## Magnetisches Streufeldverfahren zur Fehlstellendetektion in ferromagnetischen Feinstblechen

**Dissertation** zur Erlangung des akademischen Grades

#### Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von Master of Science (M.Sc.) Jakob Schwarzmann geb. am 19.03.1991 in Rostow am Don

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

Gutachter:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Mook Prof. Dr. rer. nat. habil. Hartmut Ewald Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Halle

Promotionskolloquium am 23.05.2023

### Kurzfassung

Feinblech wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. In vielen Fällen wird das Material bei der Verarbeitung, beispielsweise durch Biegen und Tiefziehen, stark umgeformt. Nichtmetallische Einschlüsse im Band, welche beim Brammenguss im Material verbleiben, können zur Bildung von Löchern, Oberflächenschäden oder sogar zu einem vollständigen Abriss des Werkstücks führen. Solche Störungen verursachen Ausschuss und häufig auch Folgeschäden, etwa durch Beschädigungen des Presswerkzeugs oder beispielsweise durch die Produktion und anschließende Befüllung undichter Verpackungen. Auch stehen diese der fortschreitenden Entwicklung hin zu weiteren Materialeinsparungen mittels Reduktion der Materialstärken durch einen höheren Umformgrad entgegen.

Eine optische Detektion solcher Einschlüsse ist oft nicht möglich, da sich diese vollständig innerhalb des Materials befinden. Mehrere Prüfverfahren werden evaluiert und auf Grund von zu geringer Auflösung oder fehlender Kompatibilität mit den Produktionsparametern, wie beispielsweise der Materialgeschwindigkeit, verworfen. Eine Prüfung mittels magnetischem Streufluss besitzt die nötige Empfindlichkeit und wird für die Prüfaufgabe bereits in Form der Magnetpulverprüfung erfolgreich stichprobenartig eingesetzt.

Zur Implementierung einer berührungslosen und vollständigen Streuflussprüfung des Materials kommen kommerziell verfügbare GMR-Gradiometer zum Einsatz. Die Auswahl des Sensortyps, der nachgelagerten Signalverarbeitung, der Magnetisierung sowie der Prüfanordnungsgeometrie geschieht auf Grundlage von Labormessungen. Diese werden auf einem Laborprüfstand zur Simulation der Materialgeschwindigkeit durchgeführt. Hier wird auch das magnetische Verhalten verschiedener Defektgeometrien und der Einfluss einzelner Betriebsparameter auf die Messung untersucht. Auf Grundlage der so gewonnenen Erkenntnisse erfolgt die Konstruktion von Streufluss-Sensormodulen, welche in einem Prototyp-Aufbau unter Produktionsbedingungen getestet werden. Dabei gewonnene Daten bestätigen die Ergebnisse der Labormessungen und zeigen die prinzipielle Eignung des Konzepts für die Prüfaufgabe. Das anschließend aufgebaute modulare Prüfsystem ermöglicht die Gewinnung großer Datenmengen. Die Erkenntnisse aus den Messungen des Prototyp-Aufbaus werden so vertieft und für den praktischen Betrieb benötigte Funktionen identifiziert. Im Ausblick sollen diese auch der Untersuchung der POD und PFA sowie der Herkunft des beobachteten magnetischen Hintergrundrauschens als Störfaktor dienen und eine Klassifizierung unterschiedlicher Fehlerarten anhand von deren Streufluss ermöglichen.

### Abstract

Thin cold rolled plate is used in a wide variety of applications, many of which involve manufacturing processes with high stretch ratios like bending or deep drawing. In such processes, non-metallic inclusions, or segregations, remaining in the material from slab casting, can cause surface damage, the formation of holes or even the plates rupture. Such disruptions result in the production of scrap and may cause consequential damage as damage to the pressing tooling or leakage from filling faulty packages. Inclusions also obstruct further developments in material efficiency through material thickness reduction by higher stretch ratios.

Optical inspection systems are not able to detect most inclusions as they are not protruding through the materials surface. Several inspection methods were assessed and discarded due to insufficient sensitivity or missing suitability for the production parameters like material velocity. Magnetic flux leakage inspection offers the necessary sensitivity and has the advantage of already being successfully applied on the inspection task in form of magnetic powder testing of samples.

The development of a contactless magnetic flux leakage inspection with full coverage is based on commercially available GMR gradiometers. The selection of a specific sensor model, the subsequent signal processing, the magnetization as well as the geometry of all those components is made based on laboratory measurements. Those are conducted using a setup fot material velocity simulation. It is also used to investigate the magnetic behavior of different defect geometries and the influence of specific operating parameters on the measurement. The acquired findings were implemented in the design of sensor modules, which were tested in a production line using a prototype setup. The thus evaluated inspection results substantiate the results obtained during laboratory measurements and confirm the suitability of the approach for the inspection task. The subsequently built modular inspection system enables the collection of a large amount of data which broadens the findings gained by the prototype setup. It also helps identifying missing functionality required for practical operation. In the outlook, the inspection of a large amount of material will help evaluating the setups POD and PFA as well as the origin of the observed magnetic background noise and allow a classification of different defect types based on their magnetic flux leakage.

# Inhaltsverzeichnis

| 1 | Einl  | eitung und Motivation  | 1  |
|---|-------|--|----|
|   | 1.1   | Einleitung   | 1  |
|   | 1.2   | Untersuchtes Material und dessen Herstellung                     | 2  |
|   | 1.3   | Anschließende Verarbeitung                                       | 5  |
|   | 1.4   | Auftretende Qualitätsprobleme                                    | 7  |
|   | 1.5   | Mögliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung                        | 10 |
| 2 | Fors  | schungsstand und Grundlagen der Prüftechnik                      | 11 |
|   | 2.1   | Mögliche Prüfverfahren   | 11 |
|   |       | 2.1.1 Durchstrahlungsprüfung                                     | 11 |
|   |       | 2.1.2 Ultraschallprüfung   | 16 |
|   | 2.2   | Magnetisches Streuflussverfahren                                 | 19 |
|   |       | 2.2.1 Magnetismus  | 19 |
|   |       | 2.2.2 Magnetischer Streufluss                                    | 22 |
|   | 2.3   | Magnetfeldsensoren   | 30 |
|   |       | 2.3.1 Spulen   | 30 |
|   |       | 2.3.2 Magnetooptische Sensoren                                   | 31 |
|   |       | 2.3.3 Hall-Sensoren  | 31 |
|   |       | 2.3.4 GMR-Sensoren   | 33 |
| 3 | Δuf   | gabenstellung  | 38 |
| J | , tan |  |    |
| 4 | Mes   | saufbau  | 39 |
|   | 4.1   | Versuchsaufbau zur Auswahl und Auslegung der Komponenten         | 40 |
|   | 4.2   | Laborprüfstand   | 43 |
|   | 4.3   | Magnetisierung   | 49 |
|   | 4.4   | Sensoren   | 55 |
|   | 4.5   | Analoge Signalverarbeitung                                       | 58 |
| 5 | Lab   | ormessergebnisse   | 64 |
|   | 5.1   | Sensoren   | 64 |
|   | 5.2   | Analoge Signalverarbeitung                                       | 71 |
|   | 5.3   | Magnetisierung   | 74 |
|   |       | 5.3.1 Auswirkung der Magnetisierungsrichtung auf Defektsignale   | 74 |
|   |       | 5.3.2 Charakterisierung natürlicher Fehlstellen                  | 79 |
|   |       | 5.3.3 Technische Umsetzung                                       | 85 |
|   | 5.4   | Einfluss der Fehlergröße, des Luftspalts und der Geschwindigkeit | 87 |
|   | 5.5   | Streuflussausdehnung   | 95 |
| 6 | Pro   | totyp und Prüfsystem   | 99 |
|   | 6.1   | Sensormodul  | 99 |

|   | 6.2       Prototyp          | $\begin{array}{c} 101 \\ 105 \end{array}$ |
|---|-----------------------------|---|
| 7 | Messergebnisse Prüfsystem   | 109                                       |
| 8 | Interpretation und Ausblick | 118                                       |

# Abkürzungsverzeichnis

| GMR           | Giant-magneto-resistance  |  |
|---------------|---|--|
| POD           | Probability of detection  |  |
| PFA           | Probability of false alarm  |  |
| EMAT          | Electro-magnetic acoustic transducer                                      |  |
| RKKY          | Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida(-Effekt)                                    |  |
| СРР           | Current perpendicular plane   |  |
| CIP           | Current in plane  |  |
| I/O(-Gerät)   | Input-Output(-Gerät)  |  |
| RCL-Messgerät | Widerstands-Kapazitäts-Induktivitäts-Messgerät                            |  |
| RL-Kreis      | Reihenschaltung eines ohmschen Widerstands und einer Spule (beides ideal) |  |
| AD-Wandler    | Analog-Digital-Wandler  |  |
| kS            | Kilosample  |  |
| CMOS          | Complementary metal-oxide-semiconductor                                   |  |
| FPGA          | Field programmable gate array   |  |
| CAD           | Computer-aided design   |  |
| DA-Wandler    | Digital-Analog-Wandler  |  |
| FFT           | Fast Fourier transform  |  |

# Formelzeichenverzeichnis

| $U_g$          | Geometrische Unschärfe                            | [m]  |
|----------------|---|--|
| a              | Abstand Strahlenquelle - Objekt                   | [m]  |
| b              | Abstand Objekt - Detektor, Breite                 | [m]  |
| F              | Ausdehnung der Strahlenquelle                     | [m]  |
| $\vec{ abla}$  | Nabla-Operator                                    |  |
| $\vec{D}$      | Elektrische Flussdichte                           | $\left[rac{A\cdot s}{m^2} ight]$                          |
| ρ              | Ladungsdichte                                     | $\left[\frac{A \cdot s}{m^3}\right]$                       |
| $ec{H}$        | Magnetische Feldstärke                            | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| $ec{J}; j$     | Stromdichte                                       | $\left[\frac{A}{m^2}\right]$                               |
| $ec{E}$        | Elektrische Feldstärke                            | $\left[\frac{V}{m}\right]$                                 |
| $\vec{B}$      | Magnetische Flussdichte                           | [T]  |
| $\mu_0$        | Magnetische Feldkonstante                         | $\approx 4\pi \cdot 10^{-7} [\frac{V \cdot s}{A \cdot m}]$ |
| $\mu_r$        | Relative Permeabilität                            |  |
| $R_m$          | Reluktanz   | $\left[\frac{A}{V \cdot s}\right]$                         |
| l              | Länge   | [m]  |
| A              | Fläche  | $[m^2]$  |
| $lpha_n$       | Winkel zum Normal der Oberfläche                  |  |
| $H_x$          | Tangentiale Streuflusskomponente quer zur Nut     | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| $H_y$          | Normale Streuflusskomponente                      | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| $H_z$          | Tangentiale Streuflusskomponente parallel zur Nut | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| $H_s$          | Feldstärke innerhalb der Nut                      | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| $H_a$          | Feldstärke im umgebenden Material                 | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| s              | Nutbreite   | [m]  |
| T              | Nuttiefe  | [m]  |
| $\sigma$       | Magnetische Ladungsdichte                         | $\left[\frac{A}{m}\right]$                                 |
| $U_{ind}$      | Induzierte Spannung                               | [V]  |
| $oldsymbol{N}$ | Windungszahl einer Spule                          |  |
| $\Phi$         | Magnetischer Fluss                                | [Wb]   |
| $F_L$          | Lorentzkraft                                      | [N]  |

| e                | Elementarladung                 | $\approx 1.602 \cdot 10^{-19} \ [C]$ |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| $v_d r$          | Elektronen-Driftgeschwindigkeit | $\left[\frac{m}{s}\right]$           |
| $F_C$            | Coulombkraft                    | [N]                                  |
| $U_H$            | Hall-Spannung                   | [V]                                  |
| j                | Stromdichte                     | $\left[rac{A}{m^2} ight]$           |
| $\boldsymbol{n}$ | Elektronendichte                | $\left[rac{1}{m^3} ight]$           |
| a                | Beschleunigung                  | $\left[\frac{m}{s^2}\right]$         |
| $\boldsymbol{v}$ | Geschwindigkeit                 | $\left[\frac{m}{s}\right]$           |
| Ι                | Strom                           | [A]                                  |
| $oldsymbol{U}$   | Spannung                        | [V]                                  |
| R                | Elektrischer Widerstand         | $[\Omega]$                           |
| t                | Zeit                            | $[\mathbf{s}]$                       |
| au               | Zeitkonstante                   | $[\mathbf{s}]$                       |
| L                | Induktivität                    | [H]                                  |
| r                | Radius                          | [m]                                  |
| $U_a$            | Ausgangsspannung                | [V]                                  |

# 1 Einleitung und Motivation

## 1.1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat der Werkstoff Stahl eine große Entwicklung durchlaufen. So wurden für viele Anwendungen optimierte Stahlsorten entwickelt. Daher ist die Anzahl der Stahlsorten in den vergangen Jahrzehnten auf über 2500 angestiegen. Die Möglichkeit der Entwicklung und wirtschaftlichen Produktion vieler Stahlsorten hängt dabei auch mit der Verfügbarkeit von fortgeschrittener Messtechnik zusammen. Diese ermöglicht durch die genaue Uberwachung von kritischen Prozessparametern die Erzeugung oder auch Nutzung der besonderen Eigenschaften spezieller Stahlsorten. Das Material Weißblech ist ein Beispiel für eine solche Entwicklung. Durch immer bessere Produktions- und Verarbeitungsmethoden lässt sich das Material zunehmend stärker strecken. Dadurch können Verpackungen mit immer dünneren Wandstärken hergestellt werden, was zu Materialeinsparung und so zu mehr Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit führt. Innere Einschlüsse im Material führen beim Umformen jedoch zu Rissen und Löchern. Daher muss Weißblech, welches zu Verpackungen mit möglichst dünnen Wandstärken tiefgezogen werden soll, neben der richtigen Zusammensetzung und dem richtigen Gefüge auch eine hohe Reinheit besitzen. Als solche wird die Abwesenheit von nichtmetallischen inneren Einschlüssen und Hohlräumen sowie Seigerungen bezeichnet. Entscheidend für die Reinheit des Weißblechs ist die Produktion der Bramme, aus welcher dieses gewalzt wird. Sofern kein geeignetes Prüfgerät zur Reinheitsbestimmung zu Verfügung steht, offenbart sich eine unzureichende Reinheit meistens erst bei der Produktion des Endprodukts. Oft lassen sich die Ursachen der vermehrt auftretenden inneren Einschlüsse nicht mehr nachverfolgen. Auch entsteht durch die Verarbeitung des fehlerhaften Materials zusätzlicher Schaden. Daher besteht eine Nachfrage nach einem Prüfgerät zur empfindlichen Bestimmung des Reinheitsgrads von Weißblech. Mit einem solchen wäre es dem Weißblechhersteller möglich, den Einfluss unterschiedlicher Produktionsparameter und Verfahren auf den Reinheitsgrad zu bestimmen. Die energie- und arbeitsintensive Herstellung von fehlerhaftem Material kann so vermieden werden. Auch kann Material, welches nicht den Anforderungen für das Tiefziehen entspricht, anderen, weniger kritischen Anwendungen zugeführt werden. Dies führt zu einer Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit des gesamten Produktionsprozesses.

### 1.2 Untersuchtes Material und dessen Herstellung

Beim untersuchten Material handelt es sich um Feinstblech mit einer Materialstärke zwischen 100  $\mu m$  und 500  $\mu m$ , einer Breite zwischen 600 mm und 1200 mm und finalen Längen von bis zu 12000 m. Es dient primär der Produktion von Verpackungen.

Hierfür wird niedrig gekohlter, unlegierter Stahl nach seiner Verhüttung zunächst mittels Strangguss zu 8 m - 11 m langen Brammen vergossen. Diese werden im warmen Zustand durch ein Vorgerüst zunächst reversierend und anschließend in mehreren aufeinander folgenden Gerüsten zu Warmband mit einer Stärke zwischen 1 mm und 4 mm und Längen von 700 m - 1200 m gewalzt und zu Coils aufgewickelt.

Die weitere Verarbeitung erfolgt in kaltem Zustand. Das Warmband wird zunächst durch Beizen und anschließendes Spülen von Zunder und Rost befreit, da die Oberfläche für das anschließende Kaltwalzen sauber und frei von Fremdkörpern sein muss. Hierfür wird es in einem kontinuierlichen Verfahren durch Tanks mit ca. zwanzigprozentiger Schwefelsäure bei ca. 98 °C geleitet.

Das so gereinigte Band wird anschließend in einer Kaltwalz-Tandemstraße zu Kaltband ausgewalzt. Diese verfügt, ähnlich der Warmbandstraße, über 5 - 6 hintereinander angeordnete Walzgerüste, in denen das Band stufenweise in seiner Dicke reduziert wird. Während des Kaltwalzens werden das Band und die Arbeitswalzen durch eine Emulsion aus Walzöl und Wasser gekühlt. Im Anschluss wird diese mechanisch durch Bürsten, chemisch durch Lauge sowie elektrolytisch vom Band entfernt.

Durch die Umformung des Bandes beim Walzen treten starke Verformungen der Kristallstruktur auf, die Kornstruktur des Stahls ist nicht mehr homogen und enthält viele Gitterfehler. Dadurch erhöht sich die Härte des Materials, was einer weiteren umformenden Bearbeitung, wie etwa dem Tiefziehen, entgegensteht [1]. Auch kommt es durch den Walzprozess zur Texturbildung, einer gleichmäßigen Anisotropie der mechanischen Eigenschaften des Bandes in Walzrichtung. Dies führt ebenfalls, insbesondere beim Tiefziehvorgang, zu einer ungleichmäßigen Verformung. Daher wird das Band rekristallisationsgeglüht. Hierfür wird es auf eine Temperatur von 600 °C - 700 °C erwärmt. In diesem Temperaturbereich finden noch keine Phasenumwandlungen des Materials statt, allerdings kommt es zur Verschiebung von Korngrenzen und Neubildung von Körnern durch Diffusion. Gitterfehler und Anisotropien der Kornformen werden so abgebaut und das Material lässt sich wieder gleichmäßig umformen [2].

Dieser Erwärmungsprozess findet wahlweise kontinuierlich in einem Durchlaufofen (Kontiglühen) oder als Coils in Haubenglühöfen (Haubenglühen) statt. Bei ersterem wird ein Endlosband durch einen Ofen gezogen und beim Durchlaufen in diesem erwärmt. Bei letzterem werden mehrere Coils zu einem Stapel übereinandergelegt und durch eine Haube abgedeckt. In dieser findet die Erwärmung statt. In beiden Fällen wird das Band auf die Zieltemperatur erwärmt und diese wird für eine festgelegte Zeit gehalten, bevor eine gezielte Abkühlung erfolgt. Die Wärmebehandlung wird in beiden Fällen unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt, um eine Oxidation zu verhindern.

Durch das Glühen treten Unplanheiten und stochastische Anisotropien der mechanischen Eigenschaften des Bandes auf. Um diese zu beseitigen, wird das Band dressiert und nachgewalzt. Hierbei wird das Band nochmals durch zwei Walzgerüste geführt, wo es zu einer weiteren Dickenreduktion um 0,4 % - 40 % kommt. Bei kleinen Verformungsgraden kann dabei auf den Einsatz von Kühl- und Schmiermitteln verzichtet werden. Zusätzlich erhält das Band durch entsprechend ausgeführte Arbeitswalzenoberflächen eine definierte Oberflächenstruktur. Diese kann sowohl bei der späteren Veredelung und Verarbeitung des Bandes, als auch als optischer Aspekt relevant sein [3]. Grundsätzlich lässt sich das Band nun umformend verarbeiten. Meist findet im Anschluss eine Veredelung der Bandoberfläche durch Verchromen oder Verzinnen statt. Nach der Verzinnung wird das Band durch das Aufbringen einer dünnen Chromoxidschicht passiviert, um den Korrosionsschutz zu verbessern.

Bei der Oberflächenveredelung handelt es sich um ein kontinuierliches Verfahren, welches in Abbildung 1.1 skizziert ist. Die einzelnen Bänder werden aneinandergeschweißt, während des Schweißvorgangs kann die Veredelungsanlage mit einem Bandvorrat weiterfahren. Dieser wird in Schlingentürmen gespeichert, welche zwei übereinander liegenden waagerechten Rollenreihen besitzen, deren Abstände veränderbar sind.



Abbildung 1.1: Schematische Darstellung einer Veredelungsanlage [4]

Um beim Verzinnen oder Verchromen einen gleichmäßigen Materialauftrag und eine gute Haftung zu erzielen, muss das Band absolut frei von Rost und Verschmutzung wie beispielsweise Öl sein. Daher wird es zunächst erneut durch Beizen sowie elektrolytisch gereinigt. Anschließend erfolgt die elektrolytische Verzinnung, beziehungsweise Verchromung. Hierfür wird das geerdete Band über elektrisch mit der Galvanikstromquelle verbundene Stromrollen durch Bäder mit Methansulfonsäure an Zinn- beziehungsweise Chromanoden vorbeigeführt. Von diesen wird das Material in Stärken zwischen 1  $g/m^2$  und 11,2  $g/m^2$ bei Zinn und 50  $mg/m^2$  bis 140  $mg/m^2$  bei Chrom auf das Band abgeschieden. Die hierfür eingesetzten Bäder sind im Bereich "Vorbehandlung" hellblau dargestellt.

Zusätzlich ist eine induktive Aufheizung des verzinnten Bandes mit anschließender Abschreckung im Wasserbad möglich. Die entsprechende Induktionsspule ist im Bereich "Aufschmelzung" gelb dargestellt. Die erreichte Temperatur liegt dabei über der Schmelztemperatur des Zinns. Als Folge dessen wird dieses verflüssigt und bildet eine homogenere, besser haftende Schicht mit verringerter Rauigkeit. Die ursprünglich matte Oberfläche wird dadurch spiegelnd. Die Korrosionsbeständigkeit der Zinnschicht wird durch die anschließende Passivierung verbessert. Dies findet in den im Bereich "Nachbehandlung" hellblau dargestellten Bädern statt. Es folgt eine Trocknung des Bandes durch Warmluft oder induktive Aufheizung. Der Bandtrockner ist nach dem "Schlaufenturm 2" gelb dargestellt. Abschließend wird durch rotierende und elektrostatisch aufgeladene Zerstäuber eine dünne Ölschicht von durchschnittlich 3  $mg/m^2 - 4 mg/m^2$  auf das Band aufgebracht. Bei der späteren Verarbeitung durch die Kunden gewährleistet diese eine Gleitfähigkeit, was Verschürfungen der Materialoberfläche beim Abwickeln oder Abtafeln sowie ein Anhaften der Bleche am Werkzeug verhindert und das Material zusätzlich vor Korrosion schützt. Aufgewickelt als Coils erfolgt der Versand an weiterverarbeitende Betriebe.

### 1.3 Anschließende Verarbeitung

Verzinntes Feinstblech wird zu einer Vielzahl von Produkten weiterverarbeitet. Ein großer Teil davon dient der Verpackung von Waren. Beispiele sind Getränkedosen, Konservendosen, Sprühdosen, Kronkorken, Schraubdeckel und dekorative Metalldosen. Je nach Endprodukt bestehen dabei unterschiedliche Anforderungen an das Feinstblech. Viele Verpackungsarten, beispielsweise Konserven- und Keksdosen, werden durch Zuschnitt und Prägung des Blechs hergestellt. Das Blech wird dabei von, dem Endprodukt entsprechenden, Werkzeugen umgeformt und durch Scherung an zwei definiert ineinanderpassenden Werkzeugen ausgeschnitten.

Eine weitere häufige Verarbeitungsart von Weißblech ist das Tiefziehen. Ein typisches mittels dieses Verfahrens hergestelltes Produkt ist die Getränkedose. Dabei werden durch mehrere parallel arbeitende Werkzeuge Ronden aus dem Blech gestanzt, die im selben Arbeitsschritt zu becherförmigen Rohlingen, sogenannten Cups, umgeformt werden.

Diese wiederum werden durch Tiefziehen zur Dose umgeformt. Dabei wird das Material von einem Stempel durch einen Tiefzieh- und mehrere Abstreckringe gezogen, welche einen zunehmend kleineren Spalt zum Stempel aufweisen. Dadurch kommt es zu einer Längung bei gleichzeitiger Verringerung der Dicke des Materials. Der Boden der Getränkedose wird im selben Arbeitsschritt geformt, indem der Stempel am Ende seines Arbeitshubs auf eine entsprechend geformte Matrize trifft. Die Abbildung 1.2 zeigt die Skizze eines solchen Werkzeugs.



Abbildung 1.2: Zeichnung eines Tiefziehwerkzeugs [5]

Anschließend wird der Rand der Dose unter Drehung derselben von einer Schere besäumt. Es folgt zunächst die äußere und anschließend die innere Lackierung der Dose. Nach dem Einziehen und Umbördeln des oberen Rands zur späteren Aufnahme des Deckels erfolgt eine Prüfung auf Risse und Löcher. Anschließend werden die Dosen an Getränkehersteller versendet, wo sie befüllt und mit Deckeln verschlossen werden.

## 1.4 Auftretende Qualitätsprobleme

Beim Guss der Brammen, welche das Ausgangsmaterial für das untersuchte Feinstblech bilden, können Einschlüsse im Material zurückbleiben. Diese bestehen zu großen Teilen aus Oxiden reaktionsfreudiger Metalle. Ein Teil dieser Einschlüsse verbleibt durch alle Walzprozesse hinweg im Material. Während der Walzvorgänge können die Einschlüsse unterschiedliche Formen annehmen. Im Allgemeinen ist jedoch von in Walzrichtung gestreckten Formen auszugehen, da die Verformung des Materials durch den Walzvorgang ebenfalls hauptsächlich in diese Richtung stattfindet. Da die Einschlüsse häufig aus sprödem Material bestehen, findet beim Walzen oftmals neben der plastischen Verformung ein Zerbrechen statt. Daher handelt es sich bei den Einschlüssen im fertigen Produkt häufig um Konglomerate länglich verteilter, separater Bruchstücke. Befinden sich die Einschlüsse an der Materialoberfläche, liegt ein offensichtlicher Qualitätsmangel vor. Gleichzeitig lassen sich oberflächliche Defekte in der Regel mit Hilfe optischer Oberflächeninspektionssysteme detektieren. Vollständig unter der Materialoberfläche liegende Einschlüsse lassen sich jedoch nicht durch optische Systeme erkennen. Die Abbildungen 1.3 und 1.4 zeigen Schliffbilder solcher Einschlüsse.



Abbildung 1.3: Schliffbild eines kompakten inneren Einschlusses in Feinstblech [6]



Abbildung 1.4: Schliffbild eines verteilten inneren Einschlusses in Feinstblech [6]

Diese werden erstellt, indem ein Stück Band senkrecht in einer Vergussmasse eingebettet und schrittweise abgeschliffen wird, bis der Einschluss zu Vorschein kommt. Die Aufnahmen werden mit einem Auflichtmikroskop erstellt. Es findet keine Ätzung statt, daher erscheint das Band als homogener heller Streifen in der Bildmitte ohne die üblicherweise auf Schliffbildern erkennbare Kornstruktur. Die dunklen Bereiche ober- und unterhalb des Bandes werden durch die schwarze Vergussmasse hervorgerufen, die dunkle Stelle innerhalb des Bandes ist der Einschluss.

Für viele Anwendungen wird Weißblech mit lediglich geringen Umformgraden verarbeitet. Produktbeispiele sind Dosen für Konserven oder Süßwaren. Diese werden hauptsächlich durch Stanzen, Prägen und Biegen aus Weißblech hergestellt. Für solche Verfahren stellen Einschlüsse, welche sich vollständig innerhalb des Materials befinden, kein Qualitätsproblem dar. Durch die geringe Umformung bleiben sie unter der Materialoberfläche und erweisen sich beim Endprodukt in der Regel nicht als störend. Bei der Produktion von Getränkedosen durch Tiefziehen von ausgestanzten Ronden treten hingegen hohe Umformgrade (über 3) auf. Bei diesem Verfahren können auch kleine Inhomogenitäten innerhalb des Materials zur Lochbildung beim Endprodukt oder zum kompletten Abriss des Materials führen. Abbildung 1.5 zeigt solche beim Tiefziehvorgang gerissenen Getränkedosen.



Abbildung 1.5: Beim Tiefziehvorgang gerissene Getränkedosen [6]

Beides behindert den Produktionsprozess und kann im schlimmsten Fall zur Beschädigung der Tiefziehmaschine führen. Hersteller von Getränkedosen benötigen daher Feinstblech mit nachweislich besonders hoher Reinheit.

#### 1.5 Mögliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Bei den zu detektierenden Einschlüssen handelt es sich um Inhomogenitäten im Bandgefüge. Diese unterscheiden sich hinsichtlich einer Reihe von physikalischen Eigenschaften vom umliegenden Material, beispielsweise bei der Dichte, der Elastizität, der elektrischen Leitfähigkeit, der magnetischen Permeabilität und dem Röntgenabsorptionskoeffizienten. Die Unterschiede dieser Eigenschaften lassen sich zur Detektion von Einschlüssen nutzen. Die im Vergleich zum Umgebungsmaterial niedrigere elektrische Leitfähigkeit ermöglicht eine Detektion mittels Wirbelstromprüfung. Die niedrigere magnetische Permeabilität erlaubt den Einsatz von auf magnetischem Streufluss beruhenden Verfahren. Durch die Unterschiede bei Dichte, Elastizität und Schallgeschwindigkeit wäre eine Ultraschallprüfung sowohl im Reflexions- als auch im Durchschallungsverfahren denkbar. Eine Durchstrahlungsprüfung wäre durch die unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten ebenfalls anwendbar. Da das Band im Laufe der Verarbeitung mehrere Temperaturwechsel erfährt, wäre auch eine thermografische Untersuchung, wie diese bereits beim Warmwalzen und Stranggießen zum Einsatz kommt, denkbar. [7]

Physikalisch sind somit mehrere Prüfverfahren für die Detektion der Einschlüsse denkbar. Viele sind jedoch nicht mit dem Anspruch einer Prüfung des gesamten Materials während der Produktion vereinbar oder bieten keine hinreichend hohe Empfindlichkeit.

