind die POD-Punkte a_{50} , a_{90} und $a_{90/95}$ aller vier POD-Kurven aufgelistet.

Kriterium	a_{50} (μm)	a_{90} (μm)	$a_{90/95}$ (μm)
1-1 (SNR2)	8,425	12,42	13,63
1-2 (SNR3)	11,53	16,36	17,64
2-1 (SNR2)	9,374	15,75	17,24
2-2 (SNR3)	13,32	23,46	25,44

Tabelle 9.3: Auflistung der POD-Werte für die Hit/Miss-Analyse.

Bei den beiden POD-Kurven, die eine Schwelle von $\text{SNR} = 2$ berücksichtigen, sind die Konfidenzbänder im unteren Bereich hin zu kleinen Defekttiefen nicht mehr parallel zur POD-Kurve. Das bedeutet, dass hier der Vertrauensbereich abnimmt. Dies ist ein Zeichen dafür, dass in diesem Bereich zu wenige Miss-Fehler vorliegen, wodurch die Aussagekraft der POD-Analyse insgesamt in Mitleidenschaft gezogen wird. Betrachtet man hingegen den Fall, dass als Schwelle $\text{SNR} = 3$ gilt, sind auch im unteren Bereich die Konfidenzbänder nahezu parallel zur POD-Kurve. Hier wirkt sich insbesondere die durch die Schwelle $\text{SNR} = 3$ vergrößerte Anzahl an nicht detektierten Defekten aus. Es befinden sich mehr Fehler im unteren Bereich des 3%-97%-Intervalls.

Zusätzlich lässt sich Abb. 9.9 (b) mit der Abb. 9.7 (a) vergleichen. Hier war bei beiden POD-Kurven $\text{SNR} = 3$ die Schwelle, bei der ein Defekt als gefunden gezählt wurde. Bei der „ $\ln \hat{a}$ -vs.- $\ln a$ “-POD-Kurve sind $a_{50} = 8,835 \mu\text{m}$, $a_{90} = 15,29 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 15,92 \mu\text{m}$. Demgegenüber sind die Werte für die gleiche Schwelle bei der Hit/Miss-Analyse $a_{50} = 11,53 \mu\text{m}$, $a_{90} = 16,36 \mu\text{m}$ und $a_{90/95} = 17,64 \mu\text{m}$. Die Werte sind bei der Hit/Miss-Analyse größer. Gründe hierfür sind wiederum die zu geringe Anzahl von Defekten insgesamt sowie von Defekten in der Nähe der 3%-Schwelle. Grundsätzlich sollten sich annähernd die gleichen POD-Kurven ergeben, wenn die Kriterien für eine Hit/Miss-Analyse erfüllt werden. Abweichungen können auch deshalb auftreten, da das „ $\ln \hat{a}$ -vs.- $\ln a$ “-Modell, welches die Signalamplitude mit berücksichtigt, mit weniger Defekten sinnvolle POD-Kurven ermittelt.

Wie schon im Grundlagen-Kapitel erwähnt, ist ein Vergleich mit POD-Werten in der Literatur nur dann gültig, wenn die gleichen Fehler und das gleiche Material untersucht wurden. Bei gleichen Fehlern, aber unterschiedlichen Materialien, ergeben sich immer unterschiedliche POD-Werte [163]. Im Fall der in diesem Kapitel vorgestellten POD-Analyse für Saarstahl 100Cr6 lassen sich keine vergleichbaren Untersuchungen finden. Für eine korrekte Betrachtung müssen die Ringe mit weiteren Prüfverfahren untersucht werden. Dann lassen sich die Messdaten auch im Rahmen einer Datenfusions-Analyse betrachten. Hier kann untersucht werden, inwieweit eine Fusion verschiedener Prüfmethoden zu einer Verbesserung der Auffindwahrscheinlichkeit für das gewählte Materialsystem führt [166].

9.5 Falschalarmrate (PFA) und ROC-Kurve

Neben den POD-Kurven, die eine Aussage darüber treffen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Defekt für einen bestimmten Defektparameter gefunden wird, ist die Aufstellung einer Falschalarmrate nötig. Hierbei wird ermittelt, inwieweit bei einer beliebig gesetzten Schwelle neben Defektsignalen auch Signale registriert werden, deren Ursprung kein Defekt ist. Hierdurch können Prüfobjekte als Ausschuß klassifiziert werden, obwohl sie keine Fehler besitzen. Es gilt, einen Kompromiss zu finden, die Falschalarmrate gering zu halten, aber dennoch Fehler mit einer gewissen Tiefe noch sicher zu registrieren.

Um die Falschalarmrate aufzustellen, wurden für jeden Kanal des GMR-Sensorarrays die Signale abzüglich der eigentlichen Defektsignale gezählt, die über einer gewählten Schwelle liegen. Geteilt durch die Gesamtanzahl aller Messpunkte ergibt sich für jede Messung ein prozentualer Anteil an Signalen, die nicht einem Defekt zugeordnet werden können.

In Abb. 9.11 (a) ist die Falschalarmrate PFA für alle 32 Kanäle (unterschiedliche Farben für die Kurven) des GMR-Sensorarrays in Abhängigkeit von der Detektionsschwelle, hier dem SNR, dargestellt. Zusätzlich enthält das Diagramm in (a) einen Ausschnitt für den Bereich von $\text{SNR} = 6$ bis $\text{SNR} = 10$. Die Werte schwanken hierbei in Abhängigkeit von den einzelnen Kanälen. Dieses Verhalten ist für drei SNR-Werte in (b) deutlicher dargestellt. Hier sind in drei Diagrammen die Falschalarmraten als Funktion des dazugehörigen Kanals für die SNR-Werte 2, 3 und 5 abgebildet. Hierbei handelt es sich um die gleichen Werte, welche schon vorher bei der Erstellung der einzelnen POD-Kurven verwendet wurden.

Die Falschalarmrate fällt von 2% bis 25% je nach Kanal für $\text{SNR} = 2$ auf unter 0,06% für ein $\text{SNR} > 6$ ab. Die Schwankungen sind ähnlich zu den POD-Kurven der unterschiedlichen Kanäle vom Rauschen abhängig. Da bei zunehmendem SNR aber auch die Auffindwahrscheinlichkeit abnimmt, können Defekte mit einer Tiefe von kleiner 30 μm bei hohem SNR nicht mehr sicher detektiert werden (siehe hierzu die vorherigen Abschnitte zu den POD-Kurven bzw. Abb. 9.8 und Tabelle 9.3).

In (b), Darstellung der PFA für die einzelnen Kanäle sowie von drei verschiedenen SNR, sind zudem wiederum Schwankungen ähnlich zu den POD-Kurven zwischen den Kanälen deutlich zu erkennen. Wird ein SNR von 3 als Schwelle angenommen, liegen die PFA-Werte je nach Kanal im Bereich von 0,05 bis 4,5%. Der $a_{90/95}$ -Wert für das „ln \hat{a} vs. ln a “-Modell liegt hierbei für alle Kanäle zusammen bei $a_{90/95} = 15,92 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 9.7 (a)). Das bedeutet, dass im schlimmsten Fall 4,5% aller Messwerte zu einem falschen Ergebnis führen. Ist dieser Wert zu hoch, muss die Schwelle heraufgesetzt werden, um die Falschalarmrate zu reduzieren, was zu einem Verlust der Tiefenempfindlichkeit führt. Zudem lassen sich Filter und Bildverarbeitung einsetzen, um einzelne Signale, welche nicht von Defekten hervorgerufen werden, zu unterdrücken, wodurch eine Verbesserung erreicht werden kann.

Abb. 9.11 (c) zeigt die ROC-Kurve (engl.: Receiver Operating Characteristic; Grenzwertoptimierungskurve) für drei verschiedene Risstiefen (Tiefen von 10 μm , 20 μm und 30 μm sind abgebildet). Aufgetragen ist der POD-Wert für einen festen Rissparameter, hier die Tiefe des Defektes, in Abhängigkeit von der Falschalarmrate PFA, gleichbedeutend mit einer Abnahme der Detektionsschwelle.

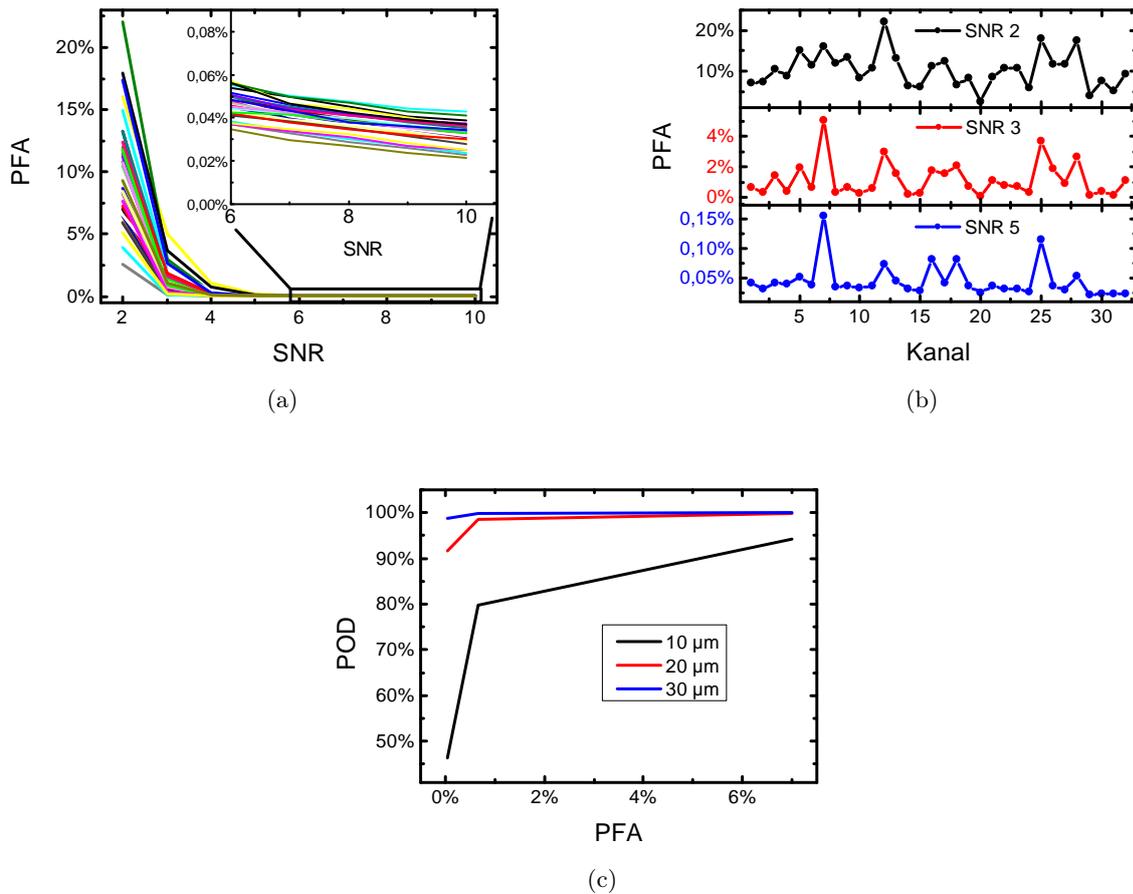


Abbildung 9.11: (a) Falschalarmrate (PFA) aller Messwerte beider Ringe je Kanal (Kanal 1 bis Kanal 32 in unterschiedlichen Linienfarben) in Prozent als Funktion des SNR. Der Ausschnitt gibt den Bereich von SNR = 6 bis SNR = 10 wieder. (b) PFA-Werte in % für die SNR-Werte 2 (schwarz), 3 (rot) und 5 (blau) je Kanal des GMR-Sensorarrays. (c) ROC-Kurve (POD vs. PFA) für Defekte mit einer Tiefe von 10 μm, 20 μm und 30 μm.

