

**Untersuchungen zur
Grenzempfindlichkeit von
magneto-resistiven Sensorsystemen
mit Flußkonzentratoren**

Dissertation vorgelegt

von

Claudio Bettner

aus

Braunfels-Altenkirchen

**Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Angewandte Physik**

und

**Institut für Mikrostrukturtechnologie
und Optoelektronik e.V. in Wetzlar**

September 1999

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1. Materie im Magnetfeld	3
2.2. Geometrischer Entmagnetisierungsfaktor	5
2.3. Anisotroper magnetoresistiver Effekt (AMR-Effekt)	6
2.4. Anisotropien und Energieverhältnisse in dünnen weichmagnetischen ferromagnetischen Schichten	8
2.4.1. <i>Anisotropieerscheinungen</i>	8
2.4.2. <i>Energieverhältnisse in idealisierten dünnen magnetoresistiven Schichten</i>	9
2.5. Eigenschaften von dünnen MR-Schichten	14
2.5.1. <i>Wichtige Materialeigenschaften</i>	14
2.6. Domänenwände in dünnen Schichten	17
2.7. Zweistrommodell von Mott	19
2.8. Temperaturkompensation	20
2.9. Normierte Empfindlichkeit	21
2.10. Linearer Magnetfeldmeßbereich	28
2.11. Linearisierung der Kennlinie	29
2.12. Auflösungsgrenze und Rauschspannungsarten	31
2.12.1. <i>Theoretische Auflösungsgrenze</i>	34
3. ARBEITSPLATZ UND HERSTELLUNG DER SENSORSTRUKTUREN	36
3.1. Meßkammer und Spulensystem	36
3.2. Fehlerquellen bei der Messung	37
3.3. Fertigung eines Sensorchips	38
4. UNTERSUCHUNGEN ZUR SÄTTIGUNGSMAGNETISIERUNG UND ANISOTROPIEFELDSTÄRKE	40
4.1. Beschreibung und Layout der Teststruktur Femto7	40
4.2. Meßaufbau und Parameter	41
4.3. Ermittlung des Widerstandshubes	42
4.4. Bestimmung der Sättigungsmagnetisierung und der Anisotropiefeldstärke	45
4.5. Zusammenfassung der Meßergebnisse an der Teststruktur Femto7	48
5. MAGNETORESISTIVE DREISCHICHTSYSTEME MIT FLUßKONZENTRATOREN	49
5.1. Konzept eines Dreischichtsystems mit integrierter Antenne	53

5.2. Materialsuche für die Zwischenschicht	56
5.3. Layout des Sensors Femto5	60
5.4. Berechnungsmodell für Dreischichtsystem mit Flußkonzentrator	62
5.5. Zwischenschichtmaterial Platin	74
5.5.1. Rauschuntersuchungen an Femto5-Sensoren mit Zwischenschichtmaterial Platin	83
5.6. Zwischenschichtmaterial Tantal	89
5.6.1. Rauschmessungen an Sensoren mit Tantalzwischenschicht	96
5.7. Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit	97
5.8. Zusammenfassung der Meßergebnisse und Bemerkungen zum Konzept der Dreischichtsysteme	101
6. LANGER MAGNETORESISTIVER STREIFEN MIT BARBER POLE STRUKTUR UND FOLIENANTENNEN	104
6.1. Beschreibung und Besonderheiten des Sensors Femto6	104
6.2. Berechnungsmodell eines MR-Streifens mit Barber Polen im Spalt von zwei Folienantennen	105
6.3. Layout der Femto6-Sensoren	114
6.4. Untersuchungen an Femto6-Sensoren ohne Antennen	115
6.5. Messungen an Femto6-Sensorsystemen mit Folien-antennen	118
6.6. Rauschmessungen und Magnetfeldauflösung	124
6.7. Untersuchungen zur Langzeitstabilität	131
6.8. Zusammenfassung der Meßergebnisse an der Teststruktur Femto6	132
7. ZUSAMMENFASSUNG	134
8. LITERATURVERZEICHNIS 	138

1. Einleitung

Die Mikrosystemtechnik ist eines der am schnellsten wachsenden strategischen Felder zukunftsweisender Technologien, die zunehmend Einfluß auf die verschiedensten Lebensbereiche gewinnt. Insbesondere auf dem Gebiet der Magnetoelektronik ergeben sich überall dort, wo magnetische Informationen in elektrische Signale umgewandelt werden müssen, durch die Mikrosystemtechnik neue Anwendungsmöglichkeiten. Das bekannteste Einsatzgebiet von auf magnetischen Effekten beruhenden miniaturisierten Sensorsystemen stellen Leseköpfe von Festplatten dar. Weitere Anwendungsfelder sind beispielsweise die zerstörungsfreie Materialprüfung und die medizinische Diagnostik. Große Innovationsschritte verspricht man sich von neuartigen magnetischen Datenspeicherelementen (MRAM: magnetic random access memory), welche die hohen Zugriffsgeschwindigkeiten von Halbleiterspeichern mit den hohen Speicherdichten magnetischer Massenspeicher verbinden. Ebenso verheißen neue auf der Magnettechnologie basierende Elektronikkomponenten wie z. B. Spintransistoren ein hohes Miniaturisierungspotential. Ein Teil der Sensorsysteme nutzt den anisotropen magnetoresistiven Effekt (AMR-Effekt). Dieser bereits 1857 von Lord Kelvin beschriebene Effekt [1] zeigt sich in Änderungen des elektrischen Widerstandes einiger ferromagnetischer Materialien in Abhängigkeit vom Winkel zwischen der Stromrichtung und der Richtung der Magnetisierung im Inneren. Eine technische Anwendung des AMR-Effektes war erst in den 70er Jahren durch Fortschritte in der Dünnschichttechnologie und der Verfügbarkeit von mikroelektronischen Systemen möglich. Als Anfang der 90er Jahre erstmals AMR-Sensoren in Leseköpfen von Festplatten eingesetzt wurden, kam es zu einer Verdopplung der Geschwindigkeit bei der Erhöhung der Speicherdichten auf ungefähr 60 % pro Jahr [2]. Hierbei besitzen die AMR-Leseköpfe ein wesentlich höheres Miniaturisierungspotential als herkömmliche induktive Leseköpfe. AMR-Sensoren ermöglichen einen geringen Energieverbrauch und aufgrund ihrer geringen Größe eine hohe Ortsauflösung. Der Verstoß in kommerzielle Einsatzgebiete gestaltet sich für AMR-Sensorsysteme jedoch als sehr schwierig, da sie in weiten Teilen eine substituierende Technologie darstellen. So sind trotz der Vorteile wie Unempfindlichkeit gegen Nässe, Korrosions- und Ölbeständigkeit bei entsprechender Kapselung [3], hohe Betriebstemperaturen, Möglichkeit der berührungslosen Messung und gute Langzeitstabilität der magnetischen Eigenschaften bisher nur wenige Anwendungen bekannt. Zu den Anwendungen zählen die Magnetfeldmessung, die potentialfreie Strommessung, die Drehwinkel- und Positionserfassung sowie zunehmend die Längenmessung [4]. Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung von neuen Sensorsystemen für die Messung kleiner Magnetfelder ist neben einem möglichst großen Sensorsignal pro Magnetfeldänderung (hohe Empfindlichkeit) eine hohe Auflösung, die durch das Rauschen des Sensorsystems

begrenzt wird. Für eine Anwendung in der zerstörungsfreien Materialprüfung und in der medizinischen Diagnostik reichen die Parameter der bekannten AMR-Sensorsysteme bisher nicht an die Eigenschaften von beispielsweise HT-SQUIDs heran, mit denen Auflösungen im Femtotesla-Bereich möglich sind [5], [6], [78]. Allerdings ist auf die für die Funktion erforderliche niedrigere Betriebstemperatur hinzuweisen. Ein Teilziel des vom BMBF geförderten Projektes (16 SV 124) FEMTO (Feldsensystem extremer Auflösung auf magnetoresistiver Basis bei Normaltemperaturen) war die Weiterentwicklung von AMR-Sensorsystemen in bezug auf eine Empfindlichkeitssteigerung und ein hohes Auflösungsvermögen bei Normaltemperaturen. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, diese Ziele durch neue geometrische Strukturen und durch den Einsatz einer Kombination aus flußverstärkenden Dünnschicht- und Folienantennen zu erreichen. Im Verlaufe des Projektes sind neue Aufbauprinzipien von Sensorsystemen untersucht worden. Hierbei sind Optimierungen in der geometrischen Struktur sowie die Integration verschiedener Arten von Flußkonzentratoren erprobt worden. Der Einsatz von Flußkonzentratoren war notwendig, um das effektive Sensorvolumen zu vergrößern, wodurch das Erreichen einer Magnetfeldauflösung im Femtotesla-Bereich möglich erschien [7], [8], [9]. Die mit den Sensorsystemen erzielbaren Auflösungen sollten nach den Zielvorgaben des FEMTO-Projektes den Einsatz in der Magnetokardiographie ermöglichen, wozu mindestens eine Auflösung von $120 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei einer typischen Bandbreite von 1 Hz bis 100 Hz benötigt wird [10]. Zu Beginn dieser am IMO (Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik) in Wetzlar in Verbindung mit dem Institut für Angewandte Physik in Gießen im Rahmen des FEMTO-Projektes durchgeführten Arbeit konnte bei einem AMR-Sensorsystem aus gesputterten Permalloy-Schichten eine Auflösung von $0,7 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei Frequenzen um 1 MHz durch den Einsatz von Flußkonzentratoren in Form von Dünnschichtantennen erreicht werden [11]. Aufgrund eines zu kleineren Frequenzen hin stark ansteigenden Rauschniveaus des Sensorsystems lag die Auflösung bei 1 Hz lediglich bei $22 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Zudem führte der Einsatz von flußverstärkenden Antennen zur Ausbildung eines hysteresebehafteten Ausgangssignals, wodurch der mögliche Einsatz in einem Meßsystem eingeschränkt wurde.

2. Physikalische Grundlagen

Ferromagnetische Materialien sind gekennzeichnet durch spontane Magnetisierung ihrer Elementarbereiche (Weißsche Bezirke), das damit verbundene Hystereseverhalten in äußeren Magnetfeldern und hohe Permeabilitätszahlen. Die bekanntesten ferromagnetischen Werkstoffe sind die Übergangsmetalle Fe, Co, Ni sowie deren Legierungen. Die grundlegende theoretische Beschreibung dieser speziellen Form des kollektiven Magnetismus erfolgt mittels der quantenmechanischen Austauschwechselwirkung, welche die magnetischen Phänomene auf die parallele Ausrichtung unkompensierter Elektronenspinmomente zurückführt. Die Elementarmomente ferromagnetischer Stoffe besitzen entgegen der Temperaturbewegung der Atome die Tendenz, sich parallel zu ihren Nachbarn einzustellen. Die Ausbildung von in gleicher Richtung magnetisierten Bereichen verschwindet ab einer bestimmten Temperatur (Curie-Temperatur). Oberhalb dieser vom Material abhängigen Temperatur, die beispielsweise für Eisen bei ungefähr 1000 K liegt, verhalten sich ferromagnetische Stoffe paramagnetisch.

2.1. Materie im Magnetfeld

Einige ferromagnetische Eigenschaften können unter der vereinfachenden Annahme verstanden werden, daß jedem dieser spontan bis zur vollständigen Sättigung magnetisierten makroskopischen Bereiche ein magnetisches Dipolmoment zugeordnet wird. Die Richtungen der magnetischen Dipolmomente sind aus energetischen Gründen so verteilt, daß nach außen kein resultierendes Magnetfeld in Erscheinung tritt, solange das Ferromagnetikum keinem äußeren Magnetfeld ausgesetzt wird. Die Summe aller magnetischen Momente pro Volumeneinheit definiert die Magnetisierung \vec{M}_s des Materials [12]:

$$\vec{M}_s = \frac{1}{V} \cdot \sum_{i=1}^n \vec{p}_i \quad (1)$$

- \vec{M}_s : Sättigungsmagnetisierung
 \vec{p} : magnetisches Dipolmoment
V : Volumen.

Setzt man einen ferromagnetischen Körper einem äußeren Magnetfeld aus, wird die im Inneren permanent vorhandene Magnetisierung ausgerichtet. Um anzugeben, wie die Magnetisierung von einem äußeren Magnetfeld abhängt, bedarf es einiger Vor-

überlegungen. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen der Magnetisierung und einer hypothetischen Magnetfeldstärke \vec{H}_i im Inneren [13]:

$$\vec{M}_s = \chi \cdot \vec{H}_i \quad (2)$$

χ : magnetische Suszeptibilität
 \vec{H}_i : Magnetfeldstärke im Inneren.

Das von außen angelegte Magnetfeld unterscheidet sich von dem im Inneren vorhandenen Magnetfeld. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\vec{H}_i = \vec{H}_a + \vec{H}_d \quad (3)$$

\vec{H}_a : Magnetfeldstärke des von außen angelegten Feldes
 \vec{H}_d : Entmagnetisierungsfeldstärke.

Ein ferromagnetischer Körper baut in einem äußeren Magnetfeld ein Entmagnetisierungsfeld auf, das diesem entgegen gerichtet ist. Dessen Feldstärke läßt sich angeben mit:

$$\vec{H}_d = -N \cdot \vec{M}_s \quad (4)$$

N : Entmagnetisierungsfaktor.

Hierbei stellt der Entmagnetisierungsfaktor N ein Maß für die Abschwächung des äußeren Magnetfeldes dar. Aus (2), (3) und (4) ergibt sich der gesuchte Zusammenhang zwischen der Magnetisierung und dem von außen angelegten Feld:

$$\vec{M}_s = \frac{\chi}{1 + \chi \cdot N} \cdot \vec{H}_a \quad (5)$$

Die magnetische Suszeptibilität χ kann durch die relative Permeabilität μ_r in folgender Weise ausgedrückt werden:

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (6)$$

Damit ergibt sich zusammen mit Gleichung (5):

$$\vec{M}_s = \frac{1}{N + \frac{1}{\mu_r - 1}} \cdot \vec{H}_a. \quad (7)$$

Weiterhin ist zu beachten, daß der Zusammenhang zwischen magnetischer Induktion und Feldstärke bei ferromagnetischen Materialien nicht linear ist und sowohl die magnetische Suszeptibilität als auch die relative Permeabilität im allgemeinen ein Tensor 2. Stufe ist.

2.2. Geometrischer Entmagnetisierungsfaktor

Ein Vergleich von Meßergebnissen mit theoretischen Zusammenhängen ist nur unter der Voraussetzung möglich, daß die abgeleiteten magnetischen Eigenschaften unabhängig von der geometrischen Form der Probe formulierbar sind. Da die magnetischen Verhältnisse im Inneren einer Probe, die sich in einem äußeren Magnetfeld befindet, der direkten Messung nicht zugänglich sind, bedient man sich der Vorstellung eines Entmagnetisierungsfeldes, dem gemäß Gleichung (4) ein Entmagnetisierungsfaktor zugeordnet wird, mit dessen Hilfe auf die Zustände im Inneren geschlossen werden kann. Die Kenntnis des von der geometrischen Form des Meßkörpers abhängigen Entmagnetisierungsfaktors ist demzufolge für die Beschreibung und das Verständnis der magnetischen Eigenschaften notwendig. Mit der Gleichung (3) wird eine homogene Magnetfeldstärke im Inneren einer Probe beschrieben, die sich durch die Anwesenheit eines homogenen äußeren Magnetfeldes ergibt. Die Forderung nach einem homogenen Magnetfeld im Inneren ist exakt nur bei einem Rotationsellipsoid erfüllbar. Man kann den Feldverlauf im Inneren einer ellipsoidförmigen Probe beispielsweise mittels Finite Elemente Methode (FEM) berechnen:

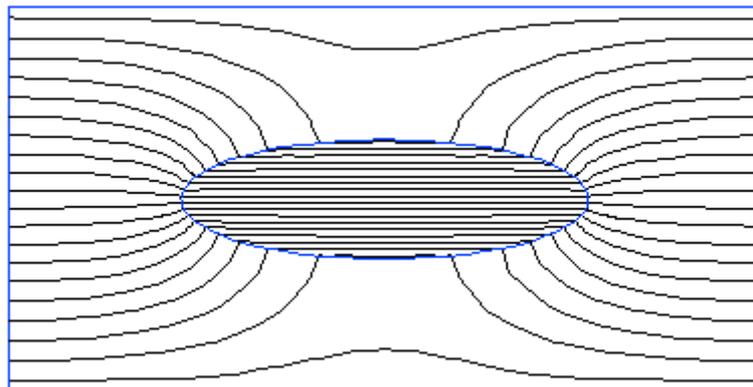


Abbildung 1: Feldlinienverlauf bei einer ellipsoidförmigen Probe.

Für jede Raumrichtung des Rotationsellipsoids mit den Halbachsen a , b und c lassen sich die Entmagnetisierungsfaktoren N_x , N_y und N_z angeben [14], wobei stets die folgende Bedingung erfüllt ist [15], [16]:

$$1 = N_x + N_y + N_z. \quad (8)$$

Aus Symmetriegründen ergibt sich beispielsweise bei einer kugelförmigen Gestalt der Probe für alle drei Raumrichtungen ein Entmagnetisierungsfaktor von $1/3$. Für eine dünne kreisförmige sich in der x - y -Ebene befindende ferromagnetische Schicht ist der Entmagnetisierungsfaktor in z -Richtung annähernd 1, wodurch ausgedrückt wird, daß die möglichen Magnetisierungsrichtungen auf die Schichtebenen beschränkt sind. Die Entmagnetisierungsfaktoren in der Schichtebene, für die $N_x = N_y$ gilt, können durch eine oblates flaches Ellipsoid, für das die Bedingungen $a = b$ und $a \gg c$ gelten, approximiert werden [17]. Eine Übersicht der Entmagnetisierungsfaktoren von ellipsoidförmigen Körpern, die sich in ihren Geometrieverhältnissen unterscheiden, ist z. B. in [18] zu finden. Schwieriger gestaltet sich die Berechnung von Entmagnetisierungsfaktoren beliebiger Körperformen, die zu analytisch unlösbaren Randwertproblemen führt [19]. Hierbei wird das Entmagnetisierungsfeld durch verallgemeinerte Entmagnetisierungsfaktoren $N_{x,y}$ beschrieben, wobei x die Komponente des magnetischen Feldes und y die Komponente der Magnetisierung darstellt. Der bisher skalare Entmagnetisierungsfaktor wird zu einem ortsabhängigen Tensor 2. Stufe.

2.3. Anisotroper magneto-resistiver Effekt (AMR-Effekt)

Mit dem anisotropen magneto-resistiven Effekt, im folgenden MR-Effekt genannt, beschreibt man die Änderung des elektrischen Widerstandes in ferromagnetischen Übergangsmetallen und deren Legierungen infolge eines äußeren magnetischen Feldes. Die Entdeckung des Effektes geht auf William Thomson (Lord Kelvin) zurück, der das Phänomen in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1857 wie folgt beschrieb [1]:

„I found that iron, when subjected to magnetic force, acquires an increase of resistance to the conduction of electricity along, and a diminution to the conductance of electricity across the lines of magnetization“.

Man bezeichnet den spezifischen elektrischen Widerstand eines stromdurchflossenen magnetisierten Körpers, bei dem die Richtung der Magnetisierung im Inneren der Probe infolge eines äußeren Magnetfeldes mit der Stromrichtung übereinstimmt, als longitudinalen spezifischen Magnetowiderstand ρ_{\parallel} . Bildet die Stromrichtung einen rechten Winkel mit der Magnetisierung, spricht man vom transversalen spezifischen Magnetowiderstand ρ_{\perp} [20]. Bei den meisten ferromagnetischen Materialien ist eine

Zunahme des elektrischen Widerstandes mit kleiner werdendem Winkel zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung zu beobachten [21]. Der anisotrope spezifische Magnetowiderstand ist nach [20] folgendermaßen definiert:

$$\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}. \quad (9)$$

Als anisotropes spezifisches Magnetowiderstandsverhältnis (MR-Effekt) bezeichnet man die normalisierte Größe:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{av}} = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_{\parallel} + \frac{2}{3}\rho_{\perp}}. \quad (10)$$

Der durchschnittliche spezifische Widerstand ρ_{av} entspricht in etwa dem spezifischen Widerstand des unmagnetisierten Materials ρ_0 , der aber bei den zu untersuchenden Proben nicht meßbar war, da während der Herstellung eine Magnetisierung eingeprägt wurde. Die Messung des maximalen und minimalen Widerstandes einer Probe in einem variierenden äußeren Magnetfeld ermöglicht die Bestimmung des in Gleichung (10) definierten MR-Effektes, der im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Widerstandshub bzw. Hub bezeichnet wird.

Der spezifische elektrische Widerstand einer magneto-resistiven Probe hängt von dem Winkel zwischen der Strom- und der Magnetisierungsrichtung im Inneren ab. Die Winkelabhängigkeit wird durch die Voigt-Thomson-Gleichung [22] beschrieben, die sowohl für massive polykristalline Proben, als auch für dünne magneto-resistive Schichten anwendbar ist:

$$\rho(\xi) = \rho_{\perp} + \Delta\rho \cdot \cos^2 \xi \quad (11)$$

ξ : Winkel zwischen der Magnetisierungs- und Stromrichtung.

In der folgenden Abbildung ist der mit Gleichung (11) berechnete Verlauf des Widerstandes als Funktion des Winkels zu sehen:

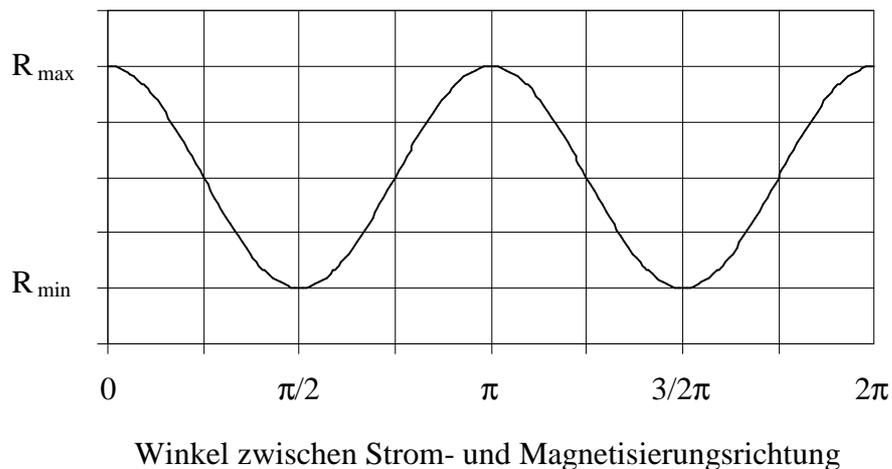


Abbildung 2: Widerstandsverlauf als Funktion des Winkels zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung.

2.4. Anisotropien und Energieverhältnisse in dünnen weichmagnetischen ferromagnetischen Schichten

Man spricht von einer dünnen ferromagnetischen Schicht, wenn die Schichtdicke klein gegenüber der Ausdehnung von magnetischen Domänen ist. Als obere Grenze der Schichtdicke finden sich Angaben, die zwischen 500 nm und 1000 nm liegen [23]. Der Entmagnetisierungsfaktor senkrecht zur Schicht ist bei einer dünnen Schicht nahezu 1, wodurch die möglichen Magnetisierungsrichtungen auf die Schichtebene beschränkt sind.

2.4.1. Anisotropieerscheinungen

Das magnetische Verhalten einer weichmagnetischen dünnen Schicht wird durch verschiedene Anisotropieerscheinungen beeinflusst. Ähnlich wie bei massivem Material existiert bei dünnen Schichten eine Kristallanisotropie (auch Magnetisierungsanisotropie genannt). Für die Magnetisierung in der Schicht gibt es eine ausgezeichnete Orientierungsachse, in deren Richtung die Energie einen minimalen Wert annimmt und in die sich die Magnetisierung bevorzugt einstellt. Diese Richtung wird als leichte Achse (easy axis) bezeichnet. Die Richtung in der Schicht, in der die Energie der Magnetisierung ihren größten Wert annimmt, wird als schwere Achse (hard axis) bezeichnet. Wird beim Aufbringen der Schicht ein ausreichend starkes Magnetfeld angelegt, kommt zu der Kristallanisotropie eine von der Orientierungsüberstruktur herrührende einachsige Anisotropie hinzu. Die einachsige Anisotropie kann auch nachträglich durch einen Tempervorgang mit angelegtem Magnetfeld bei einer ohne

Magnetfeld aufgebrachten Schicht erzeugt werden [24]. Dieser die Ausbildung einer leichten Achse unterstützende Effekt ist vor allem bei Legierungen zu beobachten [25]. Bei dünnen Schichten hat die geometrische Form einen entscheidenden Einfluß auf die Orientierung der Magnetisierung im Inneren. Zum einen zwingt ein nahe bei 1 liegender Entmagnetisierungsfaktor senkrecht zur Schichtebene die Magnetisierung in die Schichtebene und zum anderen können unterschiedliche Entmagnetisierungsfaktoren aufgrund von Asymmetrien in den Abmessungen der Probe zu verschiedenen starken Entmagnetisierungsfeldern in der betrachteten Richtung führen. Beispielsweise besitzt ein in x-Richtung langer sehr dünner Streifen in Richtung seiner Längsachse einen Entmagnetisierungsfaktor, der nahe bei 0 liegt. Da die Enden des Streifens in x-Richtung sehr weit voneinander entfernt sind, wird das Entmagnetisierungsfeld in dieser Richtung vernachlässigbar klein sein, was zu einer bevorzugten Orientierung der Magnetisierung in Streifenlängsrichtung führt. Durch schräges Aufdampfen einer magnetoresistiven Schicht kann ebenfalls eine einachsige magnetische Anisotropie entstehen [25], [26], deren Vorzugsrichtung sich parallel zur Schicht- und senkrecht zur Einfallsebene des Aufdampfstrahls einstellt. Weiterhin kann durch Magnetostraktion eine Spannungsanisotropie hervorgerufen werden. Die Ursache kann sowohl in der Materialzusammensetzung, als auch in auftretenden Eigenspannungen der Schicht aufgrund eines unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens von Substrat und Schicht liegen.

2.4.2. Energieverhältnisse in idealisierten dünnen magnetoresistiven Schichten

Um das Verhalten einer dünnen magnetoresistiven Schicht in einem äußeren Magnetfeld beschreiben zu können, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Ausgangspunkt ist eine homogen spontan magnetisierte eindomänige dünne Schicht in der x-y-Ebene, die einen ellipsoidförmigen Bereich einnimmt. Es soll die kohärente Rotation der Magnetisierung im Inneren aufgrund eines äußeren Magnetfeldes beschrieben werden, wobei das äußere Magnetfeld nur die Richtung der Magnetisierung in der Schichtebene beeinflussen kann. Die Probe soll über eine induzierte einachsige Anisotropie in x-Richtung verfügen. Damit stimmt die leichte Richtung mit der x-Achse überein. Die Schicht soll dünn genug sein, daß der Entmagnetisierungsfaktor senkrecht zur Schichtebene annähernd 1 ist, wodurch Entmagnetisierungsfelder nur in der Schichtebene entstehen können. Die Geometrie einer dünnen Schicht mit diesen Eigenschaften ist in der folgenden Abbildung skizziert:

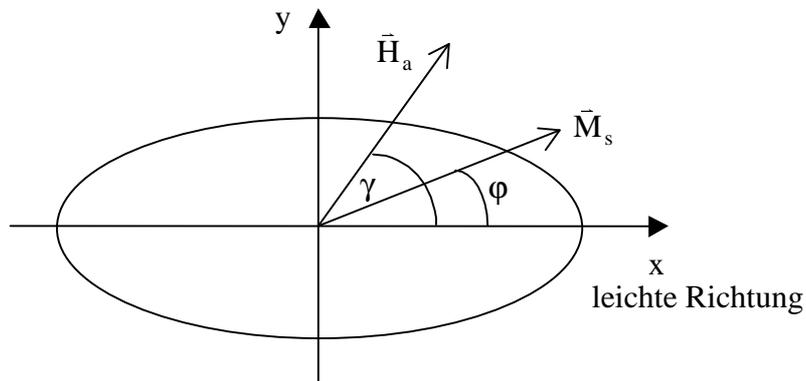


Abbildung 3: Geometrie einer homogen magnetisierten ellipsoidförmigen dünnen Schicht in einem äußeren Magnetfeld.

Der Winkel zwischen leichter Richtung und der Magnetisierung ist mit φ bezeichnet. Der Vektor des äußeren Magnetfeldes bildet mit der x-Achse den Winkel γ . Es werden neben der Energiedichte infolge eines äußeren Magnetfeldes, die Anisotropieenergiedichte und die sich aufgrund der Geometrie ergebende Entmagnetisierungsenergiedichte herangezogen. Nicht berücksichtigt werden zusätzliche Anisotropien sowie Beiträge der quantenmechanischen Austauschwechselwirkung. Für das äußere Magnetfeld läßt sich die Energiedichte wie folgt angeben:

$$u_a = -\vec{H}_a \cdot \vec{M}_s \quad (12)$$

- u_a : Energiedichte infolge eines äußeren Magnetfeldes
- \vec{H}_a : äußeres Magnetfeld
- \vec{M}_s : Magnetisierung im Inneren.

Der Winkel zwischen der Richtung des äußeren Magnetfeldes und der Magnetisierung ergibt sich aus Abbildung 3.

Für die Anisotropieenergiedichte, die aufgrund der Forderung nach einer induzierten uniaxialen Anisotropie, wie sie z. B. durch das Anlegen eines Magnetfeldes während der Herstellung der Schicht entsteht, berücksichtigt wird, gilt:

$$u_k = K \cdot \sin^2 \varphi \quad (13)$$

- u_k : Energiedichte infolge einer Anisotropie
- K : Anisotropiekonstante.

Bei der hier berücksichtigten uniaxialen Anisotropie gilt für die Anisotropiekonstante K aus Gleichung (13):

$$K = \frac{1}{2} \cdot \bar{H}_k \cdot \bar{M}_s \quad (14)$$

\bar{H}_k : äquivalente Anisotropiefeldstärke.

Für die Energiedichte, die sich aufgrund der geometrischen Form des magnetoresistiven Körpers ergibt, läßt sich folgender Zusammenhang angeben:

$$u_d = -\frac{1}{2} \cdot \bar{H}_d \cdot \bar{M}_s \quad (15)$$

u_d : Energiedichte infolge der Eigenentmagnetisierung

\bar{H}_d : Entmagnetisierungsfeldstärke.

Nach Gleichung (4) berechnen sich die beiden Komponenten der Entmagnetisierungsfeldstärke folgendermaßen:

$$H_{d,x} = -N_x \cdot M_{s,x}, \quad (16)$$

$$H_{d,y} = -N_y \cdot M_{s,y}. \quad (17)$$

Für die beiden Entmagnetisierungsfaktoren in der Schichtebene in Gleichung (16) und (17) gilt die Bedingung aus Gleichung (8). Definiert man einen Entmagnetisierungsfaktor $N = N_x - N_y$, ergibt sich für die Energiedichte infolge der Eigenentmagnetisierung folgender Zusammenhang:

$$u_d = -\frac{1}{2} \cdot N \cdot M_s^2 \cdot \sin^2 \varphi + \frac{1}{2} \cdot N_x \cdot M_s^2. \quad (18)$$

Die gesamte freie Energiedichte u_{ges} ergibt sich aus der Summe der einzelnen Energiedichten:

$$u_{ges} = u_a + u_k + u_d, \quad (19)$$

$$u_{\text{ges}} = -H_a \cdot M_s \cdot \cos(\gamma - \varphi) + \frac{1}{2} \cdot N_x \cdot M_s^2 + \frac{1}{2} \cdot H_k \cdot M_s \cdot \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \cdot N \cdot M_s^2 \cdot \sin^2 \varphi. \quad (20)$$

Das Entmagnetisierungsfeld H_d und das Anisotropiefeld H_k kann zu einem charakteristischen Magnetfeld zusammengefaßt werden:

$$H_0 = H_k + H_d. \quad (21)$$

Damit ergibt sich für Gleichung (20) der gesuchte Ausdruck für die gesamte freie Energiedichte:

$$u_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot H_0 \cdot M_s \cdot \sin^2 \varphi - H_a \cdot M_s \cdot \cos(\gamma - \varphi) + \frac{1}{2} \cdot N_x \cdot M_s^2. \quad (22)$$

Die Magnetisierungsrichtung in der Probe wird sich in einem Winkel φ einstellen, bei dem die Energiedichte ihren minimalen Wert annimmt. Gesucht wird demzufolge der Extremwert der Gleichung (22), der sich bei verschwindender Ableitung nach dem Winkel φ ergibt:

$$\sin \varphi = \frac{H_a \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi}{H_0 \cdot \cos \varphi + H_a \cdot \cos \gamma}. \quad (23)$$

Unter der Berücksichtigung der Geometrie in Abbildung 3 folgt die implizite Gleichung, die den Zusammenhang zwischen einem äußeren Magnetfeld und dem Winkel, den die Magnetisierung im Inneren der Probe annimmt, beschreibt:

$$\sin \varphi = \frac{H_{a,y}}{H_0 + \frac{H_{a,x}}{\cos \varphi}} \quad (24)$$

$H_{a,y}$: y-Komponente des äußeren Magnetfeldes (im weiteren Verlauf H_y genannt)

$H_{a,x}$: x-Komponente des äußeren Magnetfeldes (im weiteren Verlauf H_x genannt).

Für den Fall, daß das äußere Magnetfeld nur eine Komponente in y-Richtung hat ($H_x = 0$), wird die Magnetisierung sich vollständig in die schwere Richtung einstellen, sofern die Feldstärke größer als das charakteristische Feld H_0 ist. Andernfalls wird gemäß Gleichung (24) ein kleinerer Winkel erreicht. Für kleine Feldstärken H_x des äußeren Magnetfeldes, kann der Faktor $1/\cos \varphi$ durch 1 angenähert werden, sofern

$|\varphi| < 30^\circ$ erfüllt ist. In diesem Fall addiert sich die x-Komponente des äußeren Magnetfeldes dem charakteristischen Feld hinzu. Ist die x-Komponente des äußeren Magnetfeldes hingegen sehr viel größer als das charakteristische Feld, wird sich die Magnetisierung in die leichte Richtung einstellen.

Um festzustellen, ob es sich bei den aus Gleichung (22) abgeleiteten Extremwerten um echte Minimumstellen handelt, zieht man die 2. Ableitung heran [27], [28], [29]. Das Ergebnis ist die Stoner-Wohlfarth-Asteroiden-Gleichung:

$$H_0^{2/3} = |H_x|^{2/3} + |H_y|^{2/3}. \quad (25)$$

Die graphische Darstellung von Gleichung (25) ist in der folgenden Abbildung zu sehen, mit deren Hilfe bei gegebenem äußeren Magnetfeld die Lage der Magnetisierung abgelesen werden kann:

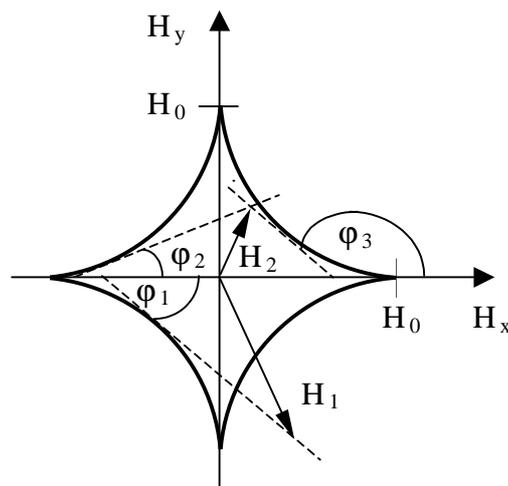


Abbildung 4: Stoner-Wohlfarth-Asteroide mit zwei verschieden großen äußeren Magnetfeldern inklusive der Magnetisierungsrichtungen.

Die Asteroide wird in ihren vier Enden von der charakteristischen Feldstärke H_0 begrenzt. Die Richtung der Magnetisierung (in Abbildung 4 gestrichelt eingezeichnet) erhält man, wenn ausgehend von der Spitze des jeweiligen Magnetfeldvektors des äußeren Feldes eine Tangente an die Asteroide gelegt wird. Bei der Bestimmung der Lage der Magnetisierung sind in Abhängigkeit von der Größe des äußeren Magnetfeldes zwei Fälle voneinander zu unterscheiden. Liegt die Spitze des Magnetfeldvektors außerhalb der Asteroide, ergibt sich eine eindeutige Lage der Magnetisierung (φ_1). Bei kleineren Feldstärken, bei denen der Magnetfeldvektor innerhalb der Asteroide liegt, sind zwei Richtungen der Magnetisierung mit unterschiedlichem Vorzeichen möglich (φ_2 und φ_3). Welche der beiden möglichen Lagen von der Magnetisierung

eingenommen wird, hängt von der magnetischen Vorgeschichte der Probe vor Anlegen des äußeren Magnetfeldes ab.

Weicht hingegen die Richtung der leichten Achse, die nach Abbildung 3 mit der x-Richtung übereinstimmt, von der Hauptachse der betrachteten ellipsoidförmigen Probe ab, ermöglicht die Einführung von transformierten Koordinaten ebenfalls eine Vorhersage über die Magnetisierungszustände als Funktion eines äußeren Magnetfeldes [30].

2.5. Eigenschaften von dünnen MR-Schichten

Die magnetischen Eigenschaften von dünnen MR-Schichten hängen von den Herstellungsbedingungen, der Materialauswahl und von der Geometrie ab. Mit Hilfe der im Kapitel 2.4.2 vorgestellten Stoner-Wohlfarth-Asteroide lassen sich durch die Tangentenkonstruktion die Magnetisierungskurven in Abhängigkeit von äußeren Magnetfeldern bestimmen. Der Magnetisierungsverlauf in leichter Richtung hat eine rechteckförmige Gestalt [31], da die Magnetisierung nur zwei stabile Werte annehmen kann ($\pm M_s$). Die theoretisch abgeleiteten Feldstärken des äußeren Magnetfeldes, die zu einer sprunghaften Richtungsänderung führen, haben die Größe des charakteristischen Feldes H_0 . Die Messung des Magnetisierungsverlaufes in leichter Richtung an realen Proben zeigt, daß die rechteckförmige Gestalt in eine hystereseförmige Form übergeht und die benötigten Umschaltfeldstärken geringer sind. Diese Umschaltfeldstärke wird Koerzitivfeldstärke H_c genannt. In Abhängigkeit von der Größe der Koerzitivfeldstärke unterscheidet man weich- und hartmagnetische Materialien. Bei hartmagnetischen Proben sollte der Wert der Koerzitivfeldstärke möglichst groß sein und umgekehrt. In leichter Richtung betrachtet sind MR-Schichten hartmagnetische Materialien. Ein Ziel bei der Herstellung der Schichten ist, daß sie eine möglichst kleine Koerzitivfeldstärke aufweisen. Der Magnetisierungsverlauf in schwerer Richtung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetisierung bis zum Erreichen des Wertes der charakteristischen Feldstärke je nach Richtung des äußeren Magnetfeldes bis zu ihrem Maximalwert (M_s) linear ansteigt bzw. absinkt. Eine weitere Erhöhung oder Verkleinerung der äußeren Feldstärke über H_0 hinaus führt nicht mehr zu einer Änderung des Magnetisierungszustandes in der Schicht. In schwerer Richtung betrachtet sind MR-Schichten weichmagnetische Materialien. Typische Magnetisierungskurven finden sich beispielsweise in [32].

2.5.1. Wichtige Materialeigenschaften

Damit bei dünnen Schichten aus magnetoresistivem Material sichergestellt ist, daß sie die gleiche Sättigungsmagnetisierung aufweisen wie das Vollmaterial, muß eine

Mindestdicke des Materials vorhanden sein. Der Zusammenhang zwischen der Sättigungsmagnetisierung und der Schichtdicke ist in der folgenden Abbildung dargestellt [33]:

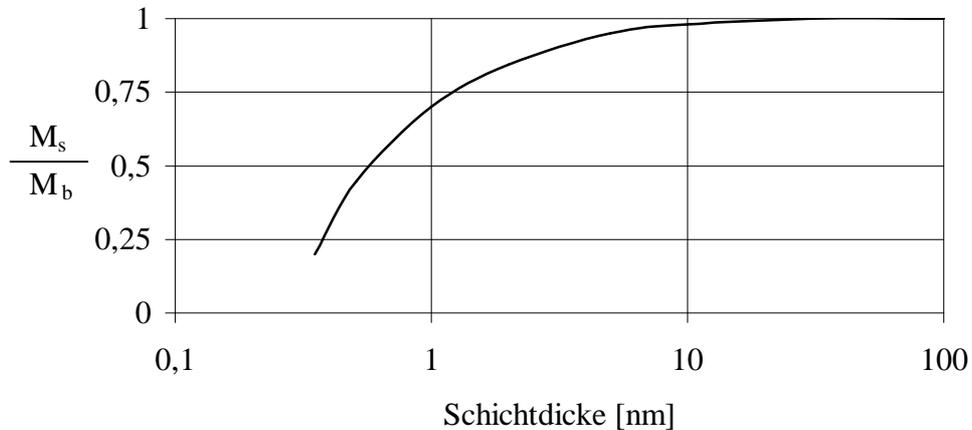


Abbildung 5: Auf die Sättigungsmagnetisierung M_b des Vollmaterials normierte Sättigungsmagnetisierung als Funktion der Schichtdicke.

In Abbildung 5 ist die Sättigungsmagnetisierung des Vollmaterials mit M_b bezeichnet. Es ist zu erkennen, daß bei Schichtdicken ab ungefähr 20 nm die Sättigungsmagnetisierung des Vollmaterials erreicht wird.

Der elektrische Widerstand einer magnetoresistiven Schicht ist ebenfalls von der Schichtdicke abhängig. Dieser Effekt hängt mit einer zusätzlichen diffusen Oberflächenstreuung der Leitungselektronen zusammen und ist bei Schichten zu berücksichtigen, deren Dicke sich in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge λ der Leitungselektronen bewegt. Die Oberfläche der Schicht stellt für die freien Elektronen ein zusätzliches Hindernis in ihrer Bewegung dar, wodurch deren mittlere freie Weglänge reduziert wird und demzufolge die Leitfähigkeit des Materials abnimmt. Für Schichtdicken, bei denen $\lambda < t$ erfüllt ist, gilt die Fuchs-Sondheimer-Näherungsgleichung [34], [35]:

$$\rho(t) \approx \rho_b \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot \lambda}{8 \cdot t}\right] \quad (26)$$

$\rho(t)$: dickenabhängiger spezifischer Widerstand

ρ_b : spezifischer Widerstand des Vollmaterials

λ : mittlere freie Weglänge der Leitungselektronen

t : Schichtdicke.

Falls die Schichtdicke wesentlich kleiner als die mittlere freie Weglänge der Leitungselektronen ist ($\lambda \ll t$), gilt in guter Näherung [36]:

$$\rho(t) \approx \rho_b \cdot \frac{4 \cdot \lambda}{3 \cdot [\ln(\frac{\lambda}{t}) + 0,423]} \quad (27)$$

Die mittlere freie Weglänge der Leitungselektronen von Permalloy beträgt ungefähr 30 nm. Meßergebnisse von Untersuchungen zur Schichtdickenabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Permalloy sind beispielsweise in [37] und [38] zu finden. Unabhängig von der Schichtdicke ist die erzielbare Widerstandsänderung in einem äußeren Magnetfeld, was dazu führt, daß mit abnehmender Schichtdicke der Widerstandshub nach Gleichung (10) ansteigt [39].

Entscheidend für die magnetischen Eigenschaften einer dünnen Schicht ist insbesondere die Materialzusammensetzung der verwendeten Legierung. In der folgenden Abbildung ist der Widerstandshub von NiFe und NiCo in Abhängigkeit vom Nickelgehalt in % dargestellt [36]:

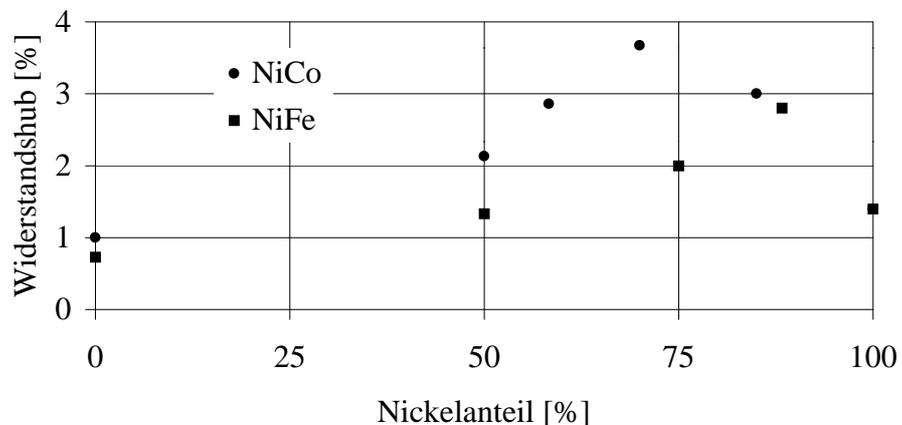


Abbildung 6: Widerstandshub von 30 nm dicken Schichten aus NiFe- und NiCo-Legierungen als Funktion des Nickelgehalts.

Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, besitzen NiCo-Legierungen mit einem Nickelanteil von 70 % einen Widerstandshub von ungefähr 3,7 %. Der Höchstwert für NiFe-Legierungen liegt bei etwa 2,8 % bei einem Nickelanteil von 85 %. Neben einem großen Widerstandshub sollten Legierungen möglichst keine Eigenspannungen, die sich durch Magnetostriktion bemerkbar machen, haben. Als nahezu magnetostriktionsfrei haben sich NiCo 50/50- und NiFe 81/19-Legierungen erwiesen. Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, liegt der erzielbare Widerstandshub bei den oben genannten Legierungen bei etwa 2,2 %. Eine detaillierte Übersicht der Magnetostriktionseigenschaften von

verschiedenen Legierungen findet man z. B. in [40]. Durch die Variation der Zusammensetzung des verwendeten Materials lassen sich unter anderem die Werte der Sättigungsmagnetisierung, der Koerzitivfeldstärke, der Permeabilität und der Anisotropiefeldstärke verändern, wobei darauf hingewiesen werden muß, daß die Herstellungsbedingungen einen entscheidenden Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften haben, weshalb bei Messungen Abweichungen von den vorausgesagten Eigenschaften auftreten können. In der folgenden Tabelle sind einige Legierungen mit ihren magnetischen Kenngrößen aufgeführt [41]:

Material und Gewichtsanteile		ρ [$10^{-8} \Omega \cdot m$]	$\Delta\rho/\rho$ [%]	H_k [A/m]	H_c [A/m]	λ_m 10^{-6}	M_s [A/m]
NiFe	81/19	22	2,2	250	80	≈ 0	876
NiFe	86/14	15	3,0	200	100	-12	756
NiCo	50/50	24	2,2	2500	1000	≈ 0	995
NiCo	70/30	26	3,7	2500	1500	-20	796
NiFeCo	60/10/30	20	2,5	2000	250	-5	1035
CoFeB	72/8/20	86	0,07	2000	15	≈ 0	1035

Tabelle 1: Vergleich einiger Legierungseigenschaften von 100 nm dicken Proben bei Raumtemperatur (λ_m ist der Magnetostruktionskoeffizient).

Die Zusammenstellung der magnetischen Eigenschaften in Tabelle 1 läßt erkennen, daß NiFe 81/19 (Permalloy), trotz des moderaten Widerstandshubes aufgrund der niedrigen Anisotropie- und Koerzitivfeldstärke sowie der Magnetostruktionsfreiheit als Sensor-material besonders geeignet ist. Der dicken – und herstellungsabhängige Temperaturkoeffizient für Widerstandsänderungen liegt bei Legierungen vergleichbar mit dem von reinen Metallen zwischen 0,3 % / K und 0,4 % / K [42]. Eine Verkleinerung der Anisotropiefeldstärke kann beispielsweise durch einen auf die Legierung abgestimmten Tempervorgang erzielt werden [43]. In Mehrschichtsystemen, bei denen NiFe-Schichten durch nichtferromagnetische nm dicke Materialien getrennt sind, konnte eine Reduktion der Koerzitivfeldstärke nachgewiesen werden [44]. Obwohl bei magneto-resistiven Sensoren unter bestimmten Voraussetzungen eine chemische Alterung (z. B. durch Migration) einsetzen kann, ist die Langzeitstabilität selbst bei Umgebungstemperaturen über 200 °C besser als bei vergleichbaren Halbleitern [45].

2.6. Domänenwände in dünnen Schichten

In einer dünnen magneto-resistiven Schicht liegt die Magnetisierung in der Schichtebene, weil der Entmagnetisierungsfaktor senkrecht dazu annähernd 1 ist. In einer realen Schicht liegt meist keine Einbereichsstruktur der Magnetisierung vor,

sondern es existieren Elementarbereiche, deren Magnetisierungsrichtungen von der Richtung der Magnetisierung der übrigen Schicht abweichen. Aufgrund von Inhomogenitäten im Schichtaufbau und Magnetostriktion kann es zu lokalen Abweichungen von der mittleren Magnetisierungsrichtung kommen. Die Bereiche einer Schicht, die eine unterschiedliche Magnetisierungsrichtung aufweisen, werden Domänen genannt. Sie sind durch Wände voneinander getrennt, die hauptsächlich parallel zur leichten Achse verlaufen. In dünnen Schichten existieren am häufigsten 180° -Wände, die dadurch gekennzeichnet sind, daß die Magnetisierungen in den benachbarten Domänen in entgegengesetzte Richtungen zeigen. Die Magnetisierung in den Domänen wird sich in die Richtung einstellen, die energetisch am günstigsten ist. Bei dünnen Schichten befinden sich die Wände deshalb hauptsächlich parallel zu den Schichträndern. Man unterscheidet zwei Arten von Wänden. Beim Übergang der Domänen dreht sich bei Néel-Wänden [46] die Magnetisierung in der Schichtebene und bei Bloch-Wänden senkrecht dazu [21]. Die magnetostatische Energie einer Néel-Wand ist kleiner als die einer Bloch-Wand, sofern die Schichtdicke kleiner als die Dicke der betreffenden Wand ist [47]. Bei Schichtdicken unterhalb von 100 nm ist die Existenz von stabilen Bloch-Wänden deshalb eher unwahrscheinlich. Bei Schichtdicken unterhalb von 50 nm wurden neben Néel-Wänden sogenannte Stacheldraht-Wände (engl. cross-tie-walls) beobachtet [48]. Bei Stacheldraht-Wänden handelt es sich um Néel-Wände, die in regelmäßigen Abständen von Néel-Wandstücken durchkreuzt sind. Diese Querwandstücke erscheinen aufgrund von Streufeldern der alternierend polarisierten Néel-Wandabschnitte, die sich auf die Magnetisierung in der unmittelbaren Umgebung der Wand auswirken. Unterhalb einer Schichtdicke von etwa 20 nm kommen in magnetoresistiven Schichten ausschließlich Néel-Wände vor [49]. Infolge eines äußeren Magnetfeldes bewegen sich ab einer vom Wandtyp abhängigen Feldstärke die Wände innerhalb einer Schicht so, daß sich die Bereiche, deren Magnetisierungsrichtung mit der Richtung des äußeren Magnetfeldes übereinstimmt, vergrößern. Die Bewegung erfolgt nicht kontinuierlich, sondern vollzieht sich in Barkhausensprüngen. Ummagnetisierungsvorgänge vollziehen sich vorrangig durch allmähliches Vergrößern der magnetischen Bereiche, deren Magnetisierungsrichtung mit der Richtung eines äußeren Feldes übereinstimmt, wobei die Domänen ausgehend von Bereichskeimen, die sich vornehmlich an den Schichträndern und in den Ecken einer Probe befinden, wachsen. Typische Domänenmuster von Schichten unterschiedlicher Geometrie, deren sonstigen Schichtparameter mit den im Verlaufe dieser Arbeit untersuchten Proben weitgehend übereinstimmen, finden sich bei [50].

2.7. Zweistrommodell von Mott

Die Träger des elektrischen Stromes in 3d-Metallen und ihren Legierungen sind vor allem die s-Elektronen. Der elektrische Widerstand wird hauptsächlich durch die s-d-Streuung zwischen den 3d- und 4s-Elektronen beeinflusst [51], [52]. Bei den ferromagnetischen Übergangsmetallen sind die 3d-Bänder nicht vollständig aufgefüllt und man kann je nach Spinrichtung der Elektronen eine Unterteilung in ein $3d\uparrow$ - und ein $3d\downarrow$ -Band vornehmen, die sich in ihren Energieniveaus voneinander unterscheiden. Die Differenz der Elektronen in den beiden Bändern bestimmt das magnetische Moment der Materialien. In dem Erklärungsmodell für den anisotropen magnetoresistiven Effekt von Mott wird davon ausgegangen, daß die s-Elektronen mit $\text{Spin}\uparrow$ und $\text{Spin}\downarrow$ unabhängig voneinander zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Diese Annahme setzt voraus, daß unabhängig von der ursprünglichen Spinrichtung der Elektronen Streuprozesse, bei denen es zu einer Spinumkehr kommt, möglich sind. Im Vergleich zu den s-Elektronen besitzen die d-Elektronen aufgrund ihrer höheren effektiven Masse eine geringere Beweglichkeit und eine kürzere freie Weglänge. Ein nicht vollständig aufgefülltes 3d-Band liefert den größten Beitrag zum elektrischen Widerstand der Übergangsmetalle und ihrer Legierungen. Da in anisotropen magnetoresistiven Metallen Streuprozesse, bei denen es zu einer Spinumkehr kommt, als relativ unwahrscheinlich zu betrachten sind, stellt man sich in dem Modell von Mott zwei parallele Elektronenströme im Material vor, die sich in ihrer Spinrichtung bezüglich der Magnetisierungsrichtung voneinander unterscheiden:

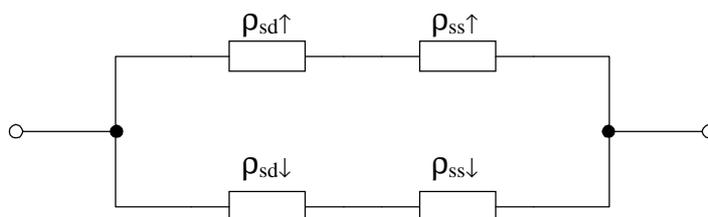


Abbildung 7: Widerstandsnetzwerk nach dem Zweistrommodell von Mott.