Bei der IMS GmbH wurden bereits EMAT-Ultraschall im Reflexionsverfahren und Durchstrahlungsprüfung als mögliche Online-Prüfverfahren untersucht. Hierbei erreichte die Ultraschallprüfung nicht die erforderliche Empfindlichkeit [8], während die Durchstrahlungsprüfung im Rahmen der technischen Möglichkeiten nur für sehr kleine Bandgeschwindigkeiten realisierbar war. [9]

Eine ausführliche Beschreibung dieser Untersuchungen findet sich im Kapitel "Grundlagen der Prüftechnik". Das aktuelle Referenzverfahren zur Qualitätssicherung beim untersuchten Material hinsichtlich innerer Einschlüsse ist die Magnetpulverprüfung. Das Verfahren beruht auf magnetischem Streufluss: Die niedrigere magnetische Permeabilität der Einschlüsse im Vergleich zum Umgebungsmaterial führt bei einer Magnetisierung des Materials zu Streufeldern an der Materialoberfläche über dem Einschluss. Durch das Aufbringen eines feinen, ferromagnetischen Pulvers können solche Inhomogenitäten des magnetischen Flusses mit hoher Empfindlichkeit detektiert werden. Eine Untersuchung des Bandes mittels Magnetpulverprüfung kann jedoch nur außerhalb der laufenden Produktion und für kleine Bandabschnitte erfolgen.

Kundenseitig wird bereits ein auf magnetischem Streufluss und Hallsensoren basierendes Prüfsystem in der Produktion eingesetzt, welches annähernd die gesamte Bandfläche abdeckt. Dieses besitzt jedoch laut Aussage des Betreibers nicht die nötige Empfindlichkeit, um alle relevanten Einschlüsse detektieren zu können. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prüfverfahren hingegen soll in der Lage sein, diese zuverlässig zu erkennen.

# 2 Forschungsstand und Grundlagen der Prüftechnik

### 2.1 Mögliche Prüfverfahren

Wie bereits im Abschnitt "mögliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung" dargestellt, eignen sich grundsätzlich mehrere verschiedene Prüfverfahren für die Erkennung von Einschlüssen in Feinstblech. Somit muss unter den Gesichtspunkten der Realisierbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Effektivität entschieden werden, welches Verfahren tatsächlich zur Anwendung kommt.

In Tandem-Kaltwalzstraßen bewegt sich das produzierte Feinstblech mit bis zu 2400 m/min. Auch in anderen Produktionslinien, welche für den Einbau eines Inspektionssystems in Frage kommen, werden stellenweise Geschwindigkeiten bis zu 1000 m/min erreicht. Zudem besitzt Feinstblech eine empfindliche Oberfläche. Daher ist ein wichtiges Kriterium für ein Prüfverfahren die Berührungslosigkeit der Prüfung. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit ist zudem ein möglichst großer Abstand zum Material erstrebenswert.

#### 2.1.1 Durchstrahlungsprüfung

Ein Verfahren, welches großen Abstand zum Material bei prinzipiell großer möglicher Empfindlichkeit bietet, ist die Durchstrahlungsprüfung. Diese wird bereits lange Zeit erfolgreich zur Prüfung begrenzter Bereiche von unbeweglichen Werkstücken eingesetzt. Bei der Durchstrahlungsprüfung wird das zu untersuchte Material ionisierender Strahlung ausgesetzt, welche in der Lage ist, dieses zu durchdringen. Als Strahlenquelle werden üblicherweise gefilterte Röntgenröhren eingesetzt. Deren Betriebsparameter können an die Dicke und das Absorptionsverhalten des zu prüfenden Materials angepasst werden. Als Detektor dienen chemische Filme, Speicherfolien und elektronische Zeilen- und Flächendetektoren unterschiedlicher Bauart. Chemische Filme und Speicherfolien erfordern eine zeitaufwändige Auswertung im Anschluss an die Prüfung. Für eine Materialprüfung während der Produktion sind daher nur elektronische Detektoren geeignet. Der Kontrast der aufgenommenen Röntgenaufnahmen entsteht durch die unterschiedliche Absorption der Strahlung durch das geprüfte Material und mögliche Einschlüsse und Defekte.



Abbildung 2.1: Prinzip der Durchstrahlungsprüfung

Bei der Durchstrahlungsprüfung ist die kleinste detektierbare Defektgröße, wie auch bei anderen optischen Verfahren, unter anderem durch die Größe der Strahlungsquelle und den Abständen zwischen Quelle, Prüfgut und Detektor begrenzt. Eine Röntgenröhre besitzt keinen punktförmigen, sondern einen ausgedehnten Brennfleck. Daher kommt es, bei mit einer solchen Lichtquelle aufgenommenen Abbildungen, zu einer geometrischen Unschärfe.



Abbildung 2.2: Skizze zur Entstehung der geometrischen Unschärfe

Die Ausdehnung der geometrischen Unschärfe  $U_g$  ist abhängig von der Größe der Strahlenquelle und den Abständen zwischen Strahlenquelle, Objekt und Detektor:

$$U_g = \frac{b}{a}F\tag{2.1}$$

a ist dabei der Abstand zwischen Strahlenquelle und Objekt, <br/>b der Abstand zwischen Objekt und Detektor und F die Ausdehnung der Strahlenquelle [9]. Es ist ersichtlich, <br/>dass größere Abstände zwischen Quelle und Objekt, kleinere Abstände zwischen Objekt und Detektor sowie kleinere Strahlenquellen die Abbildungsschärfe verbessern. Jeder <br/>dieser Ansätze ist jedoch mit Nachteilen verbunden. Eine Verkleinerung der Strahlen-<br/>quelle entspricht einer Verkleinerung des Brennflecks auf der Anode der eingesetzten <br/>Röntgenröhre. Bei konstanter Strahlungsleistung führt somit eine Brennfleckverkleinerung zu einer höheren Wärmestromdichte. Daher sinkt die mögliche Leistung einer Röntgenröhre mit der Größe ihres Brennflecks. Gleichzeitig sinkt gemäß dem Abstandsquadratgesetz <br/> $I = \frac{1}{a^2}$  die Intensität der Strahlung mit zunehmendem Abstand <br/>a zwischen Objekt und Quelle ab. Einerseits ist eine Verringerung des Abstands b<br/> zwischen Objekt und Detektor bei Aufnahmen auf bewegtem Material technisch nur begrenzt möglich und ein möglichst großer Abstand erwünscht. Andererseits sinkt mit kleinerem Abstand <br/>b auch die geometrische Vergrößerung. Bei kleinen Defekten und großen Pixelgrößen des Detektors kann dies einen Nachteil darstellen.

Festkörperdetektoren mit der notwendigen räumlichen Auflösung besitzen entweder einen Szintillator, dessen (sichtbares) Licht von einem Halbleiter detektiert wird oder aber einen Halbleiter, welcher direkt durch die Strahlung angeregt wird. Direkt angeregte Halbleiter besitzen zwar eine hohe Ortsauflösung, werden jedoch mit der Zeit von der absorbierten Strahlung geschädigt. Durch die daraus folgenden Wechselintervalle sind diese nicht für ein Industriesystem geeignet. Bei auf Szintillatoren basierenden Detektoren ist eine Umlenkung des von Szintillator emittierten Lichts durch Spiegel möglich. Dadurch kann der strahlungsempfindliche Halbleiter gut abgeschirmt werden. Allerdings stellt bei diesen Detektoren die Ortsauflösung stets einen Kompromiss zur Empfindlichkeit dar: Ein dickerer Szintillator ist empfindlicher, da er mehr Strahlung absorbiert. Gleichzeitig erfahren die emittierten Lichtblitze auf dem Weg zum Halbleiter mehr Streuung, wodurch die Abbildung an Schärfe verliert. Daher hat ein solcher Detektor mit hoher Ortsauflösung nur eine begrenzte Empfindlichkeit [9].

Bei den durchgeführten Untersuchungen kam ein Zeilen-Szintillationsdetektor des Herstellers Hamamatsu, Typ C10650, mit einer räumlichen Auflösung von 48  $\mu m$  zum Einsatz. Im Gegensatz zu einem einfachen Zeilendetektor besitzt dieser 128 Pixelreihen, deren Signale synchron zur Materialbewegung integriert werden. Dies führt zu einer deutlichen Steigerung der Empfindlichkeit. Gleichzeitig muss die Objektgeschwindigkeit genau bekannt sein, um eine Verzerrung der Abbildung zu vermeiden. Als Röntgenquelle diente eine Feinfokusröntgenröhre des Herstellers Comet mit einem Brennfleckdurchmesser von 0,3 mm. Die Beschleunigungsspannung betrug 45 kV bei 3 mA Anodenstrom. Die Verlustleistung beträgt somit etwa 132 W. Im Brennfleck entspricht dies einer durchschnittlichen Leistungsdichte von etwa 187  $kW/cm^2$ . Das Material wurde mit einer geringen Geschwindigkeit von 0,2 m/min bewegt. In dieser Konfiguration konnten Defekte der gesuchten Größenordnung erkannt werden.



Abbildung 2.3: Röntgenaufnahme von künstlichen Referenzfehlern (125 $\mu m$ breite Nuten) bei 0,2m/minMaterialgeschwindigkeit

Wie in Abbildung 2.3 ersichtlich, ist eine 20  $\mu m$  tiefe und ca. 125  $\mu m$  breite Nut nur bedingt detektierbar. Die nachfolgende 40  $\mu m$  tiefe Nut ist vollständig und klar erkennbar. Zur Verbesserung der Empfindlichkeit wäre eine stärkere Belichtung wünschenswert. Die 20  $\mu m$  tiefe Nut entspricht hinsichtlich der Querschnittsreduktion in ihrer Größenordnung den gesuchten Einschlüssen. Da diese bereits bei der angewendeten Strahlungsleistung nur bedingt zu erkennen ist, kann die Belichtung nicht weiter reduziert werden. Um das Verfahren bei Geschwindigkeiten bis zu 1000 m/min anwenden zu können, wäre daher eine Steigerung der Strahlungsleistung um mindestens den Faktor 5000 nötig. Gleichzeitig haben Vergleichsmessungen mit einer Röntgenröhre zur radiometrischen Dickenmessung mit einem 3 mm großen Brennfleck gezeigt, dass von den abgebildeten Nuten nur solche mit einer Breite ab 80  $\mu m$  dargestellt werden konnten. Bei einer Mikrofokusröhre würde eine Steigerung der Leistung um den Faktor 5000 zu einem Anodenstrom von 15 A und einer durchschnittlichen Leistungsdichte im Brennfleck von 935  $MW/cm^2$  führen. Eine solche Leistungsdichte führt innerhalb kürzester Zeit zur Zerstörung jedes verfügbaren Anodenmaterials. Eine für den Dauerbetrieb ausgelegte Röntgenquelle mit geeigneter Leistung und Geometrie ist daher nicht wirtschaftlich realisierbar. Somit ist mit den aktuell verfügbaren technischen Mitteln kein wirtschaftlicher Einsatz dieses Verfahrens für die genannte Prüfaufgabe möglich.

#### 2.1.2 Ultraschallprüfung

Ein anderes weit verbreitetes Verfahren zur Detektion innerer Einschlüsse ist die Ultraschallprüfung. Üblich ist eine Ein- und Auskopplung des Schalls mittels eines flüssigen Koppelmittels. Beispielsweise erfolgt die Ultraschallprüfung von Grobblech in einem Wasserbad oder unter einem kräftigen Wasserstrom. In beiden Fällen gleiten einzeln gelagerte Ultraschallköpfe auf Verschleißschuhen in möglichst kleinem Abstand über die Materialoberfläche. Ein solche Form der Ankopplung wäre für Feinstblech auf Grund der möglichen Beschädigungen der Oberfläche und der Materialgeschwindigkeit nicht anwendbar. Eine berührungslose Art der Ein- und Auskopplung von Ultraschall in elektrisch leitfähiges Material ohne Beeinträchtigung von dessen Oberfläche sind elektromagnetische Schallwandler (EMAT). Diese können auf ein Koppelmittel verzichten, da sowohl die Übertragung der Kräfte für das Anregen einer Schallwelle als auch die Detektion von Schallwellen im Material elektromagnetisch erfolgen. Hierfür wird das Material von einem Permanentoder Elektromagneten magnetisiert. Durch eine im Magnetfeld dieses Magneten über der Materialoberfläche liegende Spule werden nun zusätzlich Wirbelströme im Material induziert. Durch das äußere Magnetfeld wirkt auf diese eine Lorentz-Kraft, welche Schallwellen im Material anregt. Ist das Material ferromagnetisch, kann zusätzlich der Effekt der Magnetostriktion zur Schalleinkopplung genutzt werden: Durch das Anlegen eines äußeren Magnetfelds wird die Lage der magnetischen Dipole im Material verändert. Dadurch kommt es zu einer Deformation des Materials. Handelt es sich bei dem angelegten Magnetfeld um ein Wechselfeld, können im Material Schallwellen angeregt werden.

Die Detektion der angeregten Schallwellen findet in beiden Fällen über die jeweils inversen Mechanismen statt.

Ein Nachteil von EMATs ist deren Größe. Ein kompakter EMAT-Prüfkopf mit einem Durchmesser von 10 mm besitzt eine Fläche von etwa 78,5  $mm^2$ . Im Vergleich dazu hätte ein Defekt mit einem Durchmesser von 100  $\mu m$  eine Querschnittfläche von 0,007  $mm^2$ . Selbst in dem Fall, dass der Defekt jeglichen Ultraschall absorbiert, würde seine Anwesenheit bei einer Schwächungsmessung im Rahmen einer Durchschallungsprüfung höchstens zu einer Verringerung der Signalamplitude um ca. 0,009 % führen. Da die erwarteten Schwankungen durch die Materialstruktur, Variationen des Luftspalts und Abweichungen

der einzelnen elektrischen Pulse untereinander deutlich über diesem Wert liegen, ist keine Detektion von Einschlüssen dieser Größenordnung mittels Schwächungsmessung möglich. Eine Prüfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren senkrecht zur Bandoberfläche ist ebenfalls nicht praktikabel. Für dieses ist eine klare zeitliche Unterscheidung zwischen dem Echo der Rückseite des Materials und dem Echo eines Defektes nötig. Hinderlich ist hierbei die begrenzte Frequenz des Ultraschalls. Die frequenzabhängige Streuung und Absorption von Ultraschallwellen in einem Material hängt stark von dessen Kornstruktur ab. Bei Stählen ist diese nicht einheitlich, so dass die höchste nutzbare Frequenz stark von der Legierung und der Verarbeitung abhängt. Für das Prüfgut kann von mittleren Korngrößen zwischen  $10 \ \mu m$  und  $20 \ \mu m$  ausgegangen werden. Bei einem anisotropen Material wie Feinstblech ist unterhalb einer Wellenlänge vom 10-fachen des mittleren Korndurchmessers auf Grund von Streuung keine Prüfung mehr möglich. Auch kann bereits ab einer Wellenlänge, welche dem 100-fachen der mittleren Korngröße entspricht, von einer Beeinträchtigung der Prüfung durch Streuung an den Korngrenzen ausgegangen werden. Ausgehend von 10  $\mu m$  großen Körnern entspricht dies, bei einer Schallgeschwindigkeit in Stahl von 5900 m/s, jeweils Frequenzen von 5,9 MHz beziehungsweise 59 MHz.

In der Praxis werden für die Ultraschallprüfung von Stahl meist Frequenzen bis 10 MHz eingesetzt, da sich darüber hinaus die Streuung im Material als störend erweist [10]. Da sich die Stärke des spezifizierten Materials zwischen 100  $\mu m$  und 500  $\mu m$  bewegt, entspricht die kleinste Materialstärke selbst bei 59 MHz Schallfrequenz nur einer Wellenlänge. Eine zeitliche Auflösung von Defekten ist mit einer solchen Konfiguration daher nicht möglich.



Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer Impuls-Echo-Messung quer zum Band

Denkbar wäre eine Impuls-Echo-Messung quer zum Band. Eine solche ist in Abbildung 2.4 am Beispiel einer EMAT-Anregung (1) skizziert. Hierbei werden, je nach Verhältnis zwischen Wellenlänge und Materialstärke, Rayleigh- beziehungsweise Lambwellen (2) angeregt. Diese bewegen sich, ausgehend vom Wandler quer zum Band. An der Bandkante sowie an Defekten (3) kommt es zu Reflexionen (4). Wie beim senkrechten Impuls-Echo-Verfahren weisen auch hier weitere, zeitlich vor dem Rückwandecho liegende Signale auf Defekte hin. Ein dieses Prinzip nutzendes Gerät wurde sowohl im Labor als auch in einer Produktionslinie getestet. Die Anregung und Messung des Schalls erfolgte mittels eines EMAT. Die gepulste, elektrische Magnetisierung und die Anregung erfolgten dabei jeweils von zwei unterschiedlichen Materialseiten. Das Band konnte sich daher bei der Prüfung nicht auf einer Rollenoberfläche befinden, sondern musste zwecks beidseitiger Erreichbarkeit frei gespannt sein. Dabei betrug der Abstand zum Material im Mittel 0,5 mm. Da das Band trotz hoher mechanischer Spannung bei schneller Bewegung zu Schwingen mit deutlich größeren Amplituden neigt, musste das Messgerät permanent durch eine hochdynamische Verfahrung nachgeführt werden. Die Frequenz des angeregten Schalls lag bei 1,2 MHz, die Breite der Schallkeule bei ca. 100 mm. [8]

Grundsätzlich war das Gerät in der Lage, künstliche Fehler in Form von Bohrungen und größere natürlich Einschlüsse zu detektieren. Allerdings erwies sich die mit dem Messprinzip erreichbare Empfindlichkeit als unzureichend. Luftgefüllte Bohrungen konnten unter Laborbedingungen erst ab einem Durchmesser von 300  $\mu m$  sicher detektiert werden. Gleichzeitig ist die Differenz der Schallimpedanz des Bandmaterials zu typischen Einschlüssmaterialien geringer als zu Luft. Daher sinkt bei echten Einschlüssen der Anteil des reflektierten Schalls und somit die Empfindlichkeit des Prüfsystems. Auch kam es bei höheren Wiederholraten bereits bei unter 50 Hz zu störenden Mehrfachdetektionen der Rückwandechos. Dadurch war keine Steigerung der Wiederholrate auf über 120 Hz möglich, was für eine vollständige Bandabdeckung bei maximaler Anlagengeschwindigkeit notwendig wäre. Durch diese Einschränkungen hat sich das Prüfverfahren als nicht für die vorliegende Prüfaufgabe geeignet erwiesen [8].

#### 2.2 Magnetisches Streuflussverfahren

#### 2.2.1 Magnetismus

Der Begriff des Magnetismus beschreibt magnetische Kräfte, welche auf Materialien und Ladungen wirken können. Je nach deren Beschaffenheit und relativer Bewegung kommt es dabei zu sehr unterschiedlichen Ausprägungen dieser Wechselwirkungen.

Allgemein beschrieben wird der Magnetismus durch die Elektrodynamik, welche einen Zusammenhang zwischen magnetischen und elektrischen Feldern herstellt. Dieser wird durch die Maxwell-Gleichungen definiert [11]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \tag{2.2}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \tag{2.3}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \tag{2.4}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{2.5}$$

Bei  $\vec{D}$  handelt es sich um die elektrische Flussdichte, bei  $\rho$  um die Ladungsdichte und bei  $\vec{H}$ um die magnetische Feldstärke.  $\vec{J}$  stellt die Stromdichte,  $\vec{E}$  die elektrische Feldstärke und  $\vec{B}$  die magnetische Flussdichte dar. Für die magnetische Feldstärke und die magnetische Flussdichte gilt dabei folgender Zusammenhang:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \tag{2.6}$$

Hierbei sind  $\mu_0$  und  $\mu_r$  die magnetischen Permeabilitäten im Vakuum und in Materie. Während es sich bei der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$  um eine Naturkonstante handelt, ist die relative Permeabilität  $\mu_r$  stark material- und feldstärkeabhängig. Im Allgemeinen wird bei festen Stoffen zwischen drei verschiedenen Arten des Magnetismus unterschieden: Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Diamagnetische Stoffe schwächen äußere Magnetfelder in ihrem Inneren ab, für ihre relative Permeabilität gilt somit  $\mu_r < 1$ . Innerhalb paramagnetischer Stoffe werden äußere Magnetfelder hingegen verstärkt. Daher haben diese eine relative Permeabilität  $\mu_r > 1$ . In ferromagnetischen Stoffen ist die Verstärkung von äußeren Magnetfeldern wiederum viel stärker als in paramagnetischen Stoffen. Diese besitzen eine deutlich höhere relative Permeabilität,  $\mu_r >> 1$ . Das unterschiedliche Verhalten wird durch den unterschiedlichen atomaren Aufbau der Stoffe verursacht. Entscheidend dabei ist das magnetische Moment der einzelnen Atome, welches hauptsächlich von der Struktur ihrer Elektronenschalen abhängt: Während der Atomkern ein für diese Betrachtung vernachlässigbar kleines magnetisches Moment aufweist, besitzen die Elektronen (gemäß des Schalenmodells) magnetische Momente, welche von ihren Spins und Bahndrehimpulsen herrühren.

Sind alle Schalen eines Atoms vollständig mit Elektronen besetzt, gleichen sich deren magnetische Momente nach außen hin aus. Setzt man solche Atome einem äußeren Magnetfeld aus, kommt es, ähnlich einem mechanischen Kreisel, zur Larmorpräzession. Dabei präzediert das Atom um die Richtung des äußeren Magnetfelds. Dies führt zur Bildung magnetischer Dipole, welche dem äußeren Feld entgegengerichtet sind. Eine anschauliche Vorstellung ist die Induktion eines dem äußeren Feld entgegengesetzen magnetischen Moments gemäß der Lenzschen Regel. Daher werden äußere Felder abgeschwächt und ein solcher Stoff ist somit diamagnetisch.

Grundsätzlich tritt der Effekt der Abschwächung äußerer Felder durch die Larmor-Präzession nicht nur in dia- sondern auch in para- und ferromagnetischen Stoffen auf. Allerdings überwiegen bei den beiden letztgenannten Effekte, welche das Magnetfeld in deren Innerem verstärken.

Atome mit nicht vollständig besetzten Schalen besitzen im Gegensatz zu solchen diamagnetischer Stoffe ein magnetisches Moment. Deren Ausrichtung ist zunächst gleichverteilt. Werden sie einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, richten sie sich mit zunehmender Feldstärke an diesem aus, wobei parallele oder antiparallele Orientierungen möglich sind. Da sich mehr Atome parallel als antiparallel zum Magnetfeld ausrichten, wird dieses verstärkt. Bei den meisten Stoffen haben die Atome jedoch nur schwache Wechselwirkungen untereinander. Deren Energie liegt auch bei Normalbedingungen unterhalb der thermischen Energie. Daher kommt es zu keiner dauerhaften Ausrichtung der Atome und der Anteil der parallel zum äußeren Feld ausgerichteten Teilchen entspricht einem thermischen Gleichgewicht. In Folge dessen ist die Verstärkung des Magnetfelds innerhalb solcher Stoffe nur gering und nimmt mit steigender Temperatur weiter ab. Auch verschwindet das Feld in deren Inneren unverzüglich mit einer Deaktivierung des äußeren Feldes, da sich die Atome durch thermische Bewegung erneut vollständig zufällig ausrichten. Stoffe mit diesem Verhalten sind somit paramagnetisch.

Bei einer kleinen Gruppe von Stoffen sind Atome mit nicht vollständig besetzten Schalen zusätzlich aneinander ausgerichtet. Durch quantenmechanische Zusammenhänge ist darin eine antiparallele Orientierung von deren magnetischen Momenten energetisch ungünstig. Daher kommt es auch ohne äußere Felder in kleinen Bereichen des Materials, den Weisssche Bezirken, zu einer vollständig parallelen Ausrichtung der magnetischen Momente. Da die Weissschen Bezirke jedoch untereinander zufällig ausgerichtet sind, gleichen sich deren Felder ohne äußeres Magnetfeld aus. Wird ein solches angelegt, verschieben sich die Grenzen der Weissschen Bezirke, Bloch-Wände genannt, zu Gunsten der am äußeren Feld ausgerichteten und somit energetisch günstigsten. Auf dieser Weise bewirkt auch ein schwaches äußeres Feld die Ausrichtung einer großen Anzahl Atome. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Verstärkung äußerer Magnetfelder. Daher sind solche Stoffe ferromagnetisch. Werden ferromagnetische Stoffe auf hohe Temperaturen erwärmt, kann die thermische Energie der Atome die Energie der Ausrichtung innerhalb der Weissschen Bezirke übersteigen. Oberhalb der Curie-Temperatur, welche beispielsweise für Eisen bei 768 °C liegt, verhalten sich ferromagnetische Stoffe paramagnetische. Auch bleibt die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe im Gegensatz zu dia- und paramagnetischen Stoffen auch nach Entfernen des äußeren Magnetfelds zum Teil erhalten, was als Remanenz bezeichnet wird: Die Grenzen zwischen den Weissschen Bezirken bewegen sich nicht vollständig in ihre ursprüngliche Lage zurück, so dass nach einer anfänglichen Magnetisierung innerhalb des Materials eine Flussdichte  $B \neq 0$  trotz Abwesenheit externer magnetischer Spannungen (Feldstärke H innerhalb des Materials = 0) vorliegt. Anschaulich dargestellt wird dies in typischen Hysteresekurven von ferromagnetischen Materialien. Eine solche ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt.



Abbildung 2.5: Skizze der Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials [12]

Zu erwähnen sind auch antiferro- und ferrimagnetische Stoffe. Antiferromagnetische Stoffe besitzen, wie auch ferromagnetische Stoffe, Atome mit einem äußeren magnetischen Moment, welche ebenfalls Weisssche Bezirke mit fester Ausrichtung der magnetischen Momente bilden. Diese sind jedoch im Gegensatz zu ferromagnetischen Stoffen bei benachbarten Atomen antiparallel und die magnetischen Momente der Atome beider Ausrichtungen gleich, daher gleichen sich diese vollständig aus. Somit kommt es in einem äußeren Magnetfeld zwar zu einer Verschiebung der Bloch-Wände und damit zu einer Ausrichtung der Atome, eine Verstärkung des äußeren Magnetfelds findet allerdings nicht statt.

Ferrimagnetische Stoffe besitzen ebenfalls Atome mit einem äußeren magnetischen Moment, welche in Weissschen Bezirken antiparallel zueinander ausgerichtet sind. Die benachbarten Atome besitzen jedoch unterschiedliche magnetische Momente, so dass sich diese nicht vollständig ausgleichen. Es kommt zu einer Verstärkung äußerer Magnetfelder und der Ausbildung einer Remanenz. Allerdings sind beide Effekte schwächer als bei ferromagnetischen Stoffen. Neben ferromagnetischen Materialien besitzen auch ferrimagnetische Stoffe in Form von Ferriten eine große technische Bedeutung. Die Permeabilität von sowohl ferro- als auch ferrimagnetischen Stoffen ist abhängig von der magnetischen Feldstärke und sinkt bei hohen Feldstärken stark ab. Ein immer größerer Anteil der weissschen Bezirke richtet sich am äußeren Feld aus, so dass dieses für eine weitere Steigerung der Feldstärke immer höhere Werte annehmen muss. Der Zustand, in dem alle Atome entlang des äußeren Feldes ausgerichtet sind, wird als Sättigung bezeichnet. Gegenüber weiteren Steigerungen der Feldstärke über die Sättigungsfeldstärke hinaus besitzt das Material eine relative Permeabilität von  $\mu_r = 1$  [13] [14].

#### 2.2.2 Magnetischer Streufluss

Magnetische Felder können anschaulich durch magnetische Feldlinien beschrieben werden. Sie geben die Richtung und, über ihre Dichte, die Kraft wieder, welche das Magnetfeld in jedem Punkt im Raum auf einen magnetischen Körper ausübt. Da Magnetfelder gemäß der Maxwell-Gleichung 2.5 nicht divergieren, sind magnetische Feldlinien stets in sich geschlossen und verlaufen stets entlang des Pfades mit der geringsten Reluktanz  $R_m$ . Diese lässt sich gemäß der Gleichung

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \tag{2.7}$$

bestimmen, wobei es sich bei l um die Länge und A um die Querschnittfläche des magnetischen Kreises handelt. Hieraus ist ersichtlich, dass Stoffe mit einer hohen relativen Permeabilität  $\mu_r$  eine niedrige Reluktanz besitzen. Somit werden Magnetfelder in ferromagnetischen Stoffen geführt. An den Grenzflächen zwischen Stoffen mit unterschiedlicher relativer Permeabilität kommt es zudem zu einer Brechung der Feldlinien: Aus der Maxwell-Gleichung 2.5 folgt die Stetigkeit der Normalkomponente der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$ . Gleichzeitig ist die Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  bei Abwesenheit von Strömen in der Grenzfläche gemäß der Maxwell-Gleichung 2.3 ebenfalls stetig. Auf dieser Grundlage lässt sich das Brechungsgesetz für magnetische Feldlinien aufstellen:

$$\frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \tag{2.8}$$

Eine anschauliche Darstellung liefert Abbildung 2.6:



Abbildung 2.6: Feldlinienverlauf beim Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Permeabilitäten [15]

 $\alpha_1$  beziehungsweise  $\alpha_2$  sind die Winkel der Feldlinie zum Normal der Oberfläche und  $\mu_1$ und  $\mu_2$  die relativen Permeabilitäten der beiden Stoffe, welche die Grenzfläche bilden. Es ist ersichtlich, dass magnetische Feldlinien aus der Luft stets in spitzen Winkeln in Stoffe mit hoher relativer Permeabilität übergehen. Abbildung 2.7 stellt den Verlauf der Feldlinien eines Magnetfelds dar, in welchem sich ein ferromagnetischer Körper befindet:



Abbildung 2.7: Skizze des Feldlinienverlaufs in einem sich im Magnetfeld befindlichen ferromagnetischen Körper [16]

Bis auf Ein- und Austrittflächen verläuft das Magnetfeld innerhalb des Materials laminar. Da die Feldlinien in dem skizzierten Beispiel fast senkrecht in das Material eintreten, kommt es zu keiner starken Brechung.