Für einen Defekt mit einer Tiefe von 10 μm (schwarz) liegt die Auffindwahrscheinlichkeit bei einem PFA-Wert von etwa 0,05% (SNR = 5) bei lediglich 46%. Wird die Detektionsschwelle erhöht, gleichbedeutend mit einer Zunahme der Falschalarmrate, steigt die Detektionswahrscheinlichkeit auf 80% (SNR = 3) bzw. 94% für SNR = 2. Für 20 μm entsprechend ist die Detektionswahrscheinlichkeit für SNR = 5 schon bei annähernd 91% und nähert sich den 100% bei Abnahme des SNR sehr schnell an. Gleiches gilt für Defekte mit einer Tiefe von 30 μm. Eine Verbesserung der ROC-Kurve hin zu höheren POD-Werten bei geringen PFA-Werten muss allerdings weiter verfolgt werden. Hier kann durch den Einsatz von Filtern sowie digitale Nachbearbeitung der Messwerte, z.B. bei Verwendung der Defektsignalcharakteristik bei der Defektregistrierung, eine Verbesserung erreicht werden.

Da die GMR-Streufstromprüfung empfindlicher auf das zu prüfende Material reagiert, als dies bei anderen Prüfverfahren der Fall ist (siehe hierzu Kap. 6), gilt wie bei den POD-Kurven, dass für jedes Material eine Aufstellung der Falschalarmrate sowie der ROC-Kurve durchgeführt werden muss. Zudem ist ein Vergleich mit Angaben in der Literatur nicht zulässig, da auch hier gleiche Bedingungen zwischen den verglichenen Prüfverfahren gelten müssen, damit dieser Vergleich Gültigkeit erhält. Nichtsdestotrotz ergeben die hier durchgeführten Untersuchungen zur Auffindwahrscheinlichkeit sowie

zur PFA und ROC einen ersten Anhaltspunkt für die Leistungsfähigkeit der GMR-Streufussprüfung. Fehler unterhalb von 50 μm , welche oft als untere Grenze für ein Verfahren angegeben werden, sind je nach Material noch sicher detektierbar.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Seit der Entdeckung der GMR-Sensoren wurde deren Einsatz für die ZfP diskutiert. Insbesondere für die Streuflussprüfung, bei der herkömmliche Spulen nicht in Frage kommen, eignen sich GMR-Sensoren aufgrund ihrer frequenzunabhängigen Signalerfassung sowie ihrer Empfindlichkeit. Allerdings wurden in den meisten Fällen Sensoren eingesetzt, deren Abmessungen nicht für ZfP-Anwendungen angepasst waren (z.B. NVE-Sensoren vom Typ AA (Magnetometer) und Typ AB (Gradiometer)). Dadurch wird die Messung lokaler, magnetischer Streufelder erschwert bzw. eine sichere Detektion von Defekten mit Abmessungen im μm -Bereich nahezu unmöglich. Zudem bestehen diese Sensoren aus Einzelelementen. Ein Array mit vielen Elementen führt hingegen zu einer Verringerung des zeitlichen Aufwandes einer Prüfung und ist gerade deshalb von Bedeutung für die automatisierte Prüfung großer Flächen.

Um diese Einschränkungen bei der Verwendung von kommerziellen, nicht angepassten Sensoren zu verringern, wurde in dieser Arbeit erstmalig eine Optimierung der Sensorelemente, insbesondere der Anordnung sowie der optimalen Größe der aktiven Flächen hinsichtlich der Detektion von Streufeldern in der Streuflussprüfung, durchgeführt. Durch diese Parameterstudie konnte das Design der Elemente optimal an die Bedürfnisse der ZfP angepasst werden.

Prinzipiell ist diese Untersuchung auf alle Magnetfeldsensoren anwendbar. Allerdings eignen sich aufgrund des jeweiligen physikalischen Effektes der verschiedenen Sensortypen sowie der dadurch bedingten Aufbauten nicht alle Magnetfeldsensoren gleichermaßen für eine Anwendung in der ZfP. Insbesondere bei der Oberflächenrissprüfung ist Bedingung für die Detektion, dass die Sensoren bzw. ihre aktiven Flächen miniaturisiert und nah an die zu prüfende Oberfläche herangebracht werden können, weshalb sich gerade GMR-Sensoren für die Entwicklung angepasster Sensorarrays eignen.

Um die Analyse vorzubereiten, wurden Voruntersuchungen mit GMR-Sensoren, die auf Nahfeldapplikationen ausgelegt sind (z.B. die GMR-Sensoren GMR7 (laterales Gradiometer) und GF792 (Magnetometer) der Firma *Sensitec GmbH*), durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Liftoff, Sensortyp sowie Anordnung der aktiven Flächen waren neben der Parameterstudie Bestandteil für ein neues Design ZfP-angepasster GMR-Sensorarrays.

Die neu hergestellten GMR-Sensorarrays zeichnen sich durch ein geringes Rauschen, eine hohe Sensitivität sowie eine hohe Temperaturstabilität aus. Ihre Eigenschaften wurden charakterisiert sowie deren Einsatz in der Streuflussmessung anhand verschiedenster Experimente validiert. Das Rauschen liegt für Frequenzen im Bereich von 1 kHz bei einigen $\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ und ist somit vergleichbar mit dem kommerzieller GMR-Sensoren. Die Temperaturabhängigkeit des GMR-Effektes der Sensoren beträgt 0,27 - 0,29 %/K.

Ein Vergleich der bisher verwendeten Sensoren mit den angepassten Sensorarrays zeigt Verbesserungen in der Sensitivität und Detektion von Mikrorissen. Im Fall des lateralen Gradiometers GMR7 lag das SNR der Nut mit einer Tiefe von $44 \mu\text{m}$ im Probekörper *Rissplatte 1* bei 3,0. Mit den angepassten Sensoren (hier Sensor Typ 4A) wird bei vergleichbarer Messung der Platte ein leicht besseres SNR von 3,3 erreicht. Wird der für kommerzielle Sensorik repräsentative NVE-Sensor AB001-02 (laterales Gradiometer) mit berücksichtigt, ergibt sich für die Nut mit einer Tiefe von $380 \mu\text{m}$ ein SNR von nur 1,7. Durch die Kapselung ist es bei diesem Sensor nicht möglich, die aktiven Flächen nah an die zu prüfende Oberfläche zu bringen, wodurch die Detektion kleinerer Defekte verhindert wird. Zum Vergleich betragen die SNR-Werte für die GMR-Sensoren GMR7 und 4A für die $380 \mu\text{m}$ tiefe Nut 38,7 bzw. 48,4 bei einem geringeren Liftoff in der Größenordnung von $100 \mu\text{m}$. Ein ähnliches Bild lässt

sich bei Untersuchungen der Lagerschalenringe aus Saarstahl 100Cr6 finden. Zum Vergleich ergeben sich hier SNR-Werte für die 40 μm tiefe Nut von 4,4 (Magnetometer GF792; Nahfeldsensor) bzw. 19,9 (angepasstes axiales Gradiometer Typ 4A). Insgesamt gesehen konnte durch die optimierten GMR-Sensorarrays eine Verbesserung der Detektion um 25% im Vergleich zum lateralen Gradiometer GMR7 bzw. um 452% bezüglich des Magnetometers GF792 erzielt werden. Für die Ortsauflösung ergab sich zwischen den verschiedenen GMR-Sensoren, dass die neuen Sensoren durch ihren geringeren Abstand zur Oberfläche leicht verbesserte Werte erreichen. Für Sensoren des Typs 4A (axiales Gradiometer) ergeben sich Risstrennungen ab einem Abstand der Defekte zueinander von 150 μm . Dieser Wert wird hauptsächlich durch den Liftoff LO beschränkt. Würden die Sensoren näher an die Oberfläche herangebracht werden können, wäre hier mit einer weiteren Verbesserung zu rechnen. Das laterale Gradiometer GMR7 hingegen konnte die beiden Nuten erst ab einem Abstand von 244 μm trennen. Dieser Wert entspricht nahezu der Basislänge von $BL = 250 \mu\text{m}$. Hier kann auch durch einen geringeren Liftoff keine Verbesserung erlangt werden, da es sich um ein laterales Gradiometer handelt.

Zusätzlich erfolgte ein Vergleich dieser Sensoren mit anderen Verfahren. Ziel dieses Vergleichs war es, die Einsatzfähigkeit der GMR-Sensoren in der Streuflussprüfung bezüglich anderer ZfP-Oberflächenverfahren hervorzuheben. Gegenüber den anderen Verfahren liegt die GMR-Streuflussprüfung bezüglich der Ortsauflösung im Mittelfeld. Die Verfahren Magnetpulverprüfung sowie die lokal angeregte Laserthermografie schneiden hier besser ab. So können Strukturen aufgrund der geringen Partikelgröße bei der Magnetpulverprüfung schon unterhalb von 100 μm räumlich getrennt werden. Bei der lokal angeregten Laserthermografie werden für die Separation je nach Versuchsaufbau Werte von etwa 100 μm erreicht. Die Wirbelstromprüfung hingegen besitzt aufgrund der Größe der Spulen die schlechteste Ortsauflösung. Hier wird eine Risseparation erst ab 0,6 mm erreicht.

Des Weiteren ist die Detektion von Rissen mit geringen Tiefen im μm -Bereich im Fall der GMR-Sensoren viel stärker von dem zu untersuchenden Material abhängig, als dies bei den anderen Verfahren der Fall ist. In der Arbeit wurden verschiedene Materialsysteme untersucht. Es ergaben sich als untere Grenze für die Detektion von Nuten je nach Material Tiefen zwischen 10 μm (oberflächenpolierter und ausgehärteter Saarstahl (100Cr6)) und 170 μm (Kaltarbeitsstahl (90MnCrV8)). Mit den NVE-Sensoren waren Defekte erst ab Tiefen von 380 μm detektierbar. Zudem erwiesen sich die GMR-Sensoren im Vergleich zu den anderen Verfahren gerade wegen der kleinen Dimensionen der aktiven Flächen und der hieraus folgenden hohen Ortsauflösung als sehr empfindlich auf magnetische Schwankungen im Material. Diese Schwankungen können durch Gefügeänderungen im Material hervorgerufen werden. Da solche Änderungen in der Materialmatrix zu Defekten führen können, bieten die GMR-Sensoren im Vergleich zu den anderen Prüfverfahren die Möglichkeit, für die Untersuchung der Rissentstehung und des -wachstums eingesetzt zu werden.