Das Widerstandsnetzwerk in Abbildung 7 setzt weiterhin voraus, daß sich die Wahrscheinlichkeiten für die sd- und die ss-Streuung addieren lassen. Für den elektrischen Widerstand ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{ss\uparrow} + \rho_{sd\uparrow}} + \frac{1}{\rho_{ss\downarrow} + \rho_{sd\downarrow}}. \quad (28)$$

O. B. d. A. wird angenommen, daß die Spinrichtung \uparrow der Elektronen mit der Richtung der Magnetisierung übereinstimmt. Unter Vernachlässigung der Spin-Bahn-Wechsel-

wirkung folgt aus quantenmechanischer Störungsrechnung 1. Ordnung, daß unbesetzte $3d\uparrow$ -Zustände existieren, die ungleichmäßig über die 5 möglichen d-Orbitale verteilt sind und daß ein Überschuß an Elektronen besteht, deren Spinrichtung parallel zur Magnetisierungsrichtung ist [53]. Daraus folgt, daß $4s\uparrow$ -Elektronen eine höhere Streuwahrscheinlichkeit in das $3d\uparrow$ -Band besitzen als $4s\downarrow$ -Elektronen. Stimmt die Stromrichtung mit der Magnetisierungsrichtung überein, bedeutet dies einen erhöhten elektrischen Widerstand im Vergleich zu dem Fall, daß die Strom- und Magnetisierungsrichtung senkrecht aufeinander stehen. Der anisotrope magnetoresistive Effekt stellt nach diesem Modell eine Konsequenz von anisotropen Streuprozessen dar. Die Abschätzung aus den quantenmechanischen Betrachtungen für den erzielbaren MR-Effekt liefert einen Maximalwert von etwa 30 %. Bei 4,2 K wurde auf experimentellem Weg ein Höchstwert des MR-Effektes bei NiCo 70/30-Schichten von ungefähr 26 % gemessen [20]. Neuere theoretische Modelle berücksichtigen durch einen relativistischen Ansatz zusätzlich die Spin-Bahn-Wechselwirkung und führen zu präziseren Voraussagen [54].

2.8. Temperaturkompensation

Magnetoresistive Sensoren reagieren auf Temperaturänderungen mit einer Änderung ihres Grundwiderstandes. Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes von Permalloy beträgt ungefähr 0,3 % pro Kelvin. Da bei magnetoresistiven Elementen maximal von 2,5 % bis 3 % Widerstandshub aufgrund eines äußeren Magnetfeldes ausgegangen werden kann, führen bereits Temperaturschwankungen von wenigen Kelvin zu erheblichen Widerstandsänderungen und sind nicht mehr eindeutig einem sich ändernden Magnetfeld zuzuordnen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Temperaturänderung auf eine Schwankung in der Umgebungstemperatur oder auf den Betriebsstrom, der die Temperatur im Inneren des Sensors beeinflusst, zurückzuführen ist. Schaltet man vier magnetoresistive Sensoren, die sich in ihrer Geometrie und in ihren Schichteigenschaften nicht voneinander unterscheiden, auf engstem Raum zu einer Wheatstonebrücke zusammen, sind alle Sensoren annähernd der gleichen Temperatur ausgesetzt. Es ist darauf zu achten, daß sich die Sensoren einer Halbbrücke durch geeignete Maßnahmen gegenläufig in Bezug auf ein äußeres Magnetfeld verhalten. Für diesen Zustand der idealen Symmetrie kompensieren sich die Temperaturkoeffizienten der einzelnen Teilwiderstände gegenseitig. Übrig bleibt die Abnahme der Widerstandsänderung mit steigender Temperatur. Mikrostrukturierte Sensoren haben zusätzlich den Vorteil, daß sie gemeinsam auf einem Substrat sehr dicht zueinander aufgebracht werden können. Werden die einzelnen Teilwiderstände der Brücke mäanderförmig ineinander verschachtelt, ist der Einfluß eines Temperaturgradienten, der zu einer Verstimmung der Brücke führt, ebenfalls minimiert.

Damit das Substrat die entstehende Wärme schnell abführen kann, wird zum einen eine gute thermische Kopplung und zum anderen eine möglichst große Wärmeleitfähigkeit λ_T benötigt. Silizium ist aufgrund seiner in Relation zu Glas 15 mal höheren Wärmeleitfähigkeit als Trägermaterial besonders gut geeignet [55].

2.9. Normierte Empfindlichkeit

Im folgenden wird beschrieben, wie sich die Ausgangsspannung einer Wheatstonebrücke aus vier magnetoresistiven Widerständen berechnen läßt. Bei den Überlegungen wird vorausgesetzt, daß die einzelnen Widerstände identische Eigenschaften besitzen.

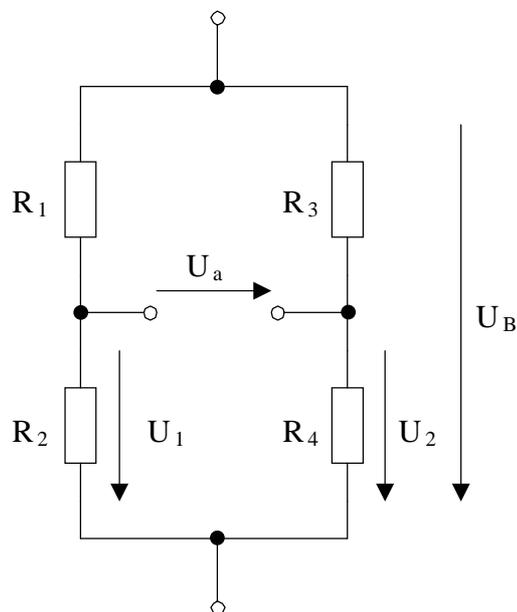


Abbildung 8: Wheatstonebrücke bestehend aus vier identischen magnetoresistiven Widerständen.

Eine weitere Voraussetzung ist, daß sich die Widerstände der Brücke aus einem magnetfeldunabhängigen und einem magnetfeldabhängigen Anteil zusammensetzen [56]:

$$R_i = R_0 + \delta R_i(H) \quad (29)$$

R_i : Gesamtwiderstand des i-ten Teilwiderstandes

R_0 : Widerstand ohne Einfluß eines äußeren Magnetfeldes

$\delta R_i(H)$: Widerstandsvariation aufgrund eines äußeren Magnetfeldes.

Hierbei steht der Index $i = 1; 2; 3; 4$ für die einzelnen Widerstände. Aus Gleichung (29) geht hervor, daß als Ursache für Widerstandsänderungen ausschließlich unter-

schiedliche Magnetfelder am Ort des jeweiligen Widerstandes betrachtet werden. Die Ausgangsspannung U_1 läßt sich über das entsprechende Widerstandsverhältnis berechnen:

$$U_1 = U_B \cdot \frac{(R_0 + \delta R_1(H))}{(R_0 + \delta R_1(H)) + (R_0 + \delta R_2(H))} \quad (30)$$

U_1 : Ausgangsspannung gegen Masse

U_B : Brückenbetriebsspannung.

Unter der Voraussetzung, daß die Summe der Widerstandsänderungen aufgrund eines äußeren Magnetfeldes klein gegenüber dem Widerstand ohne Einfluß eines Feldes ist, führt eine Reihenentwicklung in linearer Näherung zu folgender Gleichung:

$$U_1 = \frac{U_B}{2} \cdot \left(1 + \frac{\delta R_1(H) - \delta R_2(H)}{2 \cdot R_0} \right). \quad (31)$$

Für die Ausgangsspannung U_2 ergibt sich unter den gleichen Voraussetzungen eine entsprechende Gleichung. Für die weiteren Betrachtungen ist die Brückenausgangsspannung U_a von Interesse, die als Differenz der beiden Ausgangsspannungen angegeben wird:

$$U_a = \frac{U_B}{2} \cdot \left(\frac{\delta R_1(H)}{2 \cdot R_0} - \frac{\delta R_2(H)}{2 \cdot R_0} - \frac{\delta R_3(H)}{2 \cdot R_0} + \frac{\delta R_4(H)}{2 \cdot R_0} \right). \quad (32)$$

Die maximal meßbare Brückenspannung beim Anlegen eines Magnetfeldes wird dann entstehen, wenn sich die Widerstände R_1 und R_4 bzw. R_2 und R_3 jeweils um den gleichen Betrag, aber zueinander gegenläufig, verändern. Da nach den eingangs festgelegten Voraussetzungen die Änderungen der Einzelwiderstände nur auf äußere Magnetfelder zurückzuführen sind, kann im weiteren auf eine Unterscheidung zwischen den sich in gleiche Richtung variierenden Brückenwiderständen verzichtet werden. Für die Brückenausgangsspannung ergibt sich hierdurch:

$$U_a = \frac{U_B}{2 \cdot R_0} \cdot (\delta R_1(H) - \delta R_2(H)). \quad (33)$$

Für den magnetfeldabhängigen Anteil des Widerstandes R_1 gilt [57]:

$$\delta R_1(H) = -\Delta R \cdot \sin^2[\varphi + (\alpha - \delta)] \quad (34)$$

- ΔR : maximale Widerstandsänderung
 φ : Winkel zwischen leichter Achse und Magnetisierungsrichtung
 α : einzustellender Winkel zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung
 δ : Fehler des einzustellenden Winkels zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung.

In analoger Weise gilt für den magnetfeldabhängigen Widerstandsanteil R_2 :

$$\delta R_2(H) = -\Delta R \cdot \sin^2[\varphi - (\alpha - \delta)]. \quad (35)$$

Wie die in den Gleichungen (34) und (35) beschriebenen Widerstandsvariationen in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld aussehen, ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

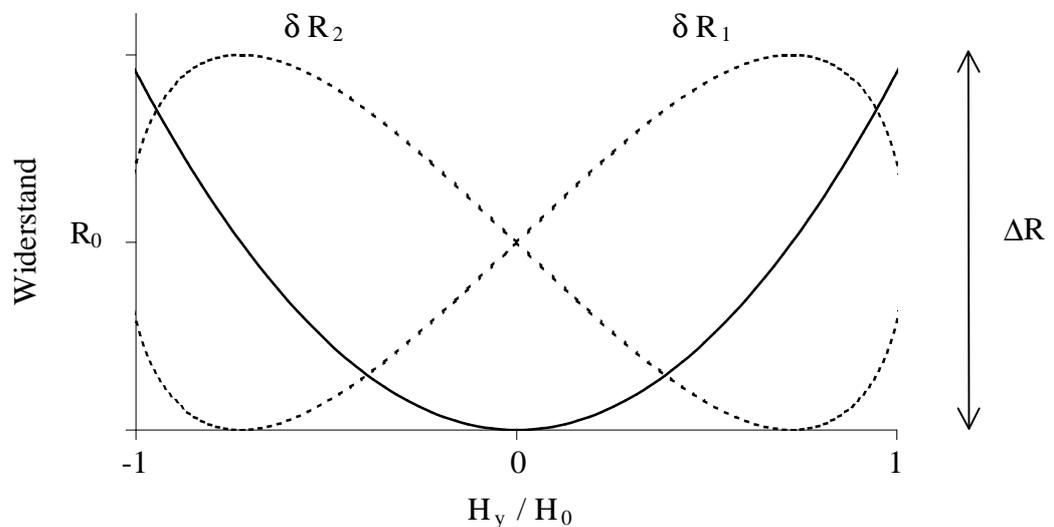


Abbildung 9: Widerstandskennlinien von magnetoresistiven Widerständen in einer Wheatstonebrücke.

Bei der durchgezogenen Kennlinie wurden die Winkel α und δ gleich 0° gewählt. Zu sehen ist die quadratische Abhängigkeit des Widerstandes von einer Magnetfeldkomponente H_y , wie sie von Gleichung (34) vorausgesagt wird. Der Funktionsverlauf ist π -periodisch und hat seine größte Steilheit für $\alpha = \pm 45^\circ$. In Abbildung 9 ist zu erkennen, daß die Widerstandsänderung pro Magnetfeld bei Feldstärke 0 am kleinsten ist. Wünschenswert in diesem Zusammenhang ist aber eine

möglichst große Widerstandsänderung. Um dies zu erreichen, ist eine Arbeitspunktverschiebung um $|\alpha| = 45^\circ$ notwendig. Wie die entsprechenden Widerstandskennlinien aussehen, ist ebenfalls in Abbildung 9 dargestellt. Die beiden gestrichelt eingezeichneten Graphen zeigen den Funktionsverlauf des magnetfeldabhängigen Anteils der Widerstandsänderung der beiden Widerstände R_1 und R_2 für $\alpha = 45^\circ$ und $\delta = 0^\circ$. Die Achsensymmetrie der beiden Kennlinien ist auf das unterschiedliche Vorzeichen der einzustellenden Winkel, die in den Gleichungen (34) und (35) angegeben wurden, zurückzuführen.

In Rahmen der beschriebenen idealisierten Voraussetzungen besteht die Möglichkeit, eine Korrektur für die fehlerhafte Winkelverdrehung um einen Winkel δ zu berücksichtigen. Wie sich Winkelkorrekturen auf die Widerstandskennlinien auswirken, geht aus Abbildung 10 hervor:

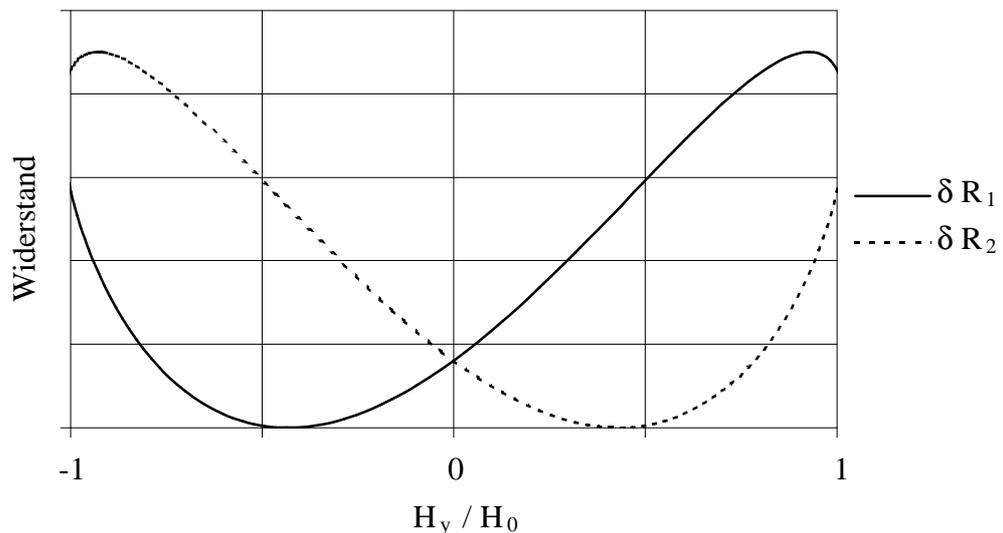


Abbildung 10: Kennlinien von magnetoresistiven Widerständen in einer Wheatstonebrücke mit einer Winkelkorrektur von $\delta = \pi/9$.

Exemplarisch sind die Widerstandskennlinien für einen Korrekturwinkel δ von $\pi/9$ eingezeichnet ($\alpha = 45^\circ$). Deutlich ist eine Verschiebung der Kennlinien in die jeweils entgegengesetzte Richtung zu erkennen. Aufgrund dieser Verschiebung reduziert sich der ohnehin kleine Linearitätsbereich des nutzbaren Teils der beiden Widerstandskennlinien. Weiterhin bleibt festzustellen, daß mit der Verschiebung ein Teil des maximal möglichen Ausgangssignals verlorenght. Um dies zu verdeutlichen, ist in der folgenden Abbildung die Ausgangsspannung, wie sie von Gleichung (33) beschrieben wird, dargestellt:

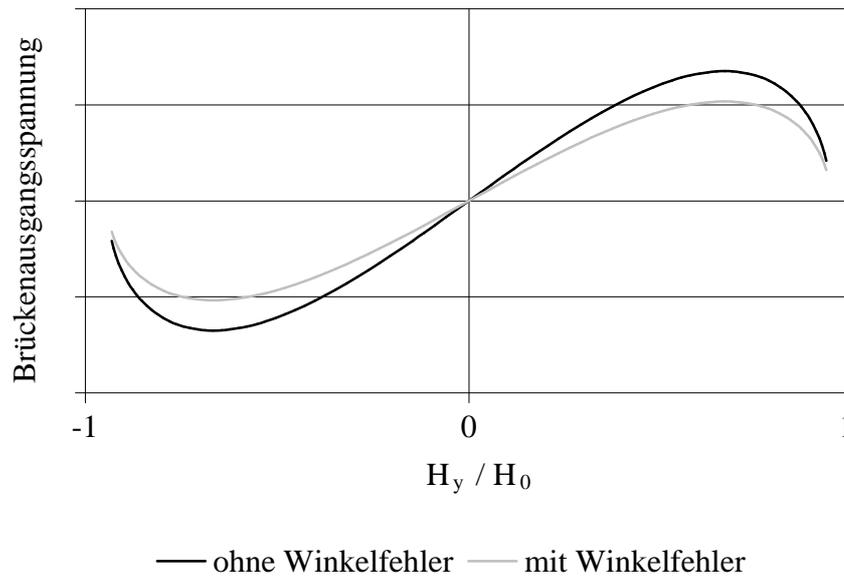


Abbildung 11: Änderung der Brückenausgangsspannung einer Wheatstonebrücke aus vier magnetoresistiven Widerständen unter dem Einfluß eines Winkelfehlers von $\delta = \pi/9$ ($\alpha = 45^\circ$).

In Abbildung 11 ist der Rückgang der Brückenausgangsspannung für einen Winkelfehler von $\delta = \pi/9$ ersichtlich. Die Steigung der grauen Kennlinie ist kleiner. Das bedeutet, daß pro Magnetfeldänderung weniger Brückenausgangsspannung zur Verfügung steht als ohne Winkelfehler. Um diesen Zusammenhang zu quantifizieren, führt man den Begriff der normierten Empfindlichkeit ein, der wie folgt definiert ist [41]:

$$S_U = \frac{1}{U_B} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial H_y} \quad (36)$$

S_U : normierte Empfindlichkeit.

Um eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Magnetfeldsensoren zu gewährleisten, ist in Gleichung (36) die Änderung der Brückenausgangsspannung pro Magnetfeldänderung in Meßrichtung auf die Brückenbetriebsspannung normiert worden. Wird die Brückenausgangsspannung als Funktion der Magnetfeldkomponente H_y aufgetragen, kann die normierte Empfindlichkeit durch Bestimmung der Steilheit (1. Ableitung) der Kennlinie angegeben werden und stellt somit eine unmittelbar meßbare Größe dar. Die normierte Empfindlichkeit läßt sich mit den in diesem Unterkapitel vorgestellten Voraussetzungen zusätzlich durch eine magnetfeldabhängige Widerstandsänderung ausdrücken. Für die Angabe des Zusammenhangs zwischen der Widerstandsänderung

infolge eines äußeren Magnetfeldes und der Feldkomponente in Meßrichtung muß Gleichung (36) folgendermaßen abgewandelt werden:

$$S_U = \frac{1}{U_B} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial H_y}. \quad (37)$$

Für den Winkel φ zwischen leichter Achse und Magnetisierungsrichtung und einem äußeren Magnetfeld mit den Komponenten H_x und H_y gilt die in Kapitel 2.4.2 abgeleitete implizite Gleichung:

$$H_y = [(N_y - N_x) \cdot M_s + H_k] \cdot \sin \varphi + H_x \cdot \tan \varphi. \quad (38)$$

Die partielle Ableitung in Gleichung (37) des Winkels φ nach der Magnetfeldkomponente H_y ist über den Umweg des totalen Differentials zu ermitteln. Die partielle Ableitung der Brückenausgangsspannung nach dem Winkel kann hingegen unmittelbar ausgeführt werden. Zusammengefaßt ergibt sich aus Gleichung (33), (34), (35) und (37):

$$S_U = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{\sin[\varphi + (\alpha - \delta)] \cdot \cos[\varphi + (\alpha - \delta)] - \sin[\varphi - (\alpha - \delta)] \cdot \cos[\varphi - (\alpha - \delta)]}{[(N_y - N_x) \cdot M_s + H_k] \cdot \cos(\varphi) + H_x \cdot [\cos(\varphi)]^{-2}}. \quad (39)$$

Wie die normierte Empfindlichkeit von der Meßfeldkomponente H_y abhängt, ist der Abbildung 12 zu entnehmen:

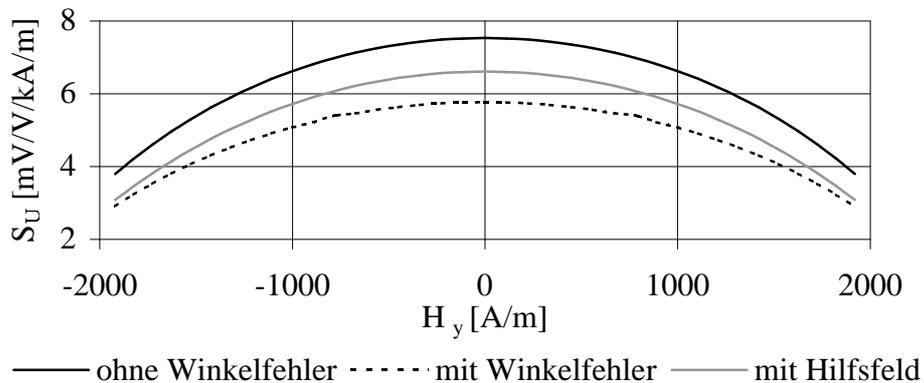


Abbildung 12: Einfluß des Winkelfehlers δ und der Magnetfeldkomponente H_x auf die Empfindlichkeit einer magnetoresistiven Wheatstonebrücke.

Für die Berechnung der in Abbildung 12 dargestellten Kennlinien wurden folgende Werte verwendet: $M_s = 1000 \text{ kA/m}$, $H_k = 250 \text{ A/m}$, $\Delta R/R_0 = 2,7 \%$, $t = 25 \text{ nm}$, $w = 7,5 \text{ }\mu\text{m}$ und $U_B = 1 \text{ V}$. Handelt es sich bei den zu betrachtenden Sensorelementen um lange Streifen aus magneto-resistivem Material, deren Länge l groß gegen die Breite w und sehr viel größer als die Dicke t ist, kann der Entmagnetisierungsfaktor in leichter Richtung durch $N_x = 0$ und in schwerer Richtung durch $N_y = t/w$ angenähert werden. Die durchgezogene schwarze Linie in Abbildung 12 zeigt den Empfindlichkeitsverlauf für eine Winkelkorrektur von $|\alpha| = 45^\circ$ ohne Winkelfehler. An der gestrichelte Kurve ist die Empfindlichkeitsabnahme für einen Winkelfehler von $\delta = \pi/9$ zu erkennen. Die durchgezogene grau dargestellte Linie zeigt den Empfindlichkeitsverlauf ohne Winkelfehler, der sich unter dem Einfluß eines in leichter Richtung angelegten Hilfsmagnetfeldes von 500 A/m ergibt.

Der Zusammenhang zwischen normierter Empfindlichkeit und Winkelfehler ist in Abbildung 13 dargestellt:

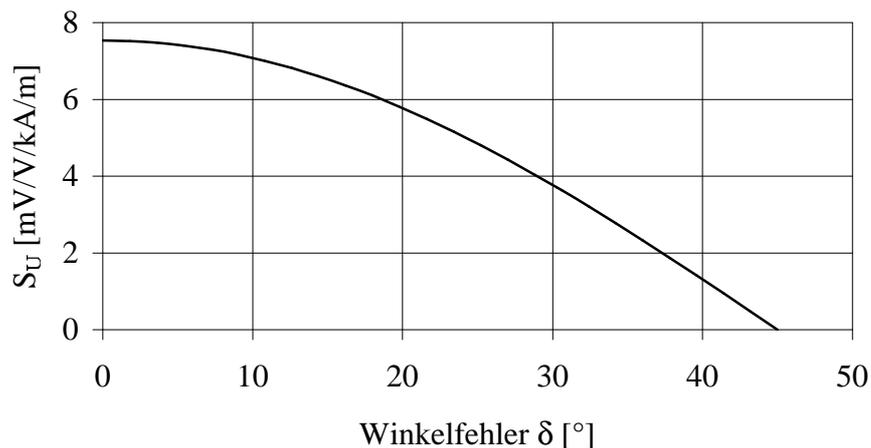


Abbildung 13: Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit vom Winkelfehler δ .

Das Maximum der erreichbaren Empfindlichkeit liegt bei einer Winkelkorrektur von $|\alpha| = 45^\circ$ (d. h. $\delta = 0^\circ$) und nimmt mit zunehmendem Winkelfehler δ bis auf Null ab. Setzt man in Gleichung (39) den Winkel φ zwischen leichter Achse und Magnetisierungsrichtung gleich Null und ordnet dem einzustellenden Winkel α zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung den Wert $\pi/4$ zu, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$S_U = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{\cos(2 \cdot \delta)}{H_k + (N_y - N_x) \cdot M_s + H_x} \quad (40)$$

Der Winkelkorrekturfaktor $\cos(2 \cdot \delta)$ gibt an, welche Auswirkung ein Fehler bei der Winkeleinstellung von $|\alpha| = 45^\circ$ zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung auf die Empfindlichkeit hat.

Die normierte Empfindlichkeit in Gleichung (36) beschreibt die Änderung der Brückenausgangsspannung in Abhängigkeit von einer zu messenden Magnetfeldkomponente. Da sich die Brückenausgangsspannung infolge eines äußeren Magnetfeldes in gleichem Maße ändert wie die Spannung an einem Einzelwiderstand, gilt Gleichung (36) sowohl für einen Einzelwiderstand, als auch für eine Wheatstonebrücke aus vier Widerständen mit geeigneter Arbeitspunktverschiebung. Für eine Halbbrücke aus zwei magnetoresistiven Widerständen und für eine Vollbrücke, die aus zwei magnetoresistiven Widerständen und zwei Festwiderständen besteht, gilt für die normierte Empfindlichkeit:

$$S_U = \frac{1}{2 \cdot U_B} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial H_y} \quad (41)$$

2.10. Linearer Magnetfeldmeßbereich

Wird ein magnetoresistiver Sensor einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, ändert sich dessen Widerstand nur in einem begrenzten Magnetfeldbereich annähernd linear. Läßt man einen Linearitätsfehler von bis zu 5 % zu, kann der lineare Magnetfeldmeßbereich nach [41] folgendermaßen festgelegt werden:

$$H_M \approx \frac{H_k + (N_y - N_x) \cdot M_s + H_x}{2} \quad (42)$$

H_M : linearer Magnetfeldmeßbereich.

Unter der Voraussetzung, daß kein Winkelfehler bei der Arbeitspunkteinstellung vorhanden ist, ergibt sich daraus zusammen mit Gleichung (40) folgender Ausdruck:

$$S_U \approx \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot H_M} \quad (43)$$

Daran ist zu erkennen, daß eine Empfindlichkeitszunahme stets mit einer Einschränkung des linearen Magnetfeldmeßbereichs verbunden ist, da der Widerstandshub bei einer vorgegebenen Materialzusammensetzung als Konstante angesehen werden muß.

2.11. Linearisierung der Kennlinie

Die Empfindlichkeit eines magnetoresistiven Widerstandselements ist aufgrund der quadratischen Abhängigkeit des Widerstandes von einem äußeren Magnetfeld bei kleinen Feldstärken gering. Die größte Steilheit der Kennlinie ist bei einem Winkel zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung von $|\alpha| = 45^\circ$ erreichbar (vgl. Abbildung 9). Die Arbeitspunktverschiebung kann durch verschiedene Maßnahmen realisiert werden. Die einfachste Lösung stellen zwei Sensorelemente dar, die unter einem Winkel von 45° angeordnet sind und zusammenschaltet eine Halbbrücke darstellen [41]:

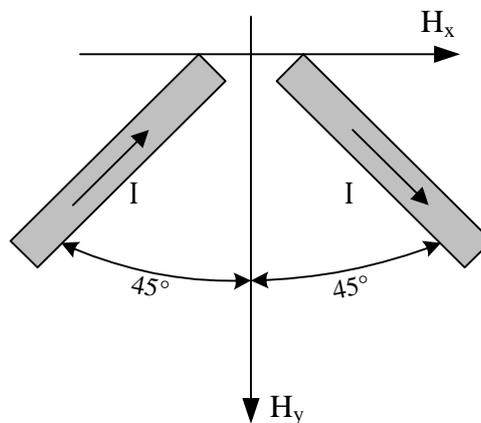


Abbildung 14: Geometrische Anordnung von zwei Sensorelementen, die zu einer Arbeitspunktverschiebung führt.

Diese Art der Winkelverdrehung hat den Nachteil, daß die örtlich getrennten Sensorbereiche einem unterschiedlich großem Magnetfeld ausgesetzt sind. Zudem können Temperaturgradienten auftreten, die sich unmittelbar auf die Ausgangskennlinie auswirken.

Die Drehung der Magnetisierung im Inneren des magnetoresistiven Streifens in Relation zur Stromrichtung in leichter Richtung kann durch Anlegen eines konstanten äußeren Feldes in Meßrichtung erreicht werden [58]. Diese Vorgehensweise erfordert ein hohes Maß an Konstanz des anzulegenden Feldes, da jede Variation in dessen Amplitude sich in einer Änderung der Ausgangsspannung bemerkbar macht und deshalb nicht von einem zu messenden Magnetfeld in gleicher Richtung unterschieden werden kann. Außerdem ist je nach Vorzeichen des zu messenden Magnetfeldes die Arbeitspunkteinstellung mit der Richtung des Zusatzfeldes zu korrelieren, was in der praktischen Anwendung nur unter erheblichem Aufwand realisiert werden kann.

Die am weitesten verbreitete Methode der Linearisierung der Kennlinie stellt die Barber Pole Struktur dar [59]. Hierbei werden hochleitfähige Streifen in regelmäßigen Abständen auf die magnetoresistiven Sensorstreifen aufgebracht:

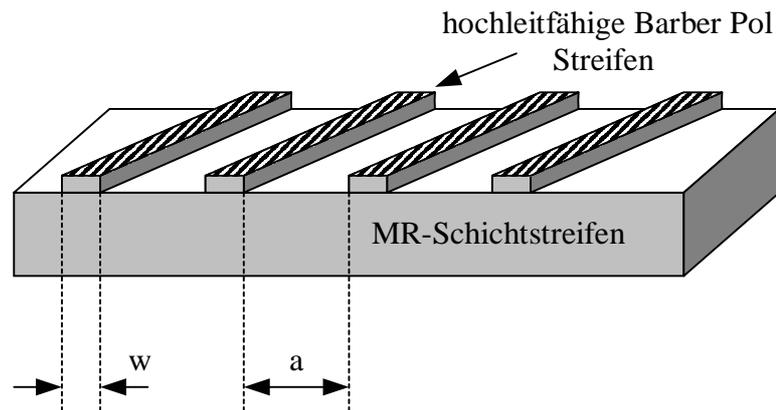


Abbildung 15: Magnetoresistiver Sensorstreifen mit Barber Pole Struktur.

Die Barber Pole Streifen sind gegen die Sensorstreifenlängsrichtung um 45° geneigt. Die hochleitfähigen Streifen stellen Äquipotentiallinien dar, die den Sensorstrom im hochohmigeren magnetoresistiven Material auf kürzestem Wege, d. h. ebenfalls unter einem Winkel von 45° gegen die Sensorstreifenlängsrichtung, zwischen ihnen fließen lassen. In der Praxis zeigen Barber Pole Sensoren eine kleinere Empfindlichkeit als man für eine Winkelverdrehung von 45° erwarteten könnte. Der Grund hierfür liegt in der unvollständig gedrehten Stromrichtung in den Randbereichen. In Abbildung 15 ist mit a der Abstand zwischen den einzelnen Barber Pole Streifen in Sensorstreifenlängsrichtung und mit w die Sensorstreifenbreite bezeichnet. Nach [60] kann die mittlere Abweichung von der Stromrichtung wie folgt angegeben werden:

$$\cos(2 \cdot \delta) \approx 1 - 0,08 \cdot \left(\frac{a}{w}\right) - 0,11 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2. \quad (44)$$

Die Näherungsformel (44) gilt unter der Voraussetzung, daß $0 \leq a/w \leq 2$ erfüllt ist. Für einen magnetoresistiven Sensorstreifen mit Barber Pole Struktur entspricht die mittlere Abweichung von der durch die Geometrie vorgegebenen Stromverdrehung dem Winkelkorrekturfaktor in Gleichung (40). Ein wesentlicher Nachteil der Barber Pole Struktur ist die Abnahme des Grundwiderstandes pro Flächeneinheit, da durch das Aufbringen der Barber Pole hochleitfähige Bereiche dem relativ dazu hochohmigen magnetoresistiven Material parallelgeschaltet werden. Um die für eine Wheatstonebrücke erforderliche Gegenläufigkeit der Widerstände zu erreichen, müssen die Barber Pole auf den einzelnen Widerstandsstreifen eine entgegengesetzte Neigung aufweisen:

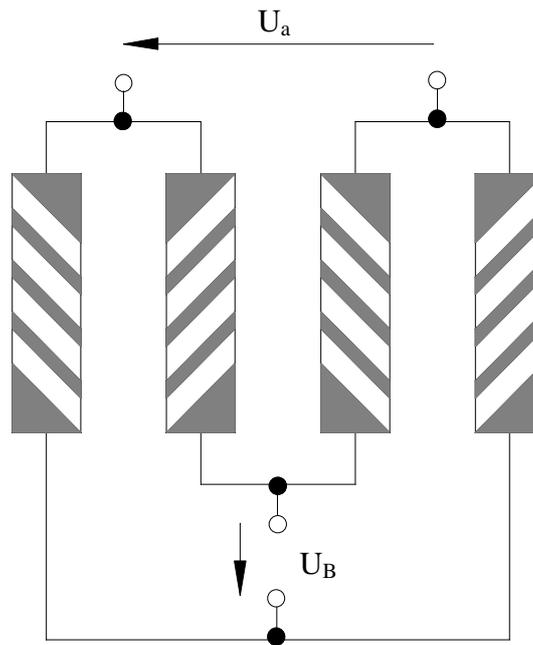


Abbildung 16: Wheatstonebrücke bestehend aus vier magnetoresistiven Widerständen mit Barber Pole Struktur.

Durch das Aufbringen von Barber Polen wird die Magnetisierungsrichtung im Sensorstreifen, die im Normalfall mit der Streifenlängsrichtung übereinstimmt, nicht beeinflusst.

2.12. Auflösungs Grenze und Rauschspannungsarten

Der Meßfeldbereich eines magnetoresistiven Sensors wird am oberen Ende durch das Erreichen des nichtlinearen Teils der Ausgangskennlinie begrenzt. Die Messung kleiner Magnetfeldstärken ist durch das Rauschen und die Nullpunktsdrift limitiert. Bei der Beurteilung eines magnetoresistiven Sensors ist neben der erzielbaren Empfindlichkeit die erreichbare Auflösung von entscheidender Bedeutung. Die Auflösungsgrenze gibt an, wie klein ein zu messendes Magnetfeld sein darf, damit es im Ausgangssignal des Sensors noch nachgewiesen werden kann. Für die Auflösung gilt folgende Gleichung:

$$A = \frac{U_r \cdot \mu_0}{S_U \cdot U_B \cdot \sqrt{\Delta f}} \quad (45)$$

- A : Auflösung [T/ $\sqrt{\text{Hz}}$]
- S_U : normierte Empfindlichkeit
- U_B : Sensorbetriebsspannung
- Δf : Bandbreite der Meßanordnung
- U_r : Rauschspannung.

Die Angabe der Auflösung bezieht sich meist auf eine Bandbreite von 1 Hz. Wie aus Gleichung (45) hervorgeht, ist bei der Angabe der Auflösung die Betriebsspannung bzw. die umgesetzte elektrische Leistung mit zu berücksichtigen.

Bei einer Messung können die im Ausgangssignal vorhandenen Rauschspannungen verschiedene Ursachen haben. Ein Teil des Rauschens stammt von der zu untersuchenden Probe. Die Anschlüsse an das Meßgerät sowie das Meßgerät selbst kommen als weitere Rauschquellen in Frage. Desweiteren können Störungen durch externe elektrische und magnetische Felder einen Rauschbeitrag liefern. Das Ziel bei Rauschuntersuchungen ist, die Rauschquellen voneinander zu separieren um Aussagen über das Verhalten der zu untersuchenden Probe machen zu können. Wird ein Sensor in einem großen Frequenzbereich betrieben, dominiert oberhalb einiger hundert Hertz das Nyquistauschen (auch Johnson Rauschen, thermisches Rauschen, weißes Rauschen oder Widerstandsrauschen genannt). Für die mittlere Rauschspannung gilt der zuerst von Nyquist aus dem Planckschen Strahlungsgesetz abgeleitete Zusammenhang:

$$U_{\text{Nyquist}} = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (46)$$

- k_B : Boltzmann-Konstante
 R : ohmscher Widerstand der Probe
 T : absolute Temperatur.

Nach Gleichung (46) existieren mehrere Möglichkeiten, daß frequenzunabhängige Nyquistauschen zu reduzieren. Eine Reduktion ist beispielsweise durch Einschränkung der Bandbreite und Absenkung der Temperatur erreichbar. Der ohmschen Widerstand einer Probe sollte möglichst klein sein. Bei Rauschspannungsuntersuchungen ist darauf zu achten, daß der Eingangswiderstand der Meßanlage sehr viel größer als der Quellenwiderstand (durch die Probe festgelegt) ist, damit das Nyquistauschen hauptsächlich durch den Widerstand der Probe bestimmt wird.

Bei magnetoresistiven Sensoren ist neben dem frequenzunabhängigen Nyquistauschen ein zu kleineren Frequenzen hin zunehmender Rauschanteil vorhanden, deren physikalische Ursache nicht vollständig geklärt ist. Im Erklärungsmodell von Hooge und Hoppenbrouwers (HH-Modell) [61] wird das frequenzabhängige Rauschen auf Widerstandsfluktuationen in der Probe zurückgeführt:

$$S_{\text{HH}} = I^2 \cdot R^2 \cdot \frac{\alpha_H}{N_e \cdot f} \quad (47)$$

- S_{HH} : spektrale Rauschleistungsdichte im HH-Modell
 I : Probenstrom
 α_H : Hooge-Konstante (für Metallschichten ungefähr 0,002)
 N_e : Anzahl der freien Ladungsträger
 f : Frequenz.

Beim HH-Modell wird davon ausgegangen, daß sich der frequenzabhängige Rauschanteil zu dem Nyquistauschen addieren läßt. Die Abhängigkeit von der Anzahl der freien Ladungsträger läßt den Schluß zu, daß der frequenzabhängige Rauschanteil eine Volumeneigenschaft der Probe ist und nicht durch Schwankungsvorgänge an der Oberfläche zu erklären ist. Zu beachten ist der quadratische Zusammenhang mit dem Probenstrom, der z. B. bei [55] unter gewissen Einschränkungen bestätigt werden konnte. Das HH-Modell vermag das Rauschverhalten bei Raumtemperatur von einigen Metallen relativ gut zu beschreiben. Die bei magnetoresistiven Sensoren zu beobachtende Temperaturabhängigkeit wird von dem HH-Modell nicht erfaßt.

In dem thermischen Diffusionsmodell von Voss und Clarke (VC-Modell) wird die Temperatur in Metallschichten als fluktuierende Einflußgröße betrachtet [62], [63], [64]. Die räumlich korrelierten Temperaturfluktuationen führen nach dem VC-Modell zu Widerstands- und letztendlich bei konstantem Probenstrom zu Spannungsfuktuationen:

$$S_{VC} = \frac{I^2 \cdot R^2 \cdot T_K \cdot k_B \cdot T^2}{c_v \cdot f \cdot [3 + 2 \cdot \ln(1/w)]} \quad (48)$$

- S_{VC} : spektrale Rauschleistungsdichte im VC-Modell
 T_K : Widerstandstemperaturkoeffizient
 c_v : Wärmekapazität der Probe
 l : Länge der Probe
 w : Breite der Probe.

Bei dem VC-Modell werden zwischen der magnetoresistiven Schicht und dem Substrat auftretende Temperatureffekte nicht berücksichtigt, was im Einzelfall zu Abweichungen bei Rauschmessungen führen kann.

Zusätzliche Rauschbeiträge des Ferromagnetismus, die sich bei auf den Sensor einwirkenden zeitlich veränderlichen Magnetfeldern im Rauschspektrum zeigen, sind auf lokale sprunghafte Veränderungen in der Domänenkonfiguration (Barkhausenrauschen) zurückzuführen. Das Barkhausenrauschen ist von der Geometrie, dem Material und von der magnetischen Vorgeschichte der Probe abhängig [65]. Da die in dieser Arbeit beschriebenen Rauschuntersuchungen ausschließlich in magnetisch

abgeschirmter Umgebung durchgeführt wurden, sind frequenzabhängige Rauschbeiträge durch Barkhausensprünge weitestgehend auszuschließen [66].

2.12.1. Theoretische Auflösungsgrenze

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation begrenzt die mit einer vorgegebenen Bandbreite minimal meßbare Energie eines Systems. Die kleinste meßbare magnetische Flußdichte, die bei einem würfelförmigen Volumen eines zu betrachtenden Körpers mit einer Bandbreite von 1 Hz meßbar ist, kann durch den folgenden Ausdruck abgeschätzt werden:

$$A_{\text{theo}} \approx 4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot \mu_0}{l_w^3}} \quad (49)$$

A_{theo} : theoretische Magnetfeldauflösung

h : Plancksches Wirkungsquantum

l_w : Kantenlänge des würfelförmigen Körpers.

Der Faktor 4 berücksichtigt hierbei, daß im Idealfall höchstens 1/4 der Energie des magnetischen Feldes in den Probekörper eingekoppelt werden kann. In der folgenden Abbildung ist die Auflösung als Funktion der Kantenlänge eines würfelförmigen Probekörpers dargestellt:

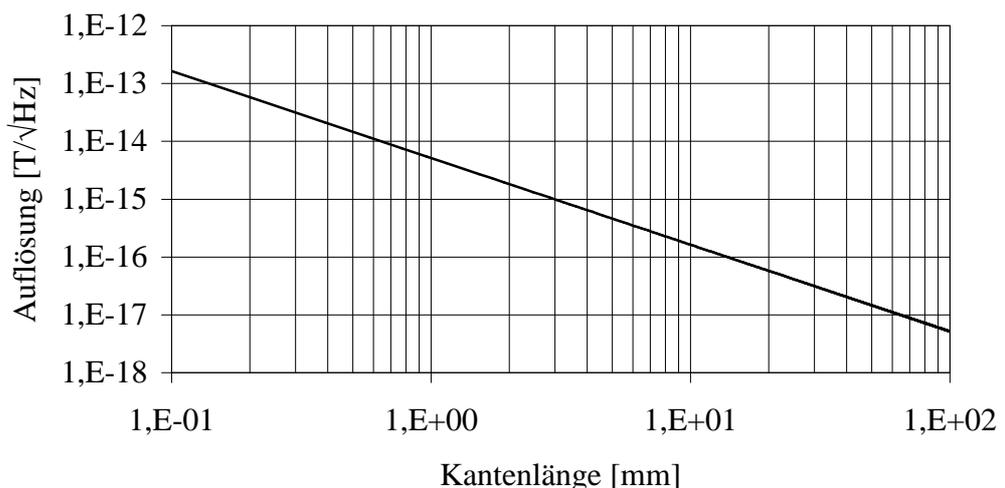


Abbildung 17: Abschätzung der theoretischen Auflösungsgrenze aufgetragen als Funktion der Kantenlänge eines Würfels.

Eine Magnetfeldauflösung von $1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ sollte unter idealen Bedingungen nach Abbildung 17 bei einer Kantenlänge von etwa 3 mm möglich sein. Allerdings wird dieser theoretische Wert bei Raumtemperatur aufgrund von thermischen Einflüssen in der Praxis erst bei größeren Volumina erreichbar sein. Die Volumina der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren bewegen sich in der Größenordnung von wenigen Kubikmikrometern. Um eine möglichst niedrige Auflösungsgrenze zu erzielen, ist deshalb eine Vergrößerung des effektiven Sensorvolumens notwendig. Eine indirekte Vergrößerung kann durch den Einsatz von hochpermeablen Antennen erfolgen, die den magnetischen Fluß in der Umgebung des Sensors bei geeigneter Ankopplung in das Sensorvolumen leiten können [67], [68]. Die Berechnungen der durch den Einsatz von Antennen erzielbaren Magnetfeldverstärkung in Abhängigkeit von der Geometrie und den magnetischen Eigenschaften der Antennen für die eingesetzten Sensorsysteme sind in Kapitel 5.4. und 6.2. ausgeführt.

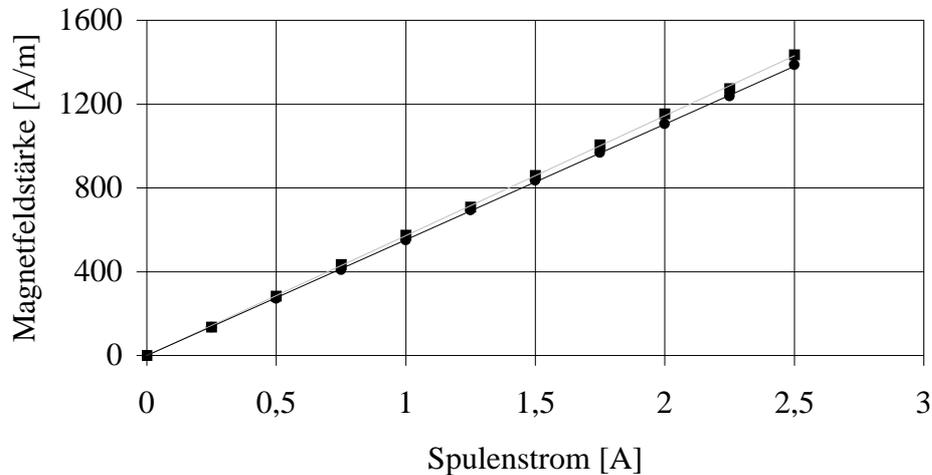
3. Arbeitsplatz und Herstellung der Sensorstrukturen

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der eingesetzten Sensorsysteme sind alle Messungen unter magnetischer Abschirmung durchgeführt worden, weil das Erdmagnetfeld und von elektrischen Anlagen erzeugte Magnetfelder die Untersuchung des magnetischen Verhaltens der Sensoren erheblich gestört hätten. Die Meßmagnetfelder wurden mit Hilfe von zwei sich ebenfalls in magnetischer Abschirmung befindlichen Helmholtzspulensystemen erzeugt. Als Vorverstärker wurde ein rauscharmer Differenzverstärker (Modell PAR 113) von der Firma EG&G Princeton Applied Research eingesetzt. Desweiteren wurde ein Instrumentenverstärker mit drei low-noise-Operationsverstärkern (LT 1028) für die Rauschuntersuchungen benutzt. Die Rauschmessungen wurden mit einem FFT-Spektrum-Analyser (AND Zonic AD 3625) durchgeführt.

3.1. Meßkammer und Spulensystem

Die eingesetzte würfelförmige doppelwandige Abschirmkammer von der Firma Vacuumschmelze GmbH bestand aus 1,5 mm dickem Mumetall [Außenabmessung: $(603 \text{ mm})^3$, Innenabmessung: $(503 \text{ mm})^3$]. Die Entmagnetisierung der Abschirmkammer konnte über eine sich im Inneren befindende Spule vorgenommen werden. Ein Entmagnetisierungsvorgang dauerte 30 s, wobei die Stromstärke ausgehend von einem Höchstwert von 50 A kontinuierlich auf 0 A heruntergeregelt wurde. Es konnte eine Abschirmung äußerer Magnetfelder um einen Faktor in der Größenordnung von 1000 (Verhältnis von äußerer zu innerer Magnetfeldstärke) nachgewiesen werden. Zwei runde Öffnungen an der Vorder- und Rückseite, die mit trichterförmigen Führungen aus Aluminium ausgestattet waren, ermöglichten den Zugang in die ansonsten geschlossene Abschirmkammer. Ein Foto sowie die Abmessungen der Meßkammer inklusive der Helmholtzspulensysteme befinden sich im Anhang. Die Sensoren wurden über Kunststoffrohre aus PVC, in deren Mitte sich eine an die jeweilige Keramikabmessungen angepaßte Halterung befanden, in der Meßkammer positioniert. Die Kontaktierung der Sensoren erfolgte mit Kontaktspitzen, die über Zuleitungen von außen zugänglich waren. Das Konzept der Meßadapter erlaubte neben dem zügigen Austauschen der Proben die reproduzierbare Positionierung in der Meßkammer. Die azimutale Position der Sensoren konnte anhand einer 360 °-Skala, die an der Außenseite angebracht war, eingestellt werden. In der Mitte der Meßkammer befanden sich zwei Helmholtzspulensysteme, die mittels einer Aluminiumkonstruktion befestigt waren. Die Spulensysteme waren orthogonal zueinander ausgerichtet, wobei die Sensoren mit Hilfe des Meßrohres im Zentrum positioniert werden konnten. Dadurch wurde die gleichzeitige Erzeugung von homogenen Magnetfeldern in der Schichtebene der Proben

entlang ihrer leichten und schweren Achse ermöglicht. Zur Ermittlung der Spulenkonstanten wurden die mit den Spulensystemen erzeugten Magnetfelder in Abhängigkeit vom Spulenstrom mit einer Hall-Sonde gemessen:



- Magnetfeld in Meßrohrrichtung ■ Magnetfeld quer zur Meßrohrrichtung

Abbildung 18: Magnetfeldstärke der Helmholtzspulensysteme in der Abschirmkammer als Funktion des Spulenstromes.

Die Bestimmung der Steigung der Regressionsgeraden lieferte die Spulenkonstante 552,51 A/m/A für das Spulenpaar, das ein Magnetfeld in Meßrohrrichtung erzeugt. Die Spulenkonstante für das Spulenpaar quer zur Meßrohrrichtung betrug 572,41 A/m/A. Aufgrund der Proportionalität zwischen Spulenstrom und Magnetfeldstärke und durch die Kenntnis der Spulenkonstanten konnten definierte Magnetfelder generiert werden.

3.2. Fehlerquellen bei der Messung

Als Fehlerquellen bei den durchgeführten Untersuchungen kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht. Zu den mechanischen Justagefehlern der Helmholtzspulensysteme und der Sensoren im Meßadapter kommen fertigungsbedingte Exemplarstreuungen der Proben hinzu. Als weitere Fehlerquelle sind die Spulenkonstanten zu nennen, mit deren Hilfe die zu messenden Magnetfelder berechnet wurden. Schwankungen in den Versorgungsspannungen und Temperaturfluktuationen in der Abschirmkammer kommen hinzu. Die eingesetzten Meßgeräte besitzen ebenfalls nur eine begrenzte Genauigkeit, wobei zu bemerken bleibt, daß bei den an den neuentwickelten Testsensoren durchgeführten Messungen hauptsächlich die Verifizierung der Funktionsweise und die Untersuchung der geometrieabhängigen magnetischen Eigenschaften im Vordergrund standen.

3.3. Fertigung eines Sensorchips

Der Weg von der Idee eines neuen Sensorchips bis zur Fertigstellung führt in Anlehnung an die zu erfüllende Aufgabe zu einem Konzeptentwurf. Anhand mathematischer Berechnungen und Simulationstechniken, wie z. B. der Finite Elemente Methode, wird abgeschätzt, ob das Sensorkonzept die erforderlichen Eigenschaften besitzt. Im nächsten Schritt wird das umzusetzende Layout des Sensors entworfen. Von dem aus mehreren Strukturierungsebenen bestehenden Layout werden anschließend die Masken für die einzelnen Herstellungsprozesse gefertigt. Mit der Dünnschichttechnologie ist der Möglichkeit der Massenfertigung komplizierter Sensorstrukturen gegeben, wobei das geringe Sensorvolumen dazu beiträgt, daß man sehr nahe an die zu untersuchenden Objekte herankommt. Dies ermöglicht beispielsweise in der Datentechnik hohe Speicherdichten. Die magnetischen Eigenschaften und die Größe des erzielbaren MR-Effektes hängen neben der Schichtdicke, der Korngröße und der Oberflächenbeschaffenheit der magnetfeldempfindlichen Schicht von den jeweiligen Herstellungsbedingungen ab. Es bedarf sehr viel Erfahrung und höchste Präzision, die Fertigungsabläufe zu kontrollieren und zu steuern. Das Ausgangsmaterial eines am IMO gefertigten MR-Sensors ist ein 4“ Silizium [100] Wafer, der als Trägersubstanz der aufzubringenden Schichtebenen dient. Dieser wird in einem Temperofen mit einer Isolationsschicht aus SiO_2 versehen. Nach einem Reinigungsschritt werden in die Isolationsschicht mit Flußsäure Ritzgräben geätzt, welche die Begrenzungen der einzelnen Sensorchips am Ende der Herstellung darstellen. Das magnetoresistive Material wird bei einer Temperatur von 250°C und einem Druck von 10^{-7} mbar mit einem Elektronenstrahlverdampfer aufgebracht. Es wird meist Permalloy mit 82 % Ni- und 18 % Fe-Anteil (NiFe 82/18) verwendet. Ein Permanentmagnet mit einer Feldstärke von etwa 6 kA/m sorgt für die Magnetisierung in einer Vorzugsrichtung des aufwachsenden Permalloys, die mit der Richtung des angelegten Magnetfeldes übereinstimmt. Als Oxidationsschutz- und Haftschicht wird anschließend eine wenige nm dicke Wolfram-Titan-Nitrid-Schicht aufgesputtert. Es folgen unter Reinraumbedingungen je nach Anzahl der Strukturierungsebenen mehrere lithographische Prozesse. Anschließend werden die aus Aluminium bestehenden Leitbahnen und Anschlußpads in einem Lift-off-Prozeß strukturiert. Ein bis zu mehreren Stunden dauernder auf die Fertigungsbedingungen abgestimmter zweistufiger Tempervorgang schließt den Herstellungsprozeß ab. Waren sämtliche Testmessungen und Sichtkontrollen während der Fertigung positiv, wird der Wafer mit einer Wafersäge an den zu anfangs geätzten Ritzgräben entlang zersägt. Die einzelnen Sensorchips werden auf ein Trägermaterial (meist Keramik) geklebt, über Bonddrähte mit den jeweiligen Anschlußpads verbunden und abschließend mit einer Abdeckmasse vor direkter

Berührung geschützt. In der folgenden Abbildung ist der nicht maßstabsgetreue schematische Schichtaufbau eines typischen am IMO gefertigten MR-Sensors zu sehen:

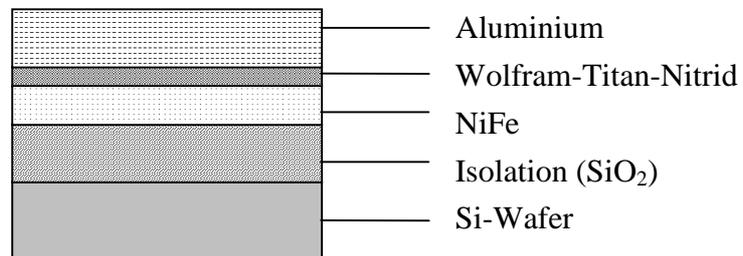


Abbildung 19: Schematischer Schichtaufbau eines am IMO gefertigten magnetoresistiven Sensors.