Eine innerhalb des Materials liegende Ungänze wie beispielsweise ein Riss, ein Loch oder eine Pore, welche eine lokale Änderung des magnetischen Querschnitts darstellt, wird von den meisten Feldlinien umlaufen, während nur wenige durch die Ungänze weiterlaufen. Dies führt zu einer Verdichtung der Feldlinien an deren Rändern. Im Bereich der Ungänze nimmt die Reluktanz des Materials somit stark zu, da lokal sowohl der magnetische Querschnitt verkleinert als auch die relative Permeabilität reduziert sind. Ein Teil der Feldlinien tritt daher, wie in Abbildung 2.8 dargestellt, am Ort der Ungänze aus der Materialoberfläche aus. Das sich so auf der Materialoberfläche ausbildende Magnetfeld wird als magnetischer Streufluss bezeichnet.



Abbildung 2.8: Skizze des Feldlinienverlaufs in einem sich im Magnetfeld befindlichen ferromagnetischen Körper mit Oberflächenriss [16]

Die Feldlinien werden beim Ein- und Austritt aus dem ferromagnetischen Material gebrochen. Dadurch ist das magnetische Streufeld deutlich größer als die ihm zu Grunde liegende Ungänze. Dies bildet die Grundlage für die Detektion von Materialfehlern mittels magnetischer Streuflussprüfung. Für eine möglichst ausgeprägte magnetische Brechung sollte gemäß des Ausdrucks 2.8 ein möglichst großer Permeabilitätsunterschied an der Grenzfläche angestrebt werden. Die als  $\mu = \frac{B}{H}$  mit der Induktion B und der Feldstärke H definierte Permeabilität wiederum ist bei ferri- und ferromagnetischen Materialien eine Funktion der Feldstärke und entspricht der Steigung der in Abbildung 2.5 skizzierten Hysteresekurve. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich die Magnetisierung des Werkstücks innerhalb der rot hinterlegten Bereiche der Hysteresekurve bewegen sollte.

Die Ausprägung des magnetischen Streuflusses hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu gehören die Eigenschaften des geprüften Materials, die Feldstärke des angelegten Feldes, die Geometrie des Fehlers, seine Ausrichtung zum Magnetfeld sowie seine Lage innerhalb des Materials. Zudem sind die Geometrien natürlicher Fehler häufig komplex und deren relative Permeabilität unbekannt [15] [17]. Daher dienen die im Folgenden dargestellten Ansätze lediglich zur Abschätzung der erwarteten Streufelder. Genauere Daten zu den Streufeldern von künstlichen und in erster Linie von natürlichen Fehlern in Weißblech können nur empirisch gewonnen werden. Drei Ansätze zur theoretischen, analytischen Berechnung des magnetischen Streuflusses einfacher Fehlergeometrien haben Verbreitung gefunden: Der Ansatz von Förster, von Shcherbinin und Pashagin sowie von Edwards und Palmer.

Försters Berechnung beziehen sich zunächst auf den Streufluss einer rechteckigen, unendlich tiefen und langen Nut (vollständige Durchtrennung). Deren Feldverlauf entspricht dabei über der Werkstückoberfläche Halbkreisen, deren Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt der Nut M an der Werkstückoberfläche übereinstimmt. Ein solches Feld kann durch das Feld eines stromdurchflossenen, zylindrischen Leiters nachgebildet werden, dessen Durchmesser der Nutbreite und dessen Mittelpunkt dem Mittelpunkt der Nut entsprechen. Darauf beruht die Berechnung des Streuflusses einer Nut mit endlicher Tiefe. Hierfür wird, wie in Abbildung 2.9 dargestellt, auf deren Boden ein weiterer Leiter angenommen, welcher von einem entgegengesetzten, gleich großen Strom durchflossen wird wie der an der Werkstückoberfläche angenommene Leiter.



Abbildung 2.9: Skizze der Anordnung zur Berechnung des Streuflusses einer Nut nach Förster

Aus dieser Betrachtung resultieren folgende Ausdrücke für die tangentiale Streuflusskomponente  $H_x$  und die normale Streuflusskomponente  $H_y$  in Abhängigkeit vom parallelen Abstand x vom Nutmittelpunkt und vom senkrechten Abstand y von der Werkstückoberfläche:

$$H_x = H_s \cdot \frac{s}{\pi} \cdot \left[ \frac{y}{x^2 + y^2} - \frac{y + T}{x^2 + (y + T)^2} \right]$$
(2.9)

$$H_y = H_s \cdot \frac{s}{\pi} \cdot \left[ \frac{x}{x^2 + y^2} - \frac{x}{x^2 + (y+T)^2} \right]$$
(2.10)

Bei  $H_s$  handelt es sich dabei um die magnetische Feldstärke innerhalb der Nut, welche in folgendem Zusammenhang mit der Feldstärke im umgebenden Material  $H_a$  steht:

$$H_s = H_a \cdot \frac{\frac{2T}{s} + 1}{\frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{2T}{s} + 1}$$
(2.11)

[18]

Im Gegensatz zu Förster leiten Shcherbinin und Pashagin Ausdrücke für den Streufluss von Nuten mit nicht nur endlicher Tiefe sondern auch endlicher Länge her. Die in den nachfolgenden Ausdrücken verwendeten Maße und Koordinaten werden in Abbildung 2.10 verdeutlicht:



Abbildung 2.10: Skizze der Anordnung zur Berechnung des Streuflusses einer Nut nach Shcherbinin und Pashagin

Da das geprüfte Werkstück sehr groß gegenüber den Ausmaßen der betrachteten Nut ist, werden die Wände der Nut als magnetische Monopole betrachtet. Deren Dichte wird je nach Anwendung als konstant oder abhängig von der Position entlang der Nutlänge angenommen. Unter der Voraussetzung einer konstanten magnetischen Ladungsdichte gilt für diese [19]:

$$\sigma = \frac{H_s}{2\pi} \tag{2.12}$$

Die Feldstärke innerhalb der Nut ${\cal H}_s$ kann dabei Gleichung 2.11 entnommen werden.

Es gelten folgende Ausdrücke für die beiden tangentialen Streuflusskomponenten  $H_x$  (quer zur Nut) und  $H_z$  (parallel zur Nut) sowie die normale Streuflusskomponente  $H_y$ :

$$H_{x} = \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{(y+T)(z+l)}{(x+\frac{s}{2})\rho_{11}}\right) - \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{y(z+l)}{(x+\frac{s}{2})\rho_{12}}\right) - \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{(y+T)(z-l)}{(x+\frac{s}{2})\rho_{23}}\right) + \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{y(z-l)}{(x+\frac{s}{2})\rho_{14}}\right) - \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{(y+T)(z+l)}{(x-\frac{s}{2})\rho_{21}}\right) + \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{y(z+l)}{(x-\frac{s}{2})\rho_{22}}\right) + \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{(y+T)(z-l)}{(x-\frac{s}{2})\rho_{23}}\right) - \frac{\sigma}{4\pi} \arctan\left(\frac{y(z-l)}{(x-\frac{s}{2})\rho_{24}}\right)$$
(2.13)

$$H_{y} = \frac{\sigma}{8\pi} \ln \frac{[\rho_{11} - (z+l)][\rho_{12} + (z+l)]}{[\rho_{11} + (z+l)][\rho_{12} - (z+l)]} - \frac{\sigma}{8\pi} \ln \frac{[\rho_{13} - (z-l)][\rho_{14} + (z-l)]}{[\rho_{13} + (z-l)][\rho_{14} - (z-l)]} - \frac{\sigma}{8\pi} \ln \frac{[\rho_{21} - (z+l)][\rho_{22} + (z+l)]}{[\rho_{21} + (z+l)][\rho_{22} - (z+l)]} + \frac{\sigma}{8\pi} \ln \frac{[\rho_{23} - (z-l)][\rho_{24} + (z-l)]}{[\rho_{23} + (z-l)][\rho_{24} - (z-l)]}$$
(2.14)

$$H_z = \frac{\sigma}{4\pi} \ln \frac{[\rho_{13} + (y+T)][\rho_{12} + y]}{[\rho_{14} + y][\rho_{11} + (y+T)]} - \frac{\sigma}{4\pi} \ln \frac{[\rho_{22} + y][\rho_{23} + (y+T)]}{[\rho_{21} + (y+T)][\rho_{24} + y]}$$
(2.15)

Dabei stehen  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{12}$ ,  $\rho_{13}$ ,  $\rho_{14}$ ,  $\rho_{21}$ ,  $\rho_{22}$ ,  $\rho_{23}$  und  $\rho_{24}$  für folgende Ausdrücke:

$$\rho_{11} = \sqrt{(x + \frac{s}{2})^2 + (y + T)^2 + (z + l)^2}$$
(2.16)

$$\rho_{21} = \sqrt{(x - \frac{s}{2})^2 + (y + T)^2 + (z + l)^2}$$
(2.17)

$$\rho_{12} = \sqrt{(x + \frac{s}{2})^2 + y^2 + (z + l)^2}$$
(2.18)

$$\rho_{22} = \sqrt{\left(x - \frac{s}{2}\right)^2 + y^2 + (z+l)^2} \tag{2.19}$$

$$\rho_{13} = \sqrt{(x + \frac{s}{2})^2 + (y + T)^2 + (z - l)^2}$$
(2.20)

$$\rho_{23} = \sqrt{(x - \frac{s}{2})^2 + (y + T)^2 + (z - l)^2}$$
(2.21)

$$\rho_{14} = \sqrt{\left(x + \frac{s}{2}\right)^2 + y^2 + (z - l)^2} \tag{2.22}$$

$$\rho_{24} = \sqrt{(x - \frac{s}{2})^2 + y^2 + (z - l)^2} \tag{2.23}$$

[20]. Die im Vergleich zum Ansatz von Förster aufwendige Berechnung kann auch auf Nuten mit großem Verhältnis zwischen Nutbreite s und Nuttiefe T angewendet werden [18]. Sowohl natürliche als auch mittels Laserbearbeitung hergestellte Ungänzen in Feinstblech weisen typischerweise größere Breiten als Tiefen auf. Auch haben natürliche Fehler häufig Längen, die nicht mehr als eine Größenordnung über deren Tiefe und Breite liegen. Dadurch ist deren Modellierung durch eine Nut mit endlicher Länge vorzuziehen.

Edwards und Palmer betrachten halbelliptische Nuten endlicher Länge. Dabei gehen sie zunächst von elliptischen Hohlräumen innerhalb eines konstant magnetisierten ferromagnetischen Materials aus. Die magnetische Feldstärke innerhalb eines solchen Hohlraums ist ebenfalls konstant. In der direkten Umgebung des Hohlraums ist selbst bei großem Verhältnis zwischen Tiefe und Breite  $(\frac{T}{s} \approx \mu_r)$  die magnetische Flussdichte deutlich geringer als im umliegenden Material. Für kleinere Verhältnisse zwischen Tiefe und Breite nimmt die Feldstärke im Bereich der Hohlraums weiter ab. Bei den in der Streuflussprüfung üblichen Magnetisierungsfeldstärken ist daher nicht mehr davon auszugehen, dass im Bereich des Hohlraums die Sättigungsfeldstärke des Materials erreicht wird. Die relative Permeabilität  $\mu_r$  im Bereich der Nut wird daher als konstant angenommen. Ein Lösungsansatz mit magnetischen Spiegelladungen, veranschaulicht in Abbildung 2.11, ergibt für an der Materialoberfläche liegende semielliptische Nuten die selbe innere Feldstärke wie für gleich große elliptische Hohlräume, die sich innerhalb des Materials befinden.


Abbildung 2.11: Skizze der durch Edwards und Palmer betrachteten Defektgeometrien

Deren Streufeld kann in guter Näherung durch rechteckige Nuten mit konstanter magnetischer Ladungsdichte an deren Wänden approximiert werden. Daher ist Shcherbinin und Pashagins Ansatz, speziell unter der Annahme einer konstanten Ladungsdichte an den Nutwänden, dazu geeignet, den erwarteten Streufluss von Nuten näherungsweise zu bestimmen. Dabei sind, wie von Edwards und Palmer dargestellt, die analytisch berechneten Streuflüsse einer rechteckigen und einer semielliptischen Nut näherungsweise gleich. Ursächlich dafür ist die nahezu konstante Polarisation innerhalb der Nut in ihrem oberen Teil. Gleichzeitig hängt das Streufeld im Nahbereich der Nut hauptsächlich von deren Polarisation an der Materialoberfläche ab. Durch den zu  $\frac{1}{r}$  proportionalen Abfall der magnetischen Flussdichte hat die Polarisation im unteren Teil der Nut lediglich schwachen Einfluss auf das Streufeld. Somit ist davon auszugehen, dass kleine Abweichungen von der rechteckigen Form wie beispielsweise abgerundete innere Ecken nur geringen Einfluss auf die Größenordnung des Streufelds der Nut besitzen. Diese Näherung liefert stets einen in Abhängigkeit von tatsächlicher Defektgeometrie und Luftspalt zu niedrigen Wert für den Streufluss. In der praktischen Anwendung ist daher stets von größeren Feldstärken und damit von günstigeren Voraussetzungen auszugehen. [21]

## 2.3 Magnetfeldsensoren

Zur Detektion der Streuflüsse von Defekten werden geeignete Magnetfeldsensoren benötigt. Die geringe Größe der gesuchten Fehler im Vergleich zu den Maßen des untersuchten Materials erfordert eine hohe räumliche Auflösung. Somit würde in einem Industriesystem eine große Anzahl an Sensoren verbaut. Diese sind, auf Grund der Nähe zum bewegten Prüfgut, unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt und durch möglichen Bandkontakt als potentielle Verschleißteile anzusehen. Sie müssen eine hohe Empfindlichkeit besitzen und möglichst robust sowie in großer Menge zu vertretbaren Kosten verfügbar sein. Da bewegtes Material geprüft werden soll, sind die vom Prüfgerät aufzunehmenden Felder als veränderlich anzusehen.

### 2.3.1 Spulen

Spulen sind einfache, sehr robuste und je nach Frequenz empfindliche Sensoren für veränderliche Magnetfelder. Eine Fertigung in geeigneten Abmessungen wäre sowohl mit Luft- als auch mit einem ferromagnetischem Kern möglich. Speziell beim Einsatz eines aus der Spule hervorstehenden Kerns ergäbe sich eine sehr hohe Beständigkeit gegenüber mechanischer Beschädigung durch Materialkontakt. Die in einer Spule mit N Windungen auf Grund einer Flussänderung  $\dot{\Phi}$  induzierte Spannung  $U_{ind}$  ergibt sich aus dem in Gleichung 2.4 beschrieben Induktionsgesetz.

$$U_{ind} = -N \cdot \dot{\Phi} \tag{2.24}$$

Bei niedrigeren Frequenzen nimmt die Empfindlichkeit von Spulen deutlich ab. Da auch sich langsam bewegendes Material ohne Empfindlichkeitseinbußen untersucht werden soll, sind Halbleitersensoren besser für die vorliegende Prüfaufgabe geeignet. Die angedachte räumliche Sensordichte würde zudem nur senkrecht ausgerichtete Spulen zulassen. Diese würden daher hauptsächlich zur Werkstückoberfläche senkrechten Streufluss detektieren. Durch die magnetische Brechung sind in der Nähe der Prüfgutoberfläche senkrechte und mit steigendem Abstand zunehmend parallele Streuflusskomponenten zu erwarten. Daher sind Sensoren mit einer zur Werkstückoberfläche parallelen Empfindlichkeitsrichtung vorteilhaft für einen möglichst großen Luftspalt.

#### 2.3.2 Magnetooptische Sensoren

Magnetooptische Sensoren auf Grundlage des Faraday-Effekts sind kommerziell verfügbar. Der Faraday-Effekt beschreibt die Drehung der Polarisationsebene von linear polarisiertem Licht in einem von einem Magnetfeld durchsetzten transparenten Material. Durch den Einsatz von auf die Anwendung optimierten Stoffen können so Magnetfelder mittels gewöhnlicher optischer Kameras abgebildet werden. Dadurch sind Sensoren mit sehr hoher räumlicher Auflösung und Bandbreite realisierbar. Die Empfindlichkeit ist jedoch auch bei optimierten Materialien vergleichsweise gering. Beim Einsatz in einem Industriesystem wären daher ein sehr kleiner Luftspalt erforderlich. Zudem ist das optisch aktive Material, welches sich direkt an der Sensoroberfläche befindet, sehr empfindlich für mechanische Beschädigungen. Daher sind solche Sensoren für eine Anwendung in der Produktion nicht geeignet. Praktikabel ist jedoch der Laboreinsatz. Eine Magnetfeldkamera Typ mageye des Herstellers matesy dient als Referenzsystem im Labor und stellt eine Alternative zur Magnetpulverprüfung dar.

### 2.3.3 Hall-Sensoren

Hall-Sensoren sind Sensoren für magnetischen Fluss. Sie erzeugen eine elektrische Spannung, welche proportional zur der den Sensor durchsetzenden Induktion ist. Fließt, wie in Abbildung 2.12 skizziert, ein in physikalischer Stromrichtung dargestellter Strom I durch einen flachen Leiter, kommt es über den gesamten Leiterquerschnitt zu einer gleichmäßigen Elektronenbewegung. Wird der Leiter von einem äußeren magnetischen Fluss  $\vec{B}$  durchsetzt, wirkt auf die sich durch den Leiter bewegenden Elektronen eine Lorentzkraft. Mit einer Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Leiter  $v_{dr}$  und einem zum Leiter normalen Magnetfeld beträgt diese:

$$F_L = (-e) \cdot \upsilon_{dr} \cdot \left| \overrightarrow{B} \right| \tag{2.25}$$

Durch die Lorentzkraft werden die sich durch den Leiter bewegenden Elektronen abgelenkt, wodurch quer zum Leiter eine Spannung gemessen werden kann. Diese stellt sich so ein, dass sich die dadurch wirkende Coulombkraft  $F_C$  und die Lorentzkraft  $F_L$  ausgleichen. Die quer zum Leiter gemessene Hall-Spannung  $U_H$  ergibt sich bei einem Leiter mit der Breite b daher aus Gleichung 2.26.

$$F_L = F_C$$
  

$$\Leftrightarrow (-e) \cdot v_{dr} \cdot \left| \overrightarrow{B} \right| = (-e) \cdot \frac{U_H}{b}$$
  

$$\Leftrightarrow U_H = v_{dr} \cdot B \cdot b$$
(2.26)

Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Leiter ist materialabhängig und ergibt sich aus der Elektronendichte im Leiter n und der Stromdichte j:

$$\upsilon_{dr} = \frac{j}{n \cdot (-e)} \tag{2.27}$$

Fortschritte in der Halbleitertechnik ermöglichten auf Grundlage dieses bereits 1879 von E. H. Hall entdeckten Prinzips die Herstellung von zunehmend empfindlicheren Magnetometern. [22]



Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Hall-Effekts

Hall-Sensoren werden bereits erfolgreich für zerstörungsfreie Prüfaufgaben eingesetzt. Die meisten kommerziellen Hall-Sensoren besitzen einen, dem eigentlichen Hall-Element nachgeschalteten, internen Verstärker. Mit diesem liegen typische Empfindlichkeiten zwischen 30  $\frac{mV}{mT}$  und 200  $\frac{mV}{mT}$ . [23] [24]

### 2.3.4 GMR-Sensoren

GMR-Sensoren besitzen eine gegenüber Hall-Sensoren verbesserte Empfindlichkeit bei besserer Bandbreite, besserem Rauschverhalten und geringerer Leistungsaufnahme. Typische Empfindlichkeiten kommerzieller GMR-Gradiometer liegen bei maximaler Betriebsspannung zwischen 70  $\frac{mV}{mT}$  und 300  $\frac{mV}{mT}$ . Diese wird jedoch ohne internen Verstärker durch das Sensorelement selbst erzielt. [25] Typische Anwendungen, für welche diskrete Hall- und GMR-Sensoren gefertigt werden, sind die Drehzahl- oder Winkelmessung an Zahnrädern, Zahnriemenscheiben oder Polringen. Hier ermöglichen GMR-Sensoren, verglichen mit Hall-Sensoren, größere Abstände zum rotierenden Teil [26]. Des Weiteren reagieren GMR-Sensoren auf zum Die parallele Flusskomponenten, Hall-Sensoren jedoch auf zur Sensorfläche senkrechte. Da ein möglichst großer Luftspalt erreicht werden soll, ist die Empfindlichkeitsrichtung von GMR-Sensoren ein weiterer Vorteil. Daher kommen bei der Entwicklung des Prüfsystems GMR-Sensoren zum Einsatz. [27]

Die Grundlage für diese Sensoren bildet der GMR-Effekt. Er beruht auf der unterschiedlichen Streuung von Elektronen am Kristallgitter eines Leiters, dessen Atome ein äußeres magnetisches Moment besitzen, in Abhängigkeit von der Ausrichtung ihres Spins. Die Streuung ist bei paralleler Ausrichtung gering und verstärkt sich bei antiparalleler sowie chaotischer Anordnung der magnetischen Momente zum Spin. Dies führt zu unterschiedlichen mittleren freien Weglängen der Leitungselektronen in Abhängigkeit von der Ausrichtung ihres Spins hinsichtlich der magnetischen Momente der Atome des Leiters. Somit erfährt ein Elektron in Abhängigkeit von dieser Ausrichtung unterschiedliche elektrische Widerstände, da die Leitfähigkeit eines Materials proportional zur mittleren freien Weglänge seiner Leitungselektronen ist. In vielen Leitern ist die mittlere freie Weglänge von Elektronen mit wenigen Nanometern deutlich kürzer als die Spin-Diffusionslänge. Innerhalb dieser behalten Elektronen ihren Spin bei. Der Effekt des, von der Ausrichtung des Elektronenspins zum magnetischen Moment der Leiteratome abhängigen elektrischen Widerstands kann daher bei dünnen Schichten beobachtet werden, deren Dicke kleiner als die Spin-Diffusionslänge ist. Der elektrische Widerstand dünner Schichten aus ferromagnetischen Materialien lässt sich somit für Elektronen mit einer Spinrichtung durch ein äußeres Magnetfeld beeinflussen. Da die Spinrichtung der Elektronen im Leiter zufällig ist, würde eine äußere Widerstandsmessung den entsprechend gewichteten Mittelwert aus den Widerständen ergeben, welche Elektronen der beiden unterschiedlichen Spinrichtungen erfahren. Es wäre nicht möglich, von dem elektrischen Widerstand auf das äußere Magnetfeld zu schließen. Daher werden mindestens zwei dünne ferromagnetische Schichten parallel zueinander angeordnet und durch eine dünne paramagnetische Schicht mit hoher elektrischer Leitfähigkeit getrennt. In Folge des Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida-(RKKY-) Effekts kommt es dabei zu einer Wechselwirkung der magnetischen Momente der beiden ferromagnetischen Schichten. Je nach Dicke der paramagnetischen Schicht richten sich diese

abwechselnd parallel (Gesamtanordnung ferromagnetisch) oder antiparallel (Gesamtanordnung antiferromagnetisch) zueinander aus. Zur Herstellung eines GMR-Sensors wird die Dicke der paramagnetischen Schicht so gewählt, dass es zu einer antiparallelen Ausrichtung der magnetischen Momente der ferromagnetischen Schichten kommt. Äußere Felder können die Richtung der magnetischen Momente der Schichten jedoch weiterhin an sich ausrichten. Bei anschließender Entfernung des äußeren Feldes stellt sich der ursprüngliche Zustand ein. Abbildung 2.13 zeigt die Wirkung äußerer Felder auf eine solche Anordnung: werden die magnetischen Momente der Schichten durch ein äußeres Feld in die selbe Richtung ausgerichtet, steigt der Widerstand für Elektronen einer Spinrichtung zwar an, fällt für Elektronen mit entgegengesetztem Spin jedoch stark ab. Ohne äußeres Feld erfahren Elektronen je nach Spinrichtung in einer der Schichten eine große und in der anderen eine geringe Streuung. Der Gesamtwiderstand der Anordnung wird somit durch äußere Felder verringert.



Abbildung 2.13: Wirkungsweise eines GMR-Sensors [28]

Bei vielen kommerziell erhältlichen GMR-Sensoren, beispielsweise auch bei den untersuchten Sensoren des Herstellers NVE, unterscheidet sich die tatsächliche Umsetzung von der Darstellung der Skizze. Der Stromfluss erfolgt nicht quer zu den Schichten sondern in deren Ebene. Dadurch kann der Widerstand des Sensors stark erhöht werden, was die anschließende Signalaufbereitung vereinfacht. Der Messeffekt kommt durch weitere Streuvorgänge zustande, welche die Elektronen die einzelnen Schichten mehrfach durchlaufen lassen. In Abgrenzung zur dargestellten Topologie (CPP: Current Perpendicular Plane) wird ein solcher Aufbau als CIP (Current In Plane) bezeichnet. Der Messeffekt kann dabei Widerstandsänderungen von über 10% erreichen. [29] Dabei ist der Widerstandsabfall annähernd linear und unabhängig von der Polung des Magnetfelds.

Um Widerstandsänderungen durch Temperatureinflüsse zu kompensieren, können 4 einzelne GMR-Sensoren, wie in Abbildung 2.14 gezeigt, als wheatstonesche Messbrücke verschaltet werden [30]. Zwei der Sensoren sind von äußeren Magnetfeldern abgeschirmt und dienen der Temperaturkompensation. Zur Abschirmung werden Flusskonzentratoren aus Materialien mit besonders hoher Permeabilität eingesetzt, welche gleichzeitig der Aggregation der zu messenden Felder zu den beiden weiteren Sensoren dienen. Diese erzeugen den Messeffekt.



Abbildung 2.14: Schaltbild eines GMR-Magnetometers

Die Mikroskopaufnahme eines solchen Sensors für absolute Felder ist in Abbildung 2.15 dargestellt.



Abbildung 2.15: Mikroskopaufnahme eines GMR-Magnetometers des Herstellers NVE [31]

Ein Beispiel für die Kennlinie eines solchen GMR-Sensors findet sich in Abbildung 2.16.



Abbildung 2.16: Kennlinie eines GMR-Sensors des Herstellers NVE [31]

Die zu messenden Felder besitzen voraussichtlich geringe Feldstärken und kleine Ausmaße und werden durch äußere Felder überlagert. Eine Möglichkeit zur Reduktion der Empfindlichkeit auf äußere Felder stellen Differenzsensoren, welche auch als Gradiometer bezeichnet werden, dar. [32] Diese bestehen wie Absolutmagnetometer aus 4 einzelnen, als wheatstonesche Messbrücke verschalteten, GMR-Sensoren. Auf eine Abschirmung zweier Sensoren wird jedoch verzichtet. Stattdessen werden, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, jeweils zwei Sensoren gruppiert in einem definierten Abstand zueinander angeordnet.



Abbildung 2.17: Schaltbild eines GMR-Gradiometers

Im Gegensatz zu Magnetometern werden alle 4 GMR-Sensoren durch das gemessene Feld beeinflusst. Bei gleicher Feldstärkedifferenz beträgt die Spannungsdifferenz zwischen den Ausgängen daher das doppelte des bei Magnetometern erzielten Wertes. [31] [33]

Bei einer Untersuchung von Defekten mit Gradiometern können keine Daten zu absoluten Feldstärken und somit keine Informationen zum tatsächlichen magnetischen Verhalten der Defekte gewonnen werden. Eine optische Darstellung von Defekten ist unanschaulich, eine automatische Klassifikation von Defekten anhand von Merkmalen aus einer Defektdatenbank wird erschwert.

Allerdings ermöglichen Gradiometer bei einer auf die zu messenden Felder optimierten Geometrie den Einsatz von deutlich höheren Verstärkungsfaktoren in der anschließenden Signalverarbeitung. Dadurch kann die Empfindlichkeit der Messung gesteigert werden. Zusätzlich ist, je nach Verstärkerschaltung und Materialbewegung relativ zum Sensor, eine höhere Signalamplitude gegenüber absoluten Magnetometern erzielbar. [34] [35]

# 3 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit sind die Entwicklung, der Aufbau sowie Erprobung und Validierung eines möglichst empfindlichen und gleichzeitig industrietauglichen Prüfsystems zur Detektion der zuvor dargestellten Einschlüsse. Dieses soll die vollständige Prüfung des Materials auf besonders kleine Einschlüsse ermöglichen, welche bislang nicht zuverlässig erkannt werden können und dadurch die minimale Wandstärke bei Tiefziehteilen begrenzen.

Die Grundlage dazu bildet die Optimierung der signalgenerierenden Prüfsystemkomponenten für diese Aufgabe. Künstliche und natürliche Fehler sollen hierfür empirisch auf die Eigenschaften ihrer Streufelder untersucht werden. Mittels der so gewonnenen Erkenntnisse soll zunächst ein Laborsystem und im Anschluss der Prototyp eines Prüfsystems aufgebaut werden. Dieser wird in einer Produktionslinie eingebaut. Die dabei gewonnenen Daten und zusätzlichen Erkenntnisse bilden die Grundlage für weitere Verbesserungen der Robustheit und Empfindlichkeit. Darüber hinaus soll ein Konzept für die Charakterisierung von Fehlern anhand deren magnetischen Streuflüssen erstellt werden.

# 4 Messaufbau

Eine Grundlage bei der Entwicklung des Prüfsystems ist eine optimale Magnetisierung des Materials sowie die Wandlung der auftretenden Streufelder in analoge Signale, welche anschließend digitalisiert werden können. Das Konzept für ein Prüfsystem besteht aus einem innerhalb eines Magnetjochs angeordneten Sensorarray. Die schematische Darstellung eines solchen Aufbaus ist Abbildung 4.1 dargestellt. Diese zeigt einen U-förmigem Elektromagneten, bestehend aus einem Magnetjoch (2) und einer Spule (1), und ein Array aus Sensoren (3) zur Erfassung von aus dem Material (4) austretendem Streufluss.