Zusätzlich zum Vergleich mit anderen Prüfverfahren ist zur weiteren Validierung eine Untersuchung zur Auffindwahrscheinlichkeit, bzw. wie gut das System in Bezug auf Falschalarme reagiert, durchzuführen. Dadurch lassen sich die Grenzen eines Prüfverfahrens hinsichtlich der Detektion von Mikrorissen abschätzen. Für die Validierung wurden mehrere Messreihen durchgeführt, die als Datenbasis für eine statistische Auswertung nötig sind. Im Fall von Lagerschalenringen, welche durch ihre Material- und Oberflächeneigenschaften besonders gut für die GMR-Streuflussprüfung geeignet sind, ergaben sich Auffindwahrscheinlichkeiten (POD) für Defekte mit Tiefen im Bereich von 30 μm von über 95%. Die Falschalarmraten (PFA) lagen hierbei je nach Kanal zwischen 0,05% und 0,15% (gleichbedeutend mit einem SNR von 5 als Detektionsschwelle).

Neben der Charakterisierung der neuen Sensoren sowie einer Untersuchung hinsichtlich POD und PFA konnte während der Arbeit mit Industriepartnern eine automatisierte Prüfeinrichtung für Lagerschalenringe realisiert werden. Hierbei wurden die neuen Sensoren erfolgreich zur Detektion der Streufelder eingesetzt.

Zusammenfassend ergibt sich für die während dieser Arbeit entstandenen GMR-Sensorarrays ein hohes Potenzial im Hinblick auf deren Einsatz zur Detektion von Mikrorissen. Zudem lässt sich die hohe Ortsauflösung aufgrund der Sensorminiaturisierung bei gleichbleibender Empfindlichkeit für andere Untersuchungen einsetzen, die neben der klassischen Detektion von Defekten die Untersuchung von Materialinhomogenitäten in Form von Permeabilitätsschwankungen zulassen, wodurch die Sensoren ebenfalls für die Materialcharakterisierung von Interesse sind.

Die in dieser Arbeit entwickelten und vorgestellten Sensoren reagieren sehr empfindlich auf die Materialeigenschaften, insbesondere auf lokale Permeabilitätsschwankungen. Diese Eigenschaft, welche sich bei der Detektion von Defekten nachteilig auswirken kann, erweist sich in Bezug auf eine Untersuchung zur Rissentstehung bzw. zum Risswachstum als Vorteil gegenüber anderen Verfahren. Da sich gerade an Korngrenzen in der Materialmatrix Spannungen ergeben können, die zur Rissentstehung führen, sind die Eigenschaften der in dieser Arbeit entwickelten Sensoren in Bezug auf Ortsauflösung und Sensitivität geeignet, hierzu Untersuchungen durchzuführen. Dafür sind Langzeitstudien, bei denen verschiedenste Proben vor und nach Belastungen gemessen werden, notwendig. So könnten mit GMR-Sensoren Ergebnisse erzielt werden, die zu einem besseren Verständnis der Rissentstehung führen.

Ein weiterer Vorteil der Sensoren ist die Messung der Streufelder selbst. Durch deren Quantifizierung kann im Gegensatz zur Magnetpulverprüfung eine Bewertung der Defekte durchgeführt werden. Durch die starke Abhängigkeit der Streufelder von der Geometrie, insbesondere der Tiefe, können Rekonstruktionsalgorithmen aufgestellt werden, welche die Permeabilität im Material, ausgehend vom gemessenen Streufeldsignal, berechnen. An Stellen, an denen die berechnete Permeabilität die Permeabilität von Luft wiedergibt, befindet sich der Defekt. Hierzu wird derzeit an der BAM eine Dissertation von Frau Verena Reimund angefertigt [26], welche die in dieser Arbeit gewonnenen GMR-Messdaten aufgreift und für die Rekonstruktion verwendet. Zudem können die GMR-Messdaten für eine Datenfusion verwendet werden, bei der Messungen verschiedenster Prüfverfahren zusammen betrachtet werden. Das Ziel dabei ist, durch die erhöhte Datenbasis ein besseres Ergebnis hinsichtlich der Detektion von kaum detektierbaren Defekten zu erreichen. Dies ist ebenfalls Bestandteil einer Promotion an der BAM, welche die GMR-Messdaten aufgreift und für eine Fusion mitverwendet.

Die Sensoren können auch in der Wirbelstromprüfung eingesetzt werden. Hier sind vor allem die Frequenzen kleiner 1 kHz interessant. In diesem Frequenzbereich sind herkömmliche Wirbelstromsonden basierend auf Spulensystemen nicht empfindlich genug, da die Spulensignale abhängig von der Frequenz sind und die Amplitude mit der Frequenz abnimmt. Zudem ist die Ortsauflösung sehr gering. Gerade niedrige Frequenzen sind aber in Bezug auf tiefer liegende Defekte interessant. Hier können GMR-Sensoren einen Ausweg bieten, da diese bzw. der GMR-Effekt bis auf eine geringe Zunahme der Rauscheinflüsse nicht von der Frequenz abhängt.

Um eine Aufnahme der GMR-Streufeldprüfung in Standards und Normen weiter voranzutreiben, sind umfangreiche Untersuchungen zur Auffindwahrscheinlichkeit und Falschalarmrate notwendig, damit verschiedenste Defektgeometrien sowie unterschiedliche Materialien in die Analyse mit einfließen können. Zusätzlich sind auch Anlagen zur vollautomatisierten Prüfung mit den GMR-Sensoren und verbesserter Sondenführung in Planung. Hierzu werden derzeit Testläufe sowie die Ausarbeitung einer praxistauglichen Anwendung durchgeführt, um die optimierten GMR-Sensorarrays in eine Fertigungslinie eines Stahlerzeugers zu integrieren. In Voruntersuchungen erwiesen sich die neuen GMR-Sensoren für die Prüfaufgabe im Vergleich zur klassischen Wirbelstromprüfung als zielführender.

Neben der Verwendung der GMR-Sensorarrays in anderen Themenfeldern außerhalb der klassischen ZfP sowie der Validierung und dem Einsatz in vollautomatisierten Prüfanlagen sind weitere Verbesserungen in Bezug auf Sensor- und Sondenometrie möglich. Dies beinhaltet eine Fortentwicklung der lokalen Anregung sowie der Überprüfung der Sensorarrays selbst in Hinblick auf den Einsatz von Magnetometern bzw. einem verändertem Layout zur Verbesserung der Detektion von Streufeldern.

Das Joch, das während dieser Arbeit zur Erzeugung des Magnetfeldes eingesetzt wurde, besteht aus Baustahl. Für die vorgestellte Prüfeinrichtung war die Größe des Jochs aufgrund des begrenzten Platzes beschränkt. Eine direkte Anpassung der Polflächen an die Krümmung des Rings konnte nicht vorgenommen werden, da die Prüfanlage auf verschiedene Ringdurchmesser ausgelegt wurde. Ist die zu prüfende Geometrie fest, d.h. die Messsonde wird nicht für die Prüfung von verschiedenen, geometrisch unterschiedlichen Objekten eingesetzt, könnten Anpassungen der Polflächen an die Geometrie des Prüfobjektes zur Verbesserung des Magnetfeldes durchgeführt werden, sodass eine homogenere Verteilung im zu prüfenden Material erzeugt werden kann. Zudem kann, wenn es die Prüfung zulässt, eine Verbreiterung des Jochs bezüglich der Platinenmesskante mit den GMR-Elementen in Betracht gezogen werden. Dadurch sollte auch für die einzelnen GMR-Elemente in einem Array ein ähnlich starkes Magnetfeld im Material erreicht werden.

Die Geometrie des Jochs ist ein möglicher Ansatzpunkt zur Verbesserung. Ein weiterer Ansatz liegt in der Verwendung eines magnetisch geeigneteren Materials für das Joch. Materialien mit einer hohen Permeabilität und geringer Hysterese würden zudem den Einsatz des Jochs in einer Wirbelstromanwendung begünstigen. Hier ist z.B. Vitroperm[®] 500 der *Vacuumschmelze GmbH & Co. KG* ein geeigneter Kandidat. Dieses Material zeichnet sich durch eine geringe Hysterese sowie einer hohen Permeabilität aus. Zudem ist es auf Hochfrequenzanwendungen ausgelegt. Allerdings ist eine Bearbeitung nicht möglich, da es sich um einen spröden und hoch giftigen Werkstoff handelt. Es gibt vorgefertigte Kerne mit festgelegter Geometrie. Diese sind jedoch in vielen Fällen, gerade wenn es sich um gekrümmte Oberflächen handelt sowie nur ein geringes Platzangebot für die Sonde zur Verfügung steht, für eine praktische Anwendung nicht geeignet. Ist eine Sonderanfertigung nötig, sind in diesem Fall sehr hohe zusätzliche Kosten zu berücksichtigen.

Neben der Anpassung des Jochs kann eine Verbesserung des gegenwärtigen Aufbaus durch eine kontaktfreie Prüfung erlangt werden. Die vorgestellte Prüfsonde besitzt höhenverstellbare Laufrollen, um einen konstanten Abstand zu gewährleisten. Mit einer intelligenten Abstandsregelung wären Einflüsse, wie sie durch ungenau gefertigte Rollen verursacht werden, im zu detektierenden Messsignal nicht enthalten. In der Prüfeinrichtung war eine kostengünstige, platzsparende Regelung nicht möglich, sollte aber bei weiteren Anwendung mit berücksichtigt werden.

Das GMR-Sensorlayout bietet, wenn der Platz auf der Platine ausreichend sein sollte, mit einer anderen Verschaltung der Versorgungsleiterbahnen den Aufbau eines Magnetometerarrays. Dadurch könnte das Absolutfeld gemessen werden, wenn dies erforderlich sein sollte. Bei einer Überarbeitung des Sensorlayouts sollte zudem versucht werden, GMR-Referenzelemente direkt auf den Chip zu integrieren. Der derzeitige Aufbau lässt nur das Hinzufügen der Referenzbrücke aus Widerständen zu, die aus anderen Materialien bestehen. Dadurch ist nicht die gleiche Temperaturabhängigkeit zu erreichen. Dies könnte sich gegebenenfalls negativ auf die Leistung des Sensors auswirken.