4. Untersuchungen zur Sättigungsmagnetisierung und Anisotropiefeldstärke

Die magnetoresistiven Schichten besitzen Eigenschaften, die eng mit den Fertigungsschritten und den Herstellungsbedingungen zusammenhängen. Zu den Schichtparametern zählen unter anderem die Sättigungsmagnetisierung, die Anisotropiefeldstärke und der in einem äußeren Magnetfeld erzielbare Widerstandseffekt.

4.1. Beschreibung und Layout der Teststruktur Femto7

Für die Empfindlichkeit einer magnetoresistiven Brücke aus Schichtstreifen mit Barber Polen in einem äußeren Magnetfeld gilt nach Gleichung (40) der folgende Zusammenhang, sofern der Entmagnetisierungsfaktor in leichter Richtung gleich Null gesetzt wird und die Bedingung $l > w \gg t$ erfüllt ist:

$$S_U = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)}{H_k + M_s \cdot \frac{t}{w} + H_x}. \quad (50)$$

Um Angaben über die Sättigungsmagnetisierung, die Anisotropiefeldstärke und den Widerstandshub machen zu können, wurde eine Teststruktur entwickelt. Die Maskenkonstruktion dieser Teststruktur ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

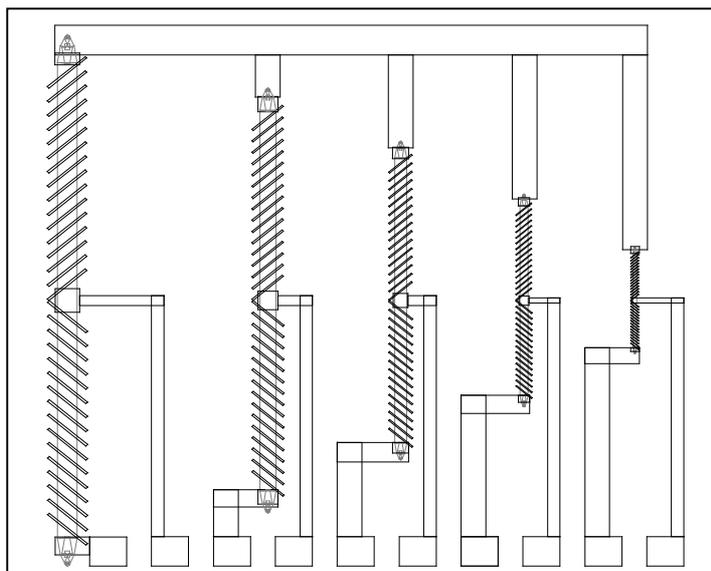


Abbildung 20: Maskenkonstruktion der Teststruktur Femto7 bestehend aus fünf magnetoresistiven Halbbrücken mit Barber Pole Struktur.

In Abbildung 20 sind fünf Streifen mit einer Barber Pole Struktur zu erkennen. Es handelt sich um Halbbrücken, deren Abmessungen (Länge, Breite, Barber Pole) von links nach rechts jeweils in Stufen von 20 % verkleinert sind. Es sind insgesamt 2 Wafer mit unterschiedlich dicken Permalloy-Schichten hergestellt worden, deren Abmessungen in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt sind:

Länge l [μm]	Breite w [μm]	Bezeichnung
2400	80	5/5
1920	64	4/5
1440	48	3/5
960	32	2/5
480	16	1/5
Wafer Nr. 9570: t = 24 nm		Wafer Nr. 9630: t = 50 nm

Tabelle2: Größenangaben und Bezeichnungen der Teststruktur Femto7.

Nach der Vereinzelung wurden die Sensoren auf 8-polige Keramikträger aufgeklebt und gebondet. Für die Messungen standen von jedem Sensortyp 5 Exemplare zur Verfügung. Dadurch konnten etwaige Exemplarstreuungen bei der Interpretation der Meßergebnisse berücksichtigt werden.

4.2. Meßaufbau und Parameter

Die Sensor-Halbbrücken wurden mit zwei Metallfilmwiderständen zu Wheatstonebrücken komplettiert. Zusätzlich befand sich in dem Festwiderstandsweig ein Potentiometer zur Kompensation der Offsetspannung der Anordnung. Da lediglich ein Brückenweig aus magnetoresistiven Widerständen bestand, mußten die gemessenen Empfindlichkeiten mit zwei multipliziert werden, um die abgeleiteten Eigenschaften auf einen einzelnen Widerstandstreifen beziehen zu können. Die Sensoren befanden sich während der Messung in der in Kapitel 3.1. beschriebenen Abschirmkammer aus doppelwandigem Mumetall, um Störeinflüsse durch äußere Magnetfelder zu minimieren. Die Kontaktierung erfolgte über einen Meßadapter, der speziell für die Verwendung in der Meßkammer konstruiert worden war. Die Betriebsspannung wurde jeweils so eingestellt, daß sie einer Verlustleistung im Sensor von 50 mW entsprach, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit theoretischen Werten im Hinblick auf die unterschiedlichen Widerstände der Sensoren zu gewährleisten. Die Brückenausgangsspannung wurde dem Differenzeingang eines x-y-Schreibers zugeführt, dessen horizontale synchrone Bewegung mit dem Meßfeld durch Abgriff über einen niederohmigen Reihenvorwiderstand der Helmholtzspulen realisiert wurde. Die Amplitude des im Zeitverlauf dreieckförmigen Meßfeldes betrug 180 A/m.

Hierdurch war gewährleistet, daß der lineare hysteresefreie Bereich der Kennlinie nicht verlassen wurde. In einer Meßreihe zur Ermittlung der Empfindlichkeiten der Sensoren sind die Ausgangssignale in Abhängigkeit von einem Hilfsfeld in leichter Richtung aufgezeichnet worden. Nach einmaliger Ausrichtung der Magnetisierung im Sensorstreifen durch Anlegen eines äußeren Feldes von 2 kA/m wurde das Hilfsfeld in 200 A/m-Schritten bis zu einem Maximalwert von 1 kA/m sukzessive erhöht. Um temperaturbedingte Änderungen der Brückenspannung aufgrund der Erwärmung durch den Betriebsstrom so klein wie möglich zu halten, sind die Meßkurven erst nach 15 minütiger Wartezeit nach dem Einschalten aufgenommen worden.

4.3. Ermittlung des Widerstandshubes

Vor der Vereinzelung der Sensorchips sind die Wafer am Prober untersucht worden. Neben der Messung des Grundwiderstandes der Sensorstreifen konnten die Widerstandshübe durch Messung der Widerstände in Abhängigkeit von der Position eines drehbaren Dauermagneten bestimmt werden. Die hier ermittelten Werte dienen der Funktionskontrolle der Sensoren vor der aufwendigen Weiterverarbeitung und stellen nur grobe Richtwerte dar. Da sich die gemessenen Grundwiderstände ohne ein äußeres Magnetfeld etwa in der Mitte zwischen den Maximal- und Minimalwerten befanden, konnte davon ausgegangen werden, daß die Magnetisierung in den Sensorstreifen während der Herstellung durch Anlegen eines äußeren Feldes wie beabsichtigt in deren Längsrichtung eingepreßt worden war. Die stichprobenartig durchgeführten Messungen ergaben Widerstandshübe von 2,3 % bei den 24 nm dicken Permalloy-Schichten und 2,6 % bei den 50 nm dicken Schichten. Die angegebenen Widerstandshübe sind Eigenschaften der Permalloy-Schichten ohne den Einfluß der Barber Pole Strukturen, die zu einer Herabsetzung des Widerstandshubes durch die Winkelverteilung der Stromrichtungen in den Sensorstreifen führen. Dennoch waren die über direkte Widerstandsmessung erhaltenen Werte für die Hübe kleiner als die in der abgeschirmten Meßkammer ermittelten, da davon ausgegangen werden mußte, daß die untersuchten Sensorstreifen ohne vorherige Ausrichtung durch ein Hilfsmagnetfeld in leichter Richtung in Domänen zerfallen waren. Dadurch mußte bei den Voruntersuchungen am Prober in Kauf genommen werden, daß mit Hilfe des Dauermagneten nicht alle Bereiche der Sensorstreifen in dessen Magnetfeldrichtung gedreht werden und demzufolge nicht die maximal möglichen Widerstandshübe gemessen werden konnten.

Die an den aufgebondeten Halbbrücken gemessenen Grundwiderstände lagen in dem im Vorfeld abgeschätzten Bereich von 130 Ω bei den 24 nm dicken MR-Schichten und von 60 Ω bei den 50 nm dicken Schichten, wenn man von einem Flächenwiderstand von etwa 4 Ω bzw. 2 Ω für die jeweiligen Schichtdicken unter Berücksichtigung des

Einflusses der aus Aluminium bestehenden Barber Polen ausgeht. Auffällig in diesem Zusammenhang war die Differenz der Grundwiderstände zwischen den Sensorhalbbrücken aus verschiedenen breiten Streifen von einigen Prozent, was aufgrund der gleichen Geometrieverhältnisse (gleiche Anzahl von Widerstandsquadraten) nicht zu erwarten war. Die mit schmaler werdenden Streifen zunehmende Widerstandserhöhung kann nur zum Teil auf die längeren Zuleitungen zurückgeführt werden. Eine Überprüfung der Geometrie führte nicht zum Verständnis des höheren Widerstandes bei kleineren Abmessungen.

Wie die reziproke Empfindlichkeit der Sensorstreifen von einem Hilfsfeld abhängt, ist stellvertretend für die durchgeführten Meßreihen anhand von Abbildung 21 zu sehen:

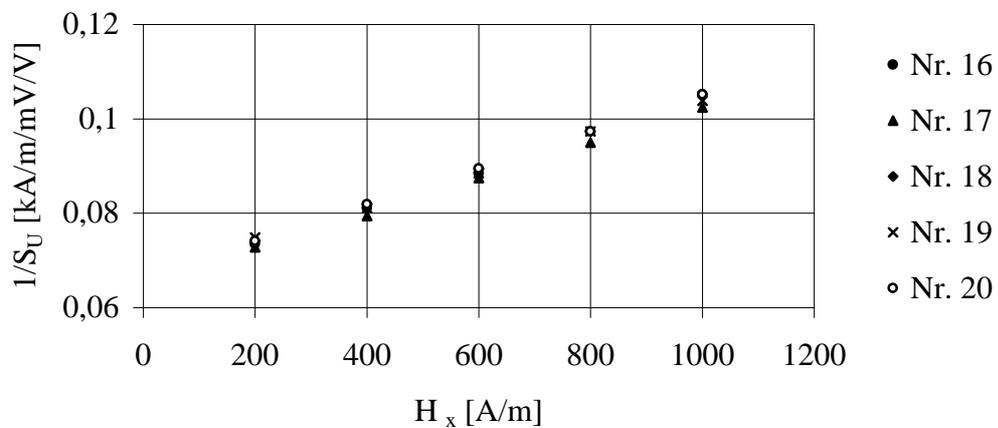


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen der reziproken Empfindlichkeit und einem Hilfsfeld gemessen an fünf Exemplaren der Femto7-Sensoren ($t = 50$ nm, Bezeichnung: 2/5).

Dargestellt sind die reziproken Empfindlichkeiten, die an fünf Exemplaren mit einer Permalloy-Schichtdicke von 50 nm und einer Streifenbreite von $32 \mu\text{m}$ gemessen wurden. Man erkennt, daß die einzelnen Sensoren trotz gleicher Geometrieparameter in ihrer Empfindlichkeit leicht voneinander abweichen. Diese in allen durchgeführten Messungen beobachteten Streuungen können zum größten Teil auf die unterschiedliche Position der einzelnen Sensoren auf dem Wafer während der Herstellung und der damit einhergehenden variierenden Schichtdicke zurückgeführt werden. Eine weitere Ursache für die Streuungen könnte sein, daß die fünf verschiedenen breiten Halbbrücken nicht auf demselben 8-poligen Keramikträger aufgebondet werden konnten. Um alle fünf Halbbrücken zu kontaktieren, wären insgesamt 11 Anschlußpads nötig gewesen. Deshalb sind von jedem Chip nur zwei bzw. drei Halbbrücken auf einem Keramikträger gebondet worden und damit der Messung zugänglich gewesen.

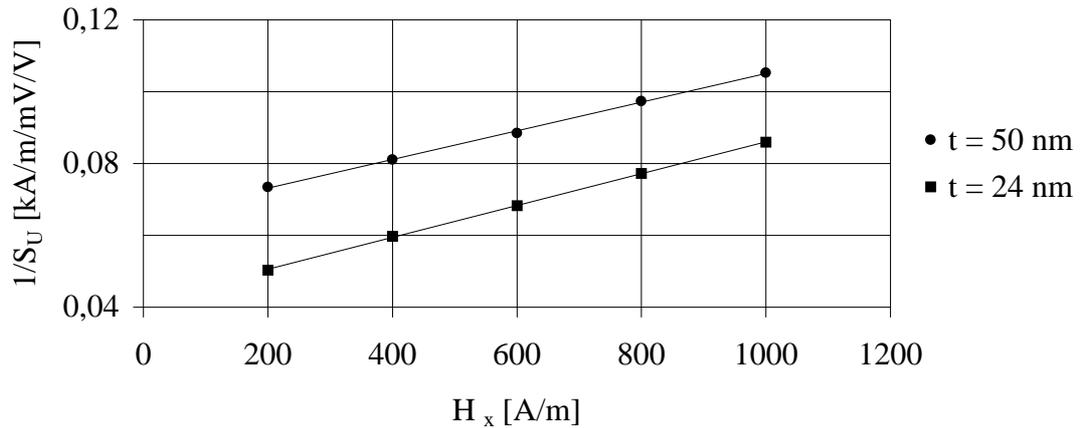


Abbildung 22: Vergleich der reziproken Empfindlichkeiten in Abhängigkeit von einem Hilfsmagnetfeld in leichter Richtung gemessen an Femto7-Sensoren gleicher Breite ($w = 32 \mu\text{m}$) und unterschiedlicher Schichtdicke ($t = 24 \text{ nm}$ und $t = 50 \text{ nm}$) inklusive der Regressionsgeraden zur Ermittlung der Widerstandshübe.

Trägt man wie in obiger Abbildung die reziproke Empfindlichkeit gegen das von außen angelegte Hilfsmagnetfeld auf und führt anschließend eine lineare Regression durch, so liegen die Meßpunkte erwartungsgemäß auf der sich ergebenden Regressionsgeraden. Man wählt die reziproke Darstellung der Empfindlichkeit, um folgende lineare Gleichung, die sich aus Gleichung (50) ergibt, auswerten zu können:

$$\frac{1}{S_U} = \frac{1}{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)} \cdot H_x + \frac{M_s \cdot \frac{t}{w} + H_k}{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)}. \quad (51)$$

Da der Abstand der Barber Pole auf den MR-Streifen in gleichem Maße wie alle anderen Geometrieparameter variiert wurde, kann ein für alle Sensoren gültiger Winkelkorrekturfaktor angegeben werden:

$$\cos(2 \cdot \delta) \approx 0,884. \quad (52)$$

Der reziproke Wert der Steigung der Regressionsgeraden in Abbildung 22 entspricht nach Gleichung (51) unter Berücksichtigung des Winkelkorrekturfaktors aus Gleichung (52) dem Widerstandshub.

Dicke Permalloy	Widerstandshub
24 nm	2,6 %
50 nm	3,0 %

Tabelle 3: An der Teststruktur Femto7 ermittelte durchschnittliche Widerstandshübe.

Hierbei lagen die Unterschiede zwischen den einzelnen Exemplaren gleicher Streifenbreite und -länge in der 2. Nachkommastelle. Entsprechend geringe Abweichungen wurden im Vergleich von Sensoren gleicher Dicke, aber unterschiedlicher Streifenbreite und -länge, festgestellt. Die Größe der gemessenen Widerstandseffekte steht im Einklang mit den aus der Literatur bekannten Werten (siehe z. B. [20]).

Weiterhin ist in Abbildung 22 zu erkennen, daß die 50 nm dicken Schichten trotz ihres größeren Widerstandshubes eine kleinere Empfindlichkeit aufweisen. Dies hängt in erster Linie mit dem für dickere Schichten zunehmenden Entmagnetisierungsfaktor und der damit verbundenen Zunahme der Entmagnetisierungsfeldstärke zusammen. Zusätzlich kommt es bei dicker werdenden Schichten zu einer Abnahme des Flächenwiderstandes, was einer möglichst geringen Stromaufnahme bei gleichzeitig ausreichender Signalgröße entgegensteht.

Der sich aus Gleichung (51) ergebende y-Achsen Schnittpunkt enthält sowohl die Sättigungsmagnetisierung als auch die Anisotropiefeldstärke in einem Term und kann somit nicht zur direkten Berechnung dieser beiden Größen herangezogen werden.

4.4. Bestimmung der Sättigungsmagnetisierung und der Anisotropiefeldstärke

Um zu verdeutlichen, wie aus den gemessenen Werten Informationen über die Sättigungsmagnetisierung zu erhalten sind, wird Gleichung (50) folgendermaßen umgestellt:

$$\frac{1}{S_U} = \frac{M_s \cdot t}{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)} \cdot \frac{1}{w} + \frac{H_k + H_x}{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)}. \quad (53)$$

In Gleichung (53) stellt der Kehrwert der Streifenbreite die abhängige Variable in der linearen Gleichung dar. Da die gemessenen Sensorstreifen fünf verschiedene Breiten aufwiesen, ist eine Darstellung der reziproken Empfindlichkeiten als Funktion der Streifenbreite möglich:

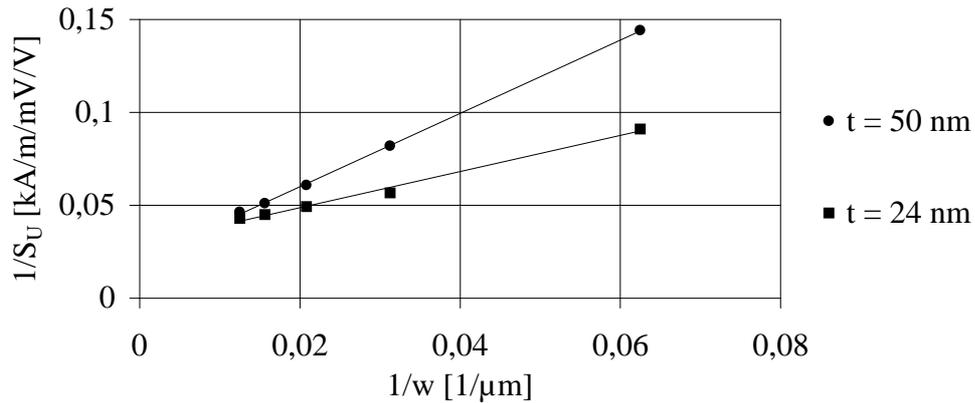


Abbildung 23: Darstellung der reziproken Empfindlichkeiten in Abhängigkeit von der Sensorstreifenbreite gemessen an Femto7-Sensoren unterschiedlicher Schichtdicken ($t = 24 \text{ nm}$ und $t = 50 \text{ nm}$) bei einem konstanten Hilfsfeld in leichter Richtung von $H_x = 400 \text{ A/m}$.

Die in Abbildung 23 angegebenen Empfindlichkeiten wurden bei einem konstanten Hilfsfeld $H_x = 400 \text{ A/m}$ gemessen. Die Meßpunkte für die 50 nm dicken Schichten liegen fast exakt auf der miteingezeichneten Regressionsgeraden. Bei den 24 nm dicken Schichten weichen die Meßpunkte für die beiden breiteren Streifen von der erwarteten Geraden ab, da sie eine zu geringe Empfindlichkeit aufweisen. Der Grund hierfür könnte in den im Verhältnis zum Gesamtchip relativ langen Streifen liegen, die fast bis an die Chipbegrenzung heranragen. In den Randbereichen der Sensorchips reagieren die Streifen mit zunehmender Schichtdicke umso stärker auf mechanischen Streß, der z. B. durch den mit der Vereinzelung einhergehenden Sägeprozeß hervorgerufen wird, je dünner sie sind. Die folgende Abbildung 24 zeigt, wie die Empfindlichkeit von der Streifenbreite bei verschiedenen Hilfsmagnetfeldern abhängt:

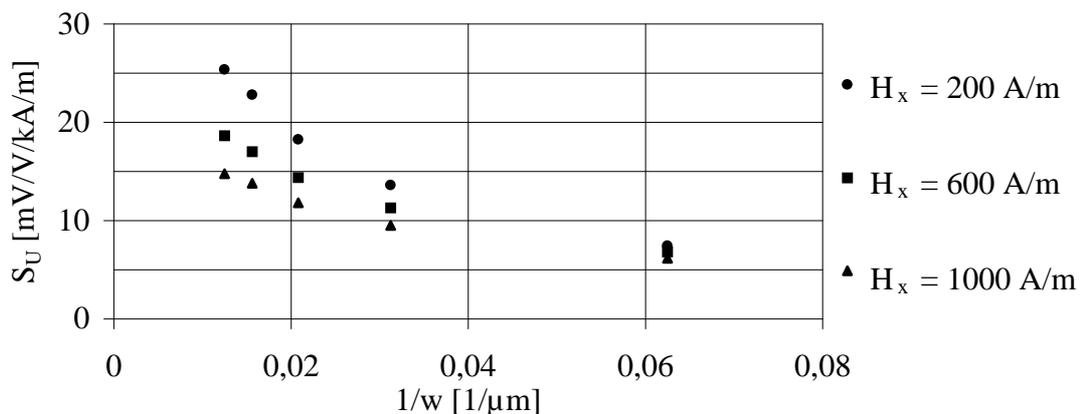


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Empfindlichkeit und Streifenbreite gemessen an 50 nm dicken Femto7-Sensoren bei unterschiedlichen Hilfsmagnetfeldern.

Es wurden Sensoren mit einer Schichtdicke von 50 nm untersucht, deren Streifenbreite zwischen $16 \mu\text{m}$ und $80 \mu\text{m}$ variierte. Bei gleichbleibender Streifenbreite sinkt

erwartungsgemäß die gemessene Empfindlichkeit mit zunehmender Hilfsfeldstärke. Dieser Effekt macht sich, wie von Gleichung (50) ableitbar, besonders stark bei den breiteren Streifen bemerkbar.

Die Auswertung der Regressionsgeraden, wie sie z. B. in Abbildung 23 eingezeichnet sind, ergaben unter Zuhilfenahme der Ergebnisse für die Widerstandshöhe und dem Zahlenwert für den Winkelkorrekturfaktor den Wert für die Sättigungsmagnetisierung $M_s = 1000 \pm 50 \text{ kA/m}$ und den Wert für die Anisotropiefeldstärke $H_k = 210 \pm 20 \text{ A/m}$. Für alle Berechnungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit sind diese durch die Messungen ermittelten Schichtparameter verwendet worden.

Die folgende Abbildung 25 zeigt den berechneten Verlauf der normierten Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Sensorstreifenbreite, der sich unter Berücksichtigung der gemessenen Werte des Widerstandshubes, der Anisotropiefeldstärke und der Sättigungsmagnetisierung ergibt:

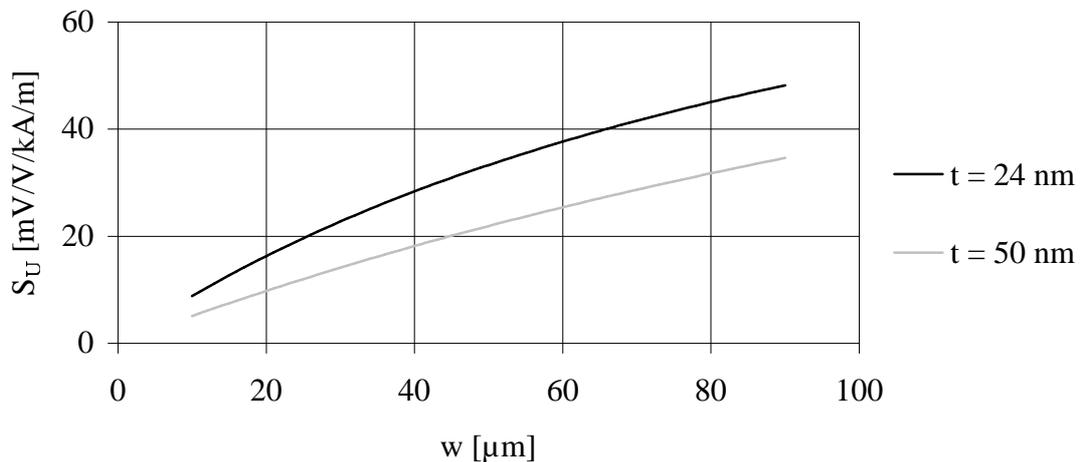


Abbildung 25: Berechnete normierte Empfindlichkeit unter Berücksichtigung der ermittelten Werte des Widerstandshubes, der Sättigungsmagnetisierung und der Anisotropiefeldstärke in Abhängigkeit von der Streifenbreite.

Die schwarze Linie zeigt den Empfindlichkeitsverlauf für 24 nm dicke Schichten und die grau dargestellte Linie den Verlauf für 50 nm dicke Schichten. Die Magnetfeldstärke in leichter Richtung wurde bei der Berechnung für beide Schichtdicken gleich Null gesetzt, um die maximal mögliche Empfindlichkeit darzustellen.

4.5. Zusammenfassung der Meßergebnisse an der Teststruktur Femto7

Um einige Schichtparameter der in dieser Arbeit verwendeten magnetoresistiven Sensoren zu bestimmen, wurde ein Testsensor entwickelt, auf dem sich fünf Halbbrücken unterschiedlicher Geometrie befanden. Die mit Barber Polen ausgestatteten Halbbrücken wurden mit zwei verschieden dicken Permalloy-Schichten hergestellt. Die Sensoren, die mit 24 nm dickem magnetoresistiven Material gefertigt wurden, wiesen einen Widerstandshub von 2,6 % auf. An den Proben mit 50 nm dicken magnetfeldabhängigen Schichten konnte ein Widerstandshub von 3,0 % ermittelt werden. Für die Sättigungsmagnetisierung M_s ergab sich ein Wert von 1000 ± 50 kA/m. Die Anisotropiefeldstärke H_k betrug 210 ± 20 A/m. Die ermittelten Schichtparameter wurden in allen folgenden Berechnungen übernommen.

5. Magneto-resistive Dreischichtsysteme mit Flußkonzentratoren

Für höchstempfindliche magneto-resistive Sensoren sind auf der Basis der im Vorfeld dieser Arbeit angestellten theoretischen Betrachtungen und der daraufhin durchgeführten Untersuchungen neue Konzepte entwickelt worden. Da bei MR-Sensoren das zur Detektion von Magnetfeldern zur Verfügung stehende effektive Meßvolumen aufgrund der geringen Abmessungen sich im Bereich von Kubikmikrometern bewegt, sind für höchstempfindliche Sensoren Flußkonzentratoren notwendig [69]. Im Laufe der Untersuchungen sind verschiedene Ausführungsformen von Flußkonzentratoren, die sich in Größe, Form und Material unterscheiden, eingesetzt worden. Die mannigfaltigen Einflußmöglichkeiten eines Flußkonzentrators auf das Verhalten eines Sensors führen dazu, daß man die Kombination von Sensor und Flußkonzentrator als ein nicht trennbares komplexes Sensorsystem betrachten muß. Einen weiteren Schwerpunkt stellte die Suche nach einer geeigneten Sensorgeometrie dar. Hierbei stand nicht nur die geforderte Kombinationsmöglichkeit mit Flußkonzentratoren, sondern auch eine möglichst große Empfindlichkeit der Sensorstruktur sowie eine niedrige Auflösungsgrenze im Vordergrund. Die Empfindlichkeitsgleichung (40), die keine Einschränkung der Sensorgeometrie beinhaltet, läßt den Schluß zu, daß kreisförmige Schichten die für höchstempfindliche MR-Sensoren geeignetste Form darstellen: Sie besitzen keine Formanisotropie, da für Kreise die Entmagnetisierungsfaktoren in allen Richtungen in der Kreisebene gleich groß sind [41]. Außerdem läßt die zur Verfügung stehende Schichttechnologie Strukturierungen im μm -Bereich zu, wodurch ausreichend kleine Spalte zwischen den Sensorbereichen und den später anzubringenden Flußkonzentratoren möglich sind. Die folgende Abbildung zeigt den Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit eines Hilfsfeldes von aus kreisförmigen Bereichen durch Hintereinanderschaltung zusammengesetzten Sensoren im Vergleich zu einfachen Sensorstreifen:

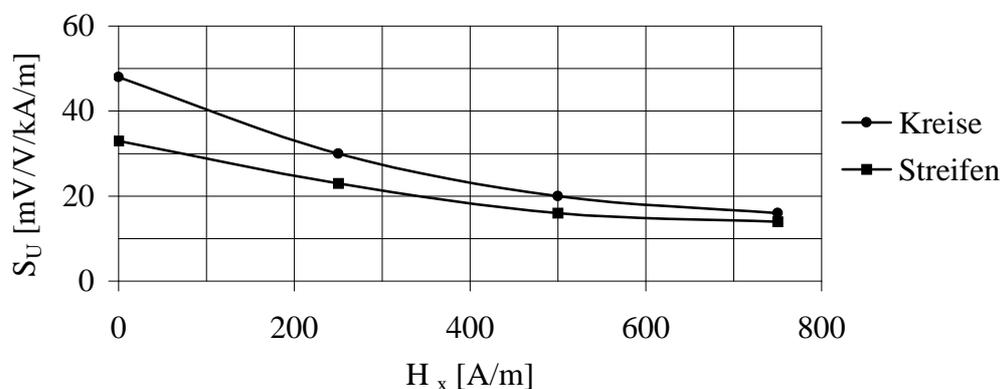


Abbildung 26: Empfindlichkeiten in Abhängigkeit von einem Hilfsfeld kreisförmiger Schichten im Vergleich zu langen Streifen mit einer Schichtdicke von 11 nm [50].

Die Messungen in Abbildung 26 wurden an hintereinander angeordneten kreisförmigen Strukturen mit einem Durchmesser von $100\ \mu\text{m}$ mit Barber Polen vorgenommen. Zum Vergleich wurden Empfindlichkeitswerte langer Streifen (ebenfalls mit Barber Polen) mit Streifenbreite $w = 100\ \mu\text{m}$, die sich auf dem selben Chip befanden, herangezogen. Die Länge des Streifens entsprach der Gesamtlänge der hintereinander angeordneten kreisförmigen Strukturen, was eine Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der gemessenen Werte war. Aus Abbildung 26 geht hervor, daß kreisförmige Strukturen, je nach Größe des Hilfsfeldes, eine bis zu 25 % größere Empfindlichkeit aufweisen. Um in einer sich anschließenden Entwicklungsstufe Flußkonzentratoren von beiden Seiten mit möglichst kleinem Spalt an die Sensorschichten heranbringen zu können, wäre eine wesentliche Verkleinerung der Kreisdurchmesser nötig gewesen. Wurden die Durchmesser der verwendeten Kreise weiter verkleinert, so stellte sich heraus, daß die Empfindlichkeit der untersuchten Strukturen entgegen den Erwartungen ebenfalls abnahm:

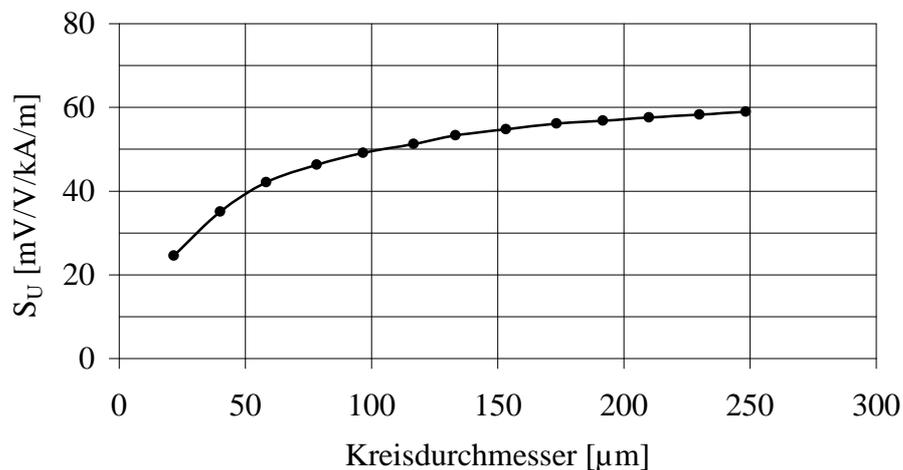


Abbildung 27: Empfindlichkeiten kreisförmiger Schichten in Abhängigkeit vom Kreisdurchmesser [50].

Mit kleiner werdendem Durchmesser gewinnt das Entmagnetisierungsfeld der einzelnen Kreise zunehmend an negativem Einfluß auf deren Einbereichsverhalten, was sich deutlich durch die in Abbildung 27 dargestellte starke Abnahme der Empfindlichkeit bemerkbar macht. Somit erwiesen sich kreisförmige Strukturen als ungeeignet für die Herstellung höchstempfindlicher MR-Sensoren.

In der nächsten Teststruktur Femto2 hatten die magnetoresistiven Bereiche eine schiffchenförmige Gestalt (an den Enden angespitzte Ellipsen). Diese Form läßt einerseits eine im Vergleich zu einfachen Streifen höhere Empfindlichkeit erwarten und andererseits erschwert diese Form die Bildung von Domänen, welche die Ursache für ein erhöhtes Rauschen im Ausgangssignal sein können [50]. Der Sensorstreifen bestand aus einer Vielzahl hintereinandergeschalteter MR-Bereiche mit einer Dicke von $17\ \text{nm}$.

Eine Kontaktfläche in der Mitte der Anordnung ermöglichte den Einsatz als Halbbrücke. Die Stromverdrehung wurde durch das Aufbringen von je zwei Barber Pole Streifen pro MR-Bereich realisiert. Der gesamte Sensor befand sich in einem Spalt zwischen zwei rhombischen Antennenflächen, die, durch eine 300 nm dicke Isolationsschicht aus Siliziumnitrid von der Sensorschicht getrennt, ebenfalls aus Permalloy bestanden. Die Isolationsschicht ermöglichte eine Überlappung der Dünnschichtantennen mit den Sensorbereichen, wodurch der magnetische Widerstand für den magnetischen Fluß gering gehalten werden konnte. Obwohl die Sensoren in einem äußeren Magnetfeld Widerstandsänderungen von bis zu 2 % aufwiesen, lag der Hub des Ausgangssignals bezogen auf die Betriebsspannung lediglich bei 0,55 %, was unter anderem auf die relativ zu den magnetfeldempfindlichen Schichten großen Barber Pole Bereiche aus gut leitfähigem Aluminium zurückzuführen ist. Die magnetfeldverstärkende Wirkung der Dünnschichtantennen kann durch den Verstärkungsfaktor, der sich aus dem Quotient der Empfindlichkeit mit und ohne Antennen ergibt, beschrieben werden. Messungen mit Stabilisierungsfeldern an Proben mit und ohne Dünnschichtantennen ergaben maximale Verstärkungsfaktoren von 9. Nach dem Unterschreiten einer Hilfsfeldstärke von 300 A/m konnten wegen auftretender Hysterese im Ausgangssignal keine Untersuchungen durchgeführt werden. Offensichtlich hatten die Antennen in diesem Punkt bezogen auf die MR-Bereiche eine abschirmende Wirkung und das in den Antennenflächen durch das Hilfsfeld erzeugte Feld war groß genug, um Teile der schiffchenförmigen Sensorbereiche in die dem angelegten Stabilisierungsfeld entgegengesetzte Richtung zu drehen. Dadurch war eine starke Abnahme des Ausgangssignals in Verbindung mit einer Hysterese zu beobachten. Die Dünnschichtantennen konnten nur bis zu einer Dicke von 100 nm aufgebracht werden, da bei Überschreitung dieser Grenze die Magnetisierung in den Antennen infolge von Magnetostriktion in Meßrichtung gedreht wurde. Da dickere Antennenschichten bereits ohne ein äußeres Feld bis zur Sättigung in Meßrichtung magnetisiert waren, konnte von ihnen eine feldverstärkende Wirkung nicht erwartet werden. Außerdem führte eine Erhöhung der Antennenschichtdicken wegen den zunehmenden mechanischen Spannungen zu einer Ablösung von der Unterlage. Eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit war durch das zusätzliche Aufkleben von 25 µm dicken Folienantennen (VITROVAC 6025 F) von 10 mm Länge und 3 mm Breite zu erreichen. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der reziproken Empfindlichkeit in Abhängigkeit von einem Hilfsfeld in leichter Richtung:

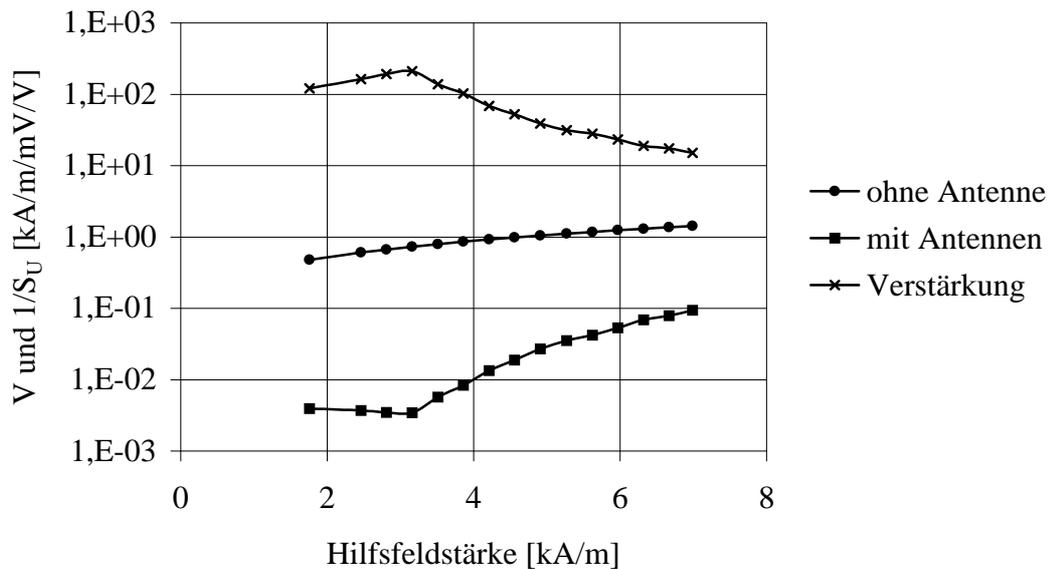


Abbildung 28: Magnetfeldverstärkende Wirkung von zusätzlich aufgeklebten Folienantennen gemessen an Proben der Teststruktur Femto2 als Funktion eines Hilfsfeldes [70].

Dargestellt sind die reziproken Empfindlichkeiten von Proben ohne jegliche Antenne im Vergleich zu den reziproken Empfindlichkeiten von Sensoren mit Dünnschicht- und Folienantennen. Zusätzlich ist die Magnetfeldverstärkung V eingezeichnet, die bei einem Hilfsfeld von 3 kA/m einen maximalen Wert von etwa 200 annimmt. Eine Verkleinerung des Hilfsfeldes führte dazu, daß die eingestellte Magnetisierung in den schiffchenförmigen Bereichen instabil wurde, was sich durch ein hysteresebehaftetes Ausgangssignal bemerkbar machte. Da der Großteil des Hilfsfeldes in die weichmagnetischen Folienantennen hineingezogen wurde und dadurch nur ein Teil des Stabilisierungsfeldes bei den MR-Bereichen ankam, trat die beobachtete Instabilität bis zu den relativ hohen Feldstärken auf. Die Instabilität bei kleineren Hilfsfeldern machte sich zusätzlich durch erhöhte Rauschwerte im niederfrequenten Bereich bemerkbar [71].

5.1. Konzept eines Dreischichtsystems mit integrierter Antenne

Die im Vorfeld dieser Arbeit angefertigten Strukturen wiesen einige Nachteile im Hinblick auf höchstempfindliche Sensoren auf. Zum einen sind hier die zu geringen Widerstandshübe, welche die Empfindlichkeit negativ beeinflussen, und zum anderen das unzureichende Einbereichsverhalten bei kleinen Hilfsfeldern zu nennen. Ein zu geringer Überlappungsbereich zwischen Antenne und magnetoresistiver Schicht war Ursache für die kleiner als erwartet ausgefallene Antennenverstärkung. Aus den Messungen ging außerdem hervor, daß eine weitere Empfindlichkeitszunahme nur durch die Kombination von Dünnschicht- und Folienantenne zu erreichen ist, da sich Dünnschichtantennen aus Permalloy ab einer Dicke von etwa 100 nm von dem Substrat zu lösen beginnen und ausgeprägte Hystereseerscheinungen zur Folge haben. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wurde eine neue Sensorstruktur entwickelt, die sich insbesondere durch die schichtweise übereinander angeordneten magnetoresistiven Bereiche von den vorherigen Sensoren unterschied. Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Dreischichtsystems:

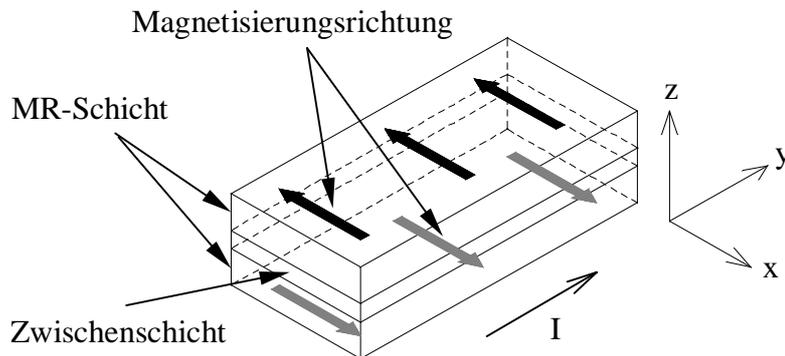


Abbildung 29: Aufbau eines Dreischichtsystems mit einer nichtmagnetischen Zwischenschicht.

Das Dreischichtsystem besteht aus zwei Permalloyschichten gleicher Dicke und einer dazwischenliegenden nichtmagnetischen Schicht. Das Besondere an dieser Anordnung ist, daß die bei der Herstellung eingeprägte Vorzugsrichtung der Magnetisierung quer zur Streifenlängsrichtung liegt. Die zweite MR-Schicht ist notwendig, damit die Magnetisierungen aufgrund der Formanisotropie nicht in Streifenlängsrichtung gedreht werden. Sind die beiden in Abbildung 29 eingezeichneten MR-Schichten durch eine geeignete Zwischenschicht magnetisch voneinander entkoppelt, stabilisieren sich die Magnetisierungen gegenseitig (Streufeldkopplung) und stellen sich quer zur Streifenlängsrichtung, aber in entgegengesetzter Richtung zueinander, ein. Der Strom, der in Streifenlängsrichtung fließt, bildet ohne ein äußeres Magnetfeld einen Winkel

von 90° mit den Magnetisierungsrichtungen. Dadurch befindet sich der ohmsche Widerstand des Schichtpaketes im Minimum. Der Sensorstrom erzeugt ein Magnetfeld, das die Quereinstellung der Magnetisierung unterstützt, so daß zusätzliche Hilfsfelder nicht erforderlich sind.

Wie sich die Magnetisierungsrichtungen durch ein in Streifenlängsrichtung angelegtes Magnetfeld aus ihrer Ruhelage heraus drehen, ist in Abbildung 30 dargestellt:

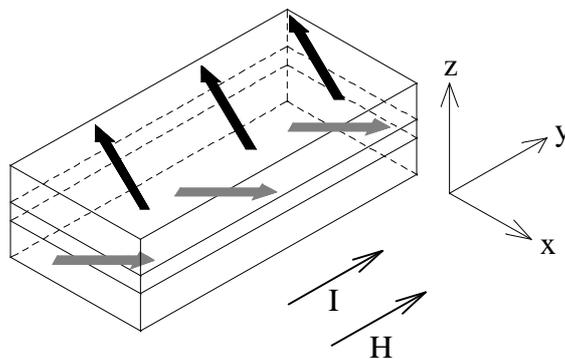


Abbildung 30: Schematische Darstellung eines Dreischichtstreifens unter dem Einfluß eines Magnetfeldes in Streifenlängsrichtung.

Die Magnetisierungsrichtungen in der oberen und unteren Schicht nähern sich mit zunehmendem äußeren Magnetfeld so lange einander an, bis sie vollständig in dessen Richtung gedreht sind. Stimmen die Stromfluß- und Magnetisierungsrichtungen überein, besitzt das Schichtpaket seinen maximalen Widerstand. Die mit dem variierenden äußeren Magnetfeld einhergehende Widerstandsänderung ergibt eine annähernd quadratische Kennlinie, wie sie in Abbildung 32 schematisch dargestellt ist.

Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß flußverstärkende Antennenschichten ohne Spalt an die Streifenenden heranragen dürfen, ohne dabei den Widerstand des Sensors zu verringern, welcher an dem Dreischichtpaket allein vorhanden ist:

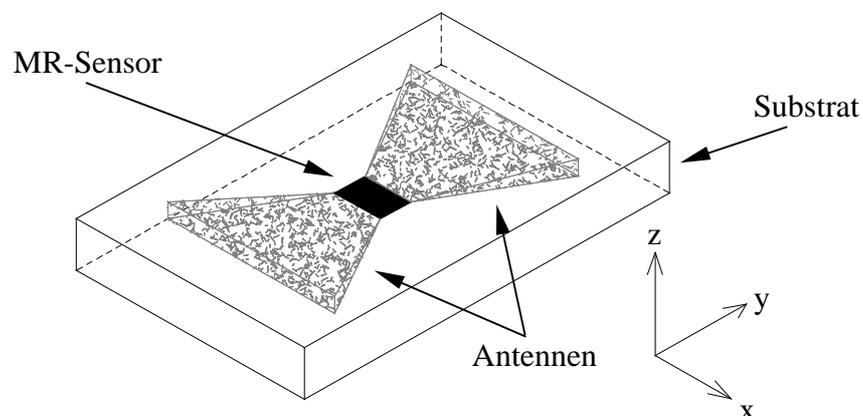


Abbildung 31: Dreischichtpaket mit Dünnschichtantennen ohne Spalt zwischen MR-Bereichen und Antennen.

Dieses Konzept beinhaltet neben dem Einsatz von Dünnschichtantennen die Möglichkeit, eine Kombination aus Dünnschicht- und zusätzlichen hochpermeablen Folienantennen als flußverstärkende Magnetfeldkonzentratoren einzusetzen.

Damit der von den Flußkonzentratoren gesammelte magnetische Fluß nicht aufgrund eines zu großen magnetischen Widerstandes des Streifenpaketes wieder in die Umgebung austritt, dürfen diese nicht beliebig lang sein. Da kürzere Streifenpakete einen kleineren elektrischen Widerstand besitzen, sind mehrere geometrisch parallel angeordnete Streifenpakete über Leitbahnen aus Aluminium in Reihe zu schalten. Wird an der Verbindungsstelle bei der Hälfte der Streifenpakete eine Anschlußstelle vorgesehen, steht eine magnetoresistive Halbbrücke zur Verfügung.

Die folgende Abbildung zeigt die Widerstandskennlinie in Abhängigkeit von einem Meßfeld:

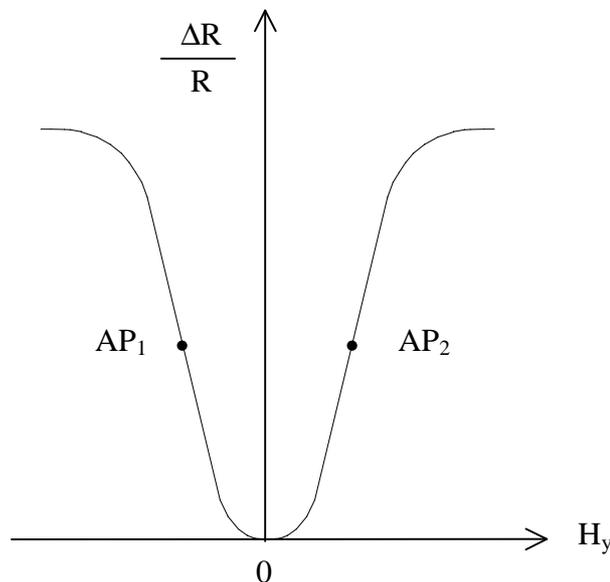


Abbildung 32: Widerstandsänderung in Abhängigkeit von einem Meßfeld bei einem Dreischichtsystem.

Die schematische Kennlinie in Abbildung 32 zeigt, daß ein Dreischichtsystem bei kleinen Feldstärken nur eine sehr geringe und einem äußeren Feld nicht linear folgende Widerstandsänderung hervorbringt. Um aus der Reihenschaltung der Streifenpakete am Verbindungspunkt der Gruppen, die jeweils einen Teilwiderstand der Halbbrücke bilden, eine größere magnetfeldabhängige Ausgangsspannung zu erhalten, müssen die beiden Gruppen in die in Abbildung 32 eingezeichneten Arbeitspunkte AP_1 bzw. AP_2 gebracht werden. Das für die Arbeitspunkteinstellung notwendige Magnetfeld kann von einem Strom erzeugt werden, der durch einen zusätzlich im rechten Winkel über die Streifenpakete aufgebrauchten Steuerleiter aus Aluminium fließt. Das Prinzip der Realisierung dieser Arbeitspunkteinstellung durch einen Steuerleiter ist in Abbildung 33 dargestellt:

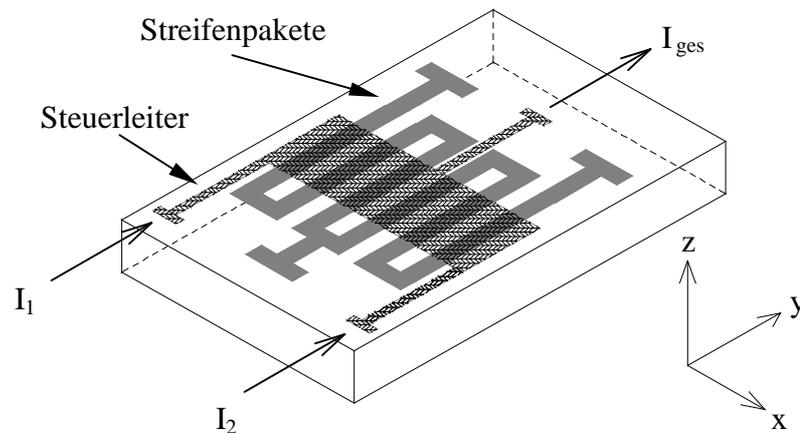


Abbildung 33: Streifenpakete mit Steuerleiter zur Arbeitspunkteinstellung.

Die beiden Arbeitspunkte können getrennt voneinander über die Stromstärke I_1 bzw. I_2 eingestellt werden, sofern die beiden Steuerströme in entgegengesetzter Richtung über die Schichtpakete fließen.

5.2. Materialsuche für die Zwischenschicht

Der nächste Entwicklungsschritt war die Suche nach einem geeigneten Material für die Zwischenschicht. Diese Zwischenschicht muß aus einem nichtmagnetischen Material bestehen und zudem elektrisch leitfähig sein, da aus technologischen Gründen eine getrennte Kontaktierung der beiden Permalloyschichten nicht möglich war. Die Kontaktierung für den Sensorstrom konnte nur an der obersten MR-Schicht erfolgen, die den Strom über die Zwischenschicht in die darunterliegende MR-Schicht weiterleitet. Entscheidend bei der Wahl des Materials war die magnetische Entkopplung der beiden äußeren Schichten, die sich durch einen minimalen Widerstand des Dreischichtsystems ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes bemerkbar macht. Die experimentelle Ermittlung des Widerstandsminimums stellte das durch Messung überprüfbar Kriterium für die magnetische Entkopplung dar. Solange die Magnetisierung in den beiden Permalloyschichten noch gekoppelt war, richtete die bei langen Streifen in Längsrichtung wirkende Formanisotropie die Magnetisierungen bevorzugt in Streifenlängsrichtung aus, was einen sich in der Nähe seines Maximalwertes befindlichen ohmschen Widerstand des Dreischichtpaketes zur Folge hatte. Für die Materialsuche wurden die mit den bereits vorhandenen Maskensätzen der Teststruktur 2 [50] gefertigten Halbbrücken aus $10\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ breiten Streifen ohne Barber Pole benutzt. Die Dicke der beiden Permalloyschichten betrug bei allen untersuchten Zwischenschichtmaterialien jeweils $24\ \text{nm}$. Versuche mit Titan und Chrom als Zwischenschichtmaterialien bis zu einer Dicke von $50\ \text{nm}$ zeigten, daß noch

keine Entkopplung eingetreten war. Auf eine weitere Erhöhung der Zwischenschichtdicke wurde im Hinblick auf den Gesamtwiderstand des Dreischichtpaketes verzichtet. Dieser nimmt mit steigender Dicke der leitfähigen Zwischenschicht ab, da die übereinander liegenden Schichten elektrisch betrachtet eine Parallelschaltung von Widerständen darstellen. Außerdem führt ein wachsender Dickenanteil der Zwischenschicht am Gesamtpaket zu einer Abnahme des Widerstandshubes des Dreischichtsystems, da der Widerstand der Zwischenschicht magnetfeldunabhängig ist und deshalb keinen Beitrag zur Widerstandsänderung leisten kann. Als nächstes wurde Platin unterschiedlicher Dicke eingesetzt. Die Entkopplung der beiden magnetoresistiven Permalloyschichten konnte mit Platin als Zwischenschichtmaterial oberhalb einer Dicke von 30 nm beobachtet werden. Eine für diese Versuchsreihe typische Kennlinienschar ist in der folgenden Abbildung für eine Zwischenschichtdicke von 50 nm dargestellt:

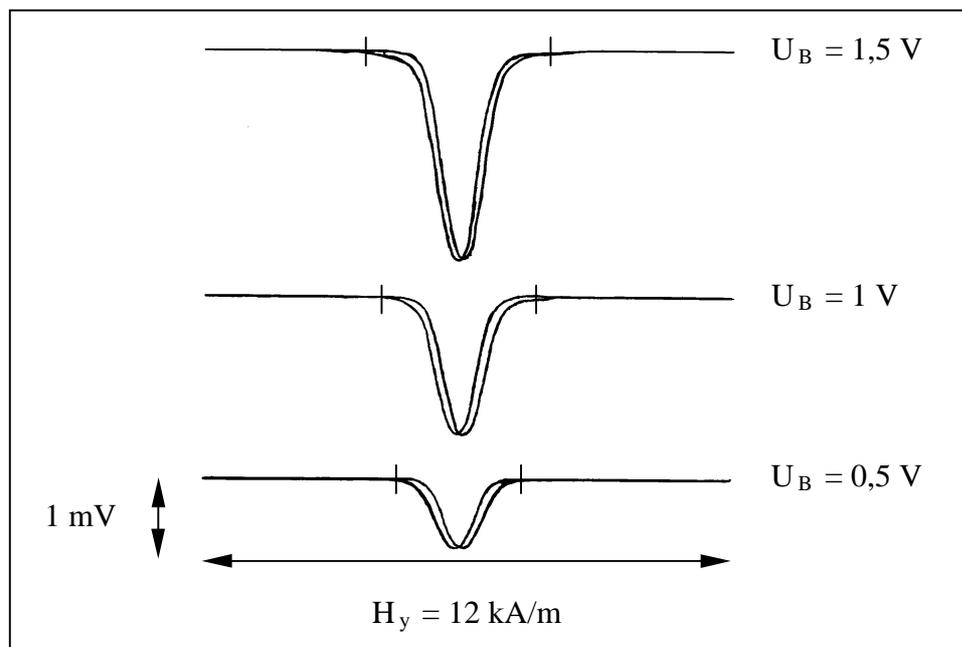


Abbildung 34: Widerstandskennlinien in Abhängigkeit eines Meßfeldes in Streifenlängsrichtung von $100 \mu\text{m}$ breiten Streifen eines Dreischichtpaketes mit 50 nm dicker Platinzwischenschicht bei unterschiedlichen Betriebsspannungen.

