

GMR-Sensoren für die magnetische Streifeld-Rissprüfung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Heiko Pries

geb. am 19.12.1979 in Braunschweig

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Mook

Prof. Dr.-Ing. Roland Kasper

Promotionskolloquium am 08.12.2014

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.



(Dipl.-Ing. Heiko Pries)

08.12.2014

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Kurzfassung / Abstract | 4 |
| 2 | Einleitung | 5 |
| 2.1 | Stand der Forschung | 6 |
| 2.2 | Motivation und Zielsetzung | 13 |
| 3 | Grundlagen dieser Arbeit | 15 |
| 3.1 | Magnetismus und seine Auswirkungen in Materie | 15 |
| 3.2 | Die Maxwellgleichungen | 19 |
| 3.3 | Numerische Lösungen und Programme | 22 |
| 3.4 | Anwendungsfall | 24 |
| 3.5 | GMR-Sensoren | 27 |
| 3.6 | Labormesstechnik | 35 |
| 3.7 | Objektivität beim Prüfen | 36 |
| 4 | Der Sensor und sein Modell | 37 |
| 4.1 | Schichtsystem und Aufbau | 37 |
| 4.2 | Kennlinie | 38 |
| 4.3 | Modellierung | 40 |
| 5 | Modell stromdurchflossener Leiter | 42 |
| 5.1 | Ergebnisse aus analytischer Darstellung | 42 |
| 5.2 | Vergleich mit den numerischen Ergebnissen | 45 |
| 5.3 | Sensorsignal - Entstehung am stromdurchflossenen Draht | 47 |
| 5.4 | Fazit stromdurchflossener Leiter | 49 |
| 6 | Referenzmodell einer Nut als Riss | 51 |
| 6.1 | Modellierung der Simulation | 51 |
| 6.2 | Untersuchung des Streufeldes einer Nut | 52 |
| 6.3 | Untersuchung des Verhaltens in z-Richtung | 58 |
| 6.4 | Vergleich mit Messergebnissen | 60 |
| 6.5 | Diskussion beliebiger Richtungsverhältnisse | 65 |
| 6.6 | Testobjekt Schweißnaht | 66 |
| 6.7 | Fazit Streufeld an einer Nut | 70 |
| 7 | Untersuchung einer Anwendung | 71 |
| 7.1 | Prüftechnik – Spezifikation und Auswahl der Komponenten | 71 |
| 7.2 | Einflussgrößenanalyse | 75 |
| 7.3 | Leistungsgrenzen der Anwendung | 80 |
| 8 | Fazit und Ausblick | 86 |
| 8.1 | Modelle und Grenzen | 86 |
| 8.2 | Technologischer Ausblick | 88 |
| 8.3 | Streuflussprüfung mit GMR-Sensoren | 90 |

Verzeichnis der Abkürzungen

| | |
|------------------|---|
| 2D | Zweidimensional |
| 3D | Dreidimensional |
| 3d | Bezeichnung eines Orbitals (auch Schale) im Atommodell |
| AFM | antiferromagnetisch |
| AMR | Anisotrope Magnetic Resistance |
| b | Breite [mm] |
| BAM | Bundesanstalt für Materialprüfung |
| Co | Elementbezeichnung Cobalt |
| Cr | Elementbezeichnung Chrom |
| C-Scan | Darstellungstypus von Signalen als Bild (auch C-Bild) |
| Cu | Elementbezeichnung Kupfer |
| d | Durchmesser [mm] |
| EA | Easy-Axis |
| EB | Exchange-Bias (auch Austausch-Anisotropie) |
| EDV | elektronische Datenverarbeitung |
| Fe | Elementbezeichnung Eisen |
| FEM | Finite Element Methode |
| FM | ferromagnetisch |
| FMEA | Failure Mode and Effects Analysis (Fehlermöglichkeiten und Einfluss-Analyse) |
| GMR | Giant Magnetic Resistance |
| Gnd | Ground (Nulleiter) |
| h | Höhe [mm] |
| l | Länge [mm] |
| Mn | Elementbezeichnung Mangan |
| MR | Magnetic Resistance |
| Ni | Elementbezeichnung Nickel |
| NVE | Firmenname NVE Corporation |
| Pt | Elementbezeichnung Platin |
| Ru | Elementbezeichnung Ruthenium |
| SFP | Streuflussprüfung |
| SNR | Signal-to-Noise-Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis) |
| t | Tiefe [mm] |
| V _{a,b} | Spannung am Punkt a bzw. b |
| V _s | Versorgungsspannung |
| x,y,z | Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem |
| zfP | zerstörungsfreie Prüfung |

Verzeichnis der Symbole

| | |
|------------------------|--|
| γ | Scherungswinkel |
| μ_0 | Permeabilität des Vakuums = $4\pi 10^{-7}$ [V·s·A ⁻¹ ·m ⁻¹] |
| μ_r | Permeabilitätszahl |
| μ | magnetische Permeabilität [V·s·A ⁻¹ ·m ⁻¹] |
| ∇ | Nabla Operator (auch Differenzialoperator) [m ⁻¹] |
| $\nabla \cdot$ | Divergenz (div) |
| $\nabla \times$ | Rotation (rot) |
| $\vec{0}$ | Nullvektor |
| \vec{j} | elektrische Stromdichte [A·m ⁻²] |
| \vec{M} | Magnetisierung [A·m ⁻¹] |
| \vec{A} | magnetisches Vektorpotential [V·s·m ⁻¹] |
| f | Frequenz [s ⁻¹] |
| b | Breite [mm] |
| B oder \vec{B} | magnetische Induktion [T] |
| B_r oder \vec{B}_r | magnetische Remanenz [T] |
| d | Durchmesser [mm] |
| h | Höhe [mm] |
| H oder \vec{H} | magnetische Feldstärke [A·m ⁻¹] |
| H_c oder \vec{H}_c | Coerzitiffeldstärke [A·m ⁻¹] |
| I | elektrischer Strom [A] |
| l | Länge [mm] |
| \lim | Limes (Grenzwert) |
| N | Entmagnetisierungsfaktor |
| n | normal |
| R | elektrischer Widerstand [Ohm] |
| t | Tiefe [mm] |
| t | tangential |
| U | elektrische Spannung [V] |
| v | Bewegungsgeschwindigkeit [m·s ⁻¹] |
| x, y, z | Koordinaten im karthesischen Koordinatensystem |
| Δ | Delta, Differenz |
| ρ, r | Koordinaten im Polarkoordinatensystem |
| ω | Feldlinienwinkel |

1 Kurzfassung / Abstract

In dieser Arbeit wird die Normalkomponente des Streufeldes eines Risses über einem ferromagnetischen Material erforscht. Ziel ist dabei eine Variante der Streufeldprüfung mit neuen Sensoren, basierend auf dem Giant-Magnetic-Resistance-Effekt (GMR-Effekt), zu untersuchen.

Aus der mathematischen Beschreibung von Feldern durch die Maxwellgleichungen wird das Referenzmodell eines stromdurchflossenen Leiters numerisch und analytisch erstellt und mit den Messergebnissen am Labormodell verglichen. Dieses einfache Modell liefert analog dem Dipol-Modell von Zatsenpin und Shcherbinin eine schnelle und einfache Basis für magnetische Felder mit hinreichender Ähnlichkeit zu den in der zerstörungsfreien Rissprüfung auftretenden Aufgaben. Es lässt sich sehr einfach und reproduzierbar als Labormodell aufbauen und ermöglicht damit erste Messungen. Zusammen mit dem Modell des Sensors werden die Signalentstehung und die Einflüsse auf die messtechnischen Ergebnisse verstanden.

Als Sensor dient ein GMR-Gradientensensor auf Basis des GMR-Effektes der Firma Sensitec. Aus den Grundlagen der Funktionsweise des Sensors, seiner Geometrie und der Kennlinie wird ein Modell zur Berechnung der Sensorsignale erstellt und im Vergleich der numerischen Daten des stromdurchflossenen Leiters und Messungen am Labormodell verifiziert.

Für die Erforschung der Normalkomponente dient eine Nut als relevantes Modell eines Risses. Parametriert über die geometrischen Eigenschaften wird das Verhalten von charakteristischen Kennwerten des Feldes und seines Gradienten anhand der numerischen Daten aus der Simulation untersucht. Im Vergleich der errechneten und an Musterteilen gemessenen Signale des Sensors wird der erreichbare Informationsgehalt der Normalkomponente anhand charakteristischer Werte ermittelt. Es zeigt sich, dass die geometrischen Abmessungen der Nut in den Sensorsignalen enthalten sind und ihre Bestimmung mit entsprechend angepassten Komponenten und Messmethoden möglich ist. Dies wird in dieser Arbeit anhand eines Beispiels bis zur Bewertung als Prüfmöglichkeit weitergeführt.

Als Anwendungsbeispiel und zur Erforschung der Leistungsfähigkeit unter einsatzrelevanten Rahmenbedingungen wird eine Prüfaufgabe der industriellen Serienfertigung von Verzahnungsgeometrien gelöst. Die Aussagesicherheit, Identifikation und Kompensation möglicher Signalstörungen stehen dabei im Vordergrund. Letztendlich kann mit Hilfe der Messsystemanalyse gezeigt werden, dass ein Einsatz dieser Technik unter den hier vorliegenden Randbedingungen möglich ist und als Alternative zur bisher eingesetzten Magnetpulverprüfung zur Verfügung steht.

2 Einleitung

Alle Unternehmen, die auf dem Weltmarkt agieren, stehen einem vielfältigen Anforderungsspektrum gegenüber. Bedingt durch den Markt, die Kunden und die geltenden Gesetze entsteht ein teilweise diametrales Anforderungsprofil an die Produkte, dessen Erfüllung nicht zuletzt durch den steigenden Kostendruck vorangetrieben wird. Um einen Kunden zu gewinnen und idealerweise langfristig an ein Produkt und damit das Unternehmen zu binden, sind die attraktive Gestaltung der Produkte und die Sicherheit im Gebrauch wichtige Punkte. Während die Gestaltung des Erscheinungsbildes maßgeblich durch aktuelle Trends des Designs beeinflusst wird, sind die technischen Details wie auch die Gebrauchssicherheit ein Zusammenspiel aus Konstruktion, Werkstoffauswahl und Fertigung. In einem Markt mit hohen Stückzahlen und Gleichteilen wie der Automobilindustrie können selbst kleinste Unzulänglichkeiten bei der Auslegung oder Fertigung bereits zu einer Vielzahl an Schadensfällen führen. Es ist also eine besondere Sorgfalt geboten und spezifische Anforderungen sind einzuhalten. Die funktionelle Integrität von komplexen Maschinen erfordert die anforderungsgemäße Auslegung, die sorgfältige Auswahl der Werkstoffe und passender Fertigungsverfahren. Ist für die Auslegung viel aus den Erfahrungen der Konstrukteure und entsprechend dokumentierter Vorgehensweisen oder anderen Quellen wie Simulationen und Berechnungen abzuleiten, sind in der Fertigung tatsächliche Kontrollmechanismen notwendig und bisweilen sogar durch den Gesetzgeber vorgeschrieben. Nicht erst seit medial präsenten Schadensfällen von Bahn, Bohrinseln und Kraftwerken ist bekannt, dass trotz der gewissenhaften Auslegung Teile versagen können. Die Ursachen sind dabei vielfältig und reichen von nicht vorhersehbaren Zufällen in der Produktion oder dem Betrieb bis hin zu technischen Fehleinschätzungen. Ohne Kontrollen in der Fertigung oder Inspektionen während des Betriebs wären solche Vorkommnisse wesentlich häufiger. Die Erfahrungen aus der Analyse von Schadensfällen, den Betriebsinspektionen und der Fertigungsüberwachung können direkt als Verbesserung einfließen und so Schäden bereits in einer frühen Phase der Produktentstehung verhindern. Die Fertigungsüberwachung bietet dabei einen der kürzest möglichen Regelkreise zur direkten Prozessüberprüfung und -beeinflussung und ist damit von hohem Interesse für die Unternehmen. Die verwendeten Prüfprozesse können in diesem Fall nur zerstörungsfreie Prüfverfahren (zfP-Verfahren) beinhalten und müssen nicht nur eine sichere Aussage über die Integrität des Bauteils oder den Zustand des Prozesses machen, sondern auch noch den vielfältigen Anforderungen an einen wirtschaftlichen Fertigungsprozess und das rechtliche Umfeld erfüllen. Im Idealfall sind die Verfahren vollautomatisiert, objektiv, mit hohem Detailgrad an Informationen und amortisieren ihre Investition durch Reduzierung der Prüfkosten bereits nach kürzester Zeit. Insbesondere die Objektivität ist bei werkergestützten

Rissprüfverfahren nicht zuletzt durch die fehlende Automatisierung immer eine Fragestellung mit besonderem Gewicht.

Zur Erfüllung dieser gestellten Anforderungen lässt sich eine Vielzahl von Ideen in der Forschung aufgreifen. Es ergeben sich neue Erkenntnisse zu Technologien, deren Verfügbarkeit und Anwendbarkeit, die sich aus dem normalen Gebrauch nicht ergeben. Für die wirtschaftlichen Ziele eines Unternehmens muss jedoch eine Fokussierung der Forschung anhand von Entwicklungszielen stattfinden.

In dieser Arbeit wird die Streufeldprüfung in ihren verschiedenen Umsetzungen betrachtet. Die Erforschung der Normalkomponenten im Hinblick auf ihr mit Sensoren messbares Verhalten an der Oberfläche von Bauteilen ist die Grundlage für die weitere Untersuchung, ob und wie ein Sensor diese Signale messtechnisch erfassen kann und welche Informationen aus den Messdaten für die Beurteilung herangezogen werden können.

2.1 Stand der Forschung

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Streufeld und der Erforschung des Verhaltens an der Oberfläche von ferromagnetischen Materialien. Insbesondere wird hierbei die Normalkomponente betrachtet. Die Anwendung des Streufeldes als Größe in der zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen wird in dieser Arbeit mit dem Fokus auf sondengestützte Streufeldprüfung mit GMR-Sensoren behandelt. Im Folgenden wird der Stand der Literatur zu diesem und angrenzenden Themen zusammengestellt.

2.1.1 Streufelder in der zFP

Magnetische Streufelder unterscheiden sich in ihrer Art der Beschreibung nicht von magnetischen Feldern und sind daher in dieser Betrachtung mit inbegriffen. Sie entstehen an jeder Grenzfläche sich ändernder magnetischer Eigenschaften. Im kleinsten Fall passiert dies auf atomarer Ebene wie beispielsweise an der Grenze zwischen zwei Weiß'schen Bezirken, beschrieben durch die Bloch- oder Néelwand. Makroskopisch ist auch jede Körperkante Quelle eines Streufeldes.

Die Beschreibung von Streufeldern an der Oberfläche von ferromagnetischen Bauteilen entstammt zumeist dem Umfeld der zerstörungsfreien Prüfung. Es gibt auch Darstellungen mit dem Schwerpunkt auf elektrischen Bauteilen und Maschinen, die hier der Relevanz halber nicht näher betrachtet werden. Physikalisch sind beide Erscheinungsformen identisch.

Streufelder zur Oberflächenrissprüfung bei der Magnetpulverprüfung und im Rahmen der sondengestützten Streuflussprüfung unterscheiden sich nur in der Auswertung. Bei der Magnetpulverprüfung wird die integrale Wirkung des Streufeldes durch Sekundäreffekte, die Anziehungskraft auf magnetische Partikel der Prüfsuspension, für die Prüfung ausgenutzt. Die so entstehenden Anzeigen werden optisch ausgewertet und lassen nur in sehr beschränkter Weise Rückschlüsse auf die Ursache des Streufeldes zu. [1]

Für die Streuflussprüfung mit Sonden existiert die Norm [2] in der von einem oberflächenoffenen Riss, angenähert durch eine Rechtecknut, als der zu betrachtenden Geometrie ausgegangen wird. Tatsächlich ist ein Riss in der Oberfläche einer der wichtigsten zu entdeckenden Fehler, insbesondere wenn die Oberfläche selber ein Funktionsträger ist. Risse sind häufig Ausgangspunkt für zum Versagen führende Mechanismen, die die Betriebsfestigkeit von Bauteilen beeinflussen und ungewünscht herabsetzen. Das Streufeld im schematischen Verlauf an der Nut und zugehörige Begrifflichkeiten für die zFP lassen sich in [2] finden. Für diese Arbeit einheitlich wird die Nomenklatur für Abmessungen und Koordinaten wie in Abbildung 2-1 übernommen.

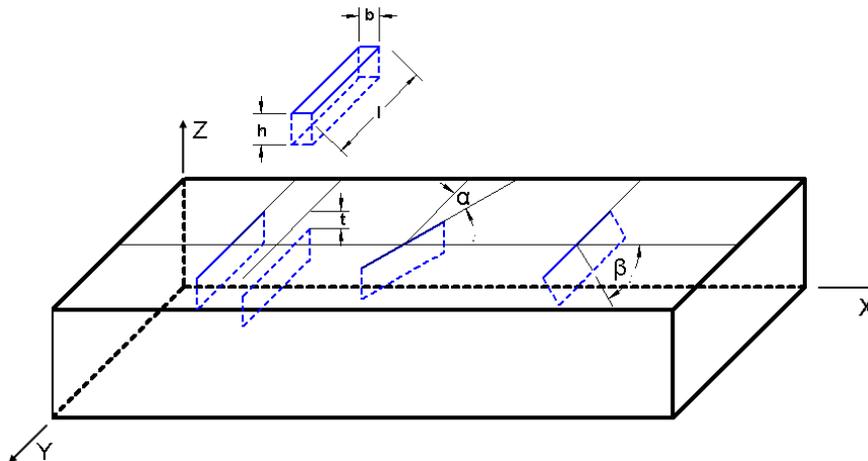


Abbildung 2-1: Koordinatenvereinbarung und Begriffe in Anlehnung an [2]

Für den Fall eines Körpers im Magnetfeld mit der magnetischen Feldstärke H_{mag} in x-Richtung ist die Beschreibung nach [2] in Abbildung 2-2 gegeben.

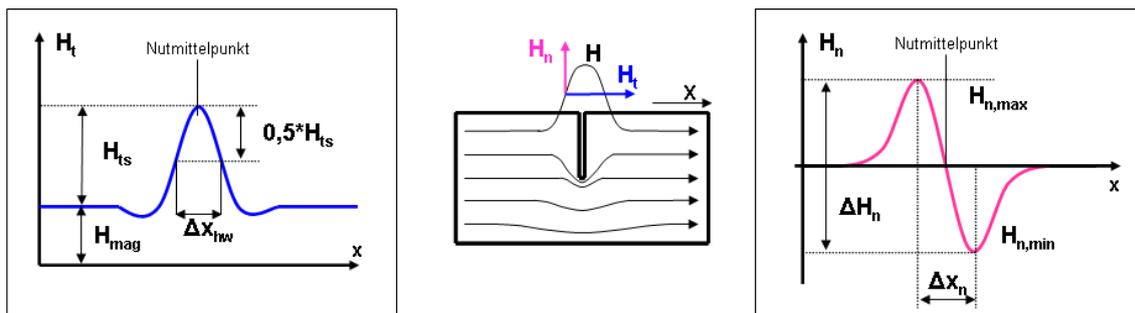


Abbildung 2-2: Qualitativer Verlauf des Streufeldes an einer Nut nach [2]

Die Aussage der Norm [2] aus Abschnitt 3.3.3, dass „das Streufeld mit zunehmender Breite und Tiefe, bei kurzen Rissen zusätzlich auch mit der Länge, des Risses wächst“, ist ohne einen präziseren quantitativen Zusammenhang mit geometrischen Parametern des Risses gegeben. Die Beschreibung und Kennzeichnung relativer Kennwerte auf den Kurven bietet keine Möglichkeit, hier Genaueres zu entnehmen. Die Feststellungen zur Abhängigkeit von b und h sind allgemein gehalten. Trotzdem erkennt man schon hier die unterschiedlichen Signalcharakteristiken. Während H_t

ein Schwellverhalten zeigt, ist bei H_n ein punktsymmetrisches Verhalten und vor allem ein Nulldurchgang mit hohem Gradient zu beobachten. Für die Untersuchung des Verhaltens werden die beiden charakteristischen Werte der maximalen Feldamplitude ΔH_n und dem Abstand der Amplitudenmaxima Δx_n herangezogen. Bei der Auswertung anhand der Sensoren sind die Werte entsprechend Δx_{ns} und ΔH_{ns} .

2.1.2 Modelle und Aussagen

Für die Beschreibung eines Risses im Material haben sich zur Betrachtung verschiedener Fragestellungen Modelle etabliert, die eine hinreichend genaue Beschreibung der Phänomene und physikalischen Wirkungsweisen zulassen und unter gewissen Randbedingungen auch analytisch lösbar sind. Die Entstehung und Weiterentwicklung eines Modells des remanenten Magnetfeldes über einem als Rechtecknut vereinfachten Riss durch Zatsepin und Shcherbinin [3] bedient sich der Modellierung über magnetische Dipole mit einer gewissen Analogie zum stromdurchflossenen Leiter. Die damit durchgeführten Untersuchungen werden von Dobmann [4] bis zum Jahr 1980 zusammengefasst. Die dort erwarteten Lösungen für die quantitative Beschreibung und der Abgleich mit entsprechenden Experimenten ist auch in den nachfolgenden Veröffentlichungen von Zagidulin [5], Shur [6], und Muzhitskii [7] noch nicht allgemeingültig erreicht worden. Die Beschreibung eines Spezialfalls dynamischer Vorgänge konnte für quasi-stationäre Modelle erfolgen [7].

Die Fragestellung zur Bestimmung der Flächenladung als der elementaren Beschreibungsgröße für dieses Modell ist unter Berücksichtigung von modellähnlichen Versuchen für konkrete, vereinfachte Fälle hinreichend gelöst. Die Zusammenfassung und Anwendung einiger dieser Ansätze findet man in [8]. Damit wird anhand dieses Modells unter geeignet gewählten Randbedingungen die Ausprägung von Streufeldern unter Berücksichtigung realer Einflüsse [9] sowie die Signalbearbeitung [10] und die Rekonstruktion von geometrischen Eigenschaften des als Nut angenommenen Risses [11], [12] präsentiert. Hauptaugenmerk liegt auf dem Übergang von infiniten Rissdimensionen im halburendlichen Raum zu realen Dimensionen für den dreidimensionalen Fall [13], was sich mit den Versuchen anhand alternativer Modelle deckt [14]. Die Schwierigkeiten hierbei sind die Abweichungen an den Rissenden und die Dimension der Nuten, hergestellt als Sägeschnitte, und deren Abweichungen zu realen Rissen in den Experimenten.

Eine spezifische Anwendung als Instrument zur Abschätzung von Prüfabläufen auf Basis des Modells von Zatsepin und Shcherbinin für die zfP bietet [15]. Die Beschreibung realer Anwendungsfälle wird hier letztendlich durch die FEM vorgenommen, was sich mit dem numerischen Vorgehen aus [4] und den daraus resultierenden Empfehlungen deckt.

Eine Übersicht exemplarischer Aussagen zu den charakteristischen Werten mit der zugehörigen Quelle werden in Tabelle 2-1 bis Tabelle 2-4 zusammengestellt. Die Kennzeichnung der Werte und Parameter ist dabei analog zu Abbildung 2-2.

Tabelle 2-1: Informationsgehalte von Streuflussignalen in der Literatur

| Größe | Aussage | Quelle |
|--------------------------|---|-------------------|
| $H_{ts} / \Delta H_{ns}$ | wächst mit steigendem h und b | [2] |
| $H_{ts} / \Delta H_{ns}$ | wächst mit h und b und l bei kurzen Rissen | [2] |
| $H_{ts} / \Delta H_{ns}$ | wächst nahezu linear mit H_{mag} im technischen Bereich | [2] |
| ΔH_n | wächst mit h bei konstantem b, nichtlinear bis zur Sättigung | analytisch [3] |
| ΔH_n | wächst mit b bei konstantem h bis zu einem Maximum, fällt danach wieder ab; remanente Magnetisierung | Messungen [4] |
| ΔH_n | wächst mit h bei konstantem b linear, aktives Feld | Messungen [4] |
| Δx_n | wächst mit b bei konstantem h linear $b \in [0,13..0,65]$ mm | numerisch [16] |
| ΔH_n | abhängig von l bei konstantem b | Messungen [4] |
| ΔH_n | wächst mit h bei konstantem b, nichtlinear bis zur Sättigung $h \in [1..3]$ mm | numerisch [16] |
| ΔH_n | wächst linear mit H_{mag} ab 100 Oe (ca. 8000 A/m) | Experiment [4] |

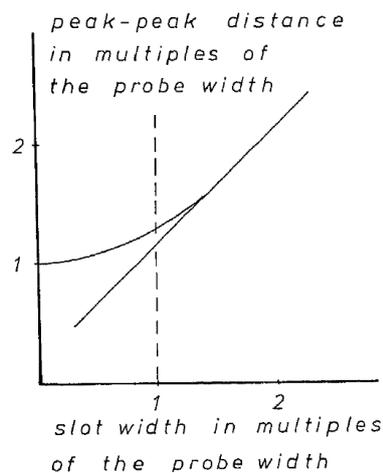
Die hier erkennbaren Widersprüche lassen sich ohne genaue Kenntnis der Versuchsaufbauten nicht näher analysieren. Diese Erkenntnisse und vor allem die Inhalte der Experimente basieren teilweise auf punktförmigen Sonden und Messung der Normalkomponente des Streuflusses. Hierfür sind zum einen maßstäbliche Geometrien verwendet worden, wie auch tatsächliche miniaturisierte Sonden, die noch immer weit entfernt von realen Fragestellungen sind.

Abweichungen von dem ermittelten Verhalten gerade im Bezug auf reale Risse wurde von Münnich in [17] untersucht. Für die zu erwartenden Rissrichtungen im technischen Bereich und deren Abweichungen vom idealisiert senkrechten Verlauf konnten Ergebnisse anhand von Rechnung und Messung verifiziert werden, wie sie der Tabelle 2-2 zu entnehmen sind.

Tabelle 2-2: Einfluss des Neigungswinkels auf den Informationsgehalt [17]

| Größe | Aussage | Quelle |
|--------------|--|--------|
| ΔH_n | geneigter Verlauf des Risses zeigt sich im asymmetrischen Verlauf des Signals | [17] |
| ΔH_n | Neigung und Tiefe können nur bei bekanntem Abstand und Sondengeometrie getroffen werden – nur für Normalkomponente möglich | [17] |

Zusätzlich wurde der Sondendurchmesser als Einflussgröße untersucht. Das Ergebnis zeigt Abbildung 2-3.

Abbildung 2-3: Sondenabmessungen als Parameter für Δx_n und Rissbreite [17]

Die Sondengröße ist also der wesentliche Parameter für die Erkennbarkeit der Rissbreite. Münnich konnte numerisch und im Abgleich mit Messungen für seine Sonde zeigen, dass für Risse, die wesentlich länger als tief sind und deren Breite $<10 \mu\text{m}$ ist, das Verhalten der Normalkomponente des Streufeldes eindeutig ist und sich Neigung und Tiefe bestimmen lassen, vorausgesetzt, man kann die realen Risse als Nut im Modell berücksichtigen. Die Breite ist dann nach seinen Untersuchungen nicht mehr zu bestimmen. [17]

Ähnliche Vergleiche von FEM-Simulation und Experiment wurden von [18] für die Untersuchung von Pipelines gemacht. Hier wird die Normalkomponente mittels Hallsonden betrachtet. Die in der Quelle angegebene Bezeichnung „ B_{streu} “ ist in der einheitlichen Nomenklatur dieser Arbeit dann gleichzusetzen mit H_n .

Tabelle 2-3: Streufeldprüfung für Pipelines [18]

| | | |
|--------------------------------|---|-------------------------------|
| $B_{\text{streu}}(\Delta H_n)$ | wächst progressiv mit h $h \in [1..6]$ mm statisches, aktives Feld | numerisch, Experiment [18] |
| $B_{\text{streu}}(\Delta H_n)$ | wächst degressiv mit b $b \in [0,1..2]$ mm statisches, aktives Feld | numerisch, Experiment [18] |
| $B_{\text{streu}}(\Delta H_n)$ | verringert sich mit steigendem Winkel statisches, aktives Feld | numerisch, Experiment [18] |

Auch hier zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zu den Parametern des Risses, was die Verfasser als Hinweis auf die Anwendbarkeit der sondengestützten Streuflussprüfung benutzen. Ein Abgleich mit tatsächlichen Abmessungen findet nicht statt. Für die Interpretation, Bewertung und Einteilung von realen Messsignalen in Defektklassen wurde in [19] die Diskriminanzanalyse in Verbindung mit neuronalen Netzwerken angewendet. Die Klassifizierung der Referenzdefekte basiert dabei auf Simulation und Rechnung von Dipolmodellen zylindrischer Fehler erheblicher Größe, wie sie in der Pipelineprüfung aufgrund von Korrosion zustande kommen. Die zu vergleichenden Aussagen sind in Tabelle 2-4 zusammengestellt. Als Messsignal wird die Normalkomponente des Streuflusses bei aktiven Magnetisierungen nahe der Sättigung herangezogen. In diesem Fall sind Permeabilitätsschwankungen zu vernachlässigen. Auch hier wird das bereits in Tabelle 2-1 beschriebene Verhalten bei aktivem Feld bestätigt.

Tabelle 2-4: Sadr – Streufeldsimulation und Experiment an Zylinderfehlern

| | | |
|--------------|--------------------------------|--------------------|
| ΔH_n | wächst mit h aktives Feld | numerisch, [19] |
| Δx_n | wächst mit b linear | numerisch, [19] |

Einige Schnittstellen der zitierten Literatur zeigen Unterschiede zueinander, obwohl die gleichen physikalischen Grundlagen und teilweise identische Modelle behandelt werden. Die Übertragbarkeit auf reale rissartige Fehler ist nicht unmittelbar gegeben und wird über Referenzgeometrien hergestellt werden müssen.

Für die in dieser Arbeit angestrebte Erforschung der einfach zugänglichen Feldgradienten der Normalkomponente in z -Richtung über der Oberfläche existieren keine zusammenhängenden Veröffentlichungen von numerischen oder analytischen Modellen, experimenteller Umgebung und Ergebnissen. Die vorhandenen Aussagen zeigen keine ausreichende Übereinstimmung, um von einem gesicherten Wissensstand ausgehen zu können.

Trotz einiger viel versprechender Ergebnisse auch aktueller Arbeiten gibt es bisher keine Veröffentlichungen zu belastbaren, statistisch abgesicherten Versuchsdaten

zur Verifizierung der analytischen Modelle von Streufeldern. Die Abweichungen gerade bei dem interessierenden Verhalten sich ändernder geometrischer Parameter eines Risses mit kleinsten Abmessungen sind ungeklärt und in der Literatur vom Einzelfall abhängig. Daher wird für die Betrachtungen in dieser Arbeit auf die sehr gut skalierbare FEM als Datenbasis für idealisierte und reale Fragestellungen zurückgegriffen und eine eigene Verifizierung der postulierten Verhalten durch Experimente vorgenommen, was sich auch mit dem Vorgehen aus [20] deckt.

2.1.3 Sondengestützte Streufeldprüfungen

Aufgrund der sehr interessanten Eigenschaften von GMR-Sensoren sind in der Vergangenheit verschiedene Anwendungen auf Basis der Forschungsergebnisse und der Verfügbarkeit von GMR-Sensoren als industriellen Serienprodukten realisiert worden. Beispielsweise prüft Mannesmann seine Rohre mittels NVE-Sensoren und einer Auswertungsalgorithmik, die den Abstand d der Sensoren zur Oberfläche und die daraus errechenbaren Verhältnisse nutzt, um Aussagen zur Lage der Fehler zu machen. Es wird für die Auswertung die Tangentialkomponente in verschiedenen Abständen d zur Oberfläche gemessen. Aus den Größen Signalstärke und örtliche Charakteristik, Abstand und Verlauf lassen sich Aussagen über Größe, Ort und Lage des Risses im Material machen. [21] Den schematischen Aufbau zeigt Abbildung 2-4.

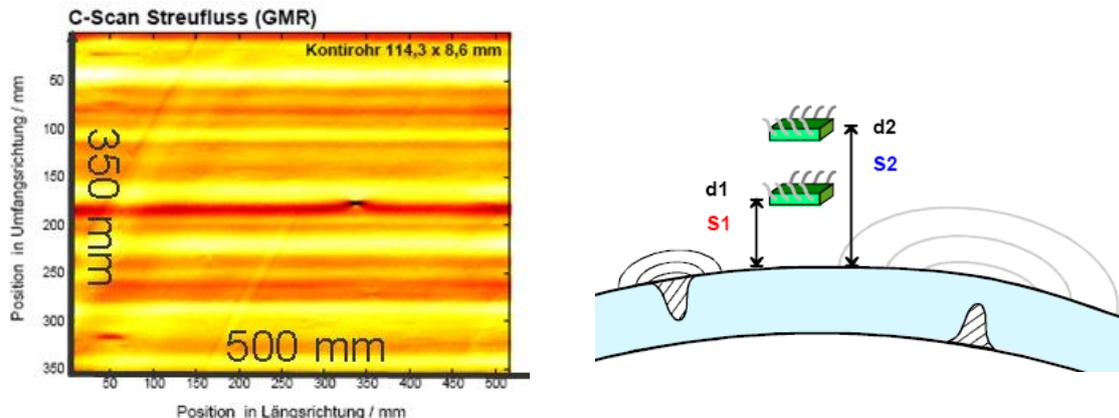


Abbildung 2-4: Rohrprüfung mit GMR [21]

Eine weitere Anwendung aus dem Bereich der Montantechnik und damit sicherheitskritischen Prüfungen ist die Seilprüfung von Bergbahnen. Im Laufe der Jahre wurde die Prüfung von Durchstrahlungsprüfung (1974) umgestellt. Seit 1996 ist ein hochauflösendes Streufeldverfahren auf der Basis von Hallsonden im Einsatz. Der Prüfaufbau in Abbildung 2-5 zeigt die dafür verwendeten Komponenten.



Abbildung 2-5: Drahtseilprüfung mit Hall-Sonden [22]

Basierend auf ringförmig um das Drahtseil angeordneten Hall-Sonden werden aus den magnetfeldabhängigen Spannungswerten und deren Verteilungen im Seil Schadensart, -ort und -größe abgeschätzt. [22]

In [23] werden mittels GMR-Sensor und lokaler Anregung durch ein Joch verschiedene Nuten als Modelle für Risse in der Oberfläche untersucht.

