Entwicklung eines Messsystems zur Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Informatik und Automatisierung
der Technischen Universität Ilmenau

von M. Eng. Jens Voigt
geboren am 16.02.1983 in Berlin

vorgelegt am: 05.05.2015
Datum der öffentlichen Aussprache: 16.11.2015

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Haueisen
2. Gutachter: Dr.-Ing. M. Burghoff
3. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat habil. H.-G. Meyer

urn: nbn:de:gbv:ilm1-2015000520

Abstract

A number of experiments in fundaments in fundamental physics, such as the search of the electric dipole moments in atoms and particles, are limited by the uncertainty contributed from the magnetic properties of the environment. Hence, these magnetic properties have to be characterized carefully to allow further optimizations of the experiment. Sensors for such magnetic characterizations are typically limited by the magnetic noise, the frequency bandwidth, the absolute magnetic accuracy for flux densities below 1 nT and the dimensions of the measurements system.

This theses deals with the development, characterization and application of a new, compact and mobile multi-channel measurement system called *Cube*-II with performance suitable for characterizing the magnetic properties of magnetically shielded rooms. The *Cube*-II-system is based on 16 individual low temperature superconducting quantum interference devices (SQUIDs) inside a nonmagnetic cylindrical dewar with 30 cm in diameter and 31 cm in height. With this dewar, a measurement time of up to 20 hours is reached. During this time, a white noise level of less than $6\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ was achieved for all 16 SQUID magnetometers in a frequency range of 1 Hz to $\geq 15\,\mathrm{kHz}$. Below 1 Hz, the magnetic flux noise increases up to $5\,\mathrm{pT}/\sqrt{Hz}$ below 1 mHz. One special feature of the *Cube*-II-system, compared to typical multichannel SQUID-systems, is the possibility to estimate simultaneously the three vector and nine gradient components of the absolute magnetic flux density inside magnetic shielded rooms.

Due to the high accuracy of the mechanical parts of the measurement setup, the three vector components of the residual magnetic field inside the heavily magnetic shielded room *BMSR*-2 were estimated with an expanded uncertainty of $\pm\,8\,\mathrm{pT}$ for B_x and B_y and $\pm\,23\,\mathrm{pT}$ for B_z. By using a new arrangement of the SQUIDs on the surface of a cube, two methods can be used to estimate the nine components of the magnetic field gradient. By using the first and well known method (shift method) to shift the *Cube*-II along the X-, Y- and the Z-axes of the magnetic shielded room, an expanded uncertainty for this method of below $\pm\,2\,\frac{\mathrm{pT}}{\mathrm{cm}}$ were achieved. For the second method (intrinsic method) the new arrangements of at least 12 SQUIDs were used to estimate the nine components with an expanded uncertainty of less than $\pm\,11\,\frac{\mathrm{pT}}{\mathrm{cm}}$.

Kurzfassung

Die Nachweisgrenze einiger Experimente, wie beispielsweise bei physikalischen Grundlagenexperimenten zur Suche nach einem elektrischen Dipolmoment in Atomen und Partikeln, ist durch das Messunsicherheitsbudegt limitiert. Ein Beriech in einem solchen Messunsicherheitsbudegt ergibt sich aus den magnetischen Eigenschaften der Umgebung des jeweiligen Experimentes. Daher müssen diese Eigenschaften mit der nötigen Unsicherheit bestimmt werden. Derzeit sind solche Messungen durch die eingesetzten magnetischen Sensoren limitiert. Diese Limitierung bezieht sich auf das magnetische Eigenrauschen, die Bandbreite, die Größe des jeweiligen Sensors oder die Unsicherheit, mit der die absolute magnetische Flussdichte unterhalb von 1 nT bestimmt werden kann.

Innerhalb dieser Dissertation wurde ein neues kompaktes und mobiles magnetisches Messsystem entwickelt. Weiterhin wurde das als *Cube*-II bezeichnete Messsystem auf dessen mechanische und magnetische Eigenschaften hin charakterisiert. Das Messsystem basiert auf 16 individuelle niedrigtemperatur supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs) innerhalb eines unmagnetischen zylindrischen Dewar mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Höhe von 31 cm. Mit diesem Dewar konnte eine Messzeit von bis zu 20 Stunden erreicht werden. Während dieser Zeit weisen alle 16 SQUIDs ein weißes magnetisches Flussdichterauschen von $\leq 6\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ in einem Frequenzbereich von 1 Hz bis ≥ 15 kHz auf. Unterhalb von 1 Hz steigt das magnetische Flussdichterauschen auf bis zu $5\,\mathrm{pT}/\sqrt{Hz}$ bei 1 mHz an. Im Gegensatz zu vergleichbaren Multikanal-SQUID-Systemen ist es mit dem *Cube*-II-System möglich, innerhalb magnetisch geschirmten Umgebungen die drei Vektor- und neun Gradientenkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte simultan zu bestimmen.

Durch die hohe Präzision der mechanischen Komponenten des *Cube*-II-Systems, konnten die drei Vektorkomponenten des statischen Restfeldes innerhalb des magnetisch geschirmten Raumes *BMSR*-2 mit einer erweiterten Messunsicherheit von $\pm\,8\,\mathrm{pT}$ für B_x und B_y, sowie $\pm\,23\,\mathrm{pT}$ für B_z bestimmt werden. Durch eine neue Anordnung der SQUID-Sensoren auf den sechs Flächen eines Würfels konnten zwei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte genutzt werden. Bei der ersten Methode (Verschiebung) wird das *Cube*-II-System sukzessive entlang der X-, Y- und Z-Achse des magnetisch geschirmten Raumes verschoben und die Änderung der magnetischen Flussdichte auf die verschobene Strecke normiert. Innerhalb des *BMSR*-2

konnten mit dieser Methode die Gradientenkomponenten mit einer erweiterten Messunsicherheit von kleiner gleich $\pm 2\,\frac{\mathrm{pT}}{\mathrm{cm}}$ bestimmt werden. Bei der zweiten Methode (intrinsisch) wird die neue Verteilung der SQUID-Sensoren über die Würfelflächen genutzt um die neun Gradientenkomponenten zu bestimmen. Mit diese Methode konnten innerhalb des *BMSR*-2 die Komponenten mit einer erweiterten Messunsicherheit von kleiner gleich $\pm 11\,\frac{\mathrm{pT}}{\mathrm{cm}}$ bestimmt werden.