TMR-Sensoren als weitere Möglichkeit, das Magnetfeld zu detektieren, bieten den Vorteil gegenüber GMR- aber auch AMR-Sensoren, kleinere Strukturen und ihre lokal begrenzten Streufelder mit einem verbesserten SNR aufzulösen. TMR-Sensoren besitzen aufgrund ihres internen Aufbaus und der Verwendung eines Isolators als Zwischenschicht zwischen zwei ferromagnetischen Schichten wesentlich höhere Widerstandseffekte von $TMR > 100\%$. Zudem können im Gegensatz zu GMR-Sensoren bei sehr kleinen aktiven Flächen im μm^2 -Regime hohe Gesamtwiderstände in der Größenordnung von einigen $\text{k}\Omega$ erreicht werden. Dadurch kann auch bei kleinen Strukturen eine hohe Spannung angelegt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] AMINEH, Reza K. ; NIKOLOVA, Natalia K. ; REILLY, James P. ; HARE, James R.: Characterization of Surface- Breaking Cracks Using One Tangential Component of Magnetic Leakage Field Measurements. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 44 (2008), S. 516
- [2] MAHDI, A.E. ; MAPPS, D.J.: High- T_c SQUIDS: the ultra sensitive sensors for non-destructive testing and biomagnetism. In: *Sensors and Actuators A* 81 (2000), S. 367–370
- [3] KREUTZBRUCK, M.v. ; ALLWEINS, K.: High field resolution for nondestructive testing using sensitive magnetometers. In: *Sensors and Actuators A* 101 (2002), S. 85–91
- [4] GRUHL, Friederike ; MÜCK, Michael ; KREUTZBRUCK, Marc von ; DECHERT, Jörg: A scanning superconducting quantum interference device microscope with high spatial resolution for room temperature samples. In: *Review of Scientific Instruments* 72 (2001), S. 2090
- [5] GRÜGER, H.: Array of miniaturized fluxgate sensors for non-destructive testing applications. In: *Sensors and Actuators A* 106 (2003), S. 326–328
- [6] KLANK, M. ; HAGEDORN, O. ; HOLTHAUS, C. ; SHAMONIN, M. ; DÖTSCH, H.: Characterization and optimization of magnetic garnet films for magneto-optical visualization of magnetic field distributions. In: *NDT & E International* 36 (2003), Nr. 6, 375 - 381. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00012-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00012-4). – DOI 10.1016/S0963-8695(03)00012-4. – ISSN 0963–8695
- [7] BATISTA, L. ; RABE, U. ; HIRSEKORN, S.: Magnetic micro- and nanostructures of unalloyed steels: Domain wall interactions with cementite precipitates observed by MFM. In: *NDT & E International* 57 (2013), Nr. 0, 58 - 68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.03.004>. – DOI 10.1016/j.ndteint.2013.03.004. – ISSN 0963–8695
- [8] ALLWEINS, K. ; KREUTZBRUCK, M. von ; GIERELT, G.: Defect detection in aluminum laser welds using an anisotropic magnetoresistive sensor array. In: *Journal of Applied Physics* 97 (2005), S. 10Q102
- [9] ALLWEINS, Kai: *Echtzeitfähiges Prüfverfahren zur Schweißnahtkontrolle an Aluminium-Bauteilen mittels magnetoresistiver Sensoren*, Justus-Liebig-Universität, Institut für Angewandte Physik, Gießen, Diss., 2005
- [10] BINASCH, G. ; GRÜNBERG, P. ; SAURENBACH, F. ; ZINN, W.: Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. In: *Physical Review B* 39 (1989), S. 4828–4830
- [11] BAIBICH, M.N. ; BROTO, J.M. ; FERT, A. ; DAU, F. Nguyen v. ; PETROFF, F. ; EITENNE, P. ; CRUEZET, G. ; FRIEDERICH, A. ; CHAZELAS, J.: Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. In: *Physical Review Letters* 61 (1988), S. 2472–2475
- [12] JULLIERE, M.: Tunneling between ferromagnetic films. In: *Physics Letters* 54A (1975), S. 225

- [13] KLOSTER, A. ; KRÖNING, M. ; YASHAN, A. ; SMORODINSKY, J. ; USTINOV, V.: Linear Magnetic Stray Flux Array based on GMR-Gradiometers. In: *NDE2002 predict. assure. improve. National Seminar of ISNT, Chennai, 5.-7. 12. 2002*, 2002
- [14] KATAOKA, Yasuhiro ; MURAYAMA, Shuhei ; WAKIWAKA, Hiroyuki ; SHINOURA, Osamu: Application of GMR line sensor to detect the magnetic flux distribution for nondestructive testing. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 15 (2001/2002), S. 47–52
- [15] SHARATCHANDRA SINGH, W. ; RAO, B.P.C. ; VAIDYANATHAN, S. ; JAYAKUMAR, T.: Detection of leakage magnetic flux from near-side and far-side defects in carbon steel plates using a giant magneto-resistive sensor. In: *Measurement Science and Technology* 19 (2008), S. 015702
- [16] CHEN, L. ; QUE, P.-W. ; JIN, T.: A Giant-Magneto-resistance Sensor for Magnetic-Flux-Leakage Nondestructive Testing of a Pipeline. In: *Russian Journal of Nondestructive Testing* 41 (2005), S. 69–73
- [17] YASHAN, André: *Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren*, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III, Saarbrücken, Diss., 2008
- [18] KAACK, M. ; ORTH, T. ; FISCHER, G. ; WEINGARTEN, W. ; KOKA, A. ; NITSCHKE, S. ; ARZT, N.: Application of GMR Sensors for the Industrial Inspection of Seamless Steel Pipes. In: *11th Symposium - Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems*, Wetzlar, 2011
- [19] DOGARU, T. ; SMITH, S.T.: Edge crack detection using a giant magneto-resistance based eddy current sensor. In: *Nondestructive Testing and Evaluation* 16 (2000), S. 31–53
- [20] DOGARU, Teodor ; SMITH, Stuart T.: Giant Magneto-resistance-Based Eddy-Current Sensor. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 37 (2001), S. 3831
- [21] KIM, Jaejoon ; YANG, Guang ; UDPA, Lalita ; UDPA, Satish: Classification of pulsed eddy current GMR data on aircraft structures. In: *NDT & E International* 43 (2010), S. 141–144
- [22] WINCHESKI, B. ; NAMKUNG, M.: DEEP FLAW DETECTION WITH GIANT MAGNETORESISTIVE (GMR) BASED SELF-NULLING PROBE. In: THOMPSON, D.O. (Hrsg.) ; CHIMENTI, D.E. (Hrsg.): *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 20, AIP Conference Proceedings 509, New York, 2000, S. 465–472
- [23] WINCHESKI, B. ; YU, F. ; SIMPON, J. ; WILLIAMS, P. ; RACKOW, K.: Development of SDT sensor based eddy current probe for detection of deep fatigue cracks in multi-layer structure. In: *NDT & E International* 43 (2010), S. 718–725
- [24] TAMBURRINO, A. ; VENTRE, S. ; FERRIGNO, L. ; UDPA, S.: Characterization and implementation of a GMR based probe for eddy current testing. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 28 (2008), S. 329–336
- [25] KREUTZBRUCK, M. ; ALLWEINS, K. ; STRACKBEIN, C. ; BERNAU, H.: High Resolution Eddy Current Testing of Superconducting Wires using GMR-Sensors. In: *17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China*, 2008
- [26] REIMUND, Verena: *Magnetic Tomography for Non-Destructive Evaluation of Ferromagnetic Steel*, Technische Universität Illmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung (in Bearbeitung), Dissertation, 2014

- [27] JACKSON, J.: *Klassische Elektrodynamik*. 4. de Gruyter, 2006
- [28] MORRISH, A.H.: *The physical principles of magnetism*. John Wiley & Sons, 1965
- [29] BLUNDELL, Stephen: *Magnetism in Condensed Matter*. 4. Oxford University Press, 2001
- [30] BLUNDELL, Stephen: *Magnetism in Condensed Matter*. 4. Oxford University Press, 2001. – 194–200 S.
- [31] NOLTING, Wolfgang: *Grundkurs Theoretische Physik 3: Elektrodynamik*. 6. Springer, 2003. – 177–178 S.
- [32] REIMUND, V. ; BLOME, M. ; PELKNER, M. ; KREUTZBRUCK, M.: Fast defect parameter estimation based on magnetic flux leakage measurements with GMR-sensors. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 37 (2011), S. 199–205
- [33] FÖRSTER, F.: Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streuflußverfahrens. In: *Materialprüfung* 23 (1981), S. 372
- [34] FÖRSTER, F.: New findings in the field of non-destructive magnetic leakage field inspection. In: *NDT International* 19 (1986), Nr. 1, 3 - 14. [http://dx.doi.org/10.1016/0308-9126\(86\)90134-3](http://dx.doi.org/10.1016/0308-9126(86)90134-3). – DOI 10.1016/0308-9126(86)90134-3. – ISSN 0308-9126
- [35] ZATSEPIN, N. ; SHCHERBININ, V.: Calculation of the magneto static field of surface defects. I. Field topography of defect models. In: *Defektoskopija* 5 (1966), S. 50–59
- [36] SHCHERBININ, V.E. ; PASHAGIN, A.I.: Influence of the extension of a defect on the magnitude of its magnetic field. In: *Soviet Journal of Nondestructive Testing* 8 (1972), S. 441–447
- [37] EDWARDS, C. ; PALMER, S.B.: The magnetic leakage field of surface-breaking cracks. In: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 19 (1986), S. 657–673
- [38] MANDAL, K ; ATHERTON, D L.: A study of magnetic flux-leakage signals. In: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31 (1998), S. 3211–3217
- [39] DYAKIN, V.V. ; UMERGALINA, O.V. ; RAEVSKII, V.Ya.: The Field of a Finite Defect in a 3D Semispace. In: *Russian Journal of Nondestructive Testing* 41 (2005), S. 28–42
- [40] MANDACHE, C. ; CLAPHAM, L.: A model for magnetic flux leakage signal predictions. In: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003), S. 2427–2431
- [41] DUTTA, Sushant M. ; GHORBEL, Fathi H. ; STANLEY, Roderic K.: Simulation and Analysis of 3-D Magnetic Flux Leakage. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 45 (2009), S. 1966–1972
- [42] DUTTA, S.M. ; GHORBEL, F.H. ; STANLEY, R.K.: Dipole Modeling of Magnetic Flux Leakage. In: *IEEE Transaction on Magnetics* 45 (2009), S. 1959–1965
- [43] BOWLER, J. R. ; BOWLER, N.: Evaluation of the magnetic field near a crack with application to magnetic particle inspection. In: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35 (2002), S. 2237–2242
- [44] LUKYANETS, S. ; SNARSKII, A. ; SHAMONIN, M. ; BAKAEV, V.: Calculation of magnetic leakage field from a surface defect in a linear ferromagnetic material: an analytical approach. In: *NDT & E International* 36 (2003), S. 51–55

- [45] SNARSKII, A.A. ; ZHENIROVSKYY, M. ; MEINERT, D. ; SCHULTE, M.: An integral equation model for the magnetic flux leakage method. In: *NDT & E International* 43 (2010), S. 343–347
- [46] MARINESCU, M. ; MARINESCU, N.: Magnetic Leakage Fields from Extended Inhomogeneities in Ferromagnetic Plates. In: *IEEE Transaction on Magnetics* 30 (1994), S. 2960–2963
- [47] ALTSCHULER, E. ; PIGNOTTI, A.: Nonlinear model of flaw detection in steel pipes by magnetic flux leakage. In: *NDT & E International* 28 (1995), S. 35–40
- [48] FÖRSTER, F.: On the Way from “Know-how” to the “Know-why” in the Magnetic Leakage Field Method of Nondestructive Testing (Part Two). In: *Materials Evaluation* 43 (1985), S. 1398
- [49] FÖRSTER, F.: On the Way from “Know-how” to the “Know-why” in the Magnetic Leakage Field Method of Nondestructive Testing (Part One). In: *Materials Evaluation* 43 (1985), S. 1154
- [50] MUZHITSKII, V.F. ; SHCHERBININ, V.E.: Magnetic Field of a Short Rectangular Slot-Type Flaw. In: *Russian Journal of Nondestructive Testing* 42 (2006), S. 115–118
- [51] HWANG, J.H. ; LORD, W.: Finite Element Modeling of magnetic Field/Defect Interactions. In: *Journal of Testing and Evaluation* 3 (1975), S. 21–25
- [52] KIKUCHI, H. ; KURISAWA, Y. ; ARA, K. ; KAMADA, Y. ; KOBAYASHI, S.: Feasibility study of magnetic flux leakage method for condition monitoring of wall thinning on tube. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 33 (2010), S. 1087–1094
- [53] LI, Yong ; WILSON, John ; TIAN, Gui Y.: Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation. In: *NDT & E International* 40 (2007), S. 179–184
- [54] CHEN, Z. ; PREDA, G. ; MIHALACHE, O. ; MIYA, K.: A fast forward analysis scheme for nonlinear static electromagnetic problems. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 14 (2001/2002), S. 513–520
- [55] DIN EN ISO 15549: *Zerstörungsfreie Prüfung - Wirbelstromprüfung - Allgemeine Grundlagen (ISO 15549:2008)*. 03 2011
- [56] DIN EN ISO 9934 - 2: *Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung - Teil 2: Prüfmittel*. 03 2003
- [57] GAUSS, G.: Automatisierung beim Einsatz der Magnetpulverprüfung. In: *DACH-Jahrestagung 2008, St.Gallen (CH)*, 2008
- [58] AMINEH, Reza K. ; KOZIEL, Slawomir ; NIKOLOVA, Natalia K. ; BANDLER, John W. ; REILLY, James P.: A Space Mapping Methodology for Defect Characterization From Magnetic Flux Leakage Measurement. In: *IEEE Transaction on Magnetics* 44 (2008), S. 2058–2065
- [59] GLORIA, N.B.S. ; AREIZA, M.C.L. ; MIRANDA, I.V.J. ; REBELLO, J.M.A.: Development of a magnetic sensor for detection and sizing of internal pipeline corrosion defects. In: *NDT & E International* 42 (2009), S. 669–677
- [60] HWANG, J. ; LEE, J. ; KWON, S.: The application of a differential-type Hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels. In: *NDT & E International* 42 (2009), S. 34–41

