

# **Rekonstruktion von zweidimensionalen Leiterstrukturen mit Hilfe der Magnetotomographie**

von

Daniel Thomas

Diplomarbeit in Physik

angefertigt im

Institut für Werkstoffkunde und Verfahren der Energietechnik (IWW-3)

in Zusammenarbeit mit der

Zentralabteilung Technologie (ZAT)

im Forschungszentrum Jülich

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

März 2006

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

.....

Referent: Dr. Helmut Soltner

Koreferent: Prof. Dr. Karl Maier

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
1.1	Motivation .....	4
1.2	Gliederung .....	5
2	Methode .....	6
2.1	Verfahrtsch .....	6
2.1.1	Vorschübe und Schrittmotoren .....	8
2.2	Sensoren .....	9
2.2.1	Offset .....	10
2.2.2	Linearität .....	11
2.2.3	Sensitivität / Rauschen .....	14
2.2.4	Dynamisches Verhalten .....	15
2.3	Störeinflüsse .....	17
2.3.1	Statische Felder .....	17
2.3.1.1	Erdmagnetfeld .....	17
2.3.1.2	Andere Gradientenfelder .....	18
2.3.2	Wechselfelder .....	20
2.3.2.1	50 Hz-Netzfrequenz .....	20
2.3.2.2	Wechselfelder von Schrittmotoren .....	21
2.4	Rekonstruktion der Stromverteilung aus der Magnetfeldmessung .....	23
3	Ergebnisse .....	28
3.1	Diskrete Leiterstrukturen zur Untersuchung des räumlichen Auflösungsvermögens ..	29
3.1.1	Kreisring .....	29
3.1.2	Mäanderstruktur .....	31
3.1.3	FZJ-Platine .....	32
3.2	Kontinuierliche Leiterflächen zur Untersuchung der Homogenität des Stromflusses ..	35
3.2.1	Doppelhalbkreis .....	35
3.2.2	Kreisring .....	38
3.3	Doppelseitige Platine mit Defekt .....	40
4	Diskussion .....	44
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	47
6	Anhang .....	48
6.1	Prinzip und Aufbau eines magnetoresistiven Sensors .....	48
6.2	MathCad-Programm zur Rekonstruktion .....	53
6.3	Literatur .....	54

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Brennstoffzellen stellen eine Schlüsseltechnologie mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in Industrie und Alltag dar. Trotz zahlreicher Produktankündigungen gibt es jedoch heute noch kaum kommerzielle Produkte mit Brennstoffzellen, denn diese befinden sich immer noch in einem Stadium der Forschung und Entwicklung. Bei den zur Zeit verfügbaren Prototypen verhindern Kosten und Qualitätsmerkmale einen raschen Markteintritt.

Ein Grund für die Zähigkeit des Entwicklungsprozesses ist, dass keine geeigneten Methoden und Werkzeuge zur schnellen Visualisierung der chemischen Aktivität im Inneren von Einzelzellen und erst recht nicht von zu Stapeln verschalteten Zellen zur Verfügung stehen.

Für einen optimalen Betrieb ist eine homogene Stromdichteverteilung Voraussetzung. In realen Zellen ist diese Bedingung aber nur begrenzt gegeben. Veränderungen der Zustandsgrößen haben Einfluss auf die chemische Aktivität: Druckunterschiede führen zu unterschiedlichen Konzentrationen der Brenngase, Temperaturunterschiede ändern die Reaktionsgeschwindigkeit, und Feuchtigkeitsunterschiede verändern die Leitfähigkeit der Membran. Weitere Ursachen für das Abweichen von einer homogenen Stromverteilung sind die unterschiedlich starke Abnutzung der Katalysatorbeschichtung an den Elektroden und die zeitliche Änderung der Leitfähigkeit der stromführenden Materialien.

Aufgrund dieser Tatsachen lässt sich leicht verstehen, warum es nie eine perfekte homogene Stromdichteverteilung in einem Brennstoffzellenstack gibt. Ziel jeder Entwicklung von Brennstoffzellen ist aber dem Ideal einer homogenen Stromverteilung für alle Betriebssituationen so nahe wie möglich zu kommen. Um dies zu erreichen, ist die Kenntnis über das Verhalten der verschiedenen Parameter (Geometrie, Temperatur, Druck, etc.) auf die Stromdichteverteilung unerlässlich.

An dieser Stelle setzt ein Projekt für die Messung der Stromdichteverteilung im Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik (IWW-3) des Forschungszentrum Jülich an. Seit dem Jahr 2002 wird dort an der Magnetotomographie für Brennstoffzellen geforscht [1]. Ziel dieser nichtinvasiven Methode ist die Rekonstruktion der Stromdichteverteilung von Brennstoffzellen mit Hilfe der Analyse der magnetischen Felder, die bei ihrem Betrieb entstehen.

Unter dem Begriff Tomographie (v. griech.  $\tau\omicron\mu\omicron\zeta$  = Schnitt,  $\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\nu$  = schreiben) werden verschiedene bildgebende Verfahren zusammengefasst, mit denen die räumliche Struktur eines Objektes nichtinvasiv ermittelt werden kann. Tomographie ist ein Verfahren, welches häufig in der Medizin seine Anwendung findet, z.B. als Schichtaufnahmeverfahren der Röntgendiagnostik [2]. Dieses nennt sich Computertomographie; also die rechnergestützte Auswertung einer Vielzahl aus verschiedenen Richtungen aufgenommener Röntgendaten eines Objekts.

Bei der Magnetotomographie werden anders als bei der Computertomographie keine Röntgenstrahlen, sondern Magnetfelder mit Hilfe entsprechender Sensoren detektiert. Mittels ihrer Auswertung ist eine Rückrechnung auf die sie erzeugende Stromverteilung im Objekt möglich. Grundlage für die Berechnung ist das Gesetz von Biot & Savart.

Des Weiteren wird dieses Verfahren bei der zerstörungsfreien Materialprüfung (ZfP, NDE – nondestructive evaluation) genutzt, um Defekte in Werkstoffen festzustellen [3].

Die Diplomarbeit lässt sich als Teil einer Methodenentwicklung zum besseren Verständnis und zur Optimierung von Brennstoffzellen bezüglich ihrer Stromdichte ansehen. Inhalt der Diplomarbeit ist zum einen die Beschreibung des Aufbaus und die Inbetriebnahme eines Verfahrtisches, mit dessen Hilfe Magnetfelder eines stromdurchflossenen Objektes gemessen werden. Zum anderen werden erste Erfahrungen mit der Rekonstruktion von ebenen Leiterstrukturen gesammelt.

Die Beschränkung auf zweidimensionale Strukturen während der Diplomarbeit erfolgt aus mehreren Gründen. Anders als bei der Rückrechnung der Stromdichte aus dreidimensionalen Objekten ist das Problem der ebenen Stromverteilungen im Prinzip eindeutig lösbar [4]. Es fließen keine zusätzlichen Annahmen wie Regularisierungsparameter in die Rückrechenalgorithmen mit ein. Bei der rekonstruierten Stromdichte aus dreidimensionalen Objekten muss zwischen Fehlern, die von der Magnetfeldmessung stammen und den Fehlern, die durch die Rückrechnung eingebracht werden, unterschieden werden. Die Fehlerquelle Algorithmus der Rückrechnung lässt sich zumindest im Prinzip für den zweidimensionalen Fall ausschließen. Fehler der Rekonstruktionen aus den ebenen Stromverteilungen resultieren dann ausschließlich aus Ungenauigkeiten der Magnetfeldmessung zum Beispiel durch die Sensoren oder durch unvermeidliche Störeinflüsse externer Magnetfeldquellen. Auf diese Weise lassen sich die Grenzen der benutzten Messapparatur besser abschätzen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden dann die Grundlage für eine Weiterentwicklung der Rückrechenalgorithmen für dreidimensionale Objekte.

## 1.2 Gliederung

Im folgenden Methodenteil (Kapitel 2.1 und 2.2) dieser Arbeit wird der Aufbau des Verfahrtisches und die Arbeitsweise des Sensorsystems dokumentiert. Einzelne Komponenten werden experimentell charakterisiert. In Kapitel 2.3 werden Fehler- und Störquellen untersucht und geeignete Gegenmaßnahmen zu deren Unterdrückung vorgestellt. In Kapitel 2.4 wird die räumliche Lage der Sensoren mittels einer Sensorkalibrierung erfasst. In Kapitel 2.5 wird eine Methode zur Rückrechnung auf die Stromdichte für zweidimensionale Objekte vorgestellt, die im Ergebnisteil (Kapitel 3) auf Ströme in Leiterplatten angewendet wird. Ein Diskussionskapitel behandelt den gegenwärtigen Stand der Apparatur und weitere Verbesserungsmöglichkeiten.

## 2 Methode

### 2.1 Verfahrtsch

Der im Rahmen dieser Arbeit benutzte Verfahrtsch für die Magnetotomographie an Brennstoffzellen wurde in der Zentralabteilung Technologie (ZAT) des Forschungszentrum Jülich entwickelt. Abbildung 1 zeigt ihn während der Aufbauphase in der ZAT, Abbildung 2 an seinem Platz im IWW 3. Als Unterbau dienen drei Aluminiumplatten mit einer Gesamtfläche von 1,1 m x 2,1 m, gelagert auf sechs Tischbeinen. Die Kopfenden sind mit Querstreben versteift, um ein verwindungsfreies Anheben für den Transport zu gewährleisten. Als Auflage für die zu untersuchenden stromführenden Objekte dient eine robuste Brücke aus Aluminiumprofilen. An den Längsseiten sind zwei parallele Vorschübe angebracht (Achse 1), die einen Rahmen mit den beiden Dreiachsens-Magnetfeldsensoren<sup>1</sup> verfahren. Der Rahmen ist beidseitig mit Aluminium-Winkeln verstärkt, damit ein schwingungsarmes Verfahren möglich ist. Auf der Oberseite des Rahmens sind zwei senkrecht aufeinander montierte Vorschübe (Achse 3 und Achse 4) befestigt. Am unteren Ende des vertikalen Vorschubes befindet sich der obere Sensor (Sensor 1). Der untere Sensor (Sensor 2) sitzt auf einem Vorschub, der auf der Unterseite des Rahmens verfährt in einer Ebene 5cm unterhalb der Auflagefläche der Brücke. In Abbildung 3 wird die Anordnung der Vorschübe sowie die Orientierung der Achsen erklärt.



*Abbildung 1: Verfahrtsch während der Aufbauphase in der ZAT. Die Sensoren werden an dem oberen und unteren Vorschub des Rahmens montiert. Der Rahmen verfährt längs des Tisches. Rechts neben dem Tisch befindet sich der Computer zur Steuerung und Datenaufnahme.*

Bei einer quaderförmigen Brennstoffzelle misst Sensor 2 das Magnetfeld parallel zur unteren Mantelfläche, während Sensor 1 das Feld parallel zu den fünf übrigen Mantelflächen detektiert. In der Praxis ist eine Seitenfläche der Brennstoffzellen für die Senso-

---

<sup>1</sup> Honeywell, HMC 1053

ren nicht erreichbar, da diese u.a. mit Zu- und Abläufen der Brenngase belegt ist. Für die Untersuchung von zweidimensionalen Objekten wird lediglich Sensor 1 benötigt. Dieser rastert eine Ebene parallel über der planaren Struktur ab. Für die in dieser Arbeit beschriebenen Messungen wird nur ein Teil der Möglichkeiten des Verfahrtes ausgenutzt.

Die Vorschübe und die Grundplatte wurden von der Firma ISEL bereitgestellt, während die Schrittmotoren (MS 160, MS 135 HT) Fabrikate der Firma Systro sind. Alle anderen Teile wie Verbindungsstücke, Winkel etc. wurden in der ZAT gefertigt. Bei der Auswahl der Materialien wurde auf ferromagnetische Teile verzichtet. Bereits in den Kaufteilen vorhandene magnetische Stahlteile wurden so weit wie möglich durch Aluminium, Messing oder nichtmagnetischen Stahl ersetzt. Die Gesamtmasse des Tisches beträgt etwa 240 kg.



*Abbildung 2: Verfahrtisch für die Magnetotomographie im IWW-3. Der Rahmen verfährt längs Achse 1. Zwei dreiachsige Magnetfeldsensoren messen das Magnetfeld des stromführenden Objektes auf der Auflage.*

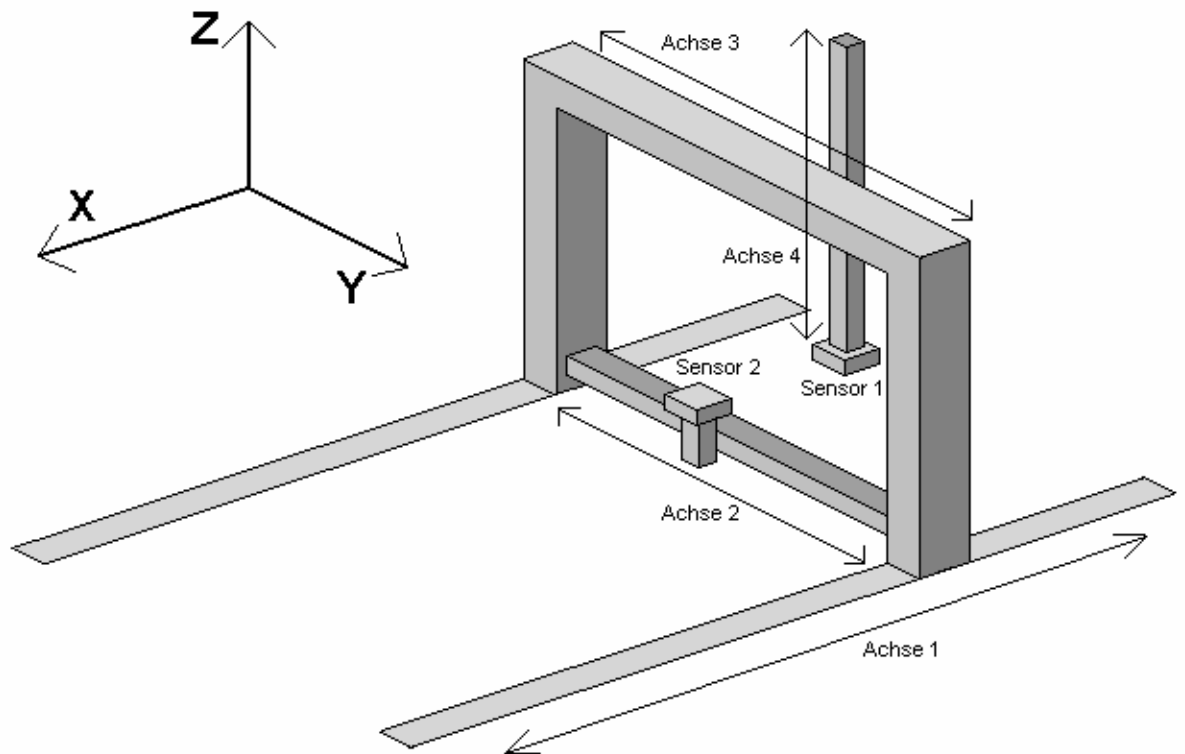


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Vorschübe und deren Ausrichtung auf dem Verfahrtsch. Sensor 1 verfährt in drei Dimensionen, während die Abtastung durch Sensor 2 auf eine Ebene beschränkt ist.

### 2.1.1 Vorschübe und Schrittmotoren

Die Vorschübe, mit denen die Sensoren verfahren werden, werden über Schrittmotoren angetrieben. Die Schrittmotoren beinhalten jeweils einen rotierenden Permanentmagneten, welcher von ortsfesten Spulen umgeben ist. Der Permanentmagnet bildet die Drehachse und ist direkt mit dem Vorschub verbunden [5]. Je nach Ansteuerung der Spulen richtet sich der Permanentmagnet zu dem Magnetfeld der Spulen aus und bewegt den Vorschub. Die zwei großen, mit einer Welle verbundenen Vorschübe (Achse 1) werden gemeinsam von einem stärkeren Schrittmotor (MS 160) mit einem Haltemoment von 1,6 Nm angetrieben. Sie bewegen gemeinsam den Rahmen mit den drei anderen Vorschüben samt Schrittmotoren und den Sensoren. Diese drei baugleichen Schrittmotoren (MS 135HT) besitzen ein Haltemoment von 1,35 Nm. Die Schrittmotoren werden von einer Leistungseinheit<sup>2</sup> angetrieben. Über eine Schnittstelle<sup>3</sup> werden zwischen PC und Steuereinheit Informationen wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung ausgetauscht. Die Einheit für die Positionen sind Schritte. Eine Schrittlänge beträgt 18,8  $\mu\text{m}$  (MS 135HT) bzw. 26,3  $\mu\text{m}$  (MS 160). Mit dieser Auflösung lassen sich Messpunkte hinreichend genau anfahren. Beim Fahren zählt die Leistungseinheit die Schritte mit. Diese Zahl kann vom PC abgefragt werden. Allerdings „vergisst“ die Leistungseinheit

<sup>2</sup> Systro, C 142-4

<sup>3</sup> National Instruments, NI PCI 6289



nach dem Abschalten wieder die absolute Position und muss deshalb nach dem Anschalten neu initialisiert werden. Dazu wird der Vorschub an ein Ende gefahren, wo er einen Taster auslöst, der ihn anhalten lässt. Diese Position wird dann als Startpunkt definiert, von dem aus alle anderen Positionen anhand von Schritten eindeutig festgelegt werden können.

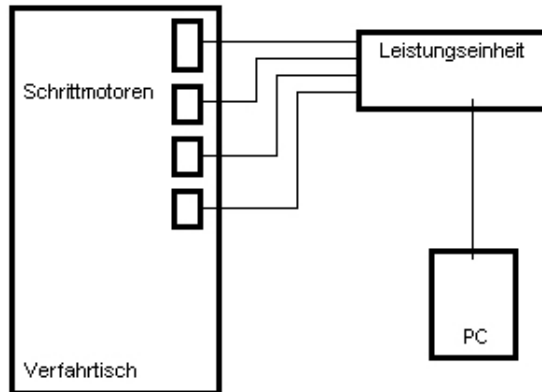


Abbildung 4: Blockschaltbild für die Steuerung der Schrittmotoren. Die Informationen für die Fahrwege werden vom PC an die Leistungseinheit übergeben. Von dort aus werden die Motoren mit entsprechenden Strömen angesteuert.

Die maximale Fahrgeschwindigkeit der Vorschübe beträgt 15 cm/s. Die Positioniergenauigkeit wird vom Hersteller mit 0,1 mm angegeben.

Achse	Max. Weg des Vorschubs		Schrittlänge
	[Schritte]	[mm]	[ $\mu\text{m}/\text{Schritt}$ ]
X Achse 1	40245	1055	26,3
Y2 Achse 2	35400	666	18,8
Y1 Achse 3	29160	550	18,8
Z Achse 4	18400	336	18,8

Für den oberen Sensor ergibt sich ein maximaler Verfahrraum von 1055 mm x 550 mm x 336 mm (0,195 m<sup>3</sup>) zum Messen. Der untere Sensor bewegt sich auf einer Fläche von 1055 mm x 666 mm (0,703 m<sup>2</sup>).

Beim Verfahren der Vorschübe werden die Sensoren durch Beschleunigungskräfte aus ihrer Lage verkippt. Um dieses Kippverhalten zu quantifizieren, wurde ein Laserpointer auf dem oberen Sensor montiert und dann typischer Beschleunigung und Verzögerung ausgesetzt. Auf einer 7 m entfernten Wand beobachtet man den projizierten Lichtpunkt. Die Amplitude des Lichtpunktes von etwa 1 cm entspricht einem Verkipfungswinkel von 0,1°.

## 2.2 Sensoren

Für die Magnetfeldmessung werden zwei dreiaxiale magnetoresistive Sensoren<sup>1</sup> der Firma Honeywell verwendet. Deren Aufbau und Messprinzip wird im Anhang dokumentiert. Jeder Sensor gibt drei Spannungen aus, die im wesentlichen proportional zur jeweiligen magnetischen Flussdichtekomponente ist. Ein solcher Sensorchip hat die Ab-

messungen 7,4 mm x 7,4 mm x 2,6 mm und ist auf einer Platine aufgebracht. Diese wurde in der ZAT konzipiert und mit den nötigen Elektronikkomponenten ausgestattet. In Abbildung 5 ist eine Seite der Platine abgebildet. Der Sensorchip selbst befindet sich auf der Rückseite der doppelseitigen Platine. Auf der Platine befindet sich für jede Magnetfeldkomponente jeweils eine Verstärkerschaltung und ein Tiefpass.



*Abbildung 5: Foto der Sensorplatine. Verstärkerschaltung und Tiefpass für drei Komponenten sind auf der Platine integriert. Der Sensorchip befindet sich auf der Unterseite der Platine.*

Das Spannungssignal eines Sensors wird um den Faktor 200 verstärkt. Der Tiefpass der Elektronik besitzt eine Grenzfrequenz von 2 kHz und filtert die Signale von hochfrequenten Störungen, um Alias-Effekte bei der Digitalisierung der Daten zu vermeiden [6]. Geschützt wird die Elektronik von einem zigaretenschachtelgroßen Plastikgehäuse. Der Messbereich der Sensoren liegt zwischen  $-600 \mu\text{T}$  und  $+600 \mu\text{T}$ . Dieser hohe dynamische Bereich ist für die Brennstoffzellen ausgelegt, die mit bis zu 300 A belastet werden. Für die in der Diplomarbeit vorgestellten Messungen wird dieser Bereich nicht ausgeschöpft. Die Empfindlichkeit des Sensors liegt bei etwa 12 nT [7].

Zwischen Sensor und PC ist eine in der ZAT konstruierte Steuereinheit für die Sensoren integriert. Diese versorgt die Sensoren mit den nötigen Spannungen für die Brückenelemente und die Set/Reset-Funktion. Außerdem stellt sie analoge Sensorspannungen für diagnostische Zwecke bereit.

### 2.2.1 Offset

Idealerweise sollten vier Magnetwiderstände mit exakt gleichen physikalischen Eigenschaften in der Wheatstoneschen Brückenschaltung des Sensors verwendet werden. Es kommt aber während der lithographischen Fertigung zu Abweichungen beim Ablegen der AMR-Elemente auf den Halbleiterchip, was sich in einer Varianz der Widerstandswerte äußert [8],[9]. Dies ist die Ursache für die unerwünschte Eigenschaft, dass man eine Ausgangsspannung, den Offset, selbst ohne ein erregendes Magnetfeld misst. Dieser Offsetspannung lässt sich mit Hilfe der Set/Reset-Funktion (siehe Anhang) [10] leicht berechnen:

$$V_{\text{Offset}} = \frac{V_{\text{Set}} + V_{\text{Reset}}}{2}$$

Die Offsetwerte liegen laut Hersteller bis maximal +/-180 mV. Diese variieren um +/-1,25 mV pro Volt Brückenspannung. Speziell bei den hier verwendeten Sensoren ergeben die drei verschiedenen Komponenten der beiden Sensoren folgende Werte bei 5 V Brückenspannung:

Offset [V]	X	Y	Z
Sensor 1	-0,165+/-0,006	0,082+/-0,003	0,021+/-0,006
Sensor 2	0,014+/-0,004	0,111+/-0,005	0,091+/-0,005

Den größten Offset hat die Komponente X von Sensor 1 mit 0,165 Volt. Dies entspricht einem Magnetfeld von etwa 16,5  $\mu\text{T}$ . Um diesen Wert ist nun der gesamte Messbereich für diese Komponente verschoben. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Offset zu berücksichtigen. Die einfachste ist, einmal nach Set und einmal nach Reset zu messen und die Werte voneinander abziehen und dann zu halbieren.

$$V_{\text{korrigiert}} = \frac{V_{\text{Set}} - V_{\text{Reset}}}{2}$$

## 2.2.2 Linearität

Der Umrechnungsfaktor dU / dB von Sensorspannung zu Magnetfeld für den Sensorchip liegt laut Hersteller in einen Bereich von 0,8 mV – 1,2 mV pro 1 V Brückenspannung und 100  $\mu\text{T}$  Magnetfeld [7]. Rechnet man noch die Verstärkerschaltung ( $v \sim 200$ ) und eine Brückenspannung von 5 V dazu, kann man für das gesamte Messsystem einen Umrechnungsfaktor von etwa 1 V pro 100  $\mu\text{T}$  erwarten. Der Fehler in der Linearität liegt bei 2 %, wenn man den gesamten Messbereich (+/-600  $\mu\text{T}$ ) betrachtet. Absolut entspricht dies einer Abweichung von etwa 12  $\mu\text{T}$ . Im folgenden werden diese Herstellerangaben überprüft. Jede Sensorkomponente wird individuell kalibriert, um den Fehler in der Linearität zu verkleinern.

Innerhalb einer stromdurchflossenen Doppelspule wird ein Magnetfeld erzeugt, welches durch ein Magnetometer<sup>4</sup> mit einer Hallsonde<sup>5</sup> ausgemessen wird. Ein Multimeter<sup>6</sup> kontrolliert den Strom durch die Spule. Die Hallsonde wird dort platziert und ausgerichtet, wo später die jeweils drei Sensorkomponenten des HMC 1053 positioniert werden. Die Sensoren werden mit Aluminiumprofilen im Inneren der Spule fixiert. In Abbildung 6 ist der Messaufbau dargestellt. Trägt man das Magnetfeld gegen den Spulenstrom auf, ergibt sich eine Gerade:

$$B(I) = (-36 \pm 1) \mu\text{T} + (1,3684 \pm 0,0004) \mu\text{T} \cdot \frac{I}{\text{mA}}$$

Der Wert  $-36 \mu\text{T}$  entspricht der vertikalen Komponente des Erdmagnetfeldes und anderer Hintergrundfelder. Die Fehler resultieren größtenteils aus der Ungenauigkeit in der Lage und der Ausrichtung. Der Strom des Netzgerätes<sup>7</sup> ist bis auf 0,01 mA konstant.

<sup>4</sup> F.W. Bell, 7010 Teslameter

<sup>5</sup> F.W. Bell 7000 Hallsonde (transversal, mittleres Feld)

<sup>6</sup> Keithley, 2001

<sup>7</sup> F. u. G. Elektronik, NTN700-35

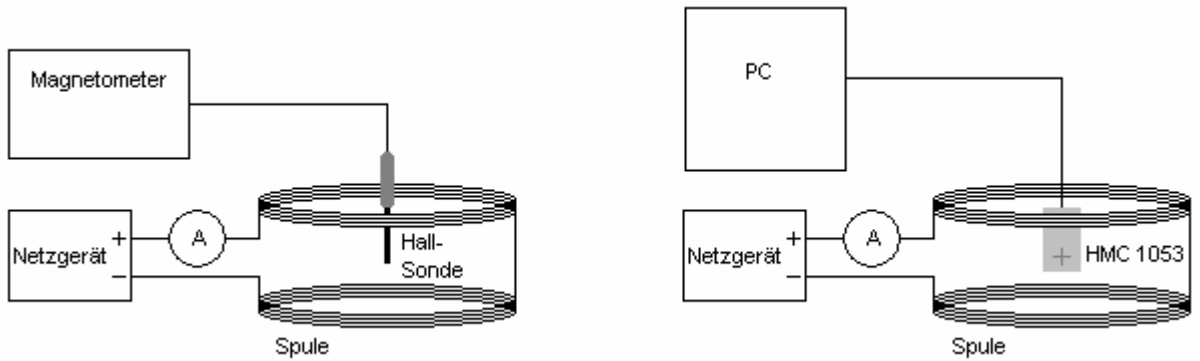


Abbildung 6: Mit Hilfe einer Hallsonde das Magnetfeld in der Spule in Abhängigkeit zum Spulenstrom kalibriert (links). Danach wird (rechts) mit dem neuen Sensor die Sensorspannung in Abhängigkeit zum nun bekannten Magnetfeld gemessen.

Das Magnetfeld lässt sich nun für den noch zu kalibrierenden Sensor anhand des Spulenstroms einstellen. Die Sensorspannung wird über den PC auf 0,1 mV genau ausgelesen und gegen das Magnetfeld aufgetragen. Dieses Vorgehen geschieht in gleicher Weise für alle drei Komponenten. Da die drei Ergebnisse ähnlich sind, wird hier nur die x-Komponente exemplarisch dargestellt.

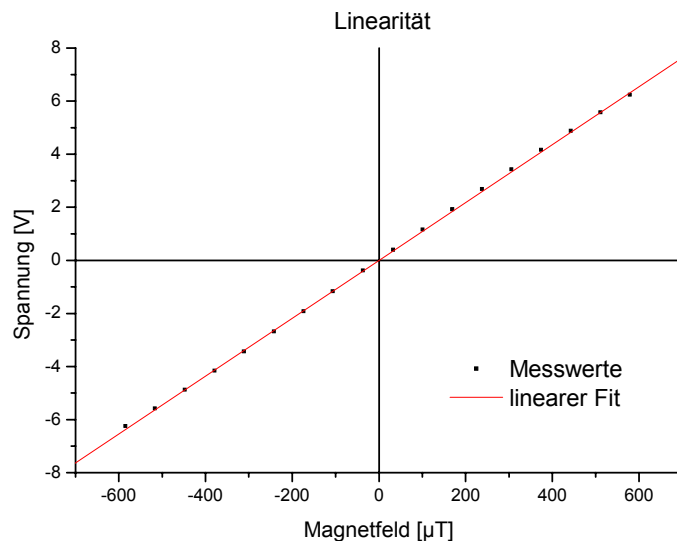


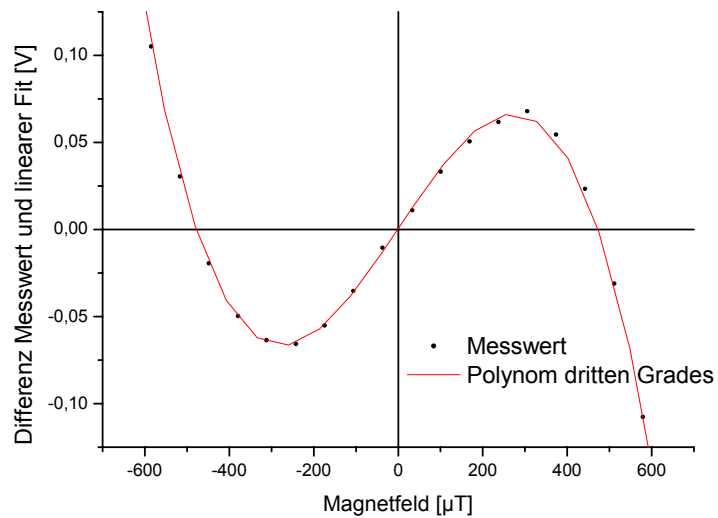
Abbildung 7: Die Sensorausgangsspannung, hier der ersten Sensorkomponente, ist gegen das externe Magnetfeld aufgetragen. Der gesamte Messbereich von  $-600 \mu\text{T}$  bis  $600 \mu\text{T}$  wird abgebildet. Aus der Steigung der Geraden erhält man den Umrechnungsfaktor  $dU/dB$ .

Auf den ersten Blick ergeben sich Geraden. Aus der Steigung erhält man den Umrechnungsfaktor  $dU / dB$ .

dU/dB [ V/100 $\mu$ T ]	X	Y	Z
Sensor 1	1,128 +/- 0,002	1,090 +/- 0,002	1,034 +/- 0,002
Sensor 2	1,111 +/- 0,002	1,106 +/- 0,002	1,029 +/- 0,002

Der Fehler von dU/dB ergibt sich nach Gausscher Fehlerfortpflanzung aus den Ungenauigkeiten in der Spannungs- und Magnetfeldmessung. Bei der Spannung liegt dieser bei 0,1 mV und beim Magnetfeld bei 1  $\mu$ T.

Trägt man die Differenz zwischen Messwerten und der dazugehörigen Werte der Regressionsgeraden noch einmal gegen das Magnetfeld auf, so zeigt sich die Abweichung von der Linearität. Die Messwerte liegen nicht chaotisch neben der Ausgleichsgeraden sondern auf einer Kurve, die gut durch ein Polynom dritten Grades wiedergegeben werden kann.



*Abbildung 8: Abweichung der Messkurve von linearem Fit. Die Abweichungen der Messwerte liegen auf einem Polynom dritten Grades.*

In Abbildung 8 sieht man die oben erwähnten 2 % Linearitätsfehler. Bei 600  $\mu$ T beträgt die Abweichung ungefähr 0,12 V, dies entspricht etwa 12  $\mu$ T. Kalibriert man die Messwerte mit dem Polynom, verringert sich der Fehler auf 0,004 V. Dies entspricht einem Magnetfeld von 0,4  $\mu$ T.

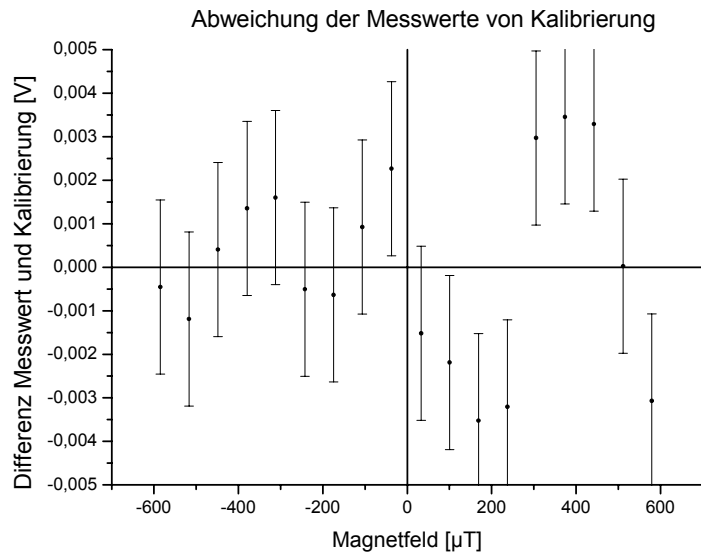


Abbildung 9: Dieses Diagramm zeigt die Abweichungen der kalibrierten Messwerte von der Linearität. Sie betragen maximal +/- 4 mV. Dies entspricht Magnetfeldern von +/- 0,4 µT. Bezogen auf den gesamten Messbereich liegt die relative Abweichung unter 0,1 %.

### 2.2.3 Sensitivität / Rauschen

Nach Herstellerangaben hat der Sensorchip ein Spannungsrauschen von  $10\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  bei 5 Hz, und bei 50 Hz wird das Weisse (Johnson) Rauschen von  $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  erreicht. Der hier zur Messung benutzte Spektrum-Analysator<sup>8</sup> hat ein Rauschniveau von  $10\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  [11]. Das Rauschen der unverstärkten Ausgangsspannung des Sensorchips kann deswegen hier nicht überprüft werden. Für diesen Zweck muss es zuerst den Verstärker mit dem Verstärkungsfaktor 206 und die Elektronik auf der Platine durchlaufen.

Einmal wird das Rauschen in „normaler“, ungeschirmter Umgebung gemessen und ein zweites Mal in abgeschirmter Umgebung. Die Abschirmung<sup>9</sup> im Institut für Schichten und Grenzflächen (ISG) ist eine zylindrische Tonne, deren Hüllfläche aus vier Schichten hochpermeablen Weicheisens besteht. Das äußere Feld wird um etwa den Faktor 1000 abgeschwächt. Das dort gemessene Rauschen ist nur auf die Elektronik des Sensorsystems zurückzuführen. Dieses Eigenrauschen der Elektronik wird als intrinsisches Rauschen bezeichnet. Es liegt ab 10 Hz bei etwa  $3\text{ µV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Multipliziert man das Rauschen des Sensorchips mit dem Verstärkungsfaktor 206, ergibt dies  $1\text{ µV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

<sup>8</sup> Stanford Research, SR 770

<sup>9</sup> Amuneal, Multilayer (Four Shell) Magnetic Shield Assembly

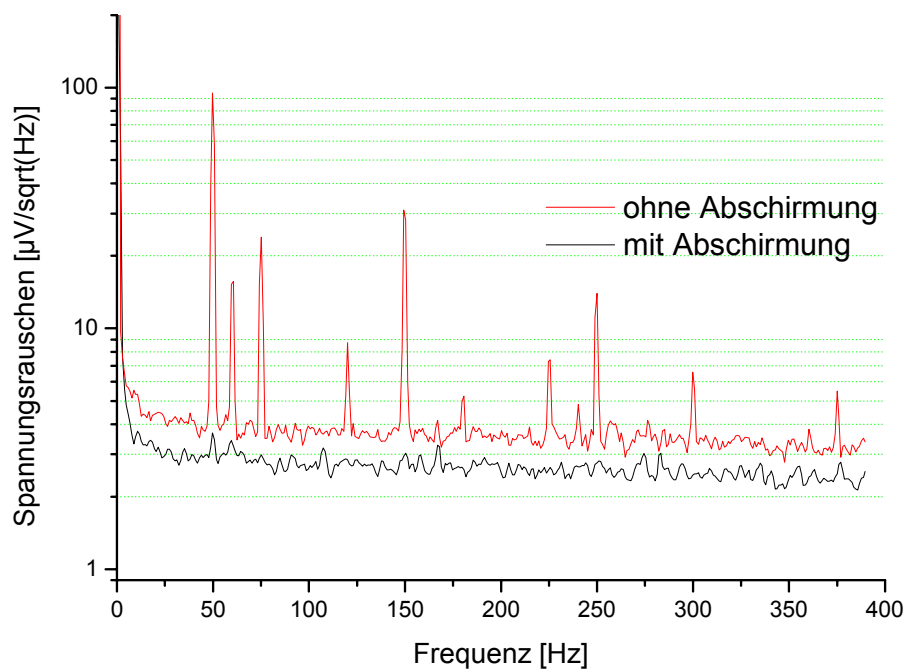


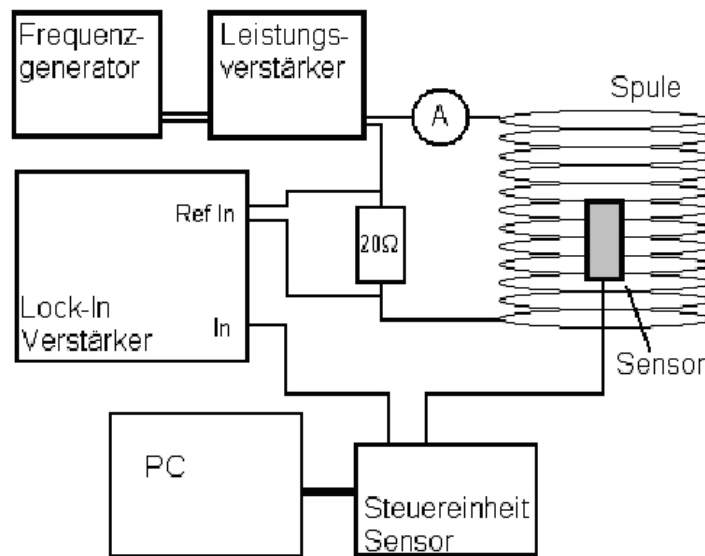
Abbildung 10: Rauschspektrum des verstärkten Sensorausgangssignals. Die untere Kurve ist das Rauschen bei abgeschirmter Umgebung. Die obere Kurve zeigt das Rauschen in normaler, unabgeschirmter Umgebung. Das größte Störsignal liegt bei 50 Hz.

Charakteristische Störsignale in unabgeschirmter Umgebung sind die 50 Hz-Signale aus dem Stromnetz und deren ungerade Oberwellen bei 150, 250 Hz usw. Das Signal bei 75 Hz stammt von einem konventionellen Röhrenmonitor, dessen Bildschirmaktualisierungsrate bei dieser Frequenz arbeitet. Das 60 Hz-Signal wird von einem Notebook abgestrahlt. Monitor und Laptop stehen in etwa 2 m Entfernung zum Sensor. Nach dem Ausschalten der beiden Elektronikgeräte verschwinden diese beiden Signale.

## 2.2.4 Dynamisches Verhalten

Das dynamische Verhalten elektronischer Bauteile wird durch den Amplituden- und Phasengang beschrieben. Üblicherweise werden beide Größen im so genannten Bodediagramm dargestellt. Dabei werden Spannungsamplitude und Phasenverschiebung gegenüber einer Erregerfrequenz aufgetragen. Ab einer bestimmten Frequenz kann die Elektronik nicht mehr dem Erreger mit voller Amplitude folgen und die Ausgangsspannung nimmt ab. Der Frequenzbereich, für den die Amplitude um weniger als 3 dBV abgefallen ist, wird als Bandbreite bezeichnet. Eine hohe Bandbreite benötigt man bei sich schnell ändernden Feldern. Bei den hier beschriebenen Messungen werden jedoch stationäre Ströme mit konstanten Feldern betrachtet. Allerdings werden die Sensoren an den Vorschüben während der Messung verfahren. Somit erfährt der Sensor aus seiner Sicht ein sich zeitlich veränderndes Magnetfeld. Wie stark die Änderung ist, hängt von der Verfahrgeschwindigkeit ab. Die Schrittmotoren verfahren die Vorschübe bei dieser Apparatur mit maximal 12 cm / s. Damit bei dieser Geschwindigkeit Änderungen auf 3 mm in der Nähe des Sensors aufgenommen werden, benötigt man eine Bandbreite von etwa 40 Hz.

Der Sensorchip hat laut Herstellerangaben eine Bandbreite von 5 MHz [7]. In der hier beschriebenen Anwendung ist noch ein Verstärker und Tiefpass in Reihe geschaltet, die die Bandbreite weiter begrenzen. Der Tiefpass besteht aus einem ohmschen Widerstand von  $820\ \Omega$  und einem Kondensator mit  $0,1\ \mu\text{F}$  und besitzt damit eine Grenzfrequenz von 2 kHz. Bei der Messung des dynamischen Verhaltens liegt der Sensor im Inneren einer zylindrischen Spule. Diese wird von einem Wechselstrom durchflossen. Die Frequenz des Wechselstroms wird mit dem Frequenzgenerator<sup>10</sup> variiert. Aus der Wechselspannung wird durch den Leistungsverstärker<sup>11</sup> ein Wechselstrom. Da die Impedanz der Spule mit steigender Frequenz anwächst, muss der Strom zu höheren Frequenzen nachgeregelt werden. Die über der Spule abgefallene Spannung ist wegen deren Selbstinduktivität nicht proportional zum Magnetfeld. Dies gilt jedoch für die Spannung, die über einen ohmschen Widerstand, der in Reihe mit der Spule geschaltet ist, abfällt. Ein Lock-In Verstärker<sup>12</sup> vergleicht die Sensorspannung mit der Wechselspannung des ohmschen Widerstandes und damit mit dem Magnetfeld.



*Abbildung 11: Messaufbau für Frequenzgang. Der Lock-In Verstärker vergleicht die Sensorspannung mit einer zum Magnetfeld proportionalen Spannung. Die Spannung über dem  $20\ \Omega$ -Widerstand ist proportional zum Magnetfeld und dient als Referenz für den Lock-In Verstärker. Die Stärke des Magnetfeldes wird durch Variation des Stroms über den gesamten Frequenzbereich konstant gehalten.*

Abbildung 13 zeigt eine konstante Amplitude bis 200 Hz. Bis 1000 Hz hat sie 3 dBV ihres Anfangswertes verloren. Eine deutliche Phasenverschiebung setzt bei 100 Hz ein.

<sup>10</sup> New Tronics, 200SPC

<sup>11</sup> Toellner, TOE 7608

<sup>12</sup> Stanford Research, SR 830



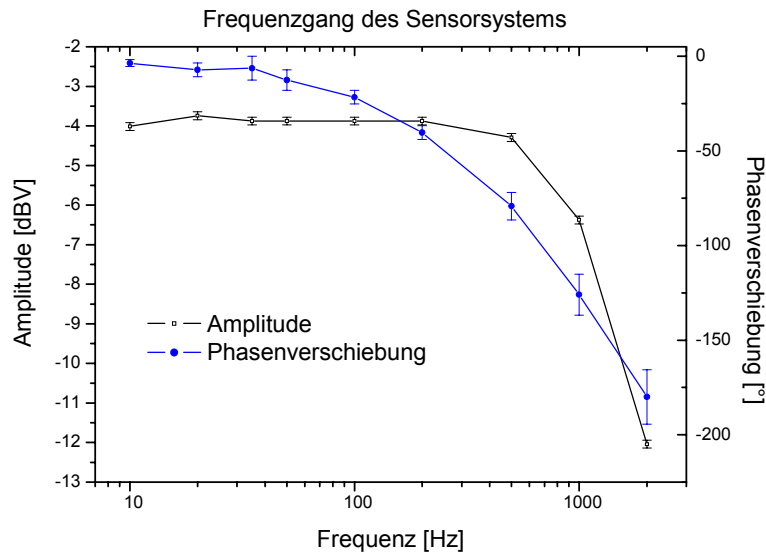


Abbildung 12: Dynamisches Verhalten des Sensorsystems im Bodediagramm. Nach 1000 Hz ist die Amplitude um 3 dBV abgefallen. Der niederfrequente Bereich bis 200 Hz, der für die Messungen eine Rolle spielt, wird uneingeschränkt von der Sensorelektronik ausgegeben.

Der oben erwähnte benötigte Messbereich bis mindestens 40 Hz wird mit diesem Sensorsystem vollkommen erfüllt. Für Magnetfelduntersuchungen, bei denen der Sensor an jedem Messpunkt anhält, können noch geringere Bandbreiten gewählt werden. Mit Hilfe von Tiefpassfiltern mit geringeren Grenzfrequenzen werden höherfrequente Störsignale besser herausgefiltert.

## 2.3 Störeinflüsse

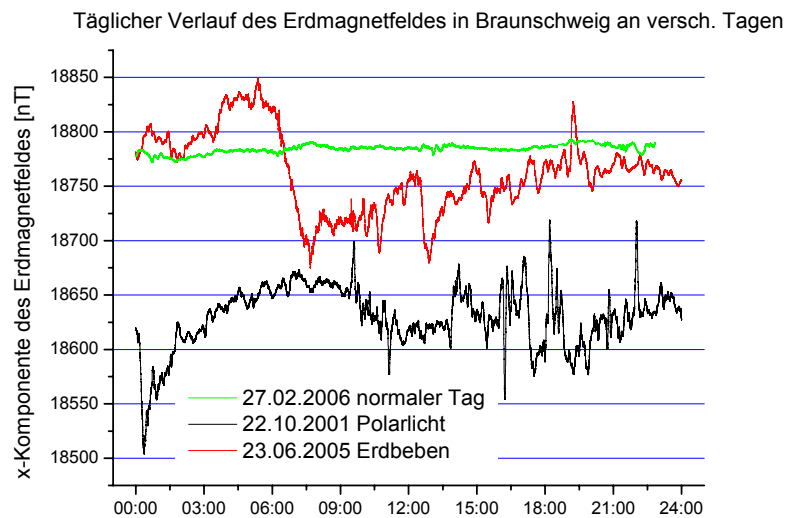
### 2.3.1 Statische Felder

#### 2.3.1.1 Erdmagnetfeld

Das Magnetfeld der Erde setzt sich aus verschiedenen Quellen zusammen. Magmaströme im Erdinnern, Teilchenströme in der äußeren Atmosphäre und ferromagnetische Erze in der Erdkruste spielen hier eine Rolle. Die Magmaströme 3000 km unter der Erdoberfläche haben den größten Einfluss auf das Erdmagnetfeld. Der Betrag des Erdmagnetfeldes liegt in unseren Breiten bei etwa 50  $\mu\text{T}$ . Die Feldlinien haben hier einen Inklinationwinkel von  $60^\circ$  gegenüber der Horizontalen [12]. Da die das Erdfeld verursachenden Ströme nicht immer konstant sind, variiert auch das resultierende Magnetfeld mit der Zeit.

Die durchschnittlichen täglichen Schwankungen (maximale Messzeit kleiner als eine Stunde) liegen mit wenigen Nanotesla unterhalb des Auflösungsvermögens der Sensoren. Das vom Erdmagnetfeld verursachte Untergrundfeld kann für unsere Anwendungen als stationär betrachtet werden.

Bei extremen Schwankungen, die z.B. bei Erdbeben oder Polarlichtern auftreten, können die Änderungen durchaus den Messbereich des Sensors erreichen. Normalerweise sind die zeitlichen Änderungen des Erdmagnetfeldes langsam und dauern länger als eine Messzeit. In Abbildung 14 sind die täglichen Schwankungen des Erdmagnetfeldes an drei verschiedenen Tagen dargestellt. Diese Werte stammen vom Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik der Technischen Universität Braunschweig [13]. Dort wird das Magnetfeld der Erde in ungestörter Umgebung jede Sekunde aufgenommen. An „normalen“ Tagen (über 95% der Tage im Jahr) variiert das Erdmagnetfeld um weniger als 20 nT pro Tag. Selten kommen durch z.B. die oben erwähnten Ereignisse bis zu zehnmal größere Schwankungen am Tag zustande. Solche Feldänderungen müssten bei der Magnetfeldmessung berücksichtigt werden.



*Abbildung 13: Normalerweise bleiben die täglichen Schwankungen des Erdmagnetfeldes innerhalb eines Bereiches von 20 nT (grüne Linie). Diese Änderungen stören die Magnetfeldmessung bei der Magnetotomographie nicht. Bei besonderen Ereignissen, wie z.B. Sonnenfleckenaktivitäten (schwarze Linie) oder Erdbeben (rote Linie) sind die täglichen Schwankungen bis zu zehnmal größer (etwa 200 nT). Diese Änderungen überschreiten das Auflösungsvermögen der Sensoren und können prinzipiell als Fehler in die Messung eingehen.*

Die einfachste und effizienteste Gegenmaßnahme zur Beseitigung des Einflusses von stationären Störfeldern ist eine Differenzmessung. Vor oder nach der Messung des Magnetfeldes eines stromführenden Objektes, wird diese, ohne Strom noch einmal durchgeführt. Diese Messwerte werden von denen bei Stromfluss subtrahiert. So erhält man das Magnetfeld des stromführenden Objektes ohne Störfeld.

### 2.3.1.2 Andere Gradientenfelder

Ursachen für weitere stationäre Störfelder sind z.B. Permanentmagnete der Schrittmotoren, Drehstuhl, Werkzeug, Schlüsselbund, etc., im Prinzip alle ferromagnetischen Sachen, die sich in der Umgebung des Sensors befinden. Die Größe des Störfeldes ist abhängig von der Größe und Magnetisierung des Objektes sowie dem Abstand zum Sensor. Solange die Entfernung des Störobjektes groß genug ist, d.h. sein Magnetfeld am Ort des Sensors kleiner ist als die Messgenauigkeit (12 nT), spielt der Störer keine Rolle. Wird die Entfernung geringer, überlagert sich das störende Gradientenfeld mit dem

Erdmagnetfeld und muss mit einer Differenzmessung berücksichtigt werden. Dabei darf sich die Position des Störobjektes während der eigentlichen und der Differenzmessung nicht ändern. In Diagramm 5 ist die Größe des Magnetfeldes zweier Störquellen gegenüber dem Abstand zum Sensor aufgetragen. Als Repräsentanten für potentielle Störquellen werden zum einen eine Schraube (Zylinderschraube M6 x 70 - 8.8) und zum anderen ein magnetisch un abgeschirmter Elektromotor der Vorschübe gewählt. Sie unterscheiden sich in erster Linie durch ihr unterschiedlich großes magnetisches Moment, welches bei der Schraube ungefähr zwei Größenordnungen kleiner als das des Elektromotors ausfällt. Damit decken diese beiden das Spektrum der möglichen Störer hinsichtlich des magnetischen Momentes gut ab. Der Einfluss der Schraube ist nach 50 cm nicht mehr nachweisbar, während der Einfluss des Motors den gesamten Verfahrtrisch überdeckt, weil er erst in etwa 250 cm Abstand nicht mehr nachweisbar ist. Charakteristisch für beide Störungen ist das Dipolverhalten, das Magnetfeld fällt also mit der dritten Potenz des reziproken Abstandes zur Quelle ab, d.h. bei Vergrößerung des Abstandes um eine Größenordnung fällt das Magnetfeld um drei Größenordnungen ab.

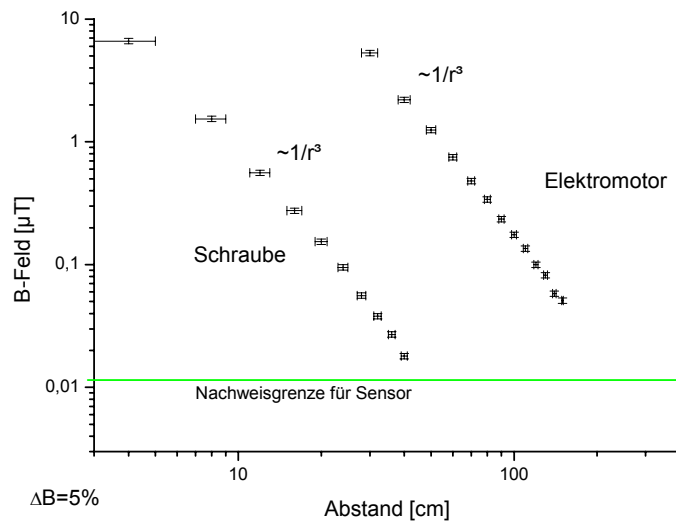


Abbildung 14: Magnetfeld von Störquellen in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensor. Die Empfindlichkeit des Sensors beträgt 12 nT.

Die Überlagerung der Gradientenfelder mit dem Erdmagnetfeld stellt den Untergrund dar. In Abbildung 16 ist diese „magnetische Landschaft“ für den Messbereich dargestellt. Der Absolutbetrag des Magnetfeldes ist in einer Ebene von 1 m x 0,5 m parallel zum Verfahrtrisch gemessen. Die Amplitude des Untergrundes beträgt 5 µT.

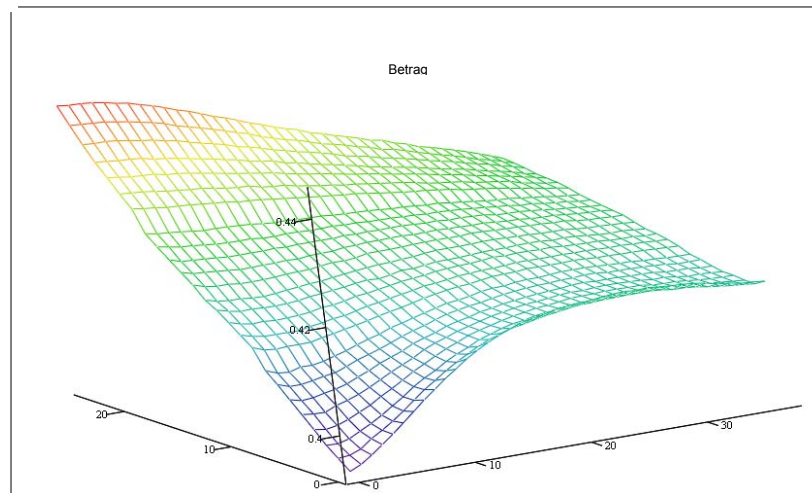


Abbildung 15: Untergrundfeld aus Erdmagnetfeld und anderer Gradientenfelder (Absolutbetrag der Flussdichte). Auf der Messebene 1 m x 0,5 m variiert der Untergrund in seinem Betrag um etwa  $5 \mu\text{T}$ .

Stoffe mit hoher magnetischer Permeabilität beeinflussen vorhandene Magnetfelder. Die B-Feldlinien konzentrieren sich in diesen Materialien im Vergleich zu Luft. Die Schrittmotoren werden mit Mu-Metall (Material mit hoher magnetischer Permeabilität) verkleidet. Dadurch wird einerseits das Gradientenfeld der Permanentmagnete von den Motoren nach außen gedämpft, andererseits auch die Feldlinien des zu untersuchenden stromführenden Objektes verzerrt.

Wie beim Erdmagnetfeld kann eine Differenzmessung die zusätzlich eingetragenen Überlagerungen von Magnetfeldern anderer Quellen eliminieren. Problematisch wird es nur, wenn die Störquellen mit dem Magnetfeld des zu messenden Objektes wechselwirken und eine andere Magnetisierung erfahren. Dann sind die Störfelder bei der eigentlichen Messung und bei der Differenzmessung unterschiedlich. Diesen Einfluss kann eine Differenzmessung nicht verhindern. Um sicher zu gehen, sollten alle magnetisierbaren Teile in einem Umkreis von 2 m entfernt werden. In 2 m Entfernung ist das Magnetfeld eines mit 300 A durchflossenen Leiters (maximaler Strom durch Brennstoffzelle) etwa so stark wie der Betrag des Erdmagnetfeldes.

## 2.3.2 Wechselfelder

### 2.3.2.1 50 Hz-Netzfrequenz

Die größte Störquelle der Wechselfelder ist das Stromnetz mit 50 Hz Betriebsfrequenz. Die Wechselfelder mit höherer Frequenz sind für diese Betrachtungen weniger von Bedeutung, da diese durch einen Tiefpass gefiltert werden.

Diese Fehlerquelle kann behoben werden, wenn mehrere Magnetfeldwerte über ein Vielfaches der Periode des Störsignals gemittelt werden. Dazu eignet sich die kontinuierliche Messung, d.h. Messen während der Fahrt, nur bedingt. Die Mindestdauer, die für eine Mittelung notwendig ist, wäre 20 ms (Periode von 50 Hz). Bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 10 cm/s bewegt sich der Sensor während dieser Zeit 2 mm weiter und würde über diese Strecke das Magnetfeld mitteln. Für das Magnetfeld von Brennstoffzellen wäre dies akzeptabel, wenn sich die Flussdichte über diesen Abtastbereich nur mit einem konstanten Gradienten ändert und die höheren Ableitungen des Feldverlaufs

verschwinden. Bei einer Abtastung der Flussdichte über einen konstante Gradienten hebt sich die Steigung für den mittleren Messpunkt auf. Ob diese Voraussetzung hinreichend für die Magnetfelder von Brennstoffzellen erfüllt ist, ist noch eine offene Frage.

Wenn wie bei den hier beschriebenen Messungen genügend Zeit zur Verfügung steht, kann an jedem Messpunkt angehalten, über mehrere Perioden des Störsignals die Magnetfelddaten aufgenommen und gemittelt werden. Für die zweidimensionalen stromdurchflossenen Strukturen wird mit einer Frequenz von 2700 Hz abgetastet und 0,2 s lang Werte aufgenommen und gefiltert (Grenzfrequenz 20 Hz). Diese 540 Werte werden gemittelt. Die Standardabweichung dieser Werte liegt in „normaler Laborumgebung“ unter 0,5 mV. Dies entspricht 0,05  $\mu$ T.

### 2.3.2.2 Wechselfelder von Schrittmotoren

Die Vorschübe, mit denen die Sensoren verfahren, werden über Schrittmotoren angetrieben. Während des Betriebes strahlt solch eine Apparatur zeitlich veränderliche elektromagnetische Felder aus, welche die Magnetfeldmessung zusätzlich beeinflussen. Um diese Störeinflüsse zu untersuchen, wird der Sensor in einer Entfernung von 20 cm zum Schrittmotor positioniert. Der Analogausgang des Sensors ist an einen Spektrum Analytator<sup>8</sup> angeschlossen. Die Auswertung der Spektralen Leistungsdichte von 0 Hz bis 3000 Hz ergibt Abbildung 17.

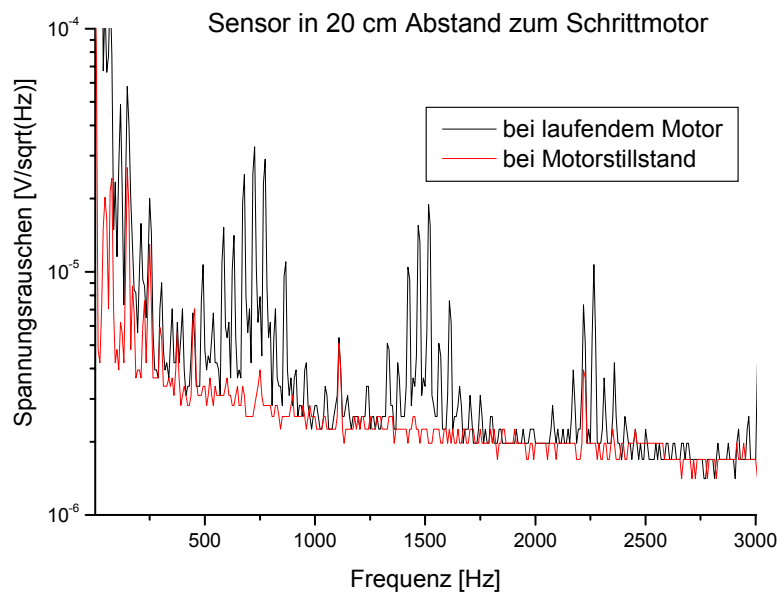


Abbildung 16: Rauschspektrum des Sensors in 20 cm Abstand zum Schrittmotor. Schwarze Linie bei laufendem Motor und rote Linie bei Motorstillstand. Bei laufendem Motor empfängt der Sensor wesentlich stärkere Störeinflüsse.

Im Vergleich zum ruhenden Motor ergeben sich im Betrieb bei mehreren Frequenzen etwa zehnmals größere Amplituden im Rauschspektrum. Die Störungen bei höheren Frequenzen können durch einen Tiefpass mit einer geeigneten Grenzfrequenz ausgeschaltet werden. Für die Magnetfeldmessung störend bleiben jedoch die niederfrequenten Signale unterhalb von 50 Hz.

Vergleicht man das Rauschen bei verschiedenen Verfahrgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 18), kann man das Spektrum in einen von der Geschwindigkeit unabhängigen Anteil und einen von der Geschwindigkeit abhängigen Anteil unterscheiden. In einer Entfernung von 40 cm (der minimale Abstand von Schrittmotor zu Sensor) ist der Einfluss der ständig vorhandenen Störungen dominierend gegenüber der durch den laufenden Motor eingebrachten Störung. Dazu gehört das Signal bei 50 Hz aus dem Stromnetz und seine ungeraden Harmonischen bei 150 Hz. Das Signal bei 75 Hz stammt von einem Bildschirm, der in 1,5 m Abstand zum Sensor entfernt steht.

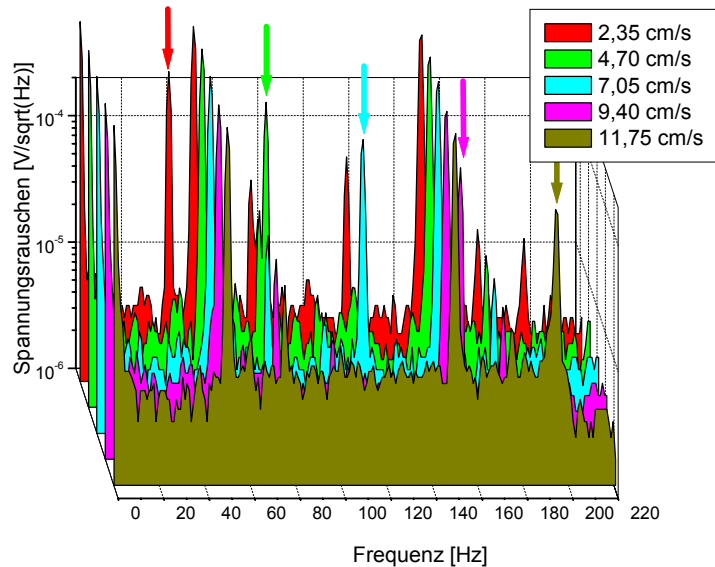


Abbildung 17: Rauschspektren bei verschiedenen Verfahrgeschwindigkeiten des Rahmens. Die größten Störeinflüsse sind unabhängig von der Verfahrgeschwindigkeit und liegen bei 50 Hz. Ein geschwindigkeitsabhängiger Störeinfluss (Pfeile) wandert von 30 Hz bei geringen bis zu 200 Hz bei hohen Verfahrgeschwindigkeiten. Störfrequenzen über 100 Hz können mit Hilfe der Software unterdrückt werden.

Die Störsignale, die aus den stromdurchflossenen Bauteilen und den bewegten Permanentmagneten des Schrittmotors resultieren, sind abhängig von der Geschwindigkeit. Bei der niedrigsten Geschwindigkeit im Diagramm (2,35 cm/s) liegt das Signal bei 40 Hz und bei der höchsten Geschwindigkeit (11,75 cm/s) bei 200 Hz. Damit liegen die Störsignale bei hohen Geschwindigkeiten in einem Bereich, in welchem sie durch einen Filter beseitigt werden können. Als Fazit aus dieser Betrachtung sollte man eine hohe Verfahrgeschwindigkeit während der Magnetfeldmessung vorziehen, wenn man die Option der kontinuierlichen Verfahrmessung wählt.

Mit einem Aluminiumzylinder (siehe Abbildung 19) werden die Störsignale vom Schrittmotor gedämpft. Die Wechselfelder induzieren Wirbelströme im Aluminium, die nach der Lenzschen Regel ihrer Ursache entgegenwirken. Dadurch wird die Energie der elektromagnetischen Wechselfelder teilweise absorbiert. Die Eindringtiefe bei Aluminium beträgt bei 50 Hz etwa 1,3 cm [14]. Die Amplitude der Störsignale (zwischen 30 Hz und 200 Hz) wird durch diesen Aluminiumzylinder gedämpft. Bei einer mittleren Verfahrgeschwindigkeit werden die bei etwa 100 Hz auftretenden Störsignale um den Faktor 3 verringert.



Abbildung 18: Der Schrittmotor wird von einem Aluminiummantel abgeschirmt. Dieser dämpft die Störsignale vom Motor.

## 2.4 Rekonstruktion der Stromverteilung aus der Magnetfeldmessung

Die Stromdichteverteilung in der xy-Ebene wird mittels der Magnetfeldkomponente in z-Richtung zurückgerechnet. Dafür wird eine Methode von Roth, Sepulveda und Wikswo [15] angewendet. Diese Betrachtungsweise des Problems stammt aus der Fourier-Optik [17].

Diese eindeutig lösbare Rückrechenmethode ist nur für zweidimensionale Stromverteilungen gültig. Eine Voraussetzung für dieses Verfahren ist die Divergenzfreiheit von Strömen, d.h. dass die Ströme möglichst in einem Punkt entstehen und verschwinden müssen. Ströme, die in drei Dimensionen ausgedehnt sind, müssen mit anderen Verfahren rekonstruiert werden.

Zur Beschreibung der Methode von Roth et. al. gehen wir von dem physikalischen Zusammenhang zwischen Flussdichte  $\vec{B}$  und Stromdichte  $\vec{J}$ , dem Gesetz von Biot und Savart, aus [18].

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} d^3\vec{r}',$$

wobei  $\mu_0$  die magnetische Permeabilität im freien Raum ist ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$ ). Weil in dieser Anwendung die Stromdichte  $\vec{J}(\vec{r})$  gesucht ist, wird dieses als Inverses Problem zum Gesetz von Biot und Savart bezeichnet. Durch explizites Ausschreiben der Vektoren ergibt sich folgende Darstellung:



$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\begin{pmatrix} (z-z')J_y - (y-y')J_z \\ (x-x')J_z - (z-z')J_x \\ (y-y')J_x - (x-x')J_y \end{pmatrix}}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 \right]^{3/2}} dx' dy' dz'.$$

Bei einer zweidimensionalen Stromverteilung ( $J_z = 0$ ) reduziert sich das Kreuzprodukt um zwei Terme, und für  $B_x(x, y, z)$  und  $B_y(x, y, z)$  folgt:

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{(z-z') \cdot J_y(x', y') \cdot \delta(z'-0)}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 \right]^{3/2}} dx' dy' dz',$$

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{-(z-z') \cdot J_x(x', y') \cdot \delta(z'-0)}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 \right]^{3/2}} dx' dy' dz'.$$

Die Integration über  $z'$  ergibt

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0 d}{4\pi} z \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{J_y(x', y')}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2 \right]^{3/2}} dx' dy',$$

$$B_y(x, y, z) = -\frac{\mu_0 d}{4\pi} z \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{J_x(x', y')}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2 \right]^{3/2}} dx' dy',$$

wobei  $d$  die Dicke der stromführenden dünnen Schicht in der  $x, y$ -Ebene ist. Diese Gleichung lässt sich formal als Faltung der Stromdichte mit einer Gewichtungsfunktion oder Greenschen Funktion auffassen, die nur vom Abstand  $|\vec{r} - \vec{r}'|$  abhängt. Das Faltungstheorem erlaubt ein Umschreiben der Gleichungen zu

$$b_x(k_x, k_y, z) = g(k_x, k_y, z) \cdot j_y(k_x, k_y) \text{ und}$$

$$b_y(k_x, k_y, z) = -g(k_x, k_y, z) \cdot j_x(k_x, k_y),$$

wobei  $b_{x,y}(k_x, k_y, z)$  und  $j_{x,y}(k_x, k_y)$  die in zwei Dimensionen Fourier-transformierten Komponenten des Magnetfeldes  $B_{x,y}(x, y, z)$  und der Stromdichte  $J_{x,y}(x, y, z)$  sind, und  $g(k_x, k_y, z)$  die Fouriertransformierte der Greensfunktion  $G(x-x', y-y', z)$  ist.

$$G(x-x', y-y', z) = \frac{\mu_0 d}{4\pi} z \frac{1}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2 \right]^{3/2}}$$

Die zwei-dimensionale Fouriertransformation und deren Inverse sind wie folgt definiert:

$$j_{x,y}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J_{x,y}(x, y) e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy,$$



$$J_{x,y}(x,y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int j_{x,y}(k_x, k_y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y.$$

$k_x$  und  $k_y$  sind die zu  $x$  und  $y$  konjugierten Koordinaten im reziproken Raum und  $i$  bezeichnet die imaginäre Einheit.

Die Fouriertransformierte der Greensfunktion  $G(x - x', y - y', z)$  lautet

$$g(k_x, k_y, z) = \left( \frac{\mu_0 d}{2} \right) e^{-\sqrt{k_x^2 + k_y^2} z}.$$

Die große Stärke dieser Technik ist, dass das Inverse Problem im transformierten Raum nur noch eine Division aus fouriertransformiertem Magnetfeld und fouriertransformierter Greensfunktion ist.

$$j_y(k_x, k_y) = \frac{b_x(k_x, k_y, z)}{g(k_x, k_y, z)} \quad \text{bzw.} \quad j_x(k_x, k_y) = -\frac{b_y(k_x, k_y, z)}{g(k_x, k_y, z)}$$

Aus  $b_y(k_x, k_y, z)$  folgt sofort  $j_x(k_x, k_y)$ , aus  $b_x(k_x, k_y, z)$  sofort  $j_y(k_x, k_y)$ . Weil diese Fourier-Komponenten aber nicht linear unabhängig sind, kann man die Stromdichte aus der Kenntnis nur einer Komponente des Magnetfeldes berechnen. Insbesondere für die  $z$ -Komponente des B-Feldes handelt es sich um eine gewichtete Überlagerung der Fourier-transformierten Stromdichten  $j_x(k_x, k_y)$  und  $j_y(k_x, k_y)$ .

$$b_z(k_x, k_y, z) = i \left( \frac{\mu_0 d}{2} \right) \frac{e^{-\sqrt{k_x^2 + k_y^2} z}}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} (k_y \cdot j_x(k_x, k_y) - k_x \cdot j_y(k_x, k_y))$$

Die Fourier-transformierten Stromdichten sind nicht linear unabhängig. Die Kontinuitätsgleichung  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$  wird im reziproken Raum zu

$$-ik_x j_x(k_x, k_y) - ik_y j_y(k_x, k_y) = 0.$$

Damit erhält man die beiden Stromdichten  $j_x(k_x, k_y)$  und  $j_y(k_x, k_y)$  in Abhängigkeit zu  $b_z(k_x, k_y, z)$ .

$$j_x(k_x, k_y) = -\frac{2i}{\mu_0 d} e^{\sqrt{k_x^2 + k_y^2} z} \frac{k_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} b_z(k_x, k_y, z)$$

$$j_y(k_x, k_y) = \frac{2i}{\mu_0 d} e^{\sqrt{k_x^2 + k_y^2} z} \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} b_z(k_x, k_y, z)$$

Durch den Term  $e^{\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \cdot z}$  werden größere  $k$ -Werte stärker gewichtet ( $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ).

Die Stromdichte im  $k$ -Raum ist quasi eine hochpassgefilterte Version des Magnetfeldes. Diese Gewichtung ist in der Praxis aber nur bis zu dem Punkt sinnvoll, an dem das Sig-

nal noch größer ist als das Rauschen. Deshalb werden die Stromdichten  $j_x(k_x, k_y)$  und  $j_y(k_x, k_y)$  zusätzlich mit einem Hanning-Fenster multipliziert.

$$H(\mathbf{k}) = \begin{cases} 0,5 \cdot \left( 1 + \cos\left( \pi \frac{k}{k_{\max}} \right) \right) & k < k_{\max} \\ 0 & k > k_{\max} \end{cases} \quad \text{wobei} \quad k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

Diese Funktion schneidet die hochfrequenten Anteile oberhalb eines frei zu wählendem Filterparameters  $k_{\max}$  ab. In erster Linie hängt die Wahl des  $k_{\max}$  vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis ab. Es gilt, einen Kompromiss aus auftretenden Artefakten und Minderung der Auflösung zu finden. Dieser Parameter muss bei jeder Rückrechnung „von Hand“ eingestellt werden. Die maximal mögliche Auflösung der Stromdichteverteilung im Ortsraum ist gegeben durch  $2\pi/k_{\max}$ .

Das Magnetfeld  $B_z(x, y, z)$  bzw. seine Fourier-transformierte  $b_z(k_x, k_y, z)$  liegen nicht als kontinuierliche Funktionen in der  $x, y$ - bzw.  $k_x, k_y$ -Ebene, sondern als Felder von endlich vielen diskreten Messpunkten vor. Da eine periodische Funktion im Ortsraum ein diskretes Spektrum hat, wird die Stromverteilung im Original als periodisch betrachtet, wobei die Periode länger als die räumliche Ausdehnung der Stromverteilung gewählt wird. Die Periodenlänge  $L$  ist die Größe des abgerasterten Bereiches, welche sich aus der Messung ergibt. Der Abstand der Punkte in der  $k_x, k_y$ -Ebene beträgt  $2\pi/L$ .

Bei den Rekonstruktionen in Kapitel 3 wird aus der  $z$ -Komponente des Magnetfeldes die Stromdichte in der  $x, y$ -Ebene rekonstruiert. Auf der folgenden Seite ist ein Flussdiagramm dargestellt, welches die einzelnen Punkte der hier angewendeten Rückrechnung aufführt: Die gemessene  $z$ -Komponente des Magnetfeldes wird Fourier-transformiert. Im  $k$ -Raum wird sie entsprechend der Komponente mit der Filterfunktion multipliziert, und die Werte oberhalb eines bestimmten Wertes für den Filterparameter  $k_{\max}$  werden gleich Null gesetzt. Die gewonnene Stromdichte im  $k$ -Raum wird invers Fourier-transformiert, um die Stromdichte im Ortsraum zu erhalten.

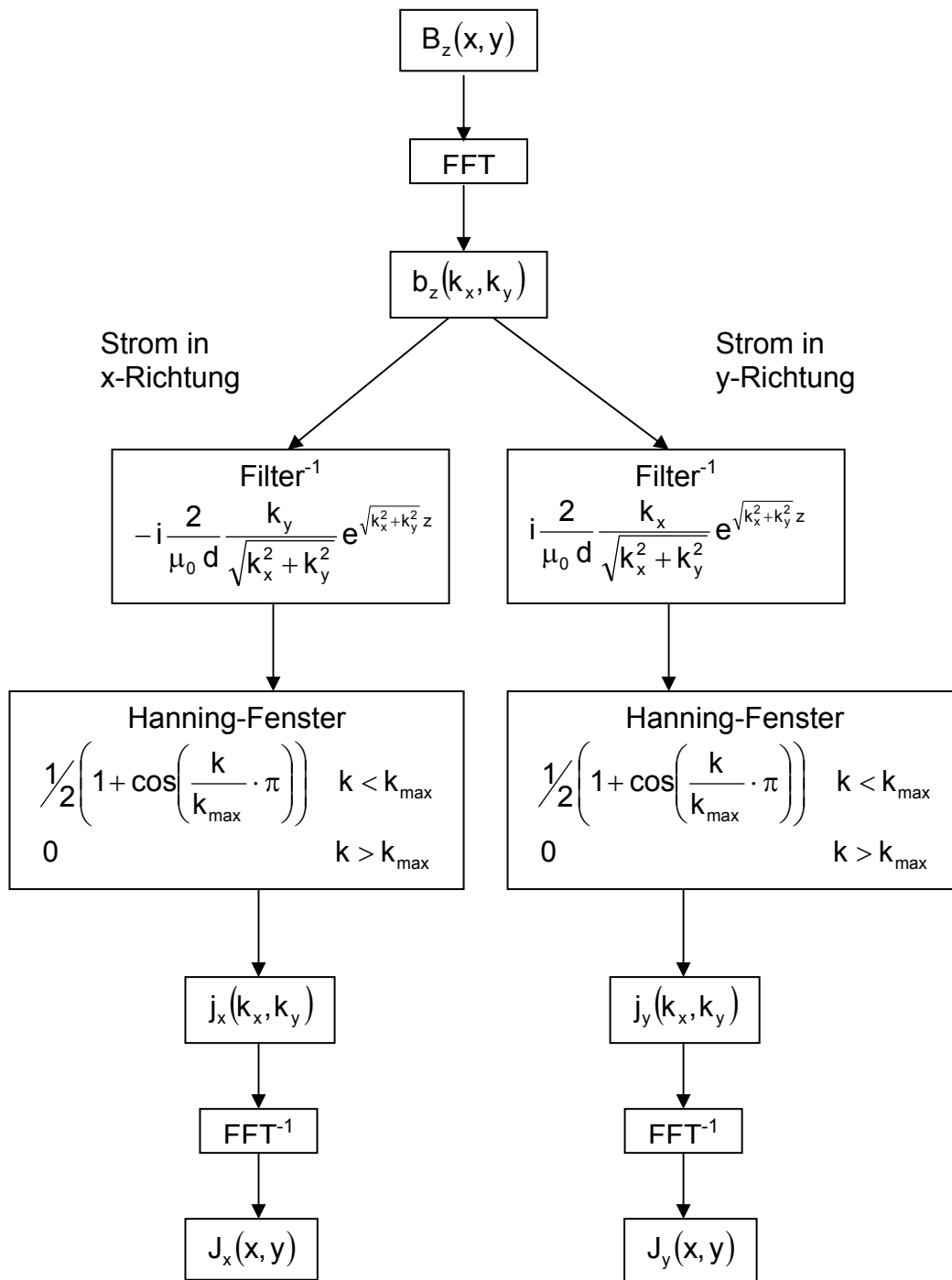


Abbildung 19: Flussdiagramm der Rückrechnung.

### 3 Ergebnisse

Sechs verschiedene ebene Stromverteilungen werden im Folgenden exemplarisch rekonstruiert. Es handelt sich hierbei im wesentlichen um Leiterplatinen, die galvanisch für die vorliegende Arbeit hergestellt wurden, um bestimmte Aspekte genauer zu untersuchen. Diese sind

**Räumliche Auflösung:** Hier wird der Frage nachgegangen, bei welchem Abstand des Sensors zur Platine man zwei parallele Leiter gerade noch im Stromdichtebild trennen kann, bzw. wie gut der Durchmesser eines Drahtes noch durch das Verfahren reproduziert wird. Im Idealfall gibt es für das Verfahren nach Roth keine Einschränkung bezüglich der Auflösung. Eine Begrenzung bei der Feinheit der Rückrechnung kommt aber durch die hier nicht berücksichtigte endliche Dimension des Sensors zustande und durch unvermeidliche Störeinflüsse wie das Rauschen und die externen Magnetfelder wie sie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben worden sind. Durch die entsprechende Fragestellung wird also die Leistung des Gesamtsystems charakterisiert: man wird im Fall dreidimensionaler Strukturen keine bessere räumliche Auflösung erwarten können, als sie bei zweidimensionalen Strukturen mit Hilfe dieses Verfahrens gewonnen wurde.

**Homogenität:** Eine unstrukturierte größere Fläche einer Leiterplatte sollte eine homogene Leitfähigkeit aufweisen und damit auch einen Strom homogen leiten können. Diese Situation ist analog der einer Brennstoffzelle, die ja auch idealerweise eine homogene Leitfähigkeit besitzt, aber wegen unvermeidbarer Fertigungseinflüsse defektartige Bereiche ausbildet. Wie gut kann man also eine Struktur fertigen, wenn es scheinbar keine Einflüsse gibt, die zu einer Abweichung führen könnten?

**Defekt:** Als einfachsten „Defekt“ in einer zweidimensionalen Struktur könnte man sich einen nichtleitenden Kreis in einer sonst nicht strukturierten Leiterplatte vorstellen, die weit weg vom Defekt parallel vom Strom durchflossen wird. Der Strom wird um diesen Defekt herum fließen und ein Strömungsmuster ausbilden, welches qualitativ dem aus der Hydrodynamik ähnelt. Das dreidimensionale Pendant wäre ein kugelförmiger Defekt.

Für alle untersuchten Strukturen, die den einen oder anderen Aspekt aus dieser Liste abdecken beschreiben, werden die drei Magnetfeldkomponenten in einer quadratischen Fläche oberhalb der Leiterstruktur gemessen. Die Messpunkte liegen auf den Gitterpunkten eines Rasters in äquidistanten Abständen von 1 mm oder 2 mm. Der Sensor hält an jedem Messpunkt, nimmt mit einer Abtastrate von 2,7 kHz jeweils 510 Werte auf, filtert und mittelt diese und fährt zum nächsten Messpunkt weiter. Dieser Vorgang dauert etwa 1 s. Bei einem Raster von 256 x 256 Messpunkten ergeben sich Messzeiten von etwa 12 h. Auf eine Messung während des Verfahrensvorgangs wurde hier verzichtet, weil für diese exemplarischen Untersuchungen keine Geschwindigkeitsoptimierung gefordert ist.

Der Strom für die Strukturen von 1 A bis 3 A wird durch eine Konstantstromquelle bereitgestellt. Höhere Stromstärken sind aufgrund der Temperaturentwicklung in den Zuleitungen nicht praktikabel. Die Stromquelle hält den Strom während der Messzeit bis auf 1 mA konstant. Eine Schwankung um diese Größe in einem Draht führt in 10 mm Abstand zu einer Flussdichteänderung von etwa 20 nT. Dieser Wert liegt nur geringfügig über der Sensorempfindlichkeit und kann gegenüber den anderen Störeinflüssen vernachlässigt werden.

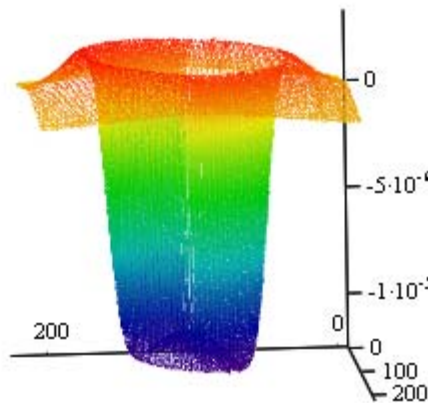
Um den Untergrund zu eliminieren, wird bei allen folgenden Messungen eine Differenzmessung durchgeführt. Die Untergrundmessung wird um den Faktor 8 größer abgerastert, da sich das Untergrundfeld räumlich nur langsam ändert. Damit verringert sich die

Messdauer der Untergrundmessung um den Faktor 64. Die dazwischen liegenden Messpunkte werden mit dem Programmpaket MATHCAD<sup>13</sup> *Referenz* interpoliert. Alternativ wäre auch eine weitere Messung mit entgegen gesetzter Stromrichtung möglich gewesen. Diese Variante hätte zusätzlich das Rauschen um den Faktor  $1/\sqrt{2}$  verringert.

### 3.1 Diskrete Leiterstrukturen zur Untersuchung des räumlichen Auflösungsvermögens

#### 3.1.1 Kreisring

Ein 0,5 mm dünner Kupferdraht wird zu einem Kreisring mit dem Radius  $R = 55$  mm geformt durch Umwicklung eines Plastikzylinders. Die Zuleitungen werden miteinander verdreht, damit sich ihre Magnetfelder kompensieren. Die Stromstärke beträgt 1 A. Der Sensor verfährt in einem 220 mm x 220 mm großen Raster 16 mm oberhalb der Kreisfläche. Die Rasterweite beträgt 1 mm.



*Abbildung 20: Vertikale Komponente des gemessenen Magnetfeldes in einer Ebene (220 mm x 220 mm) in einem Abstand von 16 mm über einer Ringspule mit einer Wicklung vom Radius 55 mm, Drahtdicke 0,5 mm. Stromstärke 1 A. Die gemessene Amplitude beträgt etwa 10  $\mu$ T.*

Abbildung 20 zeigt die vertikale Komponente des Magnetfeldes oberhalb des Kreises. Die Amplitude liegt bei etwa 10  $\mu$ T. Das Ergebnis der Rückrechnung wird hier für zwei Werte des Filterparameters  $k_{\max}$  in Abbildung 21 gezeigt. Zwar sieht das linke Bild „sauberer“ aus; wegen des geringen  $k_{\max}$  sind sowohl die Störeinflüsse als auch die hochfrequenten Anteile bei der Stromdichte gedämpft, so dass hier die Leiterdicke stark verbreitert erscheint. Allerdings kommen bei immer höheren  $k$ -Werten Artefakte durch Störungen hinzu, welche die eigentliche Stromverteilung irgendwann überdecken, wie dies schon andeutungsweise auf der rechten Seite der Abbildung 21 geschieht. Für die Wahl des  $k_{\max}$  gilt es, einen Kompromiss zwischen Auflösung und Freiheit von Artefakten zu finden.

<sup>13</sup> Mathsoft, Mathcad

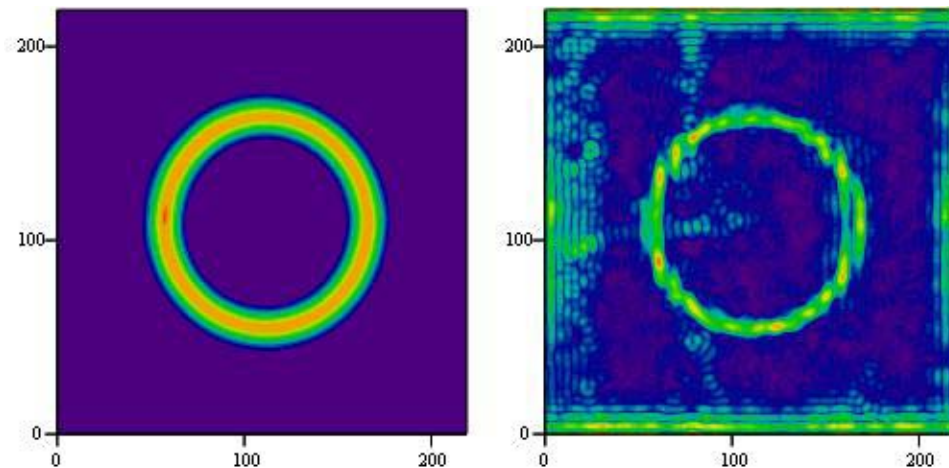


Abbildung 21: Falschfarbendarstellung der rekonstruierten Stromverteilung bei verschiedenem  $k_{\max}$ . Links beträgt der Filterparameter  $k_{\max} 450 \text{ m}^{-1}$ , rechts  $850 \text{ m}^{-1}$ .

Mit einem  $k_{\max}$  von  $450 \text{ m}^{-1}$  bzw.  $850 \text{ m}^{-1}$  lassen sich Strukturen im Ortsraum auflösen, die größer sind als  $14,0 \text{ mm}$  bzw. als  $7,4 \text{ mm}$  ( $2\pi / k_{\max}$ , siehe Kapitel 2.5). Ein Querschnitt durch die rekonstruierte Stromdichteverteilung in Abbildung 22 zeigt, dass die Halbwertsbreite der rekonstruierten Stromdichte auf dem Ring mit diesen Werten übereinstimmt.

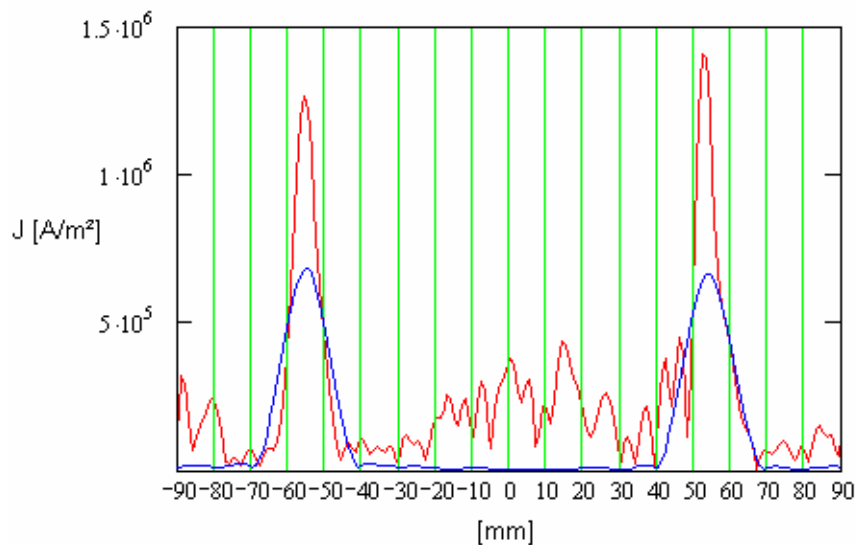


Abbildung 22: Querschnitt durch die rekonstruierte Stromdichte der Ringspule. Die blaue Kurve zeigt die Rekonstruktion mit  $k_{\max} = 450 \text{ m}^{-1}$  und die rote Kurve die mit  $k_{\max} = 850 \text{ m}^{-1}$ . Der Radius des Kreises beträgt  $55 \text{ mm}$ . Dort sind die Maxima der rekonstruierten Stromdichte zu finden. Die Halbwertsbreite der Stromdichtemaxima beträgt etwa  $8 \text{ mm}$  bzw.  $15 \text{ mm}$ . Die tatsächliche Stromdichte beträgt  $5 \times 10^6 \text{ A mm}^{-1}$ .

Gegenüber der realen Stromverteilung, die auf einem  $0,5 \text{ mm}$  dünnen Draht beschränkt ist, wird die Rekonstruktion mit  $k_{\max} = 850 \text{ m}^{-1}$  um den Faktor 16 verbreitert und die Rekonstruktion mit  $k_{\max} = 450 \text{ m}^{-1}$  sogar um den Faktor 30. Um Strukturen von einem Millimeter aufzulösen, benötigte man ein  $k_{\max}$  von über  $6000 \text{ m}^{-1}$ . Aufgrund der Störungen

muss hier mit einem geringeren  $k_{\max}$  auf Kosten der räumlichen Auflösung zurückgerechnet werden.

### 3.1.2 Mäanderstruktur

Um die räumliche Auflösung des Systems weiter zu charakterisieren, wurde eine Platine mit einer mäanderförmigen Leiterstruktur hergestellt, bei der sich die Abstände der Linien von einem Mäander zum nächsten immer weiter verkürzt, bis ein minimaler Abstand von etwa 2 mm zwischen den Leiterbahnen vorhanden ist. Abbildung 23 zeigt ein Schema dieser Struktur. Die Linienbreite beträgt 0,5 mm. Mit einem Strom von 2,5 A durch die Leiterstruktur ergibt sich eine Stromdichte von 5000 A/cm<sup>2</sup>. Es handelt sich hier um ein schwierigeres Problem für die Auflösung als bei der Kreisspule, weil hier die Ströme in kurzem Abstand entgegengerichtet fließen, und sich der Verwischungseffekt bei höheren absoluten Abständen von der Platine deutlicher zeigt.

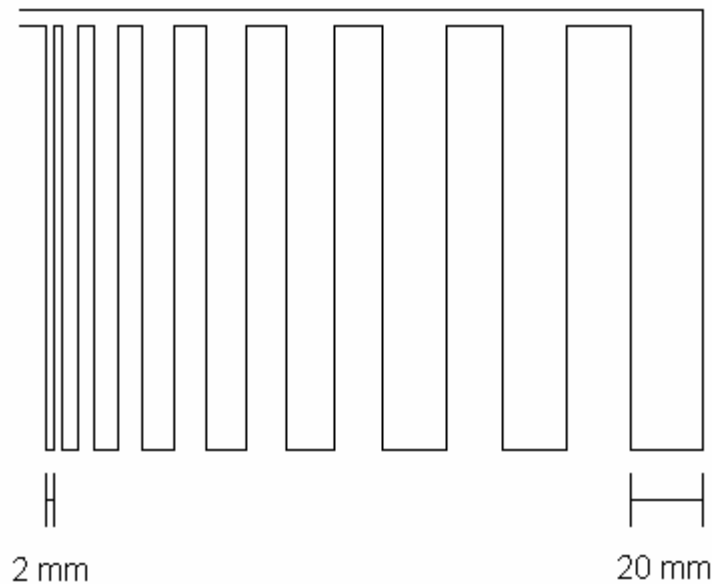


Abbildung 23: Schema der untersuchten Mäanderstruktur. Die Leiterbahnabstände variieren von 2 mm bis 20 mm. Die Breite der Leiterbahn beträgt 0,5 mm.

Abbildung 24 zeigt die gemessene Magnetfeldstruktur (links), die zurückgerechnete Stromdichte (Mitte) und einen Schnitt (rechts) von links nach rechts durch die Stromverteilung für verschiedene Abstände des Sensors von der Platine. Beim geringsten Abstand sind alle Linien gut aufgelöst, bei größerem Abstand werden zunehmend die feineren Strukturen verwischt. Diese Rückrechnungen wurden mit folgenden Filterparametern durchgeführt.

Abstand Sensor Platine	$k_{\max}$	Theoretische Auflösung
10 mm	1200 m <sup>-1</sup>	5,2 mm
20 mm	600 m <sup>-1</sup>	10,5 mm
30 mm	400 m <sup>-1</sup>	15,7 mm
40 mm	280 m <sup>-1</sup>	22,4 mm

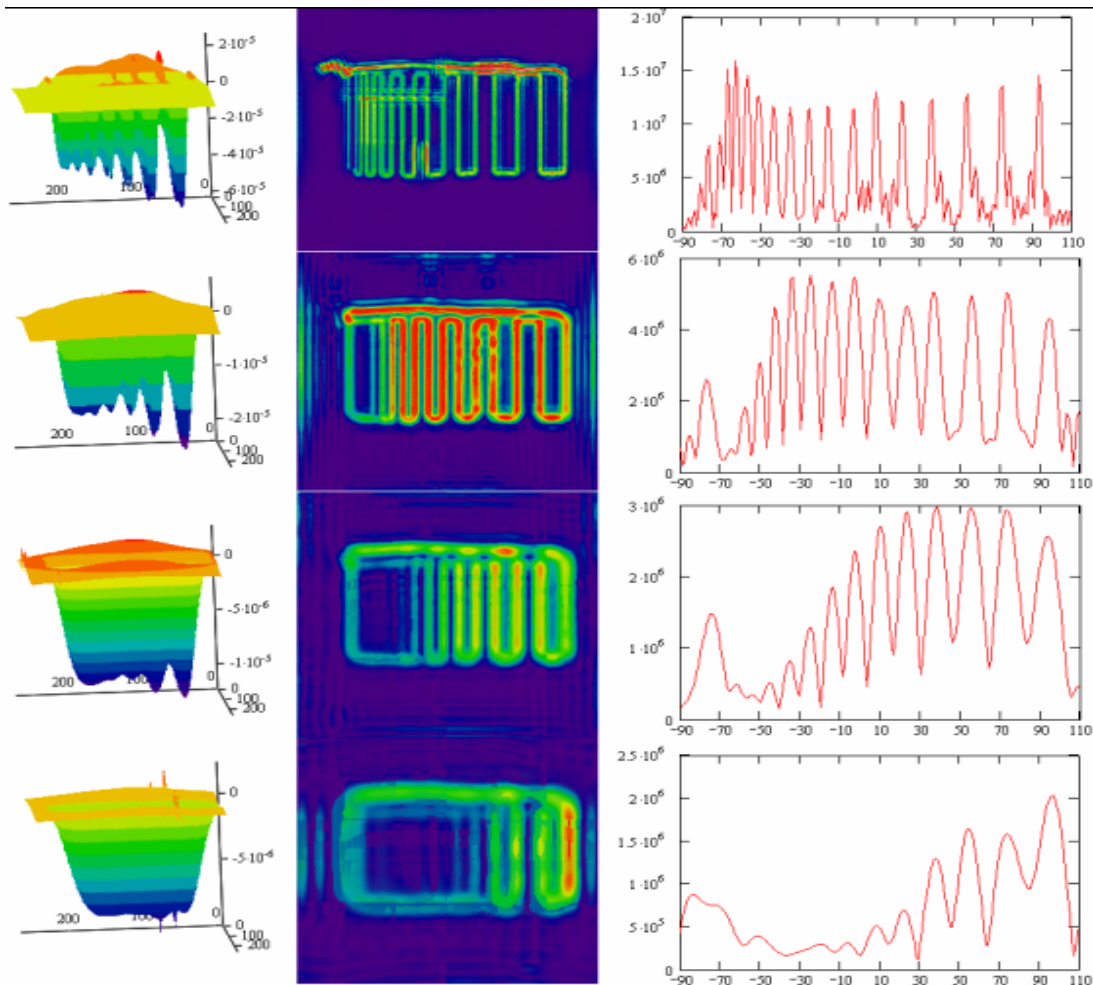


Abbildung 24: Magnetfeld über der Mäanderstruktur (links), zurückgerechnete Stromdichte in der Mitte und ein Querschnitt durch diese Stromverteilung (rechts).

An der Abbildung erkennt man deutlich, dass bei größer werdendem Abstand die Maxima, die den Leiterbahnen entsprechen, zuerst kleiner werden, bevor sie im Untergrund untergehen. Bei dem größten Abstand kann man gerade noch ein Maximum erkennen für einen Leiterbahnabstand von 20 mm. Dies entspricht einer Reduktion um einen Faktor 4 in Bezug auf den nächsten Abstand zur Leiterplatte, bei dem man noch einen Leiterbahnabstand von 5 mm erkennen kann.

### 3.1.3 FZJ-Platine

Analog zu der Stromverteilung, die in der Veröffentlichung [15] die Initialen der Vanderbilt Universität darstellen, wurde hier eine Stromverteilung in Form der Buchstaben F Z J gewählt (siehe Abbildung 25). Die Stromanschlüsse befinden sich oben links. Die Leiterbahnen sind 1 mm breit und etwa 0,1 mm hoch. Der Strom beträgt 2 A entsprechend einer Stromdichte in der Leiterbahn von etwa  $2000 \text{ A/cm}^2$ . Die Abstände benachbarter Leiterbahnen betragen etwa 10 mm.



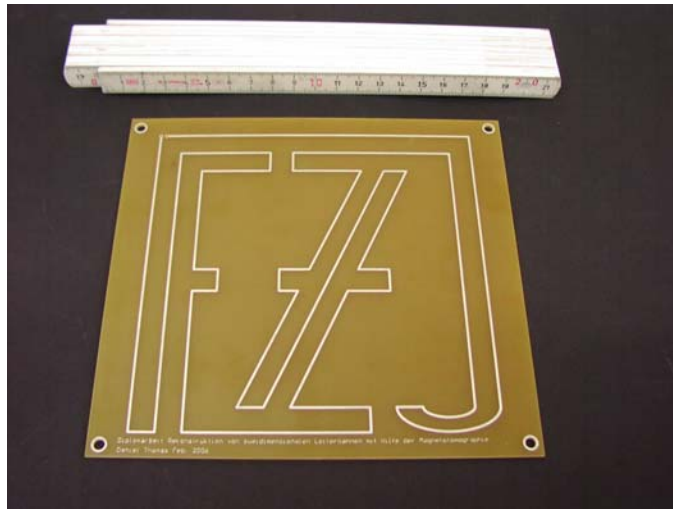


Abbildung 25: Foto der Leiterbahnplatte. Die Leiterbahnen stellen die Buchstaben F Z J dar. Zum Größenvergleich dient ein Zollstock daneben.

Das Magnetfeld wird in 10 mm und in 40 mm Abstand gemessen. Durch den erhöhten Abstand verringert sich die Signalamplitude und damit das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um den Faktor 4, entsprechend auch der noch tragbare Wert von  $k_{\max}$ . Die Rauschsignale werden mit zunehmenden  $k_{\max}$  in der Rückrechnung exponentiell verstärkt. Bei hohen  $k_{\max}$  werden diese Werte größer als die eigentlichen Signale des Stroms. Da die Signalhöhe der Messung bei 40 mm nur etwa ein Viertel derjenigen bei 10 mm ist, werden die „richtigen“ Bildanteile früher (schon bei kleineren  $k$ -Werten) durch verstärkte Störsignale zerstört. Für die Rekonstruktion aus 10 mm Abstand wurde ein  $k_{\max}$  mit  $1100 \text{ m}^{-1}$  verwendet, und für die Rekonstruktion aus 40 mm Abstand hatte  $k_{\max}$  einen Wert von  $320 \text{ m}^{-1}$ . Diese  $k$ -Werte entsprechen maximalen Auflösungen von 5,7 mm bzw. 19,6 mm. Diese Werte erklären auch die Falschfarbendarstellungen in Abbildung 26. Während die 10 mm auseinander liegenden Leiterbahnen in der oberen rekonstruierten Stromdichte (Abstand: 10 mm,  $k_{\max}$ :  $1100 \text{ m}^{-1}$ ) noch klar getrennt wiedergegeben werden, sind in der unteren Rekonstruktion (Abstand: 40 mm,  $k_{\max}$ :  $320 \text{ m}^{-1}$ ) fast nur noch die äußeren Leiterbahnen zu erkennen.

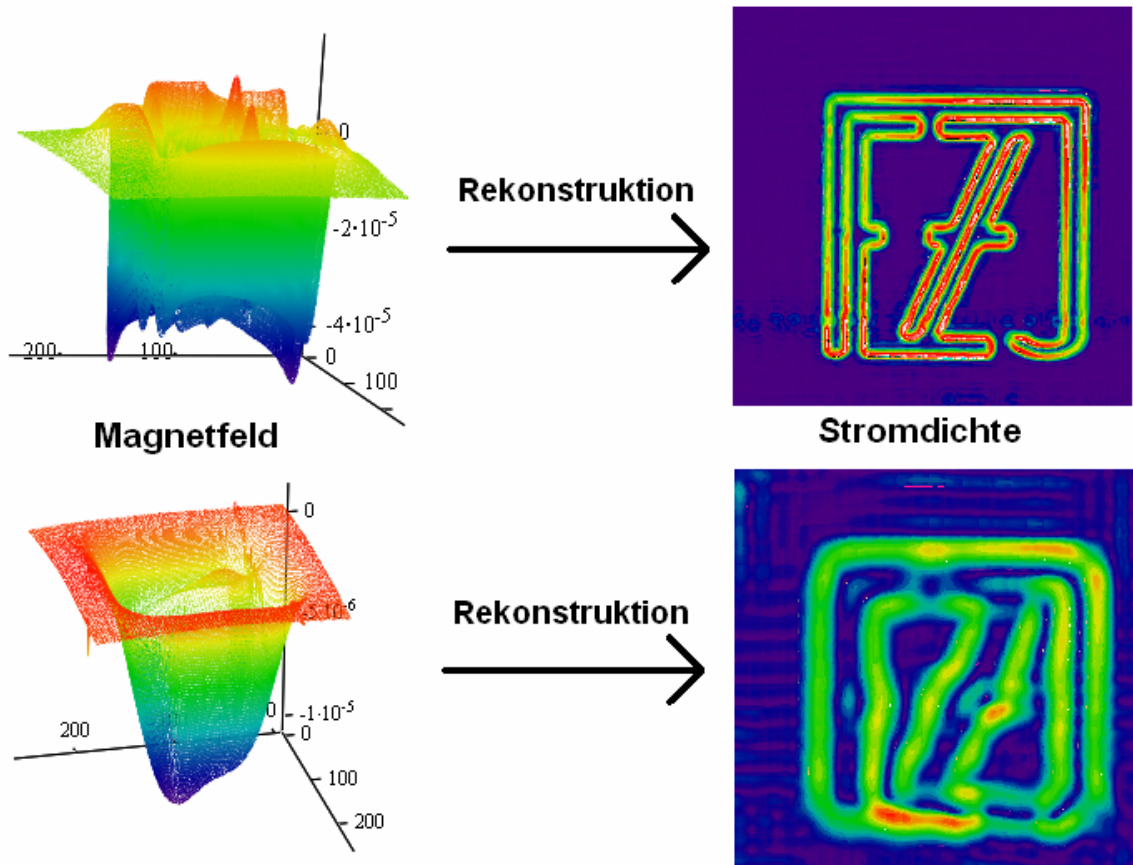


Abbildung 26: z-Komponente des Magnetfeldes über der FZJ-Platine bei 10 mm Abstand (links oben) und bei 40 mm Abstand (links unten). Rechts sind die daraus rekonstruierten Stromdichten als Falschfarbendarstellung abgebildet. Bei 10 mm Abstand besitzt die Amplitude des Magnetfeldes  $40 \mu\text{T}$  und bei 40 mm Abstand besitzt die Amplitude noch  $10 \mu\text{T}$ . Die Struktur der Buchstaben lässt sich bei der in geringerem Abstand (10 mm) durchgeführten Messung im Magnetfeld wieder erkennen. Aus dem Magnetfeld im unteren Bild kann nicht ohne weiteres intuitiv auf die vorliegende Leiterstruktur geschlossen werden.

In Abbildung 27 ist ein Querschnitt von links nach rechts durch die rekonstruierte Stromdichte dargestellt. Die drei Leiterbahnen des F und Z, sowie die beiden Leiterbahnen des J sind gut zu erkennen. Hier beträgt die absolute Stromdichte in der Rekonstruktion  $400 \text{ A/cm}^2$ . Die reale Stromdichte beläuft sich bei 2 A Stromstärke, 1 mm Breite und 0,1 mm Höhe der Leiterbahn auf  $2000 \text{ A/cm}^2$ . Der Faktor 5 ergibt sich aus der Verschmierung der Rekonstruktion. Im Gegensatz zur Realität ist die rekonstruierte Stromdichte auf etwa die fünffache Breite verschmirt. Der Gesamtstrom stimmt somit mit der Realität überein und ist somit weniger anfällig für Störungen als die Stromdichte selbst.

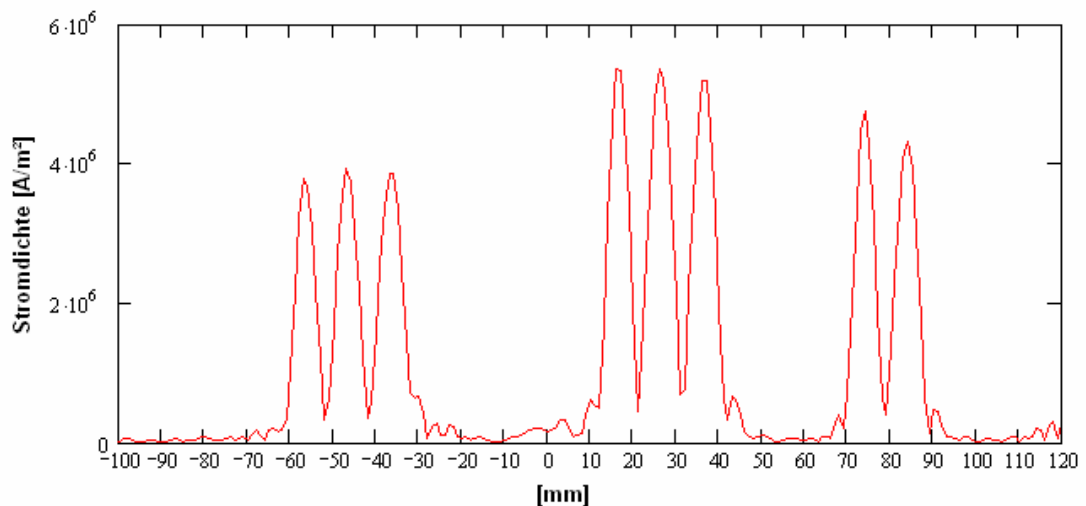


Abbildung 27: Querschnitt von links nach rechts durch die rekonstruierte Stromdichteverteilung der FZJ-Struktur in Abbildung 25 (Abstand: 10 mm,  $k_{max}$ :  $1100\text{ m}^{-1}$ ). Die rekonstruierte Stromdichte in den Leiterbahnen beträgt etwa  $400\text{ A/cm}^2$ .

## 3.2 Kontinuierliche Leiterflächen zur Untersuchung der Homogenität des Stromflusses

### 3.2.1 Doppelhalbkreis

Diese Platine dient dazu, die Homogenität des Stromflusses im Platinenmaterial zu untersuchen. Die Leiterfläche besteht aus zwei Halbkreisflächen, die über einen äußeren Kupferferring kurzgeschlossen sind. Der Spalt zwischen den Halbkreisen beträgt 1 mm. Die Stromzuführungen sind in der Mitte einer jeden der Halbkreisflächen der Platine angebracht. In Abbildung 28 ist der prinzipielle Weg des Stromes skizziert. Der Strom fließt vom linken Anschluss radial – so die Vorstellung – nach außen auf den Kupferferring zu, der wegen seines geringen Widerstandes als Kurzschluss dienen soll und idealerweise nicht die gleichmäßige radiale Verteilung des Stromes in den Halbkreisflächen beeinflussen sollte. Über den Kupferferring gelangt der Strom auf die andere Seite und fließt wieder radial nach innen zum anderen Anschluss. Die Stromstärke beträgt 2,5 A bei dieser Messung. Der Sensor nimmt in 10 mm Abstand über der Platine das Magnetfeld in einem  $256\text{ mm} \times 256\text{ mm}$  großen Raster auf. Der Gitterabstand beträgt 1 mm. Abbildung 29 zeigt ein Foto dieser Platine. Das gemessene Magnetfeld ist in Abbildung 30 dargestellt. Das Signal hat eine Amplitude von  $40\text{ }\mu\text{T}$ .

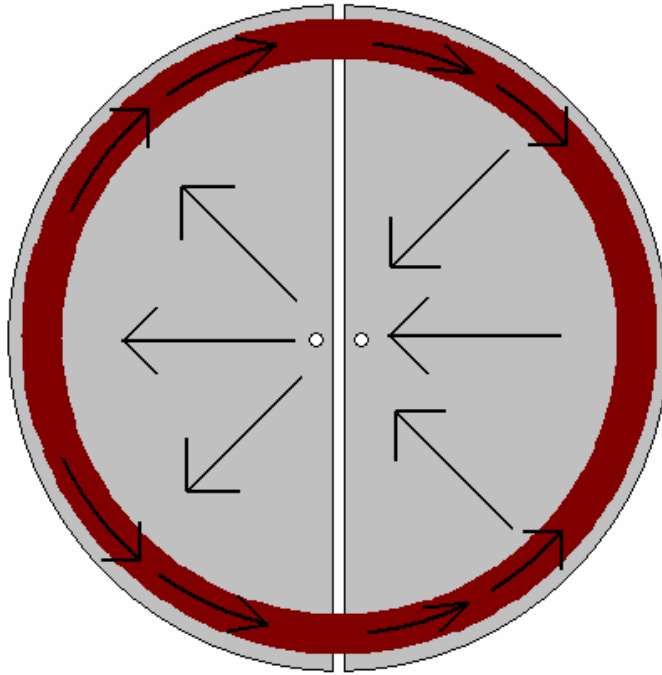


Abbildung 28: Idealisierter Stromfluss in der Doppelhalbkreisstruktur (siehe nachfolgende Abbildung). Die Stromanschlüsse befinden sich in der Mitte (kleine Kreise). Der Strom fließt vom linken Anschluss radial nach außen auf den Kupferring zu. Über den Kupferring gelangt er auf die andere Seite und fließt wieder radial nach innen zum anderen Anschluss.

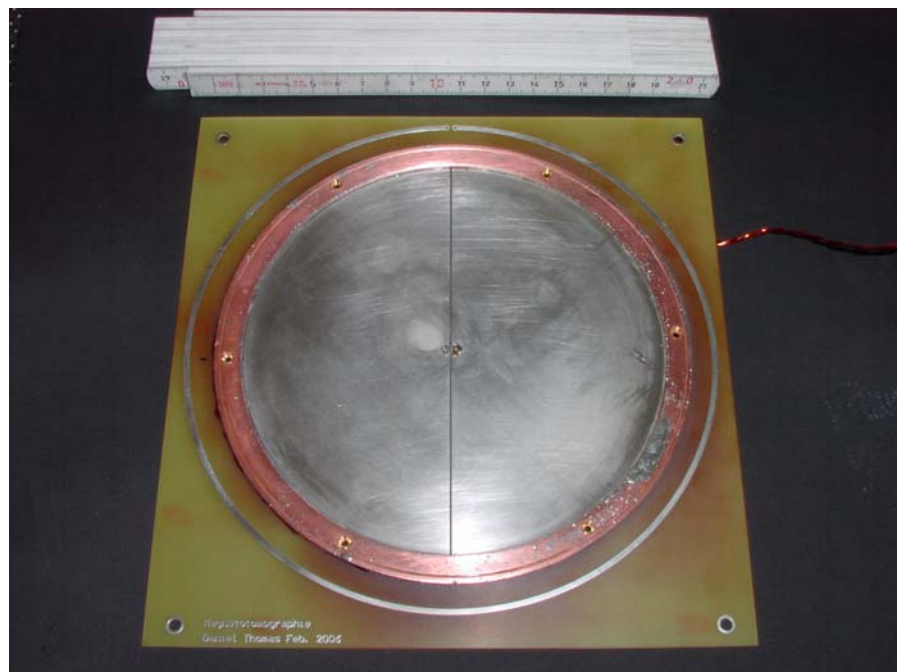


Abbildung 29: Foto von stromführender Platine. Die Platine besteht aus zwei halbkreisförmigen Leiterflächen, die auf der Platine keinen Kontakt miteinander haben. Sie werden über einen aufgelöteten Kupferring an der Außenseite kurzgeschlossen. Die Anschlüsse befinden sich in der Mitte der Platine, einer auf jeder Seite der Halbkreise.

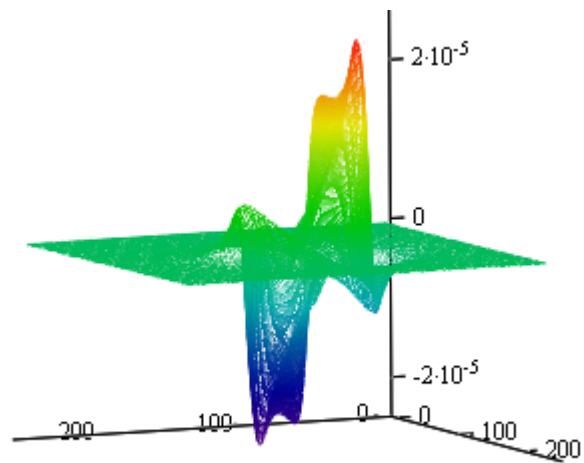


Abbildung 30: z-Komponente des Magnetfeldes 10 mm über den Halbkreisflächen.

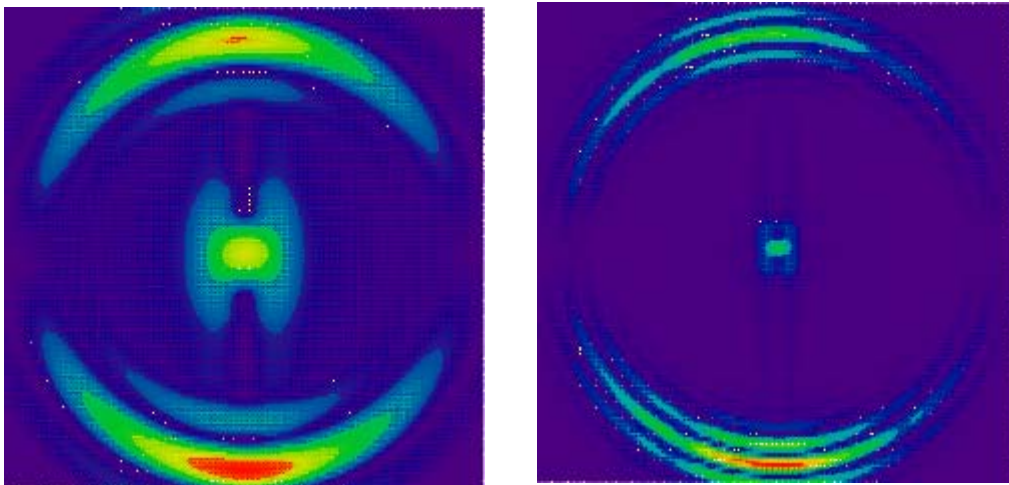


Abbildung 31: Falschfarbendarstellung der rekonstruierten Stromdichte.  $K_{max}$ :  $600 \text{ m}^{-1}$  (links).  $K_{max}$ :  $1300 \text{ m}^{-1}$  (rechts). Insbesondere an der linken Darstellung wird die Orientierung des Stromes entlang der geraden Schnittflächen der Halbkreise deutlich.

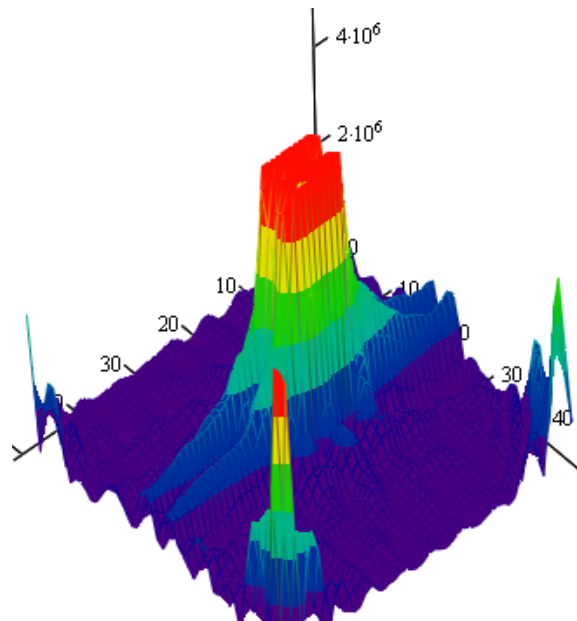


Abbildung 32: Flächendiagramm von rekonstruierter Stromdichte im Zentrum der Platine.  $K_{max}: 1300 \text{ 1/m}$ . Die Werte sind bei  $400 \text{ A/cm}^2$  abgeschnitten, weil diese nur durch die Anschlüsse zustande kommen.

Unabhängig von den bei den Rekonstruktionen verwendeten Filterparametern erkennt man in Abbildung 31 und Abbildung 32, dass der Strom in der Platine sich tatsächlich mehr entlang der geraden Seiten der Halbkreise orientiert und doch den längeren Weg durch den Kupferring meidet. Offensichtlich ist dessen Widerstand oder der Widerstand des Lötkontaktes noch zu hoch. Um diesen Umstand zu beheben, könnte man auch den Kupferring wie den Kreisring halbieren und die Hälften über Widerstände von einigen Ohm miteinander verbinden.

### 3.2.2 Kreisring

Bei folgender Leiterstruktur wird untersucht, wie homogen sich die Stromdichte auf einem breiten Kreisring verteilt. In Abbildung 34 ist der Kreisring mit einem Innendurchmesser und einer Breite von 50 mm abgebildet. Diese runde Struktur wird von einem 5 mm breiten Spalt unterbrochen. Dort befindet sich auf jeder Seite ein Anschluss für die Stromzufuhr.

Dieser Platine dient zur Untersuchung der Frage, wie gleichmäßig sich der Strom radial auf der Platine verteilt, und ob er nach einer Einlaufstrecke vielleicht sogar in Umfangsrichtung quasi parallel zur gegenüberliegenden Elektrode läuft. Rein intuitiv ist wohl schon klar, dass der Strom auf den inneren „Bahnen“ in der Nähe des Innenradius kürzere Wege zurücklegen kann, und dass damit diese stärker für den Stromfluss ins Gewicht fallen werden. Um dieser Tendenz entgegenzuwirken, wurden weitere Wege für den Strom dadurch favorisiert, dass die Anschlüsse sich am äußeren Umfang befanden.

Der Strom beträgt 3 A. Es wurde in 10 mm Abstand über ein 256 mm x 256 mm großes Gitter mit 1 mm Rasterweite gerastert.



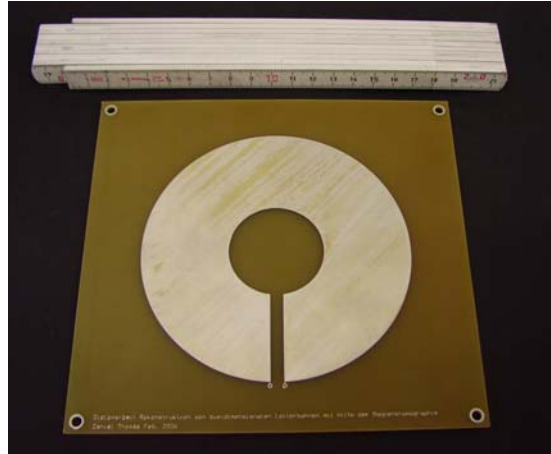


Abbildung 33: Foto vom Kreisring. Die Leiterbahn ist ein 50 mm breiter Ring, der an einer Stelle radial von einem 5 mm breiten Spalt unterbrochen ist. Dort sind am Außenrand kleine Kontakte (vorne im Bild) als Stromanschlüsse angebracht.

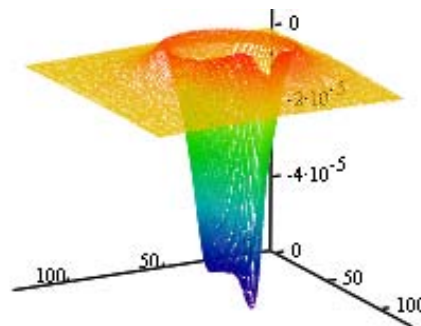


Abbildung 34: z-Komponente der Flussdichte in 10 mm Abstand über dem Kreisring. Die Amplitude beträgt  $50 \mu\text{T}$ .

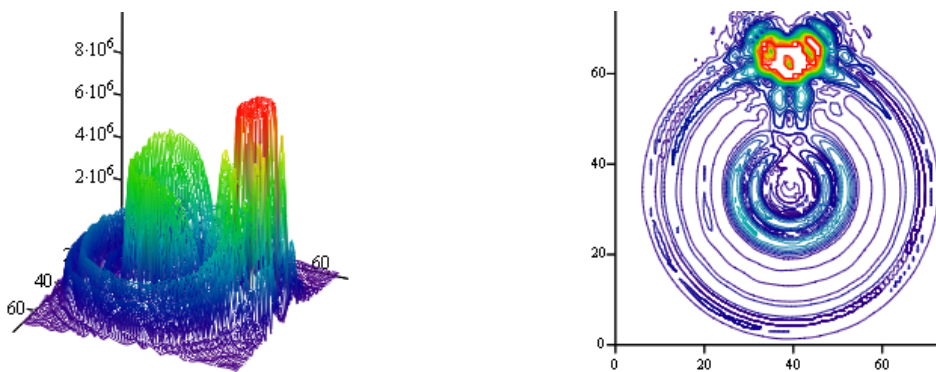


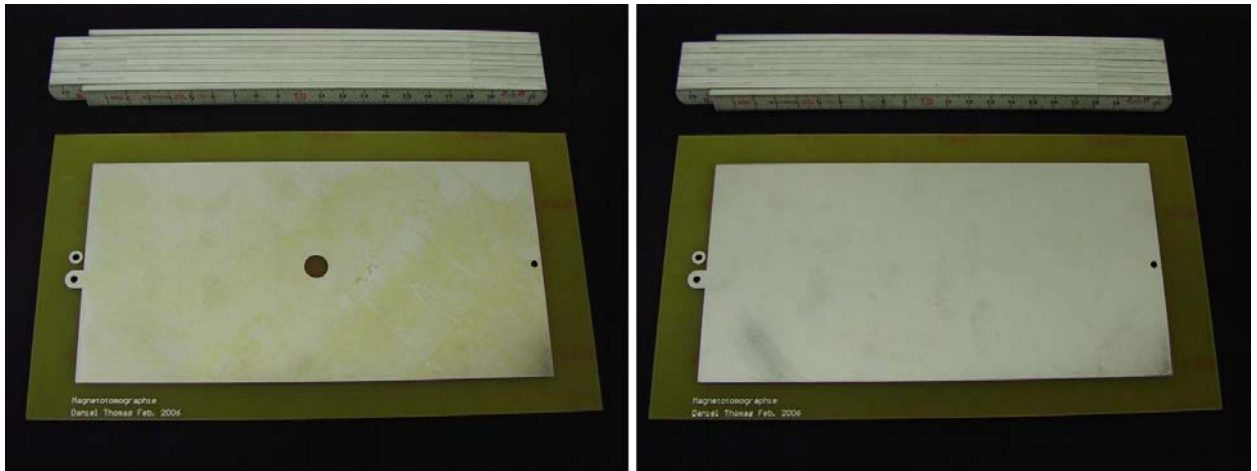
Abbildung 35: Rekonstruierte Stromdichte im Falle des Kreisringes. Die Werte wurden bei  $800 \text{ A/cm}^2$  abgeschnitten, um die Effekte der Anschlüsse zu unterdrücken. Für die Rückrechnung wurde ein  $k_{\text{max}}$  von  $1200 \text{ 1/m}$  verwendet.

Abbildung 34 zeigt die z-Komponente der Stromdichte in 10 cm Abstand. Die rekonstruierte Stromdichte in Abbildung 35 zeigt, dass der Strom im wesentlichen auf der Innenseite des Ringes fließt und nach außen dann auf ein niedriges Niveau abfällt. Noch

stärker als im Fall des Doppelhalbkreisrings ist hier die Tendenz des Stromes zu beobachten, den kürzesten Weg, den Weg des geringsten Widerstandes, zu nehmen.

### 3.3 Doppelseitige Platine mit Defekt

Bei der in Abbildung 36 dargestellten Leiterstruktur wird untersucht, wie sich ein Defekt in einer sonst homogenen Stromverteilung äußert. Dazu steht eine Platine zur Verfügung, die auf beiden Seiten parallele, 100 mm x 200 mm große Leiterflächen besitzt. Auf der einen Seite ist inmitten des sonst homogenen Leitermaterials eine kreisrunde Fläche mit 10 mm Durchmesser ausgelassen. Diese simuliert einen Defekt in einer homogenen Stromverteilung.



*Abbildung 36: Fotos der doppelseitigen Platinen. Auf der rechten Seite kann sich der Strom homogen verteilen. Auf der linken Seite wird die Stromverteilung durch einen kreisrunden Defekt beeinflusst. Die Rückführung des Stromes geschieht auf der Unterseite der Platine.*

Am linken und rechten Rand der Platine (auf Foto nicht zu sehen) wurden quer 1 mm dicke Kupferbleche aufgelötet. Sie dienen als Kurzschlussbrücken, um den Strom auf der gesamten Breite zu verteilen. Der Strom fließt auf der einen Seite der Platine hin und auf der anderen Seite wieder zurück. Die Magnetfelder des Stromes von Vorder- und Rückseite werden sich dann bei homogenem Stromfluss gegeneinander aufheben. Übrig bleibt dann nur noch ein Signal, das auf den Defekt zurückzuführen ist.

Die Stromverteilung um den Defekt kann man sich als eine Überlagerung aus einer homogenen Stromverteilung und zwei entgegengesetzten Kreisströmen vorstellen.



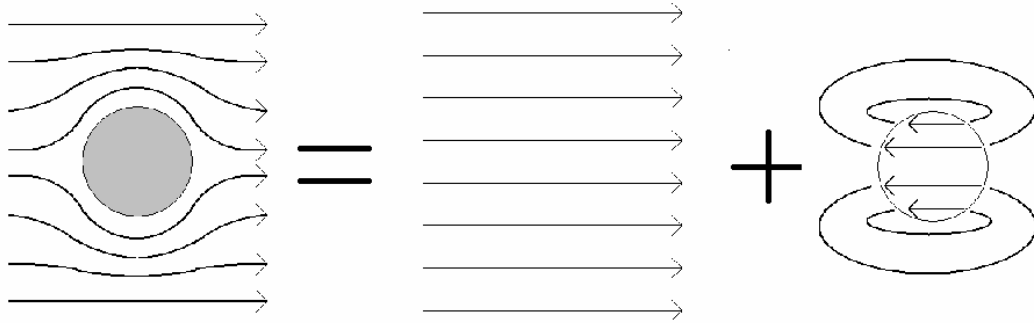


Abbildung 37: Ersatzschaltbild für die Stromverteilung um den kreisrunden Defekt der doppelseitigen Platine aus Abbildung 36. Die Stromverteilung auf der linken Seite lässt sich aus einem homogenen Strom und zwei entgegen gesetzten Kreisströmen zusammensetzen.

Der homogene Anteil entspricht genau der Stromverteilung auf der Rückseite der Platine, nur in entgegengesetzter Richtung. Die Magnetfelder dieser beiden homogenen Ströme heben sich im Idealfall gegeneinander auf. Es bleibt dann nur noch das Magnetfeld der beiden entgegengesetzten Kreisströme übrig, wie im Ersatzschaltbild der Abbildung 37 dargestellt ist.

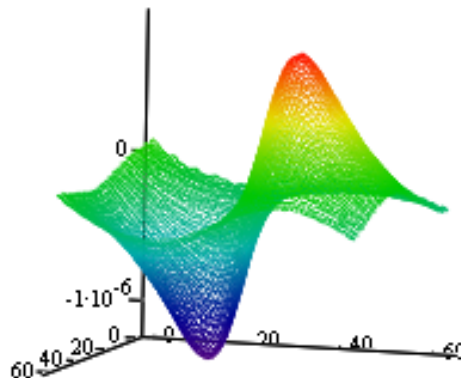


Abbildung 38: z-Komponente des Magnetfeldes 10 mm über dem kreisrunden Defekt. So sieht auch qualitativ das Magnetfeld von zwei nebeneinander liegenden, entgegengesetzten Kreisströmen aus.

Abbildung 38 zeigt die z-Komponente der Flussdichte über dem Defekt. Die Rekonstruktion der Stromdichte in Abbildung 39 zeigt genau über dem Defekt eine hohe Stromdichte, nämlich diejenige der Rückseite. Daneben ergeben sich zwei Minima, welche die Mittelpunkte der Kreisströme darstellen.

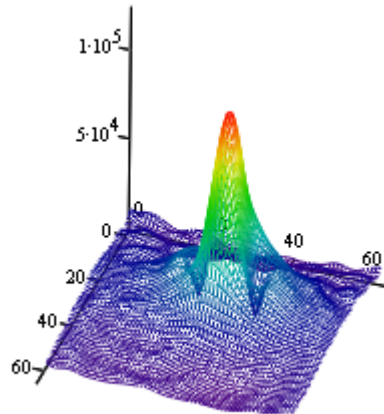


Abbildung 39: Rekonstruierte Stromdichte der doppelseitigen Platine. Für die Rekonstruktion wurde ein  $k_{\max}$  von  $850 \text{ 1/m}$  verwendet. Abstand des Sensors zur Platine ist  $10 \text{ mm}$ .

Abbildung 40 zeigt die rekonstruierten Stromdichten der doppelseitigen Platine aus Abbildung 36. Für die Rekonstruktion wurde ein  $k_{\max}$  von  $850 \text{ m}^{-1}$  (links) bzw.  $500 \text{ m}^{-1}$  (rechts) verwendet. Die Bilder geben qualitativ das Verhalten der Stromdichte aus dem Ersatzschaltbild (Abbildung 37) wieder.

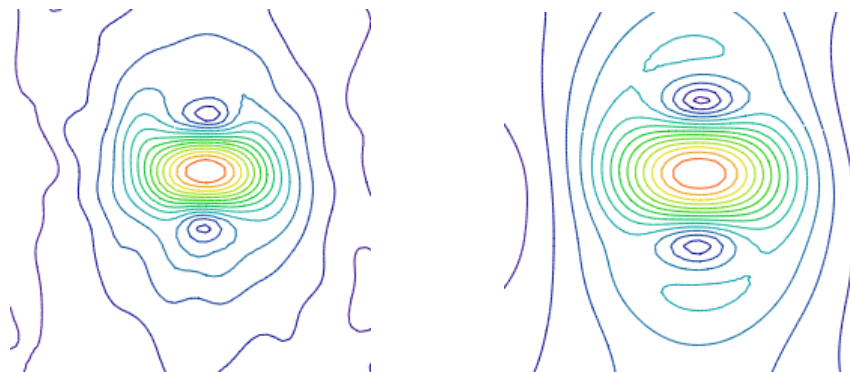


Abbildung 40: Rekonstruierte Stromdichten der doppelseitigen Platine aus Abbildung 36. Für die Rekonstruktion wurde ein  $k_{\max}$  von  $850 \text{ m}^{-1}$  (links) bzw.  $500 \text{ m}^{-1}$  (rechts) verwendet.

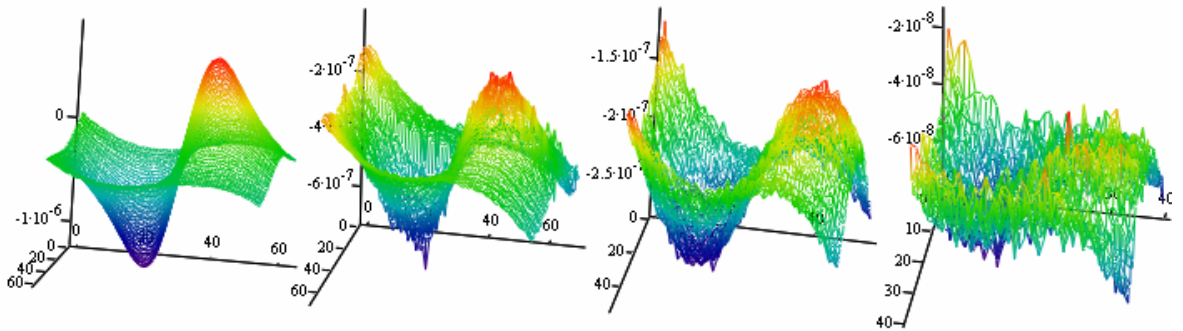


Abbildung 41: Magnetfeld über dem kreisrunden Defekt in vier verschiedenen Abständen (v.l.n.r. 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm). Bei 10 mm Abstand zwischen dem Sensor und dem Defekt ist im Magnetfeld ein deutliches Signal mit einer Amplitude von über  $2 \mu\text{T}$  zu erkennen. Mit wachsendem Abstand wird das Signal-zu-Rausch-Verhältnis immer kleiner. Bei 40 mm Abstand tritt das Signal kaum aus dem Störsignal hervor.

Vergrößert man den Abstand zwischen Sensor und Platine, so wird es immer schwieriger, den Defekt zu nachzuweisen. Dies ist in Abbildung 41 dargestellt. Bei 40 mm Abstand tritt das Signal kaum aus dem Störsignal hervor.

Trägt man nun die Amplitude des Defekt-Signals gegenüber dem Abstand zwischen Platine und Sensor auf, so erhält man Information über den maximalen Abstand, bei dem der Defekt noch nachweisbar ist.

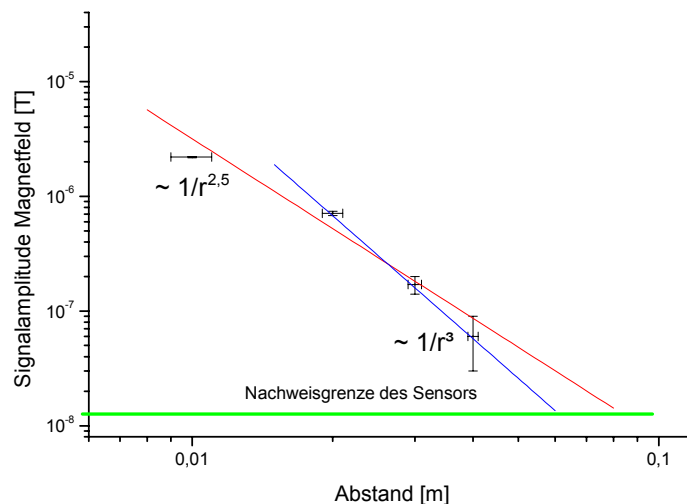


Abbildung 42: Änderung der Flussdichte über dem Defekt als Funktion des Abstandes. Das Signal in der Flussdichte wurde nur bis zu einem Abstand von 40 mm gemessen. Dies entspricht noch dem Nahfeld, denn der Exponent des Abstandsgesetzes beträgt etwa 2.5, während man im Fernfeld ein Abklingen mit mindestens der dritten Potenz des reziproken Abstandes erwarten wird.

Das Auflösungs-niveau des Sensorsystems von 12 nT wird hier bei einem Abstand von etwa 60 mm erreicht.

## 4 Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein Verfahrtschiff benutzt, der primär für die Messungen an Brennstoffzellen konzipiert worden war. Die hier dargestellten Messungen an zweidimensionalen Objekten erforderten aber nur einen Teil der Möglichkeiten dieses Systems. So wurde zum Beispiel der Sensor 2 nicht benötigt, ebenso wie die Dreiachsigkeit der Sensoren. Auch der dynamische Bereich der Sensoren wurde bei den vorliegenden Messungen nicht voll ausgeschöpft. Von der Messung während des Fahrens der Vorschübe wurde kein Gebrauch gemacht. Gerade von der letzten Option erhofft man sich aber bei den Untersuchungen der Brennstoffzellen einen Zeitgewinn, der es gegenüber der Einzelschritt-Verfahrweise erlauben soll, auch schnellere, z.B. transiente Vorgänge in den Brennstoffzellen zu detektieren.

Zwar wurde bei der Zusammenstellung des Verfahrtschiffes weitestgehend auf ferromagnetische Bauteile verzichtet, welche die Magnetfeldmessung beeinflussen können. Allerdings sind in den Schrittmotoren noch Permanentmagnete und in den Vorschüben noch Stahlführungen vorhanden. Der Feldgradient, der in Abbildung 16 gezeigt wurde, ist möglicherweise zum Teil auf den noch nicht vollständigen Austausch aller magnetischen Teile zurückzuführen. Zwar wird dieser Einfluss durch eine Differenzmessung stark eliminiert, aber trotzdem sollten ferromagnetische Teile prinzipiell eliminiert werden, um nichtlineare Magnetisierungseffekte durch das Streufeld der Brennstoffzelle im Betrieb ausschließen zu können. Als zweitbeste Option kann die Abschirmung der ferromagnetischen Komponenten herangezogen werden (siehe Abbildung 19).

Die Verfahrgenauigkeit der Vorschübe ist mit 0,1 mm ausreichend für die Anwendungen in der Magnetotomographie. Zum einen wird das Magnetfeld über eine Fläche von etwa 1 mm<sup>2</sup> im Sensorchip gemittelt. Deshalb bringen Positionierungen, die feiner als 1 mm sind, für die Magnetfeldmessung nur bedingt mehr Information. Ein stärkeres Argument kann allerdings durch die hier vorliegenden Messungen gegeben werden: Bei der Messung des stromdurchflossenen Kreisringes in nächster Nähe konnte dessen Drahtdurchmesser nur bis hinunter zu 8 mm nachvollzogen werden (siehe Abbildung 22). Dies ist deutlich schlechter als die tatsächliche Breite von 0,5 mm. Diese Begrenzung entsteht durch das Auftreten von Artefakten, die ihren Ursprung im Rauschen der Sensoren und in dem Einfluss äußerer Störquellen haben. Es steht zu erwarten, dass später tiefliegende Defekte in der Brennstoffzelle sich weit weniger gut auflösen lassen werden, weil sie in der gleichen Störumgebung analysiert werden. Die Nichteindeutigkeit der Lösung des dreidimensionalen Problems wie die Interpretation der Daten noch weiter erschweren.

Wegen seines hohen dynamischen Bereiches ist der hier verwendete Sensor ideal für die Untersuchung der Brennstoffzellen. Wenn man aber nur von den hier untersuchten Leiterplatten ausgegangen wäre, so hätte man eher einen anderen Sensor benutzt, der es gestattet hätte, näher an das Objekt heranzukommen. Die Abstandsvariation bei den Messungen der Mäanderstruktur belegen, dass Details der Stromdichte sehr schnell mit größerem Abstand unterdrückt werden, und man diese nur wieder durch die Gewichtung der höheren Raumfrequenzen zurückholen kann. Allerdings ist bei diesem System die kombinierte Wirkung von Störungen und Rauschen noch so groß, dass durch dieses Verfahren schnell auch Artefakte mit ins Spiel kommen. Die Untersuchungen von Roth et. al. zeigen, dass man ein höheres Rauschen eines Sensorsystems in gewissem Rahmen durch einen geringeren Abstand zum Messobjekt mehr als kompensieren kann. Bei dreidimensionalen Objekten wie der Brennstoffzelle sind die minimalen Abstände allerdings durch ihre Geometrie vorgegeben, so dass man hier in erster Linie an die Reduktion der Störeinflüsse denken muss.

Eine Verbesserung der Empfindlichkeit der Sensoren würde die Qualität der Messungen erst dann erhöhen, wenn diese äußeren Störquellen reduziert sind. Dies könnte optimaler Weise durch eine Abschirmung der Messumgebung realisiert werden. Zumindest sollte solch ein Ort für den Verfahrtschiff gewählt werden, bei dem nur ein Minimum an Störquellen Einfluss auf die Messumgebung hat.

Die Messzeit dauert pro Messpunkt etwa 1 s bei konventioneller Messung. Konventionelle Messung bedeutet, jeden Rasterpunkt anfahren, anhalten, Daten aufnehmen, Daten filtern, Daten mitteln und zum nächsten Punkt fahren. Verzichtet man auf die Mittelung, kann man auch während der Fahrt kontinuierlich einzelne Werte aufnehmen. Bei dieser kontinuierlichen Messung verkürzt sich die Messzeit pro Messpunkt durchschnittlich auf etwa eine Zehntelsekunde. Die gesamte Messdauer für das Magnetfeld von Brennstoffzellen zu messen, beträgt dann einige Minuten (Abhängig von der Anzahl der Messpunkte). Damit lassen sich nur stationäre Zustände der Brennstoffzellen betrachten. Um in Zukunft auch dynamische Vorgänge betrachten zu können wären Messzeiten in der Größenordnung von 0,5 Sekunden notwendig. Dies ließe sich nur mit einer großen Anzahl (ca. 50) von Sensoren, die gleichzeitig das Magnetfeld abrastern, realisieren. Dabei müsste die Datenaufnahme anders als jetzt, nicht über eine Schnittstellenkarte sondern über ein Mehrkanalsystem organisiert werden.

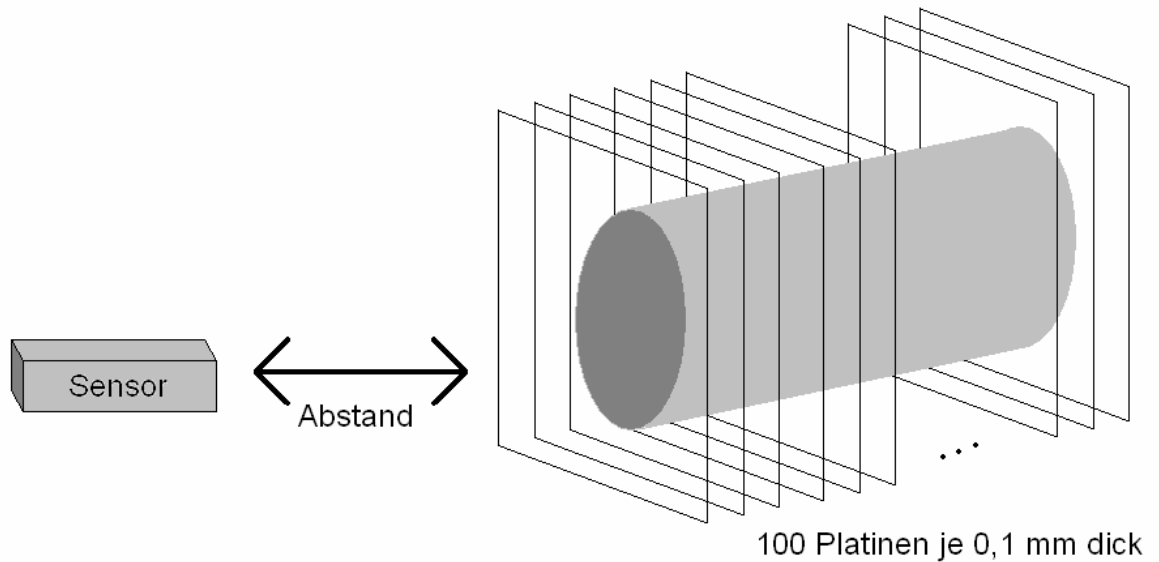
Die Untersuchung der doppelseitigen, mit dem kreisförmigen Defekt behafteten Platine erlaubt eine grobe Abschätzung der Feldänderung durch einen zylinderförmigen Defekt in einem dreidimensionalen, homogen mit Strom durchflossenen Objekt wie der Brennstoffzelle.

Hierzu wird ein 10 mm langer zylindrischer Defekt durch Übereinanderlegen des Effektes von 100 der 0,1 mm dicken Platinen betrachtet, siehe Abbildung 43. Das Magnetfeld des Defektes von einer einzelnen Platine bei einer Stromdichte von  $30 \text{ A/cm}^2$  in einem Abstand von 10 mm beträgt etwa  $2 \mu\text{T}$ . Bei wohlwollender Abschätzung, dass alle 100 Platinen unabhängig von ihrem individuellen Abstand mit  $2 \mu\text{T}$  zum Signal beitragen, erhalten wir ein Magnetfeld von  $200 \mu\text{T}$ . Allerdings beträgt die Stromdichte in einer Brennstoffzelle mit  $0,6 \text{ A/cm}^2$  nur etwa  $1/50$  der Stromdichte der hier untersuchten Platine. Die Magnetfeldstärke skaliert linear mit der Stromdichte, und somit wird ein entsprechender Defekt in einer Brennstoffzelle noch etwa  $4 \mu\text{T}$  in 10 mm Abstand liefern. Diese Situation könnte einem oberflächennahen Defekt entsprechen, der auch tatsächlich mit den hier verwendeten Sensoren prinzipiell noch auflösbar sein sollte.

Andererseits wird das Feld dieses Defektes mindestens mit der dritten Potenz des reziproken Abstandes abfallen, so dass sich bei einer Verzehnfachung des Abstandes auf 100 mm – entsprechend einem tief liegenden Defekt – nur noch eine Flußdichteänderung von 4 nT ergibt. Dies liegt unterhalb der Nachweisgrenze des Messsystems von 12 nT. Bei diesem Defekt wurde im übrigen idealerweise davon ausgegangen, dass er vollständig elektrisch isolierend wirkt. Dies wird in der Realität weniger extrem ausfallen, was das gemessene Magnetfeld noch weiter reduziert. Außerdem muss der Strom beim zweidimensionalen Defekt in der x,y-Ebene ausweichen, und die Änderung der z-Komponente der Flußdichte wird maximal. Beim dreidimensionalen Defekt ist der Strom nicht auf eine Ebene beschränkt, und er kann zusätzlich links und rechts am Defekt vorbeifließen, was die Änderung in der axialen Komponente noch weiter reduziert.

Dieses Bild zeigt zum einen, dass sich auch aus der Analyse der Stromdichte von zweidimensionalen Defekten Aussagen über die Größenordnung dreidimensionaler Defekte treffen lassen. In diesem konkreten Fall heißt dies, dass es mit den vorhandenen Senso-

ren und der realen Störumgebung schwierig werden dürfte, solche tiefliegenden Defekte in einer Brennstoffzelle zu detektieren.



*Abbildung 43: Zur Abschätzung der durch einen dreidimensionalen, zylinderförmigen Defekt erzeugten Magnetfeldstärke wird dieser durch die Aneinanderreihung von 100 Schichten approximiert. Der felderzeugende Effekt jeder einzelnen Schicht kann dann näherungsweise durch den bekannten Effekt einer Leiterplatine mit kreisförmigem Defekt ersetzt werden.*

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Etablierung der Magnetotomographie an zweidimensionalen Leiterstrukturen als Vorarbeit für die spätere Stromdichterekonstruktion an dreidimensionalen Objekten wie Brennstoffzellen. Zu diesem Zweck wurde ein Verfahrtschiff für die Messung an Brennstoffzellen aufgebaut und in Betrieb genommen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Kenntnis und Kontrolle der magnetischen Störeinflüsse des Schiffes und der Umgebung gelegt. Die magnetische Störumgebung wurde charakterisiert und magnetische Störungen wurden so weit wie möglich eliminiert oder durch Differenzmessungen kompensiert. Zur Inbetriebnahme wurde das Rückrechenverfahren auf zweidimensionale Stromverteilungen beschränkt, weil dieses Problem sich prinzipiell eindeutig lösen lässt und in der Literatur schon angewendet worden war. Trotzdem kam es schon bei relativ einfachen zweidimensionalen Strukturen zu Qualitätseinbußen bei der Rekonstruktion der Stromdichte, die auf restliche Störeinflüsse am Messort und das Rauschen der Sensoren zurückzuführen sind.

Aus diesen Erfahrungen heraus lassen sich schon einige Empfehlungen für die zukünftige Arbeit mit den Brennstoffzellen ziehen. Zum einen wird vorgeschlagen, die ferromagnetischen Wellen in den Vorschüben zu eliminieren und die Schrittmotoren noch besser magnetisch abzuschirmen. Die Arbeit mit den zweidimensionalen Strukturen hat gezeigt, dass sich auch aus der Untersuchung einfacher Systeme heraus eine Einschätzung der Effekte bei komplexeren Geometrien erzielen lässt. Insbesondere konnte abgeschätzt werden, dass sich tiefliegende Defekte in der Brennstoffzelle mit den vorhandenen Sensoren und in der jetzigen Störumgebung nur mit Schwierigkeiten auflösen lassen werden.

Um sich weiter über solche grundsätzlichen Effekte klar zu werden, wird vorgeschlagen, dass im Diskussionskapitel behandelte Problem eines zylindrischen Defektes analytisch oder numerisch zu lösen, um bei gegebenem Abstand des Defektes zum Sensor dessen gerade noch nachweisbare Größe festzustellen. Möglicherweise werden die entsprechenden Ergebnisse dazu führen, das hier vorgestellte Messkonzept in Bezug auf Sensorempfindlichkeit und Störumgebung zu überdenken. Dieser Aspekt wird noch wichtiger, wenn man in Zukunft zur Erhöhung der Messgeschwindigkeit daran denken sollte, die beiden Sensoren durch ein Mehrkanalsystem zu ersetzen.

## 6 Anhang

### 6.1 Prinzip und Aufbau eines magnetoresistiven Sensors

Das Prinzip magnetoresistiver Sensoren basiert auf dem Effekt, dass sich die Leitfähigkeit einer anisotropen ferromagnetischen Schicht unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes ändert. Dabei ist die Widerstandsänderung von der Richtung und der Stärke des Magnetfeldes abhängig.

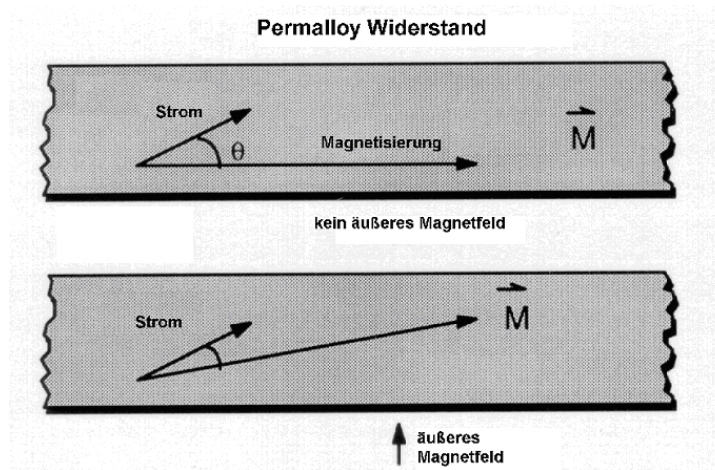


Abbildung 44: Der Winkel zwischen Strom und Magnetisierung bestimmt den Widerstand in einer magnetoresistiven Schicht. Das äußere Magnetfeld verändert den Vektor der Magnetisierung innerhalb des Magnetwiderstandes. Wenn Strom und Magnetisierung parallel laufen, wird der Widerstand maximal. Bilden sie dagegen einen rechten Winkel, so ist der Widerstand am geringsten.

Als Magnetwiderstand (magnetoresistives Material) werden dünne Schichten aus Permalloy (Nickel-Eisen-Legierung) verwendet. Entscheidend für die Widerstandsänderung ist der Winkel zwischen Stromrichtung und resultierender Magnetisierung in der Schicht. Die relative Änderung des Widerstandes liegt bei 2-3%. Der kleinste Widerstand stellt sich ein, wenn der Winkel zwischen äußerem Magnetfeld und Stromrichtung senkrecht zueinander steht, und die Magnetisierung ihren Sättigungswert erreicht hat. Der maximale Widerstand stellt sich ein, wenn das äußere Magnetfeld parallel zum Strom liegt. Zwischen beiden Extremen gibt es einen Bereich bei  $45^\circ$ , der die Änderung des Widerstandes mit dem Winkel fast linear wiedergibt.



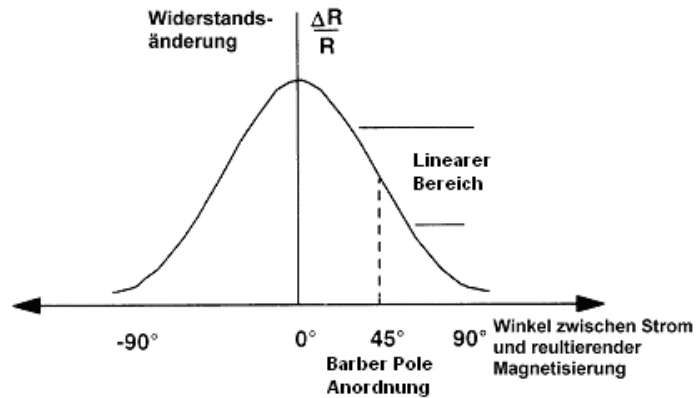


Abbildung 45: Verlauf der Widerstandsänderung in Abhängigkeit zum Winkel zwischen Strom und resultierender Magnetisierung. Wo Strom und Magnetisierung einen Winkel von 45° bilden, liegt der Arbeitsbereich eines Magnetwiderstandes. Dort ist die Widerstandsänderung proportional zur äußeren Magnetfeldänderung.

Die Methode, den Strom unter einem Winkel von 45° zu der vordefinierten Magnetisierung fließen zu lassen, nennt sich Barber Pole Anordnung. Dies wird realisiert, indem mehrere Streifen des Magnetwiderstandes (Permalloy) in einem Winkel von 45° gegen die Vorzugsrichtung der Magnetisierung angeordnet sind. Die Permalloystreifen sind getrennt durch niederohmige Kontakteleiten. Der Strom nimmt den kürzesten Weg durch die Permalloyschichten und schneidet die Vorzugsrichtung der Magnetisierung im Magnetwiderstand in einem Winkel von 45°.

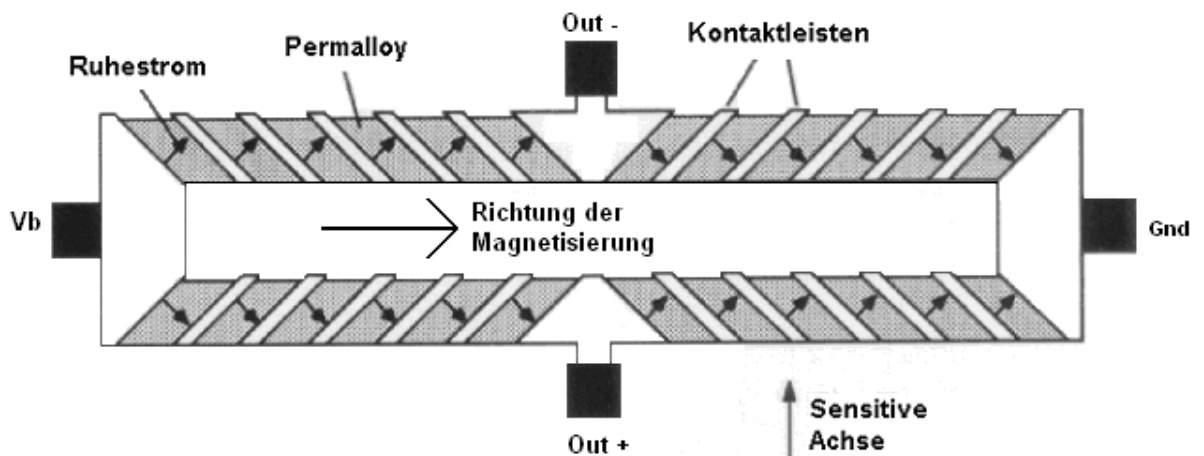


Abbildung 46: Wheatstonesche Brückenschaltung aus vier Magnetwiderständen. Die Brückenspannung liegt zwischen dem linken ( Vb ) und dem rechten ( Gnd ) Anschluss an. An den Kontakten Out+ und Out- wird die Sensorausgangsspannung abgegriffen. Der Ruhestrom nimmt den kürzesten Weg durch die Permalloystreifen und bildet mit der Magnetisierung einen Winkel von 45°.

Mit der Überlagerung eines äußeren Magnetfeldes ergibt sich eine resultierende Magnetisierung, die dann eine lineare Widerstandsänderung zur Folge hat. Jede der drei Sensorkomponenten besteht aus vier Magnetwiderständen, die zu einer Wheatstoneschen Brücke zusammengeschaltet sind. Die vier Widerstände sind bis auf kleine fertigungsbedingte Unterschiede gleich und haben Werte in der Größenordnung von 1 kΩ. Die Brückenspannung beträgt 5 Volt.

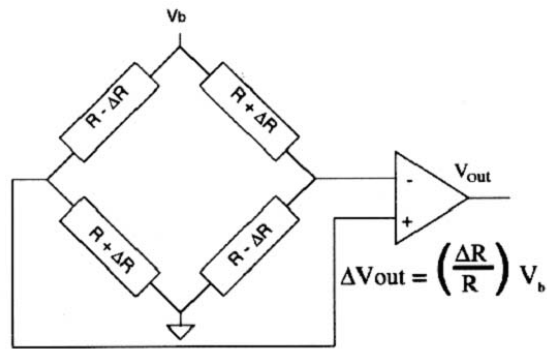


Abbildung 47: Schaltskizze Brückenschaltung. Die anliegende Brückenspannung ist mit  $V_b$  bezeichnet. Das Vorzeichen der Widerstandsänderung von gegenüberliegenden Elementen ist gleich. Die dabei abfallende Spannung wird verstärkt.

Die jeweils korrespondierenden Widerstände der Brücke (gegenüberliegend in der Schaltskizze) weisen den gleichen Winkel zwischen Stromrichtung und resultierender Magnetisierung auf. Folglich ist auch die Änderung des Widerstandes  $\Delta R$  für die beiden Paare die gleiche. Die Widerstandsänderung von nebeneinander liegenden Magnetwiderständen hat zwar auch den selben Betrag, aber ein anderes Vorzeichen. Die Spannungsänderung in der Brücke ist proportional zum Magnetfeld. Diese Spannung wird verstärkt, bevor sie gefiltert und digitalisiert von einem PC aufgenommen wird.

Ein Problem bei Verwendung von magnetoresistiven Widerständen zur Magnetfeldmessung ist die Beeinflussung der Vormagnetisierung im Material. Ohne thermische Einflüsse und äußeres Magnetfeld würde die in Vorzugsrichtung orientierte Magnetisierung beliebig lange halten. Durch äußere Magnetfelder ändert sich mit der Zeit auch der Vektor der Magnetisierung im Permalloy. Gleichbleibende Richtung und Stärke der Magnetisierung sind aber Voraussetzung für eine reproduzierbare Magnetfeldmessung.

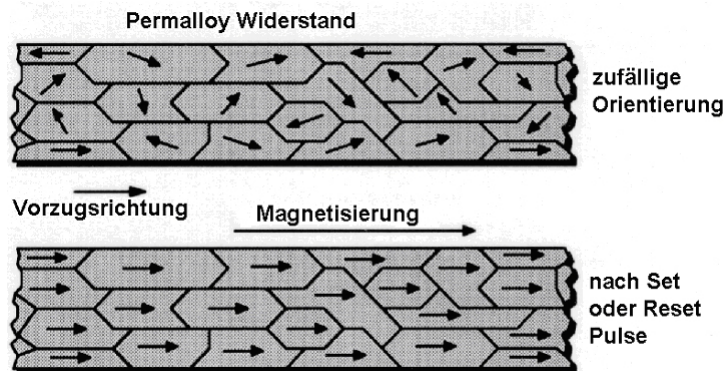


Abbildung 48: Bei zufälliger Orientierung der Magnetisierung ist eine reproduzierbare Magnetfeldmessung nicht möglich. Der Set / Reset Impuls magnetisiert den Magnetwiderstand bis zur Sättigung in eine Vorzugsrichtung.

Eine gewünschte Vormagnetisierung kann man z.B. durch eine Spule um die Widerstände erzeugen, deren Magnetfeld parallel zur gewünschten Vorzugsrichtung liegt. So wird mit Hilfe eines Stromimpulses, eines sogenannten Set- bzw. Reset- (andere Richtung) Pulses, die gewünschte Vormagnetisierung wiederhergestellt. Beim HMC 1053 werden solche Spulen durch auf dem Halbleiterplättchen befindlichen Leiterschlaufen

ersetzt, welche die Set- und Reset- Effekte erzeugen. Der Impuls dauert  $2 \mu\text{s}$  und verursacht somit nur minimierte Totzeiten des Sensors.

Der hier verwendete Sensor misst drei Komponenten, die senkrecht zu einander stehen. Die drei entsprechenden Brückenschaltungen sind in einem  $7,4 \text{ mm} \times 7,4 \text{ mm} \times 2,6 \text{ mm}$  kleinen Chip untergebracht. Auf dem vergrößertem Röntgenbild in Abbildung 49 ist die Anordnung der Komponenten erkennbar. Zwei der Komponenten sind direkt übereinander angeordnet (x- und y- Komponente), die dritte senkrecht dazu in etwa 3 mm Abstand daneben. Die Orthogonalität in den beiden Komponenten in der x,y-Ebene ist besser als  $0,1^\circ$ . Die dazu senkrechte z-Komponente weicht laut Herstellerangaben mit maximal  $1^\circ$  vom rechten Winkel ab. Die Fläche, über die der Sensor das Magnetfeld beim Messen mittelt, beträgt ungefähr  $1 \text{ mm}^2$ .

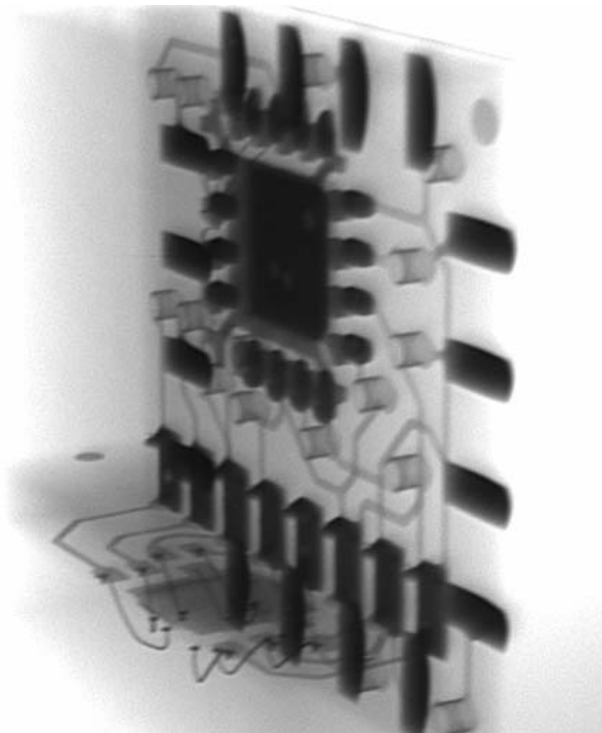


Abbildung 49: Vergrößertes Röntgenbild des Sensorchips. Abmessungen:  $7,4 \text{ mm} \times 7,4 \text{ mm} \times 2,6 \text{ mm}$ . Zwei Brückenelemente sind übereinander auf der Grundfläche angebracht (größere, schwarze Fläche in der Mitte) und der dritte senkrecht dazu an einer Seitenfläche.

Die systematische Abweichung von der Linearität in Abbildung 8 (Kapitel 2.2.2) lässt sich qualitativ erklären, wenn man den Verlauf in Abbildung 45 übertrieben betrachtet. Der lineare Verlauf geht in eine Funktion ähnlich  $1 + \cos(2\alpha)$  über. Eine Gerade, die die Steigung der Kurve im Wendepunkt bei  $45^\circ$  besitzt, liegt auf der einen Seite unterhalb und auf der anderen Seite oberhalb der Kurve. Nähert sie sich den Maxima kreuzt die Kurve wieder die Gerade.

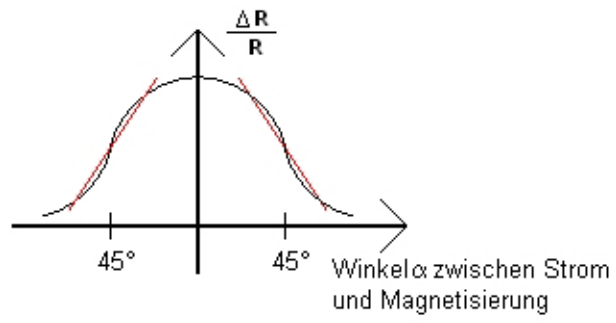


Abbildung 50: Prinzip der Widerstandsänderung eines Magnetwiderstandes. Erklärung für den Verlauf der Abweichung von der Linearität im Text.

## 6.2 MathCad-Programm zur Rekonstruktion

```

ORIGIN := 0
N := 256

b1 :=
    C:\.Mäander Bz Untergrund z 10mm Raster 1mm.bt

n := zeilen(b1)
n = 16

k := 0..n-1
m := 0..n-1

Xk := k    Ym := m

Mxy := erweitern(sort(X), sort(Y))
S := kspline(Mxy, b1)

anp(x, y) := interp[S, Mxy, b1,  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ ]

xmin := Mxy0,0    xmax := Mxyn-1,0
ymin := Mxy0,1    ymax := Mxyn-1,1

xn := N    yn := N

i := 0..xn-1    xindi := xmin + i  $\frac{xmax - xmin}{xn - 1}$ 
j := 0..yn-1    yindj := ymin + j  $\frac{ymax - ymin}{yn - 1}$ 

bi,j := anp(xindi, yindj)

ORIGIN :=  $-\frac{N}{2}$ 

a :=
    C:\.Mäander Bz 2_5A z 10mm Raster 1mm.bt

Bz :=  $\frac{a - b}{10340}$ 

FBz := cfft(Bz)

μ0 := 4 π · 10-7    i := √-1    d := 10-4    z := 0.01    kmax := 1200

siggi(n) :=  $\begin{cases} -1 & \text{if } n < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$ 

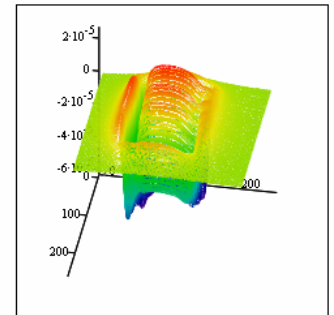
```

$$k := \frac{-N}{2} .. \left( \frac{N}{2} - 1 \right)$$

$$m := \frac{-N}{2} .. \left( \frac{N}{2} - 1 \right)$$

$$kx_k := \frac{2 \cdot \pi \cdot (k + 0.5)}{1000}$$

$$ky_m := \frac{2 \cdot \pi \cdot (m + 0.5)}{1000}$$



Bz

$$r_{k,m} := \sqrt{(kx_k)^2 + (ky_m)^2}$$

$$H_{k,m} := \frac{r_{k,m}}{kmax}$$

$$FBz\_trans_{k,m} := FBz \cdot k\text{-siggi}(k) \cdot \frac{N}{2} \cdot m\text{-siggi}(m) \cdot \frac{N}{2}$$

$$FJx\_roh_{k,m} := -i \cdot \frac{2}{\mu0 \cdot d} \cdot \frac{e^{i k_x m z}}{r_{k,m}} \cdot ky_m \cdot FBz\_trans_{k,m}$$

$$FJy\_roh_{k,m} := i \cdot \frac{2}{\mu0 \cdot d} \cdot \frac{e^{i k_x m z}}{r_{k,m}} \cdot kx_k \cdot FBz\_trans_{k,m}$$

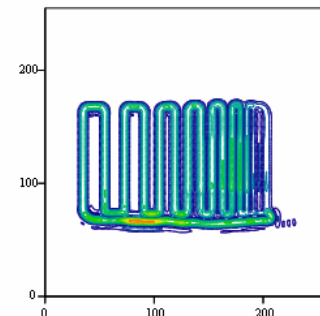
$$FJx_{k,m} := \begin{cases} FJx\_roh_{k,m} [0.5 \cdot (1 + \cos(H_{k,m} \cdot \pi))] & \text{if } H_{k,m} < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$FJy_{k,m} := \begin{cases} FJy\_roh_{k,m} [0.5 \cdot (1 + \cos(H_{k,m} \cdot \pi))] & \text{if } H_{k,m} < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Jx := icfft(FJx)$$

$$Jy := icfft(FJy)$$

$$Jxy_{k,m} := \sqrt{(|Jx_{k,m}|)^2 + (|Jy_{k,m}|)^2}$$



## 6.3 Literatur

- [1] K.-H. Hauer, *Zwischenbericht Magnetotomographie für Brennstoffzellen*, (interner Bericht im IWV-3, 2003)
- [2] H. Morneburg (Hrsg.) „*Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik*“ (München, 1995)
- [3] C. Hellier “*Handbook of Nondestructive Evaluation*” (Mc Graw-Hill, New York, 2001)
- [4] R. Kress, L. Kühn und R. Potthast, “*The reconstruction of a current distribution from its magnetic fields*“ *Inverse Problems* 18 (2002) 1127-1146
- [5] F. Prautzsch „*Schrittmotor Antriebe: präzise Positionieren in computergerechter Technik*“ (Franzis, München, 1988)
- [6] H. Hinsch „*Elektronik*“ (Springer, Heidelberg, 1996)
- [7] Honeywell Datenblatt HMC 1053
- [8] Honeywell Application Note AN-209 “*Magnetic Current Sensing*“
- [9] Honeywell Application Note AN-213 “*Set/Reset Function for Magnetic Sensors*“
- [10] Honeywell Application Note AN-212 “*Handling Sensor Bridge Offset*“
- [11] Betriebsanleitung Spektrum Analysator Stanford Research SSR 770 Network Analyzer
- [12] D. Richter „*Allgemeine Geologie*“ (de Gruyter, Berlin, 1986)
- [13] Erdmagnetfeld-Datenarchiv, Technische Universität Braunschweig [http://www.geophys.tu-bs.de/dienste/mrode/daten\\_de.html](http://www.geophys.tu-bs.de/dienste/mrode/daten_de.html)
- [14] Dieter Nährmann „*Das große Werkbuch Elektronik Bd 1*“ (Franzis, Poing, 2002)
- [15] B. Roth, N. Sepulveda and J. Wikswo, Jr., “*Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution*“, *J. Appl. Phys.* 65(1) S.361-372 (1989)
- [16] J. Goodman “*Introduction to Fourier Optics*“ (Mc Graw-Hill, New York, 1968)
- [17] J. D. Jackson “*Classical Electrodynamics*“ (John Wiley & Sons, 1975)
- [18] T. Slawomir, “*Thin film magnetoresistive sensors*“ (Institute of Physics Publ., 2001)
- [19] H. Bittel and L. Storm „*Rauschen*“ (Springer, Berlin, 1971)
- [20] B. Jungbluth „*Simulation und Experimente zur Optimierung eines hochpermeablen Magnetfeldleiters für den Einsatz in einem Squid-Mikroskop*“, Diplomarbeit RWTH Aachen, 2000
- [21] K.-H. Hauer and R. Potthast “*On uniqueness and non-uniqueness for current reconstruction from magnetic fields*“ *Inverse Problems* 21, 955-967 (2005).

## **Danksagung**

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Institut für Werkstoffkunde und Verfahren der Energietechnik (IWW-3) in Zusammenarbeit mit der Zentralabteilung Technologie (ZAT) im Forschungszentrum Jülich erstellt. Der Schwerpunkt der Arbeit fand im ZAT statt.

Zu erst bedanke ich mich bei Herrn Prof. P. Herzog, Vorsitzender des Prüfungsausschuss für den Studiengang Diplom-Physik, der diese auswärtige Diplomarbeit zugelassen hat.

Herr Prof. Dr. K. Maier hat bereitwillig das Amt des Koreferenten dieser Arbeit übernommen. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Herrn Dr. H. Soltner gilt mein besonderer Dank für die exzellente Betreuung vor Ort. Die zahlreichen Hilfestellungen, Anregungen und konstruktive Diskussionen sowie nicht zuletzt die kritische Durchsicht dieser Arbeit waren ein ständiger Garant für das Gelingen der Diplomarbeit.

Für die professionellen mechanischen Arbeiten am Verfahrtschich und das herzliche Miteinander danke ich Herrn W. Hellenbrandt und Herrn M. Dick.

Der gesamten Abteilung Entwicklung und Erprobung des ZAT unter Leitung von Dr. H. Glückler danke ich für Ihr ständiges Interesse an meiner Arbeit.

Herrn K.-P. Hollfeld danke ich für seine Geduld mir gegenüber bei Fragen über Elektronik und Softwareimplementierung.

Herrn Lang danke ich für das rasche Erstellen sämtlicher Platinen für dieses Projekt.

Für die harmonische Zusammenarbeit im IWW-3 bedanke ich mich stellvertretend bei Herrn Dr. J. Mergel und Herrn Dr. H. Dohle.