Danksagung

Ich möchte mich auf diesem Wege bei Herrn Prof. Dr. J. Haueisen für das Interesse an diesem speziellen Themengebiet und der Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung während der Erarbeitung meiner Arbeit bedanken.

Dr. L. Trahms und Dr. M. Burghoff möchte ich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit im Fachbereich 8.2 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt bedanken. Dabei gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. M. Burghoff für die persönliche Unterstützung und Betreuung sowie für die immer positive Einstellung zu den Herausforderungen, die während dieser Arbeit aufgetreten sind.

Bei Frau Dr. S. Knappe-Grüneberg und Dr. A. Schnabel möchte ich mich herzlichst für die Diskussionen und Hilfestellungen bei der Realisierung der Messungen für diese Arbeit bedanken. Herrn Dr. A. Schnabel möchte ich hier besonders für die Unterstützung bei der langwierigen Analyse der Probleme des *Cube*-I Dewars danken. Durch diese Analyse war es erst möglich, die Optimierung durchzuführen und zusammen mit dem Hersteller der Dewar Gefäße dieses einzigartige Messsystem *Cube*-II realisieren zu können.

Ich möchte mich weiterhin bei Herrn S. Neuber und Herrn D. Gutkelch sowie dem Technischen Gerätebau der PTB für die Konstruktion und Fertigung des *Cube*-I- und *Cube*-II-Systems bedanken, ohne die diese Arbeit in diesem Umfang und dieser Qualität nicht möglich gewesen wäre.

Danken möchte ich Frau N. Höfner für die Simulation der Flussdichteverteilungen der verschiedenen Spulenkombinationen, der Hilfestellungen bei der Realisierung der Messungen für diese Arbeit, aber auch für die freundschaftliche und stets ermutigende Begleitung dieser Arbeit. Herrn F. Petsche möchte ich für die Betreuung bei der Adaptierung des vorhandenen Koppelracks des Multikanal Systems der PTB auf das *Cube*-II-System und der Entwicklung von zahlreichen Zusatzgeräten bedanken, welche die Nutzung des *Cube*-II so komfortabel gestalteten. Für die Zurverfügungstellung seines Messplatzes möchte ich Herrn D. Stollfuß danken, mit welchem die Einstellungen und die Überprüfungen der SQUID-Sensoren im Messsystem reproduzierbar und vor allem zeitoptimiert ermöglichte wurde. Weiterhin möchte ich Frau E. Al-Dabbagh für die Hilfestellungen bei zahlreichen Messungen für diese Arbeit danken.

Besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dr. S. Hartwig und Herrn H.-J. Scheer für die anregenden Diskussionen und für die wissenschaftliche Vorbereitung zu diesem Unterfangen bedanken.

Herrn L.-J. Bünger danke ich für die zahlreichen freundschaftlichen Diskussionen zu dieser Arbeit, die mich begleitet und motiviert haben, dieses Ziel zu verfolgen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken, die mir den Weg bis hin zu dieser Arbeit erst ermöglichte. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei meiner Freundin A. Enkelmann für ihre Geduld und ihrer Unterstützung während der Durchführung und vor allem während der Schreibphase.

Diese Dissertation wurde im Rahmen des Forschungsprojektes BU-1037/3-2 erarbeitet, welches durch das Schwerpunktprogramm 1491 „Precision experiments in particle- and astrophysics with cold and ultracold neutronsvon“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert wurde.

Inhaltsverzeichnis

Abstract **i**

Kurzfassung **iii**

Danksagung **v**

1. Einleitung **1**
1.1. Magnetisch geschirmte Umgebungen 1
1.2. Zielstellung der Arbeit 3
1.3. Beitrag des Autors zu dieser Arbeit 4

2. Stand der Technik **5**
2.1. Abschirmung magnetischer Felder 5
2.2. Sensoren zur Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen 13
2.2.1. Fluxgate 13
2.2.2. Präzessions-Magnetometer 15
2.2.3. SQUID-Magnetometer 16
2.3. Bestimmung des DC-Offsets von SQUID-Sensoren 19

3. Charakterisierung von MSRs **25**
3.1. Standardisierung der Charakterisierung von MSRs 25
3.2. Auswahl des geeigneten Sensors 31
3.3. Adaptierte Sensoranordnung zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und deren Gradiententensor 33

4. Realisierung des magnetischen Messsystems **35**
4.1. SQUID-Sensor 35
4.2. FLL-Elektronik 36
4.3. Datenerfassung 39
4.4. Anordnung der SQUIDs auf dem Sensorkopf 40
4.5. *Cube*-II-Dewar 45
4.6. *Cube*-II-Isoliereinsatz 46
4.7. Automatische Befüllung des *Cube*-II-Dewars 48
4.8. Manipulator 49
4.9. Prozedur zur Bestimmung der Offsets aller SQUIDs 51

5. Charakterisierung des magnetischen Messsystems 55
5.1. Messzeit des *Cube*-II-Systems 55
5.2. Übersprechen der SQUID-Sensoren 55
5.3. Position und Ausrichtung der SQUIDs zur Dreh- und Kippachse des *Cube*-II-Systems im Manipulator 56
5.4. Magnetische Drift 59
5.5. Das magnetische Gesamtrauschen 62
5.6. Betrachtung der Messunsicherheit bei der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte 65
5.6.1. Einführung 65
5.6.2. Skalierung der Messwerte 67
5.6.3. Bestimmung der einzelnen SQUID Offsets 68
5.6.4. Bestimmung der drei Vektorkomponenten sowie des Betrags der magnetischen Flussdichte mit dem zentralen SQUID $Y0$ 74
5.6.5. Bestimmung der drei Vektorkomponenten sowie des Betrags der magnetischen Flussdichte mit den drei zentralen virtuellen SQUIDs *vX0*, *vY0* und *vZ0* 75
5.6.6. Bestimmung der neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte mittels der intrinsischen Methode 76
5.6.7. Bestimmung der neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte mittels der Methode der Verschiebung des Messsystems . 77
5.6.8. Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Betrachtung der Messunsicherheiten 78
5.7. Validierung der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und deren Gradientenkomponenten 81
5.7.1. Beschreibung des Messaufbaus 81
5.7.2. Simulation der Verteilung der magnetischen Flussdichte im Spulensystem 83
5.7.3. Bestimmung der Vektor- und Gradientenkomponenten mit dem *Cube*-II-System 84
5.8. Diskussion der Ergebnisse zum *Cube*-II-System 88
5.8.1. Erreichte messtechnische Eigenschaften 88
5.8.2. Vergleich des *Cube*-II-Systems mit bereits vorhandene Multikanal SQUID-Systemen. 91
5.8.3. Potential zur Verbesserung des *Cube*-II-Systems. 94