Abbildung 4.1: Skizze eines Aufbaus für Streuflussprüfung zur Begriffserklärung

Der Abstand A zwischen dem Magnet beziehungsweise den Sensoren und dem untersuchten Material wird als Luftspalt bezeichnet. Das untersuchte Material hat die Dicke E. Das Joch des Elektromagneten besitzt eine Jochweite C, eine Breite D und eine Höhe B.

# 4.1 Versuchsaufbau zur Auswahl und Auslegung der Komponenten

Für die vorliegende Prüfaufgabe sind optimale Sensoren auszuwählen. Diese müssen mit Strom versorgt und ihre Signale gefiltert und verstärkt werden. Der folgende, in Abbildung 4.5 gezeigte Versuchsaufbau erlaubt die Kombination unterschiedlicher, in Abbildung 4.3 gezeigter, Sensoren mit unterschiedlichen, in Abbildung 4.4 dargestellten, Verstärkern, welche wiederum in unterschiedlichen Zusammenstellungen auf die Platinen bestückt werden.

Die Verstärkerplatinen enthalten Filter 1. Ordnung, welche auf Grundlage der folgenden Überlegungen ausgelegt wurden. Während deren Kondensatoren feste Werte besitzen, sind die Widerstände variabel ausgeführt. Das selbe gilt für die Rückkoppelwiderstände der Verstärker, sofern deren Verstärkung nicht intern festgelegt ist.

Da der beschriebene Aufbau der Bestimmung von Referenzdaten und erforderlichen Parametern dient, muss die Zahl möglicher Fehler- und Störungsquellen gering gehalten werden. Die in der späteren Anwendung für diverse Spannungsversorgungen vorgesehenen Schaltwandler können bei falscher Auslegung Störungen verursachen. Daher wurde auf deren Einsatz im ersten Versuchsaufbau verzichtet, um mögliche Störungen auszuschließen. Durch eine spätere Umstellung der Spannungsversorgung auf Schaltwandler können so eventuell durch diese verursachte Störungen isoliert betrachtet und behoben werden. Die Spannungsversorgung der Verstärker und Sensoren erfolgt über einen Eisentrafo mit anschließender linearer Regelung und guter kapazitiver und induktiver Glättung.

Abbildung 4.2 zeigt das Konzeptschaltbild des Aufbaus:



Abbildung 4.2: Konzeptschaltbild des ersten Versuchsaufbaus

Dabei ist VS 1 die Versorgungsspannung der GMR-Gradiometer, VS 2.1 die positive und VS 2.2 die negative Versorgungsspannung der Verstärker. Es werden Sensorbestückungen für unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen realisiert. Unterschiedliche Sensorplatinen sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Aussparungen in den in Abbildung 4.4 dargestellten

Verstärkerplatinen dienen, wie in der Abbildung 4.5 gezeigt, der Aufnahme des Elektromagneten. Die Erfassung der Analogsignale erfolgt mittels eines USB-6363 Multifunktions-I/O-Geräts des Herstellers National Instruments. Dieses bietet 32 nullpunktbezogene Eingänge mit einer Auflösung von 16 bit bei einer maximalen Eingangsspannung von  $\pm$  10 V. Die maximale Abtastrate pro Kanal ist abhängig von der Anzahl der genutzten Eingänge. Bei einem permanenten USB-Datenstrom an einen PC liegt diese für 3 Kanäle bei 100  $\frac{kS}{s}$ . Wird eine Längsauflösung von 0,1 mm angestrebt, beträgt die maximale Materialgeschwindigkeit 10  $\frac{m}{s}$ . Werden alle 32 Eingänge ausgelesen, sinkt die Abtastrate pro Kanal auf 30  $\frac{kS}{s}$ . Bei gleich bleibender Auflösung entspricht dies einer maximalen Materialgeschwindigkeit von 3  $\frac{m}{s}$ . Aufzeichnung und erste Auswertung der aufgenommenen Daten erfolgt in der Bildverarbeitungssoftware der IMS GmbH VisionLab. Als Referenzfehler dienen mittels Laserbearbeitung in 200  $\mu m$  starkem Weißblech hergestellte Löcher mit einem Durchmesser von 100  $\mu m$ , 200  $\mu m$  und 300  $\mu m$  sowie Nuten mit einer Länge von 1 mm, einer Breite von ungefähr 110  $\mu m$  und einer Tiefe von 10  $\mu m$ , 25  $\mu m$  und 50  $\mu m$ .



Abbildung 4.3: Unterschiedliche Sensorplatinen



Abbildung 4.4: Unterschiedliche Verstärkerplatinen



Abbildung 4.5: Aus Sensorplatine, Verstärkerplatine und Elektromagnet zusammengesetzter Versuchsaufbau

# 4.2 Laborprüfstand

Grundlage für die Auslegung aller Komponenten des entwickelten Prüfsystems bildet die empirische Untersuchung von künstlichen und natürlichen Defekten. Für aussagekräftige Ergebnisse sollten die Prüfbedingungen dabei möglichst denen entsprechen, welche am erwarteten Einbauort zu finden sind. An diesem wird Feinstblech mit einer Dicke zwischen 100  $\mu m$  und 500  $\mu m$  auf der Oberfläche einer nicht ferromagnetischen Rolle am Prüfgerät vorbeigeführt. Die Materialgeschwindigkeit beträgt bis zu  $17\frac{m}{s}$ . Der Luftspalt zum Band soll dabei so groß wie möglich sein. Es ist jedoch von Abständen kleiner 1 mm auszugehen. Um Bandproben im Labor mit solchen Geschwindigkeiten an Testaufbauten vorbeizuführen, wurden vier unterschiedliche Konzepte evaluiert: Die Verfahrung von Proben in Form kleiner Tafeln auf einer linearen Verfahreinheit (A), Bewegung eines Endlosbandes auf einem aus mehreren Rollen bestehenden Umwickelstand (B), radiale Aufspannung eines Bandsegementes auf der Oberfläche einer rotierenden Rolle (C) und axiale Aufspannung einer aus dem Band geschnittenen Ronde auf einer rotierenden Scheibe (D). Die Konzepte sind in der Abbildung 4.6 skizziert. Dabei handelt es sich bei (1) um das Prüfgerät, bei (2) um den Antrieb und bei (3) um die zu untersuchende Probe.



Abbildung 4.6: Skizzen der betrachteten Prüfstandkonzepte

Jedes Konzept hat Vor- und Nachteile. Ein linearer Prüfstand (Typ A) kann sehr schnell mit unterschiedlichen Proben bestückt werden. Die Materialbewegung entspricht weitestgehend der am Einbauort. Die Probengröße ist stark eingeschränkt, im Gegensatz zu anderen Konzepten besteht jedoch die Möglichkeit, kleine Proben zu untersuchen.

Einen Nachteil stellt die Beschleunigung und Abbremsung der Probe bei jeder Messung dar. Um bei einer Lineareinheit mit beispielsweise 6m Verfahrweg die geforderte Geschwindigkeit von  $17\frac{m}{s}$  zu erreichen, ist gemäß  $a = \frac{v^2}{2s}$  eine Beschleunigung von  $46, 3\frac{m}{s^2}$  erforderlich. Dies ist ein für Verfahreinheiten dieser Größe hoher Wert. Somit ist ein dynamischer und gleichzeitig leistungsstarker Antrieb notwendig, was hohe Kosten nach sich zieht. Gleichzeitig besitzt ein solcher Prüfstand einen hohen Platzbedarf. Ein weiterer Nachteil ist das Überstreichen der Probenränder durch das Messgerät bei jeder Messung. Einerseits besteht durch den geringen Luftspalt und die wirkenden magnetischen Kräfte die Gefahr einer Kollision. Gleichzeitig verursachen die Probenränder sehr große Signalausschläge, welche bei kleiner Probengröße die Messung stören können.

Aus den zuvor beschriebenen Versuchen zur Fehlerdetektion mittels elektromagnetisch induziertem Ultraschall steht ein Versuchsaufbau dieses Typs bereits zur Verfügung. Der Aufbau besteht aus einer zahnriemengetriebenen Lineareinheit mit einer Verfahrlänge von 4500 mm. Der Antrieb erfolgt durch einen Wechselstromservomotor mit einer Leistung von 14 kW. Die Probenbleche werden mittels Vakuumtisch auf der Lineareinheit befestigt. Messversuche mit ersten Versuchsaufbauten haben gezeigt, dass ein solcher Aufbau durch die zuvor genannten Probleme nicht für die Messung von magnetischem Streufluss geeignet ist.

Ein Umwickelstand (Typ B) gibt die kundenseitigen Gegebenheiten von allen Konfigurationen am besten wieder. Die Materialführung entspricht genau jener am Einbauort. Allerdings muss es sich bei den Proben um ein größeres, zusammenhängendes Stück Endlosband handeln. Es ist daher mit Schwierigkeiten bei der Handhabung und bei möglicher Bearbeitung, wie beispielsweise der Einbringung künstlicher Defekte, zu rechnen. Ein solcher, in Abbildung 4.7 gezeigter, Aufbau wurde kundenseitig zur Verfügung gestellt. Dieser verfügt über 4 kleine Stahlrollen und 2 große gummierte Rollen, von denen eine angetrieben ist. 2 Stahlrollen und beide gummierte Rollen können in mehreren Richtungen justiert werden. Der Antrieb erfolgt über einen Asynchrongetriebemotor, welcher mittels

Frequenzumrichter in seiner Drehzahl geregelt werden kann.



Abbildung 4.7: Umwickelanlage für Endlosbänder

Der Umwickelstand verfügt über keine dynamische Regelung der Bandlage. Auch sind alle Rollen zylindrisch, ballige Rollen stehen nicht zur Verfügung. Daher konnte auch nach sehr langwierigen Versuchen der Justage der Rollen kein gleichmäßiger Bandlauf erzielt werden. Auch minimale Ungenauigkeiten führen zu einem Schwärmen des Bandes. Dies macht einen längeren Betrieb unmöglich, da das Band aus der Anlage wandert. Auch kann ein Fehler so nicht auf einer konstanten Spur wiederholt unter einem Prüfgerät entlanggeführt werden. Eine weitere Schwierigkeit ist die Fertigung der Endlosbänder. Um eine hinreichende Ebenheit des Materials sicherzustellen, muss es unter hohem Zug aufgespannt werden. Eine Klebeverbindung kommt daher nicht in Frage. Versuche, die Materialenden mittels Punktschweißen zu verbinden, führen trotz des vergleichsweise geringen Wärmeeintrags zu einem Verzug und somit zu starker Unplanheit des Materials. Eine Schweißung der Bänder außer Haus ist auf Grund der erforderlichen Probenzahl und des aufwändigen Transports nicht möglich. Daher können magnetische Streuflussmessungen mit Endlosband auf dem zur Verfügung stehenden Umwickelstand nicht durchgeführt werden. Es werden lediglich Messungen mit kleinen Proben bei geringen Geschwindigkeiten vorgenommen, welche auf die Oberfläche der angetriebenen Rolle geklebt werden.

Trotz der geringen Geschwindigkeit und der schon beim linearen Prüfstand aufgetretenen Probleme mit den Materialkanten können aus diesen Messungen Erkenntnisse für den späteren Einbau eines Testsystems in eine Kundenanlage gewonnen werden: Beide große Rollen bestehen aus ferromagnetischem Baustahl. Eine Streuflussmessung direkt auf deren Oberfläche ist daher grundsätzlich nicht möglich. Die Rollenoberfläche ist jedoch 20 mm stark mit Gummi beschichtet. Dadurch wird ein Abstand zwischen ferromagnetischem Rollenkörper und Prüfgut hergestellt, welcher für die Prüfung hinreichend ist. Grobe Elemente der Rolle, wie etwa die eingeschweißte Verrippung, sind dabei weiterhin in den Sensorsignalen erkennbar. Diese lassen sich durch deren viel größere Zeitskala leicht filtern. Räumlich kleine Elemente der Rollenoberfläche, welche Störungen mit hohen Frequenzanteilen verursachen würden, haben durch die Gummibeschichtung hingegen keinen Einfluss auf die Messung. In der für den Einbau des Prüfsystems vorgesehenen Kundenanlage werden ausschließlich ferromagnetische Stahlrollen mit oder ohne Gummibeschichtung eingesetzt. Die Stärke der Gummibeschichtung liegt dabei in der selben Größenordnung wie beim Laboraufbau. Eine Machbarkeitsstudie kann daher mit geringem Aufwand auf einer gummierten Rollenoberfläche durchgeführt werden.

Die auf dem Umwickelstand durchgeführten Messungen mit kleinen Proben entsprechen einem stark vereinfachten Prüfstand mit radialer Aufspannung der Probe (Typ C). Vorteil ist, wie beim Umwickelstand, der reproduzierbare Bandlauf, welcher dem künftigen Einbauort entspricht. Bei großem Rollendurchmesser stellen Störungen durch die Probenränder keinen Nachteil dar. Um dieses Konzept jedoch bei größeren Proben mit unterschiedlicher Materialstärke und hohen Geschwindigkeiten einzusetzen, ist ein mechanisch sehr aufwändiger Aufbau notwendig. Die größte Schwierigkeit stellt die Einspannvorrichtung dar. Diese muss die Probe unter hohem Zug plan auf die Rollenoberfläche spannen, ohne die Bandoberfläche zu überragen. Dies führt unter anderem zu einer Asymmetrie der Rolle. Durch die hohen Drehzahlen muss dabei zumindest eine grobe Wuchtung des Aufbaus gewährleistet sein. Folglich wurde von einer Realisierung dieses Aufbaus Abstand genommen.

Ein Prüfstand mit axialer Aufspannung von Proben auf eine plane Scheibe (Typ D) ist leicht zu realisieren. Sofern die Proben in Form von Ronden ausgeführt werden und die Scheibenoberfläche vollständig bedecken, gibt es keinen störenden Einfluss von Probenrändern auf die Messung. Auch lässt sich ohne großen Aufwand ein sehr guter Planlauf der Probe erzielen. Durch die rotationssymmetrische Probenform lassen sich hohe Geschwindigkeiten erreichen. Die Reproduzierbarkeit des Probenlaufs ist ebenfalls optimal. Ein großer Nachteil dieser Konfiguration ist jedoch die sich hinsichtlich der ursprünglichen Walzrichtung permanent verändernde Bewegungsrichtung des Materials. Möglicherweise besitzt das untersuchte Material durch den Walzprozess eine magnetische Anisotropie. In diesem Fall können Defekte nur in den beiden Punkten mit paralleler Walz- und Bewegungsrichtung des Materials untersucht werden. Bei sehr starker Anisotropie wäre das Konzept ungeeignet.

Auf Grund der einfachen Realisierbarkeit wird ein solcher Prüfstand aufgebaut. Als Spindel dient ein Drehstromasynchronmotor mit 6 Polen und einer Nennleistung von 4 kW. Die

Ansteuerung erfolgt über einen Frequenzumrichter. Eine solche Leistung ist für den Antrieb des Scheibe bei weitem nicht erforderlich, da die Beschleunigung und der Auslauf der Scheibe stets auf langsamen Rampen stattfinden soll. Motoren mit kleinerer Leistung sind jedoch nur mit Aluminiumgehäuse verfügbar, während ab einer Nennleistung von 4 kW Graugussgehäuse zum Einsatz kommen. Diese bieten die für den Aufbau notwendige mechanische Stabilität. Das hintere Lager bei gewöhnlichen Asynchronmotoren wird üblicherweise als vorgespanntes Loslager ausgeführt. Dadurch kann die Ausdehnung der Welle und des Gehäuses bei starker Erwärmung kompensiert werden. [36] Beim eingesetzten Motor wurde das hintere Lager unter Spannung verklebt, um einen reproduzierbaren Lauf der Welle zu erreichen. Auf dieser wird mittels Konusspannsatz eine Nabe mit einem Durchmesser von 90 mm zur Aufnahme der Scheiben befestigt. Die Scheiben müssen aus einem magnetisch neutralen, mechanisch belastbarem Material bestehen. Ein passendes Material mit geringem Verzug und guten Dämpfungseigenschaften ist Hartgewebe. Hieraus werden Scheiben mit einem Durchmesser von 520 mm und einer Stärke von 30 mm gefertigt. Durch die im Vergleich zur Scheibengröße kleine Aufspannfläche gelingt es trotz Presspassung auf der Nabe nicht, die Scheiben mit einem hinreichend guten Planlauf zu fertigen. Daher erfolgt die Endbearbeitung auf dem Prüfstand selbst. Hierfür wird aus Profilstahl ein Bett gefertigt und in einer Aufspannung gefräst. Mittels spielfreier Kugelumlaufschienen wird darauf ein Support mit Querschlitten befestigt. Der Antrieb erfolgt auf Grund der Selbsthemmung und Spielfreiheit durch Trapezgewindespindeln mit durch Tellerfederpakete vorgespannten Muttern.



Abbildung 4.8: Prüfstand in axialer Bauweise mit Proben unterschiedlicher Größe

Der bei maximaler Scheibengröße erzielte Planlauf ist besser als 20  $\mu m$ . Zudem bietet der Aufbau die Möglichkeit einer sehr genauen Positionierung des zu erprobenden Prüfgeräts und verkraftet auch große magnetische Kräfte zwischen Messgerät und Probe bei konstanter Geometrie. Ein De- und erneute Montage von Scheiben erweist sich bei Erhaltung der Montageposition hinsichtlich des Plan- und Rundlaufs als unproblematisch. Die Probenbleche werden mittels des Konstruktionsklebers RK 1300 des Herstellers Weicon auf den Scheiben befestigt. Während des Klebevorgangs erfolgt eine Anpressung durch eine weitere plangefräste Scheibe, um ein flächiges Anliegen zu erzielen. Der mit aufgeklebtem, 200  $\mu m$  starkem Probenblech erzielte Planlauf liegt bei unter 50  $\mu m$ .

## 4.3 Magnetisierung

Die Magnetisierung des zu prüfenden Materials soll grundsätzlich durch einen Elektromagneten erfolgen. Diese haben im Vergleich zu Permanentmagneten mit gleicher magnetischer Spannung einen größeren Raumbedarf sowie einen permanenten Energieverbrauch im Betrieb. Beides ist innerhalb eines künftigen Prüfgeräts von Nachteil. Allerdings lässt sich die Leistung einer Elektromagneten sehr leicht an unterschiedliches Prüfgut anpassen. Auch eine automatische Abschaltung ist ohne aufwändige mechanische Vorrichtungen möglich. Dies erhöht zum einen die Bediensicherheit des Geräts. Gleichzeitig wird eine Reinigung in einer mit ferromagnetischem Metallstaub und Spänen verunreinigten Umgebung erleichtert. Eine erste Auslegung von Elektromagneten für Entwicklungszwecke erfordert Kenntnisse zum Permeabilitätsverlauf und zur Sättigungsfeldstärke der inspizierten Bänder. Trotz Anfragen bei mehreren Herstellern von entsprechenden Messgeräten konnte kein kommerziell erhältliches Messgerät gefunden werden, welches eine Messung der magnetischen Permeabilität eines dünnen Blechs bei variabler magnetischer Spannung und in dessen Ebene ermöglicht. Selbiges gilt auch für beliebig geformte Blechpakete mit rechteckigem Querschnitt.

Um eine Größenordnung der Permeabilität und Sättigungsfeldstärke des Prüfguts zu erhalten, werden 12 mm breite Streifen des Materials entnommen und zu Ringkernen mit einem Außendurchmesser von 26 mm und einer Stärke von 3 mm aufgewickelt. Die Permeabilität wird über die Induktivität einer auf den Ringkern gewickelten Spule mit bekannter Windungszahl bestimmt. Eine weitere, um den Kern gewickelte und von einem variablen Gleichstrom durchflossene Spule erzeugt eine definierte magnetische Spannung im Material. Die maximale Länge eines zusammenhängenden Materialstreifens quer zur Walzrichtung ist bedingt durch die hergestellten Materialbreiten auf etwa 1200 mm begrenzt. Daher können keine größeren Kerne hergestellt werden. Der Querschnitt eines Kerns beträgt 36  $mm^2$  bei einer mittleren Feldlinienlänge von etwa 72,3 mm. Auf einen jeden solchen Probekern werden je 2 Spulen aufgebracht. Eine Spule aus dünnerem Lackdraht mit 130 Windungen dient der Induktivitätsmessung, eine weitere Spule aus Litze mit einem Querschnitt von etwa  $1.2\ mm^2$  und 70 Windungen dient der Magnetisierung. Eine direkte Induktivitätsmessung mittels RCL-Messgerät wurde mit mehreren unterschiedlichen Geräten versucht und hat sich stets als unzuverlässig herausgestellt. Daher findet die näherungsweise Bestimmung der Induktivität über die Beobachtung des Einschaltvorgangs eines RL-Kreises statt. Der Aufbau ist in Abbildung 4.9 skizziert.



Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Messung der Permeabilität des Prüfguts

In einem RL-Kreis gilt für den fließenden Strom nach dem Anlegen einer Spannung:

$$I(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$
(4.1)

 $\operatorname{mit}$ 

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{4.2}$$

Hierbei ist U die angelegte Spannung, R der ohmsche Widerstand und L die Induktivität. Bei der Induktivität handelt es sich in diesem Fall um die Messspule, während der Widerstand einen Wert von 10  $\Omega$  bei möglichst geringer parasitärer Induktivität besitzt. Der Kreis wird mit einem unipolaren Rechtecksignal mit einer Frequenz von wenigen Hertz, hoher Flankensteilheit und einer Amplitude von 10 V beaufschlagt. Die Spannung über dem Widerstand wird mittels Oszilloskop aufgezeichnet.

Es wird die Zeit bestimmt, nach welcher diese auf 98,2 % ihres maximalen Wertes von 1,65 V angestiegen ist. Entsprechend der Gleichung 4.2 handelt es sich bei dieser Zeit um  $4 \cdot \tau$ , woraus bei bekanntem Widerstand die Induktivität der Messspule und somit die relative Permeabilität des Kernmaterials gemäß der Näherungsformel für die Induktivität von Toroidspulen mit rechteckigem Kernquerschnitt

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r \cdot b}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_{au\&en}}{r_{innen}}$$
(4.3)

bestimmt werden können. N bezeichnet dabei die Windungszahl, b die Breite (in diesem Fall 12 mm),  $r_{außen}$  den Außen- und  $r_{innen}$  den Innenradius des Kerns. [37]

Bei den für die Messung eingesetzten Strömen von unter 200 mA sind die Auswirkungen der Messung auf die magnetischen Eigenschaften des Kernmaterials vernachlässigbar klein. Zwecks Magnetisierung des Kernmaterials wird die Magnetisierungsspule mittels Labornetzgerät kurzzeitig Strömen zwischen 0 A und 60 A in Schritten von 5 A ausgesetzt. Die Stromrichtung entspricht dabei der Messspule. Abbildung 4.10 zeigt den Messspulenströmverlauf für einige Magnetisierungsspulenströme, die für die jeweiligen Kurven bestimmten Zeitkonstanten  $\tau$  sowie eine Abschätzung des Stromverlaufs bei  $\mu_r = 1$ 



Abbildung 4.10: Verlauf des Messspulenstroms im zuvor gezeigten Aufbaus zur Permeabilitätsbestimmung bei verschiedenen Magnetisierungsspulenströmen

Die Flussdichte innerhalb einer Toroidspule kann über den Ausdruck

$$B_{Toroidspule} = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{I \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \tag{4.4}$$

näherungsweise bestimmt werden. Bei I handelt es sich dabei um den Spulenstrom, bei N um die Windungszahl und bei  $r_m$  um den mittleren Radius der Spule. Im Falle der verwendeten Probespulen liegt dieser bei 11,5 mm. Die so bestimmte Permeabilität und Flussdichte innerhalb der Kerns sind in Abbildung 4.11 in Abhängigkeit vom Magnetisierungsspulenstrom dargestellt.



Abbildung 4.11: Berechneter Verlauf von Permeabilität und Flussdichte des Probekerns bei variablem Magnetisierungsspulenstrom

Durch die Messung wird die Sättigungsinduktion auf etwa 2,0 - 2,1 T abgeschätzt. Dieser Wert entspricht dem Literaturwert für niedrig legierte Stähle. [38]

Diese Induktion wird bei dem vermessenen Ringkern ab einem Magnetisierungsspulenstrom zwischen 30 A und 40 A und somit ab einer magnetischen Spannung von höchstens  $2800 A \cdot Windungen$  erreicht. Die Permeabilität  $\mu_r$  des Bandes liegt dabei zwischen 20 und 27.

Der Magnet, das Prüfgut sowie der Luftspalt zwischen diesen bilden einen magnetischen Kreis. Um die Verlustleistung sowie den Platzbedarf des Magneten zu minimieren, sollte in diesem ein möglichst geringer magnetischer Widerstand angestrebt werden. Daher liegt es nahe, den Kern des Elektromagneten aus einem Material mit möglichst hoher relativer Permeabilität bei hoher Sättigungsfeldstärke zu fertigen. Spezielle Eisenlegierungen mit solchen Eigenschaften werden weitläufig in Kernen von elektrischen Maschinen und Transformatoren eingesetzt. Diese besitzen eine hohe Reinheit und speziell einen geringen Kohlenstoffanteil, um eine hohe Permeabilität zu erzielen. Eine Legierung mit Silizium verringert die Leitfähigkeit und somit die Wirbelstromverluste. [39] Durch die Verwendung von kornorientiertem Material entsprechend der Richtung des Magnetfelds ist eine weitere Verbesserung der Eigenschaften möglich. [40] Allerdings sind diese Materialien im Handel nur in Form von Elektroblech mit typischen Stärken unter 1 mm verfügbar. Halbzeuge wie Flacheisen oder Grobblech sind nicht erhältlich. Der Vorteil der Vermeidung von Wirbelstromverlusten durch einen geblechten Kern ist bei einem konstanten Magnetfeld nicht gegeben. Der Fertigungsaufwand nimmt im Vergleich zu einem Kern aus Vollmaterial jedoch deutlich zu. Andere hochpermeable Werkstoffe wie etwa Ferrite lassen sich nur schwer mechanisch bearbeiten. Zudem verschlechtern sich die magnetischen Eigenschaften mancher Materialien durch in Folge einer Bearbeitung eingebrachte innere Spannungen. Als sehr günstiger und gut verfügbarer Werkstoff, dessen relevante Eigenschaften dem Elektroblech ähnlich sind, kommt unlegierter, beruhigter Baustahl S235J2G3 zum Einsatz. Dieser besitzt im Gegensatz zu ersterem zwar keine durch Zusätze verringerte elektrische Leitfähigkeit, allerdings stellt dies bei Gleichfeldanwendungen keinen Nachteil dar. Der Kohlenstoffgehalt des Werkstoffs liegt mit maximal 0,17 % beim etwa 60-fachen von Elektroblech. [40] Eine Kornorientierung liegt ebenfalls nicht vor. Für statische Felder ist die Permeabilität über einen großen Feldstärkebereich jedoch vergleichbar mit Elektroblech [41]. Zudem ist der magnetische Widerstand des Magnetkerns im Vergleich zu den anderen beiden Komponenten des magnetischen Kreises, dem Luftspalt und dem Prüfgut, gering. Gemäß

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \tag{4.5}$$

besitzt ein 140 mm hoher und 90 mm breiter Kern aus 10 mm starkem und 40 mm breitem Flachmaterial mit einer Permeabilität von  $\mu_r = 200$  einen magnetischen Widerstand von  $3, 68 \cdot 10^6 \frac{A}{V \cdot s}$ . Demgegenüber weist ein Luftspalt von 0,5 mm selbst bei Polschuhen mit doppeltem Kernquerschnitt noch einen magnetischen Widerstand von  $1 \cdot 10^6 \frac{A}{V \cdot s}$  auf. Das Prüfgut besitzt bei einer angenommenen Stärke von 0,2 mm, der doppelten Breite des Kernmaterials und einer diesem ähnlichen Permeabilität einen magnetischen Widerstand von  $2, 2 \cdot 10^7 \frac{A}{V \cdot s}$ . Der Anteil des Kerns am gesamten Widerstand des angenommenen magnetischen Kreises von 2,  $68 \cdot 10^7 \frac{A}{V \cdot s}$  beträgt somit etwa 14 %. Hieraus ist ersichtlich, dass eine weitere Senkung des magnetischen Widerstands des Kerns den Gesamtwiderstand des magnetischen Kreises nur unwesentlich beeinflusst und daher keinen hohen technischen Aufwand rechtfertigt.

Für den Laboraufbau werden Joche mit einer maximalen Jochweite sowie einer Breite von 35 mm benötigt. Gemäß

$$B = \frac{n \cdot I}{R_m \cdot A} \tag{4.6}$$

und Gleichung 4.1 wird die erforderliche magnetische Spannung bestimmt. Auf Grund des großen Querschnitts des Kerns von 525  $mm^2$  bei 65 mm mittlerer Feldlinienlänge wird dessen magnetischer Widerstand bei der Auslegung vernachlässigt. Ausgehend von den beschriebenen Messungen wird bei einem Luftspalt von 500  $\mu m$  eine magnetische Spannung von 1376,4 A benötigt. Zwecks Messungen mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen werden mehrere Kerne aus ST235J2G3 gefertigt. Diese werden mit jeweils 90 Windungen eines Kupferleiters mit einem Querschnitt von 3  $mm^2$  bewickelt. Zum Erreichen der zuvor berechneten magnetischen Spannung wäre somit ein Spulenstrom von 15,3 A erforderlich. Durch die Materialbewegung ist die Jochweite des Magneten, bei welchem eine Streuflussprüfung möglich ist, begrenzt [42]. Zur empirischen Bestimmung des maximal möglichen Abstands wird unter anderem ein Magnet mit verstellbarer Jochweite gefertigt. Abbildung 4.12 zeigt eine Skizze und Abbildung 4.13 ein Foto des verstellbaren Magneten.