- [61] MINKOV, D. ; LEE, J. ; SHOJI, T.: Study of crack inversion utilizing dipole model of a crack and Hall element measurements. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 217 (2000), S. 207–215
- [62] MINKOV, D. ; TAKEDA, Y. ; SHOJI, T. ; LEE, J.: Estimating the sizes of surface cracks based on Hall element measurements of the leakage magnetic field and a dipole model of a crack. In: *Applied Physics A* 74 (2002), S. 169–176
- [63] OOTA, A. ; ITO, T. ; KAWANO, K. ; SUGIYAMA, D. ; AOKI, H.: Magnetic detection of cracks by fatigue in mild steels using a scanning Hall-sensor microscope. In: *Review of Scientific Instruments* 70 (1999), S. 184–186
- [64] PARK, Gwan S. ; PARK, Eun S.: Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT). In: *IEEE Transaction on Magnetics* 38 (2002), S. 1277–1280
- [65] ATZLESBERGER, J. ; ZAGAR, B.: Magnetic flux leakage measurement setup for defect detection. In: *Procedia Engineering* 5 (2010), S. 1401–1404
- [66] CHADY, T.: Evaluation of Stress Loaded Steel Samples Using GMR Magnetic Field Sensor. In: *IEEE Sensors Journal* 2 (2002), S. 488–493
- [67] TSUKADA, K. ; YOSHIOKA, M. ; KIWA, T. ; HIRANO, Y.: A magnetic flux leakage method using a magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation of spot welds. In: *NDT & E International* 44 (2011), S. 101–105
- [68] PRIES, H.: Giant-Magnetic-Resistance Sensoren in der industriellen zFP. In: *DACH-Jahrestagung, St. Gallen*, 2008
- [69] PHILIP, J. ; RAO, C. B. ; JAYAKUMAR, T. ; RAJ, B.: A new optical technique for detection of defects in ferromagnetic materials and components. In: *NDT & E International* 33 (2000), Nr. 5, 289 - 295. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(99\)00052-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(99)00052-3). – DOI 10.1016/S0963-8695(99)00052-3. – ISSN 0963–8695
- [70] LEE, J. ; WANG, T. R. S. R. Shoji ; HONG, S.: Non-destructive testing in the high-temperature regime by using a magneto-optical film. In: *NDT & E International* 41 (2008), S. 420–426
- [71] MAHENDRAN, V. ; PHILIP, J.: Nanofluid based optical sensor for rapid visual inspection of defects in ferromagnetic materials. In: *Applied Physics Letters* 100 (2012), S. 073104
- [72] SUN, Y. ; KANG, Y. ; QIU, C.: A permanent magnetic perturbation testing sensor. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 155 (2009), S. 226–232
- [73] PETKOVIC, B. ; HAUEISEN, J. ; ZEC, M. ; UHLIG, R.P. ; BRAUER, H. ; ZIOLKOWSKI, M.: Lorentz force evaluation: A new approximation method for defect reconstruction. In: *NDT & E International* 59 (2013), S. 57–67
- [74] JUN, J. ; LEE, J.: Nondestructive evaluation of cracks in a paramagnetic specimen with low conductivity by penetration of magnetic fluid. In: *NDT & E International* 42 (2009), S. 297 – 303
- [75] BLAKELEY, B. ; LUGG, M.: Recent research and development activities in electromagnetic sensor technologies. In: *Insight* 53 (2011), S. 138

- [76] GRIMBERG, Raimond ; UDPA, Lalita ; SAVIN, Adriana ; STEIGMANN, Rozina ; PALIHOVICI, Valerian ; UDPA, Satish S.: 2D Eddy current sensor array. In: *NDT & E International* 39 (2006), S. 264–271
- [77] CACCIOLA, M. ; MEGALI, G. ; PELLICANÓ, D. ; MORABITO, F.C.: A GMR-ECT based embedded solution for applications on PCB inspections. In: *Sensors and Actuators A* 167 (2011), S. 25–33
- [78] POSTOLACHE, O. ; GEIRINHAS RAMOS, H. ; LOPES RIBEIRO, A.: Detection and characterization of defects using GMR probes and artificial neural networks. In: *Computer Standards & Interfaces* 33 (2011), S. 191–200
- [79] JUN, J. ; LEE, J.: Nondestructive evaluation of a crack on austenitic stainless steel using a sheet type induced current and a Hall sensor array. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (2008), S. 1684–1691
- [80] KREUTZBRUCK, M.V. ; THEISS, A. ; MÜCK, M. ; HEIDEN, C.: Compensation electronics for larger dynamic range of a SQUID based nondestructive evaluation system. In: *Review of Scientific Instruments* 70 (1999), S. 3714–3718
- [81] SCHLICHTING, Joachim: *Integrale Verfahren der aktiven Infrarotthermografie*, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, Diss., 2012
- [82] MAHDI, A.E. ; PANINA, L. ; MAPPS, D.: Some new horizons in magnetic sensing: high- T_c SQUIDS, GMR and GMI materials. In: *Sensors and Actuators A* 105 (2003), S. 271–285
- [83] LENZ, J. ; EDELSTEIN, A.S.: Magnetic Sensors and Their Applications. In: *IEEE Sensors Journal* 6 (2006), S. 631–649
- [84] RIPKA, P. ; JANOSEK, M.: Advances in Magnetic Field Sensors. In: *IEEE Sensors Journal* 10 (2010), S. 1108–1116
- [85] ROBBES, D. ; DOLABDJIAN, C. ; MONFORT, Y.: Performances and place of magnetometers based on amorphous wires compared to conventional magnetometers. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 249 (2002), S. 393–397
- [86] ROBBES, D.: Highly sensitive magnetometers - a review. In: *Sensors and Actuators A* 129 (2006), S. 86–93
- [87] PANINA, L. V. ; MOHRI, K. ; BUSHIDA, K. ; NODA, M.: Giant magneto-impedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys (invited). In: *Journal of Applied Physics* 76 (1994), S. 6198–6203
- [88] ALVES, F. ; BENSALAH, A.-D.: New 1D-2D magnetic sensors for applied electromagnetic engineering. In: *Journal of Materials Processing Technology* 181 (2007), S. 194–198
- [89] BEACH, R.S. ; BERKOWITZ, A.E.: Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire. In: *Applied Physics Letters* 64 (1994), S. 3652–3654
- [90] PHAN, M.-H. ; PENG, H.-X.: Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. In: *Progress in Materials Science* 53 (2008), S. 323–420
- [91] KREUTZBRUCK, Marc: *Analyse zur zerstörungsfreien Prüfung mittels Wirbelstromanwendungen unter Verwendung von SQUID*, Justus-Liebig-Universität, Institut für angewandte Physik, Gießen, Diss., 1998

-
- [92] DOLABDJIAN, C. ; QASIMI, A. ; BLOYET, D. ; MOSSER, V.: Spatial resolution of SQUID magnetometers and comparison with low noise room temperature magnetic sensors. In: *Physica C* 368 (2002), S. 80–84
- [93] DRUNG, Dietmar: High- T_c and low- T_c dc SQUID electronics. In: *Superconductor Science and Technology* 16 (2003), S. 1320–1336
- [94] MERAYO, J.M.G. ; PETERSEN, J.R. ; NIELSEN, O.V. ; PRIMDAHL, F. ; BRAUER, P.: A portable single axis magnetic gradiometer. In: *Sensors and Actuators A* 93 (2001), S. 185–196
- [95] PARK, H.-S. ; HWANG, J.-S. ; CHOI, W.-Y. ; SHIM, D.-S. ; NA, K.-W. ; CHOI, S.-O.: Development of micro-fluxgate sensors with electroplated magnetic cores for electronic compass. In: *Sensors and Actuators A* 114 (2004), S. 224–229
- [96] RIPKA, P.: Advances in fluxgate sensors. In: *Sensors and Actuators A* 106 (2003), S. 8–14
- [97] KALUZA, F. ; GRÜGER, A. ; GRÜGER, H.: New and future applications of fluxgate sensors. In: *Sensors and Actuators A* 106 (2003), S. 48–51
- [98] LEROY, P. ; COILLOT, C. ; MOSSER, V. ; ROUX, A. ; CHANTEUR, G.: An ac/dc magnetometer for space missions: Improvement of a Hall sensor by the magnetic flux concentration of the magnetic core of a searchcoil. In: *Sensors and Actuators A* 142 (2008), S. 503–510
- [99] BOERO, G. ; DEMIERRE, M. ; BESSE, P.-A. ; POPOVIC, R.S.: Micro-Hall devices: performance, technologies and applications. In: *Sensors and Actuators A* 106 (2003), S. 314–320
- [100] KOOLS, J.C.S. ; COEHOORN, R. ; FOLKERTS, W. ; DE NOOIJER, M.C. ; SOMERS, G.H.J.: Anisotropic and Giant Magnetoresistive Elements. In: *Philips J. Res.* 51 (1998), S. 125–148
- [101] FREITAS, P.P. ; FERREIRA, R. ; CARDOSO, S. ; CARDOSO, F.: Magnetoresistive sensors. In: *Journal of Physics: Condensed Matter* 19 (2007), S. 165221
- [102] THOMPSON, S.M.: The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (2008), S. 093001
- [103] KUSTERS, R.M. ; SINGLETON, J. ; KEEN, D.A. ; MCGREEVY, R. ; HAYES, W.: Magnetoresistance Measurements on the Magnetic Semiconductor $\text{Nd}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{MnO}_3$. In: *Physica B* 155 (1989), S. 362–365
- [104] HELMOLT, R. von ; WECKER, J. ; HOLZAPFEL, B. ; SCHULTZ, L. ; SAMWER, K.: Giant Negative Magnetoresistance in Perovskitelike $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_x$ Ferromagnetic Films. In: *Physical Review Letters* 71 (1993), S. 2331
- [105] SOLIN, S.A. ; THIO, T. ; HINES, D.R. ; HEREMANS, J.J.: Enhanced Room-Temperature Geometric Magnetoresistance in Inhomogenous Narrow-Gap Semiconductors. In: *Science* 289 (2000), S. 1530
- [106] MÖLLER, C.H. ; KRONENWERTH, O. ; GRUNDLER, D. ; HANSEN, W. ; HEYN, Ch. ; HEITMANN, D.: Extraordinary magnetoresistance effect in a microstructured metal-semiconductor hybrid structure. In: *Applied Physics Letters* 80 (2002), S. 3988
- [107] XU, R. ; HUSMANN, A. ; ROSENBAUM, M.-L. T.F. S. T.F. Saboungi ; ENDERBY, J.E. ; LITTLEWOOD, P.B.: Large magnetoresistance in non-magnetic silver chalcogenides. In: *Nature* 390 (1997), S. 57