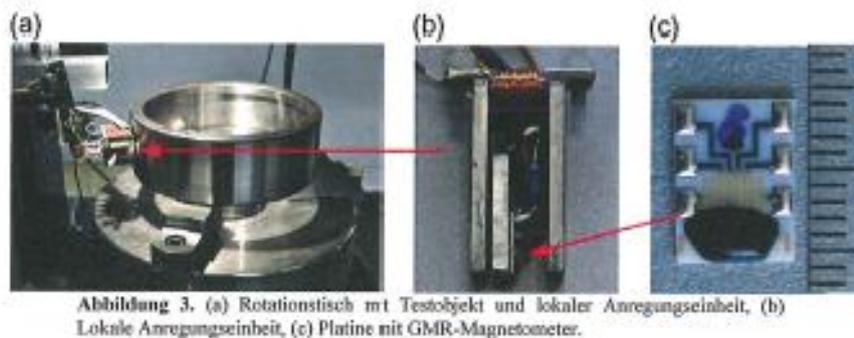


Abbildung 3. (a) Rotationstisch mit Testobjekt und lokaler Anregungseinheit, (b) Lokale Anregungseinheit, (c) Platine mit GMR-Magnetometer.

Abbildung 2-6: GMR-Sonden am Stahlbauteil [23]

Das erreichte Signal-Rausch-Verhältnis von 10:1 und die Geschwindigkeit, mit der die Sonden über der Oberfläche geführt werden können, zeigen die Leistungsfähigkeit der Sensoren an einem Beispiel.

2.2 Motivation und Zielsetzung

Die Verfügbarkeit von GMR-Sensoren mit erweitertem Leistungsspektrum der in der Literatur bislang erreichten Grenzen von Größe, Ortsauflösung und Empfindlichkeit bietet Lösungsmöglichkeiten für offene Fragestellungen der Streufeldprüfung. Im besonderen Fokus stehen dabei die GMR-Sensoren aus laufenden Forschungsaktivitäten insbesondere des Herstellers Sensitec. Im Vergleich zur Magnetpulverprüfung als Variante der Streufeldprüfung bieten sich durch Automatisierbarkeit der Messung von magnetischen Feldern anstelle von Interpretation subjektiver Sinneseindrücken Vorteile beim Einsatz des Verfahrens.

Die Theorie des Verhaltens der Normalkomponente eines Streufeldes ist in der Literatur nicht geschlossen verfügbar und wird im Rahmen dieser Arbeit durch eigene Forschung ergänzt. Das ist der theoretische Anspruch dieser Arbeit. Die Hilfsmittel sind Modelle von Sensor und Feldern, die sich zur Verifizierung in realen Messun-

gen einfach darstellen lassen und letztendlich einen Rückschluss auf das Verhalten des Sensors im Anwendungsfall ermöglichen. Als Forschungsobjekt dient hier eine Aufgabe aus dem Fokus der letzten Jahre: die Prüfung von Verzahnungsgeometrien. Die Fertigung dieser Bauteile wird häufig mittels Magnetpulverprüfung überwacht und bietet damit einen idealen Anwendungsfall mit viel Erfahrung. Lösungsversuche mit der sondengestützten Streufeldprüfung sind bislang nicht gelungen. Notwendig für die Erforschung ist das Verstehen des GMR-Effektes und der Funktionsweise der Sensoren. Aus der Kenntnis der Funktionsweise und den Werten für Kennlinie und Geometrie wird ein Sensormodell erarbeitet und das Verhalten des Sensors anhand verschiedener Felder numerisch untersucht. Aus diesem Verständnis sollen einfache Modelle zum Vergleich der rechnerisch ermittelten Ergebnisse und realen Messungen ermittelt werden. An diesem Modell wird die Signalentstehung des Sensors insbesondere im Hinblick auf die Zusammenhänge von Ortsauflösung und Empfindlichkeit erforscht sowie die Vergleichbarkeit von numerischer und analytischer Lösung dieses Falls ermittelt. Ziel ist es, anhand dieses Modells Abweichungen zwischen Modell und Messung, aber auch folgende Sensorgenerationen und Anwendungen, verstehen zu können.

Am numerischen Modell einer Rechtecknut als Modell für einen Riss im ferromagnetischen Körper wird das Verhalten des Streufeldes in z-Richtung erforscht. Diese theoretische Untersuchung anhand numerischer Modelle wird mittels des Sensormodells in die zu erwartenden Messwerte umgewandelt und mit realen Messungen an Musterkörpern verglichen. Ziel ist dabei die besonders interessierenden Werte von Breite und Tiefe des Risses in ihren Auswirkungen auf das Sensorsignal anhand der charakteristischen Werte zu erforschen.

Die Messungen von Realfällen von Rissen in ferromagnetischen Bauteilen und der Abgleich mit den zerstörenden Prüfungen gibt letztendlich die Leistungsfähigkeit und Grenze der zu erhaltenden Details in einer Anwendung wieder.

3 Grundlagen dieser Arbeit

Dieser Abschnitt behandelt die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit. Es werden in den einzelnen Abschnitten die Grundlagen zu Streufeldern als eine Form von Magnetfeldern, deren Entstehung, Beschreibung und Auswirkungen behandelt. Zusätzlich wird auf den GMR-Effekt und die Umsetzung in Sensoren eingegangen. Für die spätere Beurteilung der Leistungsfähigkeit werden die messtechnischen Anforderungen hergeleitet und der Einfluss auf die Objektivität beim Prüfen durch die damit möglichen Messwerte diskutiert. Die Anwendbarkeit wird an einem beispielhaften Anwendungsfall nachgewiesen, der mit seinen Details als Grundlage vorab erarbeitet wird.

3.1 Magnetismus und seine Auswirkungen in Materie

Der Magnetismus und seine Auswirkungen in Materie sind die entscheidenden Zusammenhänge bei der Streuflussprüfung und bis heute Gegenstand der Forschung. In dieser Arbeit genügt ein Verständnis basierend auf dem Bohr'schen Modell der Atome, in dem sich die Elektronen in ihren diskreten Schalen auf bestimmten Bahnen um die Kerne bewegen und in sich selber rotieren. In diesem Fall besitzen die Elektronen sowohl einen Bahndrehimpuls als auch ein Spinmoment, der zusammen mit dem Kern zu einem magnetischen Dipolmoment führt, sofern eine Schale nicht voll besetzt ist oder anderweitig kompensierende Mechanismen wirksam werden. Letztendlich gibt es zwischen den Atomen in einem Körper eine Vielzahl an Wechselwirkungen, die sich nicht nur auf den nächsten Nachbarn beschränken und damit für das Verhalten mit und ohne externes Magnetfeld verantwortlich sind. [24]

3.1.1 Dia- und Paramagnetismus

Beide Phänomene treten nur im Zusammenspiel mit einem externen Magnetfeld auf. Im Fall des Diamagnetismus kompensieren sich Bahn- und Spinmomente jedes Atoms im Grundzustand und es liegt kein nach außen wirksames Moment vor. Durch ein externes Magnetfeld tritt ein zusätzliches magnetisches Moment auf und führt zu einer zusätzlichen Bewegung (Lamor-Präzision). Diese Bewegung der Atome im Magnetfeld führt zu einem weiteren magnetischen Moment, was nach der Lenz'schen Regel seiner Quelle entgegengerichtet ist und zu einer Schwächung des Feldes im Inneren des Materials führt. Ein diamagnetischer Körper wird darum aus einem inhomogenen Magnetfeld herausgedrängt. Bei paramagnetischen Stoffen sind die Momente je Atom nicht vollständig kompensiert. Nach außen sind sie nur durch die Menge an zufälligen Orientierungen kompensiert. Sie richten sich mit wachsendem externem Magnetfeld immer weiter aus und führen damit zu einer makroskopisch feststellbaren Magnetisierung. So kommt es zu einer schwachen Verstärkung des Magnetfeldes im Inneren des Körpers. [25]

3.1.2 Ferromagnetismus

Für die Beschreibung des Ferromagnetismus reichen die bisher betrachteten Dipol-Wechselwirkungen nicht aus. Sie sind zu schwach, um für die spontan und bereits ohne externes Magnetfeld auftretende magnetische Sättigung, die parallele Ausrichtung der Spins, in begrenzten Bereichen des Körpers verantwortlich zu sein. Diese im Ausgangszustand vorhandenen Weiß'schen Bezirke entstehen, wie 1928 von Heisenberg postuliert, aufgrund von Austauschwechselwirkungen [26], die elektrodynamischen Ursprungs sind. Der Zustand jedes einzelnen Atoms und seiner Elektronen ist dabei nicht mehr als unabhängig von seinen Nachbarn zu sehen. Mit entscheidend für das Auftreten von ferromagnetischem Verhalten ist hier ein bestimmtes Verhältnis vom Gitterabstand zum Radius der 3d-Schale des Atoms, welches nur bei wenigen Elementen (Eisen, Nickel und Cobalt, unter 16°C Gadolinium) und einigen Legierungen vorhanden ist. [25]

Obwohl bei Raumtemperatur innerhalb der Weiß'schen Bezirke eine spontane Sättigungsmagnetisierung vorhanden ist, bleibt das Material ohne externes Magnetfeld makroskopisch nahezu neutral. Dies liegt an der im Grundzustand regellosen Verteilung der Magnetisierungsvektoren der Weiß'schen Bezirke, die sich insgesamt im energetisch günstigen Zustand der gegenseitigen Kompensation befinden. An den Übergängen zwischen den Domänen und damit unterschiedlichen Magnetisierungsvektoren bilden sich Bloch- oder unter speziellen Randbedingungen dünner Schichten Néelwände. Es handelt sich dabei nicht um Wände im eigentlichen Sinne, sondern mehr um Übergangsschichten von einigen hundert Atomlagen, in denen sich die Magnetisierungsrichtung ändert und die ihre eigenen Gesetzmäßigkeiten haben. Grundlage ist auch hier das Bestreben einen minimalen Energiegehalt des Systems zu erreichen. [27]

Im Fall eines externen Magnetfeldes ist das Verhalten durch verschiedene Elementarprozesse beschrieben, die sich in der charakteristischen Magnetisierungskurve für Ferromagnetika wieder finden, siehe Abbildung 3-1.

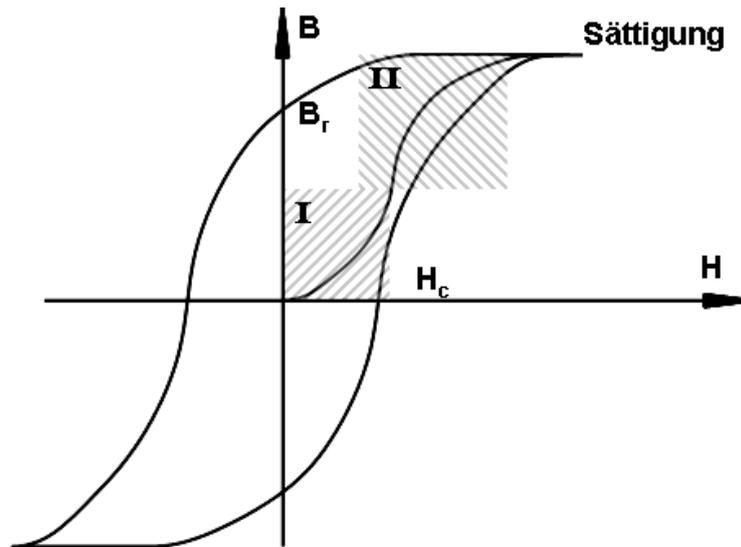


Abbildung 3-1: charakteristische Hysteresekurve, schematisch

Im ersten Bereich der Neukurve steigt die Magnetisierung überproportional zum erregenden Feld an. Im Material erfolgt eine Umorientierung der magnetischen Momente in den Weiß'schen Bezirken, die dem externen Feld am stärksten entgegenwirken. Dabei wachsen die Bereiche günstiger Magnetisierungsrichtung durch zunächst auch reversibles, dann aber zunehmend irreversibles Verschieben der Blochwände an. Ohne externes Feld ist die Blochwandstruktur relativ stabil. Sie haftet an Kristallverunreinigungen, Spannungsfeldern und anderen Störungen. Das Losreißen bei steigendem Magnetfeld führt zu den irreversiblen, bisweilen sprungartigen Verschiebungen, genannt Barkhausen-Sprünge. Sie gelten als Ursache für die Hysterese von Ferromagnetika. [27]

Es folgt ein Bereich, in dem das wachsende Feld die Magnetisierung immer schwächer erhöht. Im Material sind Drehprozesse der Magnetisierungsvektoren in den Weiß'schen Bezirken der vorherrschende Mechanismus. Da diese Drehungen auch aus der Vorzugsrichtung heraus passieren, sind höhere Energien notwendig, was den sich abflachenden Kurvenverlauf erklärt. Ab einer gewissen Feldstärke ist dieser Prozess beendet und das Material erreicht eine technische Sättigung. In den Bezirken liegt nun eine Magnetisierungsrichtung vor. Bei weiter steigendem Feld richten sich im so genannten Paraprozess die Spinmomente der Atome aus und das Material nähert sich technisch gesehen seiner absoluten Magnetisierung. Nimmt man in diesem Zustand das Feld zurück, folgt das Material dem Ziel, ein energetisches Minimum zu erreichen. Die reversiblen Prozesse führen dabei zum Ausgangszustand und durch die irreversiblen Anteile bleibt ohne ein erregendes Feld eine Magnetisierung zurück, die Remanenz genannt wird. Die für zFP-Anwendungen relevanten Remanenzen in ferromagnetischen Bauteilen liegen im Bereich [100 .. 2000] mT und damit im Bereich weniger mT in Luft an der Bauteiloberfläche. Auch wenn das Phänomen der Remanenz allgemeingültig für ferromagnetische Materialien ist, bleibt diese Betrachtung streng genommen nur für ei-

nen geschlossenen Eisenringkern gültig. Anschaulich kann man sich analog zu Abbildung 3-2 vorstellen, dass ein begrenzter Körper an seinen Stirnseiten magnetische Pole ausbildet, die ein Streufeld entgegen des Erregungsfeldes haben und dieses damit schwächen.

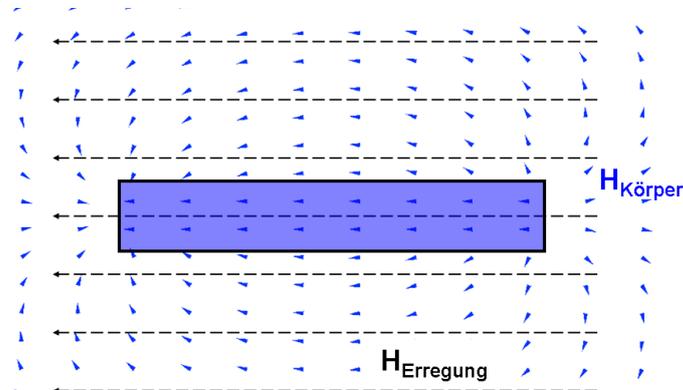


Abbildung 3-2: Begrenzter Körper im erregenden Feld, schematisch

Diese Tatsache wird durch den Entmagnetisierungsfaktor N [28] beschrieben. Diese dimensionslose, hauptsächlich von der Geometrie abhängige Zahl, ermöglicht die Transformation von im Ringkern gemessenen Kurven auf die technisch relevanten Probengeometrien, wobei die Werte für N nicht trivial zu ermitteln sind. Die geometrische Konstruktion ist die Differenz der beiden Kurven für jedes B , exemplarisch durch die blaue Linie dargestellt. Die beschriebene Scherung der Hystereseschleife in Abbildung 3-3 zeigt die daraus resultierende Gerade mit dem Scherungswinkel γ .

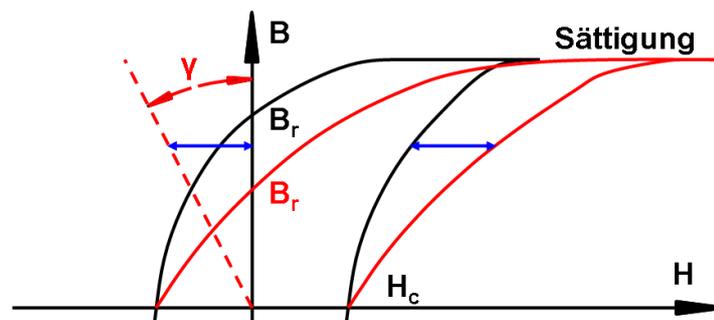


Abbildung 3-3: Scherung der Magnetisierungskurve

Den rechnerischen Zusammenhang zwischen dem Entmagnetisierungsfaktor N und dem Scherungswinkel gibt Gl. 3-1 wieder.

$$\tan \gamma = \frac{N}{\mu_0}$$

Gl. 3-1

Die so konstruierbare Kurve verläuft flacher und die magnetische Sättigung tritt erst bei höheren Feldstärken ein. Die Remanenz B_r ist geringer. Koerzitivfeldstärke sowie die von der Kurve eingeschlossene Fläche bleiben hingegen gleich und sind damit geometrieunabhängig.

Im Weiteren werden die remanente Magnetisierung als Grundlage für die Streuflussmessung und Magnetfelder aufgrund von zeitlich konstanten Strömen genutzt. Erreicht wird die Remanenz durch die Magnetisierung mit sehr hohen Feldern, so dass unabhängig für die Größenordnungen von N sicher die Sättigung erreicht wird.

3.1.3 Remanenz

Die durch irreversible Anteile bei den Magnetisierungsvorgängen zurückbleibende Magnetisierung ist die in dieser Arbeit benutzte Remanenz, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. Allgemein geht man bei der Remanenz davon aus, dass es sich um ein statisches Phänomen handelt. Wann dieser Zustand sich nicht zeitlich ändernder Eigenschaften erreicht ist, kann nicht hinreichend genau vorausgesagt werden. Es ist also durchaus möglich, dass zum Zeitpunkt der Betrachtung der Remanenz im Bauteil diese noch nicht im eigentlichen Sinne statisch ist. Die Beschreibung der atomaren Prozesse im Material aus 3.1.2 lassen dabei ein Verständnis zu, diesen Zeitraum als hinreichend klein anzusehen. Dennoch treten sicher noch Schwankungen im Magnetfeld des Bauteils auf, so dass beispielsweise bei [15] ganz bewusst von niederfrequenten Systemen gesprochen wird. In dieser Arbeit wird analog davon ausgegangen, dass die Änderungen zum Zeitpunkt der Betrachtung als sehr klein gegenüber der Dauer der Betrachtung anzunehmen sind und damit, analog zu [15], als remanent bezeichnet werden können.

3.2 Die Maxwellgleichungen

Bei den Maxwellgleichungen handelt es sich um Differenzialgleichungen, die nur für einfache Fälle analytisch gelöst werden können. Bei der heute verfügbaren Rechner-technik haben sich daher numerische Methoden etabliert.

Mit der Modellvorstellung von bewegten Ladungen auf atomarer Ebene als Grundlage für magnetisches Verhalten ist der Magnetismus mit der Theorie der Elektrodynamik (Maxwellsche Theorie) beschreibbar. Bei stationären Vorgängen entfallen die zeitabhängigen Terme und man spricht vom Spezialgebiet der Magnetostatik. Hierbei lassen sich die Gleichungen für magnetische und elektrische Felder entkoppeln.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Gl. 3-2}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad \text{Gl. 3-3}$$

Die Gl. 3-2 besagt, dass es keine magnetischen Monopole gibt; das Feld ist quellenfrei und damit sind die Feldlinien immer geschlossen. Die Gl. 3-3 beschreibt bewegte elektrische Ladungen mit der Stromdichte \vec{j} als die Ursache von magnetostatischen Feldern. [25]

Für die Gültigkeit der Beschreibung mit Gl. 3-2 und Gl. 3-3 in Materie werden für die Materialgleichung Gl. 3-4 die Konstanten μ_r und μ_0 eingeführt.

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \text{Gl. 3-4}$$

In der Magnetisierung M gehen die Materialeigenschaften ein, die im allgemeinen Fall Tensoren sind. Im Fall eines linearen und isotropen Materials vereinfachen sie sich zu Konstanten und Gl. 3-4 kann umgeschrieben werden zu Gl. 3-5. [26]

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Die Beschreibung der in dieser Arbeit untersuchten Modelle vom stromdurchflossenen Leiter können aus Gl. 3-5 hergeleitet werden.

Nur in einfachen Fällen ist eine analytische Lösung der Maxwellgleichung sinnvoll machbar. Eine analytische Lösung ist die Herleitung des Gesetzes von Biot-Savart, welches im Folgenden für die Untersuchung am stromdurchflossenen Leiter genutzt wird. Für schwierige Fälle kommen im Folgenden numerische Methoden zur Anwendung.

3.2.1 Biot-Savart-Gesetz

Im Falle einer vorgegebenen Stromdichteverteilung \vec{j} bedient man sich einer mathematischen Hilfsformulierung über das Vektorpotential zur Lösung der Maxwellgleichungen. Die Definition Gl. 3-6 gibt \vec{A} als ein Vektorpotential mit speziell gewählten Eigenschaften, wie in [29] beschriebenen.

$$\vec{B} \equiv \nabla \times \vec{A} \quad \text{Gl. 3-6}$$

Insbesondere kann \vec{A} durch die Coulomb-Eichung quellenfrei gemacht werden, was in Gl. 3-10 ausgenutzt wird. Setzt man Gl. 3-6 in Gl. 3-2 ein ergibt sich Gl. 3-7.

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = \vec{0} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Gl. 3-7 ist für beliebige Vektorfelder \vec{A} erfüllt, da definitionsgemäß die Divergenz einer Rotation eines Vektorfelds gleich null ist.

Im Vakuum lässt sich Gl. 3-4 mit Gl. 3-7 damit zu Gl. 3-8 umschreiben.

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{A} = \vec{j} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Mit der Grassmann-Identität Gl. 3-9 eines beliebigen Vektorfeldes \vec{V}

$$\nabla \times \nabla \times \vec{V} = \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) - \Delta \vec{V} \quad \text{Gl. 3-9}$$

und der Quelfreiheit von \vec{A} durch Coulomb-Eichung in Gl. 3-10

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad \text{Gl. 3-10}$$

ergibt sich die Lösung für die Beschreibung des Vektorpotentials \vec{A} nach Gl. 3-12.

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}. \quad \text{Gl. 3-11}$$

Im kartesischen Raum erhält man aus Gl. 3-11 drei Poisson-Gleichungen, deren Lösung für jede Raumrichtung ein Coulomb-Integral ist. [29]

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3\vec{r}' \quad \text{Gl. 3-12}$$

Mit Gl. 3-13 als allgemeingültigem Vektorsatz

$$\nabla \times (S\vec{J}) = S(\nabla \times \vec{J}) - \vec{J} \times (\nabla S) \quad \text{Gl. 3-13}$$

folgt beim Einsetzen von Gl. 3-12 in Gl. 3-6 unter Beachtung, dass r' invariant für $\nabla \times$ ist.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{r}') \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' \quad \text{Gl. 3-14}$$

Mit dieser analytischen Lösung für die Magnetische Flussdichte bei einer gegebenen Stromdichteverteilung lässt sich das Modell des stromdurchflossenen Leiters erstellen und mit den numerischen Ergebnissen vergleichen.

3.2.2 Das Brechungsgesetz magnetischer Feldlinien

Aus den Maxwellgleichungen lässt sich das Gesetz der Brechung magnetischer Feldlinien herleiten. Bei der Herleitung wird vorausgesetzt, dass zum einen die Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke sowie die Normalkomponente des magnetischen Flusses in der Grenzfläche stetig sind. [25]

Betrachtet man die Bedingungen an den Übergangsfächen von hoher zu niedriger Permeabilität erhält man das Brechungsgesetz des magnetischen Feldes Gl. 3-15.

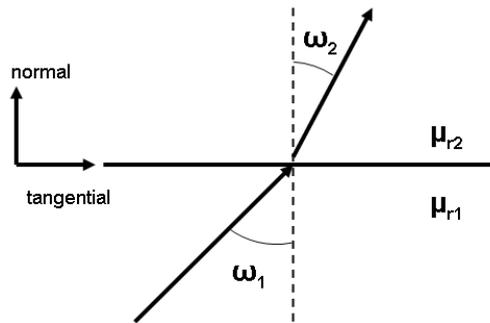


Abbildung 3-4: Skizze Brechungsgesetz magnetischer Felder

$$\frac{\tan \omega_1}{\tan \omega_2} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} \quad \text{Gl. 3-15}$$

Am Übergang von einem metallischen Körper in Luft lässt sich annehmen, dass im Metall $\mu_{r1}=1000$ und an Luft $\mu_{r2}=1$ gilt und damit aus Gl. 3-15 die Gl. 3-16.

$$\tan \omega_2 = \frac{1}{1000} \tan \omega_1 \approx 0 \quad \text{Gl. 3-16}$$

Das Ergebnis ist gleichbedeutend mit $\omega_2 \approx 90^\circ$ und folglich einem nahezu senkrechten Austritt der Feldlinien aus der Oberfläche.

3.3 Numerische Lösungen und Programme

Für die numerische Lösung von Fragestellungen der Magnetik gibt es heute eine Vielzahl an Programmen, die auf der Basis der Finite-Element-Methode (FEM) arbeiten und durch die steigende Leistungsfähigkeit der Rechnertechnik immer mehr Anwendungen finden. Hierzu wird ein Modell des Problems in diskrete Flächen- oder Volumenelemente zerlegt und die beschreibenden Gleichungen für jedes dieser Punkte unter gegebenen Randbedingungen näherungsweise berechnet [30]. Hier kommt das Softwarepaket "ComSol" in der Version 3.4 zum Einsatz. Es basiert auf einer Entwicklung, die ihren Ursprung in dem Programm MatLab der Firma "The MathWorks" hat und daher noch eine Vielzahl an Schnittstellen besitzt.

MatLab bietet als Softwarepaket eine große Vielfalt an Möglichkeiten, mit Messdaten umzugehen. Es ist dabei ebenso in der Lage, numerische Probleme darzustellen und mit dem Zugriff auf ComSol zu lösen. Diese Schnittstelle ist vor allem bei

der scriptbasierten Ausführung von Batches zur Parametervariation der Berechnungen von Vorteil. Die verschiedenen Toolboxen zur Datenbearbeitung halten Werkzeuge zur Filterung und Visualisierung bereit. Die Umsetzung der Filteralgorithmen in eigener Programmierung entfällt damit. Die Anwendung erfordert dafür detaillierte Kenntnisse über die Funktionsweise.

Randbedingungen

Für die Simulation reduziert man zunächst den zu simulierenden Bereich auf seine Symmetrien. Hierzu werden die Freischnittflächen an den Rändern der Symmetrieachsen mit Randbedingungen versehen, so dass von einer idealisierten Unbegrenztheit des Teils ausgegangen werden kann.

Die zu simulierende Geometrie besitzt kontinuierliche Bedingungen auf den Grenzen zu seiner Umgebung, die den beschreibenden Gleichungen genügen müssen. Die Umgebung selber wird durch Ränder mit isolierender Wirkung begrenzt. Im Fall magnetischer Phänomene sind das exponentielle Abklingverhalten der Felder und die damit stark eingeschränkte Reichweite bekannt. Man geht davon aus, dass in einem ausreichenden Abstand keine Beeinflussung der eigentlich interessierenden Stellen mehr stattfindet.

Materialdaten

Das Gleichungssystem setzt einige intrinsische Eigenschaften der zu berechnenden Körper voraus. Hierbei kann man sich auf die tatsächlich für die Rechnung notwendigen Werte beschränken. Es ist beispielsweise für magnetische Modelle unerheblich, welche Wärmekapazität das Bauteil hat. Die Vorgaben haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Lösung, so dass hier besondere Sorgfalt geboten ist, sofern nicht nur qualitative sondern auch quantitative Vergleiche vorgenommen werden sollen.

Wie in 3.1.2 beschrieben, ist die Permeabilität eine der wichtigsten Kenngrößen und keine Konstante. Nur für wenige Materialien sind Werte für verschiedene magnetische Induktionen oder Feldstärken in der Literatur verfügbar. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz basiert auf den in [31] und [32] veröffentlichten Werten und Zusammenhängen zur Abbildung in den Modellen mittels Interpolation.

Diskretisierung

Die zu berechnenden Gleichungen wachsen mit der Anzahl der Elemente, in die die Geometrie für die Simulation zerlegt wird. Hier gilt es einen Kompromiss aus Rechenzeit und Genauigkeit zu finden. Bei statischen Fragestellungen ist häufig der Speicher des Rechners und nicht die Rechenzeit der limitierende Faktor.

Die Software bietet die Möglichkeit, das Netz nur in Bereichen von Interesse selektiv zu verfeinern. Für Fragestellungen der Ortsauflösung ist die Netzqualität und Elementgröße immanent wichtig und wird daher bis zur Grenze der Hardware aus-

genutzt. Die Rechenzeiten der Modelle bewegen sich im Bereich von Minuten und damit hinreichend schnell für die Anwendung als Datenbasis.

Lösungsalgorithmus

Für die Lösung der Gleichungen ist der Solver der Software verantwortlich. ComSol besitzt verschiedene solcher Solver, die problemspezifische Vor- und Nachteile besitzen. Für statische Probleme der Magnetik und Elektromagnetik eignen sich durch die geringe Speicherauslastung vor allem lineare Solver. Weitere Auswahlhilfen bietet hier das Handbuch.

3.4 Anwendungsfall

Die Analyse des Anwendungsfalls umfasst das Bauteil mit seinen geometrischen und physikalischen Eigenschaften sowie den möglichen Ungängen und die Restriktionen aus dem umgebenden Fertigungsprozess. Für die Untersuchungen dient dieser Fall als Beispiel und damit für die Konkretisierung des Vorgehens in den folgenden Kapiteln. Zum Abschluss dieser Arbeit wird ein Lösungsbeispiel für diesen Anwendungsfall zur Verifizierung des Verfahrens erarbeitet.

3.4.1 Bauteil

Die Lenkungs Zahnstange als Bauteil hat eine regelmäßige Geometrie mit einer Vielzahl von Anforderungen an die Oberflächen als Träger von Funktionen aber auch geometrischen Abmessungen. Diese geforderte Präzision ist zum Vorteil für die Prüfung bei der Auslegung der Führung des Sensorarrays in Abschnitt 7.1.1. Die Geometrie des Bauteils ist als Vorgabe in der Zeichnung definiert. Eine Skizze der Verzahnungsdetails im Schnitt des interessierenden Bereichs gibt die Abbildung 3-5 wieder.

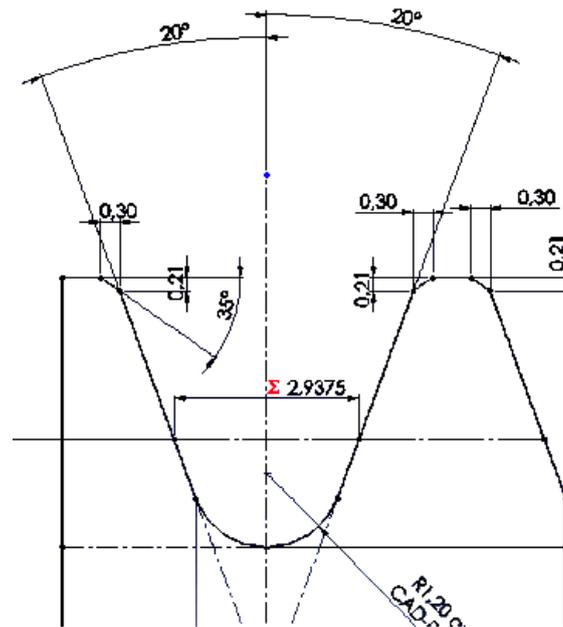


Abbildung 3-5: Ausschnitt Verzahnungsdetails, Skizze

Als Material kommt eine Variante des Cf 53 nach [33] zum Einsatz, die im Bereich der Verzahnung induktiv gehärtet wird. Die Vorprüfungen der Ausgangsmaterialien werden mittels Ultraschalltauchttechnik des Rohlings auf innere Fehler sowie einer Wirbelstromprüfung auf Oberflächenfehler vor der sich anschließenden Bearbeitung durchgeführt. Die Prüfung des letzten, hier betrachteten, Prozessabschnitts wird aktuell mittels Magnetpulver durchgeführt. Vor dem Beginn der Verzahnungsfertigung wird von einem intakten Bauteil ausgegangen, was für den folgenden Abschnitt einen kompakten Regelkreis mit nur wenigen Prozessschritten bedeutet.

3.4.2 Fertigungsprozess und mögliche Ungängen

Der mechanische Teil des Fertigungsprozesses zum Endprodukt besteht aus der spanenden Bearbeitung der Verzahnung durch Räumen und Schleifvorgänge sowie dem Richten. Als thermischer Prozess kommt die induktive Härtung im Vorschubverfahren zum Einsatz. Die Anlagen sind mittels Parameterüberwachung in der Lage, Prozessabweichungen zu erkennen und zu korrigieren. Es bleiben unvorhersehbare Einflüsse oder solche, die nicht über Parameter zu identifizieren sind, als Quellen für die Ungängen. Durch gezielte Prozessbeeinflussung sind in allen Schritten Ungängen provozierbar, die eine Vielzahl von Auswirkungen bieten. Eine Auswahl ist in Tabelle 3-1 zusammengestellt. Prinzipbedingt sind hierbei rissartige Fehler von besonderem Interesse, da sie bruchmechanisch die höchste Relevanz im Sinne einer Vorschädigung haben.