Abbildung 4.12: Skizze eines in der Breite verstellbaren Elektromagneten mit kleiner und großer eingestellter Jochweite



Abbildung 4.13: In der Breite verstellbarer Elektromagnet

Als variable Spannungsversorgung dient ein Regeltrafo mit nachgeschaltetem Niederspannungstrafo und Brückengleichrichter. Zur Glättung wird ein Kondensator mit einer Kapazität von 0,47 F eingesetzt. Auf diese Weise wird eine Restwelligkeit von 3,5 % erzielt. Die maximale Ausgangsspannung liegt bei 15 V, der maximale Strom bei 25 A. Somit steht mit den Testmagneten eine magnetische Spannung von 2250 A zur Verfügung.

## 4.4 Sensoren

Getestet werden GMR-Magnetometer und Gradiometer der Hersteller NVE und Sensitec. Aus Kostengründen sollen zunächst keine speziell gefertigten sondern nur bereits kommerziell verfügbare Sensoren zum Einsatz kommen. Bei den getesteten Sensortypen handelt es sich um Magnetometer des Typs AA004 00 von NVE und GF705-AMA von Sensitec sowie um Gradiometer des Typs ABL004 00 von NVE. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, beinhalten alle aufgezählten Sensortypen 4 einzelne, als wheatstonesche Messbrücke verschaltete, GMR-Sensoren und unterscheiden sich durch die Anordnung und Abschirmung letzterer. Das differentielle Ausgangssignal der Messbrücke ist neben der Differenz der magnetischen Feldstärke durch die beiden empfindlichen Bereiche auch abhängig von der Versorgungsspannung und Temperatur. Es lässt sich bei unbelasteter Ausgangsspannung  $U_a$  und einer Versorgungsspannung U gemäß folgender Gleichung berechnen:

$$U_a = U(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4})$$
(4.7)



Abbildung 4.14: Schematische Darstellung einer wheatstoneschen Messbrücke

Abbildung 4.14 dient zur Veranschaulichung der in Gleichung 4.7 verwendeten Bezeichnungen. Der Sensorhersteller NVE gibt für GMR-Gradiometer des Typs ABL004 eine Widerstandsänderung von 0,04 % pro 0,1 mT Induktion in deren linearem Bereich an.

Dies ergibt ein Ausgangssignal von 2 $\frac{mV}{mT\cdot V}$ . Für Magnetometer des Typs AA004 00 wird ein Ausgangssignal von 9 - 13  $\frac{mV}{mT \cdot V}$  angegeben. Magnetometer des Typs GF705-AMA besitzen in ihrem linearen Bereich ein Ausgangssignal von 8 - 13  $\frac{mV}{mT\cdot V}$ . Magnetometer vom Typ AA004 00 reagieren auf zum Gehäuse tangentiale Feldkomponenten und besitzen eine Sättigungsinduktion von etwa  $\pm$  5 mT. Die Versorgungsspannung ist laut Hersteller durch die Verlustleistung auf 24 V begrenzt. Bei Sättigungsfeldstärke und der maximalen Versorgungsspannung liegt das Ausgangssignal je nach Temperatur zwischen 0.9 V und 1.3 V. In einem Feldstärkebereich von  $\pm 0.5$  mT bis  $\pm 3.5$  mT besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Betrag der Feldstärke und der Ausgangsspannung. Magnetometer vom Typ GF705-AMA reagieren ebenfalls auf zum Gehäuse tangentiale Feldkomponenten und besitzen im Feldstärkebereich von  $\pm 1.8$  mT bis  $\pm 8$  mT einen linearen Zusammenhang zwischen dem Betrag der Feldstärke und der Ausgangsspannung. Die Sättigungsfeldstärke liegt bei  $\pm 25$  mT. Bei maximaler Versorgungsspannung von 9 V liegt die maximale Ausgangsspannung bei 1 V. Gradiometer des Typs ABL 004 00 besitzen sensitive Flächen mit einer Breite von 140  $\mu m$  und einer Länge von 125  $\mu m$ . Der Abstand zwischen deren Mittelpunkten beträgt 1 mm. Die detektierte Feldkomponente ist wie bei den Magnetometern tangential zum Gehäuse. Der lineare Bereich liegt zwischen  $\pm$ 0.5 mT und  $\pm 10 \text{ mT}$ . Die Sättigungsfeldstärke liegt bei  $\pm 18 \text{ mT}$ .

Die benötigte Sensordichte wird abgeschätzt, indem der Verlauf der Induktion des Streuflusses über einer Nut mittels des in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Ansatzes von Förster bestimmt wird. Entsprechend der Abbildung 2.9 wird der Luftspalt y mit 500  $\mu m$  angenommen und die Position x wird variiert. Abbildung 4.15 zeit den Verlauf der Induktion des Streuflusses einer Nut mit einer Nuttiefe T von 25  $\mu m$  und einer Nutbreite s von 100  $\mu m$ .



Abbildung 4.15: Horizontale Streuflusskomponente einer 100  $\mu m$  breiten und 25  $\mu m$  tiefen Nut bei 500  $\mu m$  Luftspalt in Abhängigkeit von der Sensorposition nach dem Ansatz von Förster [18]

Die Ausmaße des Streuflusses liegen somit in der Größenordnung von 1 mm. Daher wird im Versuchsaufbau zunächst eine Sensordichte von 1 mm verwendet, um deren Suffizienz hinsichtlich des Verhaltens unterschiedlicher Sensortypen und der tatsächlichen Ausdehnung der analysierten Streuflüsse zu untersuchen.

Je 3 Sensoren eines Typs werden, wie in Abbildung 4.16 gezeigt, passend zu unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen, auf Platinen montiert. Diese enthalten zusätzlich Keramikkondensatoren zur räumlich nahen Glättung der Versorgungsspannung.



Abbildung 4.16: Sensorplatinen mit GMR-Sensoren von NVE (unten) und Sensitec (oben)

## 4.5 Analoge Signalverarbeitung

Die analogen Differenzsignale der GMR-Sensoren müssen vor der Digitalisierung verstärkt und zur Verbesserung des Rauschverhaltens sowie zur besseren Ausnutzung des Dynamikumfangs gefiltert werden. Da es sich bei den Sensoren um wheatstonesche Messbrücken handelt, ist das Ausgangssignal ein Differenzsignal, welches auf halbem Versorgungspotential der Sensoren liegt. Daher wird für dessen Auswertung ein Instrumentenverstärker benötigt. Die benötigte Gesamtverstärkung wird abgeschätzt, indem das durch kleinere künstliche Fehler verursachte Streufeld nach den in Unterkapitel 2.2.2 beschriebenen Ansätzen von Förster sowie Shcherbinin und Pashagin berechnet wird. Hierfür werden die Werte für 10  $\mu m$ , 25  $\mu m$  und 50  $\mu m$  tiefe und 100  $\mu m$  breite Nuten in die jeweiligen Gleichungen eingesetzt. Der Abstand zur Materialoberfläche wird dabei von 300  $\mu m$  bis 1000  $\mu m$  variiert. Für die Feldstärke im Material wird die zuvor bestimmte Sättigungsfeldstärke von 2,1 T angenommen. Berechnet wird die horizontale Streuflusskomponente quer zur Nut in Abhängigkeit vom Luftspalt. Nach dem Ansatz von Förster bestimmte Werte sind in Abbildung 4.17 dargestellt.



Abbildung 4.17: Horizontale Streuflusskomponente von 100 $\mu m$ breiten Nuten in Abhängigkeit von Nutentiefe und Luftspalt nach dem Ansatz von Förster

Die nach dem Ansatz von Förster berechnete horizontale Streuflusskomponente beträgt beim angestrebten Luftspalt von 500  $\mu m$  und unmittelbar über dem Defekt 2,6 mT bei einer 10  $\mu m$  tiefen, 6,4 mT bei einer 25  $\mu m$  tiefen und 12,2 mT bei einer 50  $\mu m$  tiefen Nut.

Abbildung 4.18 stellt die nach dem Ansatz von Shcherbinin und Pashagin bestimmten Werte dar.



Abbildung 4.18: Horizontale Streuflusskomponente von 100 $\mu m$ breiten Nuten in Abhängigkeit von Nutentiefe und Luftspalt nach dem Ansatz von Shcherbinin und Pashagin

Nach dem Ansatz von Shcherbinin und Pashagin ergibt sich für einen Luftspalt von ebenfalls 500  $\mu m$  genau über dem Defekt eine horizontale Streuflusskomponente von 0,18 mT bei einer 10  $\mu m$  tiefen, 0,45 mT bei einer 25  $\mu m$  tiefen und 0,85 mT bei einer 50  $\mu m$  tiefen Nut.

Die sich für die jeweiligen Sensortypen bei einem Luftspalt von 500  $\mu m$  ergebenden Ausgangssignale nach beiden Ansätzen sind in Abbildung 4.19 dargestellt. Beim Gradiometer des Typs ABL 004 wird davon ausgegangen, dass die berechnete magnetische Feldstärke nur innerhalb einer sensitiven Fläche vorliegt, während die andere sensitive Fläche keinem äußeren Feld ausgesetzt ist. Als Versorgungsspannung wird stets die maximale zulässige Versorgungsspannung angenommen. Für das Magnetometer des Typs AA004 wird das Ausgangssignal mit 11  $\frac{mV}{mT\cdot V}$ , dem Mittelwert des Ausgangssignalbereichs, angenommen. Selbiges gilt für Magnetometer des Typs GF705 mit einem Mittelwert des Ausgangssignalbereichs von 10,5  $\frac{mV}{mT\cdot V}$ .

| Sensortyp  | AA004 00  | GF705-AMA | ABL004 00 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| 10 μm x 100 μm Nut<br>Ansatz nach Förster                  | 686,4 mV  | 245,7 mV  | 124,8 mV  |
| 25 μm x 100 μm Nut<br>Ansatz nach Förster                  | Sättigung | 604,8 mV  | 307,2 mV  |
| 50 μm x 100 μm Nut<br>Ansatz nach Förster                  | Sättigung | Sättigung | 585,6 mV  |
| 10 μm x 100 μm Nut<br>Ansatz nach Shcherbinin und Pashagin | 47,52 mV  | 17,01 mV  | 8,64 mV   |
| 25 μm x 100 μm Nut<br>Ansatz nach Shcherbinin und Pashagin | 118,8 mV  | 42,53 mV  | 21,6 mV   |
| 50 μm x 100 μm Nut<br>Ansatz nach Shcherbinin und Pashagin | 224,4 mV  | 80,33 mV  | 40,8 mV   |

### Abbildung 4.19: Nach den Ansätzen von Förster sowie Shcherbinin und Pashagin bestimmte Sensorsignale von unendlich langen und 100 $\mu m$ breiten Nuten bei jeweils maximaler Versorgungsspannung und optimaler Ausrichtung

Zwischen den Ergebnissen der Berechnungen nach Förster und Shcherbinin und Pashagin gibt es große Unterschiede. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, eignet sich der Ansatz von Shcherbinin und Pashagin jedoch besser für flache, breite Nuten. Daher wird bei der Auslegung der Verstärker zunächst von mit diesem Ansatz bestimmten Werten ausgegangen. Soll das Verstärkersignal der mittelgroßen Nut (25  $\mu m$ ) bei Verwendung des Sensors mit dem kleinsten Ausgangssignal (ABL004) in der Mitte des Eingangssignalbereichs des AD-Wandlers (5V) liegen, wäre ohne Berücksichtigung der Dämpfung durch die passiven Filter eine Verstärkung des Sensorsignals um den Faktor 231 nötig.

Zur Abschätzung der erforderliche Bandbreite wird der in Abbildung 4.15 gezeigte Induktionsverlauf bei der höchsten geforderten Materialgeschwindigkeit von 17  $\frac{m}{s}$  untersucht. Durch Anwendung der Fourier-Transformation ergibt sich die in Abbildung 4.20 gezeigte Frequenzverteilung.



Abbildung 4.20: Frequenzanteile der horizontale Streuflusskomponente einer 100  $\mu m$ breiten und 25  $\mu m$  tiefen Nut bei 500  $\mu m$  Luftspalt und 17  $\frac{m}{s}$ Materialgeschwindigkeit nach dem Ansatz von Förster

Man erkennt, dass mit Frequenzanteilen gerechnet werden muss, die über der im Folgenden beschriebenen Grenzfrequenz des Hochpassfilters beziehungsweise des Antialiasingfilters liegen. Die eingesetzten Verstärkerschaltungen sollten somit eine bis zur Filtergrenzfrequenz konstante Verstärkung besitzen.

Es werden 3 unterschiedliche Ansätze für eine Gesamtverstärkung in dieser Größenordnung aufgebaut und getestet. Die einfachste Lösung wäre ein einzelner Differenzverstärker, welcher bereits die nötige Verstärkung besitzt. Die Verstärkung wird wie bei den meisten Operationsverstärkerschaltungen über Rückkopplungswiderstände eingestellt. Diese müssen in engen Toleranzen aufeinander abgestimmt sein, um einen Pegelversatz zu verhindern und eine hohe Gleichtaktunterdrückung zu gewährleisten. Kommerzielle Differenzverstärker besitzen daher auf dem Die integrierte Rückkopplungswiderstände, welche bei jedem gefertigten Chip automatisiert angepasst werden. [43]

Differenzverstärker mit Verstärkungen dieser Größenordnung bei gleichzeitig hinreichend hoher Bandbreite sind nicht verfügbar. Daher werden extern als Differenzverstärker mit einer Verstärkung von 200 beschaltete Operationsverstärker vom Typ OP37 und TLE2081 getestet.

Der 2. Ansatz besteht aus einem integrierten Instrumentenverstärker des Typs INA106 oder AD628 mit einer Verstärkung von 10, welchem ein Nachverstärker in Form eines Operationsverstärkers des Typs OP37 oder TLE2081 folgt. Verstärker des Typs AD628 bestehen aus 2 intern in Serie verschalteten Verstärkern in einem Gehäuse. Der eigentliche Differenzverstärker besitzt eine fest eingestellte Verstärkung von 0,1, während sich die Verstärkung des Nachverstärkers mittels externer Widerstände einstellen lässt. Diese wird auf den Faktor 100 eingestellt, so dass die Gesamtverstärkung wie auch bei Verstärkern des Typs INA106 bei 10 liegt. Der Nachverstärker besitzt eine mittels Potentiometer zwischen 8,05 und 37,45 regelbare Verstärkung, wobei die exakten Werte den im Betrieb bereits verfügbaren Bauelementen geschuldet sind. Es ergibt sich somit eine im Bereich zwischen 80,5 und 374,5 einstellbare Gesamtverstärkung. Beim letzten Ansatz kommen integrierte Instrumentenverstärker des Typs INA149 mit einer Verstärkung von 1 zum Einsatz. Diese dienen somit lediglich der Umwandlung des Differenzsignals der Sensoren in ein massebezogenes Signal sowie der Gleichtaktunterdrückung. Die Verstärkung des Signals wird durch Nachverstärker des Typs OP37 und TLE2081 erreicht und ist im Bereich zwischen 45,7 und 212,7 einstellbar.

Die exakten Werte für den Verstärkungsbereich sowie die Grenzfrequenzen der Filter ergeben sich aus im Betrieb und bei Zulieferern verfügbaren Komponenten. Durch Fertigungstoleranzen der Sensoren sowie durch statische äußere Felder kommt es regelmäßig zu einem Versatz zwischen den differentiellen Ausgängen eines Sensors. Auch können durch die Rotation einer Rolle oder des Probenträgers im Labor Störsignale im Frequenzbereich zwischen 2 Hz und 10 Hz entstehen. Diese Einflüsse führen auf Grund der hohen Gesamtverstärkung zu einem signifikanten Versatz der Ausgangsspannung. Daher ist ein Hochpassfilter im Signalgang für eine optimale Ausnutzung des Dynamikumfangs des Nachverstärkers beziehungsweise des AD-Wandlers erforderlich. Der Hochpassfilter war ursprünglich unmittelbar am Sensorausgang verbaut. Mit einer solchen Konfiguration konnten jedoch keine plausiblen Signale gemessen werden, sodass dieser Filter überbrückt und an die in Abbildung 4.21 gezeigte Position versetzt werden musste. Der Tiefpassfilter dient der Vermeidung von Aliasingeffekten bei der Digitalisierung. Zusätzlich ist in einer Produktionsumgebung durch die zwangsläufig nicht abgeschirmten Sensoren mit hochfrequenten Störsignalen durch elektrische Anlagen zu rechnen, welche durch den Tiefpassfilter gedämpft werden. Die für den Tief- und Hochpassfilter erforderlichen Werte werden empirisch bestimmt. Die Grenzfrequenz des Hochpasses wird schrittweise erhöht, bis ein Abfallen der Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der untersuchten künstlichen Fehler bei Materialgeschwindigkeiten zwischen 3,5 $\frac{m}{s}$ und 10 $\frac{m}{s}$  beobachtet werden kann. Ebenso wird beim Tiefpassfilter vorgegangen, wobei es sich bei der Anfangsfrequenz von etwa 50 kHz um die Nyquist-Frequenz des AD-Wandlers bei maximaler Abtastrate handelt: Gemäß des Whittaker-Kotelnikow-Shannon-Abtast theorems kann es bei Anteilen eines digitalisierten Signals, deren Frequenz über der Nyquist-Frequenz, welche der halben Abtastfrequenz entspricht, liegt, zu Alias-Effekten kommen. Daher sollten über der halben Abtastfrequenz liegende Frequenzanteile gedämpft werden.



Abbildung 4.21: Schaltungsvarianten für die analoge Signalverarbeitung

In ersten Messungen erweisen sich beide getestete Verstärker gemäß Variante 1 als nicht funktionsfähig. Trotz des Einsatzes von besonders eng tolerierten Widerständen aus einer Charge ist die Streuung der Widerstandswerte zu hoch. Dies führt einem permanent maximalen oder minimalen Signal am Verstärkerausgang, so dass keine Messung möglich ist. Eine manuelle Justage der Widerstände würde den Einsatz einer solchen Schaltung voraussichtlich ermöglichen. Durch die große geplante Kanalanzahl wäre ein solches Vorgehen jedoch nicht praktisch umsetzbar, sodass der Variante 1 entsprechende Verstärker bei den folgenden Messungen nicht zum Einsatz kommen.

# 5 Labormessergebnisse

Zur Bestimmung der optimalen Konfiguration und Betriebsparameter der Sensoren, Magnetisierung sowie analogen Signalverarbeitung werden Labormessungen auf künstlichen und somit definierten und reproduzierbaren Defekten durchgeführt. Als Substrat dient Weißblech mit einer Stärke von 200  $\mu m$  und zwei unterschiedlichen, in der Produktion üblichen, Kombinationen aus Wärmebehandlung und Nachwalzgrad. Die Messungen umfassen Geschwindigkeiten bis zu 10  $\frac{m}{s}$ , was typischen Werten in der Produktion entspricht. Bei höheren Geschwindigkeiten führen Unwuchten im Messaufbau zu starken Vibrationen. Folgende künstliche Fehler werden mittels Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung in die rondenförmigen Proben eingebracht:

- Nut, 10  $\mu m$  tief, ca. 110  $\mu m$  breit, 1 mm lang
- Nut, 25  $\mu m$  tief, ca. 110  $\mu m$  breit, 1 mm lang
- Nut, 50  $\mu m$  tief, ca. 110  $\mu m$  breit, 1 mm lang
- Durchgangsbohrung, 100  $\mu m$  Durchmesser
- Durchgangsbohrung, 200  $\mu m$  Durchmesser
- Durchgangsbohrung, 300  $\mu m$  Durchmesser

Diese Defektgeometrien stellen einen Kompromiss zwischen einfacher und reproduzierbarer Herstellung und einer guten Nachbildung der in Kapitel 1.4 beschriebenen natürlichen Defekte dar.

## 5.1 Sensoren

Durch unterschiedliche Kennlinien und Geometrien haben die eingesetzten Sensoren großen Einfluss auf das Messergebnis. Daher werden mit den unterschiedlichen Sensortypen Messungen auf künstlichen Fehlern in Form der zuvor beschrieben Bohrungen bei konstanter
Geschwindigkeit durchgeführt. Die verschiedenen Sensoren besitzen unterschiedliche Empfindlichkeiten, wodurch die für eine Messung optimale magnetische Spannung nicht nur vom Prüfgut sondern auch vom eingesetzten Sensortyp abhängt. Daher wird der Strom des Elektromagneten zwecks Findung einer optimalen Kombination variiert. Zusätzlich stehen mehrere Verstärker zur Verfügung, deren Eigenschaften in Kombination mit verschiedenen Sensoren Auswirkungen auf das Messergebnis haben. Daher werden entsprechende Messreihen mit allen Kombinationen von Sensoren und Verstärkern aufgenommen. Mit Magnetometern des Typs AA004 00 konnten keine aussagekräftigen Messwerte aufgenommen werden. Selbst schwache magnetische Spannungen (2 A Magnetstrom), welche noch keine ausgeprägten Fehlersignale erzeugen, führen bereits zu einer vollständigen Sättigung dieses Sensortyps. Die folgenden Messungen wurden daher lediglich mit Magnetometern des Typs GF705-AMA von Sensitec und Gradiometern des Typs ABL004-00 von NVE durchgeführt. Die Abtastrate beträgt bei allen Messungen 100 $\frac{kS}{s}$  bei einer Materialgeschwindigkeit von 10,8  $\frac{m}{s}$ , der Luftspalt beträgt 500  $\mu m$ . Die Grenzfrequenzen der im Kapitel 4.5 beschriebenen Filterschaltungen liegen bei etwa 50 kHz für den Tiefpass und 100 Hz für den Hochpass. Das Material wird in Bewegungsrichtung magnetisiert.

Bei GMR-Sensoren handelt es sich um rein resistive Elemente, welche zumeist intern zu Messbrücken verschaltet sind. Die Versorgungsspannung hat daher keinen grundsätzlichen Effekt auf das Verhalten des Sensors und wird meist einzig durch die maximale thermische Verlustleistung begrenzt. Um eine hohe Sensitivität bei möglichst geringer Empfindlichkeit gegenüber externen elektrischen Störungen zu erhalten, wird die Versorgungsspannung möglichst hoch gewählt. Sie beträgt bei allen Messungen für Gradiometer des Typs ABL004-00 20 V und für Magnetometer des Typs GF705-AMA 8 V. Magnetometer und Gradiometer erzeugen bei einem gleichem Fehler unterschiedliche Signalverläufe. Die Signalverläufe eines Durchgangslochs mit 200  $\mu m$  Durchmesser bei 7,5 A Magnetstrom sind für beide Sensortypen in den Abbildungen 5.1 und 5.2 dargestellt:







Abbildung 5.2: Signalverlauf einer Durchgangsbohrung, <br/>ø 200 $\mu m,$  Sensor: Magnetometer

Bei Gradiometern werden beide sensitive Flächen nacheinander vom Streufluss eines Fehlers durchlaufen. Dies erzeugt jeweils einen positiven und einen negativen Ausschlag, die direkt aufeinander folgen. Ein Magnetometer besitzt nur eine sensitive Fläche, sodass es bei gleichem Fehler nur zu einem unipolaren Ausschlag kommt. [44] [27] Die Abbildungen 5.3 und 5.4 zeigen anschaulich das Zustandekommen der unterschiedlichen Signalformen.



Abbildung 5.3: Skizze des Signalverlaufs eines Gradiometers



Abbildung 5.4: Skizze des Signalverlaufs eines Magnetometers

Mit dem Gradiometer wurde im Vergleich zum Magnetometer für alle getesteten Magnetstromstärken im Bereich zwischen 1 A und 19 A, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, eine deutlich höhere Signalamplitude gemessen. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da bei den jeweiligen Betriebsspannungen die Empfindlichkeit des Magnetometers beim Doppelten des Gradiometers liegt. Zudem wird beim Magnetometer bei einem Magnetstrom zwischen 4 A und 5 A ein starker Abfall der Signalamplitude beobachtet.



Abbildung 5.5: Amplitudenverlauf des Fehlersignals unterschiedlicher Sensorarten bei variablem Magnetstrom

Abbildung 5.6 zeigt die Amplitude des magnetischen Hintergrundrauschens beider Sensorarten in Abhängigkeit vom Magnetstrom. Der beim Magnetometer schon beim Defektsignal beobachtete Amplitudenabfall zwischen 4 A und 5 A tritt auch beim magnetischen Hintergrundrauschen auf.



Abbildung 5.6: Amplitudenverlauf des magnetischen Hintergrundrauschens unterschiedlicher Sensorarten bei variablem Magnetstrom

Beim Gradiometer findet mit steigender Magnetstromstärke ebenfalls ein Absinken der Amplitude sowohl des Fehlersignals als auch des magnetischen Hintergrundrauschens statt. Ein schneller Abfall ist jedoch nicht zu beobachten. Durch die deutlich höheren Signalamplituden wird mit diesem Sensortyp trotz eines höheren Pegels des magnetischen Hintergrundrauschens bei jeder getesteten Magnetstromstärke ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzielt. Dieses ist für beide Sensorarten in Abhängigkeit vom Magnetstrom in Abbildung 5.7 dargestellt.



Abbildung 5.7: SNR einer 200 $\mu m$ Durchgangsbohrung unterschiedlicher Sensorarten bei variablem Magnetstrom

Die Feldstärke der Streufelder von Fehlern sowie des Hintergrundrauschens nimmt mit zunehmendem Abstand zwischen Sensoren und Materialoberfläche ab. Daher werden die Auswirkungen des Luftspalts auf die Amplituden der Fehlersignale und des Hintergrundrauschens sowie auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis untersucht. Der Magnetstrom wurde auf 3,5 A festgesetzt, da bei dieser Stromstärke der starke Abfall der Signalamplituden bei den Magnetometern noch nicht eintritt und gleichzeitig mit den Gradiometern bereits hohe Signal-zu-Rausch-Verhältnisse erzielt werden.



Abbildung 5.8: Amplitudenverlauf des Fehlersignals unterschiedlicher Sensorarten bei variablem Luftspalt



Abbildung 5.9: Amplitudenverlauf des magnetischen Hintergrundrauschens unterschiedlicher Sensorarten bei variablem Luftspalt

Wie in den Abbildungen 5.8 und 5.9 zu erkennen, messen die Gradiometer bei niedrigen Luftspalten, bei welchen von höheren Feldstärken auszugehen ist, deutlich höhere Signalamplituden als die Magnetometer. Bei einer Vergrößerung des Luftspalts gleichen sich die Signalamplituden an. Dieser Effekt ist bei geringen Magnetfeldstärken besonders ausgeprägt und nimmt für höhere Magnetfeldstärken ab. Dementsprechend ist von einem Sättigungsverhalten der Magnetometer auszugehen. Gleichzeitig ist die Amplitude des magnetischen Hintergrundrauschens bei Messungen mit den Gradiometern stets niedriger als bei Messungen mit den Magnetometern. Es wird angenommen, dass ein günstiges Verhältnis zwischen der für das magnetische Hintergrundrauschen verantwortlichen Materialstruktur und dem Abstands der sensitiven Flächen von Gradiometern des Typs ABL004-00 vorliegt. Dies führt zu einer Absenkung der gemessenen Amplitude des magnetischen Hintergrundrausches im Vergleich zu absoluten Messungen mittels Magnetometern (z.B. Typ GF705-AMA). Eine Validierung dieser Annahme durch Messungen mit Gradiometern mit anderen Abständen zwischen den sensitiven Flächen findet aus zeitlichen Gründen nicht statt und wäre Gegenstand künftiger Untersuchungen. Beide Effekte führen, wie aus Abbildung 5.10 ersichtlich, bei Messungen mit Gradiometern des Typs ABL004-00 zu einem deutlich höheren Signal-zu-Rausch-Verhältnis.



Abbildung 5.10: SNR eines 200 $\mu m$ Durchgangslochs unterschiedlicher Sensortypen bei variablem Luftspalt

Die Defektgröße hat ebenfalls Auswirkungen auf magnetische Feldstärke. Allerdings erzielen auch bei kleineren Defekten Gradiometer des Typs ABL004-00 stets deutlich höhere Signalzu-Rausch-Verhältnisse als Magnetometer des Typs GF705-AMA. So liegt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei ersteren für ein Durchgangsloch mit 100  $\mu m$  Durchmesser und bei 900  $\mu m$  Luftspalt bei hohen Magnetstromstärken über 10 dB. Mit Magnetometern des Typs GF705-AMA werden bei optimaler Magnetstromstärke jedoch nur 8,5 dB erzielt. Daher findet die weitere Entwicklung auf Grundlage von Gradiometern des Typs ABL004-00 statt.

## 5.2 Analoge Signalverarbeitung

Die bei der analogen Signalverarbeitung eingesetzten Komponenten wirken sich auf den Signalverlauf aus. Daher werden die im Kapitel 4.5 beschriebenen Varianten 2 und 3 mit jeweils unterschiedlichen Verstärkertypen auf die mit künstlichen Fehlern erzielbaren Signalzu-Rausch-Verhältnisse untersucht. Hierfür werden zunächst Messungen auf fehlerfreiem, bewegtem Material vorgenommen. Bei diesen liegt die Materialgeschwindigkeit bei 10,8  $\frac{m}{c}$ der Luftspalt bei 500  $\mu m$  und der Magnetstrom bei 7 A. Die Magnetisierung erfolgt in Bewegungsrichtung des Materials, die Abtastrate beträgt 32  $\frac{kS}{s}$ . Die Einstellungen der Filternetzwerke sowie die Versorgungsspannungen sind identisch. Eine Unterscheidung zwischen elektrischem Rauschen und dem magnetischen Hintergrundsignal des Materials findet über einen Vergleich zwischen dem Messsignal bei ruhendem und sich bewegendem Material statt. Das elektrische Rauschen besitzt bei Verstärkern, welche Variante 2 als auch Variante 3 in Kapitel 4.5 entsprechen, ähnliche Amplituden. Mit Verstärkern entsprechend der Variante 2 aus Kapitel 4.5 ist bei Messungen auf bewegtem Material ein Signal zu erkennen, dessen Frequenzanteile augenscheinlich deutlich unter und dessen Amplitude deutlich über der des elektrischen Rauschens liegt. Bei Verstärkern, welche der Variante 3 entsprechen, ist ein solches kaum erkennbar.