- [108] PARISH, M.M. ; LITTLEWOOD, P.B.: Non-saturating magnetoresistance in heavily disordered semiconductors. In: *Nature* 426 (2003), S. 162
- [109] TANG, H. ; LIANG, D. ; QIU, R.L.J. ; GAO, X.P.A.: Two-Dimensional Transport-Induced Linear Magneto-Resistance in Topological Insulator Bi_2Se_3 Nanoribbons. In: *ACS Nano* 5 (2011), S. 7510–7516
- [110] BAKONYI, I. ; PÉTER, L.: Electrodeposited multilayer film with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems. In: *Progress in Materials Science* 55 (2010), S. 107–245
- [111] GRÜNBERG, P. ; SCHREIBER, R. ; RANG, Y. ; BRODSKY, M.B. ; SOWERS, H.: Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers. In: *Physical Review Letters* 57 (1986), S. 2442–2445
- [112] REIG, C. ; CUBELLS-BELTRÁN, M.-D. ; RAMÍREZ MUÑEZ, D.: Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing. In: *Sensors* 9 (2009), S. 7919–7942
- [113] LENSSEN, K.-M.H. ; ADELERHOF, D.J. ; GASSEN, H.J. ; KUIPER, A.E.T. ; SOMERS, G.H.J. ; ZON, J.B.A.D. van: Robust giant magnetoresistance sensors. In: *Sensors and Actuators A* 85 (2000), S. 1–8
- [114] DIENY, B. ; SPERIOSU, V.S. ; PARKIN, S.S.P. ; GURNEY, B.A. ; WILHOIT, D.R. ; MAURI, D.: Giant magnetoresistance in soft ferromagnetic multilayers. In: *Physical Review B* 43 (1991), S. 1297–1300
- [115] KUBINSKI, D.J. ; HOLLOWAY, H.: Giant magnetoresistance in $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x/\text{Cu}$ multilayers: A new approach to reduced magnetoresistive hysteresis. In: *Journal of Applied Physics* 82 (1997), S. 322–325
- [116] GROSS, Rudolf: *Magnetismus*. – Vorlesungsskript, Walther-Meissner-Institut, TU München, 2004
- [117] DAUGHTON, J.M.: GMR applications. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 192 (1999), S. 334–342
- [118] WANG, S. ; WANG, C. ; GAO, Y. ; GAO, T. ; HU, G. ; ZHANG, H.: Anisotropic magnetoresistance of $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ films on NiFeNb buffer layer. In: *Journal of Alloys and Compounds* 575 (2013), S. 419–422
- [119] RIPKA, Pavel: Sensors based on bulk soft magnetic materials: Advances and challenges. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008), S. 2466–2473
- [120] HE, D.F. ; TACHIKI, M. ; ITOZAKI, H.: Highly sensitive anisotropic magnetoresistance magnetometer for Eddy-current nondestructive evaluation. In: *Review of Scientific Instruments* 80 (2009), S. 036102
- [121] STUTZKE, Nathan A. ; RUSSEK, Stephen E. ; PAPPAS, David P. ; TONDRA, Mark: Low-frequency noise measurements on commercial magnetoresistive magnetic field sensors. In: *Journal of Applied Physics* 97 (2005), Nr. 10, 10Q107. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1861375>. – DOI 10.1063/1.1861375
- [122] ZABEL, Hartmut: Progress in spintronics. In: *Superlattices and Microstructures* 46 (2009), S. 541–553

-
- [123] YUASA, S. ; DJAYAPRAWIRA, D.D.: Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 40 (2007), S. R337–R354
- [124] WANG, D. ; NORDMAN, C. ; DAUGHTON, J.M. ; QIAN, Z. ; FINK, J.: 70% TMR an Room Temperature for SDT Snadwich Junctions With CoFeB as Free and Reference Layers. In: *IEEE Transaction on Magnetism* 40 (2004), S. 2269–2271
- [125] MOODERA, J.S. ; KINDER, L.R. ; WONG, T.M. ; MESERVEY, R.: Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions. In: *Physical Review Letters* 74 (1995), S. 3273
- [126] CAO, J. ; FREITAS, P.P.: Wheatstone bridge sensor composed of linear MgO magnetic tunnel junctions. In: *Journal of Applied Physics* 107 (2010), S. 09E712
- [127] ALMEIDA, J.M. ; WISNIOWSKI, P. ; FREITAS, P.P.: Field detection in single and double barrier MgO magnetic tunnel junction sensors. In: *Journal of Applied Physics* 103 (2008), S. 07E922
- [128] TONDRA, M. ; DAUGHTON, J.M. ; WANG, D. ; BEECH, R.S. ; FINK, A. ; TAYLOR, J.A.: Picotesla field sensor design using spin-dependent tunneling devices. In: *Journal of Applied Physics* 83 (1998), S. 6688
- [129] EGELHOFF JR., W.F. ; PONG, P.W.T. ; UNGURIS, J. ; MCMICHAEL, R.D. ; NOWAK, E.R. ; EDELSTEIN, A.S. ; BURNETTE, J.E. ; FISCHER, G.A.: Critical challenges for picoTesla magnetic-tunnel-junction sensors. In: *Sensors and Actuators A* 155 (2009), S. 217–225
- [130] TSYMBAL, E.Y. ; MRYASOV, O.N. ; LECLAIR, P.R.: Spin-dependent tunneling in magnetic tunnel junctions. In: *Journal of Physics: Condensed Matter* 15 (2003), S. R109–R142
- [131] DAUGHTON, J.M. ; CHEN, Y.J.: GMR Materials for low Field Applications. In: *IEEE Transaction on Magnetism* 29 (1993), S. 2705
- [132] DAUGHTON, J. ; BROWN, J. ; CHEN, E. ; BEECH, R. ; POHM, A. ; KUDE, W.: Magnetic Field Sensors Using GMR Multilayer. In: *IEEE Transaction on Magnetism* 30 (1994), S. 4608
- [133] SEBASTIÁ, J.P. ; LLUCH, J.A. ; VIZCAÍNO, J.R.L.: Signal conditioning for GMR magnetic sensors Applied to traffic speed monitoring GMR sensors. In: *Sensors and Actuators A* 137 (2007), S. 230–235
- [134] COEHOORN, R. ; KOOLS, J.C.S. ; RIJKS, Th.G.S.M. ; LENSSEN, K.-M.H.: Giant magnetoresistance materials for read heads. In: *Philips J. Res.* 51 (1998), S. 93–124
- [135] NOZIÈRES, J.P. ; SAPORITO, E. ; VIALA, B.: Planar GMR head design for 50+ Gbit/in² recording. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 242-245 (2002), S. 341–344
- [136] ZHU, J.-G. ; PARK, C.: Magnetic tunnel junctions. In: *Materials Today* 9 (2006), S. 36
- [137] NAGASAKA, K.: CPP-GMR technology for magnetic read heads of future high-density recording systems. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321 (2009), S. 508–511
- [138] RIFE, J.C. ; MILLER, M.M. ; SHEEHAN, P.E. ; TAMANAHA, C.R. ; TONDRA, M. ; WHITMAN, L.J.: Design and performance of GMR sensors for the detection of magnetic microbeads in biosensors. In: *Sensors and Actuators A* 107 (2003), S. 209–218

- [139] KASATKIN, S.I. ; VASILEVA, N.P. ; MURAVEV, A.M.: Biosensors Based on the Thin-film Magnetoresistive Sensors. In: *Automation and Remote Control* 71 (2010), S. 156–166
- [140] PANNETIER-LECOEUR, M. ; FERMON, C. ; DYVORNE, H. ; JACQUINOT, J.F. ; POLOVY, H. ; WALLIANG, A.L.: Magnetoresistive-superconducting mixed sensors for biomagnetic applications. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010), S. 1647–1650
- [141] HALL, D.A. ; GASTER, R.S. ; LIN, T. ; OSTERFELD, S.J. ; HAN, S. ; MURMANN, B. ; WANG, S.X.: GMR biosensor arrays: A system perspective. In: *Biosensors and Bioelectronics* 25 (2010), S. 2051–2057
- [142] PANNETIER-LECOEUR, M. ; FERMON, C. ; VISMES, A. de ; KERR, E. ; VIEUX-ROCHAZ, L.: Low noise magnetoresistive sensors for current measurement and compasses. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316 (2007), S. e246–e248
- [143] CUBELLS-BELTRÁN, M.D. ; REIG, C. ; RAMÍREZ MUÑEZ, D. ; FREITAS, S.I. Pinheiro Cardoso d. ; FREITAS, P.J. Peixeiro d.: Full Wheatstone Bridge Spin-Valve Based Sensors for IC Currents Monitoring. In: *IEEE Sensors Journal* 9 (2009), S. 1756
- [144] RIEGER, G. ; LUDWIG, K. ; HAUCH, J. ; CLEMENS, W.: GMR sensors for contactless position detection. In: *Sensors and Actuators A* 91 (2001), S. 7–11
- [145] GIEBELER, C. ; ADELERHOF, D.J. ; KUIPER, A.E.T. ; ZON, J.B.A. van ; OELGESCHLÄGER, D. ; SCHULZ, G.: Robust GMR sensors for angle detection and rotation speed sensing. In: *Sensors and Actuators A* 91 (2001), S. 16–20
- [146] SEBASTIÁ, J.P. ; LLUCH, J.A. ; VIZCAÍNO, J.R.L. ; BELLON, J.S.: Vibration Detector Based on GMR Sensors. In: *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement* 58 (2009), S. 707–712
- [147] CHRISTIDES, C. ; PANAGIOTOPOULOS, I. ; NIARCHOS, D. ; JONES, G.: Fast magnetic field mapping of permanent magnets with GMR bridge and hall-probe sensors. In: *Sensors and Actuators A* 106 (2003), S. 243–245
- [148] JURY, J.C. ; KLAASSEN, K.B. ; PEPPEN, J.C.L. van ; WANG, S.X.: Measurement and Analysis of Noise Sources in Giant Magnetoresistive Sensors Up to 6 GHz. In: *IEEE Transaction on Magnetism* 38 (2002), S. 3545
- [149] HOOGE, F.N.: 1/f NOISE. In: *Physica B* 83 (1976), S. 14–23
- [150] KAMPEN, N.G. van: FLUCTUATIONS AND NOISE IN PHYSICAL THEORY. In: *Physica B* 83 (1976), S. 1–5
- [151] BITTEL, H.: Noise in magnetic and dielectric materials. In: *Physica B* 83 (1976), S. 6 – 13
- [152] SCHOEFS, F. ; CLÉMENT, A. ; NOUY, A.: Assessment of ROC curves for inspection of random fields. In: *Structural Safety* 31 (2009), S. 409–419
- [153] BERENS, A. P.: *NDE Reliability Data Analysis*. Bd. 17. 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM International, Materials Park, Ohio 44073, 1988. – 689–701 S.
- [154] ANNIS, Charles ; GANDOSSO, Luca ; MARTIN, Oliver: Optimal sample size for probability of detection curves. In: *Nuclear Engineering and Design* 262 (2013), S. 98–105