6. Anwendung der zwei SQUID-Systeme *Cube*-I und *Cube*-II 97
6.1. Einsatz des Prototypen *Cube*-I am Paul Scherrer Institut 97
6.2. Charakterisierung einer 2-lagigen Mu-Metallschirmung mit dem *Cube*-II-System 102
6.2.1. Schirmfaktor 102

6.2.2. Magnetische Drift 103
6.2.3. Magnetisches Rauschen 105
6.2.4. Absolute magnetische Flussdichte und dessen Gradient 106
6.2.5. Diskussion der Charakterisierung der *Zuse-MSR* 108

7. Ausblick **111**

Literaturverzeichnis **121**

Genutzte Abkürzungen und Symbole **124**

Abbildungsverzeichnis **134**

Tabellenverzeichnis **142**

Anhang A. Tabellen **143**

Anhang B. Protokoll Zuse-MSR **179**

Ehrenwörtliche Erklärung **192**

1. Einleitung

1.1. Magnetisch geschirmte Umgebungen

Die Erzeugung eines Volumens mit einer stabilen, störungsfreien und homogenen magnetischen Flussdichte ist eine wichtige Grundlage für eine Vielzahl von messtechnischen Anwendungen. Diese reichen von Messungen biomagnetischer Signale [1] und spektroskopischen bzw. bildgebenden [2, 3] Messungen der kernmagnetischen Resonanz über physikalische Grundlagenexperimente der Spin-Präzessionsmessung [4–7] bis hin zur Charakterisierung von hochempfindlichen magnetischen Sensoren [8]. Um diese Eigenschaften der umgebenden magnetischen Flussdichte zu gewährleisten, werden diese Experimente meistens in einer magnetischen Schirmung, im Folgenden als *MSR* (engl.: Magnetic Shielded Room) bezeichnet, durchgeführt.

Durch die Anwendung von *MSRs* können beispielsweise direkt biomagnetische Signale von Menschen untersucht werden. So gelang Burghoff et al. erstmals der direkte Nachweis einer langanhaltenden Gehirnaktivität während einer motorischen Stimulation [1]. Dazu wurde eine magnetische Messung der Hirnaktivität, ein sogenanntes Magnetenzephalogramm (*MEG*), von zwei Probanden innerhalb des magnetisch geschirmten Raums *BMSR*-2 (Berlin Magnetically Shielded Room-2) durchgeführt. Die Hirnaktivität wurde dabei gezielt durch eine motorische Stimulation der rechten Hand hervorgerufen. Unmittelbar nach dem Start der Stimulation konnte mit supraleitenden Quanteninterferenz Detektoren (*SQUIDs*) eine anhaltende Änderung des *MEG*-Signals im Sekundenbereich von rund 200 fT in drei 3 cm Entfernung zur Schädeldecke nachgewiesen werden. Der Nachweis dieses geringen, aber signifikanten MEG-Signals konnte innerhalb des *BMSR*-2 nur realisiert werden, weil dessen Schirmeigenschaften ausreichten, um die urbanen magnetischen Störungen von rund ±400 nT zu dämpfen.

Neben der Abschirmung von sich zeitlich ändernden magnetischen Störfeldern sind die Amplitude und der Gradient der statischen magnetischen Flussdichte innerhalb des *MSRs* die wichtigsten Faktoren bei Kern-Spin-Präzessionsmessungen für physikalische Grundlagenexperimente. Den Zusammenhang beschrieb Gemmel et al. anhand von Spin-Präzessions-Experimenten mit hyperpolarisierten Edelgasen [6]. Dafür wurden die magnetischen Kernspins aus ^{3}He- und ^{129}Xe-Atomen ausgerichtet, um eine nach außen messbare Magneti-

sierung zu erreichen. Nachdem diese durch optische Polarisation erzeugt wurde, fand ein NMR-Experiment statt, bei dem die um ein Magnetfeld B_0 präzidierende Magnetisierung mit SQUIDs detektiert werden konnte. Mit diesem Experiment sollte die Möglichkeit untersucht werden, nichtmagnetische Interaktionen mit den Kernspins der Edelgase zu detektieren. Solch eine Interaktion könnte sich in einer Änderung der Präzessionsfrequenz oder der Phase der präzidierenden Gase auswirken. Dabei hängt die Empfindlichkeit eines solchen Experimentes unter anderem davon ab, mit welcher Unsicherheit eine Änderung der Frequenz oder Phase des Messsignales bestimmt und wie gut sie von anderen Störgrößen unterschieden werden kann. Da die Frequenzauflösung mit der Dauer der Messzeit ansteigt, ist es das Ziel eine maximale Messzeit zu realisieren. Dem steht der Zerfall der messbaren Gasmagnetisierung während der Messzeit gegenüber, welcher das Signal-Zu-Rauschverhältnis (SNR) reduziert. Gemmel et al. zeigten, dass für eine kugelförmige Gasprobe die mögliche Messzeit maßgeblich von den Amplitudenquadraten der Gradienten der magnetischen Flussdichte abhängt. Damit zeigte sie, dass durch die Reduzierung des Gradienten der magnetischen Flussdichte die zeitliche Abnahme der Signalamplitude reduziert werden kann, was bei gleichem SNR die mögliche Messzeit verlängert und damit die Messunsicherheit reduziert.