Tabelle 3-1: Charakteristika möglicher Prozessschwankungen

| Provozierte Prozessabweichung | Fehlerbild | Prozessüberwachung / Maßnahmen |
|--|--|--|
| Werkzeugstandzeit Zerspanung überschritten bis 150% | Geometrieabweichungen über die Toleranzen hinaus, später Bearbeitungsriefen und Schuppenbildung in der Verzahnungsoberfläche | Standzeitkontrolle des Werkzeugs, Maßkontrolle der Bauteile als Stichprobe |
| Schleifen – zu hohe Schnittgeschwindigkeiten / fehlerhafte Kühlung | Schleifbrand, Gefügeänderungen bei lokaler Überhitzung, Schleifrisse | Schleifparameter (Kraft, Schnittgeschwindigkeit), Werkzeugstandzeit, Kühlung, Gefügebilder |
| Fehlpositionierung des Induktors beim Härten - thermische Wirkung | Ab spezifischer Grenze Rissbildung auf Zahnflanken, Verzahnungsauslauf, Rückseite der Zahnstange | Lagekontrolle, Bewegungsüberwachung der Achsen, elektrische Parameter |
| Fehlpositionierung des Induktors beim Härten - mechanische Wirkung | Schleifspuren, Kerben, Riefen bei Berührung mit dem Induktor | Lagekontrolle, Bewegungsüberwachung der Achsen |
| Biegelinienbegrenzung beim Richten überschritten | Risse im Zahngrund | Biegelinienüberwachung (Kraft und Weg) |
| Späne/Schmutz in Spannvorrichtungen | Abdrücke in der Oberfläche, ggf. funktionsrelevant | Reinigung, Vollverketzung der Anlage mit Schutz |

Die zugehörigen Prozessdeviationen sind ein Ausschnitt aus der anlagenspezifischen FMEA und bilden nur die als relevant für diese Arbeit eingeschätzten Einflüsse ab. Die auftretenden Risse im Material sind bereits zerstörend charakterisiert worden. Es handelt sich um sehr feine Risse im gehärteten Oberflächenbereich aufgrund dort möglicher ungünstiger Spannungszustände.

3.4.3 Definition der Prüfaufgabe

Die Bauteilzeichnung fordert, auf der gesamten Oberfläche die abschnittsweise definierten Eigenschaften einzuhalten. Für den Bereich der Verzahnung bedeutet dies, alle Ungenzen zu finden, die

- sich mit einem zFP-Verfahren finden lassen und
- sich negativ auf die Funktionalität und Belastbarkeit des Bauteils auswirken.

Die Definition von Grenzen, die die Funktionalität und Belastbarkeit wie beschrieben herabsetzt, ist eine Herausforderung an die Zusammenarbeit von Konstruktion und Produktion sowie den Experten der Prüftechnik.

3.5 GMR-Sensoren

Auch GMR-Sensoren gehören zu den Magnetfeldsensoren, werden aber als Haupttechnologie dieser Arbeit detaillierter beschrieben.

Als einer der bekannten magneto-resistiven Effekte (MR-Effekte) ist der Giant-MR Effekt 1988 von Peter Grünberg und Albert Fert in voneinander unabhängigen Arbeiten entdeckt worden. Im Jahr 2007 bekamen die beiden Forscher dafür den Nobelpreis für Physik. [34]

Bereits 10 Jahre nach der Entdeckung hat dieser Effekt in großtechnischen Anwendungen Einzug gehalten und es sind Sensoren als Massenware verfügbar. Die heutige Speicherdichte von Festplatten wäre ohne diesen technologischen Sprung der Sensoren in den Leseköpfen nicht möglich gewesen. Inzwischen sind weitere Anwendungen vom Drehwinkelsensor über Strommessungen bis hin zum Kompass umgesetzt und die Vielfalt der erhältlichen Sensoren wächst stetig. [35]

Der Effekt tritt in Dünnschichtsystemen, mitunter nur wenige Atomlagen stark, ferromagnetischer Materialien auf und äußert sich in einer Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der relativen Orientierung der Magnetisierungsvektoren benachbarter Schichten. Es gibt bis heute keine geschlossene theoretische Beschreibung des GMR-Effektes, wobei es gesichert ist, dass mehrere physikalische Mechanismen einen Anteil haben. Er ist in jeglicher Ausprägung von diversen Umgebungsparametern wie auch intrinsischen Größen des Schichtsystems, vor allem der Abmessung der Schichten und der geometrischen Struktur der wirksamen Flächen, abhängig. [36], [37]

Im Folgenden wird sowohl die phänomenologische und damit für die technische Anwendung interessierende Beschreibung diskutiert, als auch auf die wichtigsten physikalischen Effekte und deren zielgerichtete Nutzung und Beeinflussung in der Fertigung eingegangen.

3.5.1 Physikalische Effekte im Schichtsystem

Für den GMR-Effekt sind mindestens zwei ferromagnetische Schichten, die durch einen nicht magnetischen, aber elektrisch leitfähigen Spacer getrennt sind, notwendig. Ein solcher Funktionsstack aus Fe/Cr/Fe wurde für erste Untersuchungen verwendet. Dabei wurde ein oszillierendes Verhalten der Magnetisierungsvektoren in Abhängigkeit von der Chromschichtdicke (Spacer) ohne externes Feld, wie in Abbildung 3-6 gezeigt, beobachtet. [38]

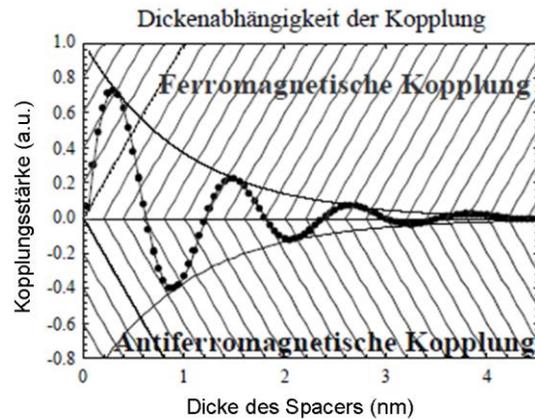


Abbildung 3-6: Zwischenlagenaustauschkopplung mit Spacerschichtdicke [38]

Dieses Verhalten beruht auf der **Zwischenlagenaustauschkopplung**, die vielfache Beschreibungsansätze besitzt. [39], [40]

In Schichtsystemen mit einer Spacerdicke um 1 nm, nach Abbildung 3-6 antiparalleler (antiferromagnetischen, kurz AFM) Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren, beobachtete Grünberg einen reduzierten Widerstand bei der parallelen (ferromagnetischen, kurz FM) Ausrichtung. Diese Abhängigkeit des Widerstands vom externen Feld definiert den GMR-Effekt nach [41] als Gl. 3-17.

$$\text{GMR} = R_{\text{FM}} - R_{\text{AFM}} / R_{\text{FM}} \quad \text{Gl. 3-17}$$

Der Zustand ohne externes Feld muss in dieser Definition also der AFM-Ausrichtung entsprechen, um den GMR-Effekt nutzen zu können. Dies lässt sich zum einen über die Spacerschichtdicke wie oben beschrieben und zum anderen auch über verschiedene Koerzitivfeldstärken der kombinierten Schichten erreichen. Eine weitere Möglichkeit, den GMR-Effekt zu nutzen, ist die **Austauschanisotropie** (Exchange-Bias, EB) beim direkten Kontakt zweier FM- und AFM-Schichten und deren Anwendung in Spinvalves. Die hierbei in der Grenzfläche auftretenden Wechselwirkungen bewirken einen zusätzlichen Energiebeitrag zur Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren. Soll, wie in Abbildung 3-7 gezeigt, durch ein externes Feld die Ausrichtung in der FM-Schicht gedreht werden, passiert dies gegen die Ausrichtung der unbeeinflussten AFM-Schicht. Es gibt somit eine Vorzugsrichtung für die FM-Schicht ohne Feld. [41]

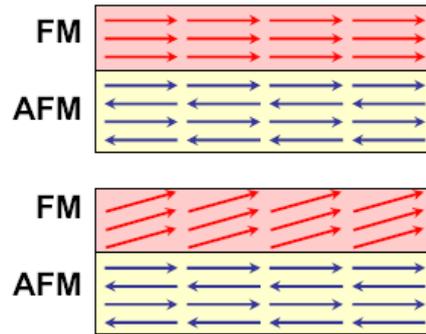


Abbildung 3-7: Modellvorstellung zur Austausch-Anisotropie [38]

Mit diesen beiden Effekten lassen sich nun die zwei unterschiedlichen Varianten genutzter Schichtsysteme verstehen, wie sie in 3.5.2 beschrieben werden. Es sei noch angemerkt, dass es nicht einmal Schichtsystemen bedarf, um den GMR zu beobachten. Es reichen auch granulare Legierungen, in denen ferromagnetische Ausscheidungen in eine nicht-magnetische Matrix eingebettet sind. [42]

Die Grenzschichtabhängigkeit, im Gegensatz zur Volumenabhängigkeit von Hall- und AMR-Effekt, ermöglicht eine nahezu beliebige Miniaturisierung bei identischen Eigenschaften. Technisch sind heute Strukturen möglich, deren Ausdehnung unter einem Mikrometer liegt.

Das Mott'sche Zwei-Spinkanal-Modell

Im Zusammenhang mit dem GMR-Effekt spricht man häufig von der spinabhängigen Streuung von Elektronen an Grenzflächen von dünnen Schichten als dem grundlegenden Mechanismus der Widerstandsänderung. Unabhängig von den physikalischen Details lässt dieser Zusammenhang sich mit dem Mott'schen Zwei-Spinkanal-Modell in Abbildung 3-8 phänomenologisch beschreiben.

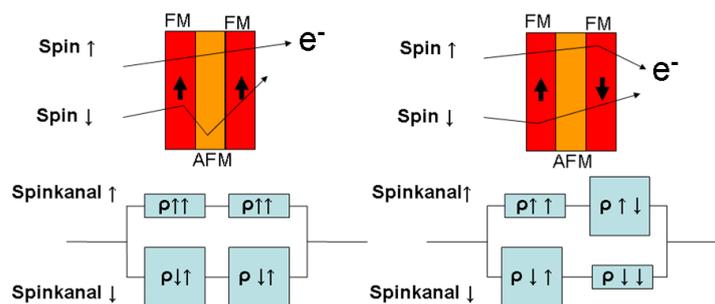


Abbildung 3-8: Mott'sches Zweistrommodell nach [38]

In dieser Vorstellung gibt es zwei an der elektrischen Leitfähigkeit beteiligte Kanäle. Je nach relativer Richtung zwischen dem Spin der Elektronen (Spin ↑ oder Spin ↓) und dem Magnetisierungsvektor im Schichtsystem entsteht dabei durch Streuung ein hoher Widerstand im Fall antiparalleler ($\rho \uparrow \downarrow$ oder $\rho \downarrow \uparrow$) Ausrichtung oder niedriger Widerstand im Fall paralleler ($\rho \downarrow \downarrow$ oder $\rho \uparrow \uparrow$) Ausrichtung, dargestellt durch die

in Abbildung 3-8 gezeigte Ersatzschaltung. Entscheidend für die Anwendung ist der Zusammenhang Gl. 3-18:

$$R = f(\vec{H}). \quad \text{Gl. 3-18}$$

Zu beachten ist dabei, dass auf der rechten Seite ein Vektor steht, die Widerstandsänderung also richtungsabhängig ist. Mit entsprechend anisotropen Empfindlichkeiten lassen sich so Magnetfelder in ihren einzelnen Komponenten nicht nur nachweisen, sondern auch qualitativ bestimmen. [38]

Die erzeugbare Anisotropie der Empfindlichkeit ist für Anwendungen der zFP interessant. Hierbei macht man sich die unterschiedlichen Effekte zu Nutze, die in vielfältigen Varianten in den Schichtsystemen auftreten. Das Vorgehen und die Umsetzung hierzu wird im Abschnitt 3.5.2 bei den jeweiligen Schichtsystemen beschrieben.

3.5.2 Umsetzung in Sensoren

Die in Sensoren eingesetzten Schichtsysteme kann man in Multilayer und Spinvalves unterscheiden. Die Bezeichnung geht dabei einher mit verschiedenen Funktionsprinzipien, die im Folgenden kurz erläutert werden. Zusätzlich lassen sich über die Ausnutzung verschiedener richtungsabhängiger Effekte die Kennlinieneigenschaften insbesondere bei Spinvalves beeinflussen, so dass auch hier die wichtigsten Faktoren und ihre Auswirkung beschrieben werden.

Multilayer

Ein Multilayer-Schichtsystem besteht aus mehreren der oben genannten Funktionsstacks von zwei magnetischen Schichten, die durch eine unmagnetische Zwischenschicht voneinander getrennt sind. Der Spacer ist dabei so gewählt, dass eine AFM-Kopplung im Bereich des ersten antiferromagnetischen Maximums von Abbildung 3-6 vorliegt.

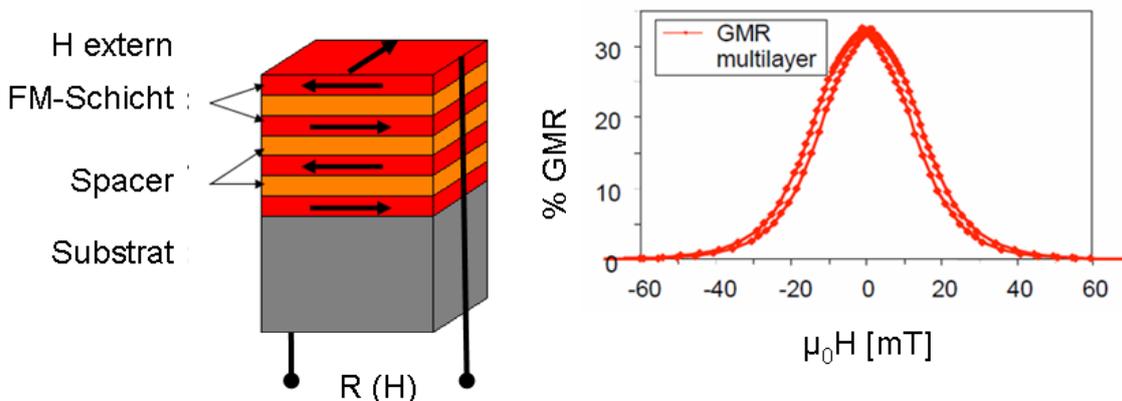


Abbildung 3-9: Schichtsystem und typische Kennlinie eines Multilayers [43]

Wirkt ein externes Feld, drehen sich die Magnetisierungen der Schichten und es entsteht die typische Kennlinie aus Abbildung 3-9. Der Gesamtwiderstand hängt von der relativen Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren in den FM-Schichten ab. Er ist maximal für AFM- und minimal für FM-Ausrichtung. In dieser Art besitzen die Schichtsysteme eine verschwindend geringe Richtungsabhängigkeit. Der GMR lässt sich dabei durch die Wahl der Spacerschichtdicke im ersten AFM-Maximum beeinflussen. Beispiele für diesen Sensortyp sind die NVE vertriebenen Serien AB und ABL.

Trotz des hohen GMR-Effektes besitzen Multilayer eine sehr kleine Empfindlichkeit von wenigen %/mT und haben im Bereich des Nullfeldes eine hohe Hysterese. Die Empfindlichkeit kann durch geeignete Wahl der Spacerschichtdicke in gewissen Bereichen eingestellt werden. Durch die hohe Kopplungsfeldstärke und die prinzipbedingte Spiegelsymmetrie zum Nullfeld sind die Sensoren erste Wahl für Anwendungen mit Schwellverhalten des Feldes bei hohen Grundfeldstärken, wie beispielsweise bei der Streuflussprüfung der Tangentialkomponente mit aktiver Anregung. [15]

Spinvalve

Spinvalve-Schichtsysteme bestehen häufig aus nur einem Funktionsstack. Die FM-Schichten sind durch den, im Vergleich zum Multilayer, wesentlich dickeren Spacer getrennt. Die Magnetisierungsrichtung einer der FM-Schichten wird durch die Kopplung an eine AFM-Schicht mittels der so genannten Exchange-Bias (EB)-Wechselwirkung festgehalten („gepinnt“) und dient als Referenzschicht, die andere ist durch den Spacer frei. Zur Richtungsvorgabe wird das Schichtsystem aus einer Temperatur über der Néel-Temperatur in einem Magnetfeld abgekühlt. Die Ausrichtung der Referenzschicht ist dann in der Grenzschicht mit der der AFM-Schicht identisch, die Vektorsumme der AFM-Schicht aber hebt sich auf und bleibt auch bei einem nun angelegten externen Feld erhalten. Die relative Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren entspricht dem FM-Zustand. [40]

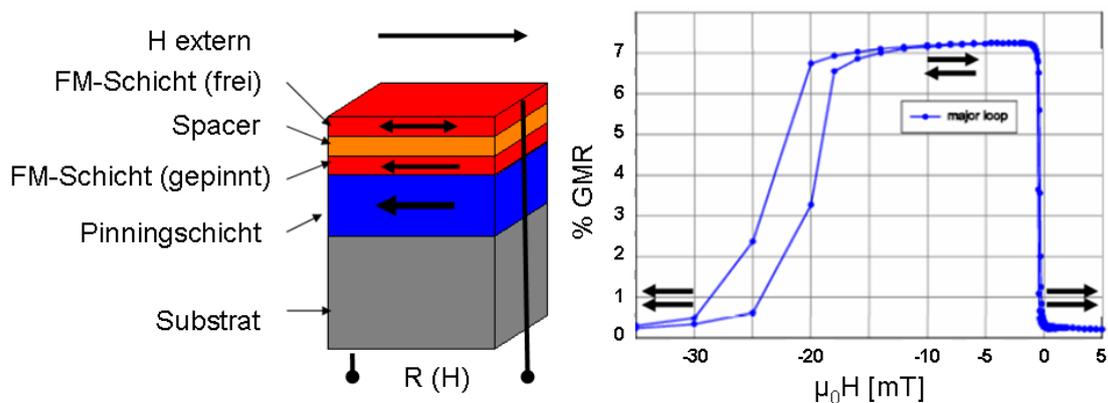


Abbildung 3-10: Schichtsystem und typische Kennlinie eines Spinvalves [43]

Betrachtet man ein solches Schichtsystem ohne weitere Strukturierung, erhält man die typische Kennlinie aus Abbildung 3-10. Dreht sich die Magnetisierung der freien FM-Schicht, ändert sich der Widerstand des Gesamtsystems. Am einfachsten geschieht dies in Richtung der Pinningrichtung, gleichbedeutend mit der Exchange-Bias (EB)-Richtung, weshalb diese Richtung auch Easy-Axis (EA) genannt wird. Der erste sprunghafte Anstieg durch Drehung der freien Schicht vom FM- in den AFM-Zustand wird gefolgt von einem weiteren nach Überwinden der EB-Feldstärke und Drehung in die entgegengesetzte FM-Ausrichtung. Eine AFM Ausrichtung der Schichten ohne externes Feld ist für die Spinvalves nicht mehr zwingend für die Funktion notwendig, jedoch können dann Felder in Richtung der EB nicht detektiert werden. Um eine Richtungssensitivität herzustellen und trotzdem die Empfindlichkeit der EB-Richtung zu nutzen, kann in diesem Fall beim Design der Sensoren auf die geometrische Anisotropie zurückgegriffen werden. [45]

Durch die schwache Kopplung der Schichten reichen schon Beiträge durch Formanisotropie aus, um in einem dünnen Streifen die Magnetisierung senkrecht zur EA auszurichten. Schematisch zeigt dies Abbildung 3-11 am Beispiel eines Streifen des Schichtsystems auf einem Probenkörper. Es handelt sich dabei nur um einen Ausschnitt der Funktionsschichten. Das Substrat wie auch die restliche Struktur des Sensors in H_n Richtung sind zur Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

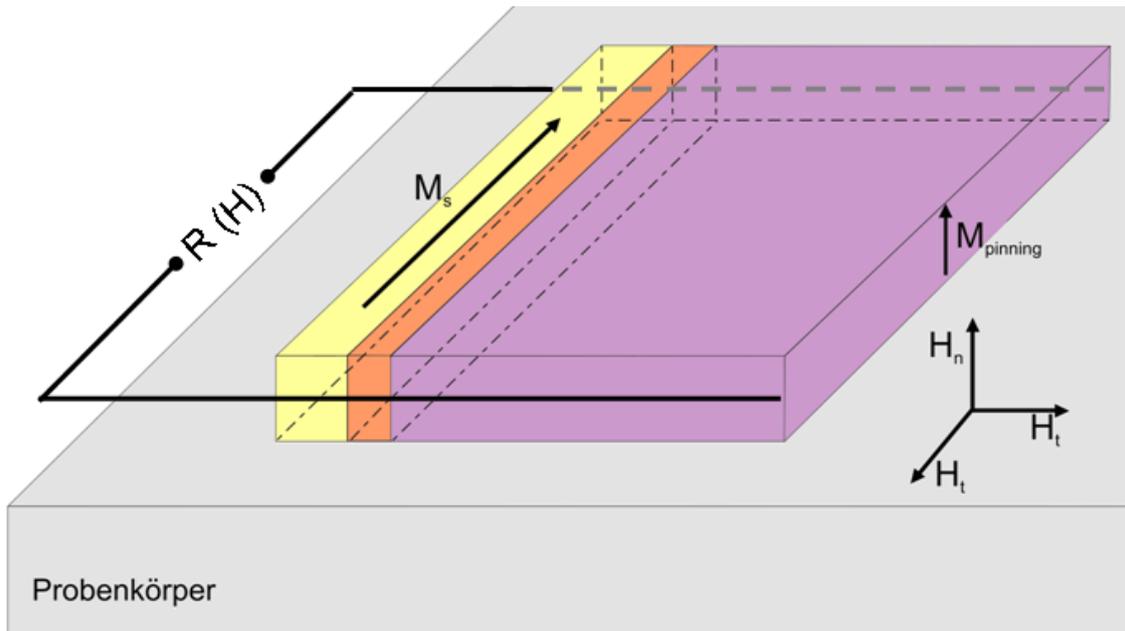


Abbildung 3-11: schematisches Schichtsystem eines strukturierten Spinvalves beim Messen [VW2]

Der Sensor erhält mit diesem Schichtsystem und der Strukturierung eine directionale Empfindlichkeit für Feldkomponenten in Richtung von M_{pinning} , gleichbedeutend mit der Normalkomponente H_n , und gleichzeitig eine verringerte für die H_t Komponenten in dazu senkrechten Richtungen. Die Kennlinie in H_n eines so optimierten Sensors gibt Abbildung 3-12 wieder.

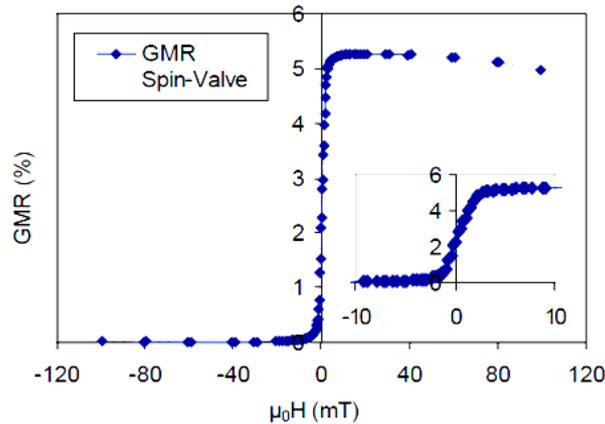


Abbildung 3-12: Sensorkennlinie H_n eines strukturierten Spinvalves [43]

Spinvalves sind aufgrund ihrer Skalierbarkeit, der gerichteten, höheren Empfindlichkeit $(\Delta R/R)/\Delta H$ und nicht zuletzt wegen ihrer Serienreife für die Aufgaben der Streuflussprüfung die geeignete Wahl. Insbesondere die gerichtete Empfindlichkeit bietet größte Vorteile bei der Nutzung der Normalkomponente in der SFP. Eine Trennung dieser vektoriellen Größen ist mit den bislang verfügbaren GMR-Sensoren nicht möglich.

Anwendungen in der zFP gibt es bereits für ähnliche Fragestellungen der Rohrprüfung oder Supraleiterprüfung, wo die allgemeinen Vorteile von GMR-Sensoren im industriellen Umfeld und der Materialprüfung detailliert in interessantem Kontext diskutiert werden. Herausgestellt werden immer wieder die Kostenvorteile und das im Vergleich mit anderen MR-Sensoren sehr gute Verhältnis von Größe zu Empfindlichkeit. [15], [45], [43] und [46]

Layoutvarianten

Unabhängig vom Schichtsystem lassen sich die Strukturen der GMR-Elemente im Layout des Sensors nahezu beliebig gestalten. Es kommen Sensoren in Absolutanordnung, häufiger aber in Gradiometeranordnungen zur Anwendung. Hierzu werden einzelne Elemente schon bei der Fertigung in Dünnschichttechnik als Wheatstone'sche-Brücken verschaltet. Das hat zum einen den Vorteil, dass Störeinflüsse, die auf alle Elemente wirken, keinen Einfluss auf das Signal haben und zum anderen die Messung der Ausgangsspannung solch einer Brückenschaltung eine triviale Aufgabe darstellt, die sich mit einfachster Messtechnik realisieren lässt. In Umgebungen mit vielen elektrischen und magnetischen Störgrößen ist der Einsatz von Gradiometersensoren bei der Detektion von kleinen Feldgradienten unabdingbar.

3.5.3 Vergleich von verfügbaren GMR-Sensoren

GMR-Sensoren bieten das beste Verhältnis von Größe zu Empfindlichkeit und damit hohes Potential für miniaturisierte Anwendungen. Sie lassen sich in Großserien

kostengünstig herstellen und in weiten Grenzen geometrisch gestalten. Es sind für verschiedene Anwendungsfälle Sensoren am Markt verfügbar. Sie sind entsprechend ihrer Anwendungsfälle von den Firmen entwickelt worden und liegen daher nur bedingt im Anforderungsspektrum für die Aufgaben der zFP. Zwei der NVE-Sensoren, wie sie in [15], [19] und [20] verwendet wurden, werden hier mit einem Prototypen „Typ 7“ der Firma Sensitec verglichen.

Die Kennlinien im Vergleich zeigt Abbildung 3-14. Sie sind mit einheitlichen Parametern im identischen Versuchsaufbau Abbildung 3-13 vermessen worden. [44]

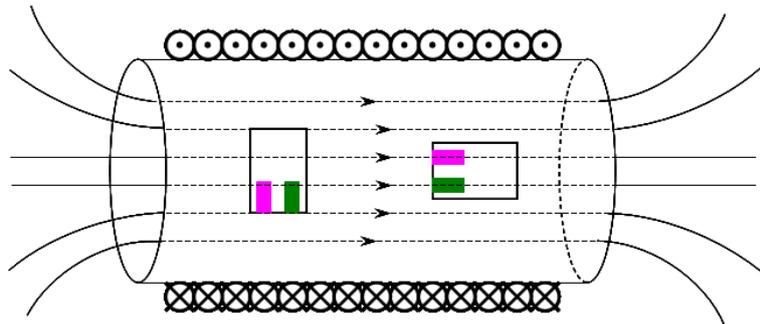


Abbildung 3-13: schematischer Versuchsaufbau Kennlinienmessung

Das Verhalten ändert sich auch bei kleineren Feldstärkebereichen nicht signifikant. Die Hysterese bei einem kleineren Feldbereich ist in jedem Fall geringer als die hier in den Messungen für die Kennlinie aufgetretene.

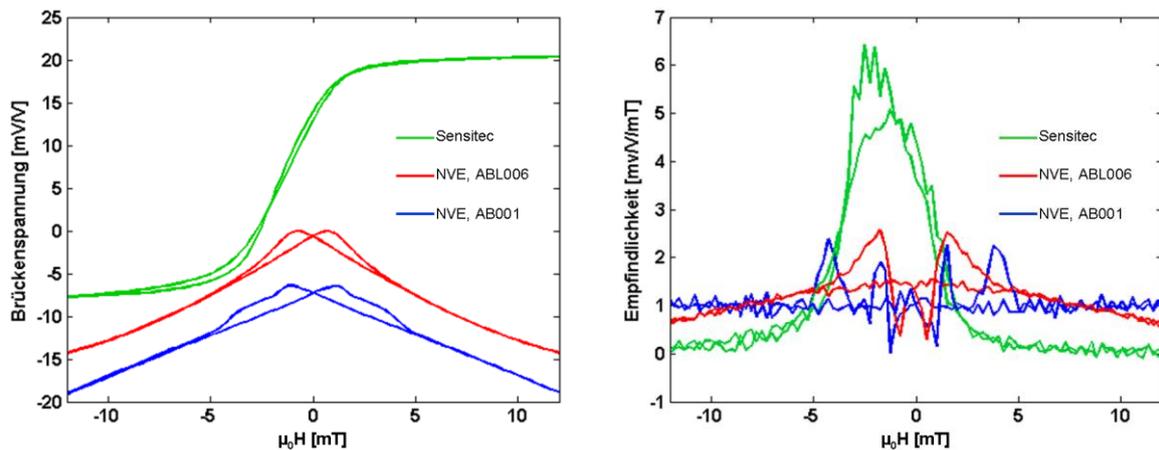


Abbildung 3-14: Vergleich Kennlinien und Empfindlichkeit [44]

Die Normierung auf die Einheit mV/V ist nicht unbegrenzt richtig. Es gibt eine maximale Betriebsspannung für die Sensoren bis zu der sich das Ausgangssignal linear mit der Betriebsspannung erhöht, ohne den Sensor zu zerstören.

3.5.4 Fazit GMR-Sensor

Die Vorteile hoher Empfindlichkeit und einfacher Anwendung der GMR-Sensoren haben sich in diesem Kapitel im Einklang mit der Literatur bestätigt. Zusammen mit den theoretischen Beschreibungen des Streufeldes in Abbildung 2-2, den Informationen der Literaturlauswertung in 2.1.2 und praktischen Erfahrungen aus 2.1.3 folgt, dass die im Folgenden verwendeten Sensoren aufgrund der geringen erwarteten Feldstärken und der benötigten Richtungsempfindlichkeit für die Normalkomponente auf dem Spinvalve-Prinzip basieren müssen und damit in der Anwendung der Sensitec „Typ 7“ betrachtet wird.

3.6 Labormesstechnik

Als Resultat aus dem Nyquist-Shannon-Theorem der Messtechnik folgen für den Laboreinsatz eine möglichst hohe Aufzeichnungsfrequenz und Auflösung als die beiden wichtigsten Kriterien für die Messtechnik. [47]

Die Aufzeichnungsfrequenz wird durch die zeitlichen Änderungen des Spannungssignals bestimmt. Im hier betrachteten remanenten Fall sind diese Änderungen hauptsächlich durch die Bewegung des Sensors bei der Messung bedingt. Für die Abschätzung der maximal notwendigen Aufzeichnungsfrequenz wird angenommen, dass die Verfahrensgeschwindigkeit des Sensors nach Gl. 3-19 maximal

$$v_{s,\max} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}. \quad \text{Gl. 3-19}$$

beträgt. Bei einer gewünschten Ortsauflösung innerhalb des Verfahrensweges von $0,1 \mu\text{m}$ ergibt sich die dafür nötige Abtastfrequenz nach Gl. 3-20.

$$f_{aq} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{0,1 \mu\text{m}} = 10^5 \text{ s}^{-1}. \quad \text{Gl. 3-20}$$

Die lokalen Feldänderungen und der zugehörige Wert der Kennlinie ergeben den Messwert und sind die Kriterien für die Auflösung. Aus den Erfahrungen der Kennlinienvermessung sind bei einer auf maximal 10 V begrenzten Versorgungsspannung Messwerte im Bereich $\pm 3 \text{ V}$ das zu erwartende Maximum. Um die Dynamik des Sensors nutzen zu können, muss eine Auflösung von mindestens $0,05 \text{ mV}$, entsprechend 16,87 bit erreicht werden.

Unter den gegebenen Randbedingungen kommt eine Messtechnik von National Instruments im Zusammenspiel mit der Software LabView zum Einsatz. Ein Auszug der technischen Leistungsdaten gibt die Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Messtechnik Leistungsdaten [48]

| | |
|-----------------------|------------------------------|
| Typ | PCI-6281 |
| Messbereich | -5 V ... 5 V |
| Auflösung | 18 bit |
| Aufzeichnungsfrequenz | $5 \cdot 10^5 \text{s}^{-1}$ |

Die Messkarten können entsprechend der notwendigen Anzahl der Kanäle in einem eigenen Rechner untergebracht werden. Der notwendige Datendurchsatz ist dabei gewährleistet.

3.7 Objektivität beim Prüfen

Grundsätzlich wird beim Prüfen zwischen zwei verschiedenen Wegen unterschieden. Bei subjektiven Sinneswahrnehmungen entsteht das Urteil durch den Prüfer aufgrund nicht zwangsläufig linear oder überhaupt skalierender Eindrücke. Eine wesentlich objektivere Beurteilung bieten Messungen von Eigenschaften, die in direktem Zusammenhang mit der Zielgröße stehen. Schematisch zeigt dies die nachstehende Abbildung 3-15 nach [49].

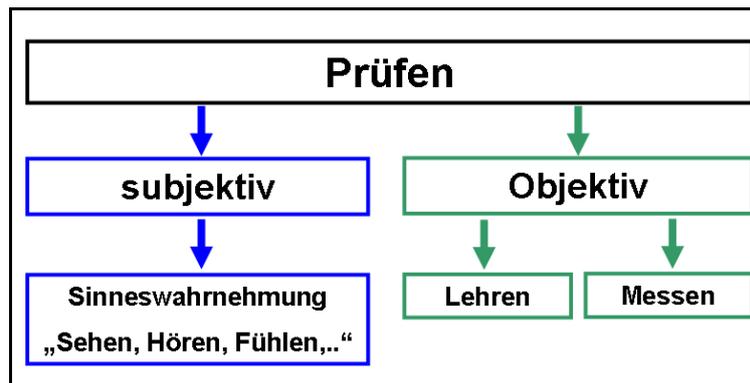


Abbildung 3-15: Prüfen – Definition und Abgrenzung

Bei der Magnetpulverprüfung „subjektiv, Sinneswahrnehmung“ kann trotz der Erfüllung aller Anforderungen im idealen Zustand der Prüfdurchführung durch stochastische Phänomene kurzzeitig die Aussagesicherheit abnehmen, beispielsweise Ablenkung des Prüfenden durch Ermüdung. Im Fall eines automatisierten Verfahrens auf Basis von Messen kann die Wahrscheinlichkeit eines stochastisch auftretenden Störphänomens wesentlich besser anhand von verschiedenen Prozessüberwachungen erkannt und die Prüfung damit klassifiziert werden. Die GMR-Sensoren machen Felder messbar in bieten damit einen Zugewinn an Informationen. Für das Verfahren der Streuflussprüfung sind Normen vorhanden. Die GMR-Sensoren fallen dabei unter die in [2] verwiesene und dort im Abschnitt 4.2 "Abtastung mit Sonden" in die Klasse c der magnetfeldempfindlichen Sonden. Es werden also Signale aufgrund von Magnetfeldern messtechnisch erfasst. Damit lässt sich die Aussagequalität anhand der Messsystemanalyse nach [49] bestimmen.