Die $100 \mu\text{m}$ breiten Streifenpakete waren durch Festwiderstände zu einer Vollbrücke komplettiert worden. In Abbildung 34 sind die Widerstandskennlinien bei unterschiedlichen Betriebsspannungen zu sehen. Ohne ein äußeres Magnetfeld befinden sich die Streifenpakete in ihrem Widerstandsminimum. Sowohl ein in positive, als auch ein in negative Richtung parallel zur Längsachse des Streifenpaketes angelegtes Magnetfeld läßt den Widerstand anwachsen. Man erkennt, daß mit zunehmendem Betriebsstrom der

lineare Meßbereich größer wird, was auf die damit verbundene stabilisierende Wirkung des von dem Sensorstrom erzeugten Magnetfeldes in Bezug auf die ursprünglich eingeprägte Magnetisierung zurückzuführen ist.

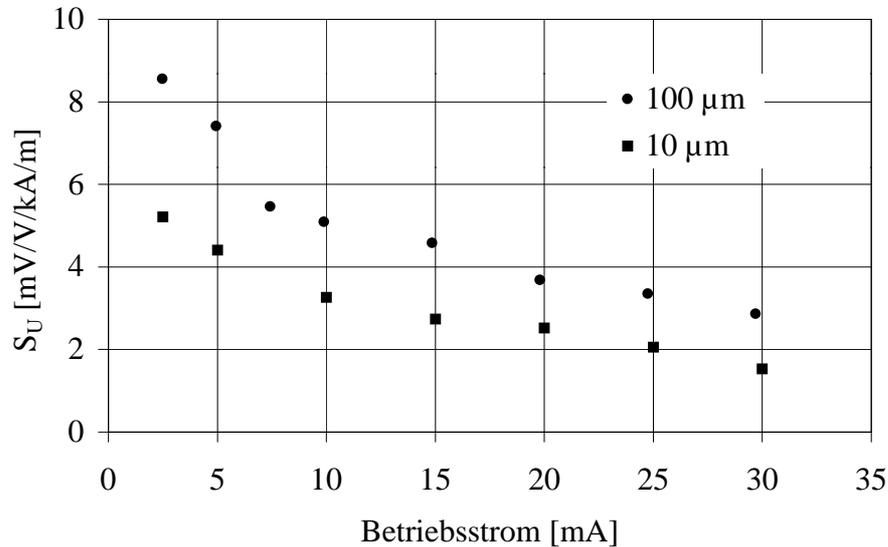


Abbildung 35: Empfindlichkeitsverlauf bei Dreischichtsystemen mit einer 30 nm dicken Zwischenschicht aus Platin in Abhängigkeit vom Betriebsstrom.

In Abbildung 35 ist der Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit vom Betriebsstrom dargestellt, der an 10 μm und 100 μm breiten Streifenpaketen mit einer 30 nm dicken Zwischenschicht aus Platin gemessen wurde. Die schmalere Streifenpakete waren um den Faktor 10 kürzer als die breiteren. Das Stabilisierungsfeld in Streifenquerrichtung bei gleichem Betriebsstrom war demzufolge bei den schmalere Streifenpaketen größer, was eine kleinere Empfindlichkeit zu Folge hatte. Trägt man die reziproke Empfindlichkeit gegen den Betriebsstrom auf, legt eine Regressionsgerade durch die Meßwerte und rechnet den durch Extrapolation erhältlichen Schnittpunkt mit der Ordinatenachse bei Betriebsstrom Null durch Kehrwertbildung um, so ergibt sich die für den Sensor theoretisch maximal erreichbare Empfindlichkeit. Für 10 μm breite Streifen ergibt sich eine maximal mögliche Empfindlichkeit von 25 mV/V/kA /m und für 100 μm breite erhält man den Wert 40 mV/V/kA/m als theoretische Grenze. Die untersuchten Proben zeigten beim wiederholten Durchfahren der Kennlinie eine reproduzierbare Hysterese, die bei 10 μm breiten Streifenpaketen deutlich ausgeprägter als bei den 100 μm breiten war. Dieses Nachhinken des Widerstandes deutet darauf hin, daß sich in den Schichtpaketen Domänen gebildet hatten, die vom Betriebsstrom allein nicht aus den Schichten zu verdrängen waren. Da einerseits, wie in Abbildung 35 gezeigt, die Empfindlichkeit mit zunehmendem Betriebsstrom abnimmt und andererseits ein noch größerer Betriebsstrom zu einer übermäßigen Temperaturerhöhung des Sensors führt, konnte dieser nicht weiter erhöht werden. Eine Verbesserung im

Hystereseverhalten beim kompletten Durchfahren der Kennlinie konnte nur durch zusätzliche Hilfsfelder in Längsrichtung der Streifenpakete erreicht werden. Wurden die Sensoren allerdings nur innerhalb des linearen Teils ihrer Kennlinie ausgelenkt, so war keine Hysterese festzustellen. Die Widerstandshübe variierten bei den gemessenen Proben je nach Streifenbreite zwischen 1,1 % und 1,5 %, was auf die Parallelschaltung der Schichten zurückzuführen ist und etwa der Hälfte des maximal möglichen Widerstandshubes einer einfachen Schicht entspricht.

Um den Einfluß eines Hilfsfeldes auf die Empfindlichkeit und das Hystereseverhalten zu untersuchen, wurden 10 μm und 100 μm breite Streifen mit Barber Polen, die sich ebenfalls auf der Teststruktur 2 befanden, für eine weitere Versuchsreihe hergestellt. Die für diese Tests produzierten einfachen Permalloyschichten hatten eine Dicke von 24 nm und wiesen einen Widerstandshub von 2,6 % auf.

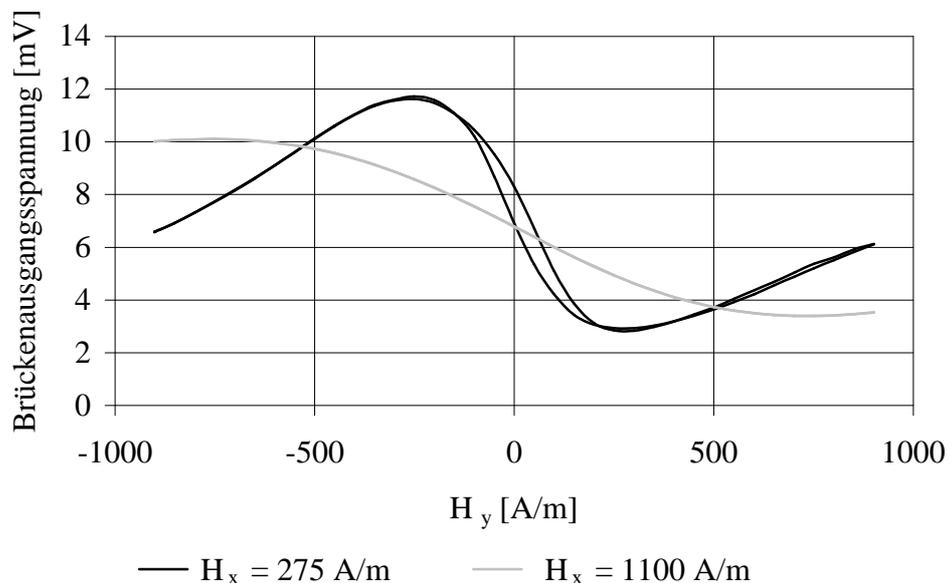


Abbildung 36: Brückenausgangsspannung in Abhängigkeit eines Meßfeldes gemessen an 100 μm breiten Streifen mit Barber Polen (Teststruktur 2).

In Abbildung 36 sind stellvertretend für die durchgeführten Messungen die Brückenausgangsspannungen unter dem Einfluß von zwei verschiedenen statischen Hilfsmagnetfeldern eines 100 μm breiten Streifens, der sich zusammen mit zwei Festwiderständen in einer Vollbrücke befand, dargestellt. Bei einem Hilfsfeld von 275 A/m ist eine deutliche Hysterese im Ausgangssignal zu erkennen. Erst ab Hilfsfeldstärken über 350 A/m war bei beiden untersuchten Streifenbreiten keine Hysterese mehr feststellbar. In Abbildung 36 ist ebenfalls die Kennlinie zu sehen, die sich bei einer Magnetfeldstärke von 1100 A/m in leichter Richtung ergab. Auch nach mehrmaligem Durchfahren des Meßfeldes war zwar keine Hysterese zu erkennen,

jedoch sank die Empfindlichkeit auf das viereinhalbfache im Vergleich zur Empfindlichkeit bei einer Hilfsfeldstärke von 275 A/m ab.

5.3. Layout des Sensors Femto5

Bei der Konzeption des Dreischichtsystemsensors Femto5 wurde darauf geachtet, mit einem Layout möglichst viele Geometrievariationen auf einer quadratischen Chipfläche mit einer Kantenlänge von 5 mm testen zu können. Dadurch sollten Aussagen über den Einfluß der Geometrie der Schichtpakete auf die Empfindlichkeit in einem Magnetfeld ermöglicht werden. Jeweils 10 parallel angeordnete Dreischichtstreifen bildeten einen Teilwiderstand einer Halbbrücke. Die Streifenpakete der einzelnen Sensoren variierten in ihrer Länge zwischen 20 μm und 80 μm und in ihrer Breite zwischen 5 μm und 20 μm . Da der Einfluß der Antennen, die in der gleichen Schichtreihenfolge wie die Sensorstreifen hergestellt wurden, zu Beginn der Untersuchungen nicht bekannt war, wurden die verschieden langen und breiten Sensoren mit unterschiedlich langen Dünnschichtantennen ausgestattet. In Abbildung 37 ist ein Ausschnitt der Chipfläche zu sehen, die einen Sensor zeigt, der mit einer einheitlichen Antennenlänge von 2,1 mm ausgestattet ist und aus 10 μm breiten Dreischichtstreifen besteht:

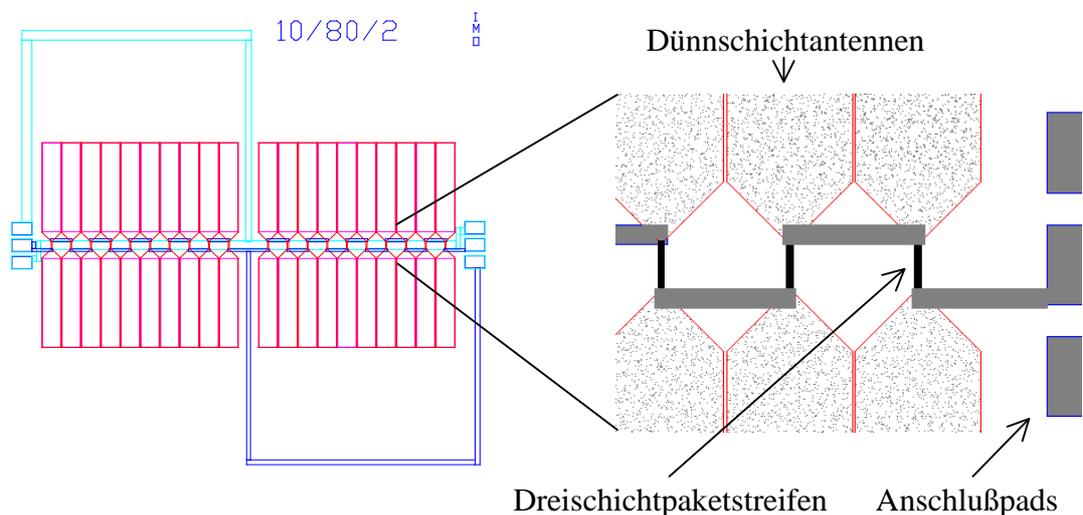


Abbildung 37: Ausschnitt aus der Maskenkonstruktion des Dreischichtsystemsensors Femto5.

Die einzelnen Sensorstreifen sind beidseitig mit den Antennenflächen verbunden. Die Antennen bestehen ebenfalls aus 10 Segmenten pro Einzelwiderstand der Halbbrücke. Die Aufspaltung wurde gewählt, um Magnetostriktion in den Antennenflächen vorzubeugen und um sicher zu stellen, daß jedem einzelnen Sensorstreifenpaket ein gleich großer magnetischer Fluß zugeführt wird. Insgesamt standen drei verschiedene

Dünnschichtantennen, die in ihrer Länge zwischen 1,15 mm und 4 mm variierten, zur Verfügung. Bei einer vierten Sorte von Sensoren wurde auf eine Dünnschichtantenne verzichtet, um deren Einfluß auf das Sensorverhalten untersuchen und einen Verstärkungsfaktor angeben zu können. Die Leiterbahnführung des für die Arbeitspunkteinstellung notwendigen Steuerleiters inklusive Mitteleinspeisung ist in Abbildung 37 zu erkennen. Zusammen mit den drei Anschlußpads für die Sensorhalbbrücke waren insgesamt 6 Außenkontakte erforderlich. Die Bezeichnung der Sensoren setzt sich aus drei Stellen zusammen. Als erstes wird die Streifenbreite gefolgt von der Länge der Schichtpakete genannt. Die letzte Stelle entspricht der Länge der Dünnschichtantennen, wobei 0 für keine Antenne, 1 für 1,15 mm lange, 2 für 2,1 mm lange und 4 für 4 mm lange Antennen steht. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht der verschiedenen Sensorgeometrien:

Streifenpaketbreite [μm]	Streifenpaketlänge [μm]	Dünnschichtantenne
5	20	0, 1, 2 und 4
5	40	
5	80	
10	20	0, 1, 2 und 4
10	40	
10	80	
20	20	0, 1, 2 und 4
20	40	
20	80	

Tabelle 4: Geometrievariationen der Sensorstruktur Femto5.

Es standen pro Wafer insgesamt 36 verschiedene Sensoren zur Verfügung, die sich in ihrer Schichtpaketbreite, -länge und Dünnschichtantenne voneinander unterschieden. Nach der Vereinzelung wurden die Sensoren auf einen speziell für diese Proben entworfenen Keramikträger, der 20 mm lang und 14 mm breit war, aufgeklebt und gebondet. Der Keramikträger war größer als das einzelne Chip konzipiert, damit in einer weiteren Entwicklungsstufe zusätzlich Folienantennen Platz finden konnten. Um ein zügiges Auswechseln der Sensoren während der Meßreihen in der Abschirmkammer zu ermöglichen und um zeitaufwendiges Anlöten von Kontaktdrähten zu umgehen, wurde ein auf den Keramikträger abgestimmter Meßadapter mit Kontaktspitzen konstruiert. Die Produktion der Keramikträger, die Vereinzelung der Sensoren, das Aufbonden und die Anbringung der Folienantennen wurde von der Firma Siegert Thin Film Technology (TFT) in Hermsdorf durchgeföhrt [72].

5.4. Berechnungsmodell für Dreischichtsystem mit Flußkonzentrator

Bevor die im Sensorlayout von Femto5 gewählte geometrische Struktur der Dreischichtsysteme mit angrenzenden Antennen gefertigt wurde, ist ein Modell zur Simulation einiger Sensoreigenschaften aufgestellt worden. Es wird zunächst davon ausgegangen, daß sich an den Enden eines Dreischichtpaketstreifens Antennen befinden, die den gleichen Schichtaufbau wie der Sensorstreifen aufweisen und die wesentlich breiter als das Streifenpaket sind. Die folgende Abbildung zeigt die vereinfachte Sensorstruktur:

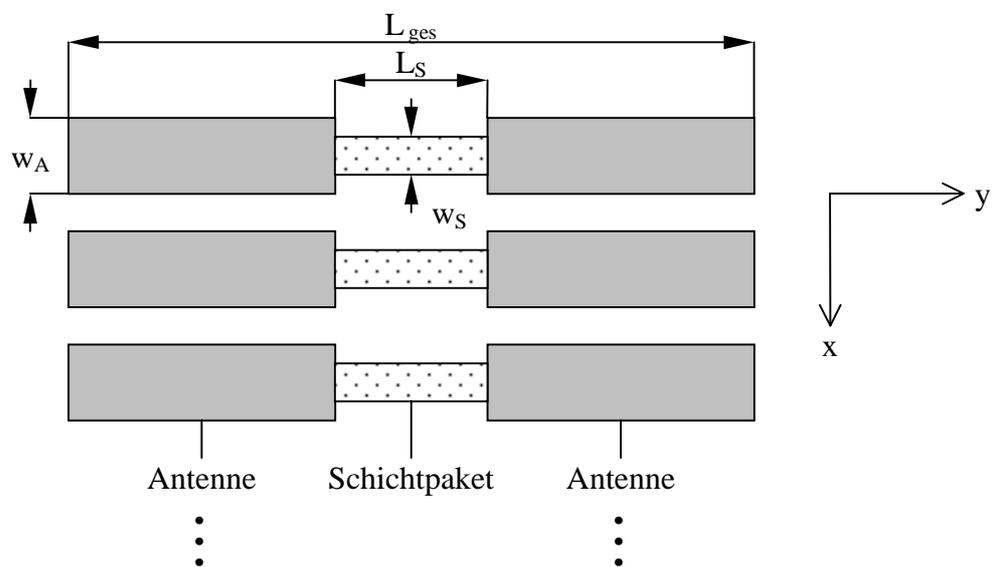


Abbildung 38: Vereinfachte Struktur des Femto5-Sensors mit Antennen (Bezeichnungen siehe Text).

Es wird angenommen, daß zu der in Abbildung 38 dargestellten vereinfachten Struktur unendlich viele weitere parallel in x-Richtung verschobene Sensorstreifenpakete mit Antennen angeordnet sind. Die Berechnung der Empfindlichkeit eines einfachen langen Streifens legt nahe, daß der für jede einzelne Struktur zur Verfügung stehende gesamte magnetische Fluß näherungsweise aus einer Fläche stammt, die durch die Gesamtlänge L_{ges} der Anordnung und die Antennenbreite w_A begrenzt ist. Zur Ermittlung des magnetischen Flusses durch einen Dreischichtstreifen werden den einzelnen Komponenten der Struktur magnetische Widerstände zugeordnet, den sie für den magnetischen Fluß darstellen. Hierdurch läßt sich für die in Abbildung 38 skizzierte Anordnung ein Ersatzschaltbild ableiten:

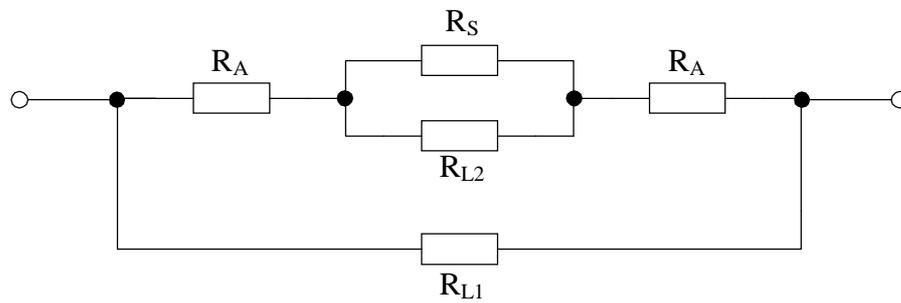


Abbildung 39: Ersatzschaltbild der vereinfachten Struktur des Femto5-Sensors mit Antennen.

R_S : magnetischer Widerstand des Sensorstreifens

R_A : magnetischer Widerstand der Antenne

R_{L1} : magnetischer Widerstand der Luft parallel zu den Antennen und Sensorstreifen

R_{L2} : magnetischer Widerstand der Luft parallel zum Sensorstreifen.

Der magnetische Widerstand R_{L1} berücksichtigt, daß ein Teil des magnetischen Flusses nicht durch die Antennen und den Sensorstreifen, sondern durch den umgebenden Luftraum, tritt. Die Beachtung des magnetischen Widerstandes R_{L2} ist notwendig, da der Sensorstreifen aufgrund seiner geringen Breite einen so großen magnetischen Widerstand darstellt, daß der durch die Antennen gesammelte magnetische Fluß nicht vollständig in das Schichtpaket eindringt und teilweise in das darüberliegende Luftvolumen gestreut wird. Geht man davon aus, daß eine große Anzahl von Dreischichtpaketstreifen mit Antennen in einer Ebene dicht nebeneinander liegend angeordnet ist, kann der gesamte magnetische Fluß, der bei einem homogenen äußeren Magnetfeld durch die Schichtpakete und die umgebende Luft tritt, durch folgenden Ausdruck angenähert werden:

$$\Phi_{\text{ges}} = w_A \cdot L_{\text{ges}} \cdot \mu_0 \cdot H_y \quad (54)$$

Φ_{ges} : gesamter magnetischer Fluß

w_A : Antennenbreite

L_{ges} : Gesamtlänge der beiden Antennen und des Sensorstreifens

H_y : y-Komponente des äußeren Magnetfeldes.

Der gesamte magnetische Fluß teilt sich gemäß Abbildung 39 in drei Teile auf:

$$\Phi_{\text{ges}} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_S \quad (55)$$

- Φ_1 : magnetischer Fluß durch Luftvolumen parallel zu Antennen und Sensorstreifen
 Φ_2 : magnetischer Fluß durch Luftvolumen parallel zum Sensorstreifen
 Φ_S : magnetischer Fluß durch den Sensorstreifen.

Die Anteile des magnetischen Flusses, die durch die einzelnen Komponenten der Anordnung treten, verhalten sich umgekehrt proportional zu den jeweiligen magnetischen Widerständen. Dies führt zu den beiden folgenden Gleichungen:

$$\frac{\Phi_S}{\Phi_2} = \frac{R_{L2}}{R_S}, \quad (56)$$

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_S + \Phi_2} = \frac{R_{L2} \cdot (2 \cdot R_A + R_S) + 2 \cdot R_A \cdot R_S}{R_{L1} \cdot (R_{L2} + R_S)}. \quad (57)$$

Aus den Gleichungen (55), (56) und (57) erhält man einen Ausdruck für den magnetischen Fluß, der durch den Sensorstreifen tritt:

$$\Phi_S = \frac{\Phi_{\text{ges}} \cdot R_{L1} \cdot R_{L2}}{R_{L1} \cdot (R_{L2} + R_S) + R_{L2} \cdot (2 \cdot R_A + R_S) + 2 \cdot R_A \cdot R_S}. \quad (58)$$

Berücksichtigt man, daß die Dünnschichtantenne magnetischen Fluß aus einer Fläche konzentrieren kann, die sich aus dem Produkt ihrer Länge und Breite ergibt, erhält man näherungsweise für den magnetischen Widerstand der Luft parallel zu den Antennen und dem Sensorstreifen:

$$R_{L1} = \frac{L_{\text{ges}}}{\mu_0 \cdot w_A \cdot L_{\text{ges}}}. \quad (59)$$

Für den magnetischen Widerstand der Luft parallel zum Sensorstreifen ergibt sich unter der Voraussetzung, daß die Länge des Sensorstreifens den Raum begrenzt, in den der magnetische Fluß gestreut wird (der magnetische Fluß wird in eine Fläche, die sich aus der Länge des Sensorstreifens und der Antennenbreite ergibt, gestreut), eine entsprechende näherungsweise gültige Gleichung:

$$R_{L2} = \frac{L_S}{\mu_0 \cdot w_A \cdot L_S} \quad (60)$$

L_S : Länge des Sensorstreifens.

Da sich die beiden magnetischen Widerstände gleichen, wird zum Zwecke der besseren Übersichtlichkeit aus den Gleichungen (59) und (60) ein gemeinsamer magnetischer Widerstand R_L abgeleitet:

$$R_L = \frac{1}{\mu_0 \cdot w_A} . \quad (61)$$

Hierdurch ergibt sich aus den Gleichungen (54) und (58) für den magnetischen Fluß durch den Sensorstreifen folgender Ausdruck:

$$\Phi_S = \frac{\mu_0 \cdot w_A \cdot L_{\text{ges}} \cdot H_y}{1 + 2 \cdot \mu_0 \cdot w_A \cdot (R_S + R_A + R_S \cdot R_A \cdot \mu_0 \cdot w_A)} . \quad (62)$$

Für den magnetischen Widerstand des Sensorstreifens gilt:

$$R_S = \frac{L_S}{\mu_0 \cdot \mu_S(\varphi) \cdot t_S \cdot w_S} \quad (63)$$

$\mu_S(\varphi)$: winkelabhängige relative Permeabilität des Sensorstreifens

t_S : Gesamtdicke der beiden magnetoresistiven Schichten des Sensorstreifens

w_S : Breite des Sensorstreifens.

Der magnetische Widerstand des Streifenpaketes hängt unter anderem von dessen relativer Permeabilität ab, die wiederum eine Funktion des Winkels zwischen der Stromrichtung und der Magnetisierung ist. Zur Ermittlung dieses Zusammenhanges muß zwischen der auf den Streifen von außen einwirkenden Magnetfeldstärke und der um die Entmagnetisierungsfeldstärke reduzierten Magnetfeldstärke im Inneren unterschieden werden. Für die Magnetfeldstärke im Inneren gilt:

$$H_{iy} = H_y - N_y \cdot M_y \quad (64)$$

H_{iy} : Magnetfeldstärke im Inneren des Streifenpaketes

N_y : Entmagnetisierungsfaktor in y-Richtung

M_y : y-Komponente der Magnetisierung.

Der Entmagnetisierungsfaktor N_y in Meßrichtung kann aufgrund der Geometrieverhältnisse näherungsweise angegeben werden mit:

$$N_y = \frac{t_s}{L_s \cdot 2}. \quad (65)$$

Der Faktor 1/2 in Gleichung (65) berücksichtigt, daß ein Sensorstreifen aus zwei gleich dicken magnetoresistiven Schichten besteht. Die relative Permeabilität der magnetoresistiven Schicht läßt sich ausgehend von folgender Gleichung berechnen:

$$\mu_s(\varphi) = 1 + \frac{\partial M_y}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial (H_y - N_y \cdot M_y)}. \quad (66)$$

Für die Magnetisierung und die y-Komponente des äußeren Magnetfeldes (siehe Gleichung 24) gelten die beiden nachfolgenden Gleichungen ($N_x = 0$):

$$M_y = M_s \cdot \sin \varphi, \quad (67)$$

$$H_y = (H_k - N_y \cdot M_s) \cdot \sin \varphi + H_x \cdot \tan \varphi. \quad (68)$$

Nach Ausführung der partiellen Ableitungen aus Gleichung (66) ergibt sich unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie die gesuchte Formel für die winkelabhängige relative Permeabilität des Sensorstreifens:

$$\mu_s(\varphi) = \frac{M_s \cdot \cos^3 \varphi}{H_x + \cos^3 \varphi \cdot H_k} + 1. \quad (69)$$

Für den magnetischen Widerstand des Sensorstreifens aus Gleichung (63) folgt unter Einbeziehung von Gleichung (69):

$$R_s = \frac{L_s \cdot (H_x + H_k \cdot \cos^3 \varphi)}{\mu_0 \cdot t_s \cdot w_s \cdot [\cos^3 \varphi \cdot (H_k + M_s) + H_x]}. \quad (70)$$

Es bleibt zu bemerken, daß die magnetische Feldstärke H_x in Gleichung (70) die Bedeutung eines zusätzlich von außen angelegten Hilfsmagnetfeldes haben kann. Im vorliegenden Fall wird dieses vom Sensorbetriebsstrom erzeugt. Es wird angenommen, daß der durch die Zwischenschicht fließende Strom vernachlässigbar ist, so daß sich der Betriebsstrom je zur Hälfte auf die untere bzw. obere MR-Schicht aufteilt. Das in einer MR-Schicht von dem Strom in der jeweiligen Schicht erzeugte Magnetfeld hat keinen Einfluß auf die Richtung der Magnetisierung. So bleibt nur der Einfluß der durch den

Strom in der einen MR-Schicht hervorgerufenen Magnetfeldkomponenten in Streifenquerrichtung auf die jeweils andere Schicht zu berücksichtigen. Da die Schichtdicke vernachlässigbar klein gegenüber der Breite ist, ergibt sich folgendes vom halben Betriebsstrom erzeugtes Magnetfeld:

$$H_x = \frac{I}{4 \cdot w_s} \quad (71)$$

Der elektrische Widerstand eines Sensorstreifenpaketes ergibt sich aus der Parallelschaltung von zwei Permalloyschichten und einer Zwischenschicht. Berücksichtigt man weiterhin, daß die Leistung in einem Teilwiderstand der Halbbrücke bei den Femto5-Sensoren auf 10 Streifenpakete aufgeteilt wird, so ergibt sich für den Sensorstrom ein von der elektrischen Leistung abhängiger Ausdruck:

$$I = \sqrt{\frac{P \cdot w_s \cdot [2 \cdot t_s \cdot \rho_z(t) + t_z \cdot \rho_{MR}(t)]}{10 \cdot \rho_{MR}(t) \cdot \rho_z(t) \cdot L_s}} \quad (72)$$

P : elektrische Leistung

$\rho_{MR}(t)$: dickenabhängiger spezifischer Widerstand der magnetoresistiven Schichten
(vgl. Gleichung (27))

$\rho_z(t)$: dickenabhängiger spezifischer Widerstand des Zwischenschichtmaterials

t_z : Dicke der Zwischenschicht.

Mit Hilfe von Gleichung (72) kann das Stabilisierungsfeld H_x aus Gleichung (71) durch die im Sensor umgesetzte Leistung berechnet werden:

$$H_x = \sqrt{\frac{P \cdot [2 \cdot t_s \cdot \rho_z(t) + t_z \cdot \rho_{MR}(t)]}{160 \cdot \rho_{MR}(t) \cdot \rho_z(t) \cdot L_s \cdot w_s}} \quad (73)$$

Berücksichtigt man, daß die Antennen nicht von dem Betriebsstrom durchflossen werden, kann für den magnetischen Widerstand R_A der Antenne durch analoge Betrachtungsweise, die zu dem Ausdruck für den magnetischen Widerstand des Streifens geführt haben, folgende Gleichung angegeben werden:

$$R_A = \frac{(L_{ges} - L_s) \cdot H_k}{\mu_0 \cdot w_A \cdot t_s \cdot (H_k + M_s)} \quad (74)$$

Bei der Berechnung des magnetischen Widerstandes R_A wurde berücksichtigt, daß kein Magnetfeld H_x vorhanden ist, da durch die Antennenflächen kein Strom fließt, der ein Stabilisierungsfeld erzeugen könnte.

Für die magnetische Induktion im Sensorstreifen gilt:

$$B_S = \frac{\Phi_S}{w_S \cdot t_S} \quad (75)$$

B_S : magnetische Induktion im Sensorstreifen.

Die Magnetisierung und die y-Komponente der Magnetfeldstärke im Sensorstreifen hängen mit dem Induktionsfeld folgendermaßen zusammen:

$$B_S = \mu_0 \cdot (H_{iy} + M_y). \quad (76)$$

Aus den Gleichungen (64), (75) und (76) ergibt sich für die Magnetisierung in y-Richtung:

$$M_y = \frac{\Phi_S}{w_S \cdot t_S \cdot \mu_0 \cdot (1 - N_y)} - \frac{H_y}{1 - N_y}. \quad (77)$$

Mit Hilfe der Gleichung (40) für die normierte Empfindlichkeit, der Gleichung (34), welche die Abhängigkeit des Widerstandes vom Winkel zwischen der Magnetisierung und der Stromrichtung eines magnetoresistiven Elements beschreibt und der Gleichung (67) ergibt sich:

$$S_U = \frac{\partial}{\partial H_y} \left(1 - \frac{\Delta R \cdot M_y^2}{R_0 \cdot M_s^2} \right). \quad (78)$$

Die normierte Empfindlichkeit in Gleichung (78) kann unter Zuhilfenahme der Gleichungen (62) für den magnetischen Fluß durch den Sensorstreifen, (70) für den magnetischen Widerstand des Streifens, (73) für das durch den Sensorbetriebsstrom erzeugte Stabilisierungsfeld, (74) für den magnetischen Widerstand der Antennen und (77) für die Magnetisierung explizit berechnet werden.

In der folgenden Abbildung ist der sich nach Gleichung (78) ergebende Empfindlichkeitsverlauf dargestellt:

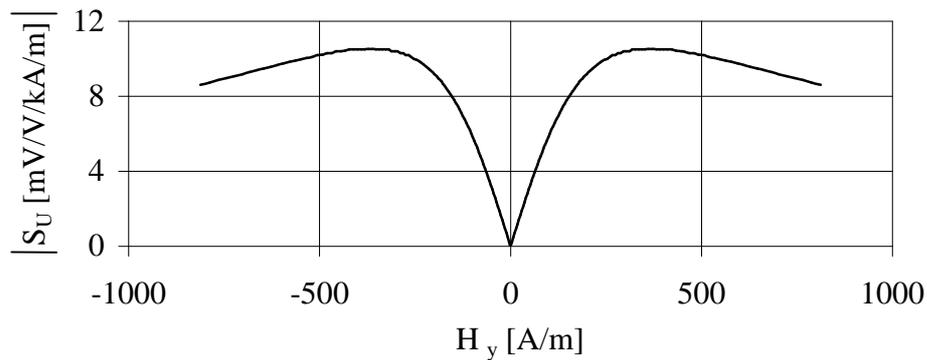


Abbildung 40: Berechneter Empfindlichkeitsverlauf eines $5 \mu\text{m}$ breiten und $20 \mu\text{m}$ langen Sensorstreifenpaketes der Femto5-Sensoren.

Die Abbildung 40 zeigt den Betrag der berechneten Empfindlichkeit in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld für die Streifenbreite $5 \mu\text{m}$ und die Streifenlänge $20 \mu\text{m}$. Für ein in positive und in negative y-Richtung angelegtes äußeres Magnetfeld nimmt die Empfindlichkeit bis zu einem Maximalwert zu. Die Notwendigkeit einer Arbeitspunkteinstellung zur Messung kleiner Magnetfeldstärken wird anhand der Abbildung 40 deutlich.

Für den Fall, daß auf die Schichtantennenflächen zusätzlich Folienantennen angebracht sind, ist deren effektive Permeabilität zu berücksichtigen. Es gilt die nachfolgende Gleichung:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{L_{\text{ges}} \cdot (\mu_{\text{Ant}} - 1)}{L_{\text{ges}} + 2 \cdot t_{\text{Ant}} \cdot (\mu_{\text{Ant}} - 1)} + 1 \quad (79)$$

μ_{eff} : effektiv wirksame relative Permeabilität der Folienantenne

μ_{Ant} : relative Permeabilität der Folienantenne (etwa 10 000)

t_{Ant} : Dicke der Folienantenne.

Der magnetische Widerstand der Schichtantenne wird in dem Modell durch den magnetischen Widerstand der Folienantenne ersetzt und hat unter Berücksichtigung von Gleichung (79) folgende Gestalt:

$$R_{\text{Ant}} = \frac{L_{\text{ges}}}{\mu_0 \cdot w_A \cdot t_{\text{Ant}} \cdot \mu_{\text{eff}}} \quad (80)$$

R_{Ant} : magnetischer Widerstand der Folienantenne.

Die maximal erreichbare Empfindlichkeit der Anordnung mit Folienantennen in Abhängigkeit von der Gesamtlänge ist in Abbildung 41 dargestellt:

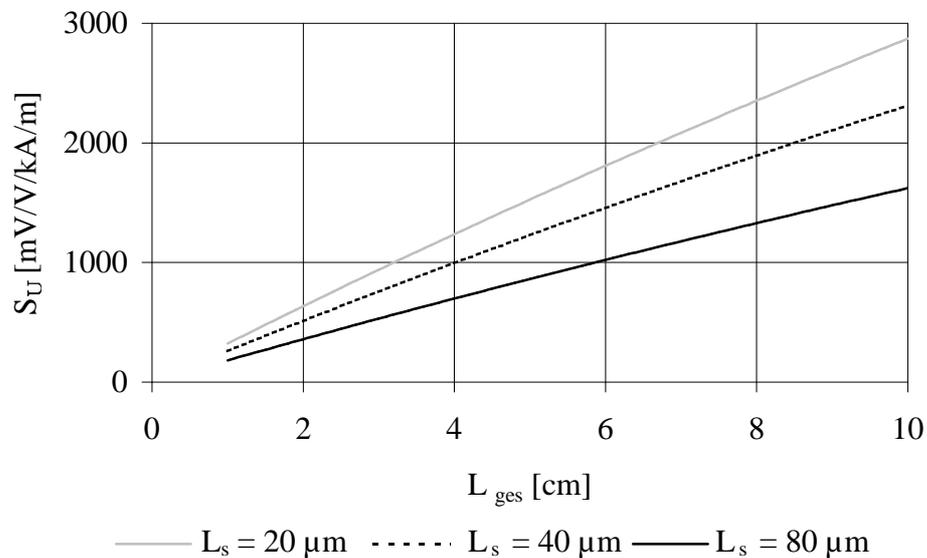


Abbildung 41: Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Gesamtlänge der Femto5-Sensoren mit Folienantennen bei unterschiedlichen Streifenlängen.

Die Streifenbreite beträgt $5 \mu\text{m}$, die Breite der $25 \mu\text{m}$ dicken Folienantennen ist 5mm und die Verlustleistung wird mit 50mW angenommen. Man erkennt den linearen Anstieg der Empfindlichkeit mit zunehmender Gesamtlänge. Je länger die Schichtpakete werden, umso geringer ist deren Empfindlichkeit.

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der normierten Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der im Sensor umgesetzten Verlustleistung:

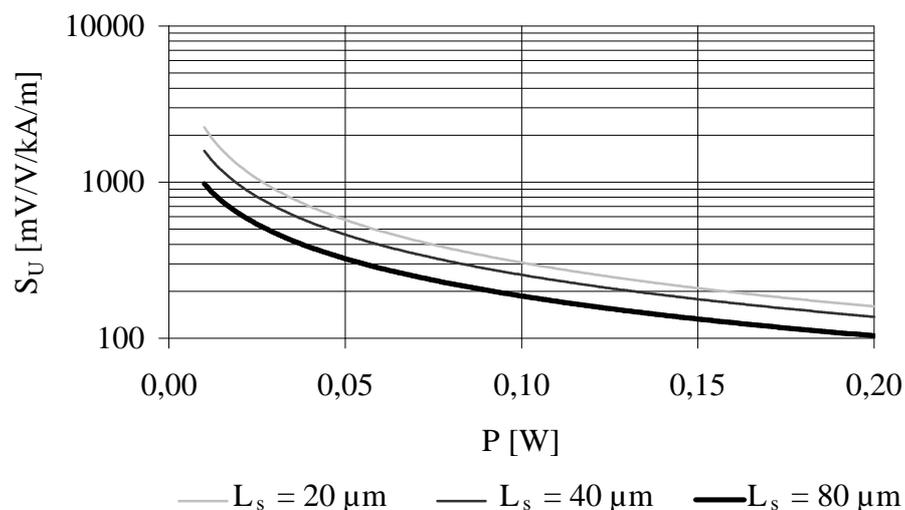


Abbildung 42: Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit von der im Sensor umgesetzten Verlustleistung der Femto5-Sensoren mit Folienantennen bei unterschiedlichen Streifenlängen.

Die Gesamtlänge der Anordnung beträgt 18 mm. Unter Beibehaltung der übrigen Parameter sind die Empfindlichkeitskurven für die drei zur Verfügung stehenden Streifenlängen abgebildet. Das Absinken der Empfindlichkeit mit zunehmender Leistung ist auf den damit verbundenen anwachsenden Betriebsstrom zurückzuführen, der ein größer werdendes Stabilisierungsfeld in Streifenquerrichtung erzeugt, welches seinerseits die Drehung der Magnetisierung im Schichtpaket erschwert. Für kürzere Streifenpakete ist bei gleicher Leistung mit einer größeren Empfindlichkeit zu rechnen. Entscheidend für die Wahl der Größe der Verlustleistung ist die damit verbundene erzielbare Magnetfeldauflösung. Geht man davon aus, daß die Magnetfeldauflösung der Femto5-Sensoren nur durch das Nyquistrauschen aufgrund ihres elektrischen Widerstandes begrenzt wird, ergibt sich für die unterschiedlichen Streifenlängen eine von der Verlustleistung abhängige Magnetfeldauflösung (vgl. Gleichung (45)):

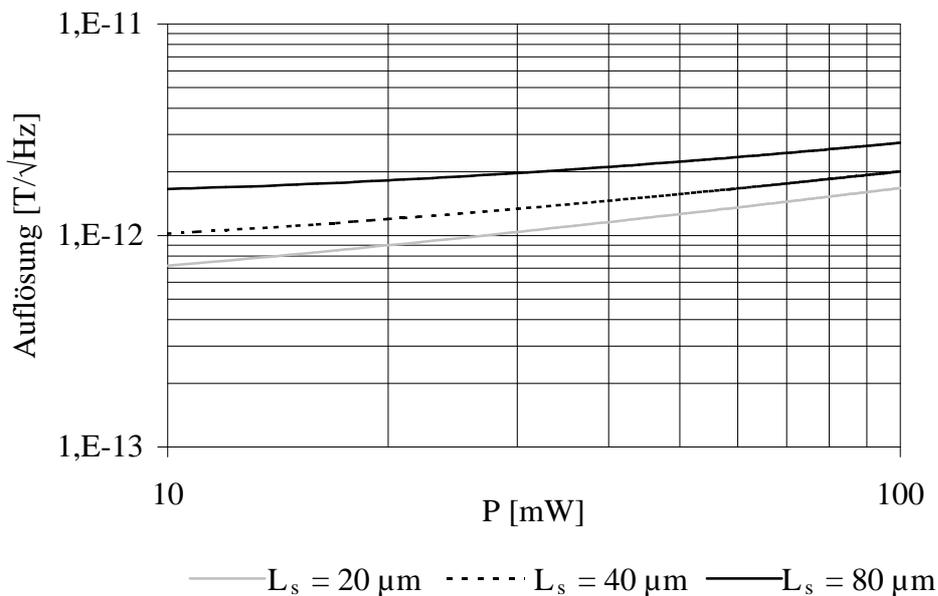


Abbildung 43: Magnetfeldauflösung der Femto5-Sensoren mit Folienantennen in Abhängigkeit von der Verlustleistung unter alleiniger Berücksichtigung des Widerstandsrauschens.

Die im Sensor umgesetzte Leistung muß so groß gewählt werden, daß das Sensorausgangssignal über der Eingangsrauschgrenze eines nachgeschalteten Signalverstärkers liegt. Wie aus Abbildung 43 zu entnehmen ist, ist im günstigsten Fall bei einer Verlustleistung von 50 mW und einer Antennengesamtlänge von 18 mm mit einer Auflösungsgrenze von ungefähr $1,5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ zu rechnen.

Wie die Auflösung mit der Antennengesamtlänge zusammenhängt, ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

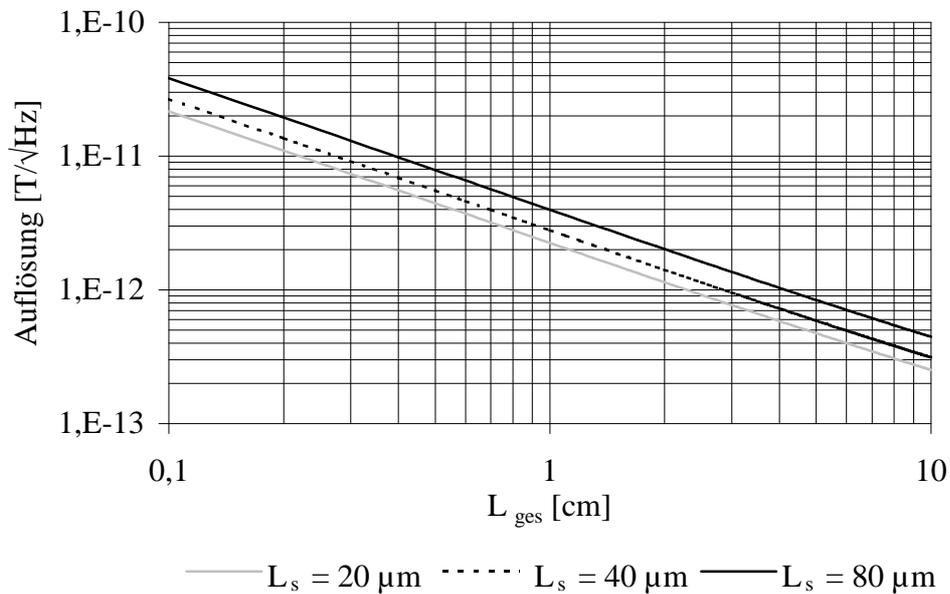


Abbildung 44: Magnetfeldauflösung der Femto5-Sensoren mit Folienantennen in Abhängigkeit von der Gesamtlänge.

Wie aus Abbildung 44 hervorgeht, ist erst ab einer Antennenlänge von ungefähr 30 mm eine Magnetfeldauflösung im Femtoteslabereich zu erwarten. Eine derartige Vergrößerung der Anordnung führt zu einer unerwünschten Verschlechterung der Ortsauflösung des Sensorsystems.

Da die Dicke der Folienantenne deren magnetischen Widerstand entscheidend beeinflusst, wird die Empfindlichkeit der Anordnung und demzufolge auch die Auflösungsgrenze von ihr ebenfalls mitbestimmt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die mit dem Modell berechnete Dickenabhängigkeit:

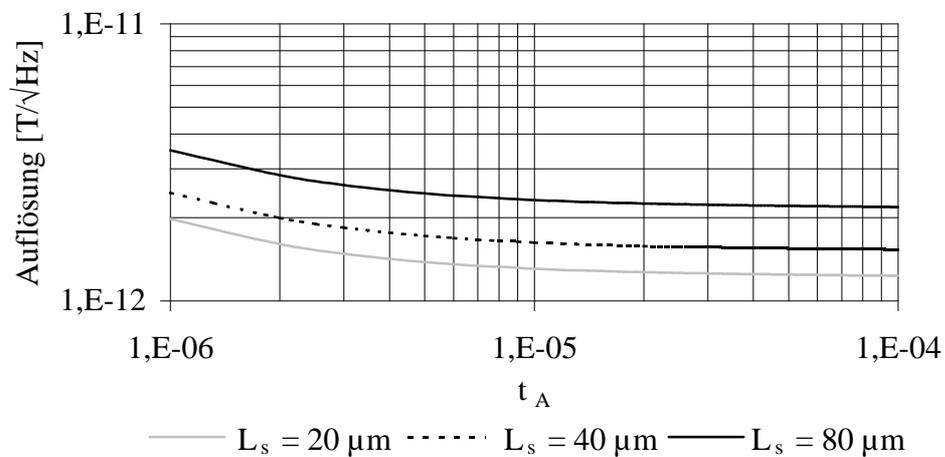


Abbildung 45: Magnetfeldauflösung der Femto5-Sensoren mit Folienantennen als Funktion der Antennendicke.

Wie aus Abbildung 45 hervorgeht, ist durch eine Vergrößerung der Antennendicke über einige Mikrometern hinaus keine signifikante Verbesserung der Auflösung zu erzielen. Für die verschiedenen Femto5-Sensorgeometrien ergeben sich mit Hilfe des in diesem Kapitel vorgestellten Modells die in Tabelle 5 aufgeführten normierten Empfindlichkeiten. Die Werte für Sensoren ohne Dünnschichtantennen wurden unter Verwendung von Gleichung (40), mit der die normierten Empfindlichkeiten für einen einfachen Streifen berechnet werden können, unter der Voraussetzung, daß im betrachteten Fall kein Winkelfehler vorliegt und daß ein Hilfsfeld der Größe 1 kA/m von dem Betriebsstrom erzeugt wird, ermittelt:

Sensorgeometrie		Empfindlichkeit S_U [mV/V/kA/m]				
w [µm]	l [µm]	0	1	2	4	mit Folienantennen
5	20	2,9	10,3	10,6	10,8	573
5	40	3,9	8,4	8,6	8,7	461
5	80	4,6	6,0	6,1	6,1	324
10	20	2,9	10,1	10,5	10,7	573
10	40	3,9	8,3	8,5	8,6	461
10	80	4,6	6,0	6,1	6,1	324
20	20	2,9	9,8	10,2	10,4	572
20	40	3,9	8,1	8,3	8,4	460
20	80	4,6	5,9	6,0	6,0	323

Tabelle 5: Berechnete normierte Empfindlichkeiten der Femto5-Sensoren mit unterschiedlichen Dünnschichtantennenlängen und zusätzlichen Folienantennen.

Die Empfindlichkeiten in Tabelle 5 wurden für einen maximalen Widerstandshub von 0,7 % und einer im Sensor umgesetzten Verlustleistung von 50 mW berechnet. Die Maximalwerte der Empfindlichkeiten sind in dem Modell bei einem Winkel zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung im Streifenpaket von $0,7 \cdot \pi/4$ zu erreichen. Die Werte für die Empfindlichkeiten nehmen mit länger werdenden Sensorpaketen ohne Dünnschichtantennen bis auf 4,6 mV/V/kA/m zu. Abhängig von der Streifenlänge kann eine Steigerung der Empfindlichkeit bis zu einem Faktor 3 erwartet werden. Die Länge der Dünnschichtantennen (1, 2 bzw. 4) scheint in den zur Verfügung stehenden Längenbereichen eine untergeordnete Rolle zu spielen. Werden zusätzlich Folienantennen angebracht, ist eine maximale Empfindlichkeit von ungefähr 570 mV/V/kA/m möglich. Dies ist gleichbedeutend mit einer empfindlichkeitssteigernden Wirkung durch die Folienantennen um einen Verstärkungsfaktor von 55. Auffallend ist die sich in den zu untersuchenden Breitenregionen der Sensorpakete

ergebende geringe Abhängigkeit der Empfindlichkeiten von der Breite der Streifen. Die Längenabhängigkeit hingegen ist in erster Linie auf die damit zusammenhängenden Entmagnetisierungsfaktoren zurückzuführen.

5.5. Zwischenschichtmaterial Platin

Aufgrund der positiven Ergebnisse bei der Suche nach einem geeigneten Zwischenschichtmaterial wurden Femto5-Proben mit einer 35 nm dicken Platinschicht hergestellt. Erste Widerstandsmessungen am Prober ergaben, daß die magnetische Entkopplung der Magnetisierungen der beiden magnetoresistiven Schichten ohne kombinierte Dünnschichtantennen, die sich durch einen minimalen Widerstandswert des Sensors ohne Einfluß eines äußeren Magnetfeldes bemerkbar macht, gelungen war. Die gemessenen Widerstandswerte der einzelnen Exemplare lagen nahe bei dem unter dem Einfluß eines drehbaren Stabmagneten minimal einstellbaren Wert:

Sensortyp	R_{ohne} [Ω]	R_{max} [Ω]	R_{min} [Ω]
5/20/0	122,8	123,6	122,6
5/40/0	347,9	351,4	347,5
5/80/0	785,7	792,8	784,5
10/20/0	74,0	74,5	73,9
10/40/0	195,1	197,0	195,0
10/80/0	431,4	435,0	430,5
20/20/0	49,8	50,2	49,8
20/40/0	110,2	111,1	110,1
20/80/0	234,4	236,7	234,3

Table 6: Widerstandsmessungen am Prober einiger Femto5-Sensoren ohne Dünnschichtantennen von Wafer Nr. 6055 mit einer 35 nm dicken Platinzwischenschicht.

Die Messungen am Prober wurden regelmäßig bei allen gefertigten Wafern durchgeführt, um die prinzipielle Funktionalität der Sensoren vor dem Aufbilden zu überprüfen. Bei Proben mit Dünnschichtantennen wurden bei den Messungen ohne Einfluß eines äußeren Magnetfeldes am Prober Widerstände gemessen, die nicht mit den minimal möglichen Werten übereinstimmten. Geht man davon aus, daß die Zwischenschichtdicke auch bei den Proben mit Dünnschichtantenne für eine Entkopplung ausreichend war, so kämen Störfelder wie z. B. das Erdmagnetfeld am Ort der Sensoren, die sich in unabgeschirmter Umgebung befanden, als Ursache für eine Auslenkung der eingepprägten Magnetisierung aus der Ruhelage heraus (quer zur

Streifenlängsrichtung) in Betracht. Um dies zu überprüfen, wurden die aufgebondeten Sensoren anschließend in der Abschirmkammer untersucht. Die Widerstände wurden durch die Einspeisung eines Stromes über den Steuerleiter variiert:

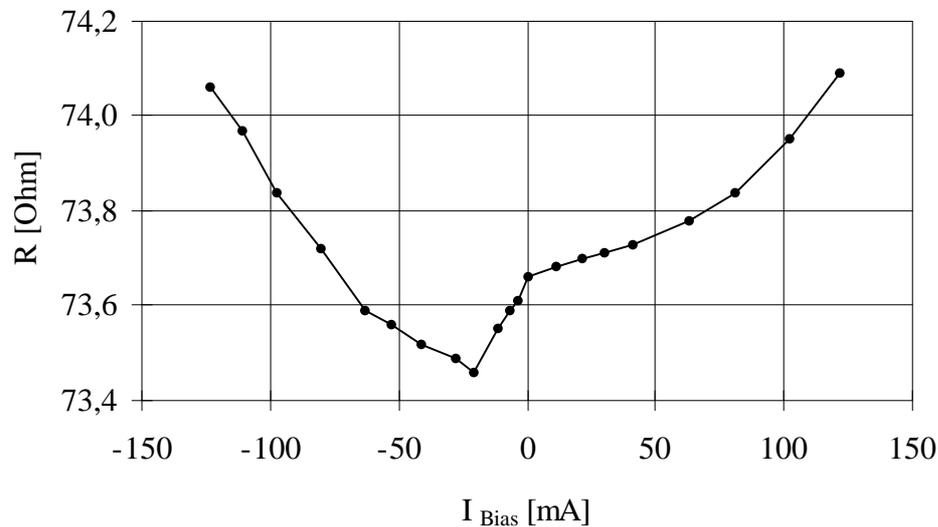


Abbildung 46: Widerstand eines Femto5-Sensors mit Dünnschichtantenne (10/20/2) in Abhängigkeit vom Steuerstrom I_{Bias} .