Neben dem Gradienten der magnetischen Flussdichte beeinflusst auch ihre zeitliche Stabilität die Messunsicherheit. Über das gyromagnetische Verhältnis γ der präzidierenden Medien ergibt sich proportional zum Betrag der absoluten magnetischen Flussdichte die Präzessionsfrequenz. Konnte wie oben beschrieben die Messzeit durch die Reduktion der Gradienten verlängert werden, so muss ebenfalls die zeitliche Stabilität der Flussdichte über diesen Zeitraum gewährleistet sein. Auch müssen systematische Unsicherheiten, die eine ähnliche Wirkung auf das Messsignal wie die gesuchte Interaktion erzeugen, untersucht und wenn möglich reduziert oder beseitigt werden. Hierzu müssen die magnetischen Schirmungen regelmäßig, eventuell sogar vor jeder Messung, auf ihre magnetischen Eigenschaften hin charakterisiert werden.

Solch eine magnetische Charakterisierung der Messumgebung wird beispielsweise für das Experiment zum Nachweis eines elektrischen Dipolmomentes vom Neutron ($nEDM$) am Paul Scherrer Institut, in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Dafür werden mit verschiedenen Magnetfeldsensoren die folgenden Eigenschaften innerhalb der magnetischen Schirmung untersucht: [9, 10]

- die Amplitude und die Homogenität der absoluten magnetischen Flussdichte ohne zusätzlich erzeugte Magnetfelder

- die Reproduzierbarkeit der Verteilung der magnetischen Flussdichte nach einer Entmagnetisierung mit und ohne B_0-Feld

- die Verteilung aller für das Experiment zusätzlich benötigten Magnetfelder

- die zeitliche Stabilität der magnetischen Flussdichte
- das magnetische Rauschen ohne und mit zusätzlichen Magnetfeldern

Das Ergebnis dieser Charakterisierung ist ein Teil des Unsicherheitsbudgets des Experimentes, welches die erreichte Nachweisgrenze eines elektrischen Dipolmomentes in einem Neutron bestimmt. Dabei ist das Interesse groß, diese Beiträge zum Unsicherheitsbudget zu verringern. Diese Optimierung stellt eine hohe Bedeutung bei der Verbesserung oder Neuentwicklung aller oben beschriebenen Experimente dar.

Aktuell werden vom Hersteller Protokolle angefertigt, welche zur Abnahme der jeweiligen *MSR* durch den Käufer genutzt werden. Der Inhalt dieser Protokolle unterscheidet sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Hersteller und den speziellen Anforderungen des Käufers. Da diese Protokolle selten veröffentlicht werden, ist es schwierig Vergleiche zwischen unterschiedlichen *MSRs* anzufertigen. Ein standardisiertes Protokoll nach dem die Charakterisierung eines *MSRs* durchgeführt und veröffentlicht wird, würde jedoch die Vergleichbarkeit der *MSRs* vereinfachen. Damit würden die Chancen erhöht, dass die Betreiber bei der Planung und Durchführung unterschiedlicher Experimente von Verbesserungen anderer *MSRs* profitieren. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Protokoll erstellt, welches als Vorlage dienen soll, die magnetische Charakterisierung eines *MSRs* nachvollziehbar, einheitlich und publizierbar abzubilden.

Um ein solches Protokoll umsetzen zu können werden entsprechende Magnetfeldsensoren benötigt. Mit den derzeitigen geschirmten Umgebungen [11–14] werden jedoch magnetische Eigenschaften erreicht, die mit den messtechnischen Randbedingungen aktueller Sensoren nur noch teilweise nachgewiesen werden können.

1.2. Zielstellung der Arbeit

Aus diesen Umständen ergibt sich die Motivation für die Entwicklung einer einheitlichen Messprozedur zur vergleichbaren Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen. Weiterhin soll ein Messsystem entwickelt und realisiert werden, mit dem die Messprozedur in unterschiedlichen magnetisch geschirmten Umgebungen angewendet werden kann. Dazu musste neben den reinen messtechnischen Eigenschaften das Messsystem sowohl kompakt als auch mobil sein. Aus diesem Grund wurde bei der Konzeption des Systems auch dessen Größe und Gewicht berücksichtigt. Das Messsystem soll magnetisch charakterisiert und zusammen mit einem standardisierten Messprotokoll in unterschiedlichen magnetisch geschirmten Umgebungen eingesetzt werden.

1.3. Beitrag des Autors zu dieser Arbeit

Bei der Realisierung des in dieser Arbeit vorgestellten Messsystems konnte der Autor zum Teil Komponenten einsetzen, welche speziell für diesen Zweck von dritten Personen entwickelt oder adaptiert wurden. Bei der Beschreibung dieser Komponenten innerhalb dieser Arbeit wurden diese Personen immer namentlich genannt. Im Folgenden wird stichpunktartig der Beitrag des Autors zum hier vorgestellten Messsystem zusammengefasst. So wurden vom Autor:

- ein Protokoll zur magnetischen Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen (MSRs) entworfen. Kapitel: 3.1
- eine adaptierte Sensoranordnung zur simultanen Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und deren Gradiententensor entwickelt. Kapitel: 3.3 und 4.4
- eine Prozedur zur Bestimmung der Offsets aller 16 SQUID-Sensoren auf dem Sensorkopf entwickelt. Kapitel: 4.9
- die technischen Vorgaben für die Konstruktion des Isoliereinsatzes und des Manipulators erarbeitet. Kapitel: 4.6 und 4.8
- der Dewar *Cube*-I in Betrieb genommen sowie die von diesem erzeugten dynamischen magnetischen Störfelder untersucht.
- zusammen mit Dr. A. Schnabel ein Konzept zur Vermeidung der magnetischen Störfelder entwickelt und mit dem *Cube*-II-Dewar erfolgreich umgesetzt.
- das magnetische Messsystem *Cube*-II in Betrieb genommen und innerhalb des *BMSR*-2 charakterisiert. Kapitel: 5
- die Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Vektor- und Gradientenkomponentenen der absoluten magnetischen Flussdichte mit dem *Cube*-II-System betrachtet. Kapitel: 5.6
- das Messprinzip mittels Spulen validiert. Kapitel: 5.7
- die beiden SQUID-Systeme *Cube*-I und *Cube*-II innerhalb zweier unterschiedlicher *MSRs* eingesetzt. Kapitel: 6
- das in dieser Arbeit entworfene Protokoll zur Charakterisierung von magnetisch geschirmten Umgebungen an der *Zuse-MSR* angewendet. Kapitel: 6.2

2. Stand der Technik

2.1. Abschirmung magnetischer Felder

Die magnetische Flussdichte

Zur Visualisierung des magnetischen Feldes werden in der Literatur häufig Linien bzw. Pfeile genutzt wie sie sich beispielsweise auch durch Eisenspäne auf Papier ergeben, wenn sie sich im Magnetfeld ausreichender Stärke befinden. Die Dichte dieser Linien und damit die Stärke des Magnetfeldes wird durch die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ beschrieben und ist ein Maß für den magnetischen Fluss Φ, welcher senkrecht durch ein bestimmtes Flächenelement tritt. Die Amplitude und Richtung des Flussdichtevektors lässt sich innerhalb eines kartesischen Koordinatensystems aus den drei Komponenten B_x, B_y und B_z bestimmen. Diese Komponenten werden auch als Tensor 1. Ordnung bezeichnet. Der Tensor 2. Ordnung, auch als Gradiententensor bezeichnet, beschreibt die Änderung der drei Komponenten der magnetischen Flussdichte entlang einer Wegstrecke, welche als Basislänge bezeichnet wird. Da in dieser Arbeit nur das kartesische Koordinatensystem genutzt wurde, ergeben sich die drei Raumrichtungen zu x, y und z. Daher wird die Basislänge, entlang derer sich die drei Komponenten ändern, als $\Delta\mathrm{x}$, $\Delta\mathrm{y}$ und $\Delta\mathrm{z}$ bezeichnet. Somit beschreibt der Gradiententensor eine Matrix mit 3x3 Elementen, welche in Gleichung 2.1 dargestellt ist [15]. Zur besseren Darstellung wird für die einzelnen Komponenten des Gradienten häufig die Abkürzung g_mn eingesetzt, wobei der Index m für die Änderung der drei magnetischen Komponenten ΔB_x, ΔB_y und ΔB_z steht und n für die Wegstrecken $\Delta\mathrm{x}$, $\Delta\mathrm{y}$ und $\Delta\mathrm{z}$ entlang derer die Flussdichteänderung untersucht wird [16].

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta B_\mathrm{x}}{\Delta\mathrm{x}} & \frac{\Delta B_\mathrm{y}}{\Delta\mathrm{x}} & \frac{\Delta B_\mathrm{z}}{\Delta\mathrm{x}} \\ \frac{\Delta B_\mathrm{x}}{\Delta\mathrm{y}} & \frac{\Delta B_\mathrm{y}}{\Delta\mathrm{y}} & \frac{\Delta B_\mathrm{z}}{\Delta\mathrm{y}} \\ \frac{\Delta B_\mathrm{x}}{\Delta\mathrm{z}} & \frac{\Delta B_\mathrm{y}}{\Delta\mathrm{z}} & \frac{\Delta B_\mathrm{z}}{\Delta\mathrm{z}} \end{pmatrix} = g_\mathrm{mn} = \begin{pmatrix} g_\mathrm{xx} & g_\mathrm{yx} & g_\mathrm{zx} \\ g_\mathrm{xy} & g_\mathrm{yy} & g_\mathrm{zy} \\ g_\mathrm{xz} & g_\mathrm{yz} & g_\mathrm{zz} \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

In dieser Arbeit fand die Bestimmung der Vektor- und Gradientenkomponenten statisch und in Luft mit einer vernachlässigbaren elektrischen Leitfähigkeit statt. Daher wurde davon ausgegangen, dass die magnetische Flussdichte innerhalb des Messvolumens frei von magnetischen Quellen ist und damit

$$\nabla \bullet \vec{B} = 0 \tag{2.2}$$

gilt. Daraus folgt, dass die Summe der Spur der 3x3 Matrix gleich Null ergibt. Neben der Quellenfreiheit muss, durch die oben getroffene Einschränkung, die Flussdichte auch wirbelfrei sein und damit:

$$\nabla \times \vec{B} = 0. \tag{2.3}$$

Dies hat zur Folge, dass der Gradiententensor symmetrisch ist und zusammen mit der Quellenfreiheit nur fünf unabhängige Komponenten bekannt sein müssen, um die 3x3 Matrix voll bestimmen zu können [17].

Neben der magnetischen Flussdichte beschreibt auch die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ die Stärke des Magnetfeldes. Beide verhalten sich über die magnetische Permeabilität μ proportional zueinander.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \tag{2.4}$$

Die Permeabilität ergibt sich wiederum aus dem Produkt der magnetischen Feldkonstante μ_0 mit einer stoffspezifischen Permeabilität μ_r. Umgangssprachlich wird letztere auch als Maß für die magnetische Leitfähigkeit oder Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder bezeichnet. Diese Eigenschaft der stoffspezifischen magnetischen Leitfähigkeit wird zur Auswahl geeigneter Materialien zur Abschirmung eines Volumens von magnetischen Feldern, also zum Aufbau eines *MSRs*, ausgenutzt.

Realisierung magnetisch geschirmter Umgebungen (MSRs)

Um störende magnetische Felder, wie beispielsweise das der Erde, zu dämpfen, werden geschirmte Umgebungen eingesetzt. Diese Schirmungen lassen sich nach ihrem Wirkprinzip in die drei Kategorien:

- Verdrängung,
- aktiver Kompensation
- und Absorption

unterteilen und werden in Abbildung 2.1 schematisch gegenübergestellt. Im Folgenden werden diese Prinzipien vorgestellt und deren Funktion beschrieben. Dabei wird unter anderem der Schirmfaktor S als beschreibender Parameter solcher Umgebungen genutzt.

$$S = \frac{\vec{B}_a}{\vec{B}_i} \tag{2.5}$$

Dieser ergibt sich nach Gleichung 2.5 aus dem Quotient der zwei magnetischen Flussdichten $\vec{B}_a$ und $\vec{B}_i$ [18]. Wobei die Amplitude der Flussdichte $\vec{B}_a$, welche an einem Punkt ohne magnetische Schirmung herrscht und die Amplitude $\vec{B}_i$ die Flussdichte am selben

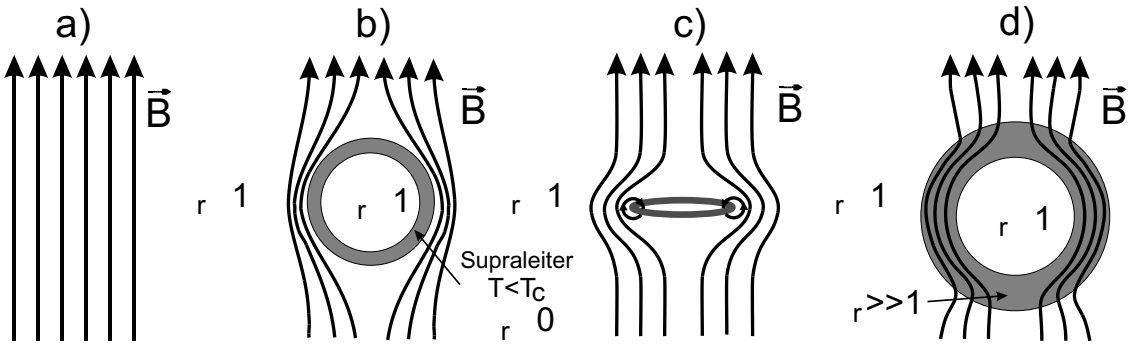


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung der drei Schirmungsprinzipien. Abbildung:a) zeigt den ungedämpften magnetischen Fluss; Abbildung:b) skizziert die Verdrängung der magnetischen Flussdichte aus einem supraleitendem Körper; Abbildung:c) stellt die Kompensation des magnetischen Flusses durch eine zusätzliche entgegengesetzte Flussdichte dar; Abbildung:d) beschreibt die Absorption der magnetischen Flussdichte durch Werkstoffe mit einem viel höheren μ_r im Vergleich zur Luft.

Punkt jedoch ohne Schirmung angibt. Durch die unterschiedlichen Wirkmechanismen der Schirmungen ist S frequenzabhängig [19] und wird daher immer zusammen mit der Anregungsfrequenz angegeben.

Schirmung mittels Verdrängung

Eine Möglichkeit die magnetische Flussdichte innerhalb eines Volumens zu verringern, ist sie zu verdrängen, wie es in Abbildung 2.1 b) schematisch dargestellt wurde. Dafür wird der sogenannte Meissener-Ochsenfeld-Effekt genutzt, welcher nach ihren Entdeckern Walther Meißner und Robert Ochsenfeld benannt wurde. Dieser Effekt beschreibt die Verdrängung des Magnetfeldes aus einem supraleitenden Körper [20]. Das statische magnetische Restfeld und der Gradient im Innern des Schirms hängen dabei stark von der Konstruktion des supraleitenden Schirmes und von dem Hintergrundfeld ab, in dem der Schirm unterhalb der Sprungtemperatur T_c abgekühlt wurde. In aktuellen supraleitenden Schirmungen wie in [21] werden statische magnetische Restfelder im Zentrum von rund 70 nT [22] und Gradienten von kleiner 5 nT/cm in einer Laborumgebung erreicht.

Schirmungen, die das Prinzip der Supraleitung nutzen, zeichnen sich im Vergleich zu Schirmungen nach dem Absorptionsprinzip durch eine hohe Schirmwirkung gegenüber einer langsamen Drift oder magnetischen Störsignalen für sehr niedrige Frequenzen aus. Weiterhin ist das benötigte Material und damit das Gewicht bei ähnlicher Schirmwirkung um ein Vielfaches kleiner. Ein mobiler supraleitender Schirm der für die MEG-Messungen entwickelt wurde, erreicht beispielsweise einen konstanten Schirmfaktor von rund 10.000 in einem Frequenzbereich zwischen 0,05 Hz und 1000 Hz [23].

Schirmung mittels aktiver Kompensation

Eine weitere Möglichkeit, die Amplitude der magnetischen Flussdichte am Ort eines Expe-

rimentes zu verringern ist die Kompensation mit zusätzlichen, entgegengesetzt gerichteten Magnetfeldern. Dabei wird die vektorielle Addition der magnetischen Flussdichte unterschiedlicher magnetischer Quellen ausgenutzt. Um dies zu realisieren wird ein zusätzliches Magnetfeld erzeugt, welches dem zu kompensierenden Feld entgegenwirkt. Das resultierende Magnetfeld entspricht dann der Superposition beider Felder. Werden die Richtung und die Amplitude des zusätzlichen Feldes entsprechend gewählt, so kann die Störamplitude, wie es in Abbildung 2.1 c) schematisch dargestellt wurde, verringert werden. Dies kann neben Spulen auch mit Dauermagneten realisiert werden.

Der Einsatz von Spulen ist weiter verbreitet, da mit geringerem Aufwand sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der Flussdichte variiert werden kann. Somit kann das Kompensationsfeld auch an sich zeitlich variierende Störquellen angepasst werden. Dieses Prinzip ist ideal zur Verringerung der Störamplitude in einem Punkt. Soll jedoch ein Volumen bedämpft werden, so müssen die Spulen speziell auf die Verteilung der Störung im Messvolumen angepasst sein. Um beispielsweise eine nicht gleichmäßig verteilte Störamplitude über ein Volumen zu dämpfen, wie bei einer nahen dipolaren Quelle, so muss der Feldverlauf des Spulenfeldes möglichst identisch mit dem Verlauf der Störung sein.

Solch eine Anpassung wurde für das *nEDM* Experiment an der Technischen Universität München umgesetzt [13]. Dafür wurden 24 rechteckige Spulen rund um das zu schirmende Volumen angebracht. Mit diesen Spulen können neben linearen Gradienten auch Gradienten zweiter Ordnung erzeugt werden. Bei diesem System handelt es sich um eine aktive Kompensation, bei der 60 Drei-Achsen Fluxgate-Magnetometer innerhalb des Volumens positioniert und deren Messwerte durch die von den Spulen erzeugten Magnetfelder minimiert werden. Diese Rückkopplung ermöglicht es, neben statischen Störungen auch zeitlich oder räumlich ändernde magnetische Störungen zu dämpfen. Die dabei nutzbare Frequenz reicht von kleiner einem Herz bis über 100 Herz und wird durch die Induktivität der Spulen und die Ausgangsspannung des Verstärkers begrenzt. Häufig wird jedoch zur Reduktion von Störungen, verursacht durch den Leistungsverstärker, ein Tiefpass in den Regelkreis eingebracht und der Frequenzbereich somit auf wenige 10 Hz verringert.

Abhängig von der Empfindlichkeit der Sensoren und dem Abstand zwischen Sensor und dem Ort an dem das Magnetfeld gedämpft werden soll, können auf diese Art Flussdichten unterhalb von 10 nT erreicht werden. Da diese Methode häufig zusammen mit der Schirmung durch Absorption genutzt wird, findet man in der Literatur meist nur die Steigerung des Schirmfaktors durch die aktive Kompensation (siehe Abbildung 2.3). Hier werden Faktoren von 3 bis 85 in einem Frequenzbereich zwischen 0,1 mHz bis 1 Hz genannt [11, 24].

Zur Kompensation höherfrequenter magnetischer und elektromagnetischer Störungen werden Wirbelströme in hoch elektrisch-leitfähigen Materialien ausgenutzt [18]. So wurde in [25] eine würfelförmige Abschirmung mit einer Kantenlänge von 2,4 m aus 6 mm dicken

Aluminiumblechen eingesetzt, um Bildgebung mittels NMR bei magnetischen Flussdichten im Microteslabereich durchzuführen. Durch den Einsatz des Aluminiums konnte ein Schirmfaktor bei 5,6 kHz von ≈ 55 erreicht werden. Da das μ_r von Aluminium rund 1 ist (vergleichbar mit Luft) [26], dient dieser Schirm nur der Dämpfung von höherfrequenten magnetischen Feldern. Um Experimente in magnetischen Flussdichten unterhalb des Erdmagnetfeldes durchführen zu können, wurden Kompensationsspulen eingesetzt.

Schirmung mittels Absorption

Bei der Schirmung durch Absorption wird die hohe spezifische magnetische Permeabilität μ_r von ferromagnetischen Werkstoffen im Vergleich zur Luft genutzt. Für spezielle Legierungen mit einem hohen Anteil an Nickel, welche als *Mu-Metall* oder permalloy bezeichnet werden, können μ_r-Werte von über 13.000 industriell erreicht werden. Im Vergleich dazu hat Luft ein μ_r von rund 1. Durch diesen hohen Unterschied der spezifischen magnetischen Permeabilität wird das Magnetfeld, wie es in Abbildung 2.1 d) schematisch dargestellt wurde, zum ferromagnetischen Körper hingezogen. Der daraus resultierende Schirmfaktor für den Innenraum steigt dabei linear mit der Schichtdicke des Schirmmaterials an. Um einen möglichst hohen Schirmfaktor bei möglichst geringem Materialeinsatz zu erreichen, werden einzelne Schirme magnetisch nichtleitend ineinander verschachtelt [27]. Wird der Abstand zwischen den einzelnen Lagen groß genug gewählt, ergibt sich die gesamte Dämpfung multiplikativ aus der Dämpfung jedes einzelnen Schirms [18, 27, 28]. Den Einsatz solch einer Schirmung aus drei Lagen für biomagnetische Messungen publizierte David Cohen erstmalig 1967 [29]. Solche Art von Schirmung [30–33] werden genutzt, um biomagnetische Felder in der Größenordnung von wenigen Pico - bis Femtotesla zu untersuchen. Im Jahr 2000 wurde an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt der magnetisch geschirmte Raum *BMSR*-2 fertig gestellt. Dabei handelt es sich um eine Infrastruktur zur Abschirmung elektromagnetischer und im Besonderen niederfrequenter magnetischer Felder. Um dies zu erreichen, wird das Prinzip der aktiven Kompensation mittels Spulen und Wirbelströmen mit der Absorption durch rund 24 Tonnen *Mu-Metall* kombiniert [11].

Abbildung 2.2 zeigt eine schematische Darstellung des *BMSR*-2 dessen äußerer Abschluss ein würfelförmiger Raum mit einer Kantenlänge von ca. 12 m bildet. Dieser Würfel besteht aus elektrisch leitfähigen Blechen die durch elektrisch leitfähiges Gewebe miteinander verbunden sind. Somit entsteht ein nahezu ideal geschlossener Faradayscher Käfig, der elektromagnetische Felder bis in den Gigaherzbereich abschirmt.

Im Zentrum dieses Würfels befindet sich wiederum ein Würfel, welcher einen begehbaren Raum von (2,9 x 2,9 x 2,83) m^3 umschließt. Die umschließenden Wände setzten sich aus 7 Schalen *Mu-Metall* zusammen, welche durch ihr hohes μ_r im Vergleich zu Luft eine passive Dämpfung statischer und niederfrequenter Magnetfelder für den Innenraum erzeugen (siehe Abbildung 2.3). Zur Dämpfung höherfrequenter magnetischer Felder ist eine weitere Schale aus Aluminium integriert. Durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit dämpft

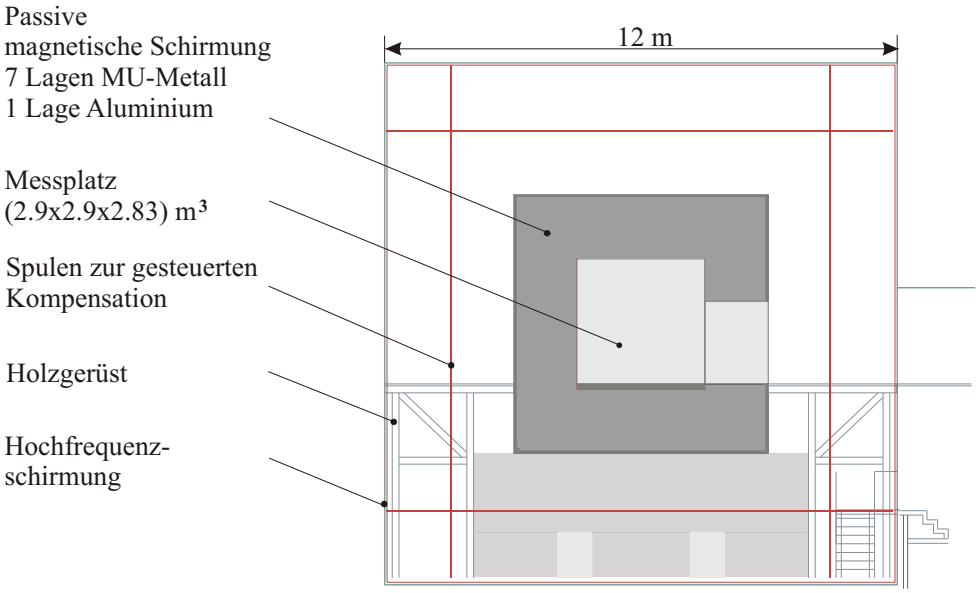


Abbildung 2.2.: Schematisches Bild vom Berlin Magnetically Shielded Room-2 (*BMSR*-2)

sie zwar mittels Wirbelströmen höherfrequente Störungen, verursacht jedoch gleichzeitig niederfrequentes thermisch induziertes magnetisches Rauschen [34]. Der Einfluss dieses Prozesses, auch als Johnson-Rauschen bezeichnet, auf biomagnetische Messungen wurde von Nenonen et al. in [35] beschrieben. Um das von der Aluminiumlage erzeugte magnetische Rauschen im Inneren des *BMSR*-2 zu reduzieren, wurde sie nicht als innerste Lage verwendet. Durch die insgesamt acht Schalen erreicht die passive Schirmung des *BMSR*-2s einen Schirmfaktor bei 0,01 Hz von ≈ 75.000 [11]. In der Abbildung 2.3 ist der passive Schirmfaktor des *BMSR*-2 frequenzabhängig dargestellt. Zum Vergleich ist zusätzlich die Schirmkurve einer passiven Schirmung aus zwei Schalen *Mu-Metall* und einer Schale Aluminium dargestellt. Diese wird als *Zuse-MSR* bezeichnet und erreicht einen Schirmfaktor von rund 100 bei 0,01 Hz. Dieser Typ von 2+1-Lagen *MSRs* ist mit mehr als 300 Installationen [36] der am häufigsten eingesetzte begehbare Abschirmraum und wird zum größten Teil für biomagnetische Messungen genutzt.

Wie die beiden Kurven in Abbildung 2.3 zeigen, hängt der passive Schirmfaktor besonders für niederfrequente Störungen von der Anzahl der Schalen und der Menge an *Mu-Metall* ab. Um die passive Schirmwirkung des *BMSR*-2 im niederfrequenten Bereich weiter zu erhöhen, wurde neben der passiven auch eine aktive Schirmung nach dem Prinzip der Kompensation realisiert. Diese besteht, im Gegensatz zum Aufbau an der Technischen Universität München [13], aus einem dreiachsigen Spulensystem, welches die passive Schirmung mit 12 m großräumig umschließt und aus drei Fluxgate-Magnetometern. Durch diese zusätzliche aktive Schirmung wird der Schirmfaktor des *BMSR*-2 bei 0,01 Hz innerhalb des *Mu-Metall*-Schirms um den Faktor ≈ 85 auf $6,4 \cdot 10^6$ erhöht (siehe Abbildung 2.3).

Das statische magnetische Restfeld innerhalb des geschirmten Volumens kann nicht von

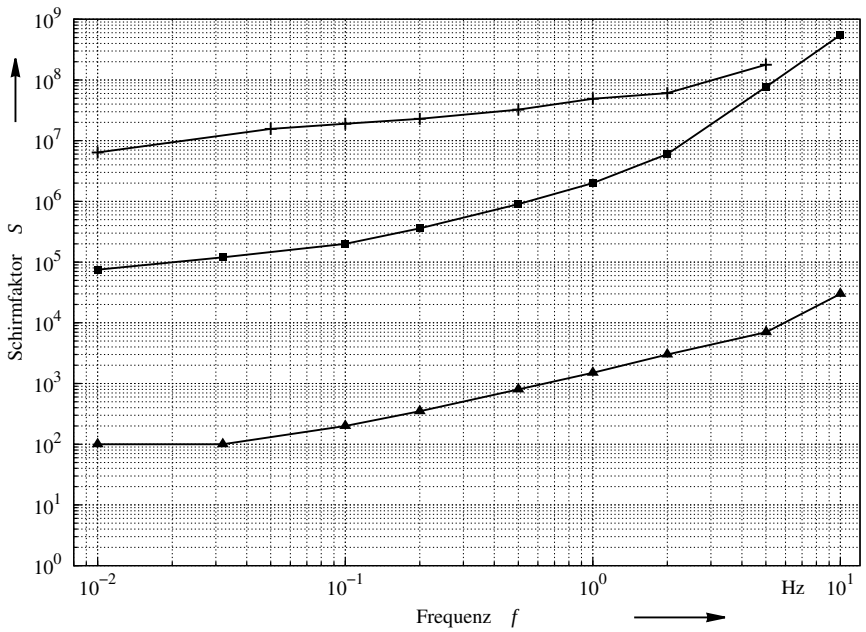


Abbildung 2.3.: Frequenzabhängiger Schirmfaktor des *Zuse-MSR* (2+1-lagig, passiv) ▲, des *BMSR*-2 (7+1-lagieg) passiv ■ sowie mit zusätzlicher aktiv geregelter Schirmung +.

dem Schirmfaktor bei sehr niedrigen Frequenzen abgeleitet werden [12]. Diese Verteilung und die Amplitude des magnetischen Restfeldes im Inneren des *MSR* ergeben sich vor allem aus der räumlichen Verteilung der Magnetisierung entlang der innersten *Mu-Metall* Schale. Sie sind unabhängig von äußeren statischen Feldverteilungen, solange die Sättigungsfeldstärke des *Mu-Metall*s von ca. 0,8 T [37] nicht überschritten wird [38]. Die Magnetisierung der Wände ändert sich jedoch aufgrund der Remanenz von *Mu-Metall* durch Änderung der umgebenden Feldstärke wie beispielsweise bei der Anwendung hoher Flussdichten zur magnetischen Polarisation von Proben für Magnetresonanz-Experimente [3]. Neben Experimenten kann auch durch normale Wartungsarbeiten oder Umbauarbeiten für verschiedene Experimente eine Änderung des magnetischen Restfeldes erzeugt werden. Durch diese Eingriffe und Maßnahmen konnten Veränderungen des Restfeldes von über 30 nT [38] innerhalb des *BMSR*-2 beobachtet werden.

Um ein reproduzierbares, homogenes und möglichst geringes Restfeld innerhalb eines mit *Mu-Metall* geschirmten zentralen Volumens zu erreichen, müssen die Wände entmagnetisiert (degaussed) werden [12]. Dazu wurden bei der Konstruktion des *BMSR*-