4 Der Sensor und sein Modell

Im Abschnitt 3.5 sind die Vorteile der GMR Sensoren aufgezeigt und der Sensitec „Typ 7“ für die weiteren Untersuchungen ausgewählt worden. Für das Verständnis des Sensors und seiner Abbildung im Modell werden zunächst weitere Details zusammengestellt. Behandelt wird das Schichtsystem mit seinen wichtigsten Funktionen, der Struktur des Sensors und der Kennlinie als Messkurve. Die schematische Wirkungs- und Funktionsweise mündet dann in einem Modell des Sensors zur weiteren Verwendung mit den numerischen und analytischen Daten von Magnetfeldern.

4.1 Schichtsystem und Aufbau

Bei den Sensoren wird ein Schichtsystem verwendet, welches bereits in Großserienprodukten der EDV eingesetzt wird. Es handelt sich um den Schichtaufbau der Sensoren in Festplatten.

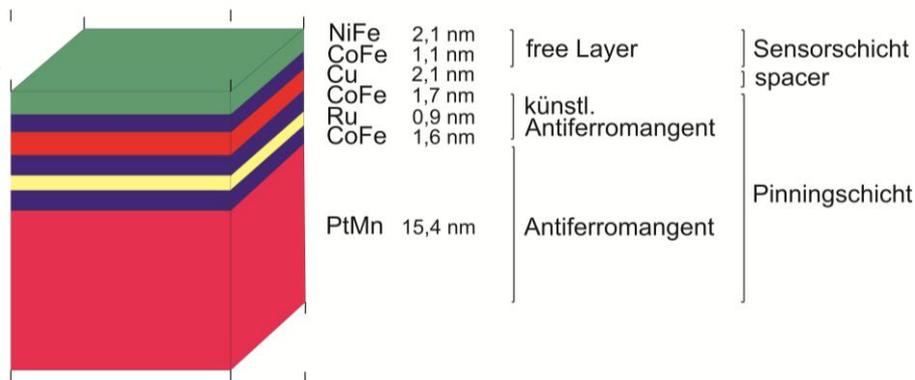


Abbildung 4-1: Ausschnitt des Schichtsystems, schematisch [44]

Die Kopplung über 0,9 nm Ruthenium führt nach Abbildung 3-6 zu einer AFM Ausrichtung und kehrt in diese auch nach Beaufschlagung mit einem sehr hohen Magnetfeld zurück. Die Platin-Magan-Schicht behält ihr AFM Verhalten bei hohen Temperaturen bei, so dass im Zusammenspiel der beiden Funktionen die Pinningschicht temperatur- und magnetfeldstabil ist, solange nicht beides zusammen auftritt. Dies ist bei der Sensorfertigung einer der entscheidenden Prozessschritte. Das so hergestellte Schichtsystem mit seiner Struktur und Position auf dem Die gibt Abbildung 4-2 wieder.

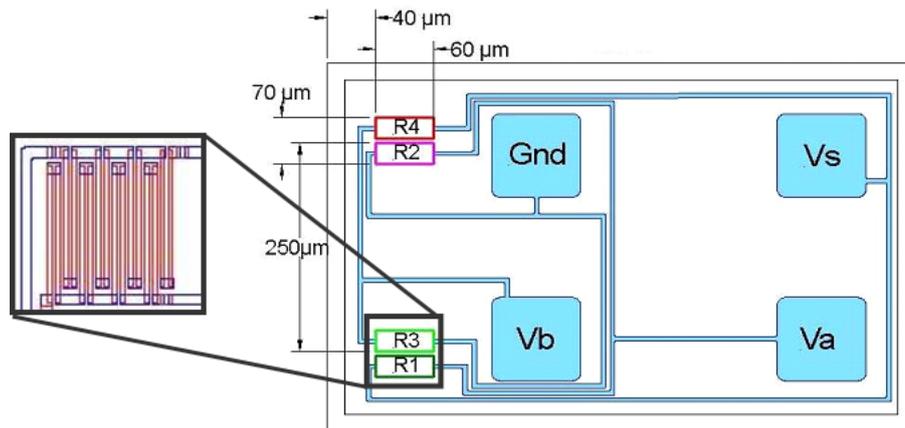


Abbildung 4-2: Sensor-Die, masstäblich [44]

Für das Verstehen der Sensorkennlinie und die Modellierung ist dieser Sensor in Abbildung 4-3 schematisiert in seiner Funktion als Wheatstone'sche Vollbrücke gezeigt.

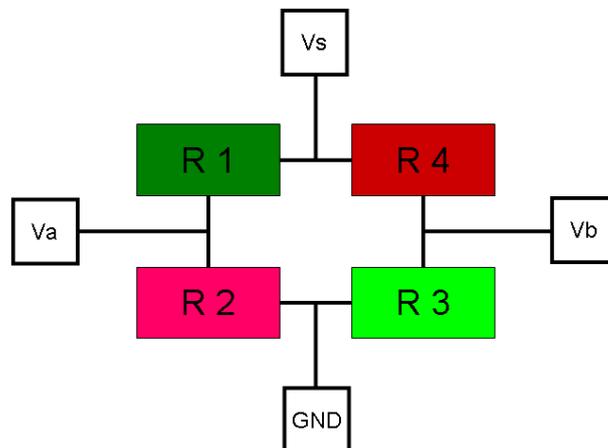


Abbildung 4-3: Sensor - Schaltbild

Die jeweiligen Diagonalwiderstände liegen örtlich sehr eng zusammen, was im Folgenden die Berechnung vereinfacht. Aus diesen Informationen zusammen mit der Kennlinie erfolgt die Modellierung des Sensors.

4.2 Kennlinie

Die Kennlinie ist bereits in 3.5.3 im Vergleich zu anderen Sensoren gezeigt worden. Zur vollständigen Beschreibung gehört der Vergleich der Kennlinien je Empfindlichkeitsrichtung. Der Sensor selber ist als Wheatstone'schen Brücke aufgebaut mit dem Schaltplan nach Abbildung 4-3. Die Vermessung der Kennlinien je Richtung erfolgt unter identischen Voraussetzungen wie in Abbildung 3-14, in diesem Fall unbelastet unter Angabe des absoluten Widerstandes. Dieses Verhalten charakterisiert dabei jeden der vier Widerstände des Sensors. Die so erzeugten Kennlinien zeigt Abbildung 4-4.

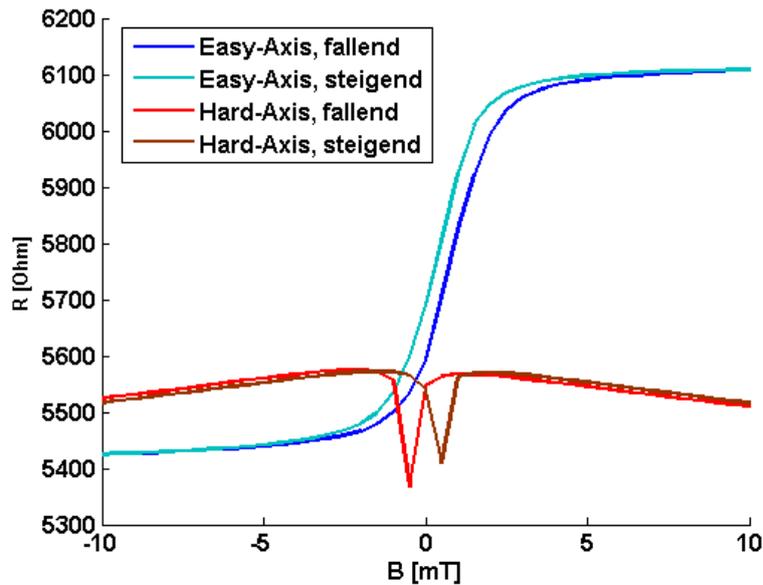


Abbildung 4-4: Kennlinien für Easy- und Hard-Axis

Dabei ist die Easy-Axis gleichbedeutend mit Feldern in z-Richtung analog Abbildung 3-11 und die Hard-Axis mit Feldern in x-Richtung aus Abbildung 4-6. Die letzte Achse der Empfindlichkeiten in y-Richtung bedeutet eine Drehung senkrecht in der Ebene des Schichtsystems, was aufgrund der geometrischen Verhältnisse sicher als "Ultra-Hard-Axis" bezeichnet werden kann. Mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik konnte keine Reaktion des Sensors bis außerhalb des Bereiches technisch relevanter Felder aufgezeichnet werden.

In der Anwendung treten tangentielle Felder sicher als Nebeneffekt der remanenten Magnetisierung auf. Kombiniert man die schematische Darstellung aus Abbildung 2-2 mit der gezeigten Kennlinie ergibt sich nach Skalierung auf den interessierenden Bereich die Abbildung 4-5.

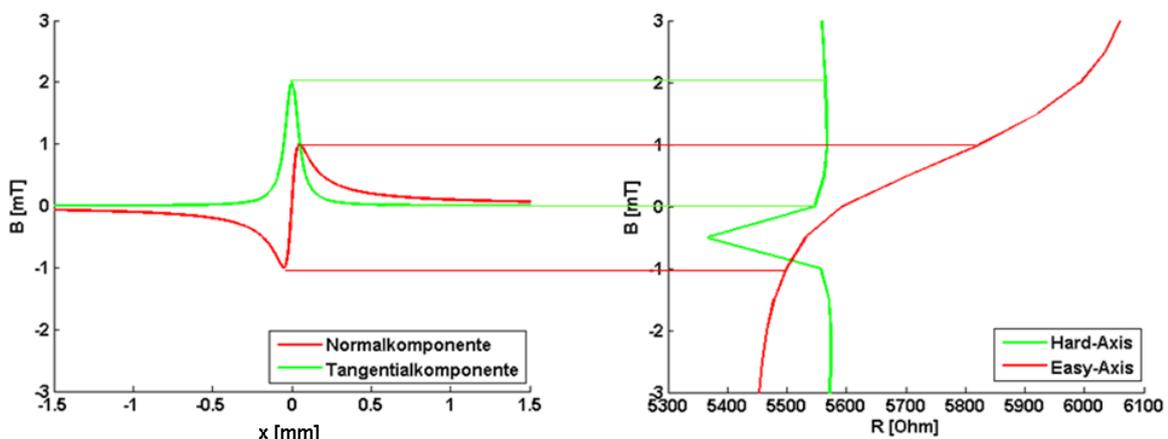


Abbildung 4-5: Kennlinien und schematischer Streufluss

Schwankungen in der Tangentialkomponente, hier am Beispiel des Feldes am Draht, führen nur zu minimalen Widerstandsänderungen und damit zu geringen

Störungen des gewünschten Messsignals. Ob es sich dabei um resultierende Streufelder einer Ungänge oder aber der Anregung handelt, ist unerheblich. Die Widerstandsänderung ist um einige Vielfache kleiner als durch die Normalkomponente bei ähnlicher Feldänderung. Es entstehen durch die Verknüpfung von Feld und Sensor die Positionskurven des Sensorsignals. Für die Extraktion des maximalen Informationsgehaltes im Einsatz muss die Zuordnung des Signals des Sensors und der zugrunde liegenden Feldänderung aus diesen Angaben rekonstruiert werden.

Für das Verständnis der Signalentstehung wird der Sensor im Modell abgebildet und anhand der Daten aus Abschnitt 4 untersucht. Für die analytische Modellbildung müssen sehr viele Vereinfachungen gemacht werden, wie im Folgenden beschrieben ist.

4.3 Modellierung

Aufgrund der dünnen Schichten im Bereich von Nanometern, in denen die für die Messung entscheidenden Effekte auftreten, kann der Sensor mit hinreichender Genauigkeit als zweidimensional angenommen werden. Die Ausdehnung der als Mäander strukturierten Widerstände müssen jedoch berücksichtigt werden. Die Details des Schichtsystems in y-Richtung, die Lage der Empfindlichkeitsrichtungen und die geometrische Gestalt des Sensors selber sind bereits im Abschnitt 3.5.3 gezeigt worden. Für das Sensormodell ist daher nur die schematische Darstellung aus Abbildung 4-6 mit den Koordinaten notwendig.

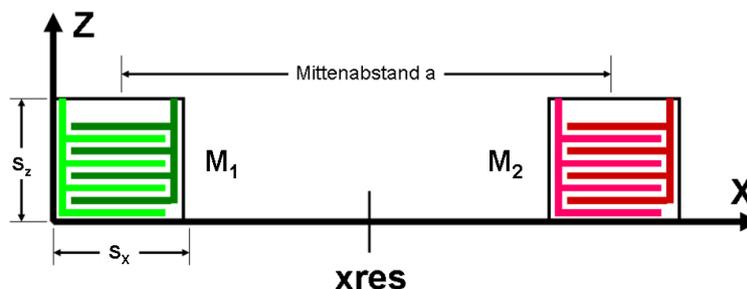


Abbildung 4-6: Skizze Sensormodell und Koordinaten

Die Mäander M_1 und M_2 fassen dabei die Widerstände zusammen. Im Weiteren wird die Bewegungsrichtung in x-Richtung angenommen, was für die Anwendung im Speziellen natürlich willkürlich gewählt ist und im Einzelfall beurteilt werden muss. Die Abmessungen $s_x = 70 \mu\text{m}$ und $s_z = 60 \mu\text{m}$ beschreiben die gesamte Fläche aktiver Elemente, hier nur schematisch dargestellt. Die Strukturierung als Streifen ist mit hinreichender Genauigkeit als gleichmäßig über beide Widerstände und die Fläche $s_x \cdot s_z$ anzunehmen. Die Funktion der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion ist Gl. 4-1.

$$U = f_s(\vec{B}) \quad \text{Gl. 4-1}$$

Beschrieben ist die Funktion f_s durch die numerisch aufgezeichnete Kennlinie aus Abbildung 3-14 je Widerstandselement und der Funktion der Wheatstone'schen Brücke mit Gl. 4-2

$$U = U_s * \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \quad \text{Gl. 4-2}$$

wobei die Widerstände jeweils das Verhalten der numerischen Kennlinie haben und damit $R_1=R_3$ und $R_2=R_4$ ist. Es lassen sich damit die einzelnen Bestandteile im Folgenden als örtlich M_1 und M_2 zusammenfassen. Damit erhält man Gl. 4-3.

$$U = U_s * \frac{R(M_1) - R(M_2)}{R(M_1) * R(M_2)} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Da der Sensor eine anisotrope Feldempfindlichkeit besitzt, lässt sich das Modell weiter vereinfachen. Für die Berechnung der Signale ist aus dem Vektorfeld \vec{B} nur die Normalkomponente (z-Komponente) relevant. Das Verhalten jedes der beiden Mäander M_1 und M_2 in Gl. 4-4 ist abhängig vom Integral der in ihm wirkenden Induktion \vec{B}_n .

$$M_i = \iint (B_n(x, z)) dx dz \quad \text{Gl. 4-4}$$

Dieser Zusammenhang muss für jeden Punkt der Oberfläche gelöst werden. Diese Beschreibung muss nun für jeden Anwendungsfall mit B_{Mi} und der entsprechenden Sensorkennlinie zusammengeführt werden. Dies wird im Folgenden anhand des stromdurchflossenen Leiters und dem numerischen Modell der Nut als Riss durchgeführt.

5 Modell stromdurchflossener Leiter

Das Modell des stromdurchflossenen Leiters wird in dieser Arbeit verwendet, um das Sensormodell zu überprüfen. Die Ähnlichkeit der Felder zum Realfall und der analytischen Lösbarkeit der Maxwellgleichungen für diesen Fall ermöglichen eine Übertragung der Ergebnisse auf die Nut als weiteres Modell und letztendlich auch auf die Realität. Am Modell wird in diesem Kapitel die Signalentstehung des Sensors speziell im Hinblick auf die Zusammenhänge von Ortsauflösung und Empfindlichkeit erforscht, sowie die Vergleichbarkeit von numerischer und analytischer Lösung dieses Falls ermittelt. Ziel ist es, anhand dieses Modells Abweichungen zwischen Modell und Messung, auch folgender Sensorgenerationen, verstehen zu können.

5.1 Ergebnisse aus analytischer Darstellung

Für das Modell des Leiters lassen sich die Maxwellgleichungen analytisch lösen. Als Beispiel mit Bedeutung für diese Arbeit ist der von einem zeitlich konstanten Stromdichte j (gleichbedeutend mit dem Strom I) durchflossene Leiter zu nennen. Der Lösungsweg ist in 3.2.1 beschrieben. In Abbildung 5-1 ist der Zusammenhang schematisch dargestellt.

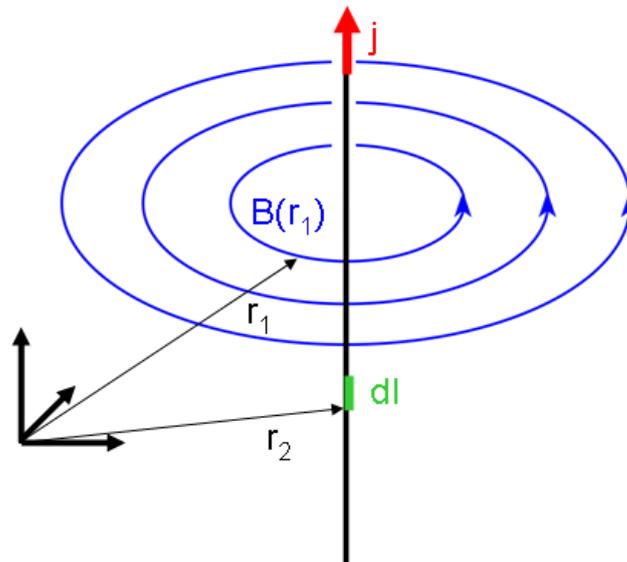


Abbildung 5-1: magnetische Induktion eines stromdurchflossenen Leiters

Für diesen Fall ergibt sich das Gesetz von Biot-Savart aus Gl. 3-14 zu Gl. 5-1

$$d\vec{B}(\vec{r}_1) = \frac{\mu_0}{4\pi} Idl \times \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Das infinitesimale Leiterstück dl an der Stelle r_2 , von der Stromdichte j durchflossen liefert den Beitrag $dB(r_1)$ zur magnetischen Flussdichte am Ort r_1 . Vernachlässigt wurde dabei die Ausdehnung des Leiters und die Eigengeschwindigkeit des betrachteten Punktes r_1 . Im Falle einer Messung sind die zu erwartenden Geschwindigkeiten der Bewegung wesentlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, so dass diese Vereinfachung zulässig bleibt [26]. Summiert man nun alle diese Stücke mittels Integration auf, erhält man die gesuchte Lösung für die magnetische Induktion am Ort r_1 .

Für die numerische Lösung mittels Simulationssoftware greift man in der Regel auf die Bestimmung des Vektorpotentials zurück. Für die Fragestellung des stromdurchflossenen Leiters lässt sich die beschreibende Gleichung unter der Bedingung eines unendlich langen Leiters und der Betrachtung eines mathematischen Punktes an der Stelle r_1 sehr einfach angeben. Die Lösung gibt Gl. 5-2.

$$\vec{B}(r_1) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} e_\varphi \quad \text{Gl. 5-2}$$

Sie beschreibt damit die magnetische Induktion entlang eines Kreises mit dem Radius r_1 um den Leiter. Mit dieser Formulierung lässt sich einfach der Vergleich zu numerischen Modellen und zur Messung durchführen.

Die Darstellung in Zylinderkoordinaten ist für die spätere Verwendung nicht geeignet und erfolgt daher in kartesischen Koordinaten entsprechend Abbildung 5-2.

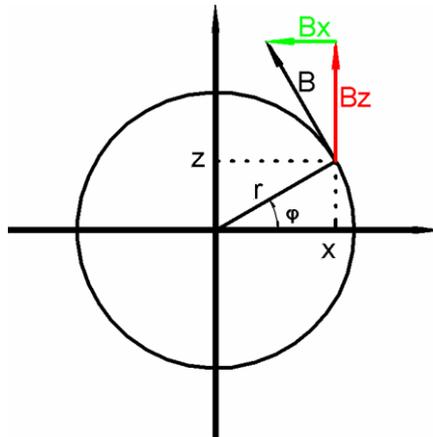


Abbildung 5-2: Koordinatentransformation

Angenommen ist ein Leiter im Zentrum des Koordinatensystems, der vom Strom I durchflossen wird. Dann ist nach Gl. 5-2 die magnetische Induktion entlang einer Kreislinie mit dem Radius r gegeben. Ersetzt man die Konstante μ_0 durch Gl. 5-3

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad \text{Gl. 5-3}$$

und bildet den Betrag von \vec{B} , ergibt sich Gl. 5-4.

$$|\vec{B}| = 2I \cdot \frac{1}{|\vec{r}|} = 2I \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Zur Übersichtlichkeit werden in Gl. 5-5 und Gl. 5-6 die zu x und z invarianten Terme zu K_1 zusammengefasst und die geometrischen Zusammenhänge zur Definition der Winkelfunktionen angewendet, wobei der Punkt $N(x=0, z=0)$ formal kein Element der Definitionsmenge sein kann. Unabhängig von dieser mathematisch korrekten Angabe lässt sich das Feld im Leiter natürlich beschreiben.

$$\vec{B}_x = |\vec{B}| \cdot \sin(\varphi) e_x = K_1 \cdot \frac{z}{x^2 + z^2} e_x [T] \quad \text{Gl. 5-5}$$

$$\vec{B}_z = |\vec{B}| \cdot \cos(\varphi) e_z = K_1 \cdot \frac{x}{x^2 + z^2} e_z [T] \quad \text{Gl. 5-6}$$

Beispielhaft sind die so zu erwartenden Verläufe entlang x für ein beliebig gewähltes $z > 0$ in der folgenden Abbildung 5-3 gegeben.

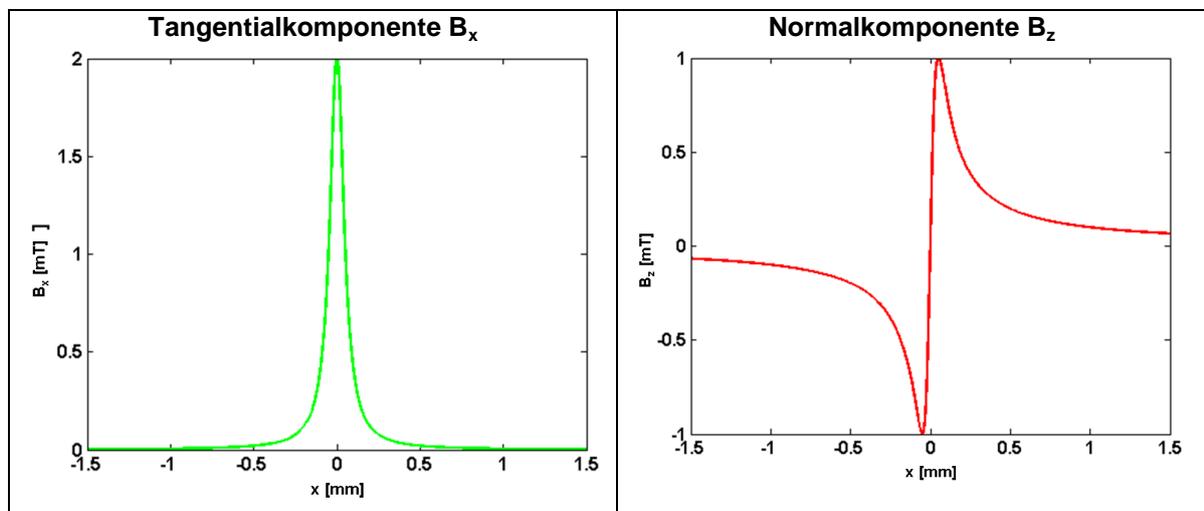


Abbildung 5-3: Beispiel B_x - und B_z -Verläufe nach Gl. 5-5 und Gl. 5-6

Rein qualitativ sind deutliche Ähnlichkeiten zu der Abbildung 2-2 zu erkennen. Das Verhalten dieses idealisierten 2D-Feldes lässt sich mit Hilfe der Analyse sehr einfach ermitteln. Für die spätere Sensorcharakterisierung ist das Verhalten der Normalkomponente in Abhängigkeit der Ortskoordinate und dem Abstand z interessant. Mit Hilfe der ersten Ableitung von B_z findet man die Orte der Extremstellen. Es sei $z > 0$. Eine notwendige Bedingung für die Extremwerte ist Gl. 5-7

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial x} = K_1 \cdot \frac{z^2 - x^2}{(z^2 + x^2)^2} = 0 \quad \text{Gl. 5-7}$$

mit den Lösungen $x_{E,1} = -z$ und $x_{E,1} = z$, die auch der hinreichenden Bedingung der zweiten Ableitung für alle $z \neq 0$ genügen. Die Position der Extrema verschiebt sich also linear mit dem Abstand zur x-Achse, es ist $\Delta x_n = 2z$. Die zugehörigen Extrema der magnetischen Induktion sind damit Gl. 5-8 und Gl. 5-9.

$$B_z(x_{E,1}) = \frac{K_1}{2z} \quad \text{Gl. 5-8}$$

$$B_z(x_{E,2}) = -\frac{K_1}{2z} \quad \text{Gl. 5-9}$$

Der Wert für die Differenz der Extrema ist dann Gl. 5-10.

$$\Delta B_z = \frac{K_1}{z} \quad \text{Gl. 5-10}$$

Zusammengefasst wird dieses Verhalten der Normalkomponente in Abhängigkeit vom Abstand in der Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1 Verhalten in Abhängigkeit vom Abstand zum Leiter, analytisch

| Größe | Verhalten | Zusammenhang |
|--------------|--|------------------------------|
| Δx_n | linear mit dem Abstand steigend | $\Delta x_n = 2z$ |
| ΔB_z | umgekehrt proportional mit dem Abstand fallend | $\Delta B_z = \frac{K_1}{z}$ |
| ΔB_z | linear mit der Stromstärke wachsend | |

Im Folgenden wird eine identische Analyse der numerischen Daten vorgenommen und veranschaulicht.

5.2 Vergleich mit den numerischen Ergebnissen

Für die numerische Modellierung werden ein Leiter mit $d = 70 \mu\text{m}$ und ein Strom $I = 0,5 \text{ A}$ im Koordinatenursprung ($x = 0, z = 0$) angenommen, der von Luft umgeben ist. Die Wahl der Daten ist im späteren Versuchsaufbau begründet.

Die Auswertung erfolgt anhand von Linien mit jeweils $5 \mu\text{m}$ Abstand zueinander im Bereich $[40 \dots 400] \mu\text{m}$, also außerhalb des Leiters. Bezüglich ihrer Extrema und Minima ergibt sich die folgende Abbildung 5-4.

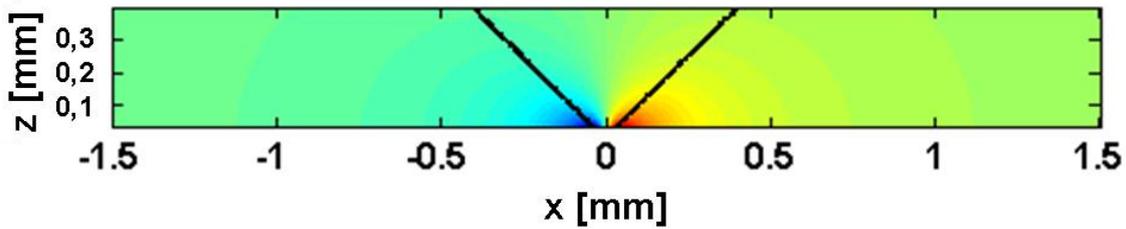


Abbildung 5-4: Numerisch: Verlauf Δx_n für Maxima und Minima von B_z

Die Werte liegen auf den beiden eingezeichneten Geraden und genügen damit offensichtlich den bereits analytisch gezeigten Zusammenhängen aus Tabelle 5-1. Die Normalkomponente von B_z und das Verhalten der Amplitude stimmen ebenfalls hinreichend genau überein, wie aus der Differenz beider Verläufe ΔB_z [norm] (Abbildung 5-5) hervorgeht.

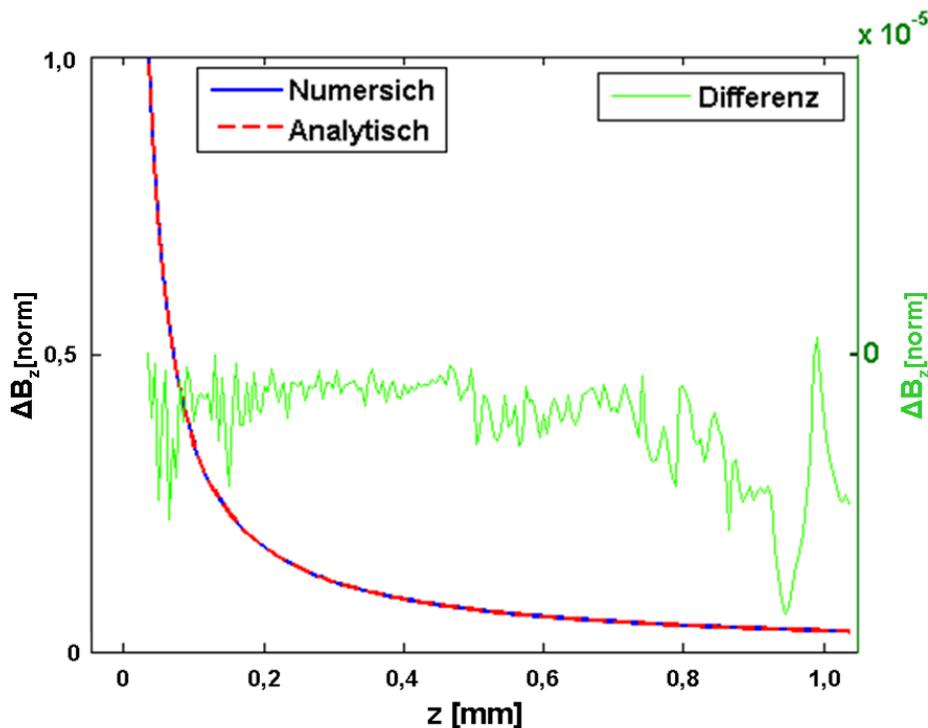


Abbildung 5-5: Numerisch – Verlauf ΔB_z mit wachsendem Abstand z

Die Unterschiede sind durch die Diskretisierung als Netzstruktur der numerischen Simulation verursacht. Die Abweichung ist mit dem Faktor 10^{-5} ausreichend für alle Betrachtungen und entspricht dem Erwartungswert der Diskretisierung.

Die analytischen und numerischen Modellierungen des stromdurchflossenen Leiters zeigen identisches Verhalten von Δx_n und ΔB_z als Funktion vom Abstand z zum Leiter und geben damit eine gute Möglichkeit, den Sensor anhand eines Labormodells zu erforschen. Die Berechnung mittels numerischer Verfahren ist hinreichend schnell möglich und kann damit im späteren Einsatz als Möglichkeit zur Datenbeurteilung genutzt werden.

5.3 Sensorsignal - Entstehung am stromdurchflossenen Draht

Zum Verständnis der Signalentstehung, insbesondere der Korrektur der örtlichen Zuordnung der Messwerte, wird das Sensormodell auf die Daten des stromdurchflossenen Leiters angewendet. Erforscht wird dabei, wie sich die charakteristischen Verläufe ineinander überführen lassen und welche Zusammenhänge für die spätere Auswertung genutzt werden können.

5.3.1 Analytische Auswertung

Es ist Gl. 5-6 als Beschreibung der Normalkomponente des Streufeldes bekannt. Mit Gl. 4-4 des Sensormodells ergibt sich Gl. 5-11 als eine Stammfunktion.

$$M_i = \iint (B_n(x, z)) dx dz = \frac{z \log(z^2 + x^2) - 2 \left(z - x \arctan\left(\frac{z}{x}\right) \right)}{2} \quad \text{Gl. 5-11}$$

Für die Integration wurde angenommen, dass $x+a \neq 0$ gilt, der Punkt $x = -a$ also nicht in der Definitionsmenge enthalten ist. Die Lösung für die Spannung an der Stelle x_{res} aus Gl. 4-3 unter den gemachten Vereinfachungen für den stromdurchflossenen Leiter ist damit Gl. 5-12.

$$U(x_{res}, z) = U_s \cdot m \cdot \left[\frac{R(M_1 |_{x,z}^{x+s_x, z+s_z}) - R(M_2 |_{x+a,z}^{x+a+s_x, z+s_z})}{R(M_1 |_{x,z}^{x+s_x, z+s_z}) * R(M_2 |_{x+a,z}^{x+a+s_x, z+s_z})} \right] \quad \text{Gl. 5-12}$$

Die Daten für die Abmessungen der Sensorflächen s_x , s_z und der Mittenabstand a sind bekannte Größen des Sensors, die in Gl. 5-12 eingesetzt werden. So erhält man die analytische Beschreibung für das Verhalten von $U(x,z) = f(B_n)$ und $U'(x,z) = f'(B_n)$. Analytisch lässt sich zeigen, dass x_{min} unabhängig von z ist und auf der Gerade $x=0$, also über dem Mittelpunkt des Leiters liegt. Diese Symmetrieeigenschaften der Signale lassen sich wie folgt auch allgemein zeigen:

Es sei $f(x)$ eine beliebige polynomiale Funktion, was sicherlich auch für die bisher verwendeten magnetischen Felder richtig sein kann. Für die Punktsymmetrie dieser Funktion zum Punkt (p, q) muss

$$2q - f(2p - x) = f(x) \quad \text{Gl. 5-13}$$

erfüllt sein.[50] Die gradiometrische Funktionsweise des Sensors, angewendet auf Gl. 5-13 bedeutet das Bilden der ersten Ableitung mit der Lösung Gl. 5-14.

$$f(2p-x) = f'(x)$$

Gl. 5-14

Dies ist die Bedingung der allgemeinen Achsensymmetrie zu $x = p$. Anhand der numerischen Daten lässt sich dieses Verhalten ebenfalls zeigen.

5.3.2 Numerische Auswertung und Messung

Die numerische Analyse des Sensorsignals wird anhand der Spannung als Messwert durchgeführt. Unter Berücksichtigung der numerischen Daten und der realen Kennlinie werden die entsprechenden Berechnungen durchgeführt. In Abbildung 5-6 sind ein berechnetes Quellsignal und das resultierende Sensorsignal gezeigt.