Abbildung 5.11: Übersicht des magnetisches Hintergrundsignals von bewegtem Stahlband mit unterschiedlichen Verstärken, Sensorart: Gradiometer



Abbildung 5.12: Ausschnitt des magnetisches Hintergrundsignals von bewegtem Stahlband mit unterschiedlichen Verstärkern, Sensorart: Gradiometer

Wie in den Abbildungen 5.11 und 5.12 zu erkennen, findet keine hinreichende Verstärkung der Sensorsignale durch Verstärker, welche der Variante 3 entsprechen, statt. Dies konnte auch durch unterschiedliche Einstellungen des Nachverstärkers (OP37 und TLE2081) nicht behoben werden. Daher wird ein Konzept auf Grundlage der Variante 2 weiterverfolgt. Die Signalverläufe und Signal-zu-Rausch-Verhältnisse unterschiedlicher Kombinationen von Differenz- und Nachverstärkern werden bei verschiedenen Fehlern und Betriebsparametern verglichen. Die in Abbildung 5.13 dargestellten Signalverläufe eines 100  $\mu m$  Durchgangslochs bei einer Geschwindigkeit von 10,8  $\frac{m}{s}$  und einem Luftspalt von 500  $\mu m$  veranschaulichen den Einfluss unterschiedlicher Komponenten. Der Magnetstrom liegt bei 7 A, die Magnetisierung erfolgt parallel zur Bewegungsrichtung des Materials.



Abbildung 5.13: Signalverlauf einer Durchgangsbohrung, <br/>ø $100~\mu m,$ unterschiedliche Vor- und Nachverstärker

Da sich die Signalverläufe in Abhängigkeit von den Verstärkertypen unterscheiden, werden in Abhängigkeit von letzteren auch unterschiedliche Signal-zu-Rausch-Verhältnisse erreicht. Um zusätzlich den Einfluss der Amplitude des Sensorsignals darzustellen, werden in Abbildung 5.14 die mit den unterschiedlichen Verstärkerkombinationen erreichten Signalzu-Rausch-Verhältnisse in Abhängigkeit vom Magnetstrom dargestellt. Die Erhöhung des Magnetstroms erfolgt bis zu 9 A, da in diesem Bereich die größten Amplitudenänderungen auftreten. Alle weiteren Parameter entsprechen der zuvor angeführten Messung.



Abbildung 5.14: SNR eines Durchgangsbohrung, ø 100 $\mu m,$ in Abhängigkeit vom Magnetstrom, unterschiedliche Vor- und Nachverstärker

Bei niedrigen Magnetstromstärken liefern alle Verstärker sehr ähnliche Ergebnisse. Bei Magnetstromstärken ab 4,5 A werden mit Differenzverstärkern des Typs INA106 durchgehend um etwa 3,5 dB bessere Signal-zu-Rausch-Verhältnisse erreicht als mit Differenzverstärkern des Typs AD628. Als Ursache werden die in Kapitel 4.5 beschriebenen Unterschiede beim internen Aufbau der Verstärker und ein sich daraus ergebendes unterschiedliches Kleinsignalverhalten vermutet. Der Nachverstärker hat lediglich Einfluss auf die Signalamplituden, ein eindeutiger Effekt beim Signal-zu-Rausch-Verhältnis kann jedoch nicht beobachtet werden. Wie in Abbildung 5.15 ersichtlich wird der Effekt deutlicher, wenn alle Signalamplituden durch eine Erhöhung des Luftspalts auf 900  $\mu m$  abgesenkt werden. Die systematischen Unterschiede zwischen den Messreihen mit gleichen Vor- und unterschiedlichen Nachverstärkern sind möglicherweise auf andere Einflüsse wie beispielsweise Ungenauigkeiten bei der Einstellung des Luftspalts zurückzuführen. Die weiteren Messungen werden mit Vorverstärkern des Typs INA106 und Nachverstärkern des Typs OP37 durchgeführt.



Abbildung 5.15: SNR einer Durchgangsbohrung, ø 100  $\mu m,$ in Abhängigkeit vom Magnetstrom bei 900  $\mu m$ Luftspalt, unterschiedliche Vor- und Nachverstärker

Eine Einstellung der Grenzfrequenz des Tiefpassfilters auf Werte unterhalb von 12 kHz verschlechtert das Signal-zu-Rausch-Verhältnis aller untersuchten künstlichen Fehler. Eine Erhöhung auf über 20 kHz führt ebenfalls zu einer Verschlechterung und ist auch auf Grund der geplanten Abtastfrequenz nicht sinnvoll. Je nach untersuchter Materialgüte könnte durch eine Dämpfung des magnetischen Hintergrundrauschens mittels Tiefpassfilter eine kleine Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erzielt werden. Hierzu wäre allerdings eine elektronische Anpassung der Grenzfrequenz nötig, um alle möglichen Materialien zu berücksichtigen. Durch die hohe erforderliche Kanalzahl würde dies jedoch zu einer wirtschaftlich nicht umsetzbaren Komplexität führen. Auch lässt sich eine frequenzabhängige Dämpfung in begrenztem Umfang auch in der Auswertesoftware realisieren. Daher wird die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters bei 18,95 kHz belassen.

## 5.3 Magnetisierung

#### 5.3.1 Auswirkung der Magnetisierungsrichtung auf Defektsignale

Der Winkel zwischen dem Magnetfeld und der Bewegungsrichtung des untersuchten Materials hat insbesondere bei bewegtem Prüfgut großen Einfluss auf die von Defekten erzeugten Streufelder sowie auf deren aufgezeichneten Signale. Daher werden drei verschiedene, technisch umsetzbare Magnetisierungsanordnungen mit unterschiedlichen künstlichen Defekten getestet: Eine Magnetisierung längs, quer und im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung. Die Anordnung der Magneten, Sensoren sowie die von diesen abgedeckte Spuren sind in der Abbildung 5.16 dargestellt.



Abbildung 5.16: Sensor- und Magnetanordnungen sowie abgedeckte Spuren bei unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen

Die messtechnisch optimale Magnetisierungsrichtung wird durch den Vergleich von Messungen auf künstlichen Defekten mit unterschiedlichen Magnetisierungrichtungen bei variablen Magnetströmen und Materialgeschwindigkeiten bestimmt. Abbildung 5.17 zeigt das Signal einer Durchgangsbohrung mit einem Durchmesser von 100  $\mu m$  bei unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen. Die Geschwindigkeit beträgt 10  $\frac{m}{s}$ , der Luftspalt liegt bei 500  $\mu m$  und die Magnetstromstärke bei 10 A.



Abbildung 5.17: Signalverlauf einer Durchgangsbohrung, ø 100  $\mu m$ , Materialgeschwindigkeit 10  $\frac{m}{s}$ , unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen

Da bei einer Magnetisierung parallel zur Bandlaufrichtung beide empfindliche Bereiche der Gradiometer von dem Defekt passiert werden, kommt es aufeinanderfolgend zu Signalausschlägen entgegengesetzter Polung. Je nach Ausdehnung des detektierten Streufelds ist dies auch für eine Magnetisierung im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung der Fall. Die Amplitude des unipolaren Ausschlags bei einer Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung ist zudem geringer als die des jeweiligen Signalanteils gleicher Polung der anderen Magnetisierungsrichtungen. Eine mögliche Ursache sind durch die Bewegung des Materials in diesem auftretende Wirbelströme [45] [46] [47]. Eine Abnahme des Effekts bei niedrigeren Geschwindigkeiten ist jedoch nicht zu beobachten.



Abbildung 5.18: Signalverlauf einer Durchgangsbohrung, ø 100  $\mu m$ , Materialgeschwindigkeit 3,3  $\frac{m}{s}$ , unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen

Die im Abbildung 5.18 dargestellten Signale wurden bei einer reduzierten Materialgeschwindigkeit von 3,3  $\frac{m}{s}$  und ansonsten unveränderten Bedingungen aufgenommen. Sowohl die Unterschiede bei den Amplituden als auch beim Hintergrundrauschen sind nahezu unverändert.

Die Effekte, welche bei einer Magnetisierung parallel und im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung zu erhöhten Amplituden führen, wirken sich sowohl auf das Fehler- als auch auf das magnetische Hintergrundsignal aus. Nichtsdestotrotz liegt das in Abbildung 5.19 in Abhängigkeit vom Magnetstrom dargestellte Signal-zu-Rausch-Verhältnis für Löcher bei einer Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung unter dem der anderen Magnetisierungsrichtungen.



Abbildung 5.19: SNR einer Durchgangsbohrung, ø 100  $\mu m$ , Materialgeschwindigkeit 10  $\frac{m}{s}$ , unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen

Wie aus Abbildung 5.20 ersichtlich, ist dies im gesamten erwarteten Materialgeschwindigkeitsbereich zwischen 1,7  $\frac{m}{s}$  und 10  $\frac{m}{s}$  der Fall.



Abbildung 5.20: SNR einer Durchgangsbohrung, <br/>ø $100~\mu m,$  Magnetstrom 10 A, unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen

Abbildung 5.21 stellt den Signalverlauf einer in Bandlaufrichtung 1 mm langen, 100  $\mu m$  breiten und 25  $\mu m$  tiefen Nut bei 10 A Magnetstrom, 500  $\mu m$  Luftspalt und 10  $\frac{m}{s}$  Materialgeschwindigkeit dar. Bei einer Magnetisierung quer und im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung wird eine ähnliche Signalamplitude erreicht, während diese bei einer Magnetisierung parallel zur Bandlaufrichtung geringer ist.



Abbildung 5.21: Signalverlauf einer Nut, l = 1 mm, b = 100  $\mu m$ , t =  $25\mu m$ , unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen

Wie bei den vorherigen Messungen ist das Hintergrundrauschen bei einer Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung im Vergleich zu den anderen Magnetisierungsrichtungen deutlich reduziert. Daher wird im Gegensatz zu kompakten Defekten bei Nuten mit einer Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung ein deutlich höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzielt. Dieses ist in Abhängigkeit vom Magnetstrom in Abbildung 5.22 dargestellt.



Abbildung 5.22: SNR einer Nut, l = 1 mm, b = 100  $\mu m$ , t = 25 $\mu m$ , Materialgeschwindigkeit 10  $\frac{m}{s}$ , unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen

Die in einschlägiger Fachliteratur angegebene nicht-Detektierbarkeit von in Magnetflussrichtung länglichen Fehlern wird bestätigt. Die absolute Signalamplitude des Defektsignals ist jedoch weitgehend unabhängig von der Magnetisierungsrichtung. Die unterschiedlichen Detektierbarkeiten und damit Signal-zu-Rausch-Verhältnisse werden durch je nach Magnetisierungsrichtung unterschiedliche Amplituden des magnetischen Hintergrundrauschens bedingt. Die vorhergesagte Detektierbarkeit ab einem Winkel von 45° zwischen Fehler und Flussrichtung kann ebenfalls nicht bestätigt werden. Die Klärung der Herkunft des Hintergrundrauschens ist bislang nicht abgeschlossenen. Interpretationsansätze sowie durchgeführte und noch ausstehende Untersuchungen hierzu finden sich in Kapitel 8. Eine Erklärung für die Abweichung der Beobachtungen von in der Fachliteratur beschriebenen Messergebnissen gibt es daher bislang nicht. [15] [48] [49]

#### 5.3.2 Charakterisierung natürlicher Fehlstellen

Wie in Kapitel 1.4 beschrieben, besitzen in Feinstblech auftretende Defekte durch den Walzprozess hauptsächlich in Bandlaufrichtung längliche Formen. Dieser Sachverhalt wird

durch die Inspektion von Feinstblechproben, welche durch einen großen Feinstblechhersteller zur Verfügung gestellt wurden und kleine natürliche Defekte enthalten, untersucht. Die Defekte wurden beim Hersteller mittels Magnetpulverprüfung lokalisiert sowie markiert und werden mittels Durchstrahlungsprüfung und magnetooptischem Handmikroskop betrachtet. Bei der Durchstrahlungsprüfung kommt eine MXR-225HP/11 Röntgenröhre (0,4 mm Brennfleckdurchmesser) des Herstellers Comet sowie ein Teledyne DALSA Xineos-1515 CMOS-Halbleiterdetektor mit einer Pixelgröße von 99  $\mu m$  zum Einsatz. Beim magnetooptischem Handmikroskop handelt es sich um ein mageve des Herstellers matesy.

Die folgenden Bilder zeigen Röntgenaufnahmen einiger vergleichsweise gut erkennbarer Defekte bei 50 kV Beschleunigungsspannung, 4 mA Anodenstrom und 2 mm Aluminium-Filterung. Die Defekte befinden sich stets innerhalb einer Unterlegscheibe, welche als dunkler Ring zu erkennen ist. Beim dunklen Bereich im unteren Teil des Bildes handelt es sich um eine 12  $\mu m$  starke Titanfolie. Die unbekannte Zusammensetzung des Einschlussmaterials, das komplexe Absorptionsverhalten der polychromatischen Strahlung einer Röntgenröhre sowie die im Vergleich zur Pixelgröße kleinen Einschlussabmessungen erlauben keine genaue Bestimmung der Einschlussstärke. Bei Annahme eines linearen Verhaltens des Detektors kann die Größenordnung der Defekte jedoch grob abgeschätzt werden.



Abbildung 5.23: Röntgenaufnahme eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.1)



Abbildung 5.24: Röntgenaufnahme eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.2)



Abbildung 5.25: Röntgenaufnahme eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.3)

Im Photonenenergiebereich zwischen 30 keV und 50 keV besitzt Eisen bei Raumtemperatur einen durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten von 36,14  $\frac{1}{cm}$ , während Titan bei 12,59  $\frac{1}{cm}$  liegt. Die Absorptionskoeffizienten der typischen Einschlussmaterialien Aluminiumund Calciumoxid ( $Al_2O_3$  und CaO) werden anhand der jeweiligen Stoffmengenanteile abgeschätzt. Im selben Photonenenergiebereich erhält man so Absorptionskoeffizienten vom 8,08  $\frac{1}{cm}$  für Aluminiumoxid und 4,32  $\frac{1}{cm}$  für Calciumoxid [50]. Die in den Abbildungen 5.21, 5.22 und 5.23 dargestellten Einschlüsse besitzen Signalhübe von jeweils etwa 58, 42 und 34 Digits. Die Abschwächung durch die Titanfolie beträgt stets 56 Digits. Die radiometrischen Dicken der Einschlüsse und der Titanfolie liegen folglich in der selben Größenordnung. Gemäß des Absorptionsgesetztes  $N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$  würden die Einschlüsse eine ungefähre minimale Stärke zwischen 2,6  $\mu m$  - 4,4  $\mu m$  bei Luft, 3,4  $\mu m$  - 5,8  $\mu m$  bei Aluminiumoxid und 3,0  $\mu m$  - 5,2  $\mu m$  bei Calciumoxid besitzen.

Bei der folgenden magnetooptischen Untersuchung wird das Material durch den beim zuvor beschriebenen Versuchsaufbau eingesetzten Elektromagneten magnetisiert. Aus räumlichen Gründen befinden sich der magnetooptische Detektor und der Magnet im Gegensatz zu den vorherigen Messungen auf entgegengesetzten Seiten des Materials. Der Magnetstrom wurde für eine optimale Sichtbarkeit der Fehler angepasst. Die folgenden Bilder zeigen magnetooptische Aufnahmen der in den Röntgenaufnahmen 5.21 - 5.23 dargestellten Einschlüsse in gleicher Reihenfolge.



Abbildung 5.26: Magnetooptische Aufnahme eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.1)



Abbildung 5.27: Magnetooptische Aufnahme eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.2)



Abbildung 5.28: Magnetooptische Aufnahme eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.3)

Alle Aufnahmen werden mit einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung erstellt. Bei einer Magnetisierung parallel oder im 45°-Winkel zur Walzrichtung sind die Einschlüsse optisch nicht zu erkennen. Insgesamt werden 10 Proben mit natürlichen Fehlern magnetooptisch untersucht. Lediglich bei einer Probe ist bei allen Magnetisierungsrichtungen ein Streufeld erkennbar. Bei den anderen 9 Proben ist dieses lediglich bei einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung sichtbar.

Ein Teil der zur Verfügung stehenden Proben besitzt eine hinreichende Größe, um mittels

des in Kapitel 4.2 beschriebenen Versuchsaufbaus untersucht zu werden. Die Größe der Proben genügt nicht für die vollständige Abdeckung der in Kapitel 4.1 aufgeführten Hartgewebescheiben. Daher werden die Proben am Scheibenrand aufgebracht und deren hervorstehende Ränder Zwecks Vermeidung von Kollisionen in innerhalb der Scheibenoberfläche eingefräste Nuten gedrückt. Da dies zu einer starken Unwucht der Scheiben führt und zudem die Gefahr besteht, dass sich Proben durch die Fliehkraft lösen, können die Messungen nur bei geringen Materialgeschwindigkeiten stattfinden. Die in den Abbildungen 5.29 - 5.31 gezeigten Signalverläufe wurden bei einem Magnetstrom von jeweils 10 A, einer Materialgeschwindigkeit von 1,7  $\frac{m}{s}$  und einem verringerten Luftspalt von 300  $\mu m$  aufgenommen. Das Material wird quer zu seiner Bewegungsrichtung magnetisiert, da bei anderen Magnetisierungsrichtungen keine Signale beobachtet werden können. Die Reihenfolge der untersuchten Einschlüsse entspricht den vorherigen Darstellungen.



Abbildung 5.29: Signalverlauf eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.1)



Abbildung 5.30: Signalverlauf eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.2)



Abbildung 5.31: Signalverlauf eines kleinen natürlichen Fehlers (Nr.3)

Die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse betragen jeweils 8,1 dB, 7,3 dB und 8,3 dB. Einschlüsse dieser Art und Größenordnung können daher, wenn überhaupt, nur bei einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung detektiert werden.

#### 5.3.3 Technische Umsetzung

Bezogen auf die zu entwickelnde Anlage zur Bandinspektion mit möglichst vollständiger Abdeckung ist eine Magnetisierung parallel zur Bandlaufrichtung technisch am einfachsten, eine Magnetisierung im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung am aufwändigsten umsetzbar. Bei einer Magnetisierung parallel zur Bandlaufrichtung kann, wie in Abbildung 5.16 gezeigt, ein großes, zusammenhängendes Magnetjoch verwendet werden, welches sich über die gesamte Materialbreite erstreckt. Innerhalb dieses Jochs können Sensoren in durchgehenden Zeilen angeordnet werden. Die Sensorzeile besitzt in Bandlaufrichtung nur geringe Ausmaße. Sie ist daher deutlich kleiner als die Jochbreite, sodass die Feldstärke und -richtung im Prüfgut für alle Sensoren nahezu homogen ist. Zudem ist nur eine präzise gefertigte und verfahrbare Baugruppe zur Aufnahme der Sensoren nötig, da die gesamte Materialbreite von einer Sensorzeile lückenlos abgedeckt werden kann.

Auf Grund der begrenzten Jochweite des Magneten sind sowohl bei einer Magnetisierung quer als auch im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung mindestens 2 Sensorzeilen erforderlich. Es wird daher eine entsprechende Anzahl verfahrbarer Baugruppen zur Aufnahme der Sensoren benötigt, was die mechanische Komplexität einer Anlage deutlich erhöht. Bei einer Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung unterscheiden sich die Breiten der einzelnen Sensorzeilen nicht von einer Magnetisierung parallel zur Bandlaufrichtung. Die einzelnen Sensorzeilen können daher jeweils im Scheitelpunkt einer nicht ferromagnetischen Rolle an das darauf stabilisierte Material herangeführt werden. Die Abweichungen der Sensorabstände durch die Krümmung der Rollenoberfläche sind dabei nur gering: Bei einer Sensorzeilenbreite von 10 mm und einem üblichen Rollendurchmesser von 440 mm beträgt die Abstandsdifferenz 57  $\mu m$ , was vernachlässigbar wäre. Bei einer Magnetisierung im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung sind die Sensoren in einem entlang des Materials besonders großem Bereich angeordnet. Durch die Krümmung der Rollenoberfläche käme es zu deutlich größeren Abstandsabweichungen. Die Sensorzeilen müssten daher im Abhebepunkt des Bandes von der Rolle an dieses herangeführt werden. Dies erschwert die Konstruktion und spätere Ausrichtung des Systems und erhöht die Gefahr von Kollisionen durch vertikale Bandbewegungen.

Werden Sensoren innerhalb des Jochs über dessen Breite verteilt platziert, kommt es zwischen unterschiedlichen Sensorpositionen innerhalb des Jochs zu Inhomogenitäten bei der Feldverteilung. Diese sind nahe den Polschuhen besonders ausgeprägt, sodass hier keine Sensoren platziert werden können. Auch ist keine hinreichende und homogene Magnetisierung des Materials möglich, falls ein Joch teilweise über dessen Rand hinausragt. Dies führt im Randbereich zu einer unvollständigen Bandabdeckung. Vom konstruktiven Standpunkt aus wäre daher eine Magnetisierung in Bandlaufrichtung vorzuziehen.

Gleichzeitig bringt eine Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung signifikante Vorteile bei der Detektion kleinerer Einschlüsse. Mit einer Magnetisierung parallel oder im 45°-Winkel zur Bandlaufrichtung kann die erforderliche Detektionsgrenze hinsichtlich der Defektgröße hingegen nicht erreicht werden. Daher wird trotz der damit verbundenen mechanischen Komplexität eine Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung umgesetzt.

Zur Bestimmung der maximalen einsetzbaren Magnetjochweite wird diese bei fortlaufender Messung und einer hohen Materialgeschwindigkeit von 10,8  $\frac{m}{s}$  schrittweise vergrößert. Ab einer Jochweite von etwa 70 mm fallen die Signalamplituden deutlich ab. Eine fortlaufende Verschiebung der Sensorplatine innerhalb eines 70 mm breiten Magnetjochs zeigt einen etwa 50 mm breiten Bereich in der Mitte des Jochs, in welchem eine Streuflussprüfung möglich ist. Befinden sich die Sensoren näher an den Polschuhen des Jochs, kommt es zu einem deutlichen Abfall der Signal-zu-Rausch-Verhältnisse von künstlichen Defekten.

Um eine gegenseitige Beeinflussung von benachbarten Magneten zu verhindern, müssen diese eine jeweils entgegengesetzte Polung besitzen. Bei Versuchen mit gleichen Polungen kommt es bei den zuvor beschriebenen Betriebsparametern und Prüfgütern zur Ausbildung eines durchgehenden Magneten. Innerhalb dessen angeordnete Polschuhe besitzen keine Wirkung. Auf Grund der zuvor beschriebenen maximalen Magnetjochbreite bei einer Magnetisierung quer zur Bandlaufrichtung ist eine Prüfung von bewegtem Material mit einer solchen Anordnung nicht möglich. Bei einer entgegengesetzten Polung der Magneten wird auch bei aufeinanderfolgender Einschaltung kein Einfluss der benachbarten Magneten beobachtet.

Für eine lückenlose Abdeckung des Materials bei einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung sind zwei Sensorzeilen mit jeweils eigenen Magneten erforderlich. Auf Grund der Materialbewegung ist daher durch Remanenz ein Einfluss eines Magneten auf im Bandlauf dahinter liegende Komponenten möglich. Zwecks Untersuchung dieses Effekts werden einige zuvor beschriebene Messungen mit einem zusätzlichen Magneten bei einer hohen Materialgeschwindigkeit von 10,8  $\frac{m}{s}$  wiederholt. Dieser befindet sich im Scheibenumlauf vor dem Messaufbau und magnetisiert das Material ebenfalls quer zur Bewegungsrichtung. Bei einem Abstand von 100 mm zwischen den Magneten kommt es auch bei der mit dem Aufbau maximalen möglichen Stromstärke des zusätzlichen Magneten zu keiner Beeinflussung des Messung. Ein kleinerer Abstand zwischen den Magneten ist aus mechanischen Gründen nicht möglich.

## 5.4 Einfluss der Fehlergröße, des Luftspalts und der Geschwindigkeit

Es wird die Abhängigkeit der Signalamplitude von der Fehlerform, dem Fehlervolumen sowie dem Fehlerquerschnitt orthogonal zur Magnetisierungsebene untersucht. Die Bestätigung eines einfachen Zusammenhangs zwischen Signalamplitude und Fehlervolumen oder Fehlerquerschnitt würde eine erweiterte Auswertung detektierter Defekte im späteren Produktionsbetrieb ermöglichen. Es werden Messungen auf den bereits aufgeführten künstlichen Fehlern sowie auf Gruppen von Durchgangsbohrungen mit kleinen Durchmessern durchgeführt. Dabei handelt es sich um Durchgangsbohrungen mit 50  $\mu m$  und 100  $\mu m$  Durchmesser, welche in Reihen von 2, 4 und 6 Bohrungen mit einem Abstand zwischen 200  $\mu m$  und 400  $\mu m$  entlang der Bewegungsrichtung angeordnet sind. Solche in Abbildung 5.32 skizzierten Fehler sollen Vorhersagen zum magnetischen Verhalten von Einschlüssen ermöglichen, welche aus mehreren nah beieinander liegenden, jedoch nicht zusammenhängenden Bruchstücken bestehen.



Abbildung 5.32: Skizze einer Lochreihe

Zunächst werden die von solchen Fehlern erzeugten Signalformen betrachtet. Die Messungen werden bei 10  $\frac{m}{s}$  Materialgeschwindigkeit und 10 A Magnetstromstärke durchgeführt. Der Luftspalt beträgt 500  $\mu m$ . Alle untersuchten Fehler sind in gleichartiges Material mit einer Dicke von 205  $\mu m$  eingebracht. Die Abbildungen 5.33 und 5.34 zeigen die Signale einiger Bohrungsreihen.



Abbildung 5.33: Signalverläufe von reihenförmig angeordneten 50 $\mu m$ Durchgangsbohrungen, Bohrungsabstand 200 $\mu m$ 



Abbildung 5.34: Signalverläufe von reihenförmig angeordneten 100 $\mu m$ Durchgangsbohrungen, Bohrungsabstand 200 $\mu m$ 

Es sind keine Signale einzelner Bohrungen erkennbar. Jede Bohrungsreihe erscheint als zusammenhängendes Signal, was auf ein gemeinsames Streufeld der Bohrungen einer Bohrungsreihe hindeutet. Daher werden die untersuchten Bohrungsreihen im Folgenden hinsichtlich Querschnitt und Volumen als zusammenhängende Einzelfehler betrachtet. Abbildung 5.34 stellt die Amplitude der Sensorsignale von einzelnen Bohrungen und Nuten bei optimaler Sensorausrichtung in Abhängigkeit vom Fehlervolumen dar.



Abbildung 5.35: Signalamplitude von Nuten und Bohrungen in Abhängigkeit von deren Volumen

Man erkennt, dass sich die Werte bei kleineren Defektvolumen annähernd einem linearen Verlauf zuordnen lassen. Beim größten Bohrungs-Messwert scheint es zu einer Sättigung zu kommen. Für eine Bestätigung wären weitere Messwerte mit Defektvolumina zwischen  $0,007 \ mm^2$  und  $0,013 \ mm^2$  erforderlich.



Abbildung 5.36: Signalamplitude von Nuten und Bohrungen sowie Bohrungsreihen in Abhängigkeit von deren Volumen

Bei einer Einbeziehung der Bohrungsreihen in die Betrachtung ergeben sich im Vergleich zu deren Volumen sehr hohe Signalamplituden. Werden die Bohrungsreihen bei der Berechnung des Volumens als zusammenhängende Langlöcher (beispielsweise im Fall einer Bohrungsreihe aus 3 Bohrungen mit 50  $\mu m$  Durchmesser und je 200  $\mu m$  Abstand als Langloch mit 450  $\mu m$  Länge und 50  $\mu m$  Breite) betrachtet, ergibt sich für die 50  $\mu m$ Bohrungsreihen eine gute Übereinstimmung mit einer Extrapolation der Messwerte der Einzeldefekte. Die 100  $\mu m$  Bohrungsreihe weist auch bei einer Betrachtung als zusammenhängendes Langloch deutlich höhere Signalamplituden als erwartet auf, was angesichts der im Vergleich zu den 50  $\mu m$  Bohrungsreihen geringeren Abständen zwischen den Bohrungsrändern unerwartet ist. Eine mögliche Erklärung ist eine Sättigung des Materials im Bereich der Stege zwischen den Löchern, was zu einem noch größeren Volumen mit niedriger Permeabilität führt.

Bei den bislang untersuchten künstlichen Fehlern steht der Querschnitt orthogonal zur Magnetisierungsrichtung hinsichtlich der variierten Werte in einem linearen (Nuten) oder quadratischen (Bohrungen) Zusammenhang mit deren Volumen. Da zudem nur eine geringe Anzahl Fehler untersucht wurde, kann auf dieser Grundlage keine Aussage dazu getroffen werden, ob ein linearer Zusammenhang zum Fehlervolumen oder Querschnitt orthogonal zur Magnetisierungsebene angenommen werden kann. Auf Grund der ungünstigen Fehlergeometrie zeigt sich für die Signalamplituden von Nuten und Bohrungen auch gegenüber deren Querschnitt ein annähernd lineares Verhalten.



Abbildung 5.37: Signalamplitude von Nuten und Bohrungen in Abhängigkeit von deren Querschnitt orthogonal zur Magnetisierungsrichtung

Auch bei der Betrachtung der Signalamplituden in Abhängigkeit vom Fehlerquerschnitt ergeben sich für die Lochreihen sehr hohe Amplituden. Eine Betrachtung als zusammenhängende Langlöcher führt ebenfalls zu keiner Übereinstimmung mit der aus den Werten für Bohrungen und Nuten erzeugten Ausgleichsgeraden.



Abbildung 5.38: Signalamplitude von Nuten und Bohrungen sowie Bohrungsreihen in Abhängigkeit von deren Querschnitt orthogonal zur Magnetisierungsrichtung

Weiterführend ist die Herstellung und Untersuchung künstlicher Fehler mit an die Fragestellung angepasster Geometrie angedacht. Denkbar wären beispielsweise Nuten mit unterschiedlicher Breite bei konstanter Länge und Tiefe (was in einem variablen Volumen bei konstantem Querschnitt resultiert) sowie Nuten mit unterschiedlichen Winkeln zur Magnetisierungsebene.