Bei allen untersuchten Sensoren mit Dünnschichtantennen zeigte sich, daß die Widerstände auch in abgeschirmter Umgebung sich nicht exakt in ihrem Minimum befanden. Erst durch das Magnetfeld eines Steuerstromes, der abhängig von der jeweiligen Geometrie der untersuchten Sensoren zwischen 15 mA und 30 mA lag, ergaben sich die minimalen Widerstände. Auf den Sensor einwirkende Magnetfelder waren demnach als Ursache für die erhöhten Widerstandswerte im Ruhezustand nicht verantwortlich zu machen. An den Kanten der Übergangsbereiche der Sensorstreifen zu den Antennenflächen hin könnten sich allerdings Domänen gebildet haben, die durch das Magnetfeld des Steuerstromes zurückgedrängt werden konnten. Zum Vergleich ist in Abbildung 47 die Widerstandskennlinie eines Sensors ohne Dünnschichtantenne dargestellt. Man erkennt, daß die magnetische Entkopplung der Schichten, die durch das Widerstandsminimum ohne Biasstrom (Strom durch Steuerleiter) erkennbar ist, vorhanden war. Der Unterschied im Vergleich zu dem in Tabelle 6 angegebenen Wert für den Grundwiderstand ist durch die zusätzlichen Widerstände der Bonddrähte und Leiterbahnen auf der Keramik inklusive deren Übergangswiderstände zu erklären.

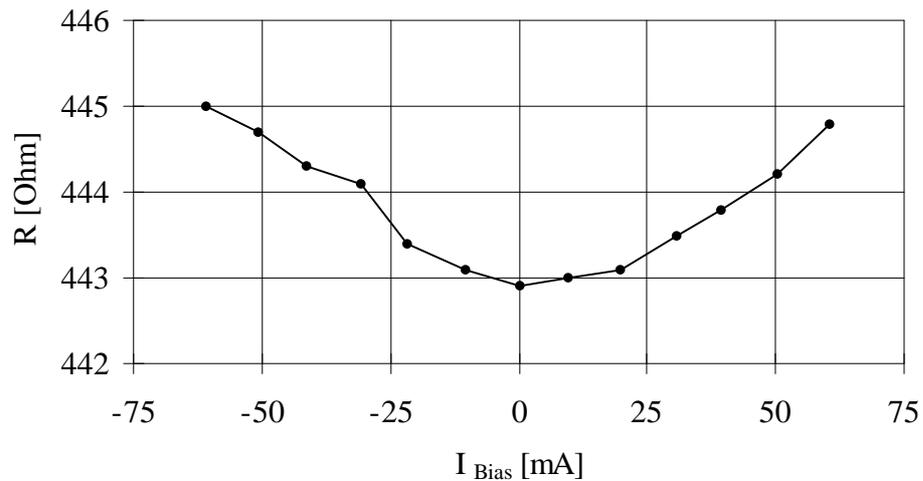


Abbildung 47: Widerstand eines Femto5-Sensors ohne Dünnschichtantenne (10/80/0) in Abhängigkeit vom Steuerstrom I_{Bias} .

Eine weitere Möglichkeit, den Entkopplungszustand der Magnetisierungen der Sensoren zu überprüfen, bestand darin, während sukzessiver Erhöhung und anschließender Absenkung des Betriebsstromes die Widerstandswerte zu ermitteln (Stromfehlerschaltung). Das Ergebnis dieser Versuche ist in Abbildung 48 am Beispiel eines Sensors mit einfacher Antennenlänge zu sehen:

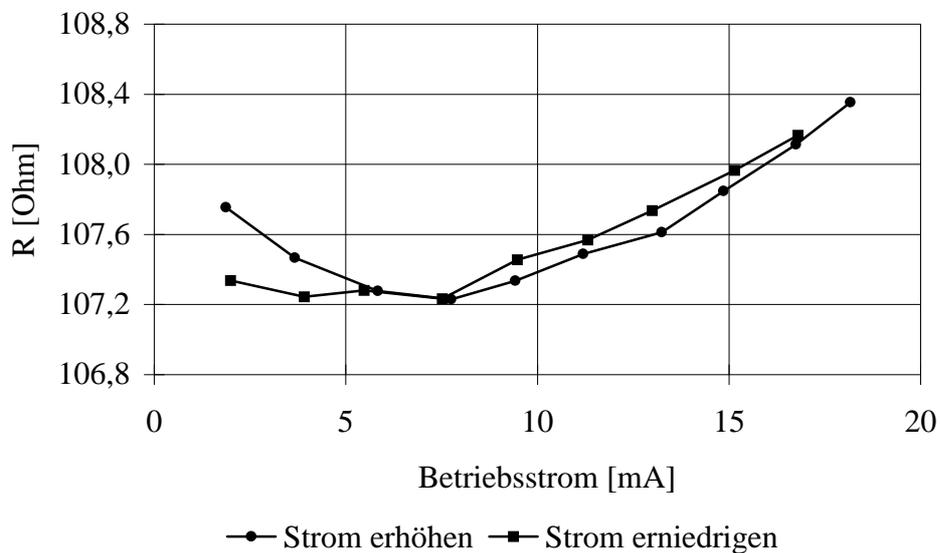


Abbildung 48: Widerstandskurve eines Femto5-Sensors mit Dünnschichtantennen (5/20/1) durch Stromfehlerschaltung ermittelt.

In Abbildung 48 ist die für Sensoren mit Dünnschichtantennen typische Abweichung der Widerstände von ihrem minimal möglichen Wert ohne äußeres Magnetfeld zu erkennen. Bei dem gezeigten Beispiel wurde der minimale Widerstand bei einem

Betriebsstrom von etwa 7 mA erreicht. Durch das Erhöhen und anschließende Absenken des Betriebsstroms auf den Ausgangswert ergaben sich, wie in Abbildung 48 zu erkennen, keine signifikanten Unterschiede in den Widerstandswerten, die auf einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluß des Betriebsstromes in den untersuchten Grenzen durch die damit einhergehende Erwärmung des Sensors deuteten. Es mußte davon ausgegangen werden, daß die unvollständige Entkopplung reversibel war und nicht durch eine vor einer Magnetfeldmessung durchzuführenden einmaligen Ausrichtung beseitigt werden konnte.

Für die Empfindlichkeitsmessungen wurden die Sensoren durch zwei parallel geschaltete Festwiderstände R_1 und R_2 und ein dazu in Reihe geschaltetes Potentiometer P_3 zu einer Vollbrücke komplettiert (siehe Abbildung 49). Alle Messungen wurden in abgeschirmter Umgebung durchgeführt, da die Feldstärke des Erdmagnetfeldes bei Proben mit Antennen ausgereicht hätte, die Sensoren in ihren Sättigungsbereich hinein auszurichten, wodurch Untersuchungen ihres Ansprechverhaltens auf Magnetfelder unmöglich geworden wären. Um die für die beiden magnetfeldempfindlichen Teilbereiche der Sensoren notwendige Arbeitspunkteinstellung vornehmen zu können, wurde ein Steuerstromkreis gemäß Abbildung 49 aufgebaut. Die Höhe des Gesamtsteuerstromes konnte durch eine einstellbare Spannungsquelle und dessen Aufspaltung auf die Teilbereiche durch die Potentiometer P_1 und P_2 variiert werden. Die Anschlußbelegung der Femto5-Sensoren und die für die durchgeführten Empfindlichkeitsmessungen typische Beschaltung ist der Abbildung 49 zu entnehmen:

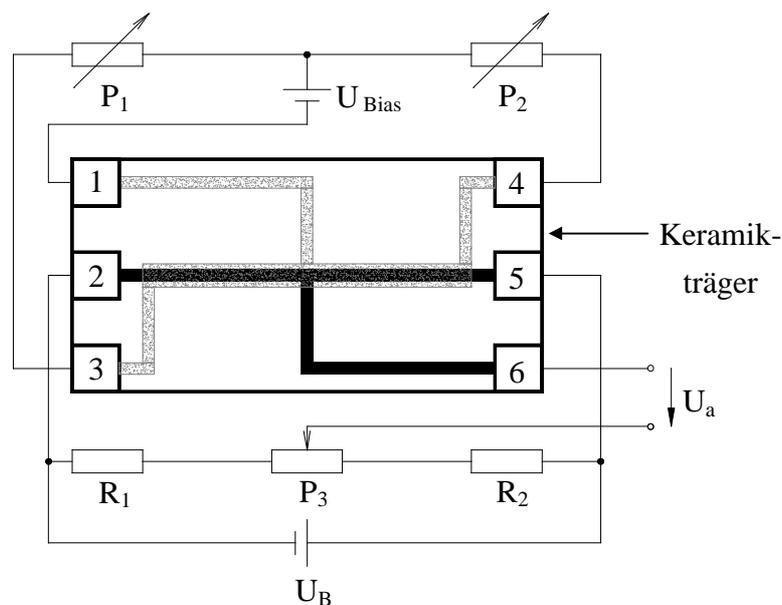


Abbildung 49: Anschlußbelegung und Beschaltung der Femto5-Sensoren.

Die in Abbildung 49 eingezeichneten nummerierten Anschlußpads entsprechen den Kontaktstellen der Sensoren auf dem Keramikträger. Die magnetoresistive Halbbrücke befindet sich zwischen den Anschlüssen 2 und 5, wobei der Pin 6 den Mittelabgriff darstellt. Der sich über beide Sensorhälften erstreckende Steuerstromleiter (Biasstromleiter) ist schematisch als grau gepunkteter Bereich eingezeichnet. Die Kontaktierung erfolgt über die Pins 3 und 4, wobei der Mittelanschluß über Pin 1 nach außen geführt ist.

Zunächst wurden Sensoren ohne Dünnschichtantennen untersucht. Da die einzustellende Größe des Biasstromes zu Beginn der Untersuchungen unbekannt war, wurde die Empfindlichkeit bei verschiedenen Biasströmen gemessen. Erwartungsgemäß stellte sich heraus, daß bei Erhöhung des Biasstromes die Empfindlichkeit bis zu einem Maximalwert hin anstieg, um bei weiterer Erhöhung wieder abzunehmen:

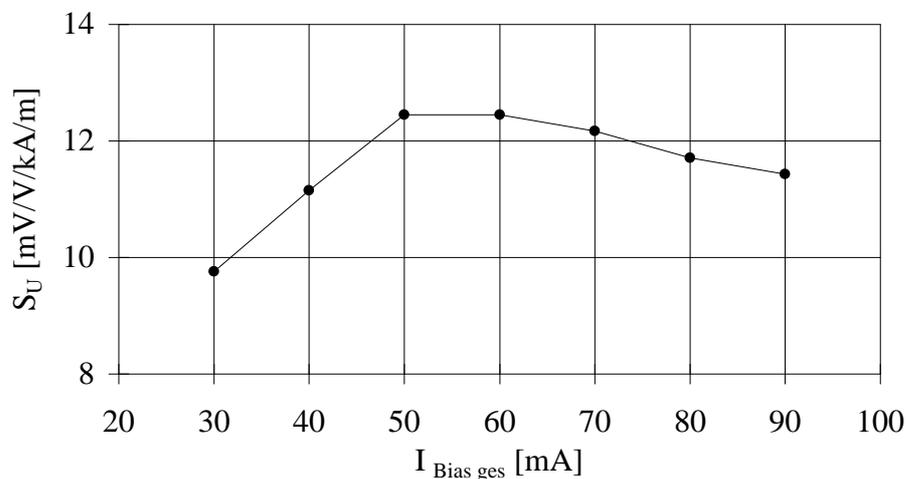


Abbildung 50: Einfluß des Biasstromes auf die Empfindlichkeit eines Femto5-Sensors 5/80/0 ($H_y = \pm 8,5 \text{ A/m}$).

Der Biasstrom wurde über die beiden Potentiometer so eingestellt, daß er im Verhältnis 50:50 aufgeteilt war. In Abbildung 50 ist der Gesamtbiasstrom aufgetragen. Man erkennt, daß die Empfindlichkeit bei einem Gesamtbiasstrom zwischen 50 mA und 60 mA ihren maximalen Wert annimmt. Untersuchungen an Sensoren mit unterschiedlichen Geometrieverhältnissen zeigten, daß ein für alle Sensoren gültiger optimaler Wert für den Biasstrom nicht existiert. Der optimal einzustellende Biasstrom schwankte zwischen 40 mA und 80 mA. Dieser war für jeden Sensor im Vorfeld einer Empfindlichkeitsmessung zu ermitteln, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu gewährleisten. Aus dem gleichen Grund wurde die in den Sensoren umgesetzte Leistung auf 50 mW durch die Wahl der Betriebsspannung festgelegt. Alle Sensoren zeigten eine deutliche Hysterese in ihrer Kennlinie beim kompletten Durchfahren in einem äußeren Magnetfeld. Eine hysteresefreie Ausgangskennlinie war bei den Proben ohne Dünnschichtantenne erst oberhalb einer Verlustleistung von

200 mW zu beobachten. Eine entsprechende Kennlinie ist in der folgenden Abbildung zu sehen:

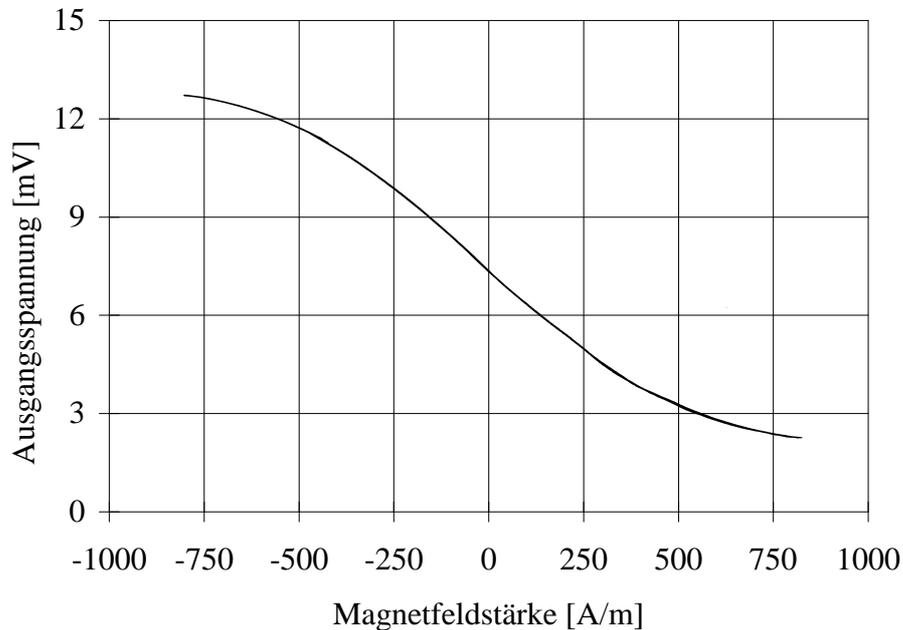


Abbildung 51: Kennlinie eines Femto5-Sensors (10/40/0) ohne Dünnschichtantenne bei einer Betriebsspannung $U_B = 6,5$ V und einem Gesamtbiasstrom von 80 mA.

Das durch den Betriebsstrom in Querrichtung erzeugte Magnetfeld reicht ab einer bestimmten Größe aus, um das Auftreten von Domänen im Sensorstreifen zu unterdrücken. Aufgrund des Berechnungsmodells für die Dreischichtsysteme war davon auszugehen, daß die Höhe des Betriebsstromes die erreichbare Empfindlichkeit beeinflusst. Das Ergebnis einer Meßreihe, in der die Betriebsspannung mit einem bipolaren Netzteil in beide Richtungen variiert wurde, ist in folgender Abbildung dargestellt:

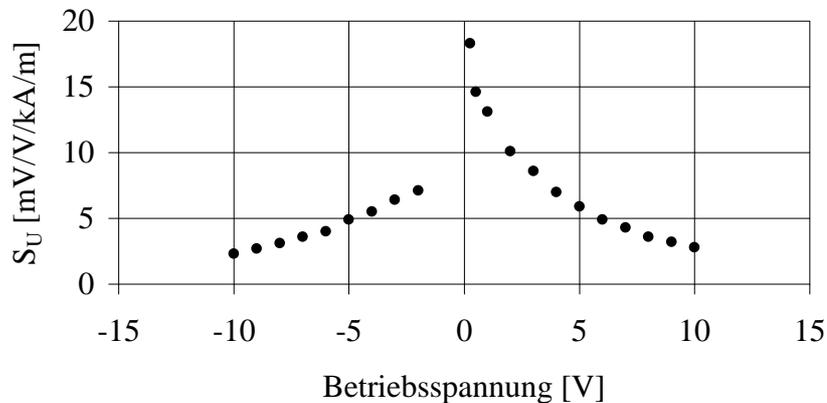


Abbildung 52: Empfindlichkeit eines Femto5-Sensors (10/80/0) in Abhängigkeit von der Betriebsspannung bei einem Gesamtbiasstrom von 60 mA.

Eine Betriebsspannung von 10 V entspricht bei dem untersuchten Sensor einer Verlustleistung von ungefähr 230 mW. Die dazugehörige Empfindlichkeit ist etwa um den Faktor 2 kleiner verglichen mit dem Wert bei 50 mW, der allerdings mit einer hysteresebefahenen Ausgangskennlinie verbunden ist.

Die Messungen an den verschiedenen Sensoren ließen erkennen, daß die Größe der Hysterese in engem Zusammenhang mit der Breite der Streifen steht. Es wurden Untersuchungen an verschieden breiten Streifenpaketen gleicher Länge (ohne Dünnschichtantennen) durchgeführt. Um die Hysterese zu quantifizieren, wurde die auftretende Differenz der Ausgangsspannung am steilsten Stück der Kennlinie bestimmt. Gibt man diesen Wert in Prozent bezogen auf den maximal erreichbaren Spannungshub beim Durchfahren der kompletten Kennlinie an, so repräsentiert er ein Maß für die Hysterese:

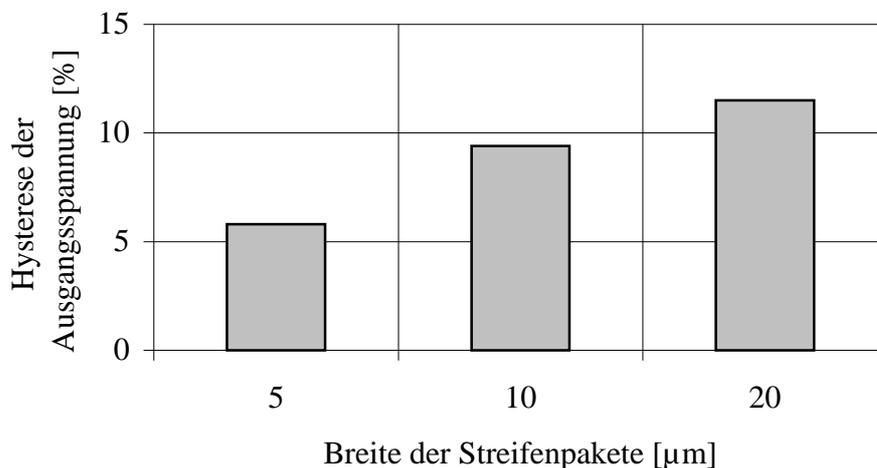


Abbildung 53: Hysterese der Femto5-Sensoren gemessen an unterschiedlich breiten Streifenpaketen ohne Dünnschichtantennen.

Die in Abbildung 53 dargestellten Werte für die Hysterese wurden an Proben der Länge 80 μm bei einem Gesamtbiasstrom von 50 mA ermittelt. Die umgesetzte Leistung war durch Variieren der Betriebsspannung jeweils auf 50 mW eingestellt worden. Die Hysterese der Ausgangsspannung ist bei den 5 μm breiten Streifenpaketen nur etwa halb so groß wie die bei den 20 μm breiten.

Ein Teil der Sensoren wurde mit Folienantennen ausgestattet, wobei eine Engspaltklebung (Spaltbreite ungefähr 10 μm) mit Sekundenkleber (SK) als Verbindungsmaterial vorgenommen wurde. Bei sämtlichen Messungen an Proben mit kombinierter Folienantenne war eine stark hysteresebefahene Kennlinie zu beobachten. Die folgende Abbildung zeigt eine für Sensoren mit Folienantenne charakteristische Kennlinie, die durch Auslenkung in einem ab- und zunehmenden Magnetfeld entstand:

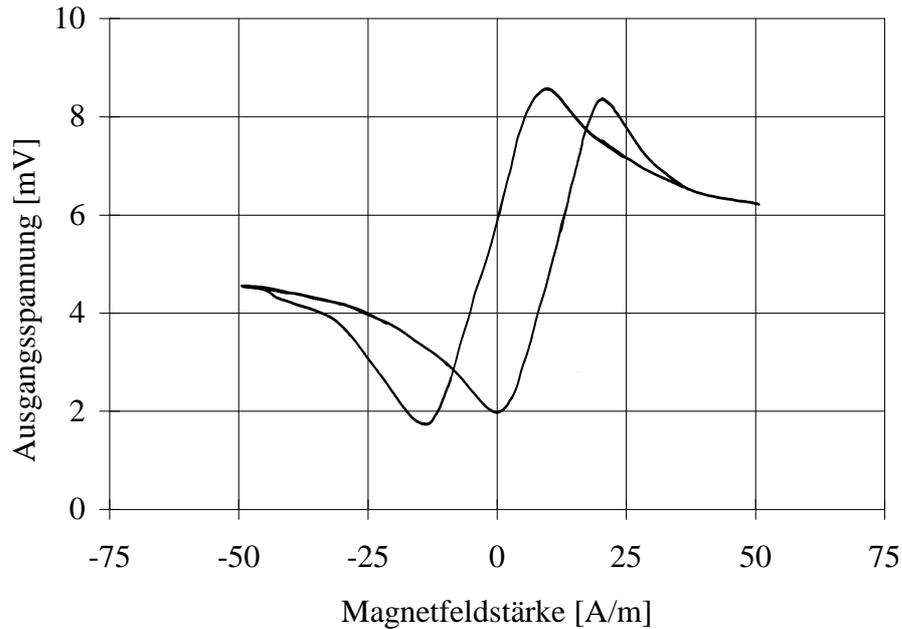


Abbildung 54: Kennlinie Femto5-Sensor mit Folienantenne (5/40/1 SK) bei einer Betriebsspannung von $U_B = 2\text{ V}$ und einem Gesamtbiasstrom von 60 mA.

Die Ausprägung der Hysterese ist weder durch Änderung der Betriebsspannung, noch durch Variation des Biasstromes entscheidend beeinflussbar. Wurden die Sensoren nicht über den linearen Teil ihrer Kennlinien hinaus ausgelenkt, so war eine Reduktion der Hysterese feststellbar. Doch selbst bei Austeuerbereichen von wenigen mA/m hatten die Ausgangskennlinien die Form von Rayleigh-Schleifen. In einer Versuchsreihe wurden die Kennlinien bei unterschiedlicher Auslenkung gemessen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messergebnisse, die bei unterschiedlicher Auslenkung an einem Sensor mit Folienantennen (5/40/1) gemessen wurden:

Meßfeldstärke [A/m]	U_a [mV]	Hysterese [mV]	Hysterese der U_a [%]	S_U [mV/V/kA/m]
± 50	7,7	5,7	74	228
± 10	5,2	0,8	15	138
± 5	2,6	0,4	15	138
$\pm 0,5$	0,25	0,04	16	117

Tabelle 7: Hystereseeigenschaften bei unterschiedlicher Meßfeldstärke eines Femto5-Sensors (5/40/1).

Die Betriebsspannung betrug bei diesen Messungen 2 V und der Gesamtbiasstrom 60 mA. Mit U_a ist in der Tabelle 7 der gemessene Gesamtspannungshub bezeichnet, der beim Durchfahren der Kennlinie erreicht wurde. Die untersuchten Proben waren oberhalb von Meßfeldstärken von etwa $\pm 10\text{ A/m}$ vollständig ausgelenkt. Ausgehend

von einem Aussteuerbereich von ± 50 A/m brachte eine Verkleinerung des Meßfeldes eine Reduktion des ermittelten Wertes für die Hysterese bis zu einem Faktor 5, der sich jedoch durch weiteres Verkleinern des Aussteuerbereiches nicht mehr vergrößern ließ. Die Hysterese läßt sich demzufolge nur bis zu einem Minimalwert hin verkleinern und kann nicht durch Einschränkung des Aussteuerbereiches vollständig beseitigt werden. Die Empfindlichkeiten der Sensoren mit Folienantennen wurden durch Bestimmung des Anstieges der hysteresebehafteten Kennlinien bestimmt. Es ist zu beachten, daß der angegebene Wert für die Empfindlichkeit bei einer Auslenkung von ± 50 A/m mit der beschriebenen Methode zu groß bestimmt war (Rayleigh-Schleifen) und nur einen theoretisch erreichbaren Wert darstellt, da die Hysterese in diesem Fall unverhältnismäßig groß ist.

Um den magnetischen Übergangswiderstand zwischen Folienantenne und Dünnschichtantenne zu verkleinern, wurden Versuche mit einem von der Firma Siegert TFT entwickelten weichmagnetischen Kleber unternommen [73]. Als Basismaterial diente gesintertes MnZn-Ferrit, das in einem speziellen Mahlverfahren zerkleinert wurde. Das gemahlene Pulver wurde in Epoxidharz verschlickert, wobei Füllungsgrade von bis zu 70 % erreicht wurden. Die Korngröße des für die Klebung der Folienantennen bei den Femto5-Sensoren verwendeten Pulvers betrug zwischen $10\ \mu\text{m}$ bis $30\ \mu\text{m}$. Mit diesem weichmagnetischen Kleber konnten Klebespalte zwischen Folien- und Dünnschichtantennen in der Größenordnung von $30\ \mu\text{m}$ bis $40\ \mu\text{m}$ realisiert werden, was in etwa drei bis viermal so große Spalte im Vergleich zu Klebespalten unter Verwendung von Sekundenkleber bedeutete. Die an den Sensoren, deren Folienantennen mit weichmagnetischem Kleber befestigt wurden, gemessenen Empfindlichkeiten lagen bei allen untersuchten Geometrievarianten im Durchschnitt zwischen 10 % und 20 % unterhalb der Werte von Sensoren, deren Folienantennen mit Sekundenkleber fixiert wurden (siehe Abbildung 55). Der vergrößerte Spalt zwischen den Antennen überkompensiert einen möglichen Empfindlichkeitsgewinn durch den weichmagnetischen Kleber. In der folgenden Abbildung sind die gemessenen Empfindlichkeiten an verschiedenen Sensoren gleicher Dünnschichtantennenlänge aufgetragen:

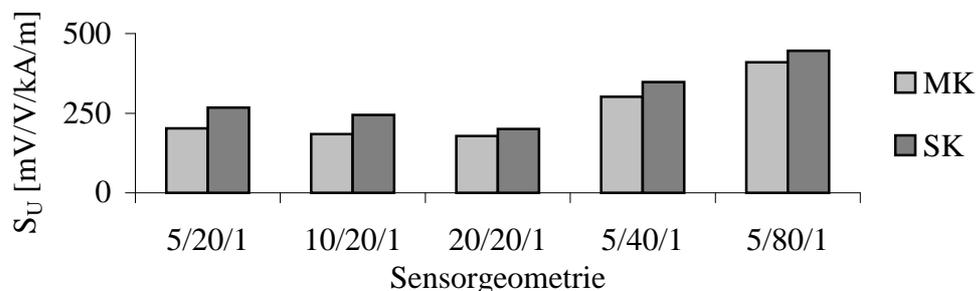


Abbildung 55: Vergleich der normierten Empfindlichkeiten von Femto5-Sensoren, deren Folienantennen mit Sekundenkleber (SK) und weichmagnetischem Kleber (MK) befestigt wurden.

Messungen an Proben mit unterschiedlicher Dünnschichtantennenlänge führten zu vergleichbaren Ergebnissen. An den Kennlinien der untersuchten Sensoren war keine Verbesserung bezüglich der Hysterese zu beobachten.

In der nachfolgenden Tabelle sind die an den Femto5-Sensoren mit 35 nm dicker Zwischenschicht aus Platin gemessenen normierten Empfindlichkeiten zusammengefaßt:

Sensorgeometrie		normierte Empfindlichkeit S_U [mV/V/kA/m]					
w [µm]	l [µm]	0	1	2	4	mit Folien- antenne SK	mit Folien- antenne MK
5	20	1,1	16,8	16,8	15,3	268	202
5	40	8,1	20,4	20,4	21,3	348	302
5	80	9,9	25,9	25,1	26,9	446	410
10	20	3,7	20,6	20,2	24,6	244	184
10	40	8,1	26,5	28,7	25,9	-	-
10	80	14,6	31,2	30,2	31,3	-	-
20	20	2,8	9,9	13,4	9,7	200	178
20	40	8,1	23,9	29,8	30,5	-	-
20	80	14,5	35,1	39,7	38,2	-	-

Tabelle 8: Normierte Empfindlichkeiten gemessen an Femto5-Sensoren mit 35 nm dicker Zwischenschicht aus Platin.

Im Gegensatz zu den berechneten Werten nimmt die Empfindlichkeit bei Sensoren mit kombinierter Folienantenne mit ansteigender Streifenlänge zu.

5.5.1. Rauschuntersuchungen an Femto5-Sensoren mit Zwischenschichtmaterial Platin

Für die Bestimmung der mit den Femto5-Sensoren erzielbaren Auflösungsgrenze wurden Rauschmessungen vorgenommen. Zunächst wurden Rauschspektren an Proben ohne Dünnschichtantenne bis zu einer Frequenz von 1 kHz gemessen. Um die störenden Einflüsse der Netzspannung so gering wie möglich zu halten, wurde die Versorgungsspannung der Proben von Akkumulatoren geliefert, die sich zusammen mit den Sensoren in der Abschirmkammer befanden. Ein für die Femto5-Sensoren typisches Rauschspektrum ist in Abbildung 56 zu sehen:

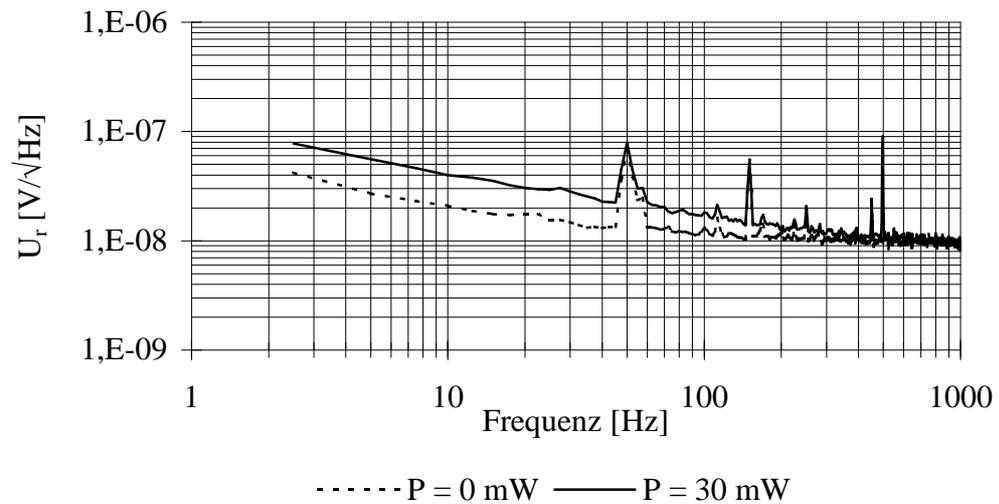


Abbildung 56: Rauschspektrum eines Femto5-Sensors ohne Dünnschichtantennen (5/80/0).

Das in Abbildung 56 gestrichelt dargestellte Spektrum wurde ohne Betriebsspannung am Sensor aufgezeichnet und repräsentiert das Spannungsrauschen des gesamten Meßaufbaus bei ohmscher Belastung des eingesetzten Verstärkers (PAR 113) durch den Sensor. Es ergibt sich, daß bei Frequenzen oberhalb einiger hundert Hertz das Rauschspannungsniveau nur von dem ohmschen Widerstand der Sensoren bestimmt wird.

Um den Einfluß des Sensorbetriebsstromes auf das Rauschverhalten im niederfrequenten Bereich zu erfassen, wurden die Rauschmessungen bei verschiedenen Versorgungsspannungen durchgeführt. Aus der gemessenen Gesamtrauschleistung läßt sich gemäß Gleichung (81) die spektrale Nettorausleistung des Sensors berechnen [55]:

$$S_n(f) = S_{ges}(f) - S_a(f) \quad (81)$$

$S_n(f)$: spektrale Nettorausleistung

$S_{ges}(f)$: gemessene Gesamtrauschleistung

$S_a(f)$: Rauschleistung der Meßanlage.

Die Rauschleistung der Meßanlage wurde gemessen, indem der Verstärker mit einem Metallfilmwiderstand ohne Versorgungsspannung eingangsseitig belastet wurde, dessen ohmscher Widerstand mit dem des zu untersuchenden Sensors vergleichbar war. Die Ergebnisse der Rauschleistungsmessungen sind in Abbildung 57 dargestellt:

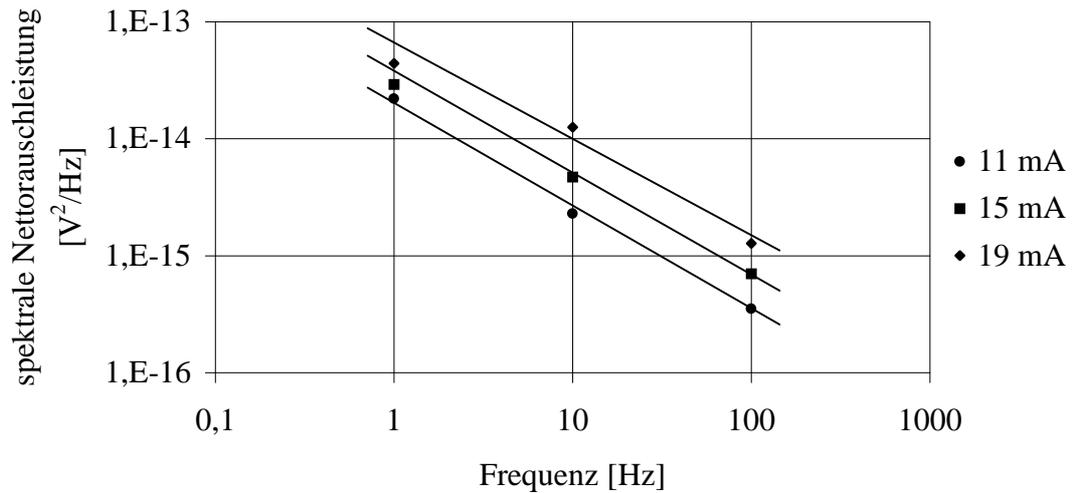


Abbildung 57: Nettorauschleistung eines Femto5-Sensors (5/80/0) bei verschiedenen Betriebsströmen.

In Abbildung 57 ist die bei kleineren Frequenzen zunehmende spektrale Nettorauschleistung eines untersuchten Sensors bei verschiedenen Betriebsströmen zu sehen. Deutlich ist der mit der Erhöhung des Betriebsstromes einhergehende Anstieg der Rauschleistung zu erkennen.

Um den Zusammenhang zwischen Betriebsstrom I und der Rauschleistung des Sensors quantitativ angeben zu können, wurde der Quotient aus der spektralen Nettorauschleistung bei einer festen Frequenz und dem Quadrat des Betriebsstromes als Funktion des Betriebsstromes aufgetragen:

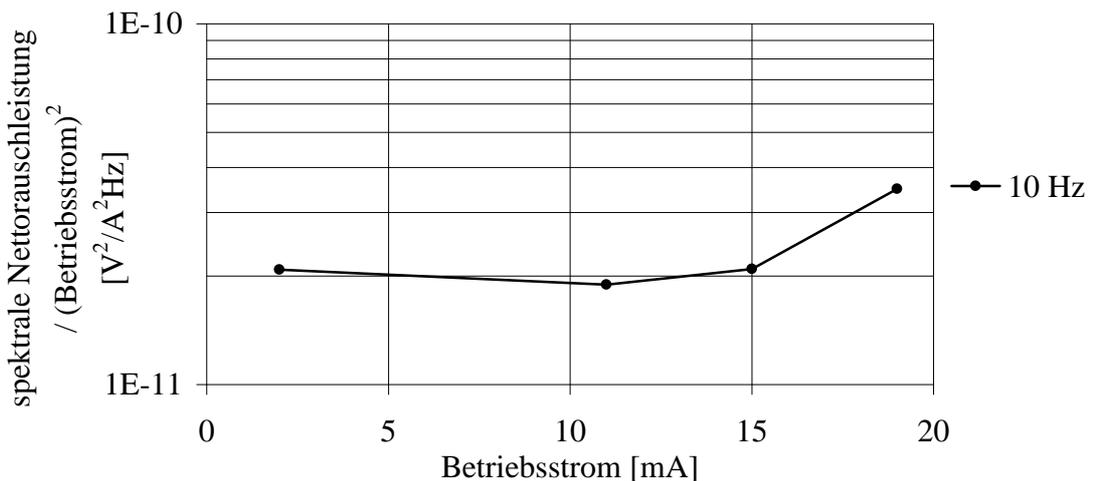


Abbildung 58: Nettorauschleistung eines Femto5-Sensors (5/80/0) normiert auf das Quadrat des Betriebsstromes.

Wie aus Abbildung 58 hervorgeht, besteht bis zu einem Betriebsstrom von etwa 15 mA ein annähernd quadratischer Zusammenhang zwischen dem Betriebsstrom und der Rauschleistung. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den von Philips Hamburg an

Femto5-Proben der gleichen Fertigungscharge gemachten Beobachtungen [74]. Wird der Betriebsstrom über 15 mA hinaus erhöht, kommt es zu einem noch größeren Anstieg der Rauschleistung. Die Ursache für diesen Anstieg kann in der zunehmenden Erwärmung der Sensorschichten durch den Betriebsstrom und dem damit verbundenen zusätzlichen Rauschbeitrag infolge der größer gewordenen Bewegungen der Domänenwände gesehen werden.

Messungen an Proben mit Dünnschichtantennen und an Proben mit kombinierten Folienantennen führten zu der Erkenntnis, daß beide Antennenarten keinen wesentlichen Beitrag zur Rauschspannung im niederfrequenten Bereich leisten, solange die Folienantennen mit Sekundenkleber befestigt wurden:

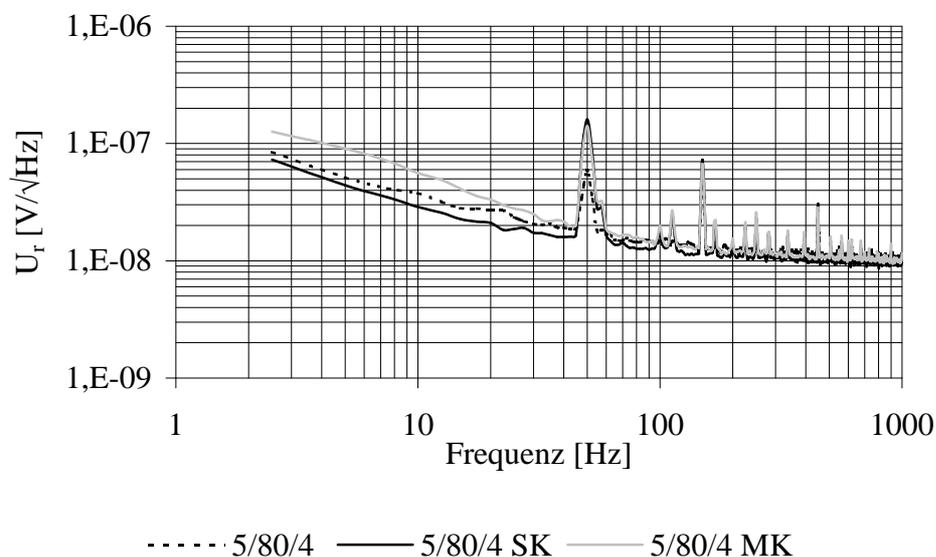


Abbildung 59: Rauschspektren der Femto5-Sensoren mit Dünnschicht- und Folienantennen.

Wie aus Abbildung 59 hervorgeht, sind die Rauschspektren der Proben mit Dünnschichtantennen von denen mit kombinierten Folienantennen, die mit Sekundenkleber befestigt wurden, praktisch nicht zu unterscheiden. Sensoren, deren Folienantennen mit weichmagnetischem Kleber fixiert wurden, rauschten dahingegen unterhalb von 10 Hz im Durchschnitt mit der doppelten Amplitude im Vergleich zu Proben mit Engspaltklebung. Aufgrund der erhöhten Rauschpegel und der zuvor ermittelten geringeren Empfindlichkeit (vgl. Abbildung 55) ist im weiteren Verlauf der Untersuchungen auf den Einsatz von weichmagnetischem Kleber verzichtet worden. Unter Berücksichtigung der Rauschzahl des Vorverstärkers und unter Miteinbeziehung der gemessenen Empfindlichkeiten konnten folgende Werte für die Auflösungsgrenzen der in Abbildung 59 gezeigten Proben mit Folienantennen ermittelt werden:

Sensortyp	S_U [mV/V/kA/m]	U_B [V]	Auflösung [pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$]		
			10 Hz	100 Hz	1 kHz
5/80/4 SK	420	4,8	20	9	5
5/80/4 MK	402	4,9	30	10	6

Tabelle 9: Auflösungsgrenzen von Femto5-Sensoren mit 35 nm dicker Zwischenschicht aus Platin im Vergleich.

Die in Tabelle 9 angegebenen Auflösungsgrenzen stellen theoretisch erreichbare Werte dar, weil die Ausgangskennlinien, an denen die Empfindlichkeiten bestimmt wurden, hysteresebefahet waren (Rayleigh-Schleifen).

Wurden die Sensoren in der Abschirmkammer einem statischen Magnetfeld ausgesetzt, konnten in Abhängigkeit von der Höhe und Richtung des in Meßrichtung angelegten Magnetfeldes im Bereich kleiner Frequenzen unterschiedliche Rauschspannungen gemessen werden. Durch das statische Magnetfeld wurden die Arbeitspunkte der Sensoren in verschiedene Bereiche verschoben. Bei der Ausgangskennlinie der Sensoren wurden hierbei drei Bereiche unterschieden. Der in der nachfolgenden Abbildung 60 mit I gekennzeichnete Bereich einer idealisiert dargestellten Ausgangskennlinie begrenzt den linearen Teil. In den Bereichen II, die sich an den linearen Teil beiderseits anschließen, befinden sich die Arbeitspunkte der Sensoren im Bereich ihrer Wendepunkte. Durch weiteres Verschieben der Arbeitspunkte gelangt man in die Bereiche III, in denen sich die Sensoren im Sättigungsbereich befinden:

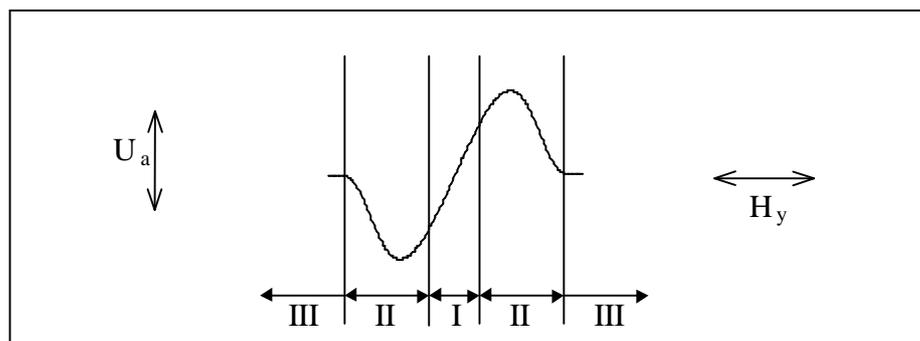


Abbildung 60: Bereiche einer idealisiert dargestellten Ausgangskennlinie.

In der Abbildung 61 sind die Rauschspannungswerte eingetragen, die an einem Sensor (5/80/0), der mit zwei Festwiderständen zu einer Vollbrücke komplettiert worden war, gemessen wurden:

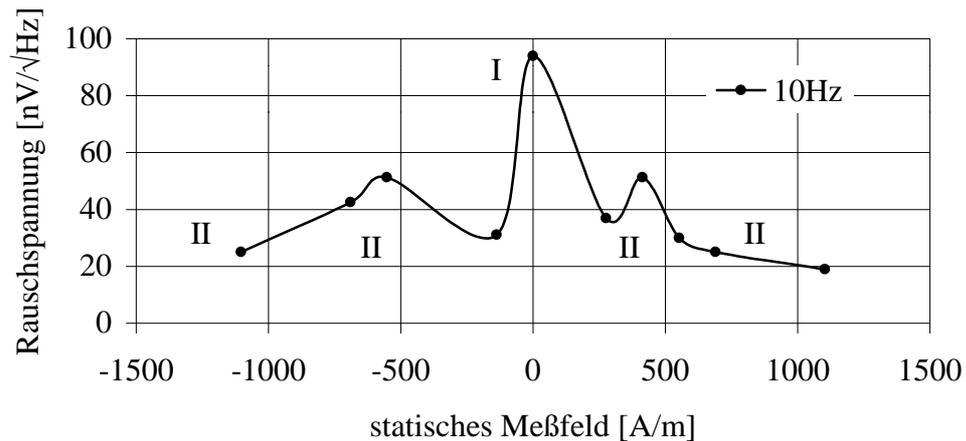


Abbildung 61: Rauschspannung eines Femto5-Sensors ohne Dünnschichtantennen unter dem Einfluß eines statischen Magnetfeldes.

Die Rauschmessungen wurden im linearen Teil der Ausgangskennlinie I, in der Umgebung der Wendepunkte II und in den Sättigungsbereichen III durchgeführt. Die Werte waren im linearen Bereich bis zu einer Größenordnung gegenüber den Werten im Sättigungsbereich erhöht. In der Nähe der Wendepunkte traten ebenfalls erhöhte Rauschspannungswerte auf. Dieses Verhalten kann unter der Annahme verstanden werden, daß die Magnetisierung in den Schichtpaketen in Domänen zerfallen ist. Die Wandbewegungen tragen im empfindlichsten Teil der Kennlinie den größten Beitrag zum Rauschniveau der Sensoren bei. Dieser Beitrag reduziert sich mit zunehmender Ausrichtung der Domänen, der mit einer Entwicklung hin zum Eindomänenzustand verbunden ist. Die dominierende Rauschquelle im niederfrequenten Spektrum wäre demzufolge die thermisch aktivierte Bewegung der Domänenwände [75].

Da die Hysterese bei allen Sensoren unter den verschiedensten Betriebsbedingungen vorhanden war, wurde als nächstes die Dicke des Zwischenschichtmaterials erhöht. Es sind zwei Wafer mit einer Zwischenschichtdicke von jeweils 50 nm Platin gefertigt worden. Die Grundwiderstände lagen nach dem Aufbrennen bis zu 30 % unter den Werten von Sensoren mit 35 nm Zwischenschicht. Die gemessenen Empfindlichkeiten waren vergleichbar mit den Empfindlichkeiten bei den vorherigen Proben mit dünnerer Zwischenschicht. Eine Hysterese in den Ausgangskennlinien war sowohl bei Sensoren, die nur mit Dünnschichtantennen ausgestattet waren, als auch bei Sensoren, die zusätzliche Folienantennen besaßen, in unveränderter Weise vorhanden.

Falls das Platin, auf dem die obere magnetoresistive Schicht aufgedampft wurde, dafür verantwortlich war, daß die beiden magnetfeldempfindlichen Schichten unterschiedliche Anisotropiefeldstärken besaßen, was bei anderen Dreischichtsystemen zu Hystereseerscheinungen geführt hatte [76], mußte ein geeigneteres Zwischenschichtmaterial gefunden werden. Tantal sollte in diesem Zusammenhang und im Hinblick auf den

erzielbaren Widerstandshub, der bei Sensoren mit Zwischenschichtmaterial Platin mit 0,7 % unter den Erwartungen zurückgeblieben war, eine Verbesserung zu bringen.

5.6. Zwischenschichtmaterial Tantal

Bevor Femto5-Sensoren mit einer Zwischenschicht aus Tantal gefertigt wurden, sind drei Teststruktur 2-Wafer, auf denen sich verschieden breite Streifenpakete ohne Dünnschichtantennen befanden, mit Zwischenschichtdicken von 30 nm, 40 nm und 50 nm Tantal produziert worden. Die magnetische Entkopplung der Schichten konnte bei alle drei Dicken durch Messung der Widerstände, die sich ohne äußere Magnetfelder in ihrem Minimum befanden, festgestellt werden. Bei gleichem Verhältnis von Länge zu Breite lagen die Widerstände der untersuchten 10 μm und 100 μm breiten Streifen unabhängig von der Dicke der Zwischenschicht bei 100 Ω . Wurden die Proben in der Abschirmkammer in beide Richtungen mehrmals vollständig bis in die Sättigung hinein ausgelenkt (Meßfeldstärke $\pm 1 \text{ kA/m}$), so war eine reproduzierbare Hysterese in den Ausgangskennlinien zu beobachten. Nach der Einschränkung des Aussteuerbereichs auf den linearen Teil der Kennlinie war keine Hysterese mehr festzustellen. Die Widerstandshübe waren mit 1,6 % ähnlich niedrig wie die Hübe, die an Proben der Teststruktur 2 mit Platinzwischenschichten gemessen wurden. Eine Auswahl der gemessenen Empfindlichkeiten in Abhängigkeit vom Betriebsstrom ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

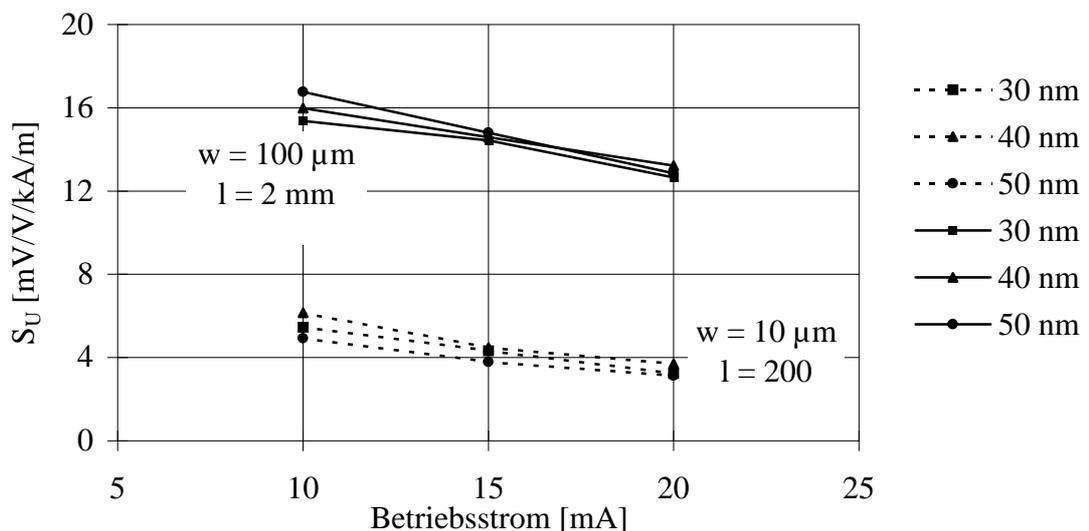


Abbildung 62: Empfindlichkeiten von Dreischichtpaketen der Teststruktur 2 mit unterschiedlich dicker Zwischenschicht aus Tantal.

Wie in Abbildung 62 zu erkennen ist, sind die 100 μm breiten Streifenpakete bis zu einem Faktor drei empfindlicher als die 10 μm breiten (vergleichbar mit den Ergebnissen bei Sensoren mit Zwischenschichtmaterial aus Platin).

Im Anschluß an die Vorversuche an der Teststruktur 2 wurden Femto5-Sensoren mit einer 40 nm dicken Zwischenschicht aus Tantal hergestellt. In der folgenden Tabelle sind die aufgebondeten Varianten mit den dazugehörigen Grundwiderständen und den gemessenen Empfindlichkeiten aufgeführt:

Sensortyp	R ₀ [Ω]	P = 50 mW	P = 100 mW	P = 150 mW
		S _U [mV/V/kA/m]	S _U [mV/V/kA/m]	S _U [mV/V/kA/m]
5/40/0	328	4,8	4,6	4,0
5/40/1	320	9,2	8,2	7,2
5/40/2	312	10,4	8,8	8,0
5/40/4	307	10,0	9,0	7,6
10/40/0	183	6,4	5,4	4,8
10/40/1	180	12,2	10,8	9,4
10/40/2	177	12,4	10,6	9,6
10/40/4	175	13,0	11,4	10,2
20/40/0	104	7,0	6,0	5,4
20/40/1	102	12,8	11,2	10,0
20/40/2	101	15,4	12,8	11,4
20/40/4	100	14,8	12,4	10,6

Tabelle 10: Normierte Empfindlichkeiten der Femto5-Sensoren mit 40 nm dicker Zwischenschicht aus Tantal.

Der Gesamtbiasstrom betrug bei den in Tabelle 10 vorgestellten Ergebnissen 90 mA und das für die Auslenkung der Sensoren benutzte Magnetfeld in der Abschirmkammer betrug ± 16 A/m. Die Kennlinien der Sensoren ohne Dünnschichtantennen war unter den genannten Bedingungen hysteresefrei. Bei den Proben mit Dünnschichtantennen war eine Hysterese im Ausgangssignal zu beobachten, die kleiner als die bei den Proben mit Platinschicht war und je nach untersuchtem Exemplar unabhängig von der Länge der Dünnschichtantenne zwischen 2 % und 3 % des im Meßfeld erreichten Spannungshubes ausmachte. Die Empfindlichkeiten, die bei Sensoren mit Dünnschichtantennen erreicht wurden, waren im Mittel 50 % kleiner im Vergleich zu den Proben mit Platinzwischenschicht. Dieser Empfindlichkeitsunterschied ist zum Teil auf den mit 0,65 % kleineren Hub der Sensoren zurückzuführen. Weil die Sensoren mit Tantalzwischenschicht einen durchschnittlich um 10 % geringeren Grundwiderstand aufweisen, ist zur Erreichung der gleichen Verlustleistung ein höherer Betriebsstrom notwendig, der die Empfindlichkeit verringert. Im wesentlichen rührt der Unterschied von den tendenziell zu hoch angegebenen Empfindlichkeitswerten bei den Sensoren mit

Zwischenschicht aus Platin her, die an der steilsten Stelle der hysteresebefahenen Ausgangskennlinie bestimmt worden waren. Wie in Tabelle 10 zu erkennen ist, beträgt der durch die Dünnschichtantennen erzielbare Verstärkungsfaktor in Bezug auf die Empfindlichkeiten unabhängig von deren Länge etwa 2.