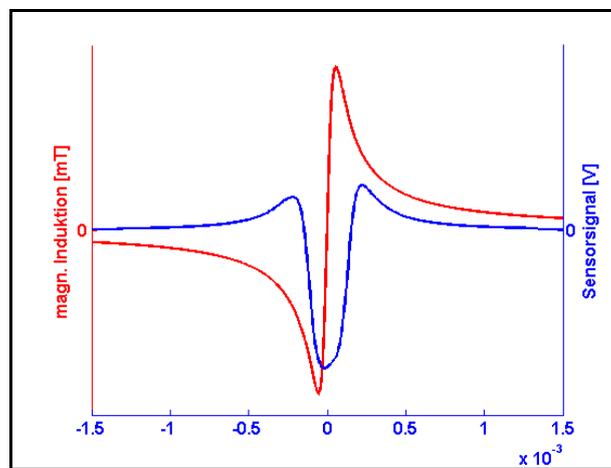


Abbildung 5-6: Magnetische Induktion und Sensorsignal am Leiter, numerisch, schematisch

Mit der Achsensymmetrie lässt sich die Ortskoordinate der Messsignale korrigieren und der X-Wert des Quellsignals bestimmen. Der Mittelpunkt des Quellsignals ist immer durch die Position der Minima des Sensorsignals beschrieben.

Die Übereinstimmung der beiden Modellvarianten mit einer exemplarischen Messung gibt die folgende Abbildung 5-7 wieder.

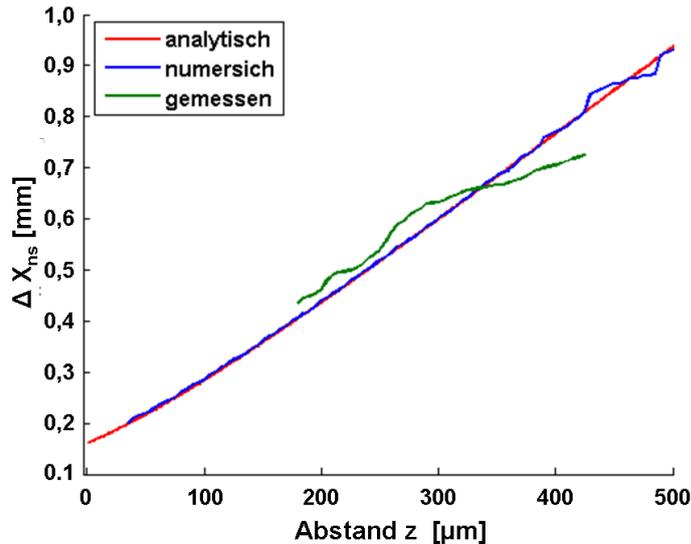


Abbildung 5-7: Vergleich Δx_{ns} , analytisch, numerisch und gemessen

Der minimale Abstand z während der Messung ist systembedingt $175 \mu\text{m}$. Im Rahmen der erwarteten Messgenauigkeit stimmt dies mit der gezeigten Darstellung überein. Die Einflüsse der realen Kennlinie bedingen eine asymmetrische Verschiebung der Signale zum Quellsignal. Diese Verschiebung ist solange vorhanden, bis der Bereich der Kleinfeldhysterese erreicht ist. Durch die einheitliche Ausprägung des Einflusses kann durch mathematische Operationen dieser Versatz über z ausgeglichen werden.

5.4 Fazit stromdurchflossener Leiter

Es konnte am stromdurchflossenen Leiter gezeigt werden, dass das Modell des Sensors zusammen mit dem Modell des stromdurchflossenen Leiter sowohl analytisch als auch numerisch, nach Berücksichtigung der realen Werte für Kennlinie und Skalierung des Sensors, hinreichend gut mit den Messungen übereinstimmt. Damit kann im Fall nicht bekannter Sensorposition diese über die Messwerte am stromdurchflossenen Leiter vermessen und so für die Korrektur der Positionsinformationen genutzt werden.

Der Sensor bildet punkt- in achsensymmetrische Signale ab. Das ermittelte Verhalten in Bezug auf die Abbildung von Symmetrien und die Lage der Extrempunkte ermöglichen die Korrektur der Position der Messergebnisse. Die Lage des Minimums gibt dabei in der theoretischen Betrachtung die Position des Sensors in der Lage über dem Nullpunkt des punktsymmetrischen Quellsignals wieder. Für die Messung müssen hier durch die Kennlinieneinflüsse Korrekturen erfolgen, die dann zu gleichwertigen Ergebnissen führen.

Für die Rückrechnung des Sensorsignals in das Feldsignal muss aus dem durch Diskretisierung, nicht linearer Kennlinie und Übertragungsfunktion entstandenen Messsignal das zugrunde liegende Feldsignal rekonstruiert werden. Eine Lösung ist analytisch für den Fall des Drahtes noch möglich, wird mit dem Übergang zu Riss-

modellen und der Beschreibung in den numerischen Modellen beliebig kompliziert. Für die Untersuchung von realen Rissen bleiben die Zusammenhänge der geometrischen Größen zum Messsignal sowie die Wege der Abschätzung zu untersuchen. Im Folgenden wird dies für Nuten als Quelle von Streufeldern in realen Körpern durchgeführt.

6 Referenzmodell einer Nut als Riss

Die Annäherung eines Risses als Nut ist ein anerkanntes Modell. Es gibt keine exakte Definition eines Risses, was nicht zuletzt auch an der Vielfalt möglicher Geometrien liegt. Als Grenze gilt für diese Arbeit die Definition über das Verhältnis der Abmessungen Breite zu Tiefe zu Länge von 1:10:100, wie sie auch von V. Deutsch und W. Morgner in [51] verwendet wird. Dies genügt auch der Beschreibung der DIN 4761: "...örtlich begrenzte Trennung [...] von geringer Breite, aber oft beträchtlicher Länge und Tiefe." und auch DIN 8524 Teil 3 "Der Riß ist eine begrenzte Werkstofftrennung mit überwiegend zweidimensionaler Ausdehnung" nach [52]. Die Untersuchungen werden ausschließlich an der Normalkomponente des Streufeldes durchgeführt.

6.1 Modellierung der Simulation

Für die Modellierung wird der Idealfall für das Streufeld betrachtet, in dem die Remanenz im Material nur entlang der x-Achse und damit senkrecht zur flächigen Ausdehnung des Risses angenommen wird. Um für dieses Modell realistische, wenngleich nicht exakte Werte für das Streufeld zu bekommen, wird eine Vielzahl von Bauteilen gleicher Geometrie, siehe Abbildung 6-1, bis zur Sättigung magnetisiert. Für die Bestimmung der Permeabilität wurden Überlegungen aus 3.2.2 zugrunde gelegt. Für die iterative Bestimmung der Remanenz im Körper wird mittels Hallsonde die magnetische Flussdichte in x-Richtung an den Stirnseiten vermessen. Der Abstand in x-Richtung spielt dabei eine wesentlich kleinere Rolle als bei der auch möglichen Vermessung der Tangentialkomponente.

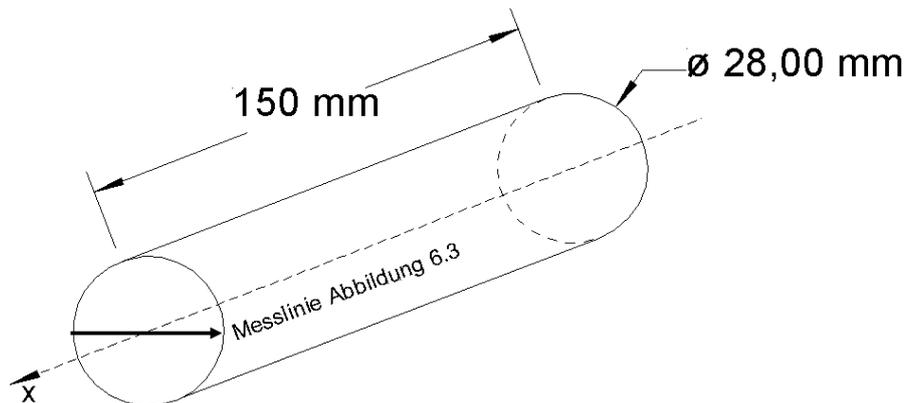


Abbildung 6-1: Musterteile für Messung der Magnetisierung und Simulation

Bei dem Material handelt es sich um den Vergütungsstahl Cf53 im normalisierten Zustand. Mittels Iteration des Feldstärkeverlaufs bei der gemessenen Remanenz an der Stirnfläche wird die Permeabilität im Material angepasst, bis die Werte ausreichend nahe beieinander liegen. Die endgültig gewählten Werte sind in Tabelle 6-1 aufgeführt und das Ergebnis der Iteration wird in Abbildung 6-2 gezeigt.

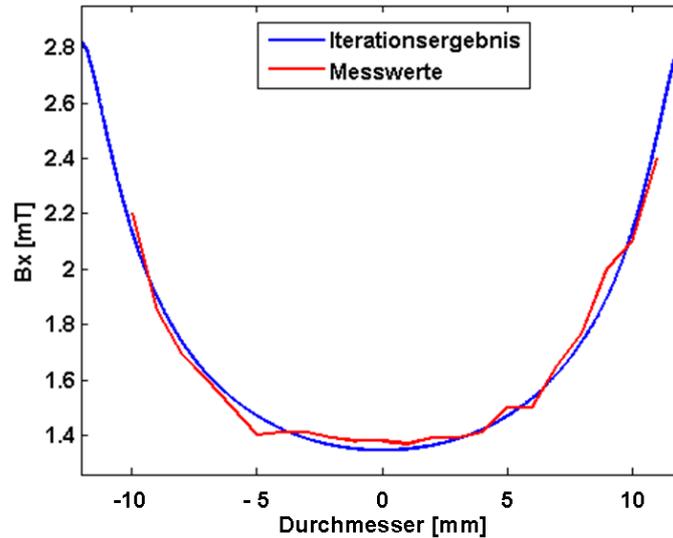


Abbildung 6-2: Vergleich von Messung und Iteration der Komponente B_x an der Probenstirnseite

Die beste Lösung wird für ein $\mu_r = 800$ erreicht, was auch im Bereich der in der Literatur veröffentlichten Materialkennwerte liegt.

Tabelle 6-1: Werte für die Modellierung

| | |
|--------------------|-----------------------|
| Rel. Permeabilität | $\mu_r = 800$ |
| Remanenz | $B_r = 1,1 \text{ T}$ |
| Material | Cf53 normalisiert |

Die Geometrie und die dadurch bedingte Formanisotropie ist einer der größten Einflüsse bei der Simulation. Um die Erfahrungen dieses Vorgehens übertragen zu können, sind die Teile ähnlich in Geometrie und Material zu den späteren Realbauteilen gewählt. Für die Simulation des Verhaltens sind die Teile mit isotropen Eigenschaften angenommen und eine Nut in ihrer Parametrierung über Höhe und Breite als Ersatzfehler für einen Oberflächenriss gegeben. Dieses Modell wird zur Überprüfung der Erfahrungen in der Literatur, der Untersuchung des Verhaltens der Normalkomponente, insbesondere dem Verhalten in z-Richtung, genutzt.

6.2 Untersuchung des Streufeldes einer Nut

Wie schon in Tabelle 2-1 und folgenden beschrieben, gibt es in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse bei der Betrachtung der charakteristischen Werte des Streufeldes, was nicht zuletzt auf die verwendete numerische Umgebung und die Experimente zurückzuführen ist. Einheitlich für diese Arbeit wird anhand dieser Kennwerte die hier benutzte Modellumgebung beschrieben und auf seine Schlüssigkeit hin diskutiert. Letztendlich zeigt der Abgleich mit den Messungen, welche Analogien der Modellumgebung zur Beurteilung herangezogen werden können und welche Einflüsse dann in der Anwendung zu beachten sind.

Als Parameter für die Untersuchung dienen die Abmessungen der Nut, definiert über Breite b und Höhe h und den Abstand z des Messpunktes zur Oberfläche. Untersucht wird hier die Normalkomponente, also der Anteil des Feldes in z -Richtung anhand der charakteristischen Werte aus Abbildung 6-3. Der maximale Hub der magnetischen Induktion ΔB_n und der Abstand dieser Extrema Δx_n werden in Abhängigkeit der Parameter untersucht.

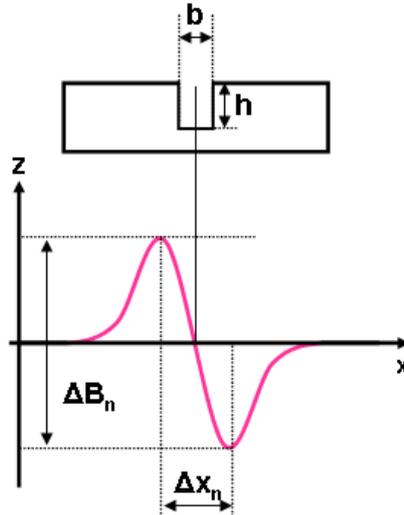
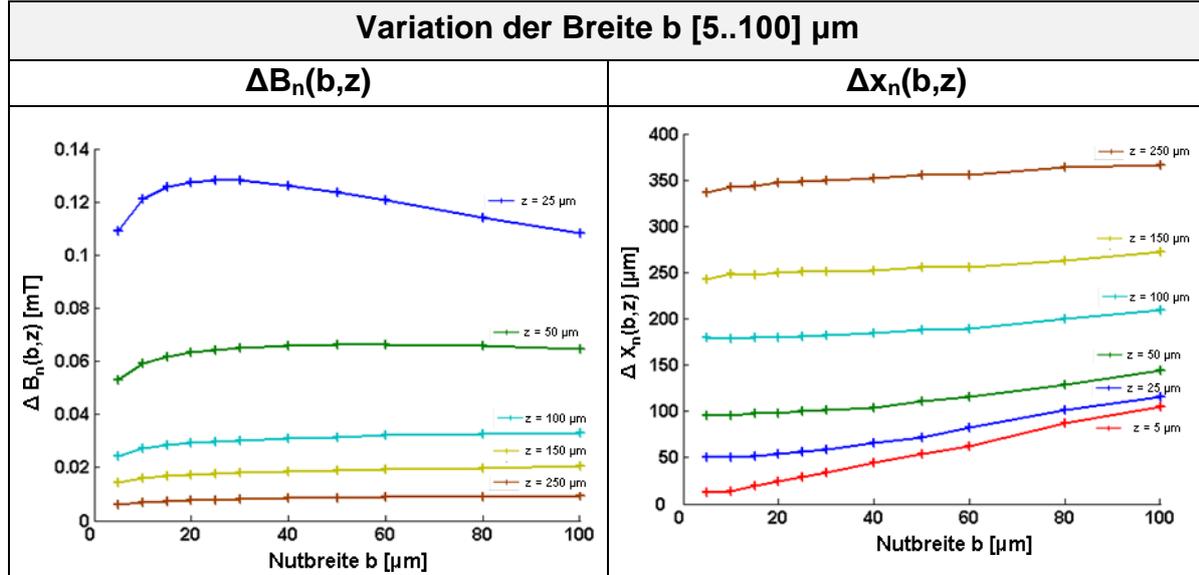


Abbildung 6-3: Skizze der charakteristischen Werte

Das numerisch ermittelte Verhalten des Feldes ist grafisch anhand der Bilder in Tabelle 6-2 für die Breite und in Tabelle 6-3 für die Höhe dargestellt und folgend diskutiert.

6.2.1 Verhalten bei Variation der Breite der Nut

Für die Untersuchung wird die Höhe konstant gehalten. Die Auswertung des Verhaltens für verschiedene Abstände dient zur späteren Interpretation der Ergebnisse der Messungen. Das Verhalten wird in der Tabelle 6-2 grafisch dargestellt. Alle Details lassen sich nicht direkt aus den Grafiken erkennen, sondern erst anhand der numerischen Auswertung der Kurvenverläufe. Die gefundenen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Tabelle 6-2: Numerisch ermitteltes Verhalten von $\Delta B_n(b,z)$ und $\Delta x_n(b,z)$ für verschiedene z 

Die numerischen Analysen der Extrempunkte des Verhaltens von $\Delta B_n(b,z)$ für den Bereich b [5..100] μm zeigen ein bis zum Maximalwert überproportionales Wachstum und anschließendes Abnehmen. Die Maxima liegen dabei an den Stellen, wo der Abstand z gleich der Nutbreite b ist, entsprechend formuliert Gl. 6-1 dies als Bedingung für die Existenz eines Maximums.

$$\Delta B'_n(b = z, z) = 0 \quad \text{Gl. 6-1}$$

Für eine nicht vorhandene Nut, entsprechend Nutbreite $b = 0$, ist im idealen Fall auch $\Delta B_n(b,z) = 0$ für alle z , entsprechend Gl. 6-2 als Grenzwert beschreiben.

$$\lim_{b \rightarrow 0} \Delta B_n(b, z) = 0 \quad \text{Gl. 6-2}$$

Die in Tabelle 6-2 gezeigten Kurven von $\Delta B_n(b,z)$ haben damit alle den Ursprung als Ausgangspunkt.

Die Kurven für $\Delta x_n(b,z)$ zeigen ein annähernd lineares Verhalten. Die Steigung wird dabei mit zunehmendem Abstand z kleiner. Für sehr kleine z nähert sich das Verhalten einer Ursprungsgeraden mit der Steigung b an. Dies zeigt die numerische Auswertung der Grenzwerte nach Gl. 6-3 und Gl. 6-4.

$$\lim_{z \rightarrow 0} \Delta x_n(b, z) = b \quad \text{Gl. 6-3}$$

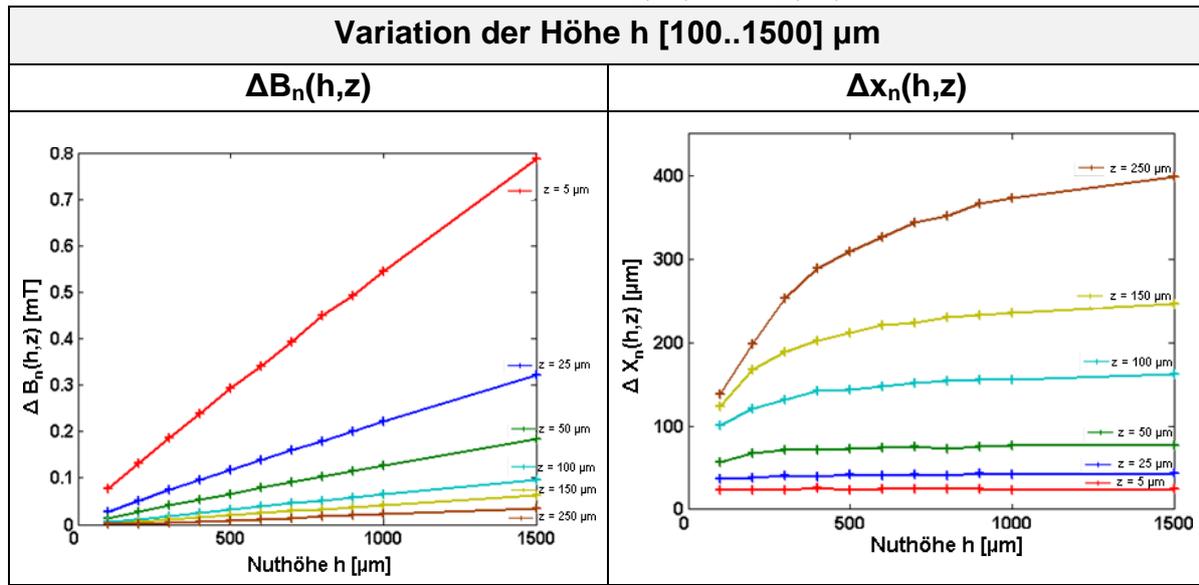
$$\lim_{b \rightarrow 0} \Delta x_n(b, z) = 0 \quad \text{Gl. 6-4}$$

Nach diesen Ergebnissen ist in dem Verhalten von $\Delta x_n(b,z)$ für kleine z die Breite der Nut enthalten.

6.2.2 Verhalten bei Variation der Höhe der Nut

Wie schon im vorangegangenen Abschnitt werden die numerischen Auswertungen der Höhenvariation diskutiert. Zur Illustration sind in Tabelle 6-3 die entsprechenden Kurven dargestellt und im Folgenden die Ergebnisse der numerischen Auswertungen zusammengefasst.

Tabelle 6-3: Numerisch ermitteltes Verhalten von $\Delta B_n(h,z)$ und $\Delta x_n(h,z)$ für verschiedene z



Das Verhalten von $\Delta B_n(h,z)$ zeigt einen linearen Zusammenhang zur Höhe h . Die Steigung nimmt für kleine Abstände zu, gleichbedeutend mit einem höheren Feldgradienten an der Oberfläche.

Unabhängig vom Abstand z zur Oberfläche ist bei einer Nuthöhe $h = 0$ auch $\Delta B_n(h,z) = 0$, formuliert als Grenzwert anhand von Gl. 6-5.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \Delta B_n(h, z) = 0 \quad \text{Gl. 6-5}$$

Die Kurven für $\Delta x_n(h,z)$ zeigen nahe der Oberfläche nur sehr geringe Einflüsse der Höhe. Mit wachsendem Abstand von der Oberfläche zeigt sich ein immer stärker asymptotisches zunehmendes Verhalten.

Der Abstand der Extrema bei einer Höhe $h = 0$ ist entsprechend Gl. 6-6.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \Delta x_n(h, z) = 0 \quad \text{Gl. 6-6}$$

6.2.3 Vergleich und Diskussion mit dem Stand der Literatur

Für den Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur werden die selbst gefundenen Ergebnisse der Simulation bis hierhin zusammengefasst. Folgende Aussagen ergeben sich:

- $\Delta B_n(b,z)$ wächst mit steigender Breite bis zu einem Maximum
Maxima liegen bei $z = b$,
- $\Delta B_n(h,z)$ wächst linear mit der Höhe,
höchster Gradient nahe der Oberfläche
- $\Delta x_n(b,z)$ wächst annähernd linear mit steigender Breite,
linearer Zusammenhang verbessert sich mit wachsendem b und z
- $\Delta x_n(h,z)$ nahezu invariant für kleine z
asymptotisch wachsend mit der Höhe für große z

Diese Aussagen werden im Folgenden tabellarisch mit den vergleichbaren Literaturinformationen aus Tabelle 2-1, Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4 verglichen. Zur besseren Übersicht ist die Sortierung anhand der charakteristischen Werte auf 2 Tabellen aufgeteilt.

Tabelle 6-4: Vergleich Literaturaussagen zu Δx_n mit eigenen Ergebnissen

| Größe | Aussage | Quelle |
|--------------|---|--------------------|
| Δx_n | wächst mit b bei konstantem h linear $b \in [0,13..0,65]$ mm | numerisch [16] |
| Δx_n | wächst mit b linear | numerisch, [19] |

Die wenigen Aussagen zum Verhalten des Abstands der Maxima aus der Literatur stimmen mit den Ergebnissen überein. Es handelt sich dabei ausschließlich um numerische Ergebnisse, wobei keine Details zu den Simulationsmodellen oder den sonstigen Parametern bekannt sind. Die Bereiche der Parameter hinsichtlich Feldstärken und Annahmen zu geometrischen Abmessungen der Testfehler überdecken sich mit denen in dieser Arbeit.

Tabelle 6-5: Vergleich Literaturaussagen zu ΔB_n mit eigenen Ergebnissen

| Größe | Aussage | Quelle |
|------------------------------------|---|-------------------------------|
| $H_t / \Delta H_n$ | wächst mit steigendem h und b | [2] |
| ΔH_{ns} | wächst mit b bei konstantem h bis zu einem Maximum, fällt danach wieder ab; remanente Magnetisierung | Messungen [4] |
| ΔH_{ns} | wächst mit h bei konstantem b linear, aktives Feld | Messungen [4] |
| ΔH_{ns} | wächst mit h aktives Feld | numerisch, [19] |
| B_{streu} (ΔH_{ns}) | wächst degressiv mit b $b \in [0,1..2]$ mm statisches, aktives Feld | numerisch, Experiment [18] |
| ΔH_{ns} | wächst mit h bei konstantem b, nichtlinear bis zur Sättigung | analytisch [3] |
| ΔH_{ns} | wächst mit h bei konstantem b, nichtlinear bis zur Sättigung $h \in [1..3]$ mm | numerisch [16] |
| B_{streu} (ΔH_n) | wächst progressiv mit h $h \in [1..6]$ mm statisches, aktives Feld | numerisch, Experiment [18] |

Die Aussage der [2] ist im Bezug auf die Größen trivial und auch in den hier erzeugten Ergebnissen so wieder zu finden. In den Artikeln der Autoren sind die Aussagen nicht einheitlich. Dies zeigt sich auch im Vergleich mit den bisherigen Ergebnissen. Für die Messungen in [4] und [4] und die numerischen Ergebnisse aus [19] ist die Aussage mit den Ergebnissen aus der numerischen Untersuchung identisch. Die Abweichungen zu den numerischen und analytischen Ergebnissen von [3], [16] und [18] sind ohne genaue Kenntnis der Modelle und Randbedingungen als den wichtigen Größen einer numerischen Berechnung nicht zu interpretieren. Ein offensichtlicher Unterschied ist bei [18] und [16] die Parametrierung der Höhe und Breite. Durch den geringen Überdeckungsbereich mit dieser Arbeit lässt sich das Ergebnis nicht systematisch vergleichen. Bei [18] werden die numerischen Ergebnisse mit Messungen verglichen, so dass von einer konsistenten Abbildung der Bedingungen der Pipelineprüfung innerhalb der eigenen Experimente auszugehen ist. Dieser Anwendungsfall ist in Bezug auf die Ortsauflösung und verwendete Sensorik nicht mit dem in dieser Arbeit zu vergleichen. Anhand der eigenen Ergebnisse muss also die Konsistenz der numerischen Daten im Abgleich mit den Messungen erarbeitet werden.

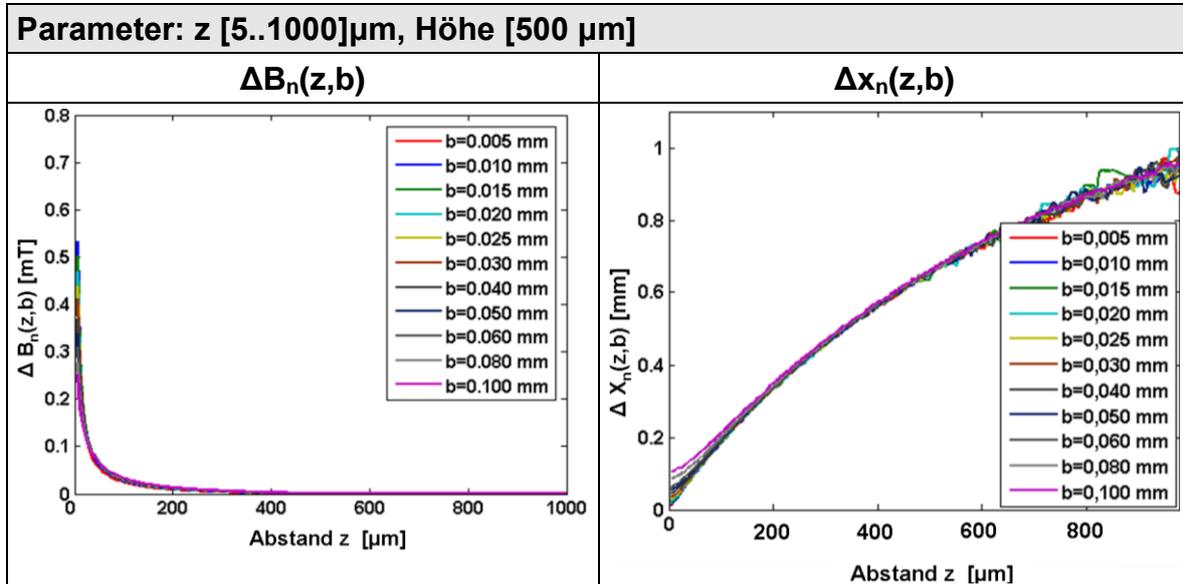
6.3 Untersuchung des Verhaltens in z-Richtung

Die Felder über der Oberfläche sind einfach zugänglich und daher von besonderem Interesse. In der Literatur ist keine systematische Betrachtung für die Normalkomponente in z-Richtung durchgeführt. Eine geschlossene Theorie des Zusammenhangs zu den geometrischen Größen der Nut existiert bislang nicht. Die numerischen Daten für diese Untersuchung entsprechen denen aus Abschnitt 6.2 und werden hier mit dem Abstand z als Variable ausgewertet. Wie schon bei der Betrachtung in Tabelle 6-2 werden auch hier die charakteristischen Werte und identischen Parameter verwendet, um die Vergleichbarkeit zu haben. Bedingt durch die Kapazität der Rechensoftware gibt es Grenzen für die zur Modellierung verwendete Netzfeinheit. Dies zeigt sich in den un stetigen Verläufen der Auswertungen für große z . Innerhalb der ersten 500 μm zeigen sich für diese Untersuchungen hinreichend kleine Abweichungen, so dass die Auswertung stellenweise auf diesen Bereich beschränkt wird.

6.3.1 Variation der Breite

Das Verhalten über der Oberfläche bei Variation der Breite wird bei einer konstanten Höhe von 500 μm untersucht. Die Kurvenverläufe, im Vergleich verschiedener Breiten, sind in der Tabelle 6-6 zusammengestellt.

Tabelle 6-6: Numerisch ermitteltes Verhalten von $\Delta B_n(z,b)$ und $\Delta X_n(z,b)$ für verschiedene b



Im Verlauf von $\Delta B_n(z,b)$ zeigt sich unabhängig von der Breite der Nut der bereits vom stromdurchflossenen Leiter bekannte asymptotisch fallende Zusammenhang nach Gl. 6-7

$$\Delta B_n(b, z) \sim \frac{1}{z} \quad \text{Gl. 6-7}$$

Die Werte von $\Delta x_n(z,b)$ nähern sich nach Gl. 6-8 für kleine Werte von z der Breite der Nut an.

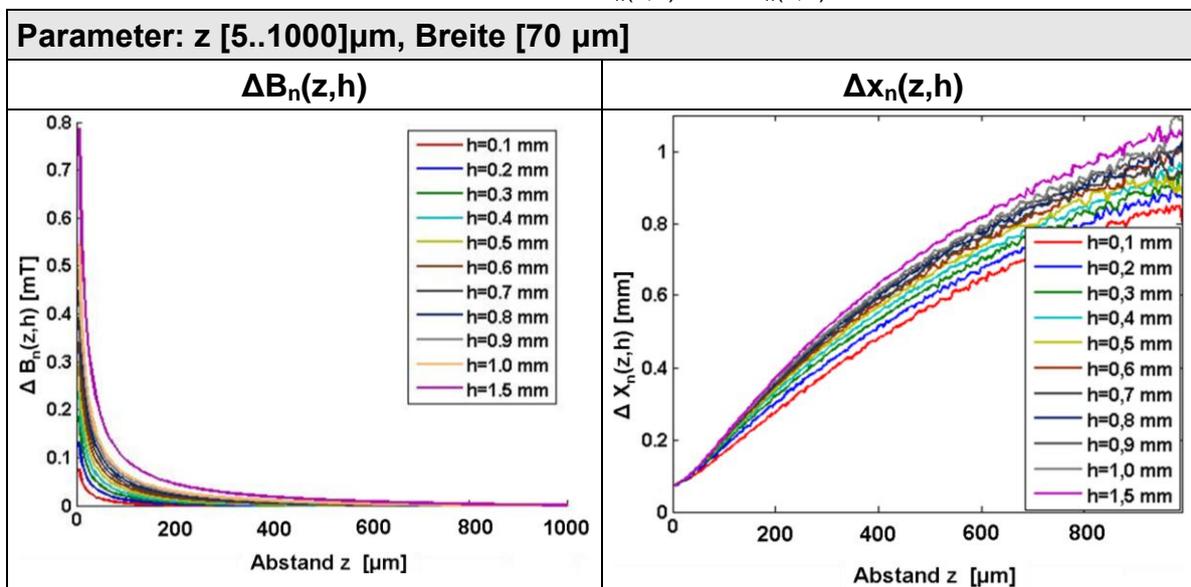
$$\lim_{z \rightarrow 0} \Delta x_n(z,b) = b \quad \text{Gl. 6-8}$$

So dicht an der Oberfläche einen Messwert zu erhalten, ist eine große Herausforderung an die Technik und den Sensoraufbau.

6.3.2 Variation der Höhe

Das Verhalten über der Oberfläche wird bei einer Breite von $70 \mu\text{m}$ untersucht. Die Kurvenverläufe, im Vergleich verschiedener Höhen, sind in der Tabelle 6-7 zusammengestellt.

Tabelle 6-7: Numerisch ermitteltes Verhalten von $\Delta B_n(z,h)$ und $\Delta x_n(z,h)$ für verschiedene h



Der asymptotische Zusammenhang nach Gl. 6-7 ist auch bei der Variation der Höhe zu erkennen. Der Absolutwert von $\Delta B_n(z,h)$ nimmt bei konstantem z mit steigender Höhe zu. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Tabelle 6-3. Der bereits gefundene Zusammenhang nach Gl. 6-8 zeigt sich auch in dieser Auswertung. Alle Kurven haben die gleiche Ordinate bei $(z=0, \Delta x_n(0,h) = 70 \mu\text{m})$.

6.3.3 Fazit zum Verhalten in z Richtung

Im Detail der einzelnen Kurven für die Variation von Höhe und Breite der Nut lassen sich in Abhängigkeit von z folgende Aussagen festhalten:

- $\Delta B_n(z,b)$ ist annähernd invariant gegenüber b
- $\Delta B_n(z,b)$ und $\Delta B_n(z,h)$ zeigen ein $\sim \frac{1}{z}$ Verhalten
- $\Delta x_n(z,b)$ geht gegen b für sehr kleine z und ist invariant zu b für große z
- $\Delta x_n(z,h)$ invariant für h bei sehr kleinen z

Durch den geringen Einfluss der Breite auf die Werte von $\Delta B_n(z,b)$ ist unter den hier gegebenen Umständen eine Zuordnung des Signals zur Tiefe des Risses möglich. Die Trennung der Einflüsse ist ausreichend groß und wird in den Messungen weiter untersucht.