Der Einfluss des Luftspalts wird mittels Vermessung von künstlichen Fehlern bei variablem Abstand untersucht. Das nachfolgende Diagramm stellt die Verläufe der Amplituden von Nuten mit 1 mm Länge, 100  $\mu m$  Breite und jeweils 20  $\mu m$ , 30  $\mu m$  und 40  $\mu m$  Tiefe sowie von Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 70  $\mu m$ , 100  $\mu m$  und 150  $\mu m$  dar. Der Magnetstrom liegt bei 10 A, die Gesamtverstärkung bei etwa 200. Die Materialgeschwindigkeit beträgt 8,3  $\frac{m}{s}$ .



Abbildung 5.39: Signalamplitude von Nuten und Bohrungen in Abhängigkeit vom Luftspalt

Der Amplitudenabfall lässt sich für die untersuchten Fehler ab einem Luftspalt von etwa 350  $\mu m$  gut durch eine zu  $e^{-0,002 \cdot d}$  proportionale Funktion annähern. Bei d handelt es sich um den Luftspalt in Mikrometern. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nimmt mit steigendem Luftspalt annähernd linear ab.



Abbildung 5.40: Signal-zu-Rausch-Verhältnis von Nuten und Bohrungen in Abhängigkeit vom Luftspalt

Für die praktische Anwendung kann der Abnahme des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses mit  $\frac{1,1 \, dB}{100 \, \mu m}$  angenommen werden, wobei der Abfall für kleinere Fehler tendenziell weniger steil verläuft.

Abbildung 5.38 zeigt für die Nuten einen Vergleich der gemessenen Signalamplituden mit für diese Fehlergeometrie vorhergesagten Werten, welche nach dem in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Ansatz von Shcherbinin und Pashagin berechnet wurden. Letztere wurde unter der Annahme der Erfassung des Streuflusses durch nur eine Sensorfläche des Gradiometers bestimmt. Der Bandpasses zwischen Vor- und Nachverstärker wurde vernachlässigt.



Abbildung 5.41: Gemessene sowie nach dem Ansatz von Shcherbinin und Pashagin berechnete Signalamplitude von Nuten in Abhängigkeit vom Luftspalt

Die nach dem Ansatz von Shcherbinin und Pashagin berechneten Streufeldstärken liegen deutlich unter den nach dem Ansatz von Förster bestimmten Werten. Die tatsächlich gemessenen Signalamplituden liegen wiederum deutlich unter der Vorhersage nach dem ersten Ansatz. Die Abweichung zwischen Vorhersage und Messergebnis nimmt dabei mit fallendem Luftspalt zu. Mögliche Ursachen wären unter anderem der Einfluss des Filternetzwerks, eine Ausdehnung des Streuflusses über beide empfindliche Flächen des Differenzsensors sowie ein vom einfachen Modell abweichendes magnetisches Verhalten des Bandes. Das Filternetzwerk als alleinige Ursache kann ausgeschlossen werden: Der Tiefpass besitzt eine Zeitkonstante  $\tau = 8, 4 \, \mu s$ . Das Signal einer 1 mm lange Nut steht jedoch auch bei einer sehr hohen Materialgeschwindigkeit von 17  $\frac{m}{s}$  für eine Dauer von mindestens 60  $\mu s$  an. Über die Signaldauer müssten daher über 99 % der ursprünglichen Amplitude erreicht werden. Die Zeitkonstante des Hochpasses liegt bei  $\tau = 1, 1 \, ms$ . Selbst bei einer sehr langsamen Materialgeschwindigkeit von 1,7  $\frac{m}{s}$  läge die Signalamplitude noch bei etwa 60 % des ursprünglichen Signals. Bei der tatsächlichen Materialgeschwindigkeit von 8,3  $\frac{m}{s}$  verringert sich die Signalamplitude rechnerisch um 11 %. Die magnetischen

Eigenschaften des Materials gehen beim Ansatz von Shcherbinin und Pashagin, wie anhand der Ausdrücke 2.11 - 2.23 ersichtlich, nur durch die Permeabilität in Form des Faktors

$$\frac{\frac{2T}{s} + 1}{\frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{2T}{s} + 1} \tag{5.1}$$

in die Streuflussberechnung ein. Eine falsch angenommene Permeabilität würde daher zu einer linearen Abweichung der Vorhersage zu den Messwerten führen. Dies ist jedoch, wie in Abbildung 5.42 zu erkennen, nicht der Fall. Der Einfluss der Permeabilität als Ursache ist demzufolge nicht plausibel.



Abbildung 5.42: Differenz zwischen den gemessenen Signalamplituden von Nuten und nach dem Ansatz von Shcherbinin und Pashagin berechneten Werten in Abhängigkeit vom Luftspalt

Eine weitere mögliche Ursache der Abweichung ist eine Beeinflussung beider empfindlichen Sensorflächen statt, wie bei der Berechnung angenommen, nur einer Sensorfläche durch den Streufluss. Dies würde bei abnehmendem Luftspalt zu einer steigenden Abweichung führen, was der Beobachtung entspricht. Voraussetzung für ein solches Verhalten wären Ausmaße des Streuflusses, welche deutlich über der Größe des ursprünglichen Defekts liegen.

### 5.5 Streuflussausdehnung

Die Ausdehnung der Streuflüsse der in Abbildung 5.36 beschrieben künstlichen Fehler wird untersucht, indem ein Sensor bei konstantem Luftspalt quer zur Bewegungsrichtung des Materials an einem Fehler vorbeigeführt wird. Der Fehler passiert dabei wiederholt mittels in Abschnitt 4.1 beschriebenem Prüfstand den Sensor. Durch eine optische Drehwinkelerfassung erfolgt die Kurvenaufzeichnung stets bei der selben Fehlerposition entlang der Bewegungsrichtung des Materials. Durch die Verwendung von Gradiometern ist die Interpretation der Daten nicht trivial. Die folgenden Darstellungen entsprechen daher nicht den tatsächlichen Werten der jeweiligen Streufeldstärke sondern lediglich der Feldstärkedifferenz zwischen den empfindlichen Sensorflächen. Streufelder, deren Größe gleich oder größer als der Sensorflächenabstand (Sensorflächenabstand bei Gradiometern des Typs ABL004-00: 1 mm) ist, besitzen bei einer zur Streufeldmitte hin monoton ansteigenden Flussdichte Signalverläufe, deren Ausdehnungen mit steigenden Feldabmessungen stets zunehmen. Zwischen diesen besteht dabei folgender Zusammenhang:

$$Signalbreite = \frac{Streuflussgröße}{2} + \frac{Sensorflächenabstand}{2}$$
(5.2)

für  $Streuflussgröße \geq Sensorflächenabstand.$ 

Die in den Abbildungen 5.43 und 5.44 dargestellten Signalverläufe einer 1 mm langen, 100  $\mu m$  breiten und 30  $\mu m$  tiefen Nut und einer Durchgangsbohrung mit 70  $\mu m$  Durchmesser werden bei einer Geschwindigkeit von 8,3  $\frac{m}{s}$  und einem Magnetstrom von 10 A aufgenommen. Der Luftspalt beträgt 500  $\mu m$ .



Abbildung 5.43: Signalamplitude einer 1 mm langen, 100 $\mu m$ breiten und 30 $\mu m$ tiefen Nut in Abhängigkeit von Materiallänge und Querposition des Sensors



Abbildung 5.44: Signalamplitude einer 70 $\mu m$ Durchgangsbohrung in Abhängigkeit von Materiallänge und Querposition des Sensors

Abbildung 5.45 stellt den Verlauf der maximalen Signalamplitude dieser Defekte in Abhängigkeit von der Sensorposition quer zur Materialbewegungsrichtung dar. Dies entspricht einem Querschnitt durch die Diagramme aus den Abbildungen 5.43 und 5.44 quer zur Materiallängenachse im Punkt der maximalen Signalamplitude.



Abbildung 5.45: Maximale Signalamplitude einer 70 $\mu m$ Durchgangsbohrung und einer 30 $\mu m$ tiefen Nut in Abhängigkeit von der Querposition des Sensors

Man erkennt, dass sich die Signalamplitude bei beiden Defekten über einen Verfahrweg von jeweils über 1 mm deutlich vom Hintergrundrauschen abhebt. Der Streufluss der Defekte erstreckt sich somit über eine Breite von über 1 mm. Gemäß des Ausdrucks 5.2 kann die maximale Streuflussbreite für beide Defekte mit mindestens 1600  $\mu m$  abgeschätzt werden. Eine Ausdehnung des Streuflusses über beide empfindlichen Sensorflächen der Gradiometer wäre daher, je nach tatsächlichem Verlauf der Streufeldstärke, eine plausible Erklärung für die zuvor beschriebenen Abweichungen zwischen Rechnung und Messwerten. Ob sich die teils sehr starken Abweichungen jedoch hauptsächlich durch diesen Effekt erklären lassen, kann mit den vorliegenden Daten nicht abgeschätzt werden. Für die Bestimmung der tatsächlichen maximalen Signalamplitude wäre eine Messung mittels Gradiometer erforderlich, deren Sensorflächenabstand größer ist als die Streuflussabmessungen. Gradiometer mit passenden Kennlinien bei größeren Sensorflächenabständen sind jedoch nicht kommerziell verfügbar. Möglich wäre ein diskreter Aufbau von Gradiometern aus einzelnen Magnetometern mit einem Abstand von wenigen Millimetern. Die Realisierung eines solchen Aufbaus ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

# 6 Prototyp und Prüfsystem

Es sollen Erkenntnisse zu unterschiedlichen natürlichen Fehlerarten, Fehlerverteilungen sowie zum allgemeinen magnetischen Verhalten unterschiedlicher Materialgüten gewonnen werden. Hierfür muss eine große Anzahl Bänder aus der laufenden Produktion möglichst vollständig untersucht werden. Für viele Fehlerarten steht keine alternative Detektionsmethode zur Verfügung, welche die Gewinnung von Laborproben ermöglichen würde. Daher wird zur Validierung der Laborergebnisse ein Prüfsystem benötigt, welches in der laufenden Produktion eingesetzt werden kann. Die so detektierten natürlichen Fehler können individuell sowie statistisch untersucht und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen werden.

Nicht nur innere Einschlüsse sondern auch Oberflächenverletzungen und Änderungen der inneren Struktur des Materials, welche beispielsweise durch ungleichmäßige Verformung auftreten, können Streufluss verursachen. Dadurch könnten auch großflächige Materialveränderungen mittels Streuflussprüfung detektiert werden. Der Nachweis erfordert ein Prüfsystem, durch welches das Material möglichst lückenlos und hochauflösend untersucht wird.

## 6.1 Sensormodul

Die Überprüfung der grundsätzlichen Eignung und Anwendbarkeit der Prüfmethode unter Produktionsbedingungen erfordert das Einbringen eines Prüfgeräts in eine Produktionslinie. Dieses sollte einen möglichst großen Materialbereich abdecken. Im Gegensatz zum Laboraufbau ist ein Schutz vor elektrischen und mechanischen Störeinflüssen nötig.

Auf Grund der durch die Magnetisierung quer zur Walzrichtung begrenzten Magnetjochweite bietet sich ein modularer Aufbau an. Dieser ermöglicht den Aufbau eines kompakten Prototypen und bietet bei einer künftigen Prüfanlage eine einfache Skalierbarkeit sowie Wartungsmöglichkeit.

Bei den Sensormodulen handelt es sich um abgeschlossene Einheiten, welche Sensoren, Verstärker und Filter, Digitalisierung, Magnet mit Ansteuerung und Spannungsversorgung dieser Komponenten beinhalten. Wie in Kapitel 5.3.3 ausgeführt, ist die für die Platzierung von Sensoren geeignete Fläche über dem Scheitelpunkt einer Bandführungsrolle begrenzt. Die räumliche Auflösung eines Prüfsystems mit mehreren Sensoren stellt damit immer einen Kompromiss zur Sensorgröße dar. Diese wiederum hat direkten Einfluss auf die Empfindlichkeit [51] [52]. Ein Sensormodul enthält auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Abschnitten 5.3 und 5.5 48 Gradiometer des Typs ABL004-00. Diese sind in 3 versetzten Reihen mit einer Gesamtauflösung von 1 mm angeordnet. Die Sensoren befinden sich innerhalb eines Magnetjochs mit einer inneren Breite von 70 mm. Da beim finalen Prüfsystem eine vollständige Materialabdeckung mit zwei versetzten Reihen Sensormodule erzielt werden soll, beträgt die maximale Sensormodulbreite 96 mm. Um Toleranzen bei der Montage zu ermöglichen, wurde das Sensormodul mit einer Breite von 95 mm konstruiert. Auf Grund des kleinen Luftspalts handelt es sich bei den Sensoren aller Voraussicht nach um Verschleißteile. Daher soll zum einen ein guter Schutz und zum anderen ein einfacher, geometrisch reproduzierbarer Austausch der Sensoren gewährleistet sein. Hierfür werden diese innerhalb eines Aluminiumrahmens mittels Epoxydharz zu einem Sensorblock vergossen. Eine genaue Positionierung der Sensoren über deren Leiterplatte ist nicht möglich, da Leiterplattenmaterial grundsätzlich hohe Dickentoleranzen aufweist. Daher wird der Sensorblock nach dem Verguss manuell mitsamt einem Teil der Sensorgehäuse abgefräst, wodurch der effektive Luftspalt zwischen Sensor-Die und Material verringert werden kann. Die mögliche Materialabnahme am Sensorgehäuse ohne Risiko einer Beschädigung wurde zuvor mittels Mikroskopaufnahmen mehrerer sukzessive bearbeiteter Sensoren bestimmt. Der Magnet wird hinsichtlich Windungszahl und Leiterquerschnitt auf die Betriebsspannung von 24 V angepasst. Dadurch ist eine Ansteuerung über dessen gesamten Leistungsbereich durch einen einfachen Abwärtswandler möglich. Es kommt ein Schaltwandler zum Einsatz, dessen Unbedenklichkeit hinsichtlich Störungen der Sensorsignale durch Testmessungen nachgewiesen wurde.

Die Digitalisierung erfolgt mittels mehrerer AD-Wandler und eines FPGAs zur Bündelung der Daten und Steuerung aller Komponenten.

Die Abbildung 6.1 zeigt ein Sensormodul in geöffnetem und geschlossenem Zustand.


Abbildung 6.1: Sensormodul in geöffnetem und geschlossenem Zustand

Bis zu 8 Sensormodule können an einen Aggregator (entworfen von Tim Beiküfner, IMS Röntgensysteme) angeschlossen werden. Dieser übernimmt deren Steuerung und kombiniert die Messdaten zu einer dem GigE-Standard entsprechenden Übertragung. Werden die Sensormodule, wie in Abbildung 5.16 gezeigt, in 2 Zeilen mit einer halben Modulbreite Versatz angeordnet, entsteht eine magnetische Zeilenkamera mit einer Breite von bis zu 384 mm bei einer Querauflösung von 1 mm. Über ein externes Geschwindigkeitssignal kann die Abtastrate angepasst werden, um eine konstante Längsauflösung beizubehalten. Der Versatz zwischen den Sensorzeilen innerhalb eines Sensormoduls wird automatisch in Abhängigkeit von der Materialgeschwindigkeit ausgeglichen.

### 6.2 Prototyp

Eine erste Begutachtung der Plausibilität der Prüfergebnisse und Industrietauglichkeit der Sensormodule erfordert deren versuchsweisen Einbau in eine Bandverarbeitungsanlage. Hierfür wird eine Vorrichtung zur Anpassung der Sensormodulposition an unterschiedliche Materialstärken benötigt. Auch muss ein zügiges Zurückziehen der Module vom Band bei durchlaufender Schweißnaht oder unvorhergesehenen Störungen möglich sein, um Kollisionen zu verhindern. Der verwendete Aufbau besteht aus zwei Sensormodulen, welche auf einem auf Rollenumlaufführungen befestigten Schlitten angebracht sind. Dieser kann mittels Kugelgewindetrieb und Gleichstromservomotor präzise positioniert werden. Die Führung des Prüfguts wird durch eine bereits vorhandene gummierte Stahlrolle übernommen. Die ausreichende Stärke der Gummibeschichtung verhindert, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, eine negative Beeinflussung der Messung durch das ferromagnetische Rollenmaterial. Auf einer zwei Sensormodulen entsprechenden Breite von 190 mm bietet diese auch eine ausreichende mechanische Stabilität. Zur Kontrolle des Abstands zwischen Sensoren und Prüfgut werden zwei Abstandssensoren, jeweils neben einem Sensormodul, auf dem Schlitten montiert.

Zum Zeitpunkt dieses Tests ist lediglich die Entwicklung der Geometrie, des Magneten, des Sensorarrays und der analogen Verstärkung und Filterung auf Grundlage der zuvor beschriebenen Untersuchungen abgeschlossen, nicht jedoch der Digitalisierung, Magnetansteuerung und Spannungsversorgung. Daher erfolgt die Digitalisierung zunächst weiterhin durch ein USB-6363 Multifunktions-I/O-Gerät von National Instruments. Dadurch können pro Sensormodul nur 32 Kanäle mit einer Abtastrate von maximal 30  $\frac{kS}{s}$  ausgewertet werden. Die Stromversorgung der Sensoren und Verstärker findet ebenfalls übergangsweise durch Netztrafos mit anschließender Glättung und linearer Spannungsregelung statt.



Abbildung 6.2: CAD-Zeichnung eines Testaufbaus zur Aufnahme von zwei Sensormodulen

Der realisierte Testaufbau ist, unter Ausnahme der I/O-Geräte zur Digitalisierung und der Stromversorgung, als CAD-Zeichnung in Abbildung 6.2 dargestellt. Bei 1 handelt es sich dabei um die Sensormodule, welche auf dem Schlitten 3 an der Prüfgut führenden Rolle 2 positioniert werden. Bei 4 handelt es sich um Kugelgewindetrieb und Servomotor, bei 5 um die kapazitiven Abstandssensoren. Die Reinigungseinheit 6, bestehend aus rotierender Bürste und Pneumatikzylinder, wird ebenfalls erprobt.

Ein Testlauf mit kontinuierlichem, automatischen Betrieb über mehrere Monate verläuft erfolgreich. An den Sensorblöcken der Sensormodule ist Verschleiß zu erkennen, welcher sich jedoch im Rahmen der erwarteten Lebensdauer des Bauteils bewegt. Daher wird an der selben Bandverarbeitungsanlage mit dem Aufbau eines Prüfsystems zur vollständigen Abdeckung der Prüfguts durch Sensormodule begonnen. Die kapazitiven Abstandssensoren erweisen sich als sinnvolle Möglichkeit zur permanenten Überprüfung des Luftspalts. Auf einem Großteil des geprüften Materials werden keine Defekte festgestellt. Eine permanente Fehldetektion kann somit ausgeschlossen werden. Detektierte Fehler besitzen bereits bekannte Verteilungen in Form von in Abbildung 6.3 als Defektkarte gezeigten Fehlerwolken mit entlang des Materials langsam abfallender Fehlerdichte und langen Spuren. Letztere folgen, wie anhand der in Abbildung 6.4 dargestellten Defektkarte ersichtlich, seitlichen Materialbewegungen. Dies bestätigt, dass es sich tatsächlich um Fehler im Material und nicht auf der Rollenoberfläche beziehungsweise um eine Fehlfunktion des Prüfgeräts handelt.



Abbildung 6.3: Durch Prototyp aufgezeichnete Fehlerkarte mit Fehlerdichtenverlauf



Abbildung 6.4: Durch Prototyp aufgezeichnete Fehlerkarte mit Fehlerspur

Die Signalverläufe einzelner Fehler ähneln, wie in den Abbildungen 6.5 und 6.6 zu sehen, den Laborergebnissen.



Abbildung 6.5: Durch Prototyp in der Produktion aufgezeichneter Signalverlauf eines großen natürlichen Fehlers



Abbildung 6.6: Durch Prototyp in der Produktion aufgezeichneter Signalverlauf eines kleinen natürlichen Fehlers

Größere Fehler und geplante Ereignisse wie Schweißnähte und der Materialverfolgung dienende Bohrungen werden sowohl vom Prototypen als auch vom Streuflussprüfsystem eines anderen Herstellers und, je nach Art der Fehler, von optischen Prüfsystemen wie Lochsuchern und Oberflächeninspektionssystemen sicher erkannt. Zudem wurden Fehler detektiert, die von keinem der anderen eingesetzten Systeme erkannt wurden. Diese besitzen großteils eine niedrige Amplitude. Mittels manueller Streuflussprüfung der entsprechenden Materialbereiche und anschließender Anfertigung von Schliffen (ähnlich Abbildungen 1.3 und 1.4) kann stichprobenartig das tatsächliche Vorliegen von Einschlüssen der in Kapitel 1.4 spezifizierten Größenordnung bestätigt werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass es sich um besonders kleine Fehler handelt, welche unterhalb der Detektionsschwelle der anderen Systeme liegen.

Zudem lieferte die Prüfung eines Testbands mit bekannter Fehlerdichteverteilung einen zum Streuflussprüfsystem eines anderen Herstellers sehr ähnlichen Detektionsratenverlauf, die absolute Detektionsrate des Prototypen wäre in Bereichen mit vielen Detektionen jedoch deutlich höher. Dies stützt die Annahme einer höheren Empfindlichkeit des Prototypen. Die vom Prototypen gelieferten Daten erscheinen plausibel und erste Untersuchungen deuten auf eine für die gestellte Prüfaufgabe hinreichende Empfindlichkeit des Konzepts hin. Der mehrmonatige Betrieb in der Verarbeitungslinie verläuft ebenfalls erfolgreich, es gibt keine unerwarteten negativen Einwirkungen auf das Prüfgerät oder die Produktion.

### 6.3 Prüfsystem

Durch den Mitarbeiter Tim Beiküfner (IMS Röntgensysteme) werden eine schnelle Digitalisierung der Sensorsignale mit einer Abtastrate von bis zu 182  $\frac{kSa}{s}$ , ein kompakter Abwärtswandler für die Elektromagneten sowie störungsarme Spannungsversorgungen für Sensoren und Verstärker mit besonders niedriger Restwelligkeit entworfen und implementiert. Die fertiggestellten Sensormodule sind staub- und spritzwassergeschützt und können direkt in der Produktionsumgebung betrieben werden. Zur Abdeckung einer maximalen Materialbreite von 1344 mm werden 2 um eine halbe Sensormodulbreite versetzte Reihen von je 14 Sensormodulen eingesetzt. Die weitere Datenverarbeitung entspricht weitestgehend den bereits im Unternehmen verfügbaren Oberflächeninspektionssystemen, welche optische Zeilenkameras einsetzten. Diese ist in Abbildung 6.7 schematisch dargestellt: Die von den Sensormodulen generierten und von den Aggregatoren zusammengefassten Messdaten werden an einen Kamerarechner übertragen. Dieser fasst die Daten der Aggregatoren zusammen, detektiert Defekte und berechnet für diese Anhand einer externen Datenbank Merkmale zur Klassifizierung. Die Defektdaten jedes geprüften Bandes werden in einer Datenbank auf dem Datenbankrechner abgelegt, wo sich auch eine bearbeitbare Defektdatenbank befindet. Auf Grundlage dieser Datenbanken erfolgt eine Visualisierung der Prüfergebnisse und eine Übertragung an das Prozessleitsystem der Produktionsanlage.



Abbildung 6.7: Übersicht der Datenverarbeitung eines Streufluss-Prüfsystems

Eine Führung des Prüfguts mittels gummierter Baustahlrolle ist bei diesem im Gegensatz zum in Kapitel 6.2 beschriebenen Prototypen nicht mehr möglich, da eine hohe mechanische Stabilität über die gesamte Materialbreite hinweg gegeben sein muss. Daher kommt eine hartverchromte, austenitische Stahlrolle zum Einsatz. Die beiden Sensormodulzeilen sind um 60° entlang des Rollenumfangs versetzt und werden, wie beim Prototypen, individuell mittels Servomotoren und Kugelgewindetrieben positioniert. Der Abstand jeder Sensormodulzeile zum Prüfgut wird mittels 3 kapazitiven Abstandssensoren, wie sie schon beim Prototypen verwendet wurden, überwacht. Die zur Befestigung der Sensormodule dienenden Platten sowie der Träger, welcher der Aufnahme von deren Führungen und Antrieben dient, sind als Hohlkörper ausgeführt. Diese werden von temperiertem Wasser durchströmt. So wird eine hohe mechanische Stabilität sichergestellt und gleichzeitig die Abwärme der Sensormodule auch bei hohen Umgebungstemperaturen sicher abgeführt. Zusätzlich zu den beiden Servoantrieben der Sensormodulzeilen besitzt das Prüfsystem einen pneumatischen Antrieb zum gleichzeitigen Heben beider Zeilen. Dieser unterstützt die Servoantriebe bei Gefahr einer Kollision mit dem Prüfgut (Fluchtfahrt). Im angehobenen Zustand ist eine seitliche Verfahrung des gesamten Prüfsystems in eine Wartungsposition möglich. Hier können am System auch bei laufender Produktion Arbeiten durchgeführt werden. [53] [54] Zudem steht eine Abgleichvorrichtung zur Verfügung: Definiert positionierte Flächen ermöglichen die Überprüfung der Position aller Sensormodule sowie der korrekten Funktion der Abstandssensoren. Sie enthält die in Abbildung 6.8 dargestellte Platinen mit einer Leiterbahn, welche jeden Sensor in einer definierten Position passiert. Diese wird bei einem Abgleich der Sensoren von einem Stromsignal durchflossen. Die so erzeugten

Sensorsignale erlauben Rückschlüsse auf die Empfindlichkeit und das Zeitverhalten der einzelnen Sensoren und somit auf deren grundsätzliche Funktionsfähigkeit. Zusätzlich können unterschiedliche Sensorempfindlichkeiten in Abhängigkeit von deren Position innerhalb eines Sensormoduls, bedingt durch Inhomogenitäten der Prüfgutmagnetisierung, durch einen Faktor kompensiert werden.



Abbildung 6.8: Platinen mit Leiterbahn der Sensor-Abgleichvorrichtung

Bei der aktuellen Sensormodulversion wurde die dem Abgleich dienende Leiterbahn auf einer Innenlage der Sensorplatine integriert und ein DA-Wandler zur Abgleichsignalgenerierung ergänzt. Somit können die Sensoren eines Sensormoduls bei Abwesenheit externer Felder jederzeit ohne zusätzliche Vorrichtungen abgeglichen werden. Die Abgleichvorrichtung dient in diesem Fall lediglich der mechanischen Überprüfung der Prüfsystemgeometrie und der Abstandssensoren. Abbildung 6.9 zeigt den Signalverlauf eines Sensors bei eingeschalteter Abgleichvorrichtung.



Abbildung 6.9: Signalverlauf eines Sensors bei eingeschalteter Abgleichvorrichtung

## 7 Messergebnisse Prüfsystem

Durch die Möglichkeit der Sensorabgleichs wurden signifikante Unterschiede bei den Empfindlichkeiten der Sensoren in Abhängigkeit von deren Position innerhalb eines Sensormoduls festgestellt [55]. Sensoren, welche sich in der Nähe der Magnetpole befinden, erzeugen bei gleichem Feld eine geringere Signalamplitude. Eine Überprüfung der Kennlinie mittels anderer Signalformen des Stroms durch die Abgleichvorrichtung zeigt jedoch ein weiterhin lineares Verhalten, sodass die Empfindlichkeitsunterschiede im Rahmen der Prüfaufgabe mittels Faktor kompensiert werden können. Abbildung 7.1 zeigt die auf Grundlage der Sensorsignalamplitude beim Abgleich errechneten Faktoren über die Breite eines Sensormoduls. Die Empfindlichkeit der Sensoren nimmt in der Nähe der Magnetpolschuhe ab, sodass hier ein höherer Abgleichfaktor berechnet wird.



Abbildung 7.1: Abgleichfaktoren aller Sensoren eines Sensormoduls in Abhängigkeit von deren Position im Magnetjoch

Zudem wird festgestellt, dass die aufgeführte Abgleichfunktion alleine nicht ausreicht, um sicherzustellen, dass nur voll funktionsfähige Sensoren zu den Prüfergebnissen beitragen. In mehreren Fällen liefern vermutlich nur leicht beschädigte Sensoren zwar plausible Ergebnisse beim Abgleich, erzeugen jedoch in größeren und unregelmäßigen Zeitabständen hohe Signalausschläge. Die verursachten Fehldetektionen lassen sich auf Grund ihrer Signalform leicht als solche identifizieren und entsprechend klassifizieren. Sie führen jedoch zu einer unerwünschten Auslastung des Auswertungssystems. Zudem nimmt die Klassifikation der Defekte eines geprüften Bands Zeit in Anspruch und steht somit es nach Bandende zur Verfügung. Fehldetektionen können somit die Anlagenbediener irritieren. Daher wird der Abgleich um eine Sensorüberprüfung ergänzt, bei der die Signale aller Sensoren ohne bewegtes Prüfgut und bei abgeschaltetem Abgleichsignal über mehrere Minuten auf Ausschläge untersucht werden. Treten mehrere Ausschläge bei einzelnen Sensoren auf, werden diese gemeldet und automatisch deaktiviert.

Während mehrerer Monate durchgehenden Prüfbetriebs kann eine Vielzahl unterschiedlicher Fehler und Fehlerverteilungen in Bändern detektiert werden. Neben kompakten Fehlern, beispielhaft dargestellt in Abbildung 7.2, werden auch großflächige Fehler, größtenteils in Form von Oberflächenbeschädigungen, detektiert.



Abbildung 7.2: Kompakter Fehler, dargestellt durch das Streufluss-Prüfsystem

Die meisten solcher in Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4 gezeigten Fehler werden auch von in der Produktionslinie eingesetzten optischen Oberflächeninspektionssystemen detektiert.