- [155] GANDOSSO, L. ; ANNIS, C.: Probability of Detection Curves: Statistical Best-Practices / ENIQ - European Network for Inspection and Qualification, ENIQ report No 41. 2010. – Forschungsbericht
- [156] CHENG, R.C.H. ; ILES, T.C.: One-Sided Confidence Bands for Cumulative Distribution Functions. In: *Technometrics* 30 (1988), S. 155–159
- [157] DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment - MIL-HDBK-1823A. 7 April 2009. – Forschungsbericht
- [158] ANNIS, Charles ; P.E.: *Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models*, 2013. <http://StatisticalEngineering.com/mh1823/>. – R package mh1823, version 3.1.4
- [159] *The R Project for Statistical Computing*. <http://www.r-project.org/>
- [160] ALDRIN, J.C. ; KNOPP, J. ; LINDGREN, E. ; ANNIS, C. ; SABBAGH, H.A. ; SABBAGH, E.H. ; MURPHY, R.K.: Reliability Demonstration for an Eddy Current NDE Technique Using a Computational Electromagnetic Model-Assisted Approach. In: *23rd Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics March 19-23, 2007, Verona, Italy*, 2007
- [161] ANNIS, Charles ; GANDOSSO, Luca: Influence of Sample Size and Other Factors on Hit/Miss Probability of Detection Curves (ENIQ report No 47) / ENIQ European Network for Inspection and Qualification. 2012. – Forschungsbericht
- [162] ŞİMŞİR, M. ; ANKARA, A.: Comparison of two non-destructive inspection techniques on the basis of sensitivity and reliability. In: *Materials and Design* 28 (2007), S. 1433–1439
- [163] WEEKES, B. ; ALMOND, D.P. ; CAWLEY, P. ; BARDEN, T.: Eddy-current induced thermography - probability of detection study of small fatigue cracks in steel, titanium and nickel-based superalloy. In: *NDT & E International* 49 (2012), S. 47–56
- [164] SIMOLA, K. ; PULKKINEN, U.: Models for non-destructive inspection data. In: *Reliability Engineering and System Safety* 60 (1998), S. 1–12
- [165] FORSYTH, D.S. ; FAHR, A.: An evaluation of probability of detection statistics. In: *RTO AVT Workshop on „Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions“, Brussels 13-14 May 1998*, 1998
- [166] HORN, D. ; MAYO, W.R.: NDE reliability gains from combining eddy-current and ultrasonic testing. In: *NDT & E International* 33 (2000), S. 351–362
- [167] ZHENG, R. ; ELLINGWOOD, B.R.: Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis. In: *Structural Safety* 20 (1998), S. 325–339
- [168] AEROTECH GMBH: *ATS100 Series, Mechanical Bearing, Ball-Screw Stage*. <http://www.aerotech.com/media/440567/ats100.pdf>. – Datenblatt (Aufruf 24.06.2009)
- [169] AEROTECH GMBH: *ATS1000 Series, Mechanical Bearing, Ball-Screw Stage*. www.aerotech.com. – Datenblatt (Aufruf 24.06.2009)
- [170] AEROTECH GMBH: *ATS5000WB Series, Mechanical Bearing, Ball-Screw Stage*. <http://www.aerotech.com/media/440662/ats5000wb.pdf>. – Datenblatt (Aufruf 26.01.2010)

- [171] AEROTECH GMBH: *ALAR Series, Direct Drive, Large-Aperture, Rotary Stage*. <http://www.aerotech.com/media/330169/alar.pdf>. – Datenblatt (Aufruf 26.01.2010)
- [172] ERTHNER, T. ; BERTUS, N. ; DOHSE, E. ; NEUBAUER, A. ; PELKNER, M. ; KREUTZBRUCK, M.: Miniaturisierte Mehrkanalelektronik für die magnetische Streuflussprüfung. In: *DACH-Jahrestagung 2012, Graz (Österreich)*, 2012
- [173] GLENSKE, Claudia ; LOREIT, Uwe: New 3D-Magnetic Field Sensors with GMR-Spin Valve Layers (+ Handout). In: *10th Symposium - Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar*, 2009
- [174] GLENSKE, Claudia: *Magnetfeldsensoren mit GMR-SGMR-Spin und Flussführung zur mehrachsigen Messung - Entwurf, Simulation und Funktionsmuster*, Justus-Liebig-Universität, Institut für angewandte Physik, Gießen, Diplomarbeit, 2010
- [175] GLENSKE, Claudia: *Persönliche Mitteilungen, Sensitec GmbH, Lahnu, 2009-2014*. – www.sensitec.com
- [176] STAUDE, Dr. A.: *Persönliche Mitteilung, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 8.5*. – Arbeitsgruppe Computertomographie, 2011
- [177] SHARATCHANDRA SINGH, W. ; RAO, B.P.C. ; KRISHNA NAND, K. ; THIRUNAVUKKARASU, S. ; JAYAKUMAR, T. ; RAJ, B.: MAGNETIC FLUX LEAKAGE NDE USING GIANT MAGNETORESISTIVE (GMR) SENSORS. In: *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 27*, 2008
- [178] CHADY, T. ; SIKORA, R. ; PSUJ, G. ; ENOKIZONO, M. ; TODAKA, T.: Fusion of Electromagnetic Inspection Methods for Evaluation of Stress-Loaded Steel Samples. In: *IEEE Transaction on Magnetics* 41 (2005), S. 3721–3723
- [179] NVE CORPORATION: *AA and AB-Series Analog Sensors*. <http://www.nve.com/analogSensors.php>. – Datenblatt (Nov. 2013)
- [180] WEISE, Matthias: *Persönliche Mitteilung, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 6.7*. – Oberflächenmodifizierung und -messtechnik, 2011-2013
- [181] ZIEGLER, Mathias ; MYRACH, Philipp ; SCHLICHTING, Joachim ; MAIERHOFER, Christiane ; KREUTZBRUCK, Marc: Laser-Thermografie für die schnelle Prüfung auf mikroskopische Risse in reflektierenden metallischen Oberflächen. In: *DGZfP-Jahrestagung*, 2013
- [182] RIPKA, P. ; TONDRA, M. ; STOKES, J. ; BEECH, R.: AC-driven AMR and GMR magnetoresistors. In: *Sensors and Actuators A* 76 (1999), S. 225–230
- [183] FERMON, C. ; PANNETIER-LECOEUR, M. ; BIZIERE, N. ; COUSIN, B.: Optimised GMR sensors for low and high frequencies applications. In: *Sensors and Actuators A* 129 (2006), S. 203–206
- [184] SENSITEC GMBH: *GF705 MagnetoResistive Magnetic Field Sensor*. http://www.sensitec.com/upload/SENSITEC/PDF_Downloads/Datenblatt/Sensitec_GF705_DSE_09.pdf. – Datenblatt (Stand Februar 2014)
- [185] SENSITEC GMBH: *GF708 MagnetoResistive Magnetic Field Sensor*. http://www.sensitec.com/upload/SENSITEC/PDF_Downloads/Datenblatt/Sensitec_GF708_DSE_03.pdf. – Datenblatt (Stand Februar 2014)

- [186] MANDAYAM, S. ; UDPA, L. ; UDPA, S. S. ; LORD, W.: Signal Processing for In-Line Inspection of Gas Transmission Pipelines. In: *Research in Nondestructive Evaluation* 8 (1996), S. 233–247
- [187] PARK, G. S. ; PARK, S.H.: Analysis of the Velocity-Induced Eddy Current in MFL Type NDT. In: *IEEE Transaction on Magnetics* 40 (2004), S. 663
- [188] ZHIYE, D. ; JIANGJUN, R. ; YING, P. ; SHIFENG, Y. ; YU, Z. ; YAN, G. ; TIANWEI, L.: 3-D FEM Simulation of Velocity Effects on Magnetic Flux Leakage Testing Signals. In: *IEEE Transaction on Magnetics* 44 (2008), S. 1642
- [189] LI, Yong ; TIAN, Gui Y. ; WARD, Steve: Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed. In: *NDT & E International* 39 (2006), S. 367–373
- [190] LI, Y. ; TIAN, G.Y. ; WARD, S.: Numerical simulation on electromagnetic NDT at high speed. In: *Insight* 48 (2006), S. 103
- [191] MYRACH, Philipp ; ZIEGLER, Mathias ; MAIERHOFER, Christiane ; KREUTZBRUCK, Marc: Influence of the Acquisition Parameters on the Performance of Laser-Thermography for Crack Detection in Metallic Components (Vortrag). In: *QNDE, Baltimore*, 2013
- [192] DIN EN ISO 9934: *Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung*
- [193] MAGNAFLUX GMBH: *Tiede - Magnetpulverprüfung - Prüfmittel*. http://www.tiede.de/media/images/uploads/0_20090831085929.pdf. – Datenblatt (Stand Nov. 2013)
- [194] ZIEGLER, Mathias: *Persönliche Mitteilung, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 8.4. – Thermografie*, 2013/2014
- [195] ROHMANN GMBH: *KDS 2-2*. http://www.rohmann.de/datasheets/probes/KDS_2-2.pdf. – Datenblatt (Stand Februar 2014)
- [196] REIMUND, V. ; PELKNER, M. ; KREUTZBRUCK, M. ; HAUEISEN, J.: Sensitivity analysis of the non-destructive evaluation of micro-cracks using GMR sensors. In: *NDT & E International* 64 (2014), Nr. 0, 21 - 29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.02.003>. – DOI 10.1016/j.ndteint.2014.02.003. – ISSN 0963–8695
- [197] KATOH, M. ; NISHIO, K. ; YAMAGUCHI, T.: The influence of modeled B-H curve on the density of the magnetic leakage flux due to a flaw using yoke-magnetization. In: *NDT & E International* 37 (2004), S. 603–609
- [198] KATOH, M. ; NISHIO, K. ; YAMAGUCHI, T.: FEM study on the influence of air gap and specimen thickness on the detectability of flaw in the yoke method. In: *NDT & E International* 33 (2000), S. 333–339
- [199] MATTNER, Jens: *Persönliche Mitteilung, Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH, Berlin*. – www.astrofein.com, 2013/2014
- [200] ASTRO- UND FEINWERKTECHNIK ADLERSHOF GMBH: *Schlussbericht Verbundprojekt BIMAS, V3MAG017, Einzelvorhaben, Hochauflösende Verfah- und Positionierungsvorrichtung für magnetische Mikrosysteme in der zerstörungsfreien Materialprüfung / www.astrofein.com*. 2012. – Forschungsbericht
- [201] PRÜFTECHNIK LINKE UND RÜHE GMBH (PLR): *Schlussbericht BIMAS, 01. März 2009 bis 31. August 2012 / www.plr-magdeburg.de*. 2012. – Forschungsbericht