Die Breite ist im Verhalten von Δx_n nur sehr nah an der Oberfläche zu finden. Grundsätzlich ist es notwendig, den Abstand zur Oberfläche zu minimieren, da die Signalamplitude überproportional mit dem Abstand zur Oberfläche abnimmt.

Aus den Erfahrungen des Verhaltens der Normalkomponente in Abhängigkeit von Breite, Höhe und Abstand zur Oberfläche wird nun die Untersuchung der Messungen angeschlossen.

6.4 Vergleich mit Messergebnissen

Die bisherigen Untersuchungen anhand numerischer Daten werden in diesem Abschnitt mit Messungen an Musterbauteilen verglichen. Ziel ist es, die Erfahrungen zu Feldern aus dem Sensormodell zusammenzuführen und mit realen Messwerten vergleichend zu untersuchen. Dazu werden aus dem numerischen Modell der Nut die Signale des Sensors für den Messaufbau berechnet und mit realitätsnahen Messungen an Nutgeometrien verglichen. Die Bauteile werden dabei aufmagnetisiert und die Signale des remanenten Feldes zur Messung herangezogen. Das Schema des Versuches zeigt Abbildung 6-4.

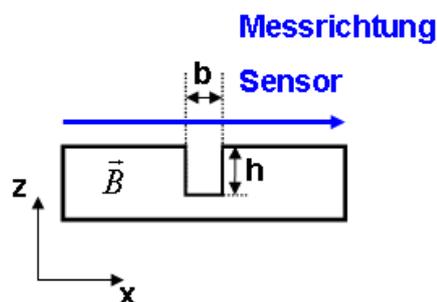


Abbildung 6-4: Schematischer Messaufbau

Zur Unterscheidung von den reinen Feld-Werten sind die Indizes wie in 2.1.1 entsprechend ΔH_{ns} und Δx_{ns} und die Einheit mV/V.

6.4.1 Referenzkörper und Modell

Die Musterkörper nach Tabelle 6-8 für die Messung sind im Erosionsverfahren bei der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) hergestellt worden. Sie bieten neben einem Prüfzertifikat mit Vermessungsprotokoll auch das geforderte geometrische Verhältnis und eine minimale Materialbeeinflussung. Die Rissbreite ist der begrenzende und gleichzeitig bedingende Faktor bei der Herstellung. Die Einstellung der Abmessungen ist also nicht disjunkt und durch die technische Machbarkeit begrenzt.

Tabelle 6-8: Musterkörper der BAM – Fertigungsgrößen

| Bezeichnung | x-Achse: Breite [mm] | z-Achse:Höhe [mm] | y-Achse: Länge [mm] |
|--------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| Breite – R1 | 0,057 | 0,533 | 15,00 |
| Breite – R2 | 0,084 | 0,525 | 15,00 |
| Breite – R3 | 0,121 | 0,510 | 15,00 |
| Tiefe – R1 | 0,068 | 0,270 | 15,00 |
| Tiefe – R2 | 0,070 | 0,499 | 15,00 |
| Tiefe – R3 | 0,075 | 0,968 | 15,00 |
| Rel. Permeabilität | $\mu_r = 800$ | | |
| Remanenz | $B_r = 1,1 \text{ T}$ | | |
| Material | Cf53 normalisiert | | |

Das numerische Modell bildet diese Musterkörper zur Untersuchung von Breiten- und Tiefenvariation als idealisierte 2D-Geometrie ab. Die numerischen Daten für diese Betrachtung werden mit realistischen Größen der Materialeigenschaften und an vergleichbaren Geometrien durchgeführt. Es wird angenommen, die eingebrachten Nuten sind unendlich in ihrer y-Achse. Die tatsächlichen Abmessungen und Parameter sind in der Tabelle 6-8 gegeben.

6.4.2 Untersuchung Sensorsignal berechnet und gemessen

Ein charakteristisches Streufeld mit dem zugehörigen Sensorsignal, berechnet aus den numerischen Daten zeigt die Abbildung 6-5. Der Nutmittelpunkt liegt im Nullpunkt der x-Achse. Das Feld- und Sensorsignal ist hierbei normiert. Es handelt sich um eine exemplarische Darstellung.

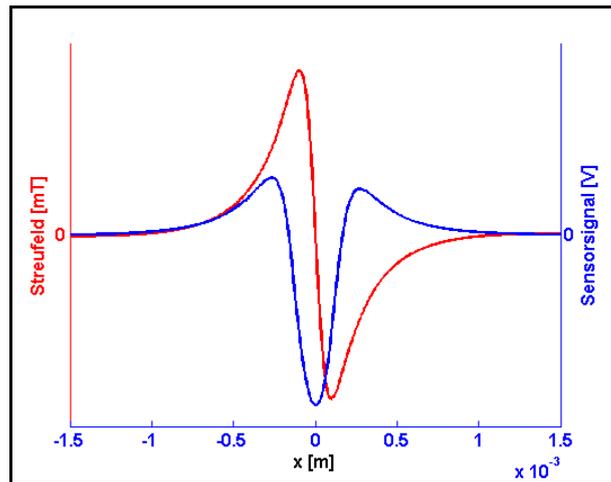


Abbildung 6-5: Magnetische Induktion und Sensorsignal an einer Nut, numerisch, schematisch

Die Symmetrieeigenschaften des Signals sind durch die Ähnlichkeit des Quellsignals zum stromdurchflossenen Leiter wie erwartet. Die Aussage über die Lage des Minimums und damit den Mittelpunkt der Nut ist in den numerischen Berechnungen wie auch den Messungen identisch. In den Messungen zeigt sich dies unabhängig von Breite und Höhe der Nut. Entscheidend für die Auswertung der Signale ist die genaue Kenntnis des Abstandes des Sensors zur Oberfläche. Dieser ist für den Messaufbau bereits in 5.3 mit minimal 175 μm bestimmt worden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Sensorsignale in Abbildung 6-6.

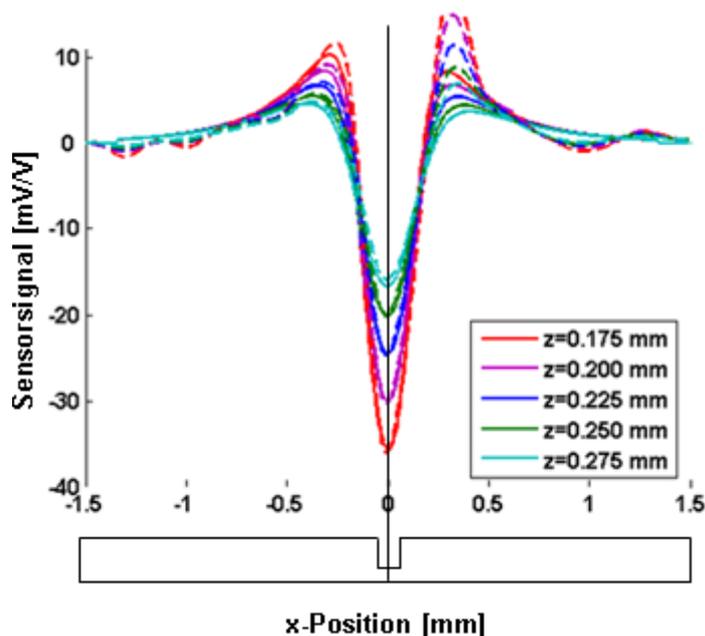


Abbildung 6-6: Vergleich Sensorsignal an einer Nut – numerisch (Solid) und gemessen (Strichpunkt)

Die asymmetrischen Abweichungen des Sensorsignals begründen sich in der Hysterese der Kennlinie und der Sensorführung. Der Sensor ist abhängig von der magnetischen Historie, die zweifelsohne durch den Verlauf der Messung vorhanden ist.

Kehrt man die Verfahrrichtung um, so zeigt sich ein spiegelverkehrtes Verhalten. Weitere Abweichungen sind in der Remanenzfeldstärke begründet. Mittels Variation in den numerischen Simulationen lassen sich dieser Einfluss und seine Auswirkung reproduzieren.

In Abbildung 6-7 bis Abbildung 6-9 sind die durchgeführten Untersuchungen im Vergleich von Messungen und den numerisch berechneten Signalen zusammengestellt. Die Unterteilung erfolgt anhand der Breite und der Höhe der betrachteten Nuten. Für die Simulation sind die Werte Tabelle 6-8 zugrunde gelegt.

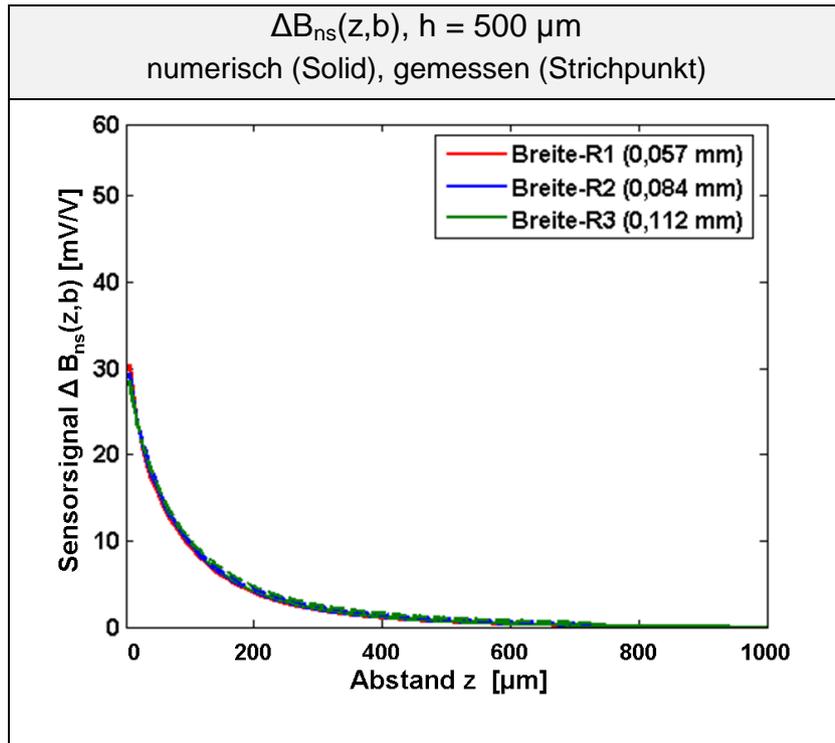


Abbildung 6-7: Variation der Breite – Vergleiche von Feldsignal und Sensorsignal in z-Richtung

Die gemessenen und berechneten Signale des Sensors liegen, wie in Abbildung 6-7 gezeigt, übereinander. Das Zusammenspiel der Modelle für Feld und Sensor zeigt sich wieder einmal als bestätigt für die hier betrachteten Grenzen. Die Abweichungen liegen unter 0,05 mV/V und damit an der Auflösungsgrenze nach Tabelle 3-2.

Die geringe Auswirkung der Breite auf das Feld ist bereits aus Abschnitt 6.3 bekannt und mit der Kenntnis des Sensors aus Abschnitt 4.3 erwartet. Die realen Breiten von Rissen liegen weit unter den hier als Muster betrachteten Nuten, so dass die Differenzierung der Breite aus den Sensorsignalen für den Realfall noch schwieriger wird.

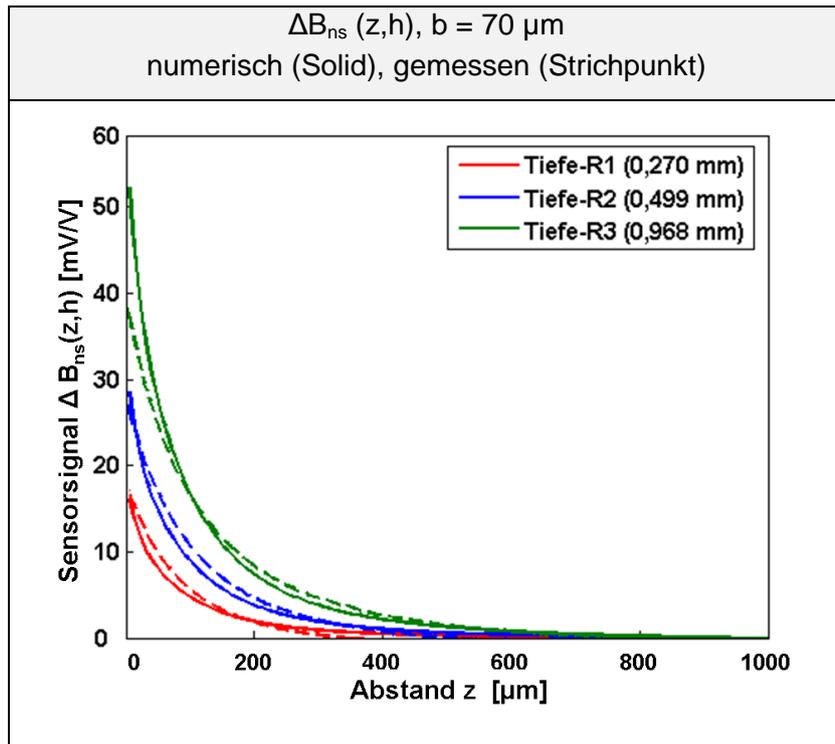


Abbildung 6-8: Variation der Höhe – Vergleiche von Feldsignal und Sensorsignal in z-Richtung

Der Einfluss der Tiefe im Vergleich mit dem der Breite bestätigt die Erfahrungen aus der Feldsimulation. Durch den geringen Einfluss der Breite lässt sich bei bekanntem Abstand z des Sensors eine Einschätzung der Tiefe ableiten. Da die Feldstärke, in diesem Fall die Remanenz, einen identischen Einfluss auf ΔB_{ns} hat, kann die Aussage nur vergleichend erfolgen. Bei entsprechend stabilen Zuständen der Remanenzfeldstärke ist es auch möglich, den Vergleich bauteilübergreifend auszuwerten.

Bei der Auswertung von Δx_{ns} sind bereits in den berechneten Signalen keine Signaltrennungen mehr zu beobachten. Die Kurven aus Abbildung 6-9 liegen im entscheidenden Bereich an der Oberfläche sehr eng beieinander.

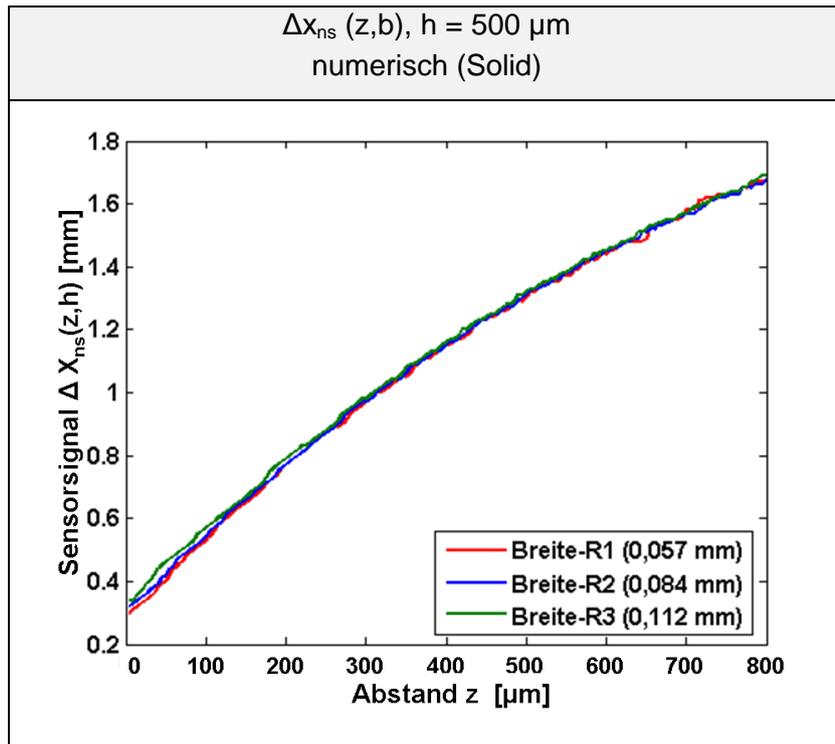


Abbildung 6-9: Variation der Höhe – berechnetes Sensorsignal in z-Richtung

In den Messungen zeigt sich dieses Verhalten in identischer Weise. Der Grund ist die x-Integration der Mäander des Sensors und damit der Verlust an örtlicher Auflösung. Numerisch lässt sich die Grenze für eine zum Quellsignal qualitativ vergleichbare Trennung der Signale ab $s_x \leq 2,5 \cdot b$ nachweisen. Dies ist mit dem verfügbaren Sensor nicht in einer Messung darstellbar.

Fazit:

Die numerisch berechneten Sensorsignale stimmen mit den Ergebnissen der Messungen im Bereich der verfügbaren Geometrien überein. Aus den Messungen kann eine sichere Aussage über die Position des Mittelpunktes der Nut erfolgen.

Das qualitative Verhalten von Δx_n bleibt auch in den Messungen erhalten. Die Grenzwertbildung führt allerdings zu konstanten Ergebnissen. Verantwortlich hierfür ist die Integration der Mäander des Sensors. Dies deckt sich mit den Erfahrungen von Münnich in Tabelle 2-2.

Durch den geringen Einfluss der Breite auf ΔB_{ns} lässt sich im Vergleich eine qualitative Aussage über die Höhe der Nut treffen. Hierfür muss der Abstand des Sensors von der Oberfläche hinreichend genau bestimmt sein.

6.5 Diskussion beliebiger Richtungsverhältnisse

Die bisherigen Untersuchungen setzen die Bewegung des Sensors wie auch die Remanenz im Bauteil in x-Richtung des Modells sowie die Lage der Risse exakt senkrecht hierzu voraus. Für die Prüfung von Bauteilen kann dies nie als allgemeingültig vorausgesetzt werden. Für die Falluntersuchung wird zwischen

- Streufeld als Resultat aus Rissrichtung gegenüber Remanenzfeldrichtung und
- Lage des Streufeldes und damit des Risses relativ zum Sensor

unterschieden. Für die Entstehung und Stärke des Streufeldes in Relation zu Feld- und Rissrichtung gibt es in der Literatur zur Magnetpulverprüfung, die auf identischen physikalischen Vorgängen beruht, Vorgaben, die übernommen werden können. Hier wird ein Winkel zwischen den beiden Feldrichtungen von $\geq 30^\circ$ gefordert. Gewährleistet wird dies durch zwei senkrecht aufeinander stehenden Magnetisierungen für die Prüfung.

Der „worst-case“ im Einsatz des Sensors ist, dass ein Streufeld vorhanden ist, der Sensor jedoch kein konstantes Signal liefert: Bedingung ist $M_1 = M_2$. Dieser Fall kann nur für einzelne Punkte und Fälle erfüllt sein, die keinen Bezug zur Realität haben.

- Bei der Bewegung des Sensors in x-Richtung und einer Nut als Quelle des Streufeldes, die parallel der x-Achse des Sensors liegt.
- Für die Bewegung des Sensors in y-Richtung ist mit einer hinreichend großen Nut in x-Richtung.

Mit diesen beiden Fällen ist die Bedingung erfüllt, über den gesamten Weg des Sensors ein Nullsignal zu bekommen. Beide Fälle sind real an einem Bauteil bei der Prüfung mittels entsprechend dimensioniertem Array nicht anzutreffen.

6.6 Testobjekt Schweißnaht

Anhand eines Realbauteils mit erzeugtem Härteriss wird die Anwendung der Sensoren im Labormaßstab mit den Ergebnissen der Musterbauteile verglichen. Die Probe ist ein mittels Lichtbogen lokal aufgeschmolzener und erstarrter C50. Die Oberfläche ist geschliffen, um jeden Einfluss auf das Messsignal durch Oberflächenstrukturen ausschließen zu können.

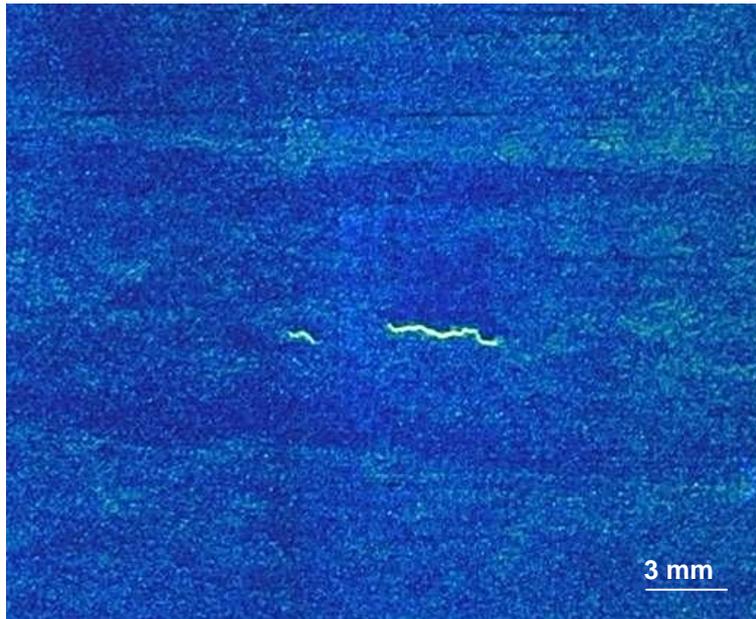


Abbildung 6-10: Magnetpulverprüfung der Schweißnahtprobe [VW1]

Die entstandenen Ungängen zeigen sich deutlich in der Prüfung mit Magnetpulver. Es handelt sich wie erwartet um Risse im Zentrum der Naht, die bei der Erstarrung des Materials entstehen. Der Bereich der Aufschmelzzone ist in dieser Abbildung ebenfalls zu erkennen. Der Messaufbau ist in Abbildung 6-11 schematisch dargestellt.

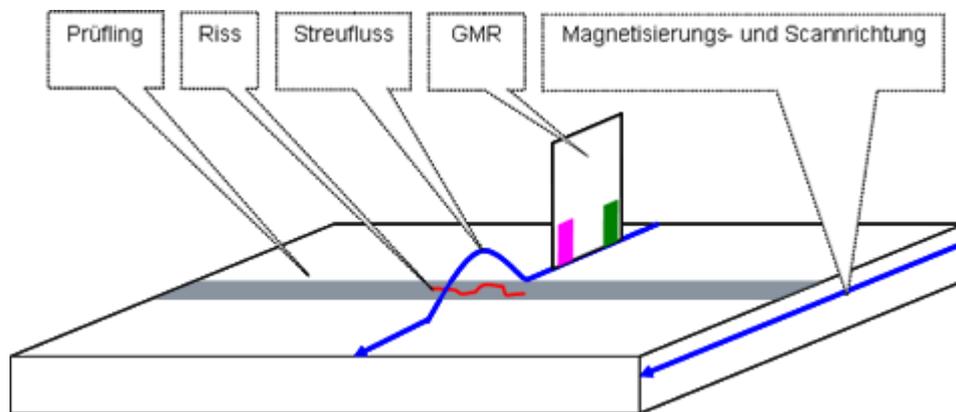


Abbildung 6-11: Messaufbau schematisch, Fall 1 [VW1]

Die folgende Abbildung 6-12 zeigt einen hochauflösenden Scan der Naht mit dem GMR-Sensor. Die Daten wurden hier so belassen, wie sie bei der Messung im Labor entstanden sind. Die Farbskala entspricht einer nichtlinearen Falschfarbendarstellung des Messsignals in Volt.

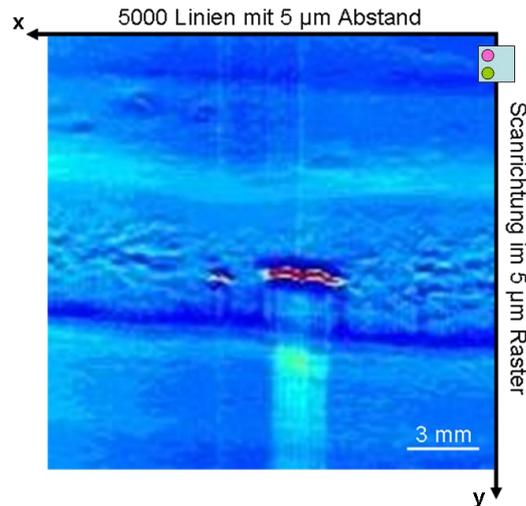
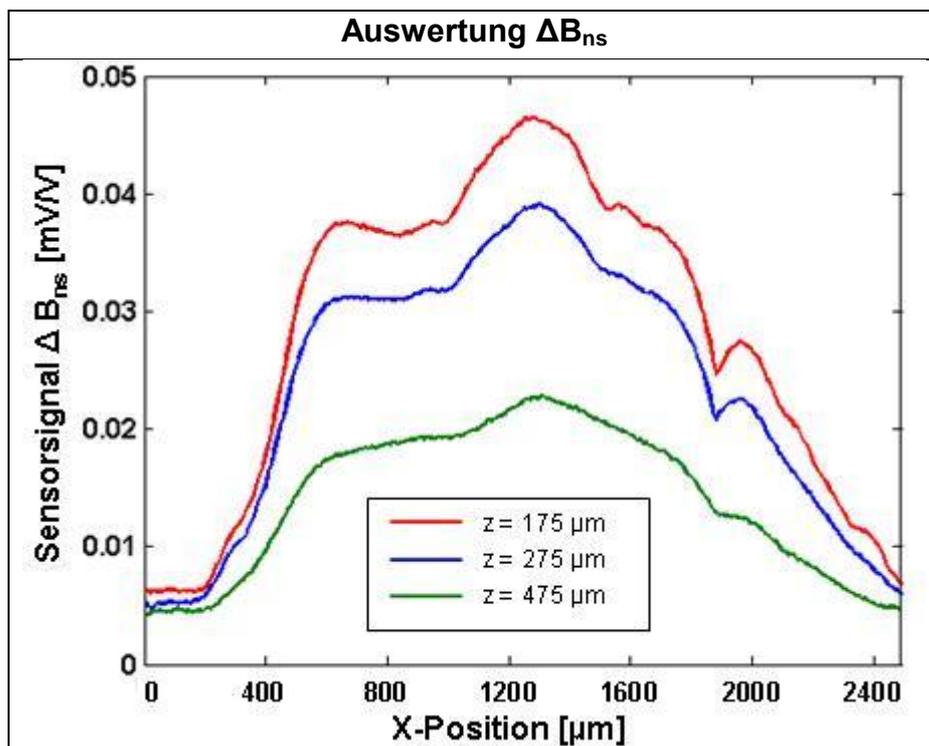


Abbildung 6-12: GMR-Scan der Schweißnaht, Fall 1 [VW2]

In dieser Auflösungsstufe, verbunden mit entsprechendem Zeitaufwand, kann man nicht nur die Risse deutlich erkennen, sondern auch die Dendritenstruktur der Aufschmelzzone sowie den Bereich der Wärmeeinflusszone.

In den Messsignalen Δx_{ns} ist keine Breitenänderung des Risses zu erkennen, wie nach den Ergebnissen aus Abschnitt 6.4 zu erwarten war. Die Untersuchung mittels Lichtmikroskop ergibt Schwankungen der Breite von 0,006 mm bis 0,032 mm. Diese Beobachtung deckt sich mit den Erfahrungen aus den numerischen Betrachtungen und Untersuchungen an den Nuten.

Die Auswertung des charakteristischen Wertes ΔB_{ns} ist in Abbildung 6-13 grafisch dargestellt.

Abbildung 6-13: ΔB_{ns} an der Schweißnaht für verschiedene z

Nach Abschnitt 6.4 ist ΔB_{ns} vorwiegend eine Funktion der Höhe. Die Breite spielt im Vergleich keine Rolle. Das Messergebnis wird mit dem Bauteilzustand verglichen. Mittels Zielpräparation in kleinstmöglichen Schritten von $50 \mu\text{m}$ ist der Tiefenverlauf bestimmt worden. Die Darstellung des Vergleichs der Messergebnisse Tiefenverlauf zu den Kurven von ΔB_{ns} für verschiedene Abstände z zeigt die Abbildung 6-14.

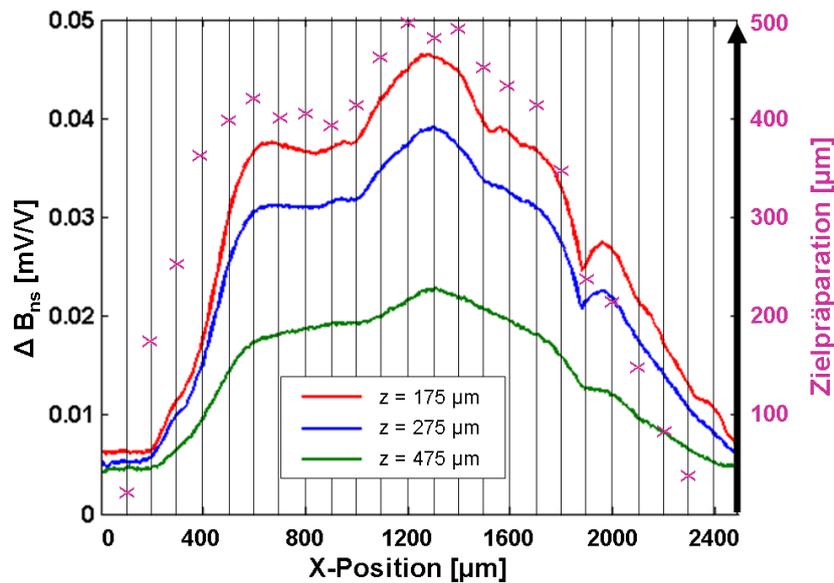


Abbildung 6-14: Vergleich Sensorsignal mit zerstörender Prüfung

Der Zusammenhang zwischen der Höhe des hier vermessenen Oberflächenrisses und dem Streusignal begrenzt sich auf die Auswertung der idealen Sensorführung. Dreht man den Sensor um 90° , entsprechend Fall 2 aus 6.5, ergibt sich wie erwartet ein ähnliches Bild nach Abbildung 6-15.

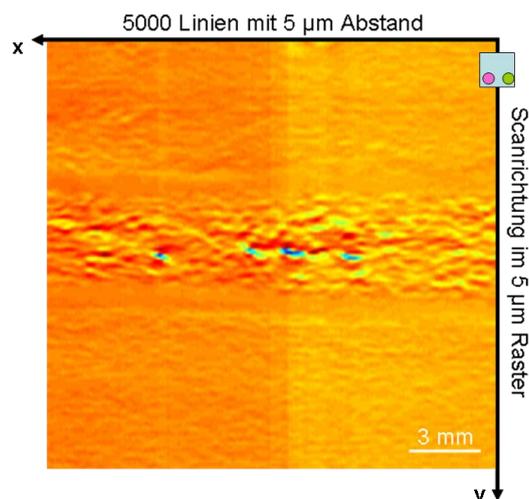


Abbildung 6-15: GMR-Scan der Schweißnaht, Fall 2

Auch hier sind Signale aufgrund des Risses und auch der Dendritenstruktur des Schweißgutgefüges zu erkennen. Die eindeutige Zuordnung geometrischer Eigenschaften wie der Länge fällt deutlich schwerer als im ersten Fall.

6.7 Fazit Streufeld an einer Nut

In den vorherigen Abschnitten wurden die charakteristischen Werte anhand von Modellen, Rechnungen und Messungen bestimmt, verglichen und die Ergebnisse diskutiert. Die Parameter waren dabei die geometrischen Größen der Nut, die Sensorführung und der Abstand zur Oberfläche. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus den Modellen mit den Messungen an Musterkörpern. Das Verhalten der Normalkomponente an einer Nut ist damit beschrieben und für die Modelle zur weiteren Verwendung verifiziert worden.

Das Verhalten in z-Richtung lässt unter idealen Bedingungen im Labor die Bestimmung des Nutmittelpunktes zu. Aus dem Verhalten von Δx_n kann die Breite der Nut ermittelt werden. In den Messungen verhindern die Abmessungen des Sensors eine genaue Auswertung. Beim Übergang zu realen Rissen, die sich in ihrer Breite wesentlich schmaler zeigen, ist diese Auswertung mit dem hier verwendeten Sensor nicht mehr möglich.

Aus dem Verhalten des charakteristischen Wertes ΔB_n lässt sich im Versuch am Musterkörper der Schweißnaht der Tiefenverlauf des dort untersuchten realen Risses im Rahmen der Messgenauigkeiten bestimmen. Dies deckt sich mit den Erfahrungen aus den numerischen Modellen.

Weicht man von den Idealbedingungen und hohen örtlichen Auflösungen ab, lassen sich die geometrischen Größen nicht mehr auswerten. Das Auffinden der Risse ist durch das hervorragende SNR, unabhängig von Sensorposition und Sondenführung bei der Messung, möglich. Für möglichst gute Ergebnisse ist es notwendig, den Abstand des Sensors zur Oberfläche zu minimieren, da die Signalamplitude überproportional mit dem Abstand zur Oberfläche abnimmt. Bei den hier vorhandenen Rahmenbedingungen ist ein Abstand von 300 μm das anzustrebende Maximum.

7 Untersuchung einer Anwendung

In den vorhergehenden Abschnitten wurden Grundlagen des Verhaltens der Normalkomponente magnetischer Felder über der Oberfläche und deren Zusammenhang mit geometrischen Eigenschaften der als Nut angenommenen rissartigen Fehlergeometrie erforscht. Die Ergebnisse von Modellen und Messungen an Realbauteilen im Labormaßstab zeigen einheitliche Ergebnisse bei der Auswertung der charakteristischen Werte. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse auf den Anwendungsfall der Lenkungs Zahnstange aus 3.4 übertragen. Ziel ist es, das Verhalten der Technik an einem Bauteil auf Basis der Streufeldmessung mit GMR-Sensoren zu ermitteln.

7.1 Prüftechnik – Spezifikation und Auswahl der Komponenten

Aus den Anforderungen der Prüfaufgabe und Kenntnis des Bauteils aus 3.4 können mit den Modellen die Bestandteile der Prüftechnik abgeleitet werden. Die hier erarbeitete Lösung stellt dabei nur eine Möglichkeit dar, die den Anforderungen genügt. Es lassen sich auf Basis der hier gezeigten Ergebnisse weitere Lösungswege erarbeiten.