Abbildung 7.3: Großflächige Fehlergruppe, dargestellt durch das Streufluss-Prüfsystem



Abbildung 7.4: Großflächiger Fehler, dargestellt durch das Streufluss-Prüfsystem

Es werden die vom Prototypen bereits gefundenen Fehlerverteilungen in Form von Spuren, kompakten Ansammlungen und sukzessiven Verläufen über weitere Bandbereiche in größerem Umfang detektiert. Die Prüfergebnisse werden teilweise von anderen optischen Prüfsystemen bestätigt. Die jeweiligen Fehlerverteilungen sind als Defektkarten in den Abbildungen 7.5, 7.6 und 7.7 dargestellt.



Abbildung 7.5: Durch das Streufluss-Prüfsystem erzeugte Defektkarte mit einer Fehlerspur



Abbildung 7.6: Durch das Streufluss-Prüfsystem erzeugte Defektkarte mit einer Fehlerwolke



Abbildung 7.7: Durch das Streufluss-Prüfsystem erzeugte Defektkarte mit mehreren Bereichen unterschiedlicher Fehlerdichte

Einzelne detektierte Fehler, deren exakte Position auf dem Band sich besonders gut bestimmen lässt, werden mittels Magnetpulverprüfung genau lokalisiert und durch die Anfertigung von Schliffen untersucht. Dadurch werden erste Gegenüberstellungen von Sensorsignalen und der mikroskopischen Beschaffenheit von detektierten Fehlern möglich. Die Abbildungen 7.8 und 7.12 zeigen aufgezeichnete Fehlersignale, die Abbildungen 7.9 -7.11 und 7.13 - 7.15 die dazugehörigen Schliffbildern. Für jeden Fehler wurden 3 Schliffe quer zur Walzrichtung angefertigt. Die Abstände zwischen den einzelnen Schliffen wurden vom ausführenden Labormitarbeiter anhand der Beschaffenheit des Fehlers gewählt und wurden nicht übermittelt. Die Prüfung des zuvor schon mit dem Prototypen untersuchten Testbands bestätigt dessen Ergebnisse.



Abbildung 7.8: Fehler A, dargestellt durch das Streufluss-Prüfsystem



Abbildung 7.9: Erstes Schliffbild Fehler A



Abbildung 7.10: Zweites Schliffbild Fehler A

| Carrier and the second s | No Contraction |
|---|----------------|
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
| 68 µm   |                |
|   |                |
| 19 µm   |                |
|   | 100            |
|   | 100 µm         |

Abbildung 7.11: Drittes Schliffbild Fehler A



Abbildung 7.12: Fehler B, dargestellt durch das Streufluss-Prüfsystem

|               | 115 µm      |        |             |
|---------------|-------------|--------|-------------|
| 9 µm <b>I</b> |             |        |             |
|               |             |        |             |
|               |             |        |             |
|               |             |        |             |
|               |             |        |             |
|               |             |        |             |
|               | 1 0 Mar 2 . | 100 µr | <u>n </u> / |

Abbildung 7.13: Erstes Schliffbild Fehler B



Abbildung 7.14: Zweites Schliffbild Fehler B



Abbildung 7.15: Drittes Schliffbild Fehler B

Des Weiteren konnte eine große Anzahl an inspizierten Bändern auf Zusammenhänge zwischen dem magnetischen Hintergrundrauschen und unterschiedlichen Materialgüten sowie vorangegangenen Produktionsparametern untersucht werden. Dabei wurden, bis auf den Geschwindigkeitseinfluss, keine Zusammenhänge gefunden.

# 8 Interpretation und Ausblick

#### Ergebnisse

Es wird festgestellt, dass kleinste, für die umformende Weiterverarbeitung relevante, Einschlüsse in kaltgewalztem Stahlband mittels elektronischer Streuflussprüfung detektiert werden können. Der Laboraufbau ist in der Lage, spätere Prüfbedingungen hinreichend gut zu simulieren. Die geometrische Stabilität ist ausreichend und mögliche durch den Walzvorgang bedingte Anisotropien im Band erweisen sich nicht als störend. Messungen in der Produktion bestätigen, dass die Signalverläufe der so im Labor untersuchten, künstlichen Fehler den Signalverläufen natürlicher Fehler der gesuchten Größe ähneln. Somit stellt die Untersuchung künstlicher Fehler mit dem Laboraufbau eine geeignete Methode zur Ermittlung der optimalen Parameter für die Prüfaufgabe dar. Auch erweist sich das Prüfverfahren als unter Produktionsbedingungen grundsätzlich anwendbar. Eine Validierung der Produktionsprüfergebnisse durch stichprobenartige Magnetpulverprüfung, teilweise mit anschließender Erstellung von Schliffen, bestätigt die hinsichtlich der Spezifikationen aus Kapitel 1.3 hinreichende Empfindlichkeit des entwickelten Prüfsystems. Zudem wird auch die Möglichkeit zur Erkennung von Walzeneindrücken, Oberflächenschäden und anderen großflächigen Materialveränderungen nachgewiesen.

#### Störgrößen

Bei der die Empfindlichkeit hauptsächlich limitierenden Störgröße handelt es sich um das magnetische Hintergrundrauschen des Prüfguts. Dessen Ursprung konnte bislang nicht abschließend geklärt werden. Bei Annahme der Oberflächenrauheit als Ursache wäre zu erwarten, dass das Streufeld der Rauheit sich mit steigender Magnetisierungsinduktion innerhalb des Prüfguts verstärkt während die Streufelder größerer Defekte abgeschwächt werden [56]. In Kapitel 5.1 wird jedoch ein gegensätzliches Verhalten beobachtet. Mit steigender Induktion schwächen sich sowohl die Streufelder von Defekten jedweder Größe wie auch das magnetische Hintergrundrauschen ab. Der Effekt ist beim magnetischen Hintergrundrauschen sogar ausgeprägter, sodass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis von Defekten mit steigender Induktion zunimmt. Zudem ist bei Labormessungen kein Einfluss des Scheibenwinkels und somit der Bewegungsrichtung des Materials relativ zur ursprünglichen Walzrichtung auf das magnetische Hintergrundrauschen erkennbar. Die Oberflächenstruktur der Proben weist jedoch eine starke Anisotropie in Walzrichtung auf. Andererseits wurde laut Pelkner [57] Oberflächenrauheit von Blechen bei deren Streuflussprüfung auf verdeckte Defekte als Ursache von Hintergrundrauschen identifiziert. Für weitere Hinweise zur Plausibilität der Oberflächenstruktur als Quelle des magnetischen Hintergrundrauschens wird ein begrenzter Bereich von etwa einem viertel Scheibenumfang einer bereits vorhandenen Laborprobe manuell poliert. Der Nachweis einer Veränderung der Oberflächenrauigkeit findet durch Vermessung der Oberfläche mittels Rauheitsmessgerät Hommel T1000 mit dem Taster TKPK100 (Spitzenradius 2  $\mu m$ ) statt. Die Abbildung 8.1 zeigt das Rauheitsprofil quer zur Walzrichtung vor und nach der Politur über eine Messstrecke von 4 mm. Die Rückseite des Materials ist, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, mit einer Kunststoffscheibe verklebt und kann somit nicht bearbeitet werden.



Abbildung 8.1: Rauheitsprofil einer Feinblechprobe quer zur Walzrichtung in poliertem und unpoliertem Zustand, Messstrecke 4 mm

Durch die Politur wurde die Oberfläche messbar geglättet. Der Mittenrauwert  $R_a$  konnte von ursprünglich 1,28  $\mu m$  auf 0,23  $\mu m$  und die gemittelte Rautiefe  $R_z$  von 4,74  $\mu m$  auf 1,17  $\mu m$  (beides gemäß DIN 4768) reduziert werden. Abbildung 8.2 zeigt ein auf dieser Probe aufgenommenes Sensorsignal über einen Scheibenumlauf. Der Luftspalt beträgt 500  $\mu m$ , die Materialgeschwindigkeit 8,3  $\frac{m}{s}$ .



Abbildung 8.2: Sensorsignal einer Feinblechprobe mit poliertem und unpoliertem Bereich

Der im Bereich der ersten 1000 Datenpunkte liegende Signalausschlag entspricht einer Reihe von händisch eingebrachten Körnungen, welche in der Abbildung als Markierungsdefekt bezeichnet sind und den Beginn des polierten Bereichs kennzeichnen. Dieser erstreckt sich über etwa 5000 Datenpunkte und ist in der Abbildung als solcher bezeichnet. Ein Einfluss der Politur auf das Rauschsignal der Probe ist nicht zu erkennen.

Auch das Korngefüge erscheint zunächst nicht als plausible Quelle, da die Körner des untersuchten Materials um etwa eine Größenordnung kleiner sind als die untersuchten natürlichen und künstlichen Fehler [58] [59] [60] [61]. Gleichzeitig scheint das magnetische Hintergrundrauschen ähnliche Signalformen zu besitzen wie durch Fehler verursachte Ausschläge. Allerdings könnte das Korngefüge auf Grund der in Kapitel 5.5 beschriebenen Effekte oder der mögliche Bildung von zusammenhängenden Bereichen mit gleicher magnetischer Vorzugsrichtung durch mehrere Körner magnetische Strukturen in der beobachteten Größenordnung erzeugen. Denkbare Ursache wären auch Lamellenstrukturen innerhalb des Gefüges: Mehrere Perlitkörner mit ähnlicher Ausrichtung der Ferrit-Zementit-Lamellenstruktur könnten Domänen der beobachteten Größenordnung mit ähnlichem magnetischen Verhalten bilden. [62] [63] [64] Schließlich wären auch vom Walzbeziehungsweise Nachwalzvorgang herrührende innere Spannungen eine mögliche Quelle der magnetischen Hintergrundrauschens. Deren Stärke und Geometrie ist bislang nicht bekannt. Das regelmäßige Auffinden von Walzeneindrücken durch das Prüfsystem zeigt, dass Verfestigungen des Materials zu magnetischen Anisotropien führen können [65] [66]. Da die Klassifizierung von detektierten Defekten auf deren Signal-zu-Rausch-Verhältnis beruht, werden Defekte gleicher mechanischer Größe in Materialien mit unterschiedlichem Rauschverhalten unterschiedlich bewertet. Die Herstellung einer eindeutigen Korrelation zwischen aufgezeichneten Signalen und der tatsächlichen Defektgröße setzt somit Kenntnisse zum Rauschverhalten des geprüften Materials voraus.

In einem Sensormodul sind mehrere Sensoren innerhalb eines Magnetjochs angeordnet. Dadurch liegt keine über alle Sensoren homogene Magnetisierung des Prüfguts vor, weshalb das Verhalten eines Sensors je nach dessen Position innerhalb des Sensormoduls variiert. Auch können im Betrieb Sensoren mechanisch beschädigt werden, wodurch sich deren Eigenschaften negativ verändern oder Fehlfunktionen auftreten können. Typische Erscheinungen sind zufällig wechselnde Signalpegel, zufällige hohe Signalausschläge oder ein zeitlich sehr träges Verhalten. Für den automatischen Betrieb einer größeren Sensoranzahl ist somit eine Sensorabgleichsfunktion beziehungsweise Sensorüberprüfungsfunktion erforderlich. Diese werden spezifiziert und implementiert.

Der Luftspalt hat einen signifikanten Einfluss auf die Signale von Defekten sowie das magnetische Hintergrundrauschen. Bei einer Vergrößerung des Luftspalts fallen die Amplituden von Defektsignalen schneller ab als die Amplitude des Hintergrundrauschens, was zu einem Abfall des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses von etwa  $\frac{1.1 \ dB}{100 \ \mu m}$  über die Spanne von 200  $\mu m$  bis 2000  $\mu m$  Luftspalt führt. Eine möglichst hohe Empfindlichkeit macht somit einen möglichst kleinen Luftspalt erstrebenswert. Dem steht jedoch die Anfälligkeit für Kollisionen mit dem bewegten Prüfgut entgegen, sodass der Luftspalt aus Wirtschaftlichkeitsgründen in der praktischen Anwendung auf einen möglichst hohen Wert eingestellt wird, welcher der Prüfaufgabe noch gerecht wird. Um vergleichbare Prüfergebnisse für unterschiedliche Bandstärken zu gewährleisten, wird die Position der Sensormodule durch eine Verfahrung stets auf einen konstanten Luftspalt angepasst.

Der Einsatz von Gradiometern und die verwendete Abschirmung der Komponenten des Sensormoduls erweisen sich für den Einsatz in einer Produktionsumgebung als ausreichend. In keiner Betriebsart wurden störende Einflüsse äußerer Felder beobachtet.

#### Ausblick

Die minimale Größe von Defekten, die von dem Prüfsystem detektiert werden können, wird nicht durch die magnetische beziehungsweise elektrische Empfindlichkeit der Sensormodule sondern durch das magnetische Hintergrundrauschen des Prüfguts begrenzt. Eine weitere Verbesserung der magnetischen Empfindlichkeit des Prüfsystems würde daher nicht die Detektion kleinerer Fehler ermöglichen, solange es nicht gelingt auch die Amplitude des Hintergundrauschens zu reduzieren. Mögliche Ansätze wären eine weitere Anpassung der Sensorgeometrie und eine Filterung von an das jeweilige Prüfgut angepassten Frequenzanteilen in den Sensorsignalen.

Eine Erhöhung der Auflösung bringt keine Vorteil, da nach den Erkenntnissen aus Kapitel 5.5 keine Streufeld-Abmessungen zu erwarten sind, die mit der aktuellen Auflösung nicht detektiert werden könnten.

Möglicherweise könnte eine Steigerung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durch eine Reduktion der Rauschpegel mittels angepasster Filterung erreicht werden [67]. Versuche mit einfachen Ansätzen auf FFT-Basis führten jedoch nicht zu einer Verbesserung. Auch eine Auswertung benachbarter Kanäle zur Reduktion der Rauschamplitude oder Identifizierung von unter der klassischen Detektionsschwelle liegenden Defektsignalen wäre denkbar.

Einen Hinweis auf den Rauschursprung kann auch die Untersuchung der Daten einer großen Anzahl geprüfter Bänder geben. Nach der Kompensation von irrelevanten Einflüssen auf die Rauschamplitude wie beispielsweise der Bandgeschwindigkeit oder des Luftspalts ließen sich möglicherweise Korrelationen mit Materialeigenschaften nachweisen.

Eine genauere Bestimmung der in Kapitel 5.4 beschriebenen Zusammenhänge zwischen dem Querschnitt beziehungsweise Volumen von Defekten und deren Signalamplitude erfordert die Untersuchung weiterer, an die Fragestellung angepasster Defektgeometrien. Hilfreich wäre die Vermessung von Defekten mit unterschiedlichem Querschnitt bei konstantem Volumen und umgekehrt, variablem Volumen bei konstantem Querschnitt. Zudem sollte die Datenpunktdichte bei größeren Defekten erhöht werden.

Die Ursache für die besonders hohen Signalamplituden der untersuchten Bohrungsreihen ist nicht bekannt und Gegenstand künftiger Untersuchungen. Hilfreich wären weitere Lochreihenproben mit feiner abgestuften Lochabständen.

Die im weiteren Verlauf der Einführung des Prüfverfahrens in der Produktion vorgesehene Untersuchung der Erkennungs- und Falschalarmwahrscheinlichkeiten (POD und PFA) gestaltet sich auf Grund der schwierigen Auffindbarkeit einzelner Defekte in mehrere Kilometer langen Bändern als problematisch. Neben der genauen Lokalisierung einer großen Anzahl detektierter Fehler mittels Magnetpulverprüfung mit anschließender Schlifferstellung müssten auch Bänder, welche laut Prüfsystem keine Fehler enthalten, stichprobenartig untersucht werden. Zudem könnte die Erkennungswahrscheinlichkeit für einen Fehler auf Grund der materialspezifischen magnetischen Hintergrundrauschens nur für eine bestimmte Materialgüte angegebenen werden. Der Einfluss unterschiedlicher Materialgüten auf die Streufelder von geometrisch identischen Fehlern wurden bislang nicht untersucht. Ein weiterer Ansatz wäre die Auswertung von Kundenrückmeldungen und Reklamationen über einen längeren Zeitraum und eine große Materialmenge. So könnte die korrekte Identifizierung von Bändern mit einer großen Anzahl Fehler, welche eine für weitere Produktionsschritte relevante Größe besitzen, überprüft werden.

Rückschlüsse von aufgenommenen Signalen auf Fehlerarten und Fehlergrößen erfordern Erkenntnisse zum Einfluss des jeweiligen Materials auf das magnetische Verhalten von Fehlern. Aktuell wird der Versuch unternommen, entsprechende Daten mit Hilfe des Prüfsystems zu gewinnen. Hierfür kommt unter anderem eine Segmentierung und Klassifizierung von aufgenommenen Bildern auf Grundlage eines neuronalen Netzes zum Einsatz, welche bislang hauptsächlich für optische Oberflächeninspektionssysteme eingesetzt wurde.

## Literaturverzeichnis

- [1] Brütsch/Rüeger AG. "Beeinflussung des Gefüges durch Umformung, S.6 ff". In: ().
- [2] A. Höfler. Wärmebehandlung von Stählen. Zugriff: 2019-07-22. URL: http://www. ahoefler.de/de/maschinenbau/werkstoffkunde.html.
- [3] T. Koll, M. Bretschneider, T. Klinkberg, F. Luther, B. Maas. "Optimierter Dressierprozess verbessert die Eigenschaften verzinkter Stahloberflächen". In: *stahl und eisen* (2016).
- [4] thyssenkrupp Rasselstein GmbH. Wege der Produktion. 2018.
- [5] A. Herbert Fritz, G. Schulze. *Fertigungstechnik*, S.427. Springer Verlag, 2004.
- [6] thyssenkrupp Rasselstein GmbH.
- [7] P. Gaujé, S. Rocher, A.Yashan, A.Klein. "Assessment of steel inclusions cleanliness by mixed NDT methods". In: *technical steel research* (2003).
- [8] M. Schwan. Abschlussbericht Entwicklungsprojekt "Ultraschallmessung für dünne Bänder". 2011.
- M. Schwan. "Erkennung von Einschlüssen in Stahlbändern mittels Röntgendurchstrahlverfahren". Magisterarb. TFH Georg Agricola, Fachbreich Maschinen- und Verfahrenstechnik, 2013.
- [10] Krautkrämer. Werkstoffprüfung mit Ultraschall, S.96-S.115. Springer Verlag, 1961.
- [11] J. D. Jackson. *Klassische Elektrodynamik*, S.3. Walter de Gruyter, 2006.
- [12] L. Bergmann, C. Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Elektromagnetismus, S.158. Walter de Gruyter, 2006.
- [13] L. Bergmann, C. Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Elektromagnetismus, S.821 ff. Walter de Gruyter, 2006.
- [14] Heptner, Stroppe. Magnetische und magnetinduktive Werkstoffpr
  üfung, S.13-S.17.
   VEB Deutscher Verlag f
  ür Grundstoffindustrie, 1972.
- [15] Heptner, Stroppe. Magnetische und magnetinduktive Werkstoffpr
  üfung, S.31ff; S.65ff.
   VEB Deutscher Verlag f
  ür Grundstoffindustrie, 1972.

- [16] Deutsch, Morgner, Vogt. Magnetpulver-Rißprüfung, Grundlagen und Praxis, S.15; S.58. VDI Verlag, 1993.
- [17] Deutsch, Morgner, Vogt. Magnetpulver-Rißpr
  üfung, Grundlagen und Praxis, S.33ff; S.53ff. VDI Verlag, 1993.
- [18] F. Förster. "Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streuflussverfahrens". In: Materialpr
  üfung 23, Nr.11 (1981).
- [19] M. Pelkner. Dissertation: Entwicklung, Untersuchung und Anwendung von 'GMR-Sensorarrays für die Zerstörungsfreie Prüfung von ferromagnetischen Bauteilen. 2014.
- [20] V.E. Sherbinin, A.I. Pashagin. "Influence of the extension of a defect on the magnitude of its magnetic field". In: *Soviet Journal of Nondestructive Testing 8* (1973).
- [21] C. Edwards, S.-B. Palmer. "The magnetic leakage field of surface-breaking cracks". In: Journal of Physics D: Applied Physics 19 (1986), S.657-S.673 (14.05.1985).
- [22] S. Blügel, M. Giesen, B. Hillebrands, H. Hillmer, H. Ibach, R. Kassing, H. v. Löhneysen, P. Luger, J. Salbeck, U. Scherz, W. Schilling, L.-K. Thomass. Bergmann Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 6 Festkörperphysik, S.679ff. Walter de Gruyter.
- [23] L. Bergmann, C. Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Elektromagnetismus, S.514 ff. Walter de Gruyter, 2006.
- [24] Honeywell, SEC Electronics Inc., Texas Instruments. Hall-Sensor-Datenblätter der Sensortypen SS490, SS1302, DRV5056, SS49 und weiterer. 2012 - 2020.
- [25] NVE Corporation, Sensitec Magnetoresistive Sensors GmbH. GMR-Sensor-Datenblätter der Sensortypen ABL004, ABL005, ABL006, AA002 - AA007, AB001, GF705 und GF708. 2014 - 2021.
- [26] R.Slatter, Fa. Sensitec. "Neuartige Winkel- und Drehzahlsensoren auf Basis des Tunnelmagnetoresistiven-Effekts". In: Hannover Messe 2017, Special Antriebstechnik (2017).
- [27] M. Pelkner, A. Neubauer, V. Reimund, M. KReutzbruck, A. Schütze. "Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing". In: Sensors, Ausgabe 12, S.12169-12183 (2012).
- [28] C. Baraduc, M.Chshiev, B. Dieny. "Spintronic Phenomena: Giant Magnetoresistance, Tonnel Magnetoresistance and Spin Transfer Torque". In: *Giant Magnetoresistance* (GMR) Sensors (2013).

- [29] S. Blügel, M. Giesen, B. Hillebrands, H. Hillmer, H. Ibach, R. Kassing, H. v. Löhneysen, P. Luger, J. Salbeck, U. Scherz, W. Schilling, L.-K. Thomas. Bergmann Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 6 Festkörperphysik, S.476ff. Walter de Gruyter.
- [30] M. Kreutzbruck, A.Neubauer, M. Pelkner, V.Reimund. "Adapted GMR Array used in Magnetic Flux Leakage Inspection". In: 18. World Conference on Nondestructive Testing. 2012.
- [31] NVE Corporation. GMR Sensor Catalog. 2012.
- [32] G. Mook, W. D. Feist, J. Hinken. "Wolframkarbideinschlüsse in Flugtriebwerkrotoren detektieren, lokalisieren und identifizieren mit elektromagnetischen Verfahren". In: *Materialprüfung, Ausgabe 47, Nr. 4, S.219-225* (2005).
- [33] A. Yashan. Dissertation: Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren, S. 24 ff. 2008.
- [34] M. Pelkner, A. Neubauer, V. Reimund, T. Erthner, N. Panke, M. Kreutzbruck. "Automatisierte Streuflussprüfung und Bewertung von Zylinderlagerringen unter Anwendung von GMR-Sensorarrays". In: DACH-Jahrestagung 2012 in Graz - Mo.2.A.2 (2012).
- [35] A. Kloster, M. Kröning, A. Yashan, J. Smorodinsky, V. Ustinov. "Linear Magnetic Stray Flux Array based un GMR-Gradiometers". In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Ausgabe 18, S.2257-2263* (1993).
- [36] Svenska Kullagerfabriken (SKF). Wälzlager in Elektromotoren und Generatoren. 2005.
- [37] H.-G. Gerlach. Elementare Begriffe der Elektrotechnik, Studienbuch f
  ür Ingenieure, S.79 f. Birkhäuser Basel, 1976.
- [38] S.Sgobba, CERN, Genf, Schweiz. "Physics and measurements of magnetic materials". In: (2009).
- [39] Dr.-Ing. C. Geiger. Handbuch der Eisen- und Stahlgießerei. Verlag von Julius Springer, 1925.
- [40] Wirtschaftsvereinigung Stahl, C.-D. Wuppermann, A. Schoppa. "Merkblatt 401: Elektroband und -blech". In: (2017).
- [41] U.-D. Hünicke, S. Möller, Institut für Werkstoffkunde (IWK), Universität Rostock.
   "Auswertung der statischen Magnetisierungskurve zur Kontrolle von Gefüge- und Behandlungszuständen bei Stählen". In: DGZFP Jahrestagung 2003 (2003).
- [42] P. Wang, Y. Gao, G. Tian, H. Wang. "Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection". In: NDT & E International, Ausgabe 64, S.7-12 (2014).

- [43] Y. Zhou, A. Kay. "Offset Correction Methods: Laser Trim, e-Trim, and Chopper". In: (017).
- [44] A. Neubauer, M. Pelkner, V. Reimund, T.Erthner, N.Bertus, H. M. Thomas, M. Kreutzbruck. "Magnetische Streuflussprüfung mit angepassten GMR Sensor Arrays".
   In: 16. GMA-ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme. 2012.
- [45] Z. Usarek, M. Chmielewski1, L. Piotrowski. "Reduction of the Velocity Impact on the Magnetic Flux Leakage Signal". In: *Journal of Nondestructive Evaluation 38:28* (2019).
- [46] B. Nestleroth and R. Davis. "The effects of magnetizer velocity on magnetic flux leakage signals". In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Ausgabe 12A, S.1891–1898 (1993).
- [47] G. Katragadda, Y. S. Sun, W. Lord, S. S. Udpa, L. Udpa. "Velocity Effects and their Minimization in MFL Inspection of Pipelines — A Numerical Study". In: *Review* of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Ausgabe 14A, S.499–505 (1993).
- [48] D. Lovejoy. *Magnetic Particle Inspection: A practical guide*, S.4 f. Springer Science and Business Media, 1993.
- [49] V. Reimund, M. Pelkner, A. Neubauer, H. M. Thomas, M. v. Kreutzbruck. "Automatische Detektion von Rissen in Stahlbauteilen unter Verwendung von GMR-Sensoren bei der magnetischen Streuflussprüfung". In: DGZFP Jahrestagung 2011 Mo.3.C.4. 2011.
- [50] NIST, X-Ray Mass Attenuation Coefficients. URL: %7Bhttps://physics.nist.gov/ PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html%7D.
- [51] K. Krzywosz. "Advances in GMR for Crack Characterization". In: 7. International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear und Pressurized Components. 2009.
- [52] A. Kloster. Dissertation: Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren, S.54 ff. 2008.
- [55] G. H. Kim, Z. S. Lim. "Magnetic Flux Leakage Inspection for Moving Steel Sheet". In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Ausgabe 18, S.2257-2263 (1993).
- [56] Heptner, Stroppe. Magnetische und magnetinduktive Werkstoffpr
  üfung, S.69f. VEB Deutscher Verlag f
  ür Grundstoffindustrie, 1972.
- [57] M. Pelkner, C. Commandeur, T. Erthner, M. Kreutzbruck, R. Pohl. "Detektion verdeckter Defekte in dünnen Stahlblechen mit GMR-Sensoren". In: DGZfP Jahrestagung 2014–Mo.3.B.2 (2014).

- [58] Arcelor Mittal. Steel for packaging product catalogue. 2021.
- [59] S. Blunden, ITRA Ltd. *Guide to Tinplate*. 2000.
- [60] A. Yin, Q. Yang, H. Fei, H. Xiao. "Determination of Grain Size in Deep Drawing Steel Sheet by Laser Ultrasonics". In: *Materials Transactions, Ausgabe 55(7), S.994-997* (2014).
- [61] G.-S. Park, S.-H. Park. "Analysis of the Velocity-Induced Eddy Current in MFL Type NDT". In: *IEEE Transactions on Magnetics, Ausgabe 40, Nr. 2* (1993).
- [62] H. Pries. Dissertation: GMR-Sensoren für die magnetische Streufeld-Rissprüfung, S.6f. 2014.
- [63] Seeberger GmbH. Das Gefüge der Stähle.
- [64] J. Gola. Dissertation: Objektive und reproduzierbare Gefügeklassifizierung niedriglegierter Stähle, S.6 ff. 2019.
- [65] R. Casperson, A.Dey, R.Pohl, V. Reimund, H. M. Thomas. "Einfluss lokaler Aufhärtung ferritischer Stähle auf die Risstiefenbestimmung mit dem Wirbelstromprüfverfahren". In: DGZFP Jahrestagung 2010, Poster 25. 2010.
- [66] A. Dey, R. Casperson, R. Pohl, H. M. Thomas. "Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung". In: DGZFP Jahrestagung 2009, Di.2.B.3. 2009.
- [67] T. Orth, T. Schmitte, R. Peters, K. D. Müller, A. Koka, S. Nitsche. "Wavelet Signal Processing of Magnetic Flux Leakage Signals - Implementation of a Multichannel Wavelet-Filter for Nondestructive Testing Systems in Steel Tube Mills". In: 6. International Workshop Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of materials. 2009.

## Eigene Veröffentlichungen

- [53] J. Schwarzmann. "Online MFL Inspection System for NMIs in Thin Steel Strip". In: Surface Inspection Summit (SIS) Europe. 2021.
- [54] J. Schwarzmann. "Neuentwicklung eines Online-Inspektionssystems für innere Einschlüsse in Kaltband". In: *Hüttentag (Home of Steel)*. 2021.
- [68] J. Schwarzmann, S. Fritsch, H. Krauthäuser. "New Online Inspection System for Internal Defects in Thin Steel Strip". In: European Steel Technology and Application Days (ESTAD). 2019.
- [69] J. Schwarzmann. "Measuring Technology and Quality Assurance in Packaging Steel Production". In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Ausgabe* 882 (2020). Symposium on Materials and Joining Technology. DOI: 10.1088/1757-899X/882/1/012020.
- [70] J. Schwarzmann. "IMS ermöglicht Früherkennung von inneren Einschlüssen". In: Stahl., S.53-56 1-2 (2022).
- [71] T. Beiküfner J. Schwarzmann. "Online magnetic flux leakage detection of inclusions and inhomogeneities in cold rolled steel plate". In: *Materials Testing, Ausgabe 64:10* (Im Druck).