Abkürzungsverzeichnis

AFM	antiferromagnetisch bzw. Antiferromagnet
AMR	englisch: anisotropic magneto resistance; deutsch: anisotroper Magnetwiderstand
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BEM	Boundary Element Methode
BL	Basislänge
CMR	englisch: colossal magneto resistance; deutsch: kolossaler Magnetwiderstand
dH	Höhe der aktiven Fläche (eines Sensors)
dL	Länge untere Seitenkante der aktiven Fläche (eines Sensors)
EMR	englisch: extraordinary magneto resistance; deutsch: außergewöhnlicher Magnetwiderstand
ET	englisch: eddy current testing; deutsch: Wirbelstromprüfung
FEM	Finite Element Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
FIB	Focus Ion Beam
FM	ferromagnetisch bzw. Ferromagnet
FPGA	field programmable gate array
GLM	Generalized Linear Model
GMR	englisch: giant magneto resistance; deutsch: Riesenmagnetwiderstand
LMR	englisch: linear magneto resistance; deutsch: linearer Magnetwiderstand
LO	Liftoff
MBE	Molekular-Strahl-Epitaxie
MLH	Maximum-Likelihood-Verfahren
MR	englisch: magneto resistance; deutsch: Magnetwiderstand
MT	englisch: Magnetic Particle Testing; deutsch: Magnetpulverprüfung

PFA	englisch: Probability of False Alarms; deutsch: Falschalarmrate
PM	Permanentmagnet
POD	englisch: Probability of Detection; deutsch: Detektionswahrscheinlichkeit
REM	Rasterelektronenmikroskop
ROC	englisch: Receiver Operating Characteristics; deutsch: Grenzwertoptimierungskurve
RT	Raumtemperatur
SNR	englisch: signal-to-noise ratio; deutsch: Signal-zu-Rausch-Verhältnis
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
TMR	englisch: tunnel magneto resistance; deutsch: Tunnelmagnetwiderstand
TT	Thermografieprüfung
w.E.	willkürliche Einheiten
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachbereichs 8.4, Akustische und Elektromagnetische Verfahren, der Abteilung 8, Zerstörungsfreie Prüfung an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin. Mein Dank gilt allen, die direkt oder indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze vom Lehrstuhl Messtechnik der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, für die Bereitschaft zur Übernahme der Betreuung meiner Arbeit. Für seinen Rat und die vielen wertvollen Anregungen sowie für die immer schnelle Beantwortung meiner Fragen gilt mein Dank.

Meinem wissenschaftlichen Betreuer Herrn Dr. habil. Marc Kreutzbruck von der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 8.4, Akustische und Elektromagnetische Prüfverfahren, gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit, unter seiner Leitung als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand auf dem Gebiet der Elektromagnetischen Prüfmethode, insbesondere der Streuflussprüfung, tätig zu sein. Für die intensiven, fruchtbaren und richtungsweisenden Diskussionen sowie die vielfältige Hilfe aber auch die interessanten Gespräche über wissenschaftliche Themen hinaus bedanke ich mich herzlichst. Hierbei nicht zu vergessen sind die vielen Stunden, die ich fragend an seiner Tür stand und jederzeit darauf bauen konnte, dass er sich Zeit für mich nahm, ungeachtet des meist sehr vollen Terminkalenders.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre möchte ich für seine Bereitschaft zur Übernahme des dritten Gutachtens danken. Zudem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke für die Übernahme des Vorsitzes sowie Herrn Dr. Michael Koblichka für die Übernahme des Beisitzes des Prüfungsausschusses.

Frau Verena Reimund, Kollegin und Mitstreiterin, möchte ich für die kritischen und bereichernden Diskussionen, für die wundervolle Zusammenarbeit, die lustigen und herzlichen Momente im Arbeitsalltag sowie für die über die Jahre gewachsene Freundschaft danken, die mich immer mit einem Lächeln zur Arbeit kommen ließ. Ebenso gilt mein Dank allen Kollegen der GMR-Gruppe - Dr. Mark Blome, Dr. Andreas Neubauer und Nikolai Panke - für ihre Unterstützung, die vielen konstruktiven Diskussionen und die tolle Arbeitsatmosphäre.

Allen Mitarbeitern des Fachbereichs 8.4 schulde ich Dank für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die vielen großen und kleinen Hilfen für meine Arbeit. Besonderer Dank gilt hierbei Norbert Bertus, Gabriele Casperson, Anika Dey, Thomas Erthner, Andreas Knöppchen, Ricarda Kotlow, Rainer Pohl, Dr. Hans-Martin Thomas und Dr. Mathias Ziegler.

Claudia Glenske und Uwe Loreit von der *Sensitec GmbH* bin ich dankbar für die Hilfestellungen sowie die Ratschläge bezüglich GMR-Sensoren und die zielführenden Gespräche hinsichtlich eines angepassten GMR-Sensorarrays.

Zu guter Letzt geht ein großes Danke an meine Familie für ihre uneingeschränkte Unterstützung in allen Bereichen sowie ihr offenes Ohr für das eine oder andere Problem. Und schließlich möchte ich mich bei meinen Freunden für die Unterstützung, die Geduld, wenn ich mal wieder keine Zeit für sie hatte, und die jederzeit motivierenden und aufbauenden Worte bedanken.

Veröffentlichungen

Artikel in Fachzeitschriften

1. Reimund, V.; Blome, M.; Pelkner, M. & Kreutzbruck, M.
Fast defect parameter estimation based on magnetic flux leakage measurements with GMR sensors
International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2011, **37**, 199-205
2. Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V. & Kreutzbruck, M.
Routes for GMR-sensor design in non-destructive testing
Sensors, 2012, **12**, 12169-12183
3. Pelkner, M.; Reimund, V.; Erthner, T. & Kreutzbruck, M.
Size adapted GMR arrays for the automated inspection of surface breaking cracks in roller bearings
International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2014, **xx**, xxx-xxx (accepted)
4. Reimund, V.; Pelkner, M.; Kreutzbruck, M. & Haueisen, J.
Sensitivity analysis of the non-destructive evaluation of micro-cracks using GMR sensors
NDT & E International , 2014, **64**, 21-29

Poster und Vorträge

1. Blome, M.; Pelkner, M.; Reimund, V. & Kreutzbruck, M.
Flux leakage measurements for defect characterization using a high precision 3-axial GMR magnetic sensor
15. ITG/GMA-Fachtagung - Sensoren und Messsysteme 2010 (Proceedings), VDE-Verl., 2010, 809
Vortrag und Beitrag im Tagungsband
2. Pelkner, M.; Blome, M.; Reimund, V. & Thomas, H.-M.
3D-GMR-Messungen an Referenzbauteilen und Rekonstruktion von Rissgeometrien
DGZfP-Jahrestagung 2010, 2010
Vortrag und Beitrag im Tagungsband
3. Kreutzbruck, M.; Thomas, H.-M.; Reimund, V.; Blome, M. & Pelkner, M.
Magnetic Response Field of Spherical Defects within Conductive Components
The 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE), Stettin (Polen), 2010
Vortrag

4. Pelkner, M.; Blome, M.; Reimund, V.; Thomas, H.-M. & Kreutzbruck, M.
Flux Leakage Measurements for Defect Characterization Using a High Precision 3-Axial GMR Magnetic Sensor
 The 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE), Stettin (Polen), 2010
 Electromagnetic nondestructive evaluation (XIV), IOS Press, 2011, **35**, 217-224
 Poster und Beitrag im Tagungsband
5. Reimund, V.; Pelkner, M.; Neubauer, A.; Thomas, H.-M. & Kreutzbruck, M.
Automatische Detektion von Rissen in Stahlbauteilen unter Verwendung von GMR-Sensoren bei der magnetischen Streuflussprüfung
 DGZfP-Jahrestagung 2011, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2011, 1-7
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband
6. Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V. & Kreutzbruck, M. *Local magnetization unit for GMR array based magnetic flux leakage inspection*
 QNDE 2011, Burlington (Vermont, USA), 2011
 Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, volume 31, American Institute of Physics, 2012, 1005-1012
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband
7. Kreutzbruck, M.; Neubauer, A.; Pelkner, M.; Reimund, V. & Thomas, H.-M.
NDT-adapted GMR probe with local magnetization unit for MFL testing
 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011
 Vortrag
8. Ziegler, M.; Schlichting, J.; Maierhofer, C.; Pelkner, M. & Kreutzbruck, M.
Kameragestütztes Flying-Spot-Verfahren zur Risserkennung
 Thermografie-Kolloquium 2011, 2011
 Vortrag
9. Kreutzbruck, M.; Pelkner, M.; Reimund, V. & Neubauer, A.
GMR Array Based Magnetic Flux Leakage Inspection
 NDE 2011, 2011
 Vortrag
10. Neubauer, A.; Pelkner, M.; Reimund, V.; Erthner, T.; Bertus, N.; Thomas, H.-M. & Kreutzbruck, M.
BIMAS - Bildgebende Verfahren und Komponenten für die zerstörungsfreie Materialprüfung unter Einsatz magnetischer Sensorarrays
 Öffentliche Statuspräsentation der Verbundprojekte der Bekanntmachung „Magnetische Mikro- und Nanotechnologien“ des BMBF, 2011
 Vortrag
11. Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V.; Erthner, T.; Panke, N. & Kreutzbruck, M.
Automatisierte Streuflussprüfung und Bewertung von Zylinderlagerringen unter Anwendung von GMR-Sensorarrays
 DACH-Jahrestagung 2012 - ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung (Proceedings), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), 2012, 1-8
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband

12. Kreutzbruck, M.; Neubauer, A.; Pelkner, M. & Reimund, V.
Adapted GMR array used in magnetic flux leakage inspection
 18th WCNDT - World conference on nondestructive testing (Proceedings), 2012, 1-8
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband
13. Pelkner, M.
Automatisierte Streuflussprüfung von Lagerringen mit GMR-Sensorarrays
 Sensorik und Messtechnik für Schienenfahrzeuge (Fokussierte Thementage 2013), 2013
 Vortrag
14. Pelkner, M.; Reimund, V.; Neubauer, A.; Panke, N.; Erthner, T. & Kreutzbruck, M.
Angepasste Wirbelstromsonden mit GMR Sensoren für die zerstörungsfreie Prüfung von Aluminium
 DGZFP-Jahrestagung 2013, 2013
 Vortrag
15. Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V.; Erthner, T. & Kreutzbruck, M.
Automatisierte Streuflussprüfung von Zylinderlagerringen mit GMR-Sensoren
 10. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen, 2013
 Poster
16. Kreutzbruck, M.; Pelkner, M.; Gaal, M.; Daschewski, M. & Brackrock, D.
Evolution of modern NDT-methods for the inspection of lightweight components
 12th International conference of the Slovenian society for non-destructive testing - Application of contemporary non-destructive testing in engineering (Proceedings), The Slovenian society for non-destructive testing and faculty of mechanical engineering, 2013, 303-314
 Vortrag
17. Pelkner, M.
Angepasste GMR-Sensorarrays für die Zerstörungsfreie Prüfung
 DGZfP Arbeitskreis Berlin, 347. Sitzung, 2013
 Vortrag
18. Pelkner, M.
Angepasste GMR-Sensorarrays für die zerstörungsfreie Prüfung
 VDI/VDE-Expertenforum, Messe Sensor & Test, 2013
 Vortrag
19. Pelkner, M.; Erthner, T. & Kreutzbruck, M.
Zerstörungsfreie Prüfung von Lagerschalenringen
 Hannover Messe 2013, 2013
 Poster

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Ort, Datum

Berlin, 21.09.2016

Unterschrift

M. Pelken