Die Nähe der Modelle und daraus abgeleiteten Ergebnissen zum hier beschriebenen Anwendungsfall ermöglicht es, aus den Laboruntersuchungen des Streufeldes an einer Nut die Randbedingungen für den Prüfprozess festzulegen. Zur Übersichtlichkeit sind diese Ergebnisse in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Randbedingungen des Prüfprozesses – Zusammenfassung

| | |
|---|---|
| Physikalisches Phänomen: | Streufeld |
| Komponente: | Normalkomponente |
| Erzeugung: | magnetostatisch, Bauteilremanenz |
| Erwartete Streufeldstärke an der Oberfläche: | wenige mT (z < 50 µm) < 1 mT (z > 50 µm) |
| Erwartete Ausdehnung des Streufeldes an der Oberfläche in x, y: | > 250 µm bei z = 300 µm |
| Sensorprinzip: | GMR, Gradiometer |
| Messkette: | Magnetfeld – Widerstand – Spannung |
| Messgröße: | Brückenspannung [V] |

Die Sonden werden automatisch geführt. Dafür kommen Standardkomponenten zum Einsatz, auf die nicht näher eingegangen wird. Entscheidend für den Prüfprozess sind der Aufbau des Sensorarrays und die Einhaltung der Prämisse, einen Abstand in z-Richtung von weniger als 300 µm einzuhalten.

7.1.1 Sensorarray

Für das Sensorarray kommen die GMR-Sensoren „Typ 7“ von Sensitec zum Einsatz. Damit sind die Vorgabe für den Sensor mit seiner Baugröße und die geometrischen Randbedingungen des Bauteils bekannt. Die Anforderungen in Tabelle 7-2 sind aus den bisherigen Ergebnissen abgeleitet.

Tabelle 7-2: Anforderungen an den Sensor für Arrays

| Anforderung | Verhalten / Vorgabe / Restriktion |
|--------------------|---|
| Baugröße | Bauraum Verzahnung, Array Umkreis < kleinster Radius ~1,3 mm |
| Referenzierung | Bauteilvorgaben, Konstanten und Toleranzen berücksichtigen |
| Sensorposition | möglichst geringer Abstand zur Oberfläche des Prüflings, max 300 μm |
| Flächenabdeckung | Randabstand aktiver Flächen <0,25 mm |
| Streuung Kennlinie | Möglichst gering über Charge/Arraybestückung |

Die Sensoren erfüllen den Punkt des kleinsten Umkreises. Allerdings sind sie noch zu groß, um nebeneinander über das gesamte Zahnprofil die benötigte Flächenabdeckung gewährleisten zu können. Die Lösung liegt im Design der Platinen und deren Stacking zur Sonde. Durch die Anordnung in mehreren Ebenen wird die anforderungsgerechte Abdeckung erreicht. Jede Ebene ist dabei identisch im Layout, was die Variantenvielfalt auf zwei notwendige Platinenlayouts reduziert.

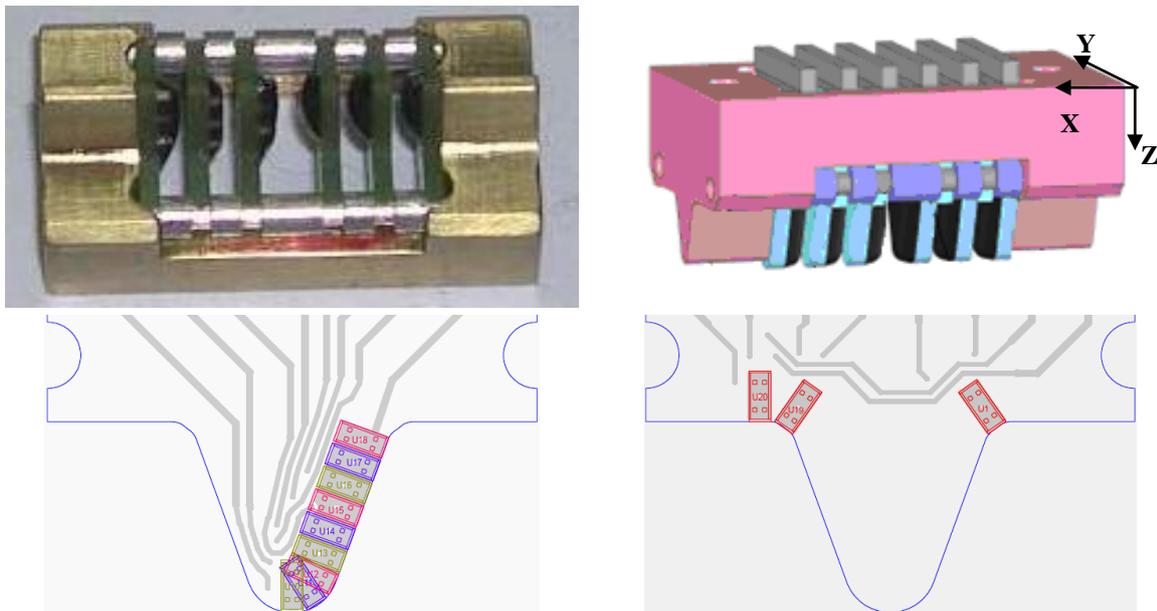


Abbildung 7-1: Platinenlayout und Stacking einer Zahneinheit, unvergossen [44]

Der Entwurf der Sensorstacks ist optimiert für die schleifende Führung im Zahngrund. Hier nicht abgebildet ist die dafür eingesetzte keramische Matrix als Ver-

gussmasse, wie sie in Abbildung 7-2 zu sehen ist. In der Trägerplatte werden die Stacks einzeln gelagert mit der Möglichkeit, in z-Richtung einen Versatz von bis zu 500 μm und eine Rotation um Y von $\pm 2^\circ$ auszugleichen. Damit ist die gesamte Toleranzbreite des Bauteils abgedeckt. Die Vergussmasse schützt die Sensoren bei der Bewegung durch das Bauteil und vermindert die Reibung. Mögliche elektrostatische Aufladungen werden über die Messingmatrizen abgeleitet.



Abbildung 7-2: Trägerplatte unbestückt

Durch den Platzbedarf der einzelnen Sonden in der Trägerplatte müssen die Positionsinformationen je Sensor vermessen und für die genau Kenntnis der später benutzten Ortsinformation korrigiert werden. Aus den Erfahrungen über das Signal am stromdurchflossenen Leiter werden für jeden Sensor sein Offset der Position und der Abstand zur Oberfläche in mehrfach wiederholten Messungen bestimmt und in der Software hinterlegt. Die Messdaten liegen damit positionskorrigiert vor und können dem Bewertungsalgorithmus zugeführt werden. Bei der Auslegung auf 30 Zähne und insgesamt 20 Sensoren je Zahn sind diese 600 Messkanäle die letzte notwendige Vorgabe für die Messtechnik des folgenden Abschnitts.

7.1.2 Messtechnik

Durch die zu erwartende Anzahl von Kanälen des Messsystems ist eine Hardware erforderlich, die zusätzlich zur Aufzeichnung den Anforderungen an Auflösung und Datenstruktur genügt und gleichzeitig die anfallenden Datenmengen sicher verarbeiten kann. Der Einsatz von Standardprodukten erlaubt eine schnelle Reaktionszeit bei Defekten durch den Hersteller und die Kompatibilität mit verschiedener Software für Steuerung und Datenakquise.

Tabelle 7-3: Anforderungen an die Leistung der Messtechnik

| Anforderung | Verhalten / Vorgabe / Restriktion | Quelle |
|-------------|-----------------------------------|-----------------|
| Auflösung | < 0,1 mV @ ± 1 V (> 14 bit) | 5.3.2 |
| Datenrate | > 5 kHz | 3.4.2 mit 3.4.3 |
| Kanalanzahl | > 600 | 7.1.1 |
| Messzeit | Teil der Taktzeit | 3.4.3 |

Zum Einsatz kommt ein System aus Komponenten der Firma National Instruments. Die Kaskade besteht aus einer Mehrzahl an identischen Messkarten die den Anforderungen genügen. Die eingesetzten Multiplexer realisieren die Abtastung in hinreichend kleiner Zeit, so dass ein Versatz durch den zeitlichen Abstand der Messdaten zu vernachlässigen ist. Die Software für die Messtechnik ist, wie schon im Laboraufbau, LabView. Die geforderten Möglichkeiten der Aufzeichnung, Speicherung und Bearbeitung der Messdaten sind gegeben. Die Software ist für die Implementierung und Anwendung von Auswertungsalgorithmen und Filtern geeignet. Die Entwicklungen lassen sich später direkt in DSP programmieren und ermöglichen damit den Übergang von dem Reihenversuch direkt zu einer serientauglichen Lösung. Die Echtzeitfähigkeit der DSP liefert einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung der Messzeit. Die Entwicklung des Algorithmus kann nur mit Kenntnis der Umgebungseinflüsse und Leistungsgrenze erfolgen.

7.1.3 Automatisierung

Für die Abtastung mittels der Sensorarrays ist eine Bewegungsachse ausreichend. Zwecks Positionierung und Handling sind weitere Bewegungseinheiten notwendig, die keinen Einfluss auf den Prüfprozess haben. Die Anlagenteile im direkten Umfeld der Sensoren sind aus nicht ferromagnetischen Materialien gefertigt, um die Beeinflussung der Messung gering zu halten. Hier gezeigt als Ausschnitt ist der Träger der Sensorarrays und die darin eingebundene Mechanik zum Nachführen der Sonden in z-Richtung. Die Automatisierungstechnik stellt keine besonderen Herausforderungen dar und kann mit Standardkomponenten gelöst werden.

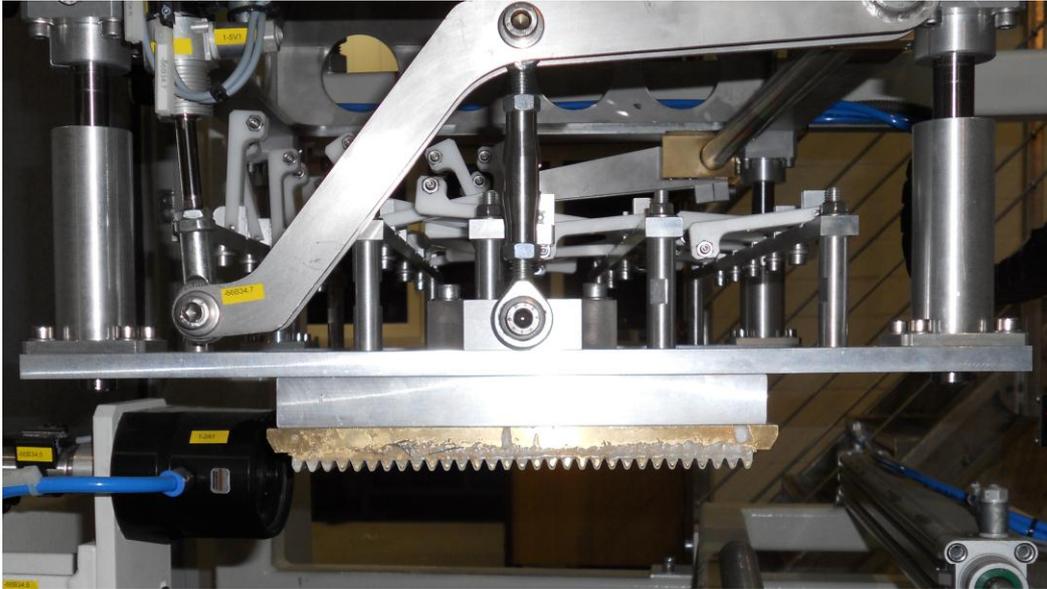


Abbildung 7-3: Ausschnitt Demonstrator - Arrayträger mit Sondenführung

Der Aufbau umfasst alle notwendigen Komponenten, um die zuvor remanent magnetisierten Bauteile automatisiert zu prüfen. So lässt sich ein Bedienereinfluss auf das Prüfergebnis ausschließen. Für die Prüfprozesseignung sind damit alle notwendigen Informationen bekannt. Das Vorgehen wird im folgenden Abschnitt erarbeitet und diskutiert.

7.2 Einflussgrößenanalyse

Die Einflussgrößen auf das Messsignal sind über die gesamte Messkette zu identifizieren. Die hier angewendete Systematik zeigt die möglichen Einflüsse in der Matrix aus den Zuordnungen der physikalischen Grundprinzipien und den beteiligten Komponenten der Messkette.

Tabelle 7-4: Einflussgrößenanalyse

| | Umgebung | Bauteil | Anlage | Sensor |
|------------|---|---|--|--|
| elektrisch | Netzrauschen - Schienenverkehr - Eigenrauschen Anlagen Hallenverkehr | elektrostatische Aufladung | Messtechnik - Aufzeichnungsgeschwindigkeit - Filterung - Auflösung - Eigenrauschen Induktion durch Bauteile | Kennlinie Versorgungsspannung - Restwelligkeit - Absolutstärke EMV-Schutz |
| magnetisch | Magnetisierungsanlage Suszeptibilitätsänderungen - Hallenverkehr / Lieferverkehr - Bauteilbewegungen - Anlagen in der Halle | Gefügegradienten Remanenzfeldstärke inhomogene Sättigung Relaxationsvorgänge | Ferromagnetische Bauteile Induktion in Bauteilen Magnetfelder von elektrischen Komponenten | Eigeninduktion Barkhausenrauschen Einflüsse durch Stacking |
| mechanisch | Vibrationen - Pressenstrasse - Güterverkehr - Anlagen, Hallenverkehr - Gebäudeanlagen | Geometrie - Torsion - Biegung - Maßhaltigkeit - Oberfläche | Eigenschwingungen Toleranzen Einspannung, Lagerung des Prüflings Positionierung und Bewegung | Verbindungselemente - Bondstellen - Die-Verbindung zur Platine abrasive Einflüsse durch Führung Beschleunigungen durch Bewegung |
| thermisch | Temperaturschwankungen - Tag/Nacht - Sommer/Winter | Bauteiltemperatur - Kennwertabhängigkeit - Ausdehnung | Temperaturdehnungen - Einspannung - Sensorarray | Kennliniendrift Stabilität über Lebensdauer |
| chemisch | Staub Niederschläge aus Anlagen | | | chemischer Abtrag von Substrat Materialveränderungen durch Reaktionen |

Die in Tabelle 7-4 grün hinterlegten Punkte wurden bereits in den vorherigen Abschnitten behandelt und deren Einfluss ist hinreichend klein. Die Schwerpunkte der weiteren Analysen liegen in den orange markierten Bereichen mit vielfältigen Rauschphänomenen. Die Auswirkung auf das Messsignal nur als Summe zu betrachten, ist nicht zielführend. Die Maßnahmen müssen für jedes Phänomen entwickelt und bewertet werden. Eine Trennung erfolgt daher anhand der physikalischen Phänomene.

7.2.1 Temperatur

Die Temperatur am Arbeitsplatz ist in der Arbeitsstättenordnung als Richtlinie mit einer unteren Grenze von 17°C und einer oberen Grenze von 26°C festgelegt. In Vorschriften zu elektronischen Bauteilen finden sich verschiedene Limitierungen mit weit höheren Grenzen. Auch wenn im Betrieb dieser Anlage nicht mit Temperaturen dieser Größenordnung zu rechnen ist, wird für die Untersuchung die Funktionsgrenze der Messtechnik von [0°C .. 80°C] angenommen. Das Ergebnis der gesamten Sensorführungsbaugruppe inklusive des Kabelbaums im Vergleich mit dem Soll- und Ist-Profil der Temperaturwechselprüfung stellt Abbildung 7-4 dar.

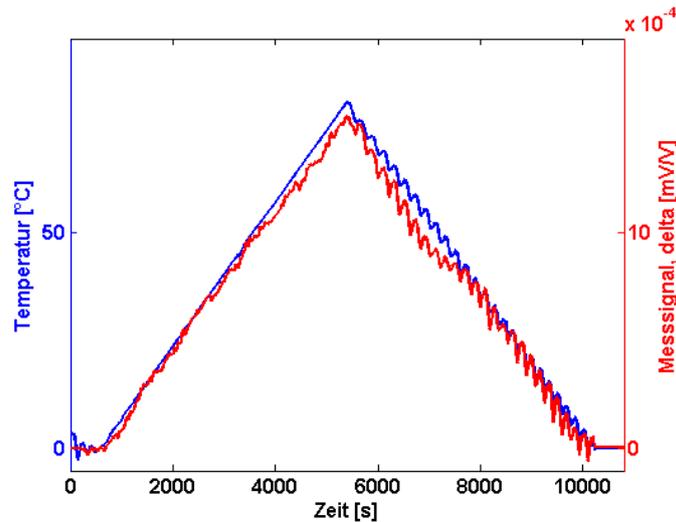


Abbildung 7-4: 1 Zyklus Temperaturwechseltest und Sensorwerte

Die beiden Kurven sind qualitativ identisch, in guter Annäherung linear im Zusammenhang zwischen Temperatur und Ausgangssignal, hier bedingt durch die nicht kompensierende 2-Leiter-Messung des Kabelbaums. Weitere Einflüsse durch elektrische und magnetische Störungen werden im Weiteren gesondert behandelt.

Die thermisch bedingte Alterung in diesem Temperaturbereich nach 1000 Zyklen ist nicht messbar. Erst bei erhöhter Temperaturdifferenz und 5000 Zyklen lässt sich eine messbare irreversible Veränderung der Brückenwiderstände am Sensor feststellen. Im Mittel beträgt die Änderung 0,67 % im Vergleich zum Widerstand beim Beginn. Grund hierfür sind thermisch beschleunigte Migrationsvorgänge an den Leiterbahnübergängen in der GMR-Struktur.

7.2.2 Analyse elektrischen und magnetischen Rauschens

Die dritte Maxwellgleichung identifiziert die Wirbel des elektrischen Feldes als abhängig von der zeitlichen Änderung der magnetischen Induktion. Gleichzeitig sind nach der vierten Maxwellgleichung die Wirbel des Magnetfeldes abhängig von der elektrischen Flussdichte. Die Verknüpfung zeitlich veränderlicher, magnetischer und elektrischer Phänomene ist damit offensichtlich. Die Trennung der Auswirkungen der beiden Phänomene ist nicht trivial. Es handelt sich um vektorielle Größen, die nur bedingt isotrope Eigenschaften haben. Die Analyse erfolgt daher anhand von Messungen mit der Anlage und bildet die Grundlage für die Entwicklung der Signalaufbereitung.

Die Messdaten wurden in die Frequenzanteile zerlegt und für zwei ausgewählte Sensoren in der Abbildung 7-5 dargestellt.

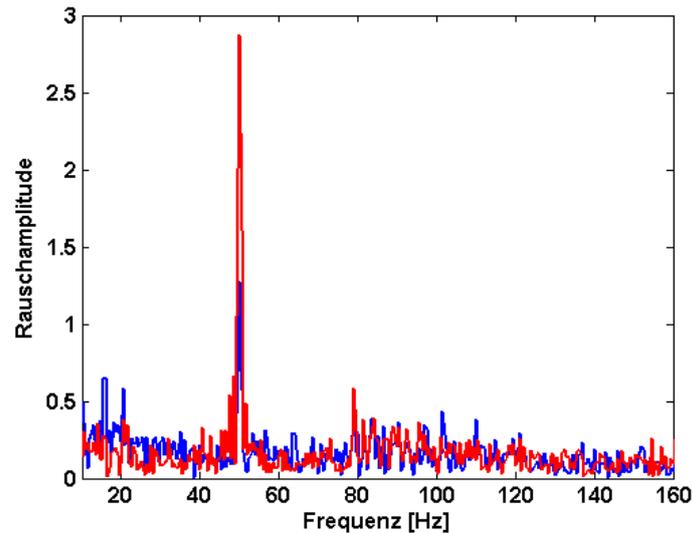


Abbildung 7-5: Rauschspektrum ausgewählter Sensoren

Das Frequenzspektrum zeigt die erwarteten Abweichungen zwischen den einzelnen Sensoren aufgrund der unterschiedlichen Raumausrichtung. Der erwartete Peak bei 50 Hz (Netzfrequenz) mit der höchsten Rauschamplitude findet sich in allen Signalen wieder. Weitere Auffälligkeiten mit geringen Amplituden sind zwischen 80...100 Hz (bspw. Monitore) zu finden und in der blauen Kurve auch bei 16.6 Hz (Bahnverkehr). Dieses Ergebnis fließt in der Signalauswertung entsprechend ein. Dort sind vor allem niederfrequente Störungen auszufiltern, die im Erwartungsbereich des Messergebnisses liegen.

7.2.3 Vorgehen zur Signalauswertung

Der Informationsgehalt von Messdaten lässt sich durch die Anwendung von mathematischen Operationen nicht erhöhen, nur die Erkennung gesuchter Muster kann vereinfacht werden. [53]

Ziel ist die sichere Identifizierung von fehlerrelevanten Signalen ab der technischen Machbarkeit. Für diese Arbeit wird von einer sicheren Erkennbarkeit ab einem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, Signal to Noise Ratio) von 1:3, analog der Wirbelstromtechnik, ausgegangen.

Dieses Verhältnis ist immer relativ zum Absolutwert des jeweils auftretenden Rauschens. Ein erster Schritt ist die Unterdrückung von Rauschen im interessierenden Bereich im Frequenzraum mittels Filter. Aus 7.2.2 ist das Rauschfrequenzspektrum bekannt, auf dessen Grundlage ein Tiefpassfilter ausgelegt wird. Aus der Struktur der Prüfsonde, der Funktionsweise des Sensors als Gradiometer und der Anordnung innerhalb der Sonde lassen sich weitere Auswertungsoperationen entwickeln. Zur Illustration ist der Messaufbau schematisch mit folgendem Modell in den Koordinaten aus Abbildung 7-6 beschrieben

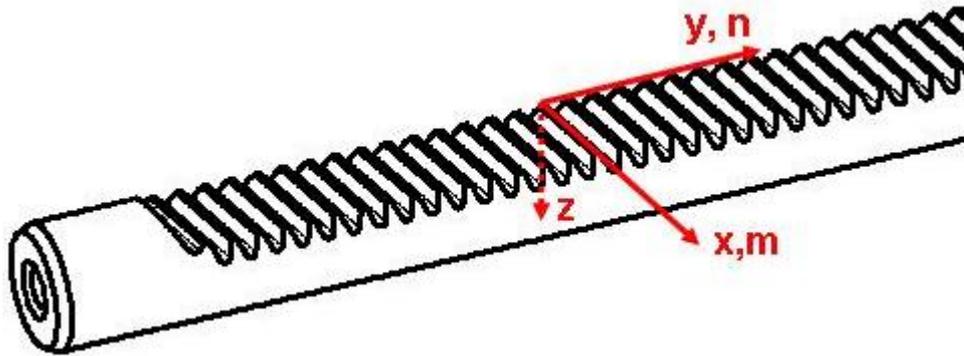


Abbildung 7-6: Koordinaten am Bauteil

Die Anzahl n der Zähne mit $i = 1..20$ Sensoren S_i je Zahn und die Anzahl m der Messpunkte je S_i in x -Richtung beschreiben die drei Freiheitsgrade der Messergebnisse. Hinzu kommt der durch den Sensor immer in Richtung der Oberfläche gebildete Gradient. Es steht also ein Ergebnisraum von $i \times n \times m$ Punkten zur Verfügung. Die Bewegung beim Scannen erfolgt entlang der x -Achse, der Sensor wird nach Abbildung 7-7 geführt.

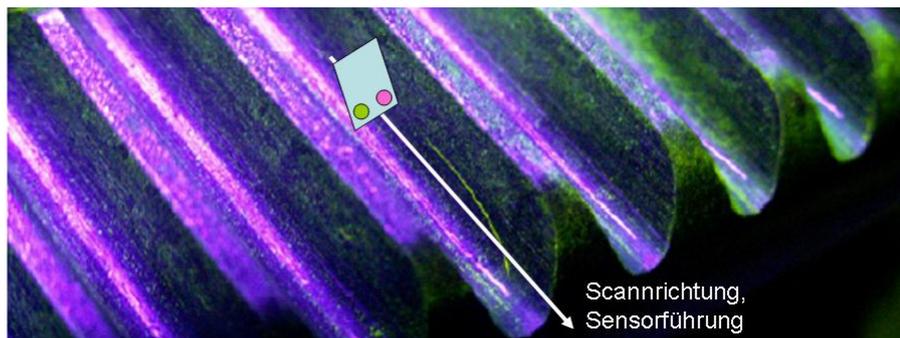


Abbildung 7-7: Schematische Sensorposition am Bauteil

Die Positionskurven lassen sich einfach unter Kenntnis einer Messung am stromdurchflossenen Leiter als Erwartungsbereich für jedes $S_i(n,m)$ mit den Ergebnissen aus 5.3 korrigieren. Im idealen Zustand gelten dann Gl. 7-1 und Gl. 7-2 zur Beschreibung an der Oberfläche.

$$\frac{\partial S_i(n,m)}{\partial n} = 0 \quad \text{Gl. 7-1}$$

$$\frac{\partial S_i(n,m)}{\partial m} = 0 \quad \text{Gl. 7-2}$$

Durch die Sensorführung und die technisch nie einheitliche Magnetisierung an den Rändern des Prüflings bleibt diese Betrachtung nur theoretisch. Erst die Einbeziehung von Erwartungswerten aufgrund genauer Kenntnis der Positionskurven jedes

S_i am Bauteil kann eine Auswertung erfolgen. Zusammenfassend gibt Abbildung 7-8 die schematische Struktur des hierzu entwickelten Algorithmus wieder.

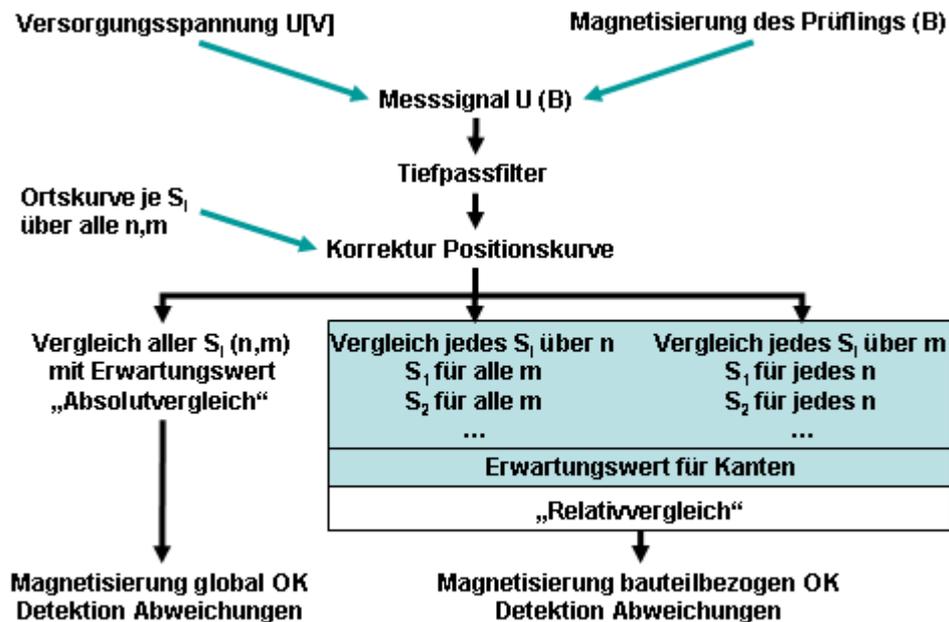


Abbildung 7-8: Auswertungsverfahren, schematisch

Die lokalen Abweichungen aufgrund von Oberflächenfehlern führen zu Signalen, die den erlaubten Bereich der Erwartung verlassen. Die einfachste Methode der Auswertung ist, die Erwartung als Schwellwert oder Hüllkurve je Freiheitsgrad festzulegen. Durch die Einbeziehung relativer Werte je Bauteil und globaler Erwartungswerte aus der Qualifizierung lassen sich Prozessschwankungen beispielsweise der Magnetisierung erkennen und die Ausschussquote im Sinne einer Falschbewertung eines intakten Bauteils als fehlerhaft reduzieren. Zusätzlich ergeben sich durch die messtechnisch erfassbaren Gradienten und die rechnerisch in der Auswertung ermittelten Gradienten Möglichkeiten, die Ungenzen der Signale zu klassifizieren.

7.3 Leistungsgrenzen der Anwendung

In den vorherigen Abschnitten wurden die Komponenten der zur Untersuchung aufgebauten Prüftechnik anhand der bisherigen Ergebnisse spezifiziert und das Schema der Signalauswertung entwickelt. Mit dem so entstandenen Prüfaufbau wird die Leistungsfähigkeit im Umfeld des Einsatzes in der industriellen Serienfertigung und speziell deren Einflüsse auf die Sensoren und damit das Messergebnis untersucht. Im Vergleich der Ergebnisse am Realfall werden die Forschungsergebnisse an der Nut als Referenzfehler abgeglichen. Das Vorgehen orientiert sich an Abschnitt 3.7 und bedient sich der Messsystemanalyse.

7.3.1 Rauschen als Grenze der Erkennbarkeit

Für die Messsystemanalyse muss zunächst der Referenzwert a_0 der minimal erkennbaren Signalanomalie bestimmt werden. Die Leistungsfähigkeit ist dann gegeben durch die davon abweichende, kleinste sicher zu detektierende Signalanomalie des gesamten Systems unter Einsatzbedingungen.

Die Oberflächenstruktur des Bauteils hat mit der Zeichnungsbeschränkung für seine Beschaffenheit einen nicht eindeutig zu ermittelnden Einfluss. Im Messsignal schlägt sich die Struktur genauso wie lokale Magnetisierungsschwankungen als Rauschen nieder. Dieser Einfluss zusammen mit der Abstandsänderung in z-Richtung sind die Hauptgrößen für die Rauschamplitude. Getrennt stellt die Abbildung 7-9 das Rauschen einiger Messungen mit und ohne Bauteil dar.

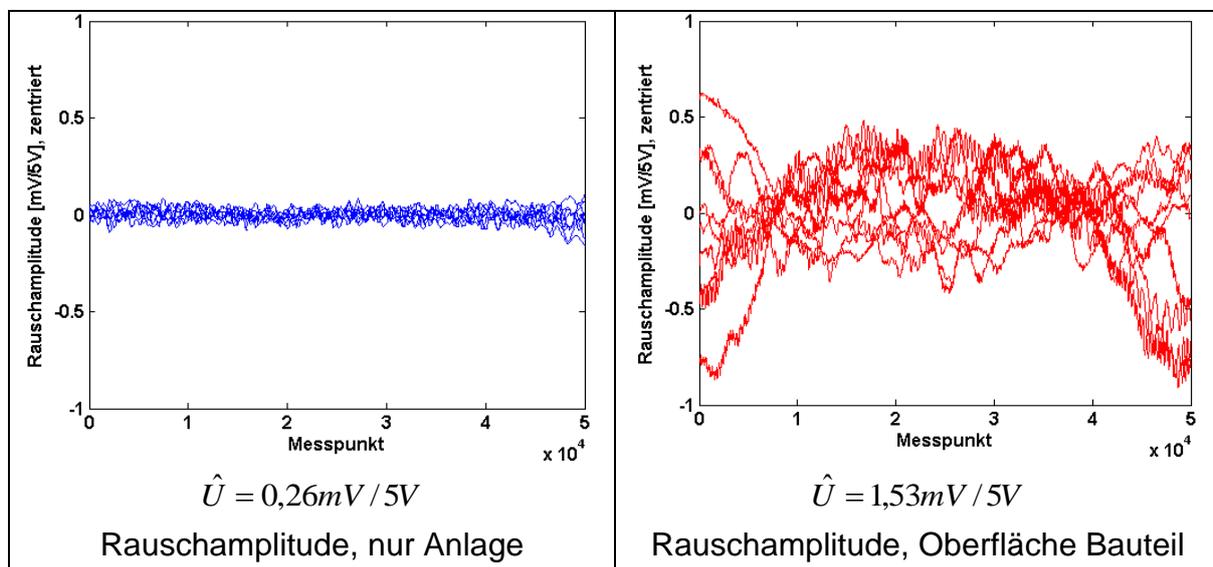


Abbildung 7-9: Rauschamplituden mit und ohne Bauteil

Die exemplarische Darstellung einiger Rauschwertkurven mit dem zugehörigen, maximal aufgetretenen Störungswert zeigt die eindeutig überwiegende Einflussmenge aus Bauteil, seiner Oberfläche und der lokalen Magnetisierungsschwankung. Die Bewertung in Tabelle 7-4 ist demnach weiterhin gültig und der hier ermittelte Wert kann für das weitere Vorgehen übernommen werden.

Technisch ist der Zusammenhang zwischen dem kleinsten differenzierbaren Wert unter Einsatzbedingungen und dem damit korrelierenden kleinsten sicher erkennbaren Signal eines möglichen Fehlers entscheidend. Für das weitere Vorgehen wird von einer sicheren Erkennbarkeit ab einem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, Signal-to-Noise-Ratio) von 1:3 ausgegangen. Die zugrundeliegende Ungänge ist dabei zunächst unerheblich. Hieraus ergibt sich für den betrachteten schlechtesten Fall $a_0 = 0,91 \text{ mV} / \text{V}$. Oberhalb dieser Signalschwelle erkennt das Verfahren die Abweichung.

7.3.2 Messsystemeignung

In diesem Schritt wird das Verfahren als metrisches Verfahren betrachtet und die Messsystemeignung, in Anlehnung an dem in [49] gegebenen und in der Automobilindustrie etablierten „Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen“, nachgewiesen. Hierbei ist die Quelle des Signals unerheblich und nicht zwingend in einer Ungänge begründet. Die Aussage muss daher an eindeutigen Musterteilen getroffen werden. Für den Umgang mit metrischen Verfahren und deren Validierung sind verschiedene Vorgehen bekannt. In der vollautomatisierten Anwendung ohne Bedienerinfluss wird die Bewertung nach Verfahren 1: „Systematische Messabweichung und Wiederholpräzision“ durchgeführt. [49]

Das Modell des stromdurchflossenen Leiters dient als Rückführung auf SI-Einheiten und bekannte Erwartungswerte für die Messungen. Bewertet wird anhand einer gesamten Messkurve die Abweichung jedes Punktes über alle Messungen. Die zulässige Toleranz ergibt sich aus Abschnitt 7.3.1. Durch die Vielzahl an Messpositionen ergibt sich entsprechend ihrer Anzahl i auch ebenso viele \bar{x}_i , die in die Auswertung mit eingehen. Genau genommen ist die Toleranzuntersuchung verknüpft mit der Ortstoleranz, welche als hinreichend klein ermittelt wurde und damit vernachlässigt wird. Eine Auswertung des Versuches nach „Verfahren 1“ liefert die nachstehende Tabelle.