Die Proben mit Dünnschichtantennen wurden anschließend mit Folienantennen durch Engspaltklebung mit Sekundenkleber ausgestattet. In einer Meßreihe sind für die in Tabelle 10 aufgeführten Sensortypen die Empfindlichkeitswerte unter verschiedenen Betriebsbedingungen ermittelt worden. Dabei wurde die umgesetzte Leistung in 25 mW Schritten sukzessive bis auf 150 mW erhöht und die Ausgangskennlinien bei Biasströmen von 40 mA, 80 mA und 120 mA aufgenommen. Zusätzlich wurde der Aussteuerbereich von ± 1 A/m über $\pm 5,3$ A/m bis hin zu $\pm 17,5$ A/m variiert. Die folgende Tabelle zeigt am Beispiel eines Sensors (10/40/4) mit Folienantennen die Empfindlichkeitswerte, die unter den beschriebenen Bedingungen bestimmt wurden:

P [mW]	I_{Bias} [mA]	S_U	Hyste-	S_U	Hyste-	S_U	Hyste-
		[mV/V/kA/m] $H_y = \pm 1$ A/m	rese [%]	[mV/V/kA/m] $H_y = \pm 5,3$ A/m	rese [%]	[mV/V/kA/m] $H_y = \pm 17,5$ A/m	rese [%]
25	40	276	4,3	279	1,8	433	33,8
25	80	138	1,7	144	2,9	212	*
25	120	69	0	76	0	131	*
50	40	247	2,1	270	8,1	324	29,4
50	80	165	1,9	167	5,3	204	*
50	120	98	0	101	3,1	137	*
75	40	222	3,0	240	6,5	285	32,6
75	80	158	2,2	161	4,7	196	*
75	120	104	0	105	3,6	120	*
100	40	195	2,4	207	5,4	282	32,1
100	80	143	1,7	148	3,9	177	*
100	120	104	0	99	3,4	122	*
125	40	190	2,3	193	5,2	243	29,1
125	80	138	0,7	143	4,2	180	*
125	120	104	0	100	2,9	118	*
150	40	183	1,5	192	5,6	238	28,3
150	80	139	1,3	142	3,9	177	*
150	120	102	0	98	2,7	118	*

Tabelle 11: Empfindlichkeitswerte eines Femto5-Sensors mit 40 nm dicker Zwischenschicht aus Tantal und kombinierter Folienantenne SK.

Die in Tabelle 11 angegebenen Werte für die Hysterese beziehen sich auf den bei dem jeweiligen Aussteuerbereich erzielten Spannungshub. Durch Vergrößerung des Biasstromes konnte bei allen untersuchten Exemplaren die Hysterese verkleinert werden. Beim kleinsten gewählten Aussteuerbereich ($H_y = \pm 1 \text{ A/m}$), war bei einem Biasstrom von 120 mA keine meßbare Hysterese im Ausgangssignal vorhanden. In Abhängigkeit von den übrigen Parametern war dies mit einer Abnahme der Empfindlichkeit verbunden. Wurden die Sensoren über den linearen Bereich hinaus ausgelenkt ($H_y = \pm 17,5 \text{ A/m}$), führten Biasströme größer 40 mA zu Instabilitäten in den Kennlinien, wodurch die Angabe der prozentualen Hysterese unmöglich wurde (in Tabelle 11 durch * gekennzeichnet).

Bei den untersuchten Exemplaren konnte die Empfindlichkeit durch die Größe des Biasstromes beeinflusst werden. Der Zusammenhang zwischen Biasstrom und Empfindlichkeit geht aus der nächsten Abbildung hervor:

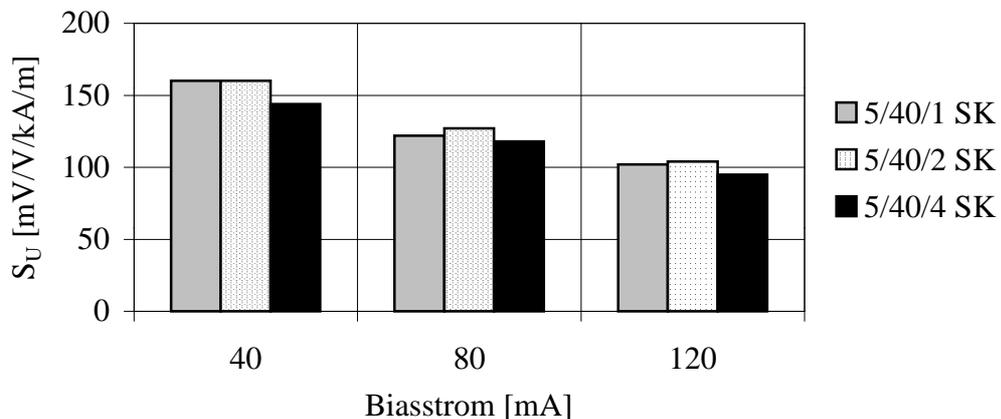


Abbildung 63: Normierte Empfindlichkeiten von Femto5-Sensoren mit Tantal-zwischenschicht bei verschiedenen Biasströmen.

Am Beispiel der $5 \mu\text{m}$ breiten Proben mit Folienantennen ist die Abnahme der Empfindlichkeit zu erkennen. Die Verlustleistung betrug bei den in Abbildung 63 dargestellten Messungen 100 mW und das Meßfeld $\pm 1 \text{ A/m}$. Die Länge der Dünnschichtantennen unter den Folienantennen besitzt einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Höhe der Empfindlichkeit, so daß festzustellen bleibt, daß bereits die Überlappungsfläche bei einfacher Dünnschichtantennenlänge ausreicht, um den von den Folienantennen gesammelten magnetischen Fluß in Richtung Sensorstreifen einzukoppeln.

Eine Vergrößerung der Verlustleistung führt aufgrund der stabilisierenden Wirkung des Sensorstromes ebenfalls zu einer Reduzierung der Empfindlichkeit. In der folgenden Abbildung 64 ist dieser Zusammenhang anhand der Empfindlichkeitswerte, die bei drei verschiedenen Biasströmen ermittelt wurden, gezeigt. Stellvertretend für die durch-

geführten Meßreihen sind die Ergebnisse von einem Sensor (5/40/1) mit aufgeklebten Folienantennen, der von einem Meßfeld der Größe ± 1 A/m ausgelenkt wurde, zu sehen:

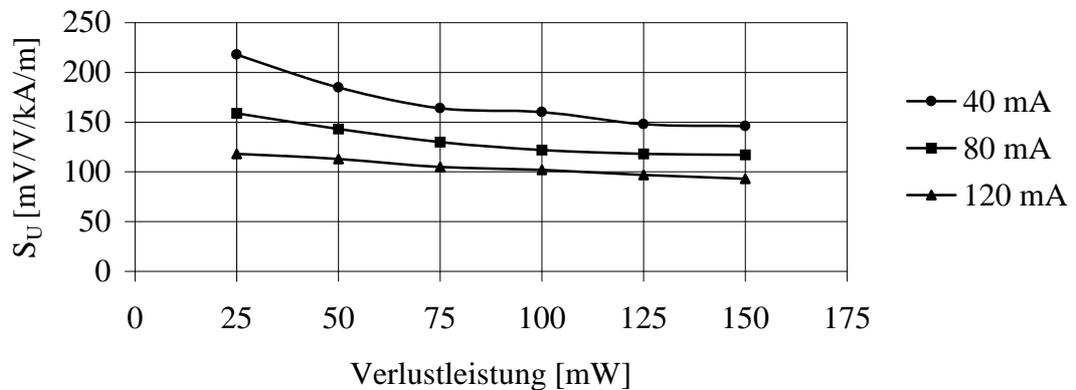


Abbildung 64: Empfindlichkeiten eines Femto5-Sensors (5/40/1 SK) mit Folienantennen in Abhängigkeit von der Verlustleistung bei verschiedenen Arbeitspunkten.

Die Höhe und die Differenz der Empfindlichkeitswerte zwischen den verschiedenen Biasströmen verkleinerte sich bei allen Proben unabhängig von der Breite und Länge der Dünnschichtantennen mit zunehmender Verlustleistung.

Eine Gegenüberstellung der Empfindlichkeiten der Sensoren vor und nach dem Anbringen von Folienantennen läßt erkennen, daß Empfindlichkeitssteigerungen um den Faktor 20 bis 30 durch die Antennenkombination möglich sind. In der folgenden Abbildung repräsentieren die schwarzen Balken die Empfindlichkeitswerte von den Proben ohne Folienantenne bei einer Verlustleistung von 50 mW, einem Biasstrom von 90 mA und einem Meßfeld von ± 16 A/m. Die grauen Balken entsprechen den maximal gemessenen Empfindlichkeiten der gleichen Sensoren nach dem Aufkleben der Folienantennen bei einer Verlustleistung von ebenfalls 50 mW, einem Biasstrom von 40 mA und einem Gesamtmeßfeld von $\pm 17,5$ A/m:

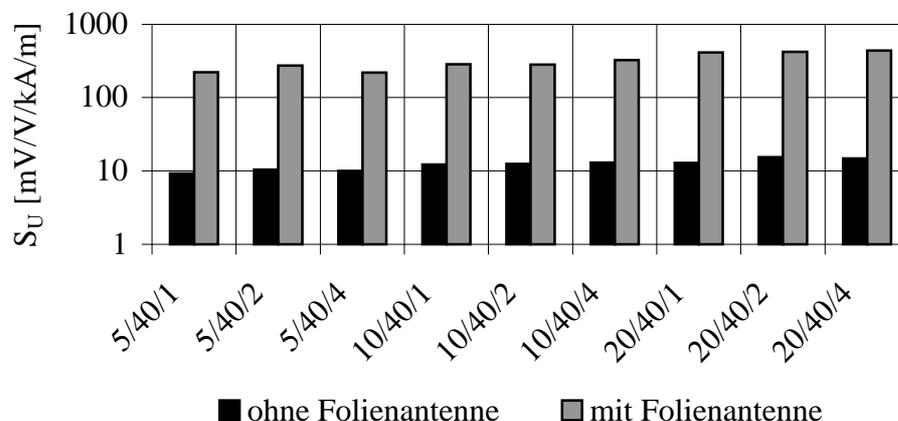


Abbildung 65: Empfindlichkeiten der Femto5-Sensoren (40 nm Tantalzwischen-schicht) mit und ohne Folienantennen.

Setzt man die Maximalwerte in Abbildung 65 in Relation zu den Empfindlichkeiten von Proben ohne Dünnschichtantennen, so ist der Kombination von Dünnschicht- und Folienantennen ein Verstärkungsfaktor zuzuordnen, der zwischen 50 und 70 liegt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen sind Proben mit 80 μm langen Streifen-schichtpaketen aufgebondet worden. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Sensoren und die gemessenen normierten Empfindlichkeiten aufgelistet:

Sensortyp	S_U [mV/V/kA/m]	Sensortyp	S_U [mV/V/kA/m]
5/80/0	6,6	10/80/2	14,2
5/80/1	10,5	10/80/4	16,2
5/80/2	10,6	20/80/0	10,4
5/80/4	*	20/80/1	19,7
10/80/0	8,5	20/80/2	21,4
10/80/1	15,8	20/80/4	*

Tabelle 12: Empfindlichkeitswerte von Femto5-Sensoren mit Streifenlänge 80 μm .

Die Verlustleistung betrug 50 mW, der Biasstrom 90 mA und das Meßfeld ± 16 A/m. Die Empfindlichkeitswerte liegen geringfügig über denen der 40 μm langen Streifenpakete. Die Dünnschichtantennen führen ebenfalls unabhängig von deren Länge zu einer Verdopplung der Empfindlichkeiten. Die mit einem * gekennzeichneten Exemplare waren defekt.

Eine Gegenüberstellung der mit dem Modell berechneten und den gemessenen Empfindlichkeitswerten ist in Abbildung 66 zu sehen:

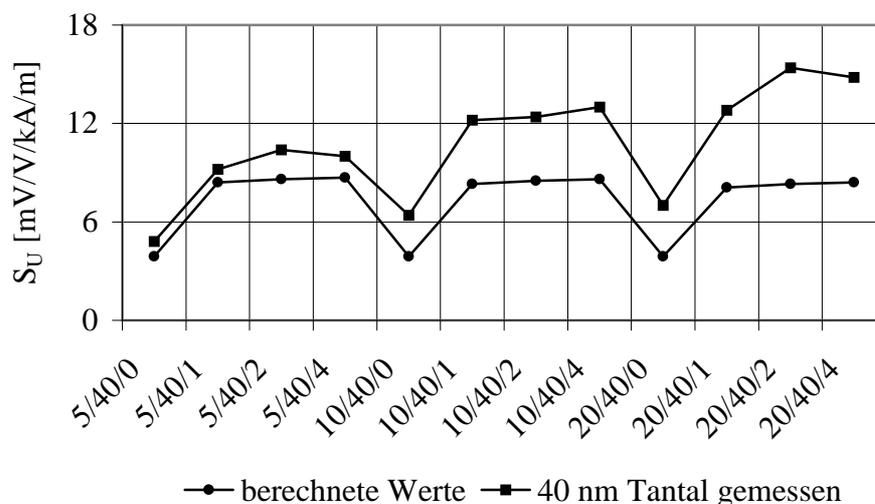


Abbildung 66: Meßwerte von Femto5-Sensoren mit 40 nm Tantalzwichenschicht im Vergleich zu theoretischen Werten.

Wie aus Abbildung 66 hervorgeht, kann die Empfindlichkeitszunahme durch die Dünnschichtantennen der Längen 1, 2 und 4 bezogen auf Sensoren mit Streifenpaketen ohne Dünnschichtantennen mit dem Modell gut vorausgesagt werden. Die beste Übereinstimmung zwischen theoretischen Werten und den Meßergebnissen ist bei den 5 μm breiten Proben zu erkennen. Je breiter die untersuchten Sensorstreifen waren, desto größer waren die Abweichungen, wobei die gemessenen Werte stets über den berechneten lagen.

Durch das Anbringen von Folienantennen bei Proben mit Dünnschichtantennen konnten mit einem Meßfeld von $\pm 5,25 \text{ A/m}$ unter Beibehaltung der übrigen Parameter die in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Werte gemessen werden:

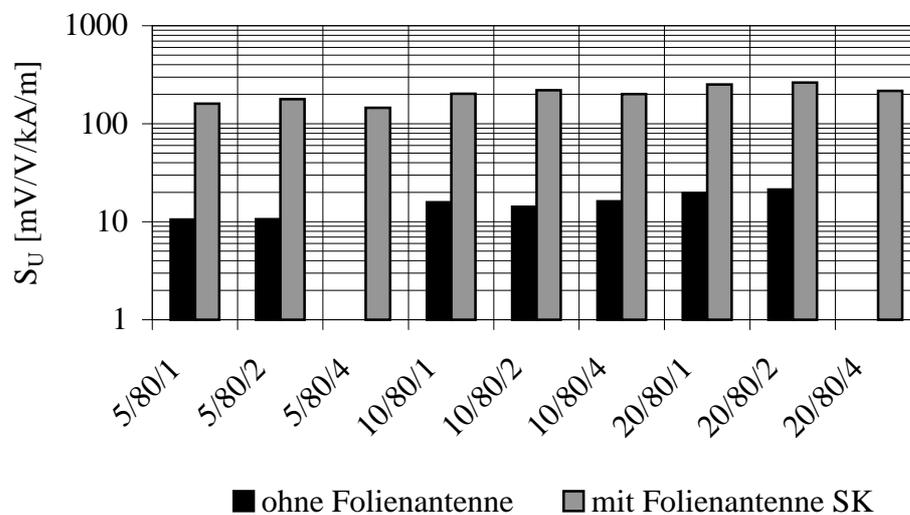


Abbildung 67: Empfindlichkeitswerte der Femto5-Sensoren mit Streifenlänge 80 μm mit und ohne kombinierter Folienantenne.

Wie in Abbildung 67 zu sehen, können mit Folienantennen bei 80 μm langen Schichtpaketen Empfindlichkeitssteigerungen um etwa eine Größenordnung erzielt werden. Die Absolutwerte liegen im Mittel um 20 % über denen, die an Proben mit 40 μm langen Schichtpaketen entsprechender Breite unter vergleichbaren Bedingungen gemessen wurden. Die Hysterese der Ausgangskennlinien war mit maximal 3,5 % bezogen auf den Spannungshub im Meßfeld deutlich kleiner als bei den 40 μm langen Schichtstreifen.

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich zwischen dem berechneten Empfindlichkeitsniveau, daß aufgrund der Vernachlässigung der unterschiedlichen Länge der Dünnschichtantennen bei den Modellannahmen aus Vereinfachungsgründen für Sensoren mit kombinierter Folienantenne bei gleicher Streifenpaketlänge nahezu konstant ist, und den Meßwerten:

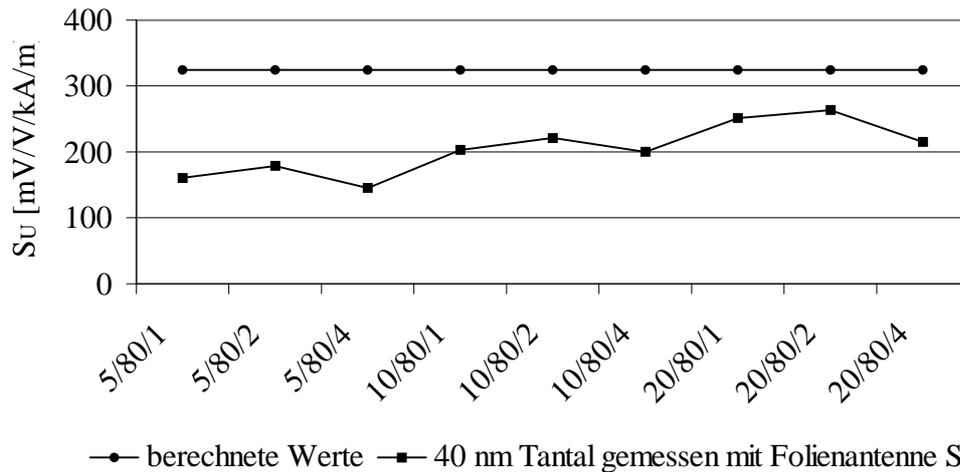


Abbildung 68: Vergleich der gemessenen und berechneten Empfindlichkeitswerte der Femto5-Sensoren mit kombinierter Folienantenne.

Die gemessenen Empfindlichkeitswerte liegen unterhalb des vorausberechneten Niveaus, wobei eine Abnahme der Differenzen mit zunehmender Breite der Streifenpakete zu beobachten ist.

5.6.1. Rauschmessungen an Sensoren mit Tantalzwichenschicht

Rauschspannungsmessungen in der Abschirmkammer zeigten, daß sich die Spektren der Femto5-Sensoren mit Tantalzwichenschicht nicht signifikant von denjenigen, die an Proben mit Platinzwichenschicht gemessen wurden, unterscheiden. Im Bereich des weißen Rauschens wird das Rauschspannungsniveau hauptsächlich durch den ohmschen Widerstand der Sensoren bestimmt. Unterhalb einiger hundert Hertz dominiert das für magnetoresistive Sensoren typische frequenzabhängige Rauschen. Die folgende Abbildung zeigt am Beispiel einer Probe (5/80/1), die mit Folienantennen ausgestattet war, die Rauschspannungsspektren bei einer Verlustleistung von 30 mW bei zwei verschiedenen statischen Magnetfeldern:

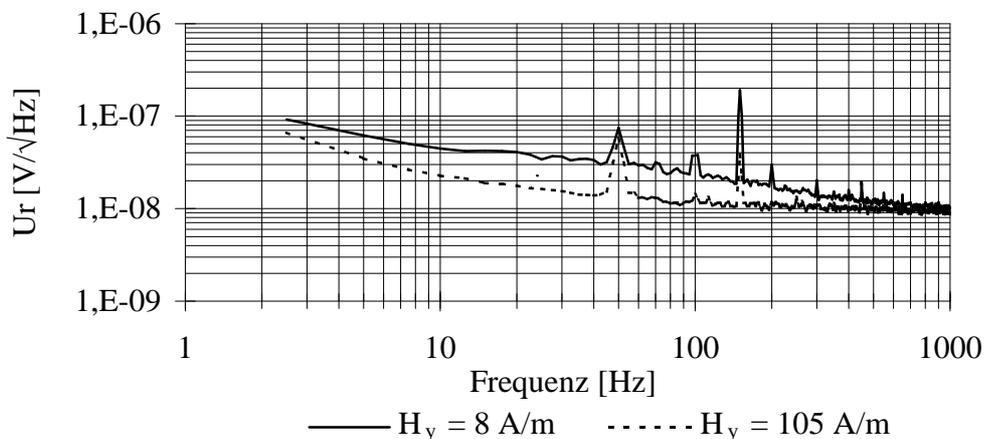


Abbildung 69: Rauschspektren eines Femto5-Sensors (5/80/1 SK) unter dem Einfluß eines statischen Magnetfeldes.

In der Abbildung 69 ist das Rauschspannungsspektrum gestrichelt dargestellt, das bei einem statischen in Meßrichtung zeigenden Magnetfeld, welches mit 105 A/m ausreichend groß war, um den Sensor in den gesättigten Teil seiner Kennlinie (Bereich III, vgl. Abbildung 60) zu bringen, gemessen wurde. Ebenfalls zu sehen ist das Spektrum bei einem statischen Magnetfeld, das den Sensor bis in die Umkehrpunkte seiner Ausgangskennlinie (Bereich II), die den linearen Bereich begrenzen, ausgelenkt hatte. Die Zunahme der Rauschspannung im niederfrequenten Bereich ist deutlich zu erkennen. Die Ursache dieses bereits bei den Femto5-Sensoren mit Zwischenschicht aus Platin beobachteten Phänomens könnte ebenfalls die thermisch aktivierten Bewegung der Domänenwände sein.

In der folgenden Abbildung ist die mit diesem Sensor erreichbare Magnetfeldauflösung dargestellt:

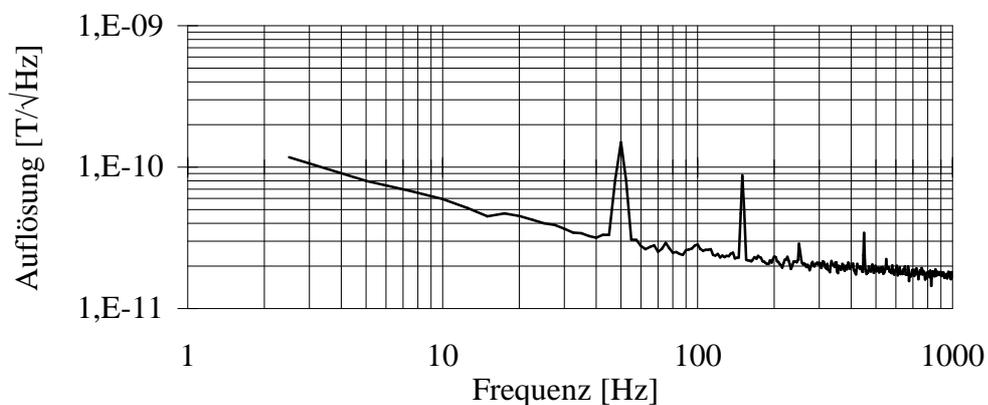


Abbildung 70: Magnetfeldauflösung eines Femto5-Sensors (5/80/1 SK).

Die Verlustleistung betrug bei der Messung 30 mW und der Biasstrom war 80 mA. Die Messung wurde ohne statisches Magnetfeld durchgeführt. Man erkennt, daß das Rauschniveau im Bereich unterhalb von 100 Hz stark zunimmt.

Die beste mit Femto-5 Sensoren mit Tantalzwischenschicht erreichbare Magnetfeldauflösung betrug bei 1 kHz 3 pT/√Hz (20/80/2 SK). Rauschmessungen an Proben unterschiedlicher Antennenkonfigurationen ergaben, daß weder die Dünnschicht- noch die Folienantennen eine Anhebung der Rauschpegel zur Folge haben und sich die Auflösungsgrenzen demzufolge lediglich um den Antennenverstärkungsfaktor voneinander unterscheiden.

5.7. Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit

Um den Einfluß der Temperatur auf den ohmschen Widerstand der Femto5-Sensoren zu untersuchen, wurde eine Versuchsreihe mit Proben durchgeführt, deren Zwischenschicht aus 35 nm Platin bzw. aus 40 nm Tantal bestand. Die Sensoren

befanden sich auf einer Heizplatte, an der die Temperatur eingestellt werden konnte. Die Streifenwiderstände wurden in Abhängigkeit von der Temperatur während der Versuche mit einem Ohm-Meter gemessen. In der folgenden Abbildung sind drei typische Kennlinien dieser Versuchsreihe zu sehen:

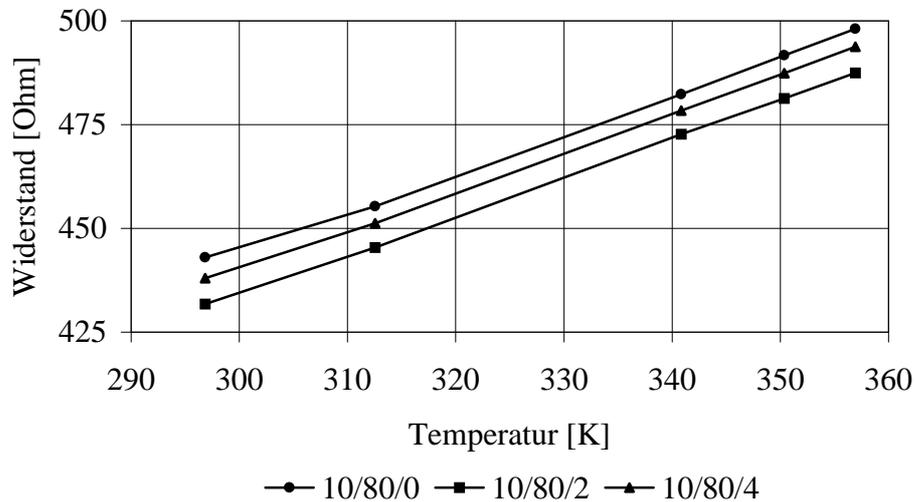


Abbildung 71: Widerstand als Funktion der Temperatur von Femto5-Sensoren mit einer 35 nm dicken Zwischenschicht aus Platin.

Die in Abbildung 71 dargestellten Kennlinien stammen von Sensoren gleicher Streifenlänge mit einer 35 nm dicken Zwischenschicht aus Platin und unterschiedlicher Länge der Dünnschichtantennen. Die Dünnschichtantennen besitzen keinen meßbaren Einfluß auf das Temperaturverhalten der Proben. Erwartungsgemäß liegen die Meßpunkte jeweils auf einer Geraden. Der Steigung dieser Geraden entspricht der Widerstandsänderung pro Temperatureinheit. Die Parameter der Geraden wurden aus einer linearen Regression erhalten. In der nächsten Abbildung ist die Geradengleichung einer Meßreihe angegeben, die an einer Probe mit 40 nm dicker Zwischenschicht aus Tantal gemessen wurde:

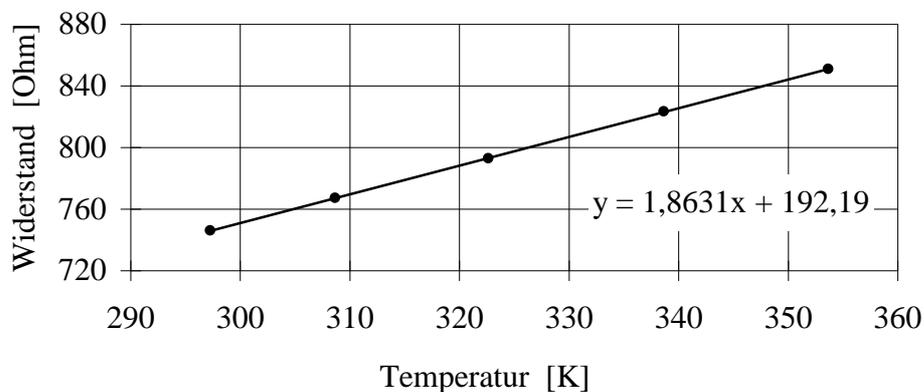


Abbildung 72: Widerstand als Funktion der Temperatur eines Femto5-Sensors (5/80/4) mit einer 40 nm dicken Zwischenschicht aus Tantal.

Mit Hilfe der Steigungswerte und den bei Raumtemperatur gemessenen Widerständen der Sensoren wurde der Temperaturkoeffizient bestimmt, der die prozentuale Widerstandsänderung pro Kelvin angibt:

Femto5 35 nm Platin	Femto5 40 nm Tantal	DFK
$0,21 \frac{\%}{\text{K}}$	$0,25 \frac{\%}{\text{K}}$	$0,27 \frac{\%}{\text{K}}$

Tabelle 13: Temperaturkoeffizienten von Femto5-Sensoren mit verschiedenen Zwischenschichtmaterialien und eines am IMO hergestellten herkömmlichen MR-Sensors (DFK).

Wie aus Tabelle 13 hervorgeht, besitzen die mit einer Zwischenschicht aus Platin ausgestatteten Sensoren einen geringeren Temperaturkoeffizienten als die, deren Zwischenschicht aus Tantal besteht. Eine zur besseren Einordnung der gewonnenen Ergebnisse durchgeführte Messung unter den gleichen Bedingungen an einem herkömmlichen am IMO hergestellten Sensor, dessen magnetoresistive Schicht einlagig ist, läßt den Schluß zu, daß die Unterschiede in den Temperaturkoeffizienten auf das Zwischenschichtmaterial zurückzuführen sind. Die gemessenen Temperaturkoeffizienten liegen unterhalb von $0,3 \text{ \% / K}$ und damit in dem für diese Schichtdicken typischen Bereich.

Anschließend sind die Widerstände der zuvor auf ihr Temperaturverhalten untersuchten Sensoren durch eine Stromfehlerschaltung bestimmt worden. Exemplarisch sind zwei Kennlinien von Proben mit unterschiedlichem Zwischenschichtmaterial in der folgenden Abbildung dargestellt.

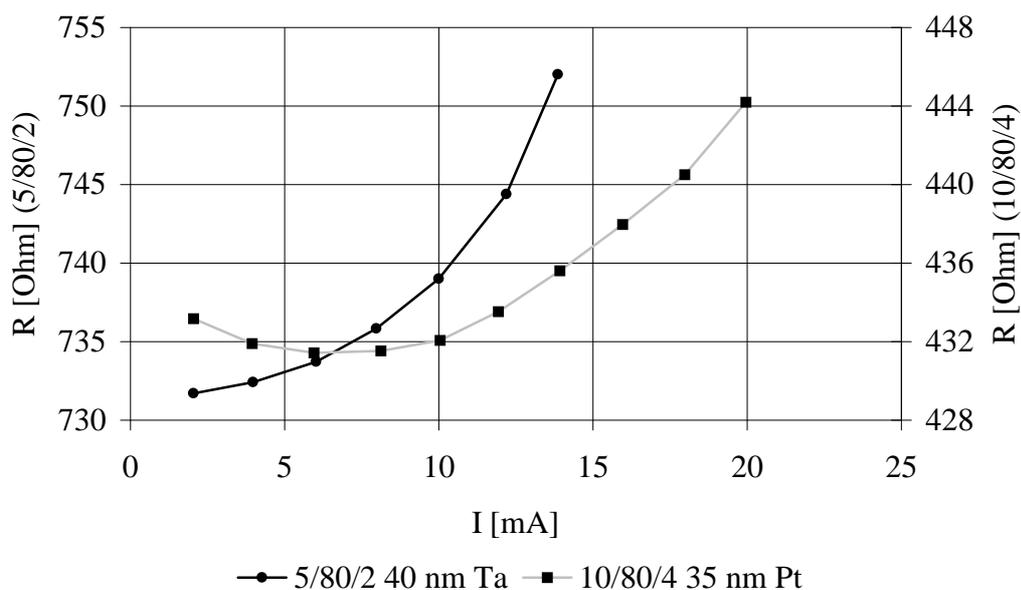


Abbildung 73: Widerstand als Funktion des Meßstromes von Femto5-Sensoren mit unterschiedlichem Zwischenschichtmaterial.

An der grau dargestellten Kurve in Abbildung 73 ist zu erkennen, daß sich der Widerstand des Sensors ohne Betriebsstrom nicht in seinem Minimum befand, was möglicherweise auf eine unvollständige Ausrichtung der Magnetisierungen der beiden Permalloy-Schichten zurückzuführen ist. Für die weiteren Betrachtungen sind die Meßwerte unterhalb der festgestellten Widerstandsminima nicht berücksichtigt worden. Die Form der Kennlinien in Abbildung 73 läßt in gewissen Grenzen auf eine Proportionalität zwischen den ermittelten Widerständen und der umgesetzten Leistung schließen:

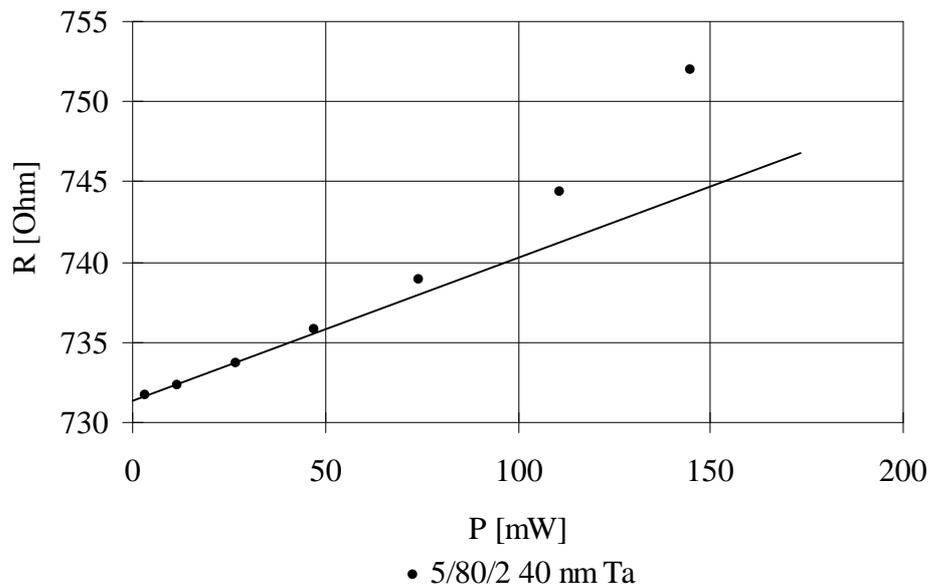


Abbildung 74: Widerstand eines Femto5-Sensors einer 40 nm dicken Tantal-zwischenschicht in Abhängigkeit von der umgesetzten Leistung.

Wie in Abbildung 74 zu erkennen, ist die Proportionalität bis in den Leistungsbereich von etwa 50 mW zu beobachten. Man erkennt, daß der überproportionale Anstieg des Widerstandes oberhalb dieses Bereiches, der auf Temperaturerhöhungen infolge des Betriebsstromes zurückgeführt werden kann, bei Untersuchungen an den Sensoren oberhalb von 50 mW berücksichtigt werden muß. Vergleicht man die in dieser Meßreihe bei einer bestimmten Leistung gemessenen Widerstandswerte mit den Widerständen bei Raumtemperatur, so kann unter Miteinbeziehung des entsprechenden Temperaturkoeffizienten auf eine durchschnittliche Temperaturerhöhung im Sensor von etwa 100 K / W geschlossen werden. Für die in dieser Arbeit bei den Messungen am häufigsten eingestellte Verlustleistung von 50 mW bedeutet dies eine Temperaturerhöhung von 5 K im Sensor.

5.8. Zusammenfassung der Meßergebnisse und Bemerkungen zum Konzept der Dreischichtsysteme

Auf der Suche nach einem für höchstempfindliche magnetoresistive Sensoren geeigneten Konzept sind im Vorfeld dieser Arbeit aufgrund von bestehenden theoretischen Modellvorstellungen Untersuchungen an kreisförmigen Strukturen unternommen worden. Dabei zeigte sich, daß Empfindlichkeitssteigerungen an aus Kreisen zusammengesetzten Sensoren von bis zu 25 % im Vergleich zu einfachen Streifen möglich sind. Eine Verkleinerung der Kreisdurchmesser hatte jedoch eine Abnahme der erzielbaren Empfindlichkeit zur Folge, was auf eine die Einbereichsstruktur der Magnetisierung der einzelnen Kreise sich negativ auswirkende gegenseitige Beeinflussung durch die Entmagnetisierungsfelder zurückgeführt werden könnte. Eine sich anschließende Testreihe mit Sensoren, die aus schiffchenförmigen Bereichen bestanden, führte zu dem Ergebnis, daß durch die Anbringung von Flußkonzentratoren in Form von Folienantennen Empfindlichkeitssteigerungen von maximal 200 erreichbar sind. Allerdings waren die Ausgangskennlinien trotz der Verwendung von Hilfsmagnetfeldern stark hysteresehaftet, was schließlich der Grund für die Abkehr von diesen Sensortypen war.

In einem neuartigen Sensorkonzept sollte die bei der Herstellung eingeprägte Magnetisierung quer zur Streifenlängsrichtung eingestellt sein, um flußverstärkende Antennenbereiche ohne Spalte an die magnetoresistiven Streifen heranragen lassen zu können, ohne daß sich dadurch die ohmschen Widerstände der Sensoren übermäßig verkleinerten. Die Quereinstellung der Magnetisierung schien durch ein Dreischichtsystem, daß aus zwei magnetoresistiven Schichten und einer dazwischenliegenden nichtmagnetischen Schicht bestand, realisierbar zu sein. Die Idee hierbei war, daß die Formanisotropie, welche die Magnetisierungen vorzugsweise in Streifenlängsrichtung ausrichtet, überwunden wird, indem es durch die Zwischenschicht zu einer Entkopplung der Magnetisierungen in den beiden magnetfeldabhängigen Schichten kommt, wobei sich die Magnetisierungen gegenseitig in ihrer Querposition stabilisieren sollten. Aus fertigungstechnischen Gründen konnte keine getrennte Kontaktierung der beiden MR-Schichten erfolgen. Auf der Suche nach einem Zwischenschichtmaterial, daß die Entkopplung ermöglichte und gleichzeitig elektrisch leitfähig war, wurden Testsensoren gefertigt. Bei Versuchen mit Titan und Chrom als Zwischenschichtmaterial konnte keine Trennung der Magnetisierungen festgestellt werden. An Testsensoren, die mit einer mindestens 30 nm dicken Zwischenschicht aus Platin hergestellt wurden, konnte der erwünschte Effekt gemessen werden.

Es folgte die Entwicklung eines Testsensors Femto5, der neben Dünnschichtantennen, die aus der gleichen Schichtreihenfolge wie die Sensorstreifen bestanden, das Anbringen von flußverstärkenden Folienantennen erlaubte. Ein Berechnungsmodell

wurde abgeleitet, mit dem die zu erwartende Empfindlichkeit und die erzielbare Magnetfeldauflösung berechnet werden kann. Die Ergebnisse der Berechnungen wurden als Grundlage bei der Festlegung der verschiedenen Geometrien verwendet. Als erstes wurden Femto5-Proben mit Platin als Zwischenschichtmaterial unterschiedlicher Dicke und Antennenkonfigurationen hergestellt. Die ermittelten Widerstandshübe blieben mit durchschnittlich 0,7 % unter den Erwartungen zurück. Bei allen untersuchten Proben zeigte sich eine deutliche Hysterese, die auf die Existenz von Domänen in den Schichtsystemen hinwies. An Sensoren mit Folienantennen, die mit weichmagnetischem Kleber befestigt wurden, sind geringere Empfindlichkeitswerte als an Sensoren, deren Folienantennen mit Sekundenkleber fixiert wurden, gemessen worden. Bei den durchgeführten Rauschuntersuchungen zeigte sich ein starkes Ansteigen der Rauschspannungen im niederfrequenten Bereich. Das Hauptproblem stellte die nicht zu beseitigende Hysterese in den Ausgangskennlinien dar.

Durch den Einsatz von Tantal als Zwischenschichtmaterial konnte zwar eine Verkleinerung der Hysterese erreicht werden, doch an den Einsatz in einem Meßsystem war mit diesen Sensoren ebenfalls nicht zu denken. Es zeigte sich, daß bereits die einfache Länge der Dünnschichtantennen ausreicht, um den von den darüberliegenden Folienantennen gesammelten magnetischen Fluß weiterzuleiten. Die beste Magnetfeldauflösung betrug bei 1 kHz $3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (20/80/2 SK), wodurch der anhand des Berechnungsmodells vorausgesagte Auflösungsbereich erreicht wurde.

Alle untersuchten Femto5-Sensoren besaßen einen Widerstandshub, der im Vergleich zu einfachen Schichten um einen Faktor 3 bis 4 geringer war. Eine weitere Empfindlichkeitssteigerung wäre unter anderem durch einen größeren Hub erreichbar, da die Empfindlichkeit unter Beibehaltung der restlichen Parameter proportional mit dem Widerstandshub ansteigt. Die magnetische Entkopplung der beiden magnetoresistiven Schichten setzt eine Mindestdicke des Zwischenschichtmaterials voraus. Da eine direkte Kontaktierung der untersten MR-Schicht nicht möglich war, erfolgte deren Stromzufuhr über die elektrisch leitende Zwischenschicht. Die Parallelschaltung führt zu einer Herabsetzung des erzielbaren Widerstandshubes und infolgedessen zu einer Reduktion der Empfindlichkeit. Ein größerer Widerstandshub der Dreischichtpakete wäre mit einer geeigneten Legierung als Zwischenschichtmaterial, deren spezifischer Widerstand wesentlich über dem der reinen Metalle liegt, erreichbar gewesen. Vermutlich hätte der Einsatz einer Legierung aber nicht zu einer Verbesserung der Hysterese im Ausgangssignal geführt. Deren Ursprung könnte in dem kantigen Übergangsbereich der Schichtstreifen zu den Dünnschichtantennen und den dadurch begünstigten Domänen bei der Arbeitspunkteinstellung durch den Biasstrom liegen. Der Übergangsbereich hätte diesbezüglich bei einer Weiterentwicklung des Sensorlayouts mit weniger scharfen Kanten ausgestattet werden können. Die Abweichungen zwischen den mit dem Modell berechneten Empfindlichkeitswerten und den gemessenen beruhen zum Teil

darauf, daß bei der Berechnung mit dem Modell von einer Einbereichsstruktur ausgegangen wurde, die bei den untersuchten Proben nicht vorhanden war, wobei die Existenz einer Hysterese in den Ausgangskennlinien ein Indiz für die Domänenbildung im Sensorstreifen war. Bei den kürzeren Sensorstreifen könnte ein zusätzlicher Empfindlichkeitsverlust durch die unvollständige Ausrichtung der Magnetisierungen in den Randbereichen der beiden Schichten entstanden sein, was sich bei den kürzeren Streifen wegen des ungünstigeren Länge zu Breite Verhältnisses stärker als bei den längeren Streifen bemerkbar macht. Mit der Konzeption des Dreischichtensors als Vollbrücke wäre eine um einen Faktor 2 größere Empfindlichkeit zu erzielen gewesen. Eine weitere Steigerung der Auflösung wäre durch die Vergrößerung der Folienantennen zu erreichen, was jedoch eine Abnahme der Ortsauflösung bedeutet hätte.

Für Femto5-Sensoren, die mit einer 35 nm dicken Zwischenschicht aus Platin ausgestattet waren, ergab sich ein Widerstandstemperaturkoeffizient von 0,21 %/K. Bei Sensoren mit einer 40 nm dicken Zwischenschicht aus Tantal betrug der Widerstandstemperaturkoeffizient 0,25 %/K.

6. Langer magneto-resistiver Streifen mit Barber Pole Struktur und Folienantennen

Alle bisher beschriebenen Sensorsysteme mit Dünnschicht- und Folienantennen wiesen eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Hysterese in ihren Ausgangskennlinien auf. Eine Weiterentwicklung der bestehenden Konzepte im Hinblick auf den Einsatz der Sensoren in einer Anwendung erschien aufgrund der hysteresebehafteten Ausgangskennlinien und dem hohen Rauschniveau im niederfrequenten Bereich wenig aussichtsreich. Bei der nächsten Sensorgeneration wurde deshalb auf die Mehrlagigkeit der Sensorebenen verzichtet.

6.1. Beschreibung und Besonderheiten des Sensors Femto6

Eine der Hauptforderungen an das Konzept der neuen Sensorgeneration bestand darin, ein Sensorsystem zu entwickeln, dessen Ausgangskennlinien möglichst hysterese-frei sind. Um eine hohe Magnetfeldempfindlichkeit zu erzielen, sollte die Anbringung von flußverstärkenden Antennen möglich sein. Der prinzipielle Aufbau des neuen Sensorsystems Femto6 ist in der folgenden Zeichnung dargestellt:

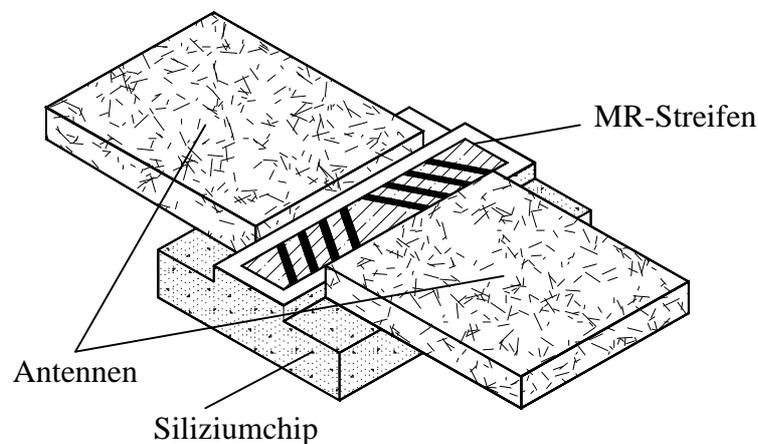


Abbildung 75: Zeichnung des Femto6-Sensors mit Antennen.

Der Sensor besteht aus einem langen magneto-resistivem Streifen. Die eine Hälfte des MR-Streifens ist mit Barber Polen ausgestattet, die 45° in positiver Richtung gegenüber der Streifenlängsachse geneigt sind. Auf der anderen Hälfte befinden sich Barber Pole, die 45° in negativer Richtung gedreht sind. Durch die Kontaktierung an den Streifenenden und in der Mitte der Anordnung entsteht eine magneto-resistive Halbbrücke. Die zu messenden Magnetfelder sind quer zur Streifenlängsrichtung anzulegen. Das Besondere an diesem Layout sind die zu beiden Seiten des Streifens hin abgesenkten Flächen, die jeweils in einem Abstand von etwa $10\ \mu\text{m}$ von der seitlichen

Streifenbegrenzung beginnen. Die etwa 15 μm tiefer liegenden Bereiche des Siliziumchips stellen die Auflagefläche für die 25 μm dicken Antennen dar, wobei die durch die Absenkung entstehenden Kanten als Justierhilfe bei deren Montage dienen. Berücksichtigt man, daß durch die Fixierung der Folienantennen ein Klebespalt von ungefähr 5 μm entsteht, befindet sich der magnetfeldempfindliche Streifen noch etwa in der Mitte der Folienantennen, so daß möglichst viel des eingesammelten magnetischen Flusses in den Streifen eintreten kann. Dem Zugewinn an Empfindlichkeit durch die tieferliegenden Folienantennen steht der bei diesem Konzept unvermeidbare erhöhte magnetische Übergangswiderstand zwischen Antenne und MR-Streifen aufgrund des Luftspaltes gegenüber. Ein Vorteil dieses Konzepts gegenüber dem Dreischichtsystemsensor Femto5 ist in der höheren Empfindlichkeit des Streifens ohne Antenne aufgrund seiner größeren Breite, die den Entmagnetisierungsfaktor in Meßrichtung verkleinert, zu sehen. Weiterhin ist mit einem für einfache MR-Schichten typischen Widerstandshub von etwa 2,5 % zu rechnen, der wiederum proportional zur Empfindlichkeit ist. Die Arbeitspunkteinstellung durch einen Biasstrom entfällt wegen der Barber Pole, die eine Stromverdrehung gegenüber der leichten Achse von vornherein gewährleisten. Um Voraussagen über die zu erwartende Empfindlichkeit und Auflösungsgrenze der Femto6-Sensoren machen zu können, ist ein Berechnungsmodell entwickelt worden, das gleichzeitig zur Optimierung der Sensorgeometrien im endgültigen Layout herangezogen wurde.

6.2. Berechnungsmodell eines MR-Streifens mit Barber Polen im Spalt von zwei Folienantennen

Das für die Berechnung der Empfindlichkeiten und Auflösung benötigte Berechnungsmodell basiert auf der Vorstellung, daß sich ein unendlich langer magnetoresistiver Streifen mit Barber Polen im Spalt zwischen zwei Antennen befindet. Dadurch kann das betrachtete Problem zweidimensional behandelt werden. In der folgenden Abbildung sind die schematische Anordnung und die Ersatzschaltung der Femto6 Sensoren zu sehen:

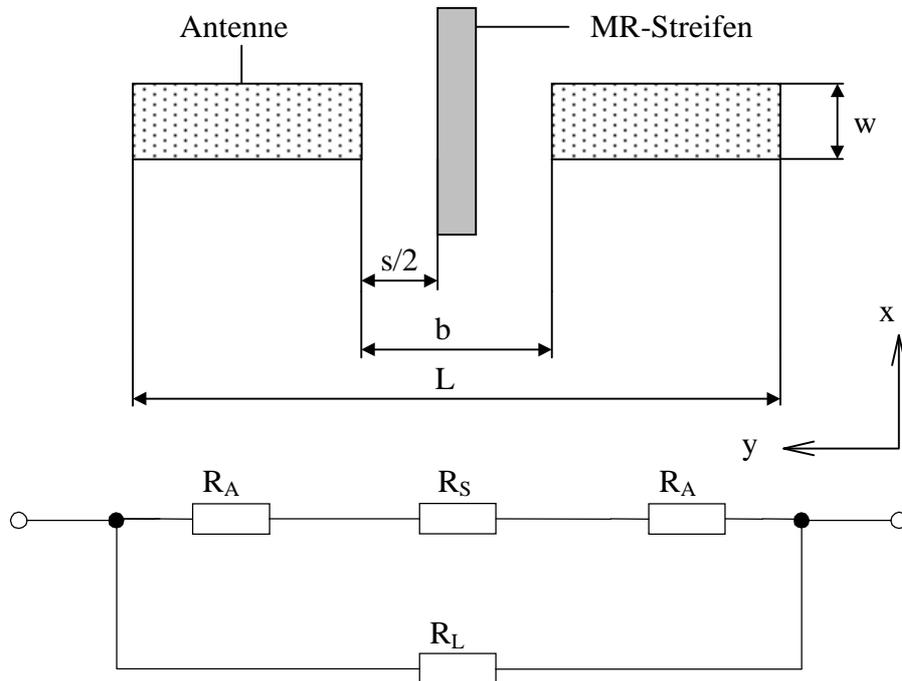


Abbildung 76: Schematische Anordnung und Ersatzschaltbild der Femto6-Sensoren mit Antennen.

- b : Abstand zwischen den Antennen
- s : Gesamtpalt zwischen den Antennen und dem MR-Streifen
- w : Breite der Antennen
- L : Gesamtlänge des Sensorsystems
- R_S : magnetischer Widerstand des Spaltes zwischen den Antennen
- R_A : magnetischer Widerstand der Antenne
- R_L : magnetischer Widerstand des Luftvolumens.

Für die normierte Empfindlichkeit einer Sensorbrücke aus magneto-resistiven Streifen mit Barber Polen gilt unter der Voraussetzung, daß dessen Länge größer als die Breite und die wiederum sehr viel größer als dessen Dicke ist, die folgende Gleichung:

$$S_U = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)}{H_k + N_y \cdot M_s + H_x}. \quad (82)$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Entmagnetisierungsfaktor in x-Richtung Null ist. Der Entmagnetisierungsfaktor N_y in Meßrichtung läßt sich unter Berücksichtigung der vorhandenen Geometrieverhältnisse folgendermaßen annähern:

$$N_y = \frac{t}{b-s} \quad (83)$$

t : Dicke des Sensorstreifens.

Die normierte Empfindlichkeit in Gleichung (82) berücksichtigt nicht die magnetfeldverstärkende Wirkung der Antennen. Deren verstärkenden Einfluß gilt es in den folgenden Betrachtungen zu quantifizieren. Zur Vereinfachung der Berechnung wird die magnetische Wechselwirkung zwischen den beiden Antennenhälften und zwischen den Antennen und dem Sensorstreifen vernachlässigt. Ausgangspunkt der Überlegungen ist das in Abbildung 76 dargestellte Ersatzschaltbild der Anordnung mit dem Ziel, die Magnetfeldstärke im Spalt zwischen den Antennen zu berechnen. Im Modell wird davon ausgegangen, daß diese Feldstärke mit derjenigen gleichzusetzen ist, die auf den Sensorstreifen, der sich im Spalt zwischen den Antennen befindet, einwirkt. Der gesamte magnetische Fluß besteht gemäß dem Ersatzschaltbild aus zwei Teilen:

$$\Phi_{\text{ges}} = \Phi_S + \Phi_L \quad (84)$$

Φ_{ges} : gesamter magnetischer Fluß

Φ_S : magnetischer Fluß durch den Luftspalt zwischen den Antennen

Φ_L : magnetischer Fluß durch die umgebende Luft.

Die Aufteilung der magnetischen Flüsse erfolgt im umgekehrten Verhältnis ihrer magnetischen Widerstände:

$$\frac{\Phi_S}{\Phi_L} = \frac{R_L}{R_S + 2 \cdot R_A} \quad (85)$$

R_L : magnetischer Widerstand des Luftvolumens parallel zu den Antennen

R_S : magnetischer Widerstand des Luftspaltes

R_A : magnetischer Widerstand einer Antennenhälfte.

Aus Gleichung (84) und (85) ergibt sich für den magnetischen Fluß im Luftspalt zwischen den Antennen:

$$\Phi_S = \frac{R_L \cdot \Phi_{\text{ges}}}{R_L + R_S + 2 \cdot R_A} \quad (86)$$

Für den gesamten magnetischen Fluß, der von einem äußeren in Meßrichtung angelegten homogenen Magnetfeld stammt, gilt folgende Gleichung:

$$\Phi_{\text{ges}} = \mu_0 \cdot w \cdot L \cdot H_y \quad (87)$$

w : Breite der Antennen

L : Gesamtlänge der Anordnung

H_y : Komponente eines äußeren Magnetfeldes in Meßrichtung (y-Richtung).

Der Beitrag zum magnetischen Fluß im Luftspalt durch die Antennen kann mit Hilfe der Gleichung (88) angegeben werden:

$$\Phi_S = \mu_0 \cdot w \cdot b \cdot H_{yS} \quad (88)$$

b : Abstand zwischen den Antennen

H_{yS} : Komponente in Meßrichtung eines äußeren Magnetfeldes im Luftspalt.

Unter Berücksichtigung von Gleichung (85), (86) und (87) ergibt sich für die durch die Antennen hervorgerufene Komponente der magnetischen Feldstärke im Luftspalt:

$$H_{yS} = \frac{R_L \cdot L}{b \cdot (R_L + R_S + 2 \cdot R_A)} \cdot H_y \quad (89)$$

Bevor auf die Gleichung (89) zurückgegriffen wird, werden die magnetischen Widerstände der einzelnen Teile des Sensorsystems abgeleitet. Unter der Voraussetzung, daß der Abstand b zwischen den Antennen groß gegen die Dicke t_A der Antennen ist, kann der magnetische Widerstand des Luftspaltes näherungsweise durch die nachfolgende Gleichung angegeben werden:

$$R_S = \frac{b}{\mu_0 \cdot w \cdot b} \quad (90)$$

Für den magnetischen Widerstand des parallelgeschalteten Luftvolumens gilt näherungsweise:

$$R_L = \frac{L}{\mu_0 \cdot w \cdot L} \quad (91)$$

Die beiden magnetischen Widerstände in den Gleichungen (90) und (91) sind unter den genannten Bedingungen gleich groß. Der magnetische Widerstand der Antenne berechnet sich wie folgt:

$$R_A = \frac{L - b}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{eff}} \cdot w \cdot t_A} \quad (92)$$

μ_{eff} : effektiv wirksame relative Permeabilität der Antenne.

Berücksichtigt man, daß sich die Magnetisierung im Inneren der Antenne aus der Summe des äußeren Magnetfeldes und dem Entmagnetisierungsfeld zusammensetzt, ergibt sich für die effektiv wirksame Permeabilität der Antenne folgende Gleichung:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_{\text{Ant}} - 1}{1 + (\mu_{\text{Ant}} - 1) \cdot N_{y\text{Ant}}} + 1 \quad (93)$$

μ_{Ant} : relative Permeabilität der Antenne

$N_{y\text{Ant}}$: Entmagnetisierungsfaktor der Antenne in y-Richtung.

Der Entmagnetisierungsfaktor in Meßrichtung in Gleichung (93) kann näherungsweise durch folgenden Ausdruck angegeben werden:

$$N_{y\text{Ant}} = \frac{2 \cdot t_A}{L - b} \quad (94)$$

Einsetzen der Gleichungen (90), (91) und (92) für die verschiedenen magnetischen Widerstände in Gleichung (89) ergibt für die Komponente des äußeren Magnetfeldes in Meßrichtung im Luftspalt:

$$H_{yS} = \frac{L \cdot t_A \cdot \mu_{\text{eff}}}{L + b \cdot (2 \cdot t_A \cdot \mu_{\text{eff}} - 1)} \cdot H_y \quad (95)$$

Die gesamte Magnetfeldstärke im Luftspalt ergibt sich aus der Summe von der durch die Antennen bewirkten Magnetfeldstärke und der Magnetfeldstärke des von außen in Meßrichtung angelegten Magnetfeldes:

$$H_{ySges} = H_{yS} + H_y \quad (96)$$

H_{ySges} : Komponente in Meßrichtung der Gesamtmagnetfeldstärke im Luftspalt.

Gleichung (95) und (96) ergeben zusammengefaßt:

$$H_{yS} = \left(\frac{L \cdot t_A \cdot \mu_{eff}}{L + b \cdot (2 \cdot t_A \cdot \mu_{eff} - 1)} + 1 \right) \cdot H_y. \quad (97)$$

Das Magnetfeld im Luftspalt ist nach Gleichung (97) um den dort in der Klammer stehenden Faktor größer als bei einer Anordnung ohne Antennen. Bezeichnet man diesen Faktor mit V als den Verstärkungsfaktor und variiert die Gesamtlänge des Sensorsystems, ergibt sich folgende Graphik:

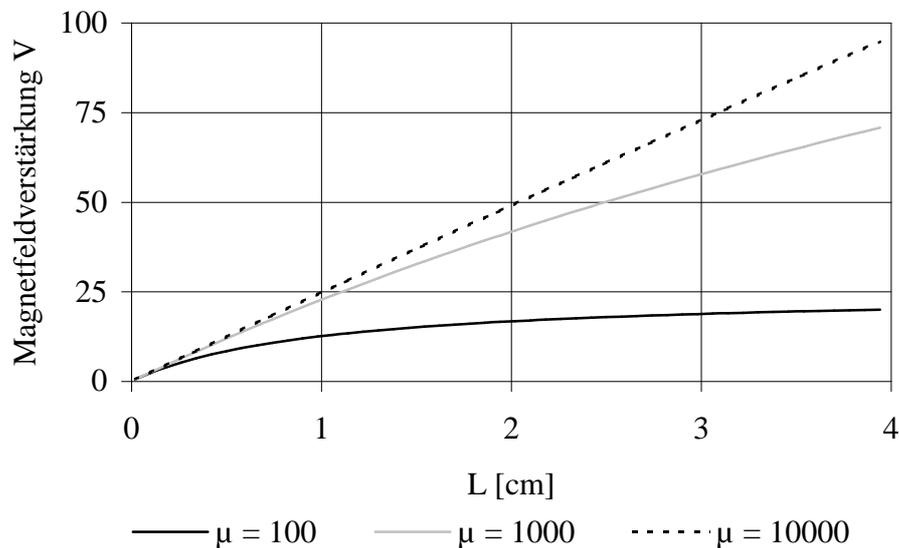


Abbildung 77: Magnetfeldverstärkung bei Femto6-Sensoren in Abhängigkeit von der Gesamtlänge des Sensorsystems.

Bei der Berechnung der Kennlinien in Abbildung 77 wurde von 25 μm dicken Folienantennen ausgegangen, deren Abstand 100 μm betrug. Die Kurven zeigen die Verstärkung bei drei verschiedenen relativen Permeabilitäten der Antennen. Es ist zu erkennen, daß nur mit Folienantennen, deren relative Permeabilität mindestens Tausend beträgt, eine nennenswerte Magnetfeldverstärkung erzielbar ist, die dann proportional mit der Gesamtlänge des Systems anwächst. Bei einer Gesamtlänge des Sensorsystems von 2 cm ist mit einer Magnetfeldverstärkung von etwa 50 zu rechnen.

Für die normierte Empfindlichkeit aus Gleichung (82) folgt unter Hinzuziehung des Verstärkungsfaktors aus Gleichung (97) die gesuchte Empfindlichkeitsformel, die den magnetfeldverstärkenden Einfluß der Antennen berücksichtigt:

$$S_U = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos(2 \cdot \delta)}{H_k + N_y \cdot M_s + H_x} \cdot \left(\frac{L \cdot t_A \cdot \mu_{\text{eff}}}{L + b \cdot (2 \cdot t_A \cdot \mu_{\text{eff}} - 1)} + 1 \right). \quad (98)$$

Durch den Faktor 1/2 in Gleichung (98) wird ausgedrückt, daß es sich bei den Femto6-Sensoren um Halbbrücken handelt. Bei den nachfolgenden mit dem vorgestellten Modell berechneten Kennlinien wurde von einem Barber Pole Korrekturfaktor von 0,884 ausgegangen, der sich für einen Barber Pole Abstand von $58 \mu\text{m}$ und einer Sensorstreifenbreite von $80 \mu\text{m}$ nach Gleichung (44) ergibt. Der Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Spaltbreite zwischen den beiden Antennen ist in der nächsten Abbildung zu sehen:

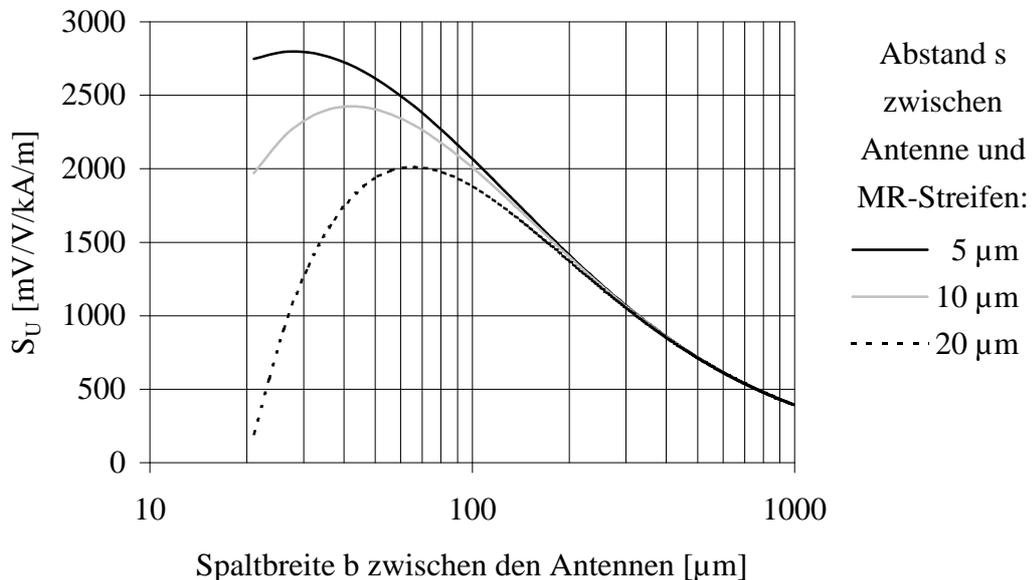


Abbildung 78: Empfindlichkeit der Femto6-Sensoren in Abhängigkeit von der Spaltbreite zwischen den Antennen.

Die Kennlinien für drei unterschiedliche Abstände s zwischen den Antennen und dem Sensorstreifen in Abbildung 78 ergaben sich für einem Widerstandshub von 2,3 %, einer Schichtdicke des Permalloys von 24 nm, einer Gesamtlänge der Anordnung von 2 cm und für eine Hilfsfeldstärke von Null. Die Kennlinien zeigen ein Maximum, daß sich mit zunehmendem Abstand s zwischen der Antenne und dem Sensorstreifen zu größeren Spaltbreiten b zwischen den Antennen hin verschiebt, womit eine Abnahme des Maximalbetrages verbunden ist. Aus der Abbildung 78 ist ersichtlich, daß die Spaltbreite zwischen den Antennen einen entscheidenden Einfluß auf die Größe der erreichbaren Empfindlichkeit hat. Bei einer Spaltbreite zwischen den Antennen von $100 \mu\text{m}$ und einer Gesamtpaltbreite zwischen dem Sensorstreifen und der Antenne von

20 μm (dies entspricht einer Sensorstreifenbreite von 80 μm) sollten Empfindlichkeitswerte im Bereich von 2000 mV/V/kA/m möglich sein. In der folgenden Abbildung ist der Einfluß eines Hilfsfeldes auf die zu erwartende Empfindlichkeit dargestellt:

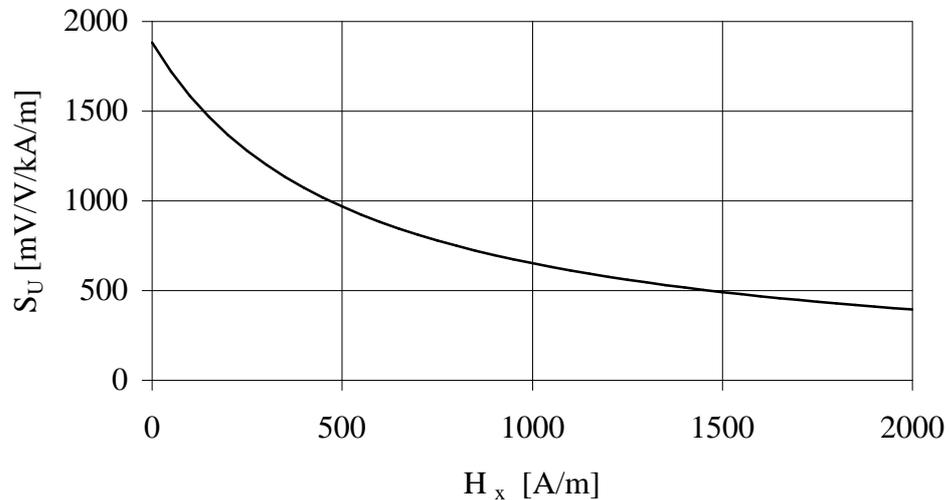


Abbildung 79: Empfindlichkeitsverlauf in Abhängigkeit von einem Hilfsfeld bei Femto6-Sensoren.

Die Kennlinie in Abbildung 79 zeigt den Empfindlichkeitsverlauf für einen 80 μm breiten Sensorstreifen. Falls beim Betrieb der Femto6-Sensoren Hilfsmagnetfelder in Streifenlängsrichtung zu Stabilisierungszwecken benötigt werden, ist mit einer deutlichen Abnahme der Empfindlichkeiten zu rechnen.

In der folgenden Abbildung ist die gemäß Gleichung (45) berechnete Auflösung für verschiedene Gesamtlängen der Anordnung zu sehen:

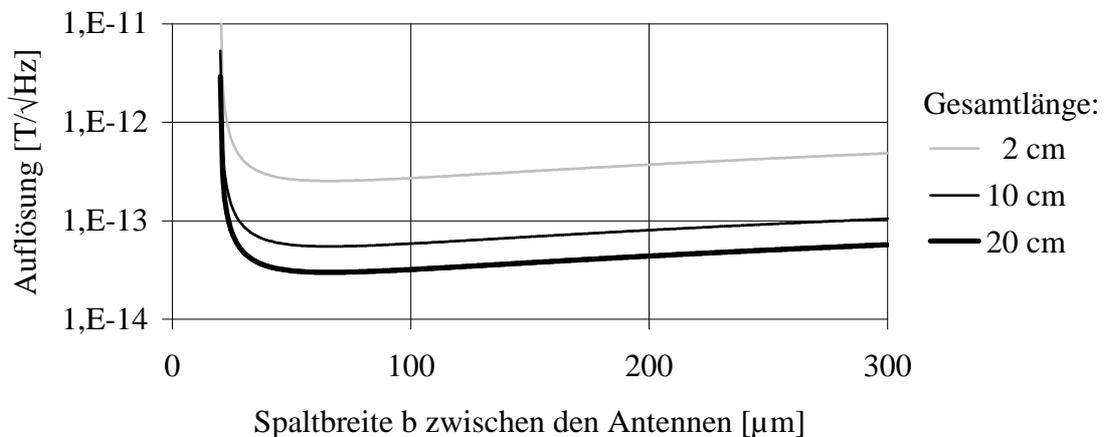


Abbildung 80: Magnetfeldauflösung der Femto6-Sensoren in Abhängigkeit von der Spaltbreite zwischen den Antennen bei unterschiedlichen Gesamtlängen der Anordnung.

Hierbei handelt es sich um die Auflösung bei Raumtemperatur, welche bei einem Femto6-Sensor mit Antennen bei einer Verlustleistung von 100 mW erreichbar ist und die als einzigen Rauschbeitrag das Nyquisttrauschen berücksichtigt. In der Abbildung 80 sind die Auflösungen für drei verschiedene Gesamtlängen der Anordnung dargestellt. Bei einer Spaltbreite von $100\ \mu\text{m}$, einer Sensorstreifenbreite von $80\ \mu\text{m}$ und einer Gesamtantennenlänge von 2 cm beträgt die Magnetfeldauflösung ungefähr $300\ \text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Durch eine Verlängerung der Antennen um den Faktor 10 sinkt dieser Wert entsprechend der damit verbundenen Empfindlichkeitszunahme in etwa um eine Größenordnung.

Die erreichbare Auflösung hängt auch mit der Dicke der Antennen ab. Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Abbildung für eine Gesamtlänge des Sensorsystems von 2 cm dargestellt:

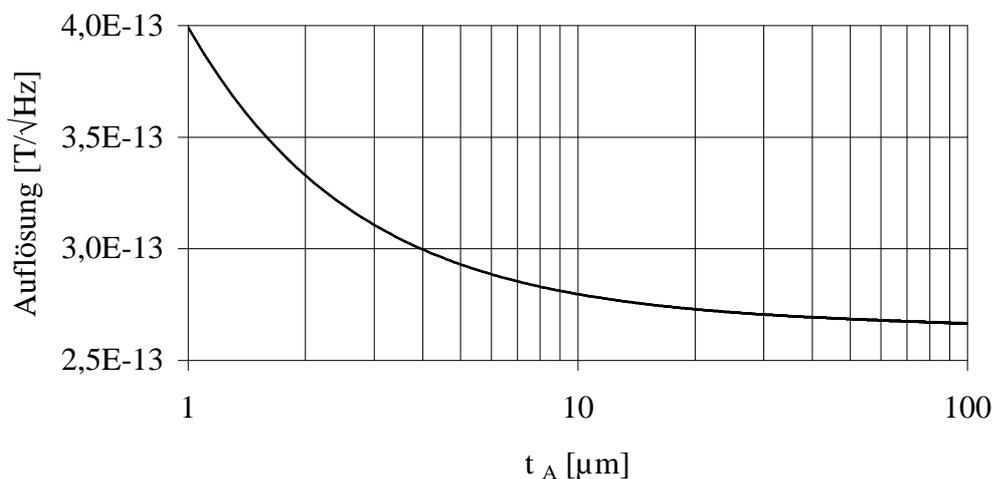


Abbildung 81: Zusammenhang zwischen der Magnetfeldauflösung und der Dicke der Antennen bei Femto6-Sensoren.

Wie aus Abbildung 81 hervorgeht, ist zur Erreichung einer möglichst kleinen Auflösungsgrenze eine Mindestdicke der Antennen notwendig, da die Auflösungsgrenze mit dünner werdenden Antennen stark zunimmt. Liegt die Dicke der Antennen im Bereich von einigen $10\ \mu\text{m}$, ist die minimal erzielbare Auflösung annähernd erreicht und es muß nicht mehr mit einem negativen Einfluß bedingt durch die Sättigung des Antennenmaterials gerechnet werden.

Abschließend ist in der nachfolgenden Abbildung die mit dem Modell berechnete Auflösung als Funktion der Gesamtlänge der Anordnung aufgetragen:

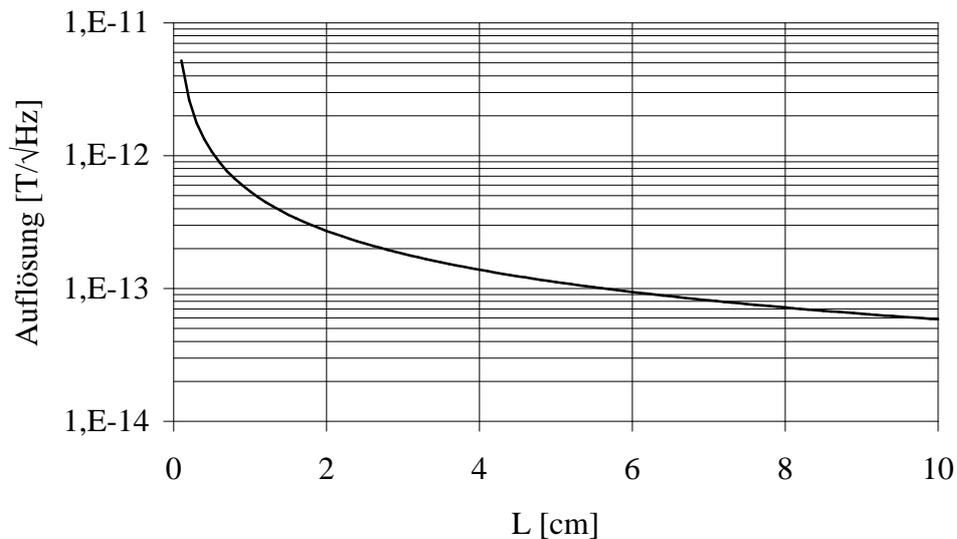


Abbildung 82: Auflösung der Femto6-Sensoren als Funktion der Gesamtlänge der Anordnung.

Wie aus Abbildung 82 hervorgeht, sollten bei Gesamtlängen des Sensorsystems oberhalb von 6 cm Magnetfeldauflösungen im Bereich von $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ möglich sein.

6.3. Layout der Femto6-Sensoren

Der Femto6-Sensor besteht aus einem 2,4 mm langen und $80 \mu\text{m}$ breiten magnetoresistiven Streifen mit einer Dicke von 24 nm. Die Enden des Streifens haben eine schiffchenförmige Gestalt, wodurch die Bildung von Domänen in diesem Bereich erschwert werden soll. Die Absenkung für die Antennen beginnt beidseitig des Streifens in einem Abstand von $10 \mu\text{m}$ und erstreckt sich über den kompletten quadratischen Chip, dessen Kantenlänge 3 mm beträgt. Die Barber Pole haben einen Abstand von $58 \mu\text{m}$ zueinander. Für den Sensorchip ist ein Keramikträger entworfen worden, auf dem neben dem Chip auch Platz für die Antennen vorhanden ist. Die Außenabmessungen des Keramikträgers und die Positionen der Anschlußpads für die Kontaktierung des Sensorsystems entsprechen denjenigen des Keramikträgers des Dreischichtsystemsensors Femto5, aufgrund dessen der gleiche Meßadapter in der Abschirmkammer eingesetzt werden konnte. In der folgenden Abbildung ist ein Ausschnitt des Sensorstreifens zu sehen:

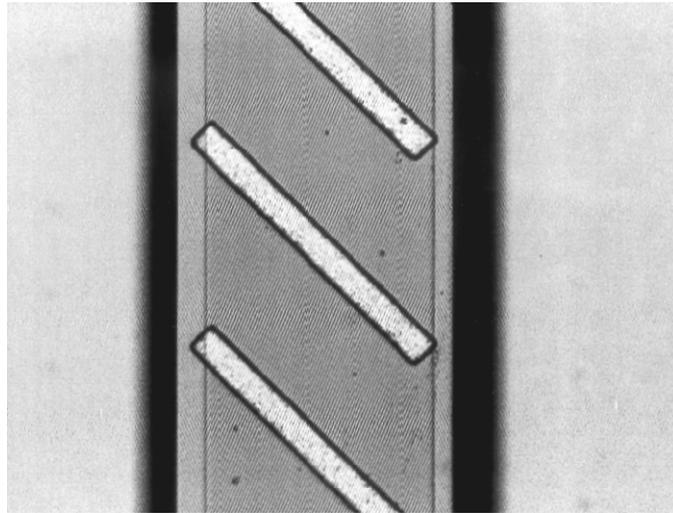


Abbildung 83: Ausschnitt eines Femto6-Sensors aufgenommen mit einer CCD-Kamera.

In Abbildung 83 sind neben dem Sensorstreifen mit den Barber Polen auch die durch die Absenkung der Chipfläche entstandenen Kanten beiderseits des Streifens als dunkle Streifen zu erkennen. Die Breite dieser Streifen ist ein Anhaltspunkt dafür, daß es sich hierbei nicht um exakte 90° -Kanten, sondern um allmählich abfallende Bereiche handelt, die während der Herstellung in einem Ätzzvorgang erzeugt wurden.

6.4. Untersuchungen an Femto6-Sensoren ohne Antennen

Bevor die einzelnen Sensorchips auf den Keramikträgern befestigt und gebondet wurden, ist eine erste Funktionskontrolle am Prober durchgeführt worden. Dabei wurden mit Hilfe eines drehbaren Stabmagneten Widerstandshübe gemessen, die zwischen 2,3 % und 2,4 % betragen. Die aufgebondeten Sensorchips standen in drei Varianten zur Verfügung. Zum einen sind Exemplare ohne Antenne hergestellt worden. Andererseits wurden Sensorsysteme mit zwei unterschiedlich langen Folienantennen aufgebaut, um deren Einfluß auf die Empfindlichkeit und das Rauschverhalten untersuchen zu können. Für die Messungen, die ausnahmslos in der Abschirmkammer vorgenommen wurden, sind die Sensoren durch das Parallelschalten von zwei Festwiderständen und ein dazu in Reihe geschaltetes Potentiometer, das zu Abgleichzwecken diente, zu einer Vollbrücke komplettiert worden. Der ohmsche Widerstand dieses Brückenweiges war mit 150 Ohm etwa genauso groß wie der durchschnittliche Widerstand der Sensor-Halbbrücken. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu gewährleisten, wurde bei allen Messungen die Betriebsspannung so eingestellt, daß in der magnetoresistiven Halbbrücke eine Leistung von 100 mW umgesetzt wurde. Zur Bestimmung der Empfindlichkeit wurde die

Brückenausgangsspannung als Funktion eines äußeren Magnetfeldes in leichter Richtung aufgezeichnet. Eine typische Kennlinie dieser Meßreihe ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

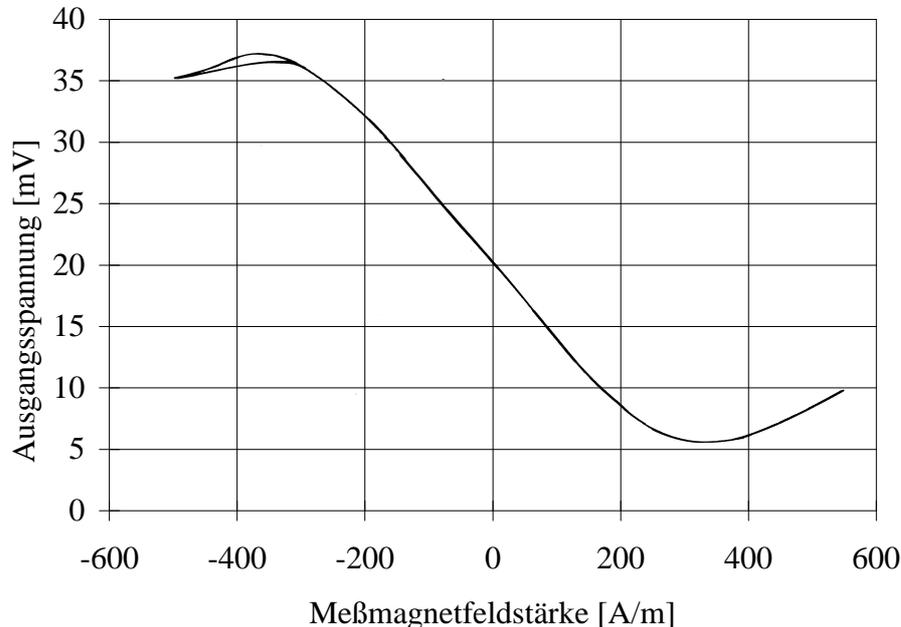


Abbildung 84: Kennlinie eines Femto6-Sensors ohne Antenne mit Hilfsfeld $H_x = 50 \text{ A/m}$.

Vor der Messung wurde der Sensor kurzzeitig einem in Streifenlängsrichtung zeigenden Magnetfeld der Stärke 1 kA/m ausgesetzt, um die Magnetisierung im Sensorstreifen auszurichten. Während der Messung wurde ein statisches homogenes Magnetfeld in Streifenlängsrichtung von 50 A/m angelegt. Hierdurch war ein Aussteuern des Sensors über den linearen Bereich seiner Kennlinie hinaus ohne Hysterese im Ausgangssignal möglich. Ohne ein zusätzliches Hilfsfeld war ein deutlicher Rückgang der Steilheit der Kennlinien nach dem Aussteuern über den linearen Bereich hinaus zu beobachten. Die Kennlinie in Abbildung 84 weist einen linearen Meßbereich von ungefähr 300 A/m auf. Das Auseinanderklaffen der Meßkurve am linken oberen Rand der Abbildung ist das Ergebnis des mehrmaligen Durchfahrens der Kennlinie und läßt auf ein Nachhinken der Magnetisierung in Teilen des Sensorstreifens infolge von Domänenbildung schließen. In Anwesenheit eines genügend großen Hilfsfeldes kehrte die Kennlinie unabhängig von der Größe der Aussteuerung in den linearen Bereich zurück. Auf das statische Hilfsfeld während der Messung, daß in jedem Fall die Empfindlichkeit absinken läßt, konnte verzichtet werden, sofern der Aussteuerungsbereich sich auf den linearen Teil der Kennlinie beschränkte. Eine kurzzeitige Ausrichtung mit einem Magnetfeld von mindestens 1 kA/m vor der Messung war hingegen unverzichtbar. An den Ausgangskennlinien war keine Hysterese beobachtbar. Es standen insgesamt fünf

Proben ohne Antenne zur Verfügung. In der folgenden Tabelle sind die ermittelten normierten Empfindlichkeiten ohne Hilfsfeld angegeben:

$P = 100 \text{ mW}$ $H_y = \pm 50 \text{ A/m}$ $H_x = 0$	Lfd. Nr.	$S_U \text{ [mV/V/kA/m]}$
	1	37
	2	45
	3	39
	4	42
	5	38

Tabelle 14: Empfindlichkeiten von Femto6-Sensoren ohne Antenne.

Die Werte der normierten Empfindlichkeiten in Tabelle 14 gelten für eine Vollbrücke aus vier magnetoresistiven Widerständen. Die an den Brücken gemessenen Empfindlichkeiten waren um einen Faktor zwei kleiner. Die Unterschiede in den gemessenen Empfindlichkeiten können mehrere Ursachen haben. Als erstes ist hier ein unterschiedlicher Ausrichtungsgrad der Magnetisierungen in den Streifen vor den Messungen zu nennen. Es zeigte sich, daß die Steilheiten der Ausgangskennlinien durch Variation der Zeitdauer, die von kurzzeitigen Impulsen durch Ein- und Ausschalten des Spulenstromes bis hin zu mehreren Sekunden reichte, der Richtung (positive bzw. negative x-Richtung) und ein langsames Abklingen des Hilfsmagnetfeldes, daß sich über einige Sekunden erstreckte, beeinflusbar waren. In der Tabelle 14 sind die bei den Untersuchungen gemessenen Maximalwerte aufgeführt. Ein weiterer Grund für die Streuung der Empfindlichkeitswerte könnten herstellungsbedingte Schwankungen in den geometrischen Abmessungen der Sensoren sein. Weiterhin könnte es zu Schwankungen in der Anisotropiefeldstärke in bestimmten Bereichen des Wafers infolge von unterschiedlichen Schichtspannungen gekommen sein, die sich bei den mit 2,4 mm Länge bis fast an die Chipbegrenzungen heranragenden Sensorstreifen bemerkbar machten.

Die Widerstandshübe der Sensoren wurde auf zwei verschiedenen Wegen bestimmt. Zum einen wurde der Spannungshub, der beim kompletten Durchfahren der Kennlinie erreicht wurde, in Relation zur Betriebsspannung gesetzt. Daraus ergab sich ein Widerstandshub von durchschnittlich 2 %. Zum anderen ist die Empfindlichkeit bei verschiedenen Hilfsfeldstärken ermittelt worden. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis einer solchen Meßreihe, wobei die reziproke normierte Empfindlichkeit als Funktion eines Hilfsfeldes aufgetragen ist:

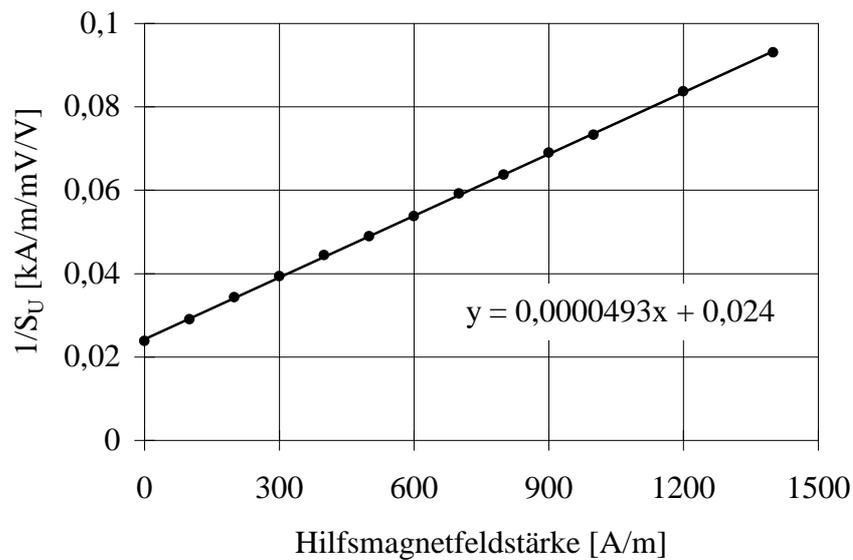


Abbildung 85: Reziproke normierte Empfindlichkeit eines Femto6-Sensors ohne Antenne in Abhängigkeit eines Hilfsmagnetfeldes.

Die Steigung der in Abbildung 85 eingezeichneten Regressionsgeraden multipliziert mit dem Barber Pole Faktor entspricht nach Gleichung (82) dem Kehrwert des Widerstandshubes. Hieraus ergibt sich ein Widerstandshub der magnetoresistiven Schicht von 2,3 %, was mit den am Prober gemessenen Werten übereinstimmt. Die Abweichung gegenüber dem zuvor ermittelten Wert durch Spannungshubmessung beim kompletten Durchfahren der Ausgangskennlinie ist vermutlich auf Bereiche in dem Sensorstreifen zurückzuführen, die vor der Messung nicht vollständig ausgerichtet waren und infolgedessen nur einen geringeren Beitrag zur gesamten Widerstandsänderung beitragen konnten.

6.5. Messungen an Femto6-Sensorsystemen mit Folienantennen

Insgesamt sind 16 Sensoren mit $25 \mu\text{m}$ dicken Folienantennen (VITROVAC 6025 F) hergestellt worden. Die Gesamtlänge der Antennen betrug 18 mm, wobei die eine Hälfte der Sensorsysteme mit 3 mm und die andere Hälfte mit 6 mm breiten Folienantennen ausgestattet war, um eventuelle Einflüsse der Antennenbreite auf die Empfindlichkeit und die Magnetfeldauflösung bestimmen zu können. Die Folienantennen wurden von der Firma Siegert TFT im Engspaltklebverfahren mit Sekundenkleber auf den Chips befestigt. Die an den Sensorsystemen gemessenen Kennlinien lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, die sich je nach Größe des Aussteuerbereichs unter anderem hinsichtlich ihres Hystereseverhaltens deutlich voneinander unterscheiden. In der

folgenden Abbildung ist eine Kennlinie zu sehen, die typischerweise beim Aussteuern eines Sensors in die Sättigungsbereiche hinein zu beobachten war:

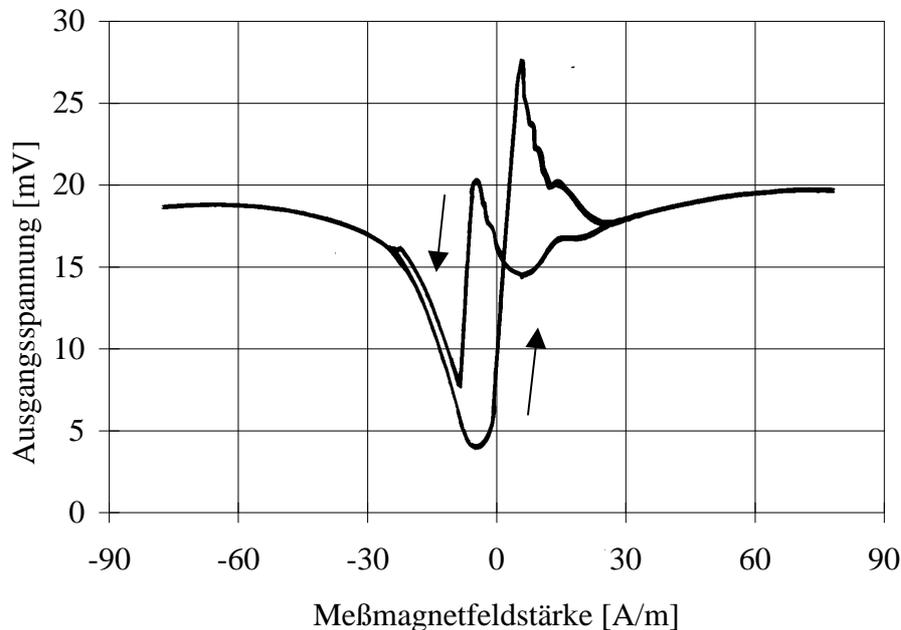


Abbildung 86: Kennlinie eines Femto6-Sensors mit 3 mm breiten Folienantennen bei Austeuerung über den linearen Bereich hinaus.

Die Kennlinie in Abbildung 86 stammt von einem Sensor mit 3 mm breiten Folienantennen, dessen Brückenversorgungsspannung so eingestellt war, daß in dem magnetoresistiven Teil der Brücke, eine Leistung von 100 mW umgesetzt wurde. Die Messung erfolgte ohne Hilfsmagnetfeld. Der mit einer deutlichen Hysterese behaftete Verlauf der Ausgangsspannung war auch nach mehrmaligem Durchfahren des Meßfeldes in unveränderter Form vorhanden. Bei der Beurteilung des Kennlinienbildes in Abbildung 86 können zwei Bereiche unterschieden werden. Ein steilerer Teil, der sich um den Nullpunkt des Meßmagnetfeldes herum befindet, entsteht beim Durchfahren der Kennlinie mit ansteigender Magnetfeldstärke aus negativer Richtung kommend. Dieser Teil ist mit einem nach oben gerichteten Pfeil gekennzeichnet. Solange durch das ansteigende Magnetfeld das Maximum der Kennlinie in positiver Richtung nicht überschritten wird, führt eine sich anschließende Verringerung der Feldstärke bis in den Sättigungsbereich in negativer Richtung hinein und eine erneute Erhöhung des Meßfeldes dazu, daß der steilere Teil der Kennlinie wieder erreicht wird. Dieser Kurvenverlauf ist beliebig oft reproduzierbar und kennzeichnet den stabilen hysteresefreien Teil des gesamten in Abbildung 86 dargestellten Kurvenverlaufs. Überschreitet man das Maximum der Kennlinie aus negativer Richtung kommend, hängt der Kurvenverlauf bei anschließender Magnetfeldumkehr von der Amplitude des

Magnetfeldes ab. Erfolgt die Umkehr bei einer Magnetfeldstärke, die kleiner als etwa 30 A/m ist, wird der steilere Teil der Kennlinie wieder erreicht. Wird der Sensor über diesen Wert hinaus angesteuert, folgt die Ausgangskennlinie dem mit einem nach unten gerichteten Pfeil gekennzeichneten Verlauf. Dem kompletten Kennlinienverlauf, wie er in Abbildung 86 dargestellt ist, kann man entnehmen, daß nach dem Überschreiten des Maximums aus negativer Richtung kommend eine Umkehr der Magnetisierungsrichtung im Sensorstreifen beginnt, die bei einer Magnetfeldstärke von etwa 30 A/m abgeschlossen ist. Eine sich anschließende Verkleinerung der Feldstärke führt zu einer allmählichen Rückdrehung der Magnetisierung, die sich über einen größeren Magnetfeldbereich erstreckt, als es in umgekehrter Richtung zu beobachten ist. Die Ursache dieses Verhaltens, daß bei allen untersuchten Sensoren auftrat, könnten nicht exakt parallel zum Sensorstreifen justierte Folienantennen sein. Infolgedessen wäre je nach Feldrichtung eine unterschiedlich große Magnetfeldkomponente in leichter Richtung nach dem Anlegen eines Magnetfeldes quer zur Streifenlängsrichtung vorhanden, wodurch die Drehbarkeit der Magnetisierung im Sensorstreifen in der aufgezeigten Art und Weise beeinflussbar wäre.

Wurde der Aussteuerbereich der Sensoren auf wenige A/m reduziert, konnten hysteresefreie Ausgangskennlinien beobachtet werden. Voraussetzung war ein kurzzeitiges Anlegen eines Magnetfeldes in leichter Richtung, wobei dessen Richtung mit derjenigen übereinstimmen mußte, die beim Durchfahren des Minimums in Abbildung 86 aus negativer Richtung kommend auf den steileren Teil der Kennlinie führt. Hierzu wurden Magnetfeldstärken benötigt, die mindestens 2 kA/m betragen. Dieser relativ große Wert der Magnetfeldstärke ist erforderlich, da durch die abschirmende Wirkung der Folienantennen nur ein geringer Teil des angelegten Feldes in den Sensorstreifen zur Ausrichtung von dessen Magnetisierung gelangen kann. Nach erfolgter Ausrichtung konnten Kennlinien gemessen werden, die auch nach mehrmaligem Durchfahren die gleiche Form und Empfindlichkeit aufwiesen, sofern die Sensoren nicht über die Umkehrpunkte in ihren Kennlinien hinaus angesteuert wurden. In der folgenden Abbildung ist eine Kennlinie eines Sensors mit 3 mm breiten Folienantennen zu sehen:

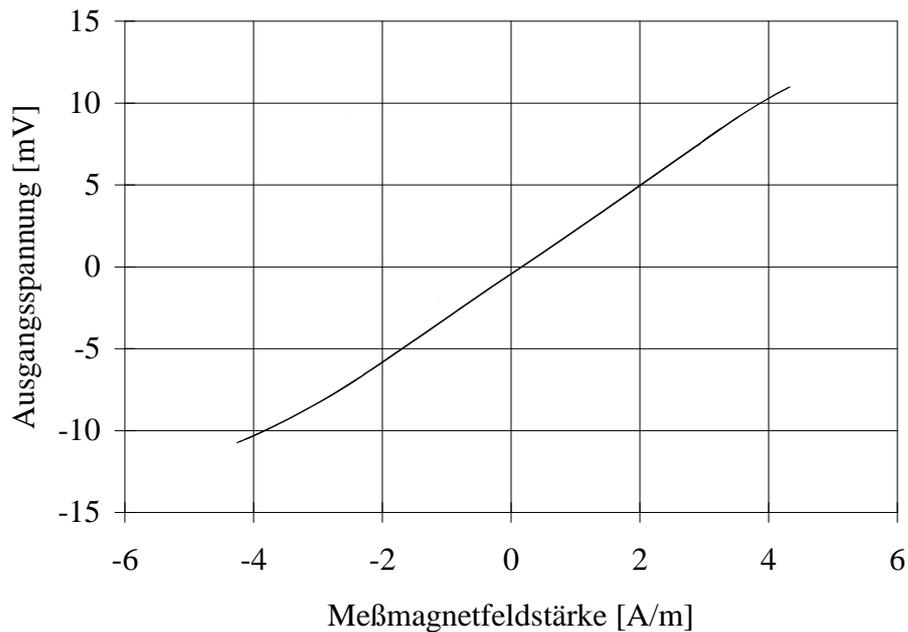


Abbildung 87: Kennlinie eines Femto6-Sensors mit 3 mm breiten Folienantennen bei reduziertem Aussteuerbereich.

Der Sensor wurde mit einem Meßmagnetfeld von 8,5 A/m angesteuert. Die in Abbildung 87 dargestellte Kennlinie weist eine Empfindlichkeit von 1425 mV/V/kA/m auf. Man erkennt, daß der lineare Meßbereich auf weniger als 5 A/m beschränkt ist. Die größere Abweichung der Kurve von dem linearen Bereich ist in dem gezeigten Beispiel bei negativen Feldstärken vorhanden. Dies könnte auf eine leichte Verdrehung des Sensors im Bezug auf die Achse des Spulenpaares, mit dem das Meßmagnetfeld erzeugt wurde, zurückzuführen sein, wobei sich bereits kleinste Winkelfehler im Ausgangssignal bemerkbar machen.

In der folgenden Abbildung sind die Empfindlichkeitswerte von zwei Sensoren mit 3 mm breiten Folienantennen als Funktion der Betriebsspannung dargestellt:

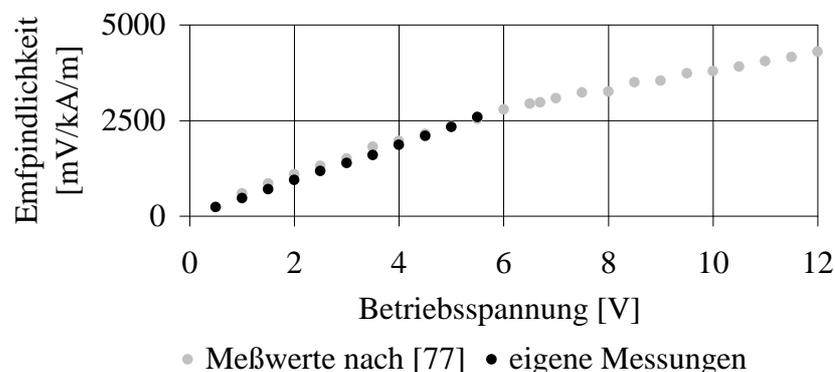


Abbildung 88: Empfindlichkeitsverlauf als Funktion der Betriebsspannung von zwei Femto6-Sensoren mit 3 mm breiten Folienantennen.

Die Meßwerte in Abbildung 88, die durch graue Punkte gekennzeichnet sind, wurden bei ISMRA et Université de Caen ermittelt [77]. Das Abflachen des Empfindlichkeitsverlaufs mit zunehmender Betriebsspannung hängt vermutlich mit einem Anstieg der Temperatur infolge der gestiegenen Stromdichte im Inneren der Probe zusammen. Die mit schwarzen Punkten dargestellten Meßwerte, die sich bis zu einer Betriebsspannung von 4 V erstrecken, stellen einen Vergleich mit den bei ISMRA et Université de Caen gemessenen Werten dar. Aus der Abbildung 88 geht hervor, daß eine Erhöhung der Betriebsspannung zu einem Anwachsen der Empfindlichkeit führt. Da hiermit ein erhöhtes Rauschspannungsniveau verbunden sein wird, ist aber eine übermäßig hohe Betriebsspannung im Hinblick auf die zu erzielende Magnetfeldauflösung unzweckmäßig.

In der nachfolgenden Tabelle sind die an den Sensoren gemessenen normierten Empfindlichkeiten, die auf eine Vollbrücke aus vier magnetoresistiven Widerständen umgerechnet wurden, aufgeführt:

Lfd. Nr.	Antennenbreite [mm]	Empfindlichkeit [mV/V/kA/m]
6	3	870
7	3	1077
8	3	1220
9	3	940
10	6	920
11	6	1042
12	6	1000
13	6	497
14	6	1261
15	3	1370
16	3	1425
17	3	1650
18	3	1650
19	6	1500
20	6	1530
21	6	1190

Tabelle 15: Normierte Empfindlichkeiten von Femto6-Sensoren mit Folienantennen (Gesamtlänge: 18 mm).

Die normierten Empfindlichkeitswerte in Tabelle 15 weisen erhebliche Differenzen auf. Diese können zum Teil auf Exemplarstreuungen in der Geometrie zurückgeführt

werden. Eine weitere Ursache könnte sein, daß die verwendeten Folienantennen eine unterschiedliche Remanenz aufweisen. Um der Frage nachzugehen, ob die zwischen den Sensorstreifen und den Folienantennen vorhandenen Spalte von Exemplar zu Exemplar variieren, sind unter einem Mikroskop mit Hilfe einer CCD-Kamera Aufnahmen der betreffenden Bereiche auf den Sensorchips vorgenommen worden. In der nächsten Abbildung ist die Aufnahme eines Teils von einem Femto6-Sensor mit Folienantennen zu sehen:

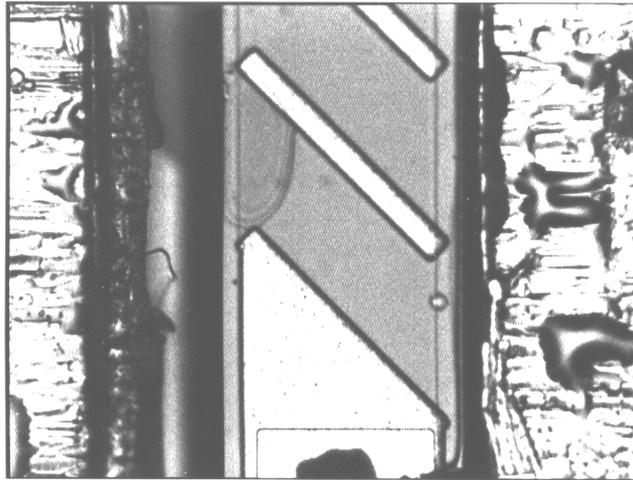


Abbildung 89: CCD-Kameraaufnahme eines Femto6-Sensors mit Folienantennen.

In der Mitte der Abbildung 89 ist das Ende des magnetoresistiven Streifens mit Barber Polen zu erkennen. Am unteren Rand befindet sich die Kontaktstelle für den Bonddraht, dessen Ende zu sehen ist. Links und rechts neben dem Sensorstreifen befinden sich die Kanten der Folienantennen. Es ist deutlich zu erkennen, daß die rechte Folienantenne näher an den Streifen heranragt als die linke. Besonders an der linken Antenne ist die rauhe Kante der Folienantenne zu sehen, die mit einer Wafersäge von der Firma Siegert TFT in ihre geometrische Form gebracht wurde. Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß die Spalte zwischen den Sensorstreifen und den Folienantennen zwischen $15\ \mu\text{m}$ und $90\ \mu\text{m}$ variierten, wobei teilweise eine zusätzliche Abweichung von der gewünschten Parallelität zwischen Antennen und Sensorstreifen vorhanden war. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den gefundenen Spaltunterschieden und den Streuungen in den Empfindlichkeitswerten hergestellt werden. Bei einigen Proben waren die Folienantennen in einer unterschiedlichen Höhe in Bezug auf den Sensorstreifen montiert. Dieser unter dem Mikroskop nur qualitativ erfaßbare Umstand hängt vermutlich mit der Befestigungsmethode der Folienantennen zusammen, die per Hand mit Hilfe einer Pinzette bis zur Wirkung des Sekundenklebers in ihrer Position fixiert wurden. Die Folienantennen wiesen zudem leichte Wölbungen auf, die mit dem in Form einer Rolle gelieferten Ausgangsmaterial zusammenhängen könnten. Das Aufrollen hatte eine bleibende Verbiegung des Materials zu Folge, die

durch nachträgliches Strecken nicht wieder zu beseitigen war. Die gesägten Folienantennen konnten infolgedessen nur unter manuellem Druck befestigt werden, wobei ein vollständiges Verschwinden der Wölbungen nicht erreicht wurde. Die Höhenunterschiede und die unterschiedlich ausgeprägten Wölbungen der Folienantennen könnten eine weitere Ursache für die Streuungen in den Meßwerten sein, wobei ein quantitativer Zusammenhang mit den vorhandenen Meßmethoden nicht hergestellt werden konnte. Ein weiterer Grund für die Streuungen in den Empfindlichkeitswerten könnte in den nicht optimal eingestellten Arbeitspunkten der Sensoren liegen. Variationen der Stärke, der Richtung und der Zeitdauer des Hilfsmagnetfeldes vor den Messungen führten zu stark voneinander abweichenden Meßergebnissen, wobei keine für alle untersuchten Sensoren gültige Vorgehensweise zu ermitteln war, außer daß die Magnetfeldstärke mindestens 2 kA/m betragen und die Richtung so gewählt werden mußte, daß sich der Arbeitspunkt auf dem steileren Teil der beiden Kennlinienabschnitte in Abbildung 86 befand. Dies konnte zum Teil durch sukzessive Verkleinerung des Aussteuerbereichs kontrolliert werden. Ein eventuell vorhandener Zusammenhang zwischen der Empfindlichkeit und der Breite der Folienantennen konnte wegen den Exemplarstreuungen nicht verifiziert werden. Die an den Proben gemessenen Empfindlichkeiten sind um einen Verstärkungsfaktor, der zwischen 30 und 45 liegt, größer als die Werte, die an den Sensoren ohne Folienantennen gemessen wurden. Die Werte für den Verstärkungsfaktor liegen knapp unterhalb derer, die mit dem Modell für die verwendeten Geometrien berechnet wurden (vgl. Abbildung 77), wenn man davon ausgeht, daß die relative Permeabilität der Folienantennen in etwa 1000 beträgt. Ein Teil der Differenz zwischen den berechneten und den gemessenen Werten könnte seine Ursache in der Rauigkeit der Kanten der Folienantennen haben, da eine verlustarme Überleitung des durch die Antennen gesammelten magnetischen Flusses in die Sensorstreifen aufgrund von Streufeldern in diesen Bereichen erschwert wird. Die mit Hilfe des Modells vorausgesagten Empfindlichkeitswerte, die in Abbildung 78 dargestellt sind, wurden maximal bis zu 80 % erreicht.

6.6. Rauschmessungen und Magnetfeldauflösung

Bei den Untersuchungen des Rauschverhaltens der Femto6-Sensoren wurde die Versorgungsspannung von Akkumulatoren, die sich zusammen mit den Proben in der Abschirmkammer befanden, bereitgestellt. Aufgrund der niedrigen Impedanz der Sensoren, wurde vor den Differenzverstärker (PAR 113) ein Transformator als Impedanzwandler (1:100) geschaltet. Zunächst wurde untersucht, ob eine Ausrichtung der Magnetisierung durch das Anlegen eines Magnetfeldes in leichter Richtung vor der Messung einen Einfluß auf das Rauschniveau besitzt. Hierzu sind an einer Probe mit

6 mm breiten Folienantennen Rauschmessungen ohne und mit vorheriger Ausrichtung ($H_x = 2,5 \text{ kA/m}$) vorgenommen worden:

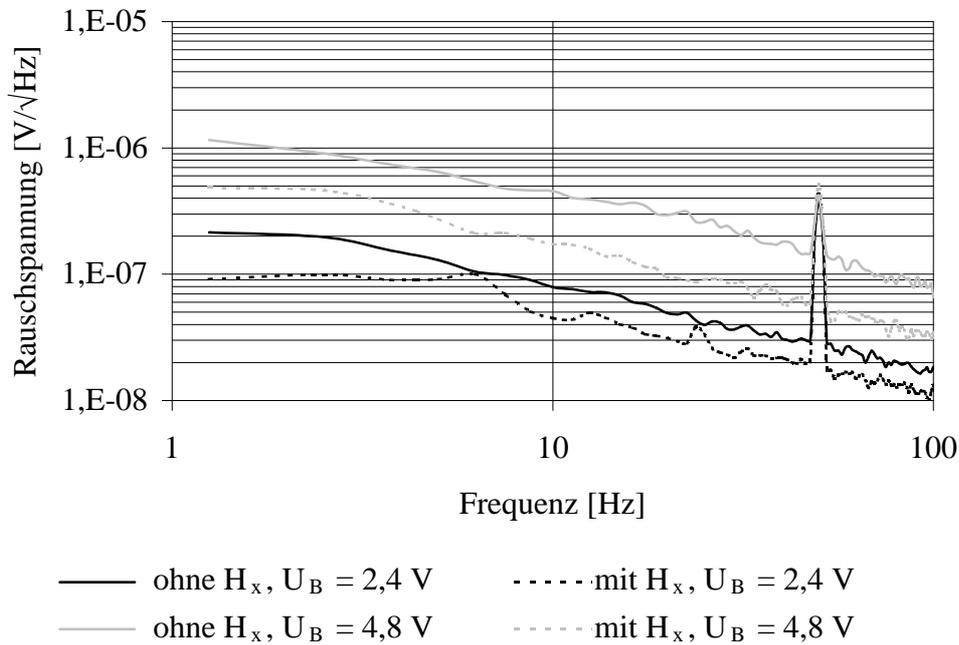


Abbildung 90: Rauschmessungen an einer Femto6-Probe mit 6 mm breiten Folienantennen mit und ohne vorheriger Ausrichtung der Magnetisierung.

Die Messungen wurden bei zwei verschiedenen Versorgungsspannungen U_B durchgeführt. Wie aus Abbildung 90 hervorgeht, hat eine vorherige Ausrichtung ein Absinken des Rauschspannungsniveaus im niederfrequenten Bereich zur Folge. Aus diesem Grund ging allen folgenden Messungen eine Ausrichtung voraus, die einer Arbeitspunkteinstellung auf den steileren Teil der Ausgangskennlinie gleichkam. In der folgenden Abbildung ist das Rauschspektrum eines Femto6-Sensors ohne Folienantennen zu sehen:

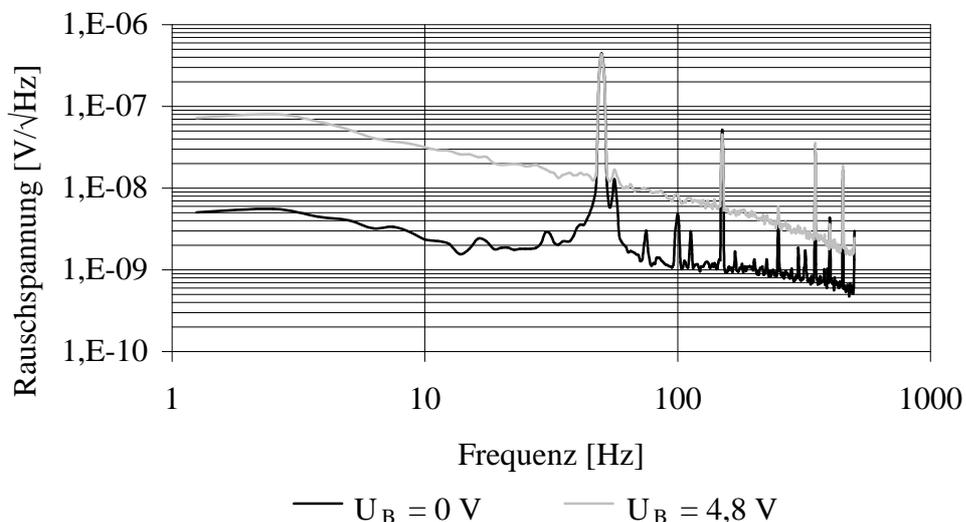


Abbildung 91: Rauschspektrum eines Femto6-Sensors ohne Folienantennen.

In der Abbildung 91 sind zwei Rauschspektren dargestellt, die sich über einen Frequenzbereich von 1,25 Hz bis 500 Hz erstrecken. Das mit einer schwarzen Linie dargestellte Referenzspektrum entspricht dem Rauschspannungsverlauf ohne Betriebsspannung. Der grau dargestellte Kurvenverlauf ergab sich nach dem Anlegen einer Versorgungsspannung von 4,8 V. Die Rauschspektren in Abbildung 91 besitzen qualitativ die gleiche Form wie sie bei den Femto5-Sensoren beobachtet wurden. Auffällig ist auch hier die relativ stark ausgeprägte Zunahme der Rauschspannung im niederfrequenten Bereich.

Um den Einfluß der Größe der Betriebsspannung auf das Rauschverhalten zu untersuchen, sind Messungen an Proben mit Folienantennen bei verschiedenen Versorgungsspannungen durchgeführt worden. In der nächsten Abbildung sind die Rauschspektren zu sehen, die sich durch sukzessives Erhöhen der Betriebsspannung bei einer Probe mit 3 mm breiten Folienantennen ergaben:

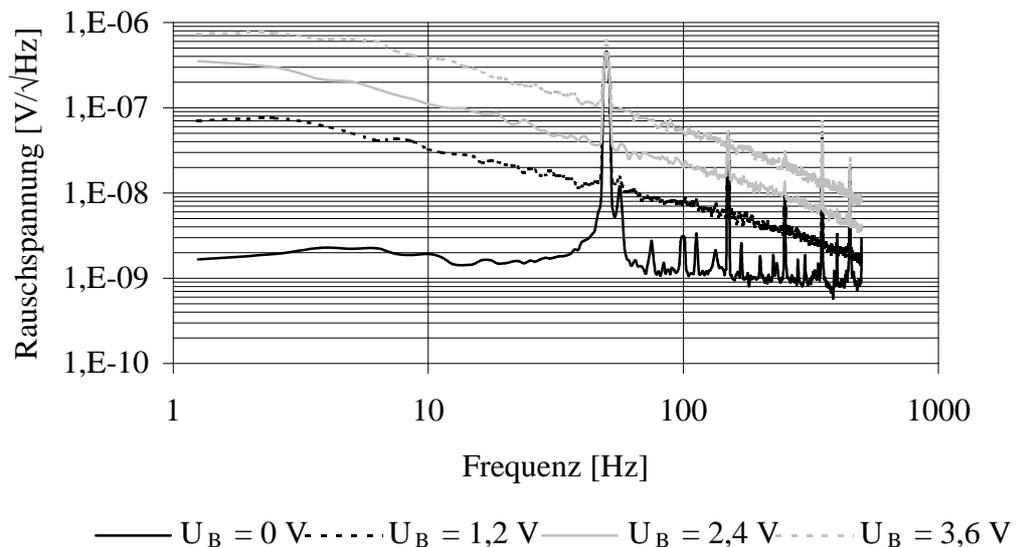


Abbildung 92: Rauschspektren eines Femto6-Sensors mit 3 mm breiten Folienantennen bei verschiedenen Betriebsspannungen.

Eine Erhöhung der Versorgungsspannung führte bei allen untersuchten Proben unabhängig von der Breite der Folienantennen zu einem Anwachsen des Rauschniveaus im niederfrequenten Bereich. Hierbei konnte bis zu einem Betriebsstrom von etwa 15 mA, vergleichbar mit den Ergebnissen von den Femto5-Sensoren, ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem Betriebsstrom und der Rauschspannung festgestellt werden. Da es bei weiterer Erhöhung des Betriebsstromes zu einem noch stärkeren Anstieg der Rauschspannungen kam, ist im Hinblick auf die erzielbare Auflösung von einem übermäßig großen Betriebsstrom abzusehen, weil die Ausgangsspannung immer nur linear mit dem Betriebsstrom zunimmt.

In der nächsten Abbildung sind einige Rauschspannungswerte bei unterschiedlichen Frequenzen, die an einem ebenfalls mit 3 mm breiten Folienantennen ausgestatteten Sensor gemessen wurden, bei verschiedenen Betriebsspannungen gemeinsam mit den sich aufgrund des Empfindlichkeitswertes zu erwartenden Sensorausgangsspannungen für drei verschiedene magnetischen Induktionswerte in Abhängigkeit von der Betriebsspannung aufgetragen:

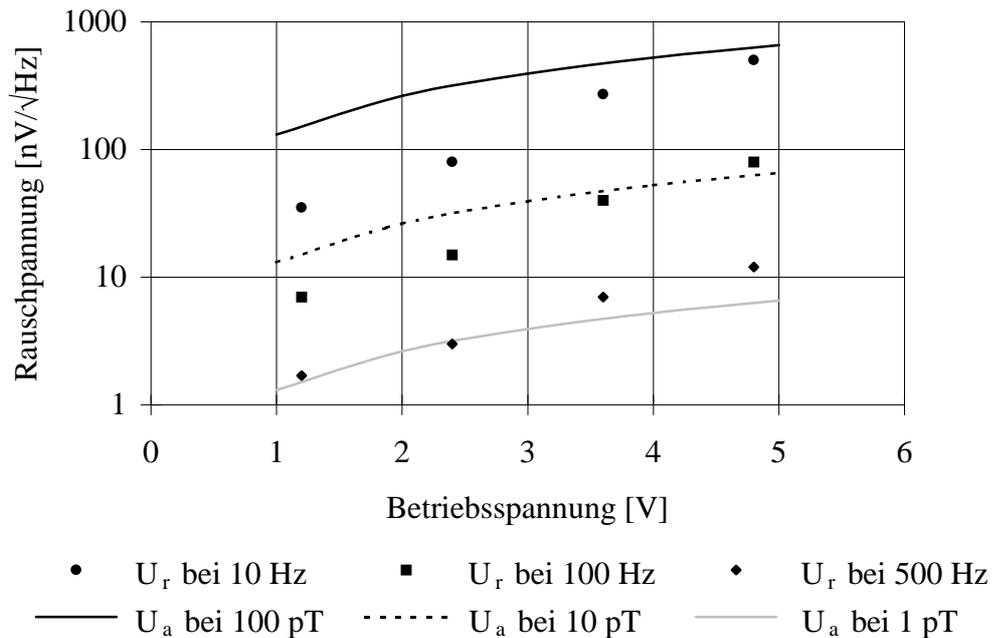


Abbildung 93: Rauschspannungswerte bei verschiedenen Frequenzen eines Femto6-Sensors mit 3 mm breiten Folienantennen und Sensorausgangsspannungen bei unterschiedlich großen magnetischen Induktionen als Funktion der Betriebsspannung.

Man kann in Abbildung 93 erkennen, daß beispielsweise die Messung mit einer Bandbreite von 1 Hz einer magnetischen Induktion von 1 pT und einer Frequenz von 500 Hz unterhalb einer Betriebsspannung von ungefähr 1 V gerade noch möglich sein sollte, da dort die Amplitude des Meßsignals größer als die von dem Sensor erzeugte Rauschspannung sein wird. Die Messung mit einer Bandbreite von 1 Hz von magnetischen Feldern einer Frequenz von 10 Hz, denen eine Induktionen von 100 pT entspricht, sollte gemäß Abbildung 93 selbst bei Betriebsspannungen von 5 V noch möglich sein, da der gemessene Rauschspannungswert unterhalb des Niveaus der zur erwartenden Meßsignalspannung liegt.

In der folgenden Abbildung ist die Magnetfeldauflösung als Funktion der Frequenz von einem Femto6-Sensor abgebildet, der einen auf eine Vollbrücke aus vier magnetoresistiven Widerständen umgerechneten Empfindlichkeitswert von 1650 mV/V/kA/m aufwies:

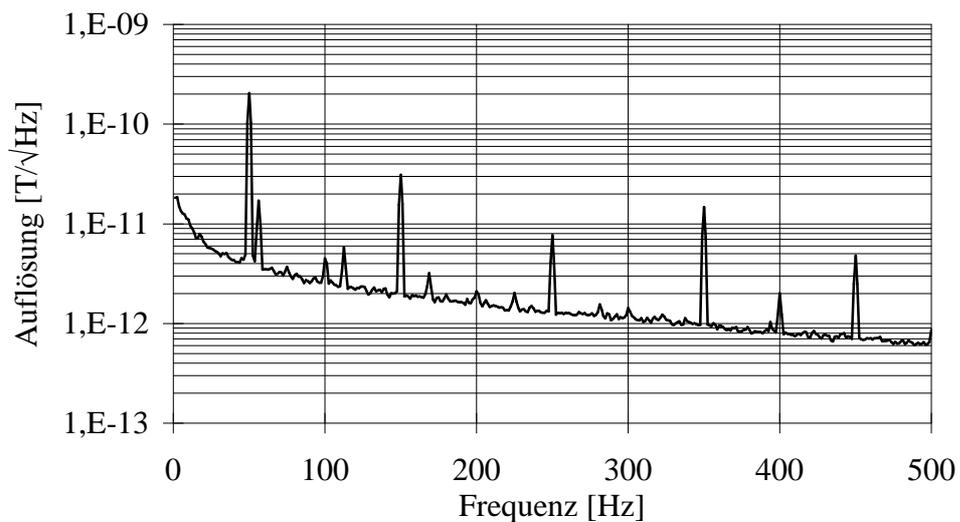


Abbildung 94: Auflösung eines Femto6-Sensors mit 3 mm breiten Folienantennen bei einer Betriebsspannung von 1,2 V.

Wie aus der Abbildung 94 hervorgeht, liegt die Magnetfeldauflösung bei einer Frequenz von 300 Hz bei etwa $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, wobei der Wert der Auflösungsgrenze zu niedrigeren Frequenzen hin deutlich zunimmt. Wurden die Rauschmessungen bis in den Bereich von 1 kHz ausgedehnt, konnten bei einigen Exemplaren anhand der Rauschspektren Auflösungen von minimal $700 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bestimmt werden. Damit konnte die Größenordnung der aufgrund des Modells vorausgerechneten magnetischen Auflösung von einigen hundert Femtotesla mit den gegebenen geometrischen Abmessungen des Sensorsystems erreicht werden (vgl. Abbildung 82). Bei einem linearen Meßbereich von 5 A/m (vgl. Abbildung 87) ergibt sich hieraus ein Dynamikbereich von $140 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$. Geht man davon aus, daß ein Femto6-Sensorsystem den magnetischen Fluß aus einer Fläche konzentrieren kann, die sich aus dem Produkt der Gesamtlänge und Breite der Anordnung ergibt, erhält man bei einer Gesamtlänge von 18 mm und einer Breite von 3 mm eine effektive Sensorfläche von 54 mm^2 . Damit wird bei 1 kHz eine Flußauflösung von $3,8 \cdot 10^{-17} \text{ Wb}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht. Bei den Untersuchungen zeigte sich, daß bei Frequenzen oberhalb von 1 kHz das Rauschspannungsniveau fast nur noch durch das Nyquistrauschen der magnetoresistiven Schichtstreifen bestimmt wird. Die mit den Femto6-Sensoren mit und ohne Folienantennen erzielbaren Auflösungen oberhalb von ungefähr 1 kHz liegen in etwa um den Verstärkungsfaktor, der durch die Folienantennen erreicht wird, auseinander. Im Frequenzbereich von einigen Hz war bei Sensoren mit Folienantennen ein bis zu einem Faktor 10 erhöhtes Rauschspannungsniveau zu beobachten, daß demzufolge zum Teil auf die Folienantennen zurückzuführen ist. Ein weiterer Grund für die erhöhten Rauschspannungswerte in diesem Bereich könnte in der unzureichenden Ausrichtung vor der Messung der Sensoren mit Folienantennen liegen, was gleichzeitig die Streuungen der

Meßergebnisse bei baugleichen Sensoren erklären könnte. Als Ursache für das ansteigende Rauschniveau im niederfrequenten Bereich kommen die bereits bei den Femto5-Sensoren vermuteten thermisch aktivierten Wandbewegungen von magnetischen Domänen in den Sensorstreifen in Betracht.

Parallel sind bei ISMRA et Université de Caen in Frankreich Untersuchungen an Femto6-Sensoren mit 3 mm breiten Folienantennen bei tiefen Temperaturen vorgenommen worden. Dabei wurde zunächst die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes der magnetoresistiven Halbbrücken ermittelt. Das Ergebnis einer solchen Meßreihe ist in der folgenden Abbildung zu sehen:

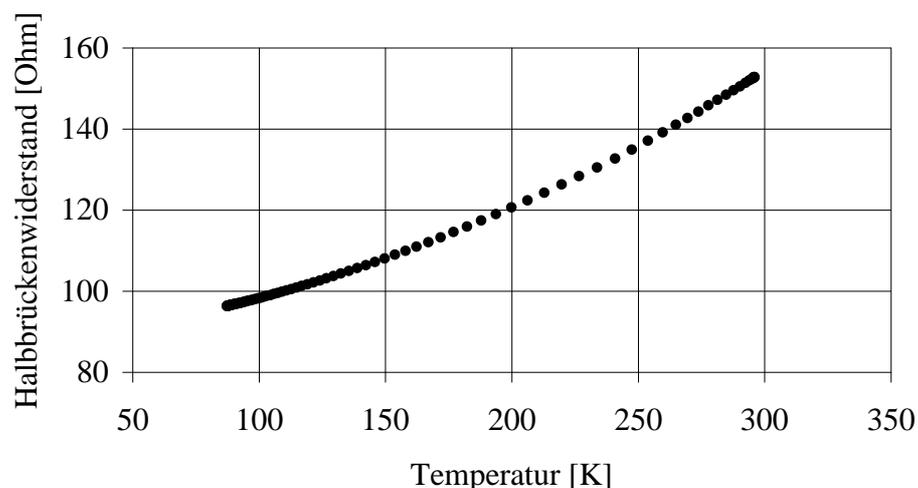


Abbildung 95: Abhängigkeit des ohmschen Widerstandes eines Femto6-Sensors von der Umgebungstemperatur [77].

Wie aus Abbildung 95 hervorgeht, ist durch die Absenkung der Umgebungstemperatur auf unter 100 K eine Widerstandsabnahme um etwa 40 % bezogen auf den ohmschen Widerstand bei Raumtemperatur verbunden. Die an diesem Sensor bei einer Betriebsspannung von 6,9 V gemessene Empfindlichkeit betrug bei Raumtemperatur 4710 mV/kA/m und bei einer Umgebungstemperatur von 88 K 4870 mV/kA/m.

In der folgenden Abbildung ist die magnetische Auflösung, die sich bei einer Messung bei 88 K Umgebungstemperatur, welche einer Temperatur im Sensor von etwa 110 K aufgrund der Eigenerwärmung durch den Betriebsstrom entspricht, dargestellt:

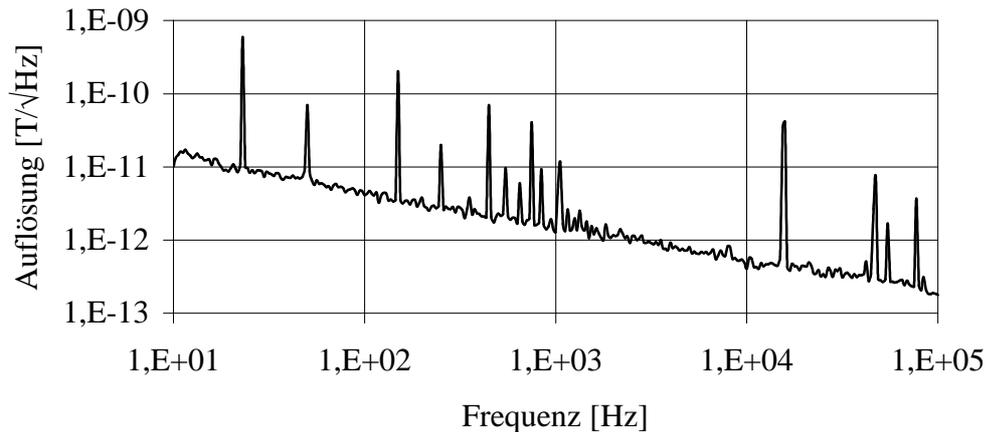


Abbildung 96: Auflösung eines Femto6-Sensors bei einer Umgebungstemperatur von 88 K [77].

Bei der in Abbildung 96 dargestellten Messung diente ein magnetisches Wechselfeld mit einer Frequenz von 23 Hz als Referenzsignal. Die Anwesenheit dieses Referenzsignals könnte zusammen mit anderen nicht vollständig abgeschirmten externen magnetischen und elektrischen Störfeldern der Grund für das im Vergleich zu den eigenen Messungen verlangsamte Abklingen der Auflösung bei größer werdenden Frequenzen sein. Bei dem Sensor, dessen Auflösungsverlauf in Abbildung 96 dargestellt ist, beträgt die Magnetfeldauflösung bei 1 kHz ungefähr $1,5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Im Gegensatz zu den eigenen Messungen wurde mit der an der Halbbrücke gemessenen Empfindlichkeit die Auflösung bestimmt. Dies erklärt zum Teil die größeren Auflösungswerte. Der im Vergleich zu den eigenen Messungen geringere Empfindlichkeitswert bei Raumtemperatur läßt darauf schließen, daß der Arbeitspunkt des Sensors durch kurzzeitiges Anlegen eines Magnetfeldes ausreichender Größe in leichter Richtung bei der Meßtemperatur nicht optimal eingestellt war. Dies könnte ebenfalls die Ursache von Streuungen in den Ergebnissen bei verschiedenen Sensoren unter ansonsten gleichen Meßbedingungen sein.

Bei weiteren Untersuchungen konnte an einem Exemplar bei 88 K Umgebungstemperatur eine Auflösung von unter $200 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei Frequenzen oberhalb von 100 kHz gemessen werden. Allerdings war bei dieser Messung ein Bonddraht des Sensors abgerissen, so daß ein fehlender magnetoresistiver Teil der Halbbrücke durch einen magnetfeldunabhängigen Festwiderstand, der nicht gekühlt wurde, ersetzt werden mußte. Laut ISMRA et Université de Caen wäre bei einem voll funktionsfähigem Sensor eine Auflösung von etwa $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ möglich [77].

6.7. Untersuchungen zur Langzeitstabilität

Um Aussagen über das Langzeitverhalten der Femto6-Sensoren machen zu können, wurde ein Dauertest durchgeführt. Hierbei befanden sich zwei Proben ohne Antennen und zwei Proben mit Folienantennen in einer Meßvorrichtung, deren Innentemperatur auf 423 ± 1 K eingestellt war. Die Temperaturüberwachung während der Versuchsdauer erfolgte über einen Meßfühler, der mit einem temperaturabhängigen Widerstand (PT 1000) ausgestattet war. Die Sensoren waren durch Mumetall (Abschirmfaktor ≈ 100) vor magnetischen Feldern abgeschirmt, um deren störenden Einfluß auf die Meßergebnisse zu minimieren. Die magneto-resistiven Halbbrücken wurden über einen Vorwiderstand von 10Ω an eine Präzisionsspannungsquelle angeschlossen, wobei die Betriebsspannung auf 2 V eingestellt war. Der Test erstreckte sich über einen Zeitraum von 974 Stunden. Die Meßanordnung erlaubte neben der Kontrolle der eingestellten Temperatur die Messung der Ausgangsspannung der Sensorhalbbrücken während der gesamten Meßdauer. In der folgenden Abbildung ist der auf die Betriebsspannung normierte Verlauf der vier simultan gemessenen Ausgangsspannungen zu sehen:

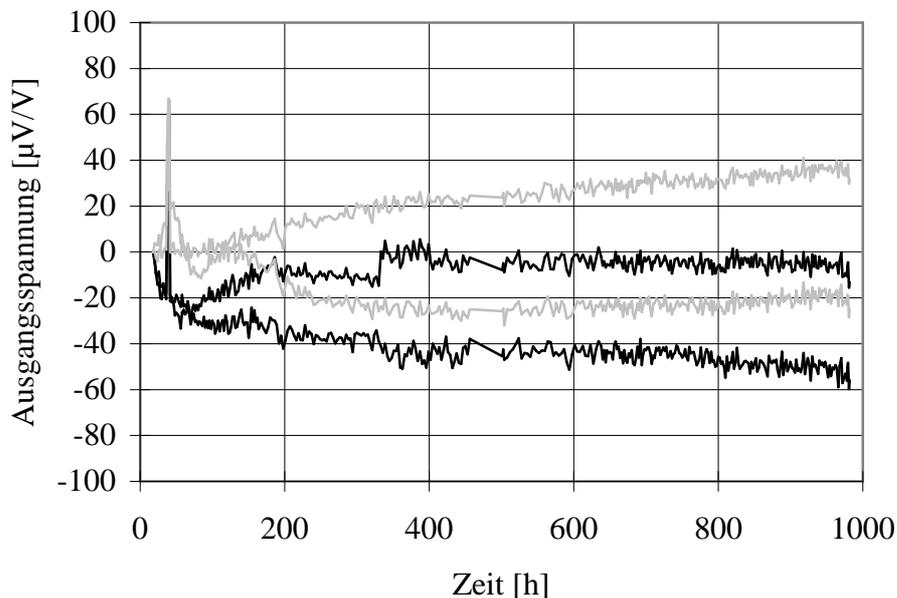


Abbildung 97: Verlauf der Ausgangsspannungen von vier Femto6-Sensoren im Dauertest.

Die in der Abbildung 97 dargestellten Kurven zeigen die zeitliche Drift der Ausgangsspannungen, wobei die sich nach einer Einregelzeit von 18 Stunden nach Meßbeginn ergebenden Spannungen als Startwerte benutzt wurden. Die beiden schwarz dargestellten Kurven wurden an den Sensoren ohne Antennen gemessen und die grau eingezeichneten Kurven zeigen die Spannungsverläufe der Sensoren mit Folien-

antennen. Ein Einfluß der Folienantennen auf den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannungen konnte nicht festgestellt werden. Die abgebildeten Spannungsspitzen nach etwa 40 Stunden sind auf eine nicht näher rekonstruierbare Störung im Meßsystem zurückzuführen und wurden bei der Interpretation der Meßdaten nicht herangezogen. Für die untersuchten Sensoren ergaben sich die in der folgenden Tabelle angegebenen Ergebnisse:

Sensortyp Femto6	T_{k1} [$\mu\text{V/V/K}$]	T_{k2} [$\mu\text{V/V/K}$]	Drift [nV/V/h]
ohne Antenne	8,0	2,5	19
ohne Antenne	-1,8	8,9	23
mit Antennen	-9,6	-8,2	-30
mit Antennen	15,8	14,3	-4,0

Tabelle 16: Temperaturkoeffizienten der Ausgangsspannungen und Drift der Femto6-Sensoren beim Dauertest.

Die Temperaturkoeffizienten T_{k1} und T_{k2} in Tabelle 16 geben die auf die Betriebsspannung normierten Werte an, mit der sich die Ausgangsspannungen zwischen 0 h und 18 h (T_{k1}) und zwischen 991 h und 974 h (T_{k2}) nach Meßbeginn geändert haben. Zur Bestimmung der Drift in Tabelle 16 wurden die Spannungswerte, die sich im Zeitraum zwischen 694 h und 974 h ergaben, herangezogen. Hierbei bedeutet eine Drift von 30 nV/V/h bei einer maximalen Empfindlichkeit von 1650 mV/V/kA/m innerhalb einer Stunde Meßzeit eine Änderung der Ausgangsspannung, die einer magnetischen Induktion von etwa 22 pT entspricht. Die nach dem Dauertest durchgeführten Empfindlichkeitsmessungen ergaben keine Abweichungen zu den Empfindlichkeiten, die vor Beginn des Langzeittests ermittelt wurden.

6.8. Zusammenfassung der Meßergebnisse an der Teststruktur Femto6

Mit der Entwicklung der Teststruktur Femto6, die aus einem langen magnetoresistivem Streifen mit Barber Polen besteht, wurde versucht, die Schwachstellen vorangegangener Sensorkonzepte wie z. B. die Hysterese im Ausgangssignal bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit und Magnetfeldauflösung zu überwinden. Die Besonderheit beim Konzept des Femto6-Sensors liegt in der Absenkung der Flächen neben dem MR-Streifen, die eine bezogen auf die vertikale Position der magnetfeldabhängigen Schicht mittige Anbringung von Flußkonzentratoren in Form von Folienantennen ermöglicht. Es wurde ein Berechnungsmodell abgeleitet, daß Magnetfeldauflösungen von etwa 300 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ für die eingesetzte Struktur voraussagte. Der ermittelte Widerstandshub der Femto6-Sensoren betrug 2,3 %. An Proben ohne Antennen konnten hysteresefreie

Kennlinien beobachtet werden, sofern vor den Messungen eine Ausrichtung der Magnetisierung in den Streifen durch das Anlegen eines Hilfsmagnetfeldes erfolgte. Untersuchungen an Exemplaren mit Folienantennen zeigten, daß beim kompletten Durchfahren der Kennlinie eine reproduzierbare Hysterese auftritt, wodurch zwei Bereiche in der Ausgangskennlinie unterschieden werden können. Ein steilerer Teil wird bis zur Aussteuerung mit einer Magnetfeldstärke von höchstens 30 A/m in eine Richtung nicht verlassen. Eine Aussteuerung über diesen Wert hinaus führt nach einer anschließenden Verringerung der Feldstärke in einen weniger steilen Bereich der Kennlinie. Durch die Beschränkung des Aussteuerbereichs auf wenige A/m und das Ausrichten vor der Messung mit einem Hilfsmagnetfeld von mindestens 2 kA/m konnten hysteresefreie Kennlinien gemessen werden, deren maximale normierten Empfindlichkeiten mit 1650 mV/V/kA/m nahe bei den mit dem Modell berechneten Werten lagen. Allerdings streuten die Meßergebnisse über einen großen Bereich, so daß ein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen den Antennenbreiten und dem Ansprechverhalten der Sensoren nicht ermittelt werden konnte. Die Ursache dieser Streuungen könnte neben Schwankungen in der Positionierung der Folienantennen hauptsächlich in einer unvollständigen Ausrichtung der Magnetisierungen gelegen haben.

Die untersuchten Sensoren zeigten zu kleinen Frequenzen hin stark zunehmende Rauschspannungspegel. Mit einer auf eine Vollbrücke umgerechneten Empfindlichkeit konnte eine Magnetfeldauflösung bei 1 kHz von 700 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ angegeben werden. Dieser Wert ist in etwa mit der Auflösung vergleichbar, die an Femto6-Sensoren bei ISMRA et Université de Caen ermittelt wurde, wenn man berücksichtigt, daß bei diesen Untersuchungen die Empfindlichkeit der Halbbrücke zugrunde gelegt wurde [77].

Bei einem linearen Meßbereich von 5 A/m ergab sich ein Dynamikbereich von 140 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Die effektive Sensorfläche betrug 54 mm², womit eine Flußauflösung von $3,8 \cdot 10^{-17}$ Wb/ $\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht werden konnte.

Bei Umgebungstemperaturen von 88 K konnte bei ISMRA et Université de Caen im günstigsten Fall an einem Femto6-Sensor, bei dem infolge der Beschädigung eines Bondkontaktes lediglich ein Teil des magnetfeldabhängigen Bereichs funktionsfähig war, eine Magnetfeldauflösung von unter 200 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bei Frequenzen oberhalb von 100 kHz ermittelt werden. Mit einem vollständig funktionsfähigem Sensor sollte eine Magnetfeldauflösung von 100 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ möglich sein [77].

In einem über 974 Stunden durchgeführten Dauertest wurde neben dem Temperaturkoeffizienten der Ausgangsspannungen, der unabhängig von der Antennenkonfiguration zwischen minimal $-9,6 \mu\text{V/V/K}$ und maximal $15,8 \mu\text{V/V/K}$ schwankte, eine maximale Drift der Sensorausgangsspannung von 30 nV/V/h ermittelt. Die untersuchten Sensoren zeigten nach dem Dauertest keine veränderten Empfindlichkeitswerte.

7. Zusammenfassung

Im Verlauf dieser Arbeit wurde ein Testsensor (Femto7) entwickelt, der aus fünf Halbbrücken mit Barber Polen unterschiedlicher Geometrie bestand, um verschiedene Schichtparameter bestimmen zu können. Die mit 24 nm dickem Permalloy gefertigten Proben wiesen einen Widerstandshub von 2,6 % auf. An den 50 nm dicken Exemplaren wurde ein Widerstandshub von 3,0 % gemessen. Die Untersuchung der Sättigungsmagnetisierung M_s ergab einen für die am IMO gefertigten Sensoren typischen Wert von 1000 ± 50 A/m. Die Anisotropiefeldstärke H_k betrug 210 ± 20 A/m. Die ermittelten Parameter wurden in allen Berechnungen verwendet.

Es folgte die Entwicklung eines neuartigen Sensorsystems, bei dem zwei übereinanderliegende MR-Schichten durch eine nichtmagnetische Zwischenschicht voneinander getrennt waren. Das Besondere an diesem Konzept war, daß die Magnetisierung während der Herstellung quer zur Längsrichtung des Schichtpaketes eingepreßt wurde. An Versuchsreihen an einer Teststruktur konnte nachgewiesen werden, daß Platin ab einer Schichtdicke von 30 nm als Zwischenschichtmaterial geeignet war. Das Dreischichtkonzept erlaubte eine spaltfreie Anbringung von Dünnschichtantennen, die aus der gleichen Schichtreihenfolge wie das Schichtpaket bestanden. Zusätzlich bot das Konzept die Möglichkeit, Folienantennen anzubringen. Es wurde ein Modell für die Berechnung der zu erwartenden Sensorsystemeigenschaften aufgestellt. Anschließend wurde eine Sensorstruktur entwickelt (Femto5), bei der die Geometrien der Dreischichtpakete und die Abmessungen der Dünnschichtantennen variiert waren, um die mit dem Modell berechneten Eigenschaften und Abhängigkeiten der ermittelten Parameter zu überprüfen. Die Dicke einer MR-Schicht betrug bei allen gefertigten Exemplaren 24 nm. Die Zwischenschichtdicke wurde zwischen 35 nm und 50 nm variiert. Es stellte sich heraus, daß die Dreischichtsensoren lediglich einen Widerstandshub von durchschnittlich 0,7 % aufwiesen. In den Ausgangskennlinien war bei allen Geometrievarianten eine deutliche Hysterese vorhanden, die auf die Existenz von Domänen innerhalb der Schichtpakete und in den angrenzenden Antennenbereichen schließen ließ. Wurden auf die Dünnschichtantennen zusätzlich Folienantennen in Engspaltklebetechnik mit Sekundenkleber montiert, konnte eine maximale Empfindlichkeit von 446 mV/V/kA/m gemessen werden (5/80/4 SK). Die Rauschspektren der Femto5-Sensoren zeigten unterhalb von einigen hundert Hertz einen starken Anstieg des Rauschniveaus. Bei Frequenzen von einigen Hertz konnte bis zu einem Betriebsstrom von etwa 15 mA ein annähernd quadratischer Zusammenhang zwischen dem Betriebsstrom und der Rauschleistung ermittelt werden. Versuche, die Folienantennen mit weichmagnetischem Kleber zu befestigen, führten aufgrund der größeren Klebespalte nicht zu einer Steigerung der Empfindlichkeit. Bei weiteren Versuchen mit Tantal als Zwischenschichtmaterial konnte eine geringfügige Reduzierung der

Hysterese festgestellt werden und die berechneten Empfindlichkeiten und Auflösungen wurden annähernd erreicht. Die beste Magnetfeldauflösung betrug bei einer Gesamtlänge des Sensorsystems von 20 mm bei 1 kHz $3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (20/80/2 SK).

Der Widerstandstemperaturkoeffizient der Femto5-Sensoren, die mit einer 35 nm dicken Platin Zwischenschicht ausgestattet waren, betrug $0,21 \text{ \%}/\text{K}$. Für Femto5-Sensoren mit 40 nm dicker Zwischenschicht ergab sich ein Wert von $0,25 \text{ \%}/\text{K}$.

Da eine Neukonstruktion des Dreischichtensors als Vollbrücke zwar zu einer Vergrößerung der erzielbaren Empfindlichkeit geführt hätte, das Problem der Hysterese in den Ausgangskennlinien (Rayleigh-Schleifen) aber dadurch nicht zu beseitigen gewesen wäre, wurde im weiteren Verlauf der Arbeit von dem Dreischichtkonzept Abstand genommen.

Es folgte die Konstruktion eines neuen Sensors (Femto6), der aus einem langen Streifen mit Barber Polen bestand. Das Besondere an diesem Konzept war die Absenkung der Flächen neben dem MR-Streifen, wodurch ein mittiges Anbringen von Folienantennen bezogen auf die vertikale Position der Sensorschicht möglich war. Für die Berechnung der zu erwartenden Sensoreigenschaften wurde ein Modell entwickelt, das unter idealisierten Bedingungen eine Magnetfeldauflösung von etwa $300 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ für das Sensorsystem voraussagte. Der Widerstandshub der Femto6-Sensoren betrug $2,3 \text{ \%}$. An Proben ohne Antennen war nach Ausrichtung durch ein Hilfsfeld eine hysteresefreie Ausgangskennlinie zu beobachten. Bei Sensoren mit Folienantennen trat beim kompletten Durchfahren der Kennlinie ein reproduzierbare Hysterese auf. Es waren zwei Bereiche der Ausgangskennlinie, die sich in ihrer Steilheit voneinander unterschieden, vorhanden. Durch die Ausrichtung mit einem Hilfsfeld von mindestens $2 \text{ kA}/\text{m}$ vor der Messung war ein stabiler Arbeitspunkt im steileren Teil der Kennlinie erreichbar, sofern die Meßfeldrichtung mit der Richtung des Hilfsfeldes übereinstimmte. Wurde anschließend der lineare Teil der Kennlinie durch Beschränkung des Aussteuerungsbereiches auf wenige A/m während der Messung nicht mehr verlassen, konnten hysteresefreie Ausgangskennlinien gemessen werden. Die maximale Empfindlichkeit betrug $1650 \text{ mV}/\text{V}/\text{kA}/\text{m}$, was gut mit dem anhand des Modells vorausgerechneten Wert übereinstimmte. Die Sensoren zeigten zu kleinen Frequenzen hin ebenfalls stark zunehmende Rauschspannungspegel. Die Magnetfeldauflösung konnte mit einer auf eine Vollbrücke umgerechneten Empfindlichkeit bei 1 kHz mit $700 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ angegeben werden. Der lineare Meßbereich betrug etwa $5 \text{ A}/\text{m}$, wodurch sich ein Dynamikbereich von $140 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ bestimmen ließ. Bei einer effektiven Sensorfläche von 54 mm^2 konnte bei Raumtemperatur für die Flußauflösung ein Wert von $3,8 \cdot 10^{-17} \text{ Wb}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht werden. Mit HT-SQUIDs können beispielsweise Flußauflösungen im Bereich von einigen $10^{-20} \text{ Wb}/\sqrt{\text{Hz}}$ mit einer effektiven Sensorfläche von $0,5 \text{ mm}^2$ erzielt werden [78].

Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich der mit verschiedenen Magnetfeldmeßsystemen erzielten Magnetfeldauflösungen:

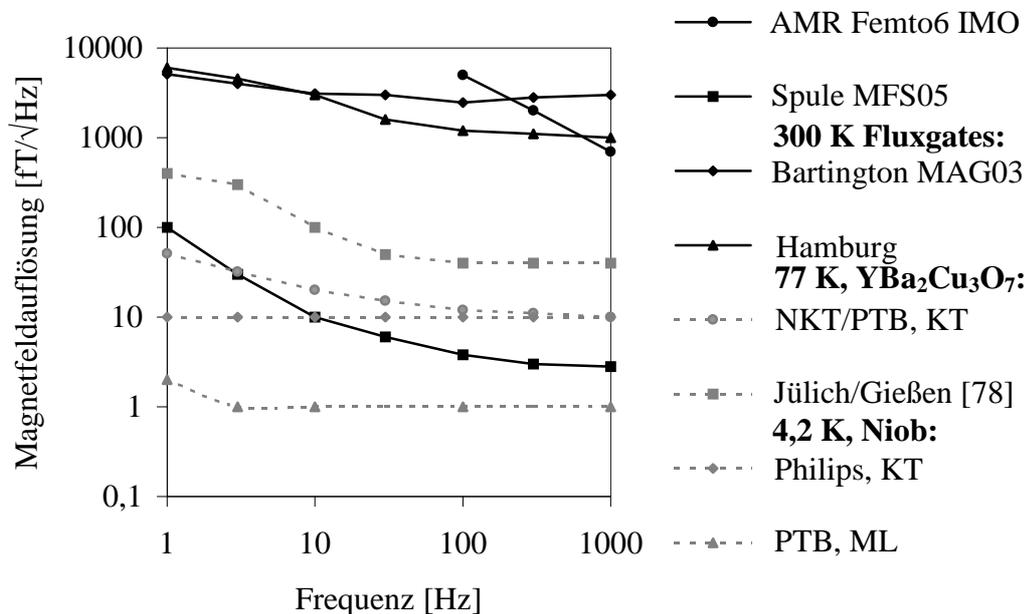


Abbildung 98: Magnetfeldauflösung verschiedener Magnetfeldmeßsysteme [79].

Bei der Beurteilung verschiedener Meßsysteme ist stets das zur Verfügung stehende effektive Meßvolumen und die Betriebstemperatur mit einzubeziehen. Die durchgeführten Berechnungen haben unter anderem gezeigt, daß bei den entwickelten AMR-Sensorsystemen eine Proportionalität zwischen der Gesamtlänge der Anordnung und der Magnetfeldvertärkung der Antennen besteht. Grundsätzlich sind höhere Auflösungen durch Verlängerung der Antennen zu Lasten der Ortsauflösung erzielbar.

Im Bereich des weißen Rauschens konnte bei ISMRA et Université de Caen mit einem Femto6-Sensor bei einer Umgebungstemperatur von 88 K eine Auflösung unter $200 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht werden [77]. Bei diesem Exemplar war eine Bondverbindung beschädigt, so daß ein Teil der Halbbrücke durch einen Festwiderstand ersetzt werden mußte. Mit einem voll funktionsfähigen Femto6-Sensor sollte laut ISMRA et Université de Caen eine Magnetfeldauflösung von ungefähr $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei 88 K Umgebungstemperatur möglich sein. Diesbezügliche Untersuchungen waren bei Abschluß dieser Arbeit noch nicht beendet.

Der in einem 974 stündigen Dauertest ermittelte Temperaturkoeffizient der Ausgangsspannungen lag bei den Femto6-Proben zwischen $-9,6 \mu\text{V}/\text{V}/\text{K}$ und $15,8 \mu\text{V}/\text{V}/\text{K}$. Die maximale Drift der Ausgangsspannung betrug während des Dauertests $30 \text{ nV}/\text{V}/\text{h}$.

Die bei den Femto6-Sensoren aufgetretenen Exemplarstreuungen sind vermutlich auf Schwankungen in der Positionierung der Folienantennen und auf eine unvollständige

Ausrichtung der Magnetisierung vor den Messungen zurückzuführen. In einer weiteren Entwicklungsstufe des Femto6-Konzeptes könnten Empfindlichkeitssteigerungen durch die Konstruktion einer Vollbrücke erreicht werden. Eine Verringerung der Antennenspalte und Rauigkeit der Antennenkanten könnten zu weiteren Verbesserungen führen. Für eine Anwendung in einem Meßsystem müßte eine Kompensationsvorrichtung entweder integriert im Sensorlayout oder durch eine externe Kompensationsspule vorgesehen werden. Störende Magnetfelder in der Meßumgebung könnten auch durch eine Gradiometeranordnung unterdrückt werden.

Vielversprechender in diesem Zusammenhang dürften GMR-Sensorsysteme (GMR: giant magnetoresistance) mit Folienantennen sein, da die Sensorstreifenpakete bei vergleichbarer Empfindlichkeit wesentlich schmäler konstruierbar sind. Dadurch sind erheblich kleinere Antennenspalte, die im wesentlichen den Wirkungsgrad der Folienantennen bestimmen, möglich.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Thomson, W., "On the electrodynamic qualities of metall: effects on the electric conductivity of nickel and of iron", Proc. Roy. Soc. London, A8, 1857, S. 546-550
- [2] Coehoorn, R., "Giant magnetoresistance in exchange-biased spin-valve layerd structures and ist application in read heads", Hrsg. U. Hartmann, in Vorbereitung
- [3] Göpel, W., Hesse, J., Zemel, J. N., "Magnetic Sensors", Weinheim, 1989
- [4] Dettmann, F., Linke, S., Loreit, U., "Messung mechanischer Größen mit magnetoresistiven Sensoren", Feingerätetechnik, Berlin 38, 1989
- [5] Grundler, D., David, B., Eckart, B., Dössel, O., "Highly sensitive $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ dc SQUID magnetometer with thin film flux transformer", Appl. Phys. Lett. 63, 1993, S. 2700-2702
- [6] Informationsschrift des Forschungszentrums Jülich GmbH (KFA), "Hochempfindliche SQUID Gradiometer zur Messung biomagnetischer Signale und zur zerstörungsfreien Materialprüfung"
- [7] EP 0131405, "Hall effect device", 1985
- [8] Schneider, M., Castagnetti, R., Allen, G., Baltes, H., "Integrated flux concentrator improves CMOC magnetoresistor", Proc. MEMS, IEEE, 1995, S. 151-156
- [9] EP 0091000, "Vorrichtung zur Messung des Erdmagnetfeldes", 1982
- [10] Moshage, W., "Progress in biomagnetic imaging of heart arrythias", in Frontiers of European radiology, Vol. 8, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1991
- [11] Smith, N., Jeffers, F., Freeman, J., "A high-sensitivity magnetoresistive magnetometer", J. Appl. Phys. 69 (8), 1991, S. 5082-5084
- [12] Nolting, W., "Grundkurs: Theoretische Physik, 3. Elektrodynamik", Verlag Zimmermann-Neufang, 1990
- [13] Weiss, P., J. Phys. Chim. Hist. Nat. 6, 1907, S. 661
- [14] Osborn, J. R., "Demagnetizing factors of the general ellipsoid", Phys. Rev. 67, 1945, S. 351-357
- [15] Kneller, E., "Ferromagnetismus", Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1962
- [16] Becker, B., Sauter, F., "Theorie der Elektrizität", Teubner Stuttgart, 1964, S. 64
- [17] Polivanov, K. M., "Theoretische Grundlagen der Elektrotechnik Teil 3", Izd. Energija, Moskau, 1966
- [18] Kohlrausch, F., "Praktische Physik II", Teubner Stuttgart, 1962
- [19] Sommerfeld, A., "Vorlesung über theoretische Physik III", 3. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1961

- [20] McGuire, T. R., Potter, R. I., "Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-11, No. 4, 1975
- [21] Cullity, B. D., "Introduction to magnetic materials", Addison-Wesley Publishing Company, 1972
- [22] Mitschell, E. N., Haukass, H. B., Bule, H. D., Streeper, J. B., J. Appl. Phys. 35, 1964, S. 2604
- [23] Pöcker, A., "Dünne magnetische Schichten und ihre Anwendung in der Speichertechnik", Verlag für Wissenschaft und Leben, Bad Windsheim, 1964
- [24] Williams, H. J., Sherwood, R.C., J. Appl. Phys. 28, 1957, S. 548
- [25] Smith, D. O., J. Appl. Phys. 30, 1959, S. 264
- [26] Knorr, T. G., Hoffman, R. W., Phys. Rev. 113, 1959, S. 1039
- [27] Stoner, E. C., Wohlfarth, E. P., Philos. Trans. Roy. Soc. London 240, 1948, S. 599
- [28] Goodenough, J. B., Smith, D. O., "Magnetic properties of metals and alloys", Publ. by Amer. Soc. Met., Cleveland, Ohio, 1959, S. 112
- [29] Slonczewski, J. C., Bericht IBM Research Center, New York, 1956
- [30] Fluitman, J. H. J., Thin solid films 16, 1973, S. 269-276
- [31] Smith, D. O., J. Appl. Phys. 29, 1958, S. 264
- [32] Prutton, M., "Thin ferromagnetic films", London: Butterworths, 1964
- [33] Chopra, K. L., "Thin film phenomena", Chap. VI Mc-Graw-Hill, New York, 1969
- [34] Fuchs, K., "Conductivity of thin metallic films", Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol. 34, 1938, S. 100-108
- [35] Sondheimer, E. H., "The mean free path of electrons in metals", Adv. in Phys., Vol. 1, 1952, S. 1-42
- [36] Berry, R. W., Hall, M., Harris, M. T., "Thin film technology", Chap. 6 Van Nostrand Reinhold, New York, 1968
- [37] Mitchell, E. N., Haukaas, H. B., Bale, H. D., Streeper, J. B., "Compositional and thickness dependence of the ferromagnetic anisotropy in resistance of iron-nickel films", J. Appl. Phys. Vol. 35, No. 9, 1964, S. 2604-2608
- [38] Williams, F. C., Mitchell, E. N., "A study of resistance and magnetoresistance in nickel-iron thin films", Jap. J. Appl. Phys. Vol. 7, No. 7, 1968, S. 739-742
- [39] Andrä, W., Steinbeiss, E., "Magnetische und elektrische Eigenschaften dünner Schichten", in: Magnetische Eigenschaften von Festkörpern, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1975, S. 253-268
- [40] Hall, R. C., "Single crystal anisotropy and magnetostriction constants of several ferromagnetic materials including alloys of NiFe, SiFe, AlFe, CoNi and CoFe", J. Appl. Phys. 30, 1959, S. 816-819

- [41] Dibbern, U., "Magnetoresistive Sensors", in: Sensors, a comprehensive survey, Vol. 5, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 1989
- [42] Inagaki, M., Suzuki, M., Iwama, Y., Mizutani, U., Jap. J. Appl. Phys. Part I, 25, 1986, S. 1514-1517
- [43] Solt, K., Thin solid films 125, 1985, S. 251-256
- [44] Herd, S. R., Ahn, K. Y., J. Appl. Phys. 50, 1979, S. 2384-2386
- [45] Gangulee, A., Bajorek, C. H., d'Heurle, F. M., Mayadas, A. F., IEEE Trans. Magn., Mag-10, 1974
- [46] Néel, L., "Energie des parois de Bloch dans les couches minces", Compt. Rend. 241, 1955, S. 533-536
- [47] Prutton, M., Thin ferromagnetic films, London: Butterworths, 1964, S. 269
- [48] Huber, E. E., Smith, D. O., Goodenough, J. B., "Domain-wall structure in Permalloy films", J. Appl. Phys. 29, 1958, S. 294-295
- [49] Fuller, H. W., Rubinstein, H., J. Appl. Phys. 30, 1959, S. 84
- [50] Schröpfer, G., "Untersuchungen zur Steigerung der Empfindlichkeit magnetoresistiver Strukturen", Diplomarbeit Institut für Angewandte Physik Gießen, 1995
- [51] Mott, N. F., Wills, H. H., "Resistance and thermoelectric properties of the transition metals", Proc. Roy. Soc., Vol. A 156, 1936, S. 368-382
- [52] Mott, N. F., "The electrical conductivity of transition metals", Proc. Roy. Soc. London, Vol. A 153, 1936, S. 699-726
- [53] Smit, J., "Magnetoresistance of ferromagnetic metals and alloys at low temperatures", Physica 16, 1951, S. 612
- [54] Bahnhart, J., Ebert, H., "Eine voll relativistische Theorie der Magnetoresistivität von magnetischen Legierungen", Vortrag 58. Physikertagung, Münster 1994
- [55] Gebhard, O., "Untersuchungen an ferromagnetischen magnetoresistiven Schichten und deren Einsatz in Detektoren", Dissertation Friedrich-Schiller-Universität Jena, 1982
- [56] Dettmann, F., "Grenzen der MR-Technologie beim Einsatz in hochauflösenden inkrementalen Drehgebern", Studie IMO Wetzlar, 1996
- [57] Kwiatkowski, W., Tumanski, S., "The permalloy magnetoresistive sensors, properties and applications", J. Phys. E: Sci. Instrum. 19, 1986
- [58] Hunt, R. P., IEEE Trans. Magn., Mag-7, 1971, S. 150-154
- [59] Kuijk, K. E., van Gestel, W. J., Gorter, F. W., IEEE Trans. Magn., Mag-11, 1975, S. 1215-1217
- [60] Kwiatkowski, W., Stabrowski, M., "The optimization and design of magnetoresistive barber pole sensors", Sensors and actuators, 7, 1985, S. 285-295

- [61] Hooge, F. N., Hoppenbrouwers, A. M. H., "1/f noise in continuous thin gold films", *Physica* 45, 1969, S. 386
- [62] Voss, R. F., Clark, J., "1/f noise from thermal fluctuations", *Phys. Rev. Lett.* 33, 1974, S. 24
- [63] Voss, R. F., Clark, J., "1/f noise from systems in thermal equilibrium", *Phys. Rev. Lett.* 36, 1976, S. 42
- [64] Voss, R. F., Clark, J., "1/f noise: equilibrium temperature and resistance fluctuations", *Phys. Rev. B.* 30, 1976, S. 556
- [65] Heiden, C., Storm, L., "Grundsätzliches zur Bestimmung der Größenverteilung der Barkhausenvolumina in Ferromagnetika", *Z. Angew. Phys.* 21, 1966, S. 349-354
- [66] Bittel, H., Storm, L., "Rauschen", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1971
- [67] Hartig, K., "Experimentelle Untersuchungen an magnetischen Sensoren im Hinblick auf eine magneto-tellurische Aufnahme in Array –Technik", Diplomarbeit Bergakademie Freiberg, 1987
- [68] Porstendorfer, G., "Methodische und apparative Entwicklung magneto-tellurischer Verfahren mit Anwendung auf die Tiefenerkennung im Bereich der norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie", Veröff. d. Instituts für Geodynamik Jena, Akademie Verlag Berlin, 1965
- [69] Dettmann, F., Bettner, C., Loreit, U., "Neue Konzepte für die hochempfindliche Feldmessung mit magnetoresistiven Sensoren", Vortrag IV, Symposium und Statusseminar, IMO Wetzlar, 1997
- [70] Dettmann, F., "Teilvorhaben: Systemgrundlagen und Bauelemente", 2. Zwischenbericht FEMTO, IMO Wetzlar, 1996
- [71] Dössel, O., Kobs, R., Krüger, J., "Hochempfindliche magnetoresistive Sensoren für biomagnetische Messungen", 1. Zwischenbericht FEMTO, Philips GmbH Hamburg, 1996
- [72] Brode, W., "Aufbau und Verbindungstechnik für hochempfindliche magnetoresistive Sensoren", Vortrag XVIII, Symposium und Statusseminar IMO Wetzlar, 1997
- [73] Brode, W., "Aufbau und Verbindungstechnik für hochempfindliche magnetoresistive Sensoren", Abschlußbericht FEMTO, Siegert TFT GmbH, Hermsdorf, 1999
- [74] David, B., Kobs, R., Dössel, O., Krüger, J., "Hochempfindliche magnetoresistive Sensoren für biomagnetische Messungen", Abschlußbericht FEMTO, Philips GmbH Hamburg, 1999

- [75] Gijs, M. A. M., Giesbers, J. B., van Elst, J. W., Briaire, J., Vandamme, L. K. J., “1/f noise in magnetic Ni₈₀Fe₂₀ single layers and Ni₈₀Fe₂₀/Cu multilayers”, J. Magn. Mater. 165, 1997, S. 360
- [76] Moodera, J. S., Kinder, L. R., Wong, T. M., Meservey, R., “Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions”, Phys. Rev. Lett. 74, Nr. 16, S. 3273
- [77] Dolabdjian, C., Saez, S., Robbes, D., Bettner, C., Loreit, U., Dettmann, F., Kaiser, G., Binneberg, A., “HTS SQUID and cryogenically operated magnetoresistive sensors – an open competition?”, Eucas, 1999, Barcelona
- [78] Hohmann, R., Lienerth, C., Zhang, Y., Bousak, H., Thummes, G., Heiden, C., “Comparison of low noise cooling performance of a Joule-Thomson cooler and a Pulse-Tube cooler using a HT SQUID”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 9, 1999, S. 3688-3691
- [79] Schilling, M., “Ultrarauscharme Magnetfeld-Sensoren”, Vortrag Universität Hamburg, Institut für Angewandte Physik, 1999

Abschirmkammer mit Helmholtzspulensystemen
(Deckel demontiert)