Tabelle 7-5: Messsystemuntersuchung Verfahren 1, stromdurchflossener Leiter

| | | | | |
|----------------------------|------------------------------|-------------|------|--------|
| Auflösung (5% Regel) | [mV] | 0,0031 | < | 0,0078 |
| Messungen | n= | 2500 | | |
| Referenzwert (a_0) | x_m = | 0,91 | mV/V | |
| Toleranz der Referenz | T= | 0,156 | mV/V | |
| Mittelwert | x_g = | 0,9104 | mV/V | |
| Standardabweichung | s_g = | 0,005 | mV/V | |
| Abweichung x_g von x_m | B_i = | 0,0004 | | |
| | $C_{gk} =$ | 1,52 | > | 1,33 |
| | $C_g =$ | 1,56 | > | 1,33 |

Die Messsystemfähigkeit an der Grenze a_0 mit der Toleranz für den stromdurchflossenen Leiter ist nachgewiesen. Zu beachten bleibt noch, dass es sich um den Sonderfall eines einseitig begrenzten Merkmals handelt. Der Vertrauensbereich ist damit für a_0 mit der Verschiebung um $T/2$ zu größeren a hin zu wählen, wie in Abbildung 7-10 skizziert.

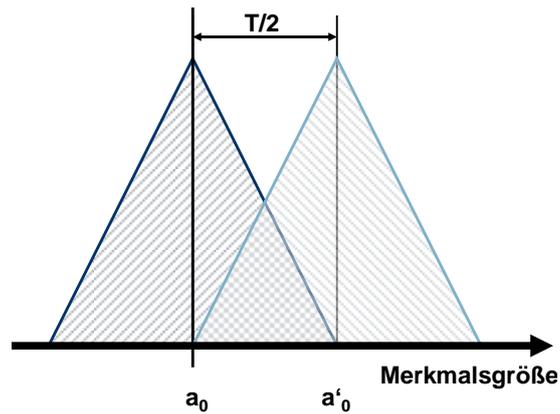


Abbildung 7-10: Vertrauensbereich, einseitiges Merkmal

7.3.3 Untersuchung am Realbauteil

Aufgrund der gezeigten Übereinstimmungen in den Modellen sind die bisher gemachten Aussagen für die Anwendung auf Bauteile mit angepassten Werten für die Toleranzbereiche jeder Auswertung nach Abbildung 7-8 gültig. Exemplarisch zeigt dies die Betrachtung eines ortskorrigierten Messsignals mit zwei Elementen der entwickelten Auswertung nach Abbildung 7-8 in der nachfolgenden Tabelle 7-6. Der exemplarisch verwendete Fehler ist ein Härteriss auf der Zahnflanke aufgrund einer fehlerhaften Wärmebehandlung analog den Prozessanalysen nach Tabelle 3-1.

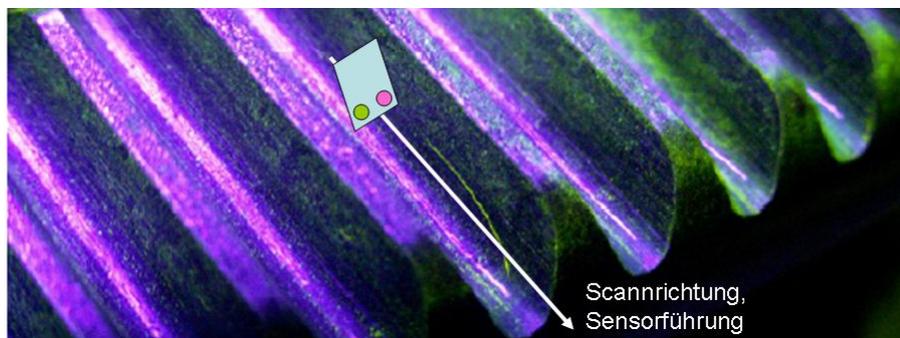
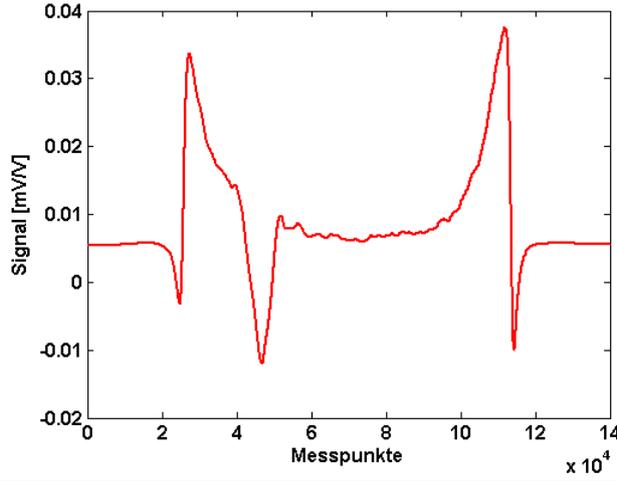
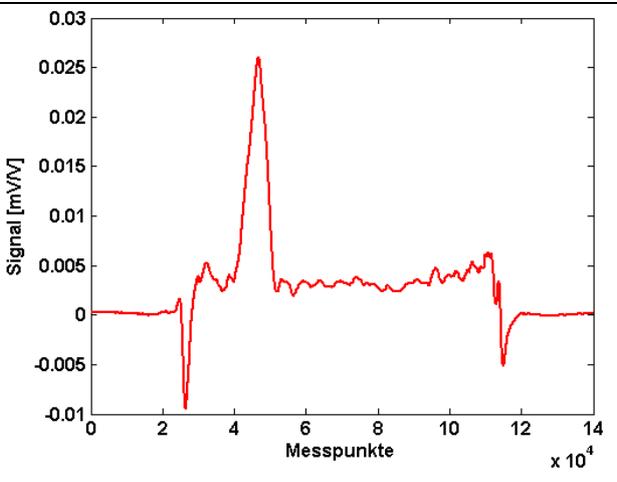


Abbildung 7-11: Magnetpulverprüfung Zahnstangenabschnitt mit Härteriss

Im Abgleich mit den Simulationsdaten entsprechen die Ergebnisse in Tabelle 7-6 den Erwartungswerten.

Tabelle 7-6: Vergleich Messsystemeignung am Realbauteil mit Fehler

| | | |
|--|-----------------------|------------------|
|  | Auflösung | 0,0305 < 0,0459 |
| | Messung | n= 2500 |
| | Referenzwert | xm= 12,15 mV/V |
| | Toleranz der Referenz | T= 0,918 mV/V |
| | Mittelwert | xg= 12,1655 mV/V |
| | Standardabweichung | sg= 0,0288 mV/V |
| | Abweichung xg von xm | Bi= 0,0155 |
| | | |
| | | Cgk 1,33 |
| | | Cg 1,59 |
| Signal $S_i(n,m)$ – Auswertung anhand Schwellwert | | |
|  | Auflösung | 0,0305 < 0,20505 |
| | Messung | n= 2500 |
| | Referenzwert | xm= 21,261 mV/V |
| | Toleranz der Referenz | T= 4,101 mV/V |
| | Mittelwert | xg= 21,22 mV/V |
| | Standardabweichung | sg= 0,143 mV/V |
| | Abweichung xg von xm | Bi= 0,0041 |
| | | |
| | | Cgk 1,33 |
| | | Cg 1,43 |
| Signal S_i über m – Auswertung der Differenz je identischer Sensorposition | | |

Die Messsystemeignung ist an diesen Beispielen auch für die Verwendung eines Realbauteils mit Fehler gegeben. Für die Beurteilung beliebiger Ungängen kann aus der technisch vorgegeben Grenze der Erkennbarkeit und den Modellen für jede Lage eine Betrachtung der Eignung durchgeführt werden. Die Messung gibt lediglich eine Aussage, ob eine Anomalie entsprechender Größe in den Signalen zu finden ist. Die Zuordnung der erreichten Leistungsgrenze des Verfahrens muss für jeden möglichen Fehler aus Tabelle 3-1 mittels der Modelle und idealerweise mit Realteilen ermittelt werden. Die Aussagequalität der Simulationen ist in der Anwendung auf die hier aufgeführten Ergebnisse identisch zu den Aussagen der Messung.

Fazit GMR-Scan-Technologie

Aus den Forschungsergebnissen konnte eine Prüfanlage für ein Realbauteil konzipiert und realisiert werden. Die aufgebaute Testanlage entspricht nach den Vorgaben der Messsystemanalyse den Anforderungen an den Stand der Technik für Messsysteme. Mit dem Modell des stromdurchflossenen Leiters kann die minimale

Grenze der Erkennbarkeit bestimmt werden. Mit den anschließenden Untersuchungen anhand des Modells einer Nut als Riss im Abgleich mit Messungen eines Realbauteils ist die Eignung unter den gestellten Randbedingungen nachgewiesen worden. Die Aussagesicherheit betrifft nur die Korrelation mit dem gezeigten Riss als einem relevanten Fehler, deckt sich aber mit den Ergebnissen der Simulation. Allgemein zeigt sich, dass erkennbare Fehler im Rahmen der mittels etablierter zFP-Verfahren zu erkennenden Größen liegen.

8 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein Beitrag zur Anwendung der Normalkomponente des Streufeldes in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung geleistet. Ausgehend von einem Anwendungsfall wurden das Vorgehen und die Hilfsmodelle ausgewählt. Aus den Forschungsergebnissen ist anhand von Simulation, Rechnung und Messung die Theorie zur Normalkomponente des Streufeldes an einer Nut über den Stand der Literatur hinaus erweitert worden. Messungen verschiedener Muster- und Realteile mit Modellfehlern und echten Rissen zeigen identische Ergebnisse und verifizieren damit den theoretischen Ansatz mit der Gültigkeit der in dieser Arbeit betrachteten Fälle, Grenzen und Parameter. Im Vergleich zur Literatur sind Abweichungen aufgetreten, die keinen Widerspruch zu den hier ermittelten Ergebnissen darstellen. Es werden vielmehr nicht alle Hintergründe der Ergebnisse in den Veröffentlichungen präsentiert, so dass die Einschätzung einiger, vor allem früherer Ergebnisse schwerlich möglich ist. Die erreichten Ergebnisse zeigen Wege auf, wie die Normalkomponente zur Bestimmung von geometrischen Eigenschaften von rissartigen Fehlern herangezogen werden kann und welche technologischen Schritte dabei gegangen werden müssen.

Eine Prüftechnik basierend auf GMR-Sensoren für die industrielle Serienumgebung wurde als Beispiel genutzt, um für einen Anwendungsfall die Machbarkeit unter Realbedingungen zu zeigen. Damit stellt diese Arbeit einen erweiterten Stand der Technik dar, der noch nicht in der Literatur beschrieben ist.

Dieses Kapitel schließt die in den jeweiligen Abschnitten erfolgte Diskussion der Ergebnisse zum theoretischen Ansatz der Gradienten in Normalrichtung mit dem daraus entwickelten Prüfverfahren basierend auf GMR-Sensoren ab.

8.1 Modelle und Grenzen

Der in dieser Arbeit geleistete Beitrag zur Erweiterung der Gradienten in Normalrichtung beruht auf den entwickelten Modellen und deren Überprüfung durch Messungen. Die hierfür verwendeten Modelle des stromdurchflossenen Leiters als einfachem Feldmodell und der Nut als Rissmodell sind für die Betrachtung entsprechend parametrisiert und als Labormodelle dargestellt worden.

8.1.1 Sensormodell am stromdurchflossener Leiter

In früheren Arbeiten kommt das Modell elektrischer Dipole stromdurchflossener Leiter von Zatsepin und Shcherbinin für die Abschätzung von Feldern an einer Nut zum Einsatz. Durch die Weiterentwicklung der Simulationssoftware und der verfügbaren Rechenleistung finden in dieser Arbeit hauptsächlich numerische Verfahren Anwendung.

Der stromdurchflossene Leiter dient in dieser Arbeit als einfaches Feldmodell für die Erforschung des Sensors und der Validierung. Er ähnelt dem Modell von Zatse-

pin und Shcherbinin, lässt sich einfach analytisch, numerisch und auch messtechnisch darstellen und in den Ergebnissen vergleichen. In Übereinstimmung mit der analytischen Lösung der Maxwellgleichung, den identischen numerischen Berechnungen in der Software ComSol und den Messungen lassen sich der Sensor und sein Verhalten erforschen. Als Ergebnis ist ein hinsichtlich Signalcharakteristik, Ortsauflösung und Abstandsverhalten verifiziertes Modell des Sensors für die weitere Verwendung am Modell der Nut entstanden.

In der Anwendung ist das bekannte Verhalten dazu genutzt worden, um die genauen Ortskoordinaten der einzelnen Sensoren in den Experimenten zu vermessen und damit die Ortsinformationen zu korrigieren. Im Rahmen der Messungengenauigkeit kann die Positionszuordnung mit Abweichungen $<5 \mu\text{m}$ erfolgen. Besonders im Anwendungsfall kann so eine weitere Dimension der Messdaten in Form des Ortes für die Auswertung genutzt werden.

Die Nutzung als einfaches Feldmodell zur Untersuchung von Sensoren hat sich in dieser Arbeit bewährt. Es bietet eine reproduzierbare, sehr einfach zu modellierende und messtechnisch zu erfassende Forschungsumgebung. Grenzen in der Umsetzung sind hierbei vor allem durch die endlichen Drahtstärken und Fertigungstoleranzen gegeben. Werkzeugmaschinen können heute problemlos Toleranzen im Bereich von Mikrometern einhalten. Bei der Manipulation von Drahtdurchmessern kleiner $70 \mu\text{m}$ ist dann das Handling der entscheidende Faktor. Die Modellbildung stellt durch die heute vorhandene Rechnerleistung eine uneingeschränkt lösbare Aufgabe dar. Die Anforderungen im magnetostatischen Fall sind noch um ein Vielfaches kleiner, so dass mit einer sehr hohen Netzdichte die Abweichungen in der Simulation auf unter 10^{-5} begrenzt werden kann. Gerade in Bezug für die Ortsauflösung und Signalcharakteristik des Sensors zeigten sich so beste Ergebnisse, die das Verständnis des Sensors ermöglicht haben und damit die Basis für die Erforschung der Feldgradienten in z-Richtung bilden.

8.1.2 Modell einer Nut - Feldcharakteristik in z-Richtung

Für die Erforschung des Verhaltens der Normalkomponente am Modell einer Nut wurde das Vorgehen am stromdurchflossenen Leiter als Grundlage angewendet. Die aus den Ergebnissen der Simulation und dem Modell des Sensors berechneten Sensorsignale zeigen im Vergleich mit den Messungen sehr gute Übereinstimmung im Bereich der messtechnischen Grenzen. Die Modellumgebung zeigt für verschiedene Anwendungen eine gute Übereinstimmung von Theorie und Messungen und lässt die gezielte Untersuchung und Entwicklung von anwendungsrelevanten Komponenten einzusetzender Prüf- und Anlagentechnik zu. Nachfolgende Problemstellungen können mit geringem Aufwand abgebildet und beurteilt werden. An dem so validierten Modell wurden die theoretischen Untersuchungen anhand von charakteristischen Kennwerten durchgeführt.

Die eigenen Ergebnisse bieten dabei neue Erkenntnisse zu Auswertungswegen, insbesondere zu Details der geometrischen Größen von rissähnlichen Ungängen.

Die Breite einer oberflächenoffenen Nut kann aus den berechneten Signalen bestimmt werden. Der nachgewiesene Einfluss der Sensorstruktur und des Abstands zur Oberfläche machen die messtechnische Erfassung deutlich schwieriger. In den Versuchen mit Nuten und auch Realteilen lassen sich die Breiten nicht aus den Messsignalen rekonstruieren. Die Tiefe der Nut zeigt einen deutlich ausgeprägten Zusammenhang zur Feldstärke und deren Gradient. Am Versuchsteil Schweißnaht korreliert der Tiefenverlauf in der zerstörenden Prüfung gut mit den Messwerten des Sensors an der Oberfläche.

Eine Rekonstruktion geometrischer Eigenschaften von Ungängen anhand ihrer Streufeldsignatur ist realistisch, gelingt in dieser Arbeit nur im Umfeld der Modelle und im Einzelfall in den Messungen. Die Restriktionen für die Anwendung konnten in den Abmessungen des realen Sensors prognostiziert und die Randbedingungen zur Optimierung aufgezeigt werden. Dies bestätigt sich in der Anwendung. Die technologischen Möglichkeiten der GMR-Sensoren bieten noch Potential, hier einen weiteren Fortschritt zu erzielen.

Die Betrachtung von Absolutwerten des Streufeldes bleibt durch das hohe Potential an Störungen der Messung für die industrielle Serenumgebung und analog aller ähnlichen Anwendungsfälle nicht zielführend. Diese Messungen zu nutzen, bedarf einer dedizierten Betrachtung der Störfeldrichtungen und ggf., durch geeignete Wahl, den Ausschluss entsprechender vektorieller Größen. Hierbei eine Verallgemeinerung zu erreichen, ist aus jetziger Sicht nicht möglich. Die Normalkomponente direkt an der Oberfläche in Kombination mit dem gradiometrisch wirkenden Sensor ist im Vergleich von Ortsauflösung und Signalqualität für diesen Anwendungsfall den bisher versuchten Sensoren überlegen.

8.2 Technologischer Ausblick

Der technologische Ausblick richtet sich analog des Systems hauptsächlich an die GMR-Sensoren als entscheidende Komponente. Zusätzlich wird ein Ausblick auf mögliche Kombination von Prüftechniken gegeben.

8.2.1 GMR-Sensoren

Die in dieser Arbeit erreichte Leistungsgrenze der Sensoren, insbesondere ihre Ortsauflösung, bedingt die Nutzung der Messsignale. In der Theorie sind Möglichkeiten zur Rekonstruktion geometrischer Größen aufgezeigt und anhand von numerischen und analytischen Daten bestätigt worden. In der technischen Umsetzung sind die Sensoren hier der entscheidende Engpass. Wie in 6.4 diskutiert, wird sich bei Verbesserung der Ortsauflösung die Diversifizierung der Signale aufgrund von Breitenänderungen erreichen lassen. Auch hier muss im Hinblick auf die Prüfaufgabe der Nutzen vorher ermittelt werden, was durch die Modelle ermöglicht wird. Die Grenze der technisch erreichbaren GMR-Strukturen ist noch nicht am Ende der Möglichkeiten, so dass hier mit weiteren Erfolgen zu rechnen ist. Strukturen im Bereich um wenige Mikrometer sind realistisch und damit auch entsprechend hohe

Ortsauflösungen denkbar. Die Einflüsse auf die Sensoren lassen sich nur mit dem Know-How der Herstellung abschätzen.

Aktuelle Forschungen auf dem Gebiet von Granulaten mit GMR-Effekt ermöglichen in Zukunft weitere Anwendungsvereinfachungen. Gelingt es einen ausreichend großen GMR-Effekt in den Granulaten zu erzeugen und messtechnisch nutzbar zu machen, vereinfachen sich die Arrayaufbauten durch den flexiblen Einsatz der Granulate stark. Realistisch sind dann Freiformen und selbstanpassende Strukturen, die sich einheitlich an beliebigen Geometrien einsetzen lassen. Durch die Unterteilung in feinste Freiformteilungen steht so die Möglichkeit eines bildgebenden Verfahrens in der Art eines Magnetfeldfotos zur Verfügung. Die erreichbaren Prüfzeiten sind im Bereich unter einer Sekunde, analog der Wirbelstromtechnik, realistisch.

8.2.2 Prüftechnologie - Vergleich

Die lokale Anregung ist ein Vorteil der Wirbelstromprüfung und auch für die Streufeldmessung eine interessante Variante. Es entfällt die Entmagnetisierung der Bauteile nach der Prüfung und die Präparation des Bauteils wird stark vereinfacht. Die Kombination der GMR-Sensoren mit der Anregung nach den Prinzipien des Wirbelstromverfahrens mit sehr niedrigen Frequenzen oder sogar statisch durch Dauermagnete macht ein weites Spektrum an Informationen bei voranschreitender Vereinfachung zugänglich. Mit klassischen Spulen als Messsonde der Wirbelstromprüfung ist die Leistungsgrenze durch die Miniaturisierbarkeit bereits nahe. Sowohl die Ortsauflösung als auch die möglichen Empfindlichkeiten lassen sich nicht beliebig weiter optimieren. Hier bieten die GMR-Sensoren noch großes Potential, das durch die bereits vorhandene Fertigungstechnologie direkt zugänglich ist. Die Möglichkeit einer besseren Ortsauflösung und die Integration von mehreren Sensoren auf einem Die lassen es zu, Informationen in verschiedenen Raumrichtungen und Gradientenabständen zu vereinen. Nach der Theorie der Gradienten in z-Richtung lässt sich dann auch die Breite einer Nut aus den Streufeldern errechnen und genauere Rückschlüsse auf die Tiefe ziehen. Allgemein ist mit weiter voranschreitender Auflösung die Rückrechnung auch anhand von Simulationsdaten möglich.

Analog zu der bildgebenden Wirbelstromtechnik mit Bewegungsfeldsonden können ähnliche Arrays auch mit GMR-Sensoren aufgebaut werden. Die mechanische Fixierung und sichere Anbindung der Die ist dabei die technologische Herausforderung. Die Ortsauflösung wird unter Beibehaltung der Sensoren erstmal sinken und sich dem Niveau der Wirbelstromtechnik annähern. Bei entsprechender Kontaktierung können die Bauteile ohne Relativbewegung in einer Art magnetischer Fotografie geprüft werden. Bei entsprechender Datenqualität sind Ergebnisse der Auswertung wie am Beispiel in Abschnitt 6.6 zu erwarten.

8.3 Streuflussprüfung mit GMR-Sensoren

Die Entwicklung von neuen Verfahren ist immer mit einem Mehraufwand im Vergleich zum Einsatz eines bekannten Verfahrens verbunden. Durch die technischen Weiterentwicklungen motiviert lohnt es sich bei jedem Verfahren, die Grenze des Machbaren von Zeit zu Zeit neu zu beurteilen. Hierbei anwendungsfallbezogen vorzugehen, hat sich in dieser Arbeit als richtige Wahl gezeigt. Das angewendete Verfahren zur schrittweisen Entwicklung der Prüftechnik bis hin zu Anwendung wurde bestätigt.

Die GMR-Technologie hat als zFP-Verfahren ihre Berechtigung. Die hier erzielten Ergebnisse und die Aussagesicherheit machen es für die exemplarische Anwendung zu einer Alternative für die weitläufig eingesetzte Magnetpulverprüfung. Durch die Messung von Magnetfeldern wird, trotz der Bewertung im attributiven Vorgehen, eine Möglichkeit zur besseren Objektivität gegeben. Alleine durch den Einsatz eines Messverfahrens ergibt sich in der Anwendung ein ausreichend hohes Verbesserungspotential. Eine Zuordnung der Signale zu möglichen Ungängen kann erst mit der konkreten Vorgabe von Fehlergrenzen, die zum Versagen führen, erfolgen. Hierzu ist im Abschnitt der Modelle ausreichende Vorarbeit enthalten.

In der Anwendung der Technologie ist das Verständnis der Ergebnisse zu hinterfragen. Es kann in Prozessen immer wieder zu unvorhergesehenen, sporadischen Abweichungen kommen, die keiner Statistik gehorchen. Die Technik kann also nicht im Sinne einer Sortierprüfung gesehen werden, da Einzelentscheidungen auch das Übersehen eines Fehlers ermöglichen. Der Einsatz als eine Komponente der Prozessüberwachung ist daher sinnvoll. Erst im Zusammenspiel aller Prüfungen vom Rohmaterial bis hin zur Fertigteilprüfung lässt sich das Spektrum möglicher Fehler so weit eingrenzen, dass die Wahrscheinlichkeit, einen versagenskritischen Fehler zu übersehen, hinreichend gering ist.

Die Technologie funktioniert. Eine Erweiterung der Anwendung ist nach dem hier gezeigten Stand an Wissen problemlos möglich. Eine Vielzahl von Bauteilen ist potentiell mit dieser Methode prüfbar. Ob dies wirtschaftlich sinnvoll ist, entscheidet im Einzelfall über die Anwendung. Für die hier gestellte Aufgabe ist im Rahmen dieser Promotion eine funktionierende Lösung nach aktuellem Stand der Technik realisiert und qualifiziert worden.

Literatur

- [1] Schulungsunterlagen der DGzFP zum Kurs *Magnetpulver Stufe 1 und 2* nach DIN EN 473, 2004, Magdeburg
- [2] DIN 54136:1988, BEUTH VERLAG, BERLIN
- [3] ZATSEPIN, N.N., SHCHERBININ, V.E.: *On the Calculation of Magneto-static Field of Surface Flaws*, Defektoskopiya 2 (5), 1966
- [4] DOBMANN, G., HÖLLER, P.: *Physical Analysis Methods of Magnetic Flux Leakage*, Research Techniques in Nondestructive Testing, Volume 4, 1980
- [5] ZAGIDULIN, R.V.: *Calculation of the remanent magnetic field of a continuity defect in a ferromagnetic article-2 the remanent magnetic field of a defect in air*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 34 (1998) 10, S. 727-731, Übersetzung aus dem Russischen, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999
- [6] SHUR, M.L., ZAGIDULIN, R.V., SHCHERBININ, V.E.: *Theoretical Problems of the Formation of a Field of a Surface Defect*, Institute of Metal Physics, Ural Branch, Academie of Science of the USSR, 1988, S. 153-163 Übersetzung aus dem Russischen, Plenum Publishing Corporation, 1988
- [7] MUZHITSKII, V. F.: *Model of a Surface Flaw and Calculation of Topography of Its Magnetic Field for Tangential Magnetization by Alternating Magnetic Fields. Quasi-Stationary Case*, Russian Journal of Nondestructive Testing 39 (2003) 10, S. 729–740 Übersetzung aus dem Russischen, MAIK Nauka/Interperiodica, 2003
- [8] MUZHITSKII, V. F., SHCHERBININ, V.E.: *Magnetic Field of a Short Rectangular Slot-Type Flaw*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 42 (2006) 2, S 115–118, Übersetzung aus dem Russischen, Pleiades Publishing, Inc., 2006
- [9] REUTOV, YU. YA., LOSKUTOV, V.E.: *Topography of the Field of a Slot upon Nonlinear Magnetization*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 40 (2004) 10, S. 696–701, MAIK Nauka/Interperiodica, 2004
- [10] ZAGIDULIN, R.V., MUZHITSKII, V. F., BIZYULEV, A.N.: *Identification of Groups of Discontinuity Flaws in Ferromagnetic Components Based on Magnetic Field Conguration in Air*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 38 (2002) 2, S 136–142, MAIK Nauka/Interperiodica, 2002
- [11] ZAGIDULIN, R.V., MUZHITSKII, V. F.: *Measuring Geometric Parameters of Discontinuity Flaws in Ferromagnetic Plates by Minimizing Smoothing Functional. II. Estimates of Discontinuity Flaw Parameters*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 37 (2001) 10, S. 687-692, MAIK Nauka/Interperiodica, 2001

- [12] ZAGIDULIN, R.V., MUZHITSKII, V. F., KUROZAEV, V.P.: *Calculation of the Spectral Function of Magnetic Field due to a Surface Flaw and Reconstruction of Magnetic Field due to a Flaw of Corresponding Dimensions in a Ferromagnetic Plate*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 36 (2000) 12, S. 877-882, MAIK Nauka/Interperiodica, 2000
- [13] ZAGIDULIN, R.V., MUZHITSKII, V. F.: *Three-dimensional Model of Discontinuity Flaw of Finite Dimensions in a Ferromagnetic Plate*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 38 (2002) 11, S 806–812, MAIK Nauka/Interperiodica, 2002
- [14] DYAKIN, V.V., UMERGALINA, O.V.: *Calculation of the Field of a Flaw in Three-Dimensional Half-Space*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 39, (2003) 4, S. 297–309, MAIK Nauka/Interperiodica, 2003
- [15] KLOSTER, A.: *Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren*, Dissertation an der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2008
- [16] HWANG, J. H.: *Defect characterisation by magnetic leakage field*, Doktorarbeit, Colorado State University, 1975
- [17] Münnich, H.: *Ein mathematisches Interpretationsmodell zur objektiven Beurteilung von magnetischen Streuflussamplitudenortskurven*, Saarbrücken, FhG-Berichte 4 (1978), S.23-28
- [18] WANG, Y., XU, Y., DING, S., ET.AL.: *Numerical Simulation and Experiment on Magnetic Flux Leakage Inspection of Cracks in Steels*, Proceedings of 17th WCNDT2008, Shanghai 2008
- [19] SADR, A., EHTERAM, S.: *Intelligent MFL Defection Algorithm Equipped by Linear Discriminate Analysis*, Česká společnost pro nedestruktivní zkoušení materiálu, 38. Tagung in Brno, 2008
- [20] HUANG, Z., QUE, P.: *Three modeling methods in MFL testing*, Proceedings of 17th WCNDT2008, Shanghai 2008
- [21] ORTH, TH.: *Einsatz von neuen Magnetfeldsensoren zur Streuflussprüfung an nahtlosen Stahlrohren*, DGZfP-Berichtsband, DGZfP-Jahrestagung, Rostock, 2005
- [22] HALLER, A.: *Erste Erfahrungen mit der hochauflösenden magnetischen Drahtseilprüfung*, DACH-Zeitung, 12 (1997)
- [23] 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, Bremen, 2011
- [24] BUECH, H.: *Das Ising-Model*, Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder, Wintersemester 2005/2006, Universität Münster, Münster, 2005

- [25] HEPTNER, H., STROPPE, H.: *Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung*, Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1965
- [26] NOLTING, W.: *Theoretische Physik 6*, Springer Verlag, 2007
- [27] N.N.: *Weichmagnetische Werkstoffe*, Siemens Aktiengesellschaft [Abt. Verlag], München, Berlin 1990
- [28] KNELLER, E.: *Ferromagnetismus*, Springer-Verlag, Berlin 1962
- [29] LEUCHTMANN, P.: *Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie*, Pearson Studium, München, 2007
- [30] STEINKE, P.: *Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2007
- [31] BOENING, W.: *Elektrische Energietechnik – Band 1: Maschinen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978
- [32] HÜNICKE U.-D., MÖLLER, S.: *Auswertung der statischen Magnetisierungskurve zur Kontrolle von Gefüge- und Behandlungszuständen bei Stählen*, DACH-Jahrestagung, Mainz 2003
- [33] DIN 17212:2006, , BEUTH VERLAG, BERLIN
- [34] BUCHAL, C., BÜRGLER, D.: *Peter Grünberg. Nobelpreis für Physik 2007*, MIC GmbH, Jülich 2008
- [35] BULLINGER, H.-J.: *Technologieführer – Grundlagen-Anwendungen-Trends*, Springer Verlag, Düsseldorf, 2007
- [36] ELMERS, H.-J.: *Magnetismus dünner Filme*, 30. Ferienkurs IFF, Schriften des Forschungszentrum Jülich, Materie und Material, Jülich, 1999
- [37] BRUNO, P.: *Theory of Interlayer Exchange Coupling*, 30. Ferienkurs IFF, Schriften des Forschungszentrum Jülich, Materie und Material, Jülich, 1999
- [38] MATTHEIS, R.: *Dünne magnetische Schichten und Schichtsysteme*, IPHT Jena, 2006
- [39] BUCHMEIER, M.: *Magnetische Schichtsysteme: Veränderung statischer und dynamischer magnetischer Eigenschaften durch starke Zwischenschichtaustauschkopplung*, Inaugural-Dissertation an der Universität zu Köln, 2003
- [40] GROSSER, R., MARX, A.: *Grundlagen der Magnetoelektronik*, Vorlesung am Walther-Meißner-Institut der Bayerische Akademie der Wissenschaften, Script zur Vorlesung, 2004
- [41] GRÜNBERG, P.: *Zwischenlagenaustauschkopplung: Phänomenologische Beschreibung, Materialabhängigkeit*, 30. Ferienkurs IFF, Schriften des Forschungszentrum Jülich, Materie und Material, Jülich, 1999
- [42] BERKOWITZ, A.E., ET AL: *Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys*, Phys. Rev. Lett. 68, The American Physical Society, Californian 1992

- [43] VOGELSANG, B., BAUER, C., RETTIG, R.: *Performance of GMR-Elements in Sensors for Automotive Application*, Advanced Microsystems for Automotive Applications, Springerlink New York, Heidelberg, Berlin 2005, S. 435 - 446
- [44] LOREIT, U.: *Unterlagen des Sensors Typ 7*, Entwicklungsunterlagen Sensitec, Lahnau, 2008
- [45] KREUTZBRUCK, M.V., MATTHEIS, R.: *Intelligente MR-Sensorik für die zerstörungsfreie Materialprüfung*, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben gefördert von der Stiftung Industrieforschung, Projektnr. 48, 2004-2006
- [46] ORTH, T., KAACK, M., NITSCHKE, S., DELHAES, CH.: *Einsatz von neuen Magnetfeldsensoren zur Streuflussprüfung an nahtlosen Stahlrohren*, DGZfP-Jahrestagung, Rostock, 2005
- [47] LERCH, R.: *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren.*, Springer-Verlag, Heidelberg, 2007
- [49] DIETRICH, E., SCHULZE, A.: *Prüfprozesseignung – Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*, Carl Hanser Verlag, München, Wien 2007
- [50] BRONSTEIN, I.N., SEMENDJAJEW, K.A., MUSIOL, G., MÜHLIG, H.: *PTaschenbuch der Mathematik*, 4.Auflage, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main, Thun, 1999
- [51] DEUTSCH, V.; MORGNER, W.; VOGT, M.: *Magnetpulver-Rissprüfung*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [52] MORGNER, .: *Ein Riss – Was nun ?*, Vortrag im DGZFP-Arbeitskreis Magdeburg, Magdeburg 2005
- [53] HOFFMANN, R.: *Grundlagen der Frequenzanalyse*, 2. Auflage, expert-Verlag, 2005 Renningen
- [54] MOOK, G., MICHEL, F., SIMONIN, J.: *1D-, 2D- und 3D-Bewegfeldsensoren zur elektromagnetischen Bildgewinnung*, Berichte der DACH-Jahrestagung, St.Gallen 2008

Betreute Arbeiten während der Promotion

- [VW1] XU, BEIYI: *Untersuchung und Charakterisierung von Magnetfeldsensoren zum Einsatz in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*, Masterarbeit, Leibnizuniversität Hannover, Hannover, 2007
- [VW2] BÜRGER, RONNY: *Einsatz von GMR-Sensoren in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*, Diplomarbeit, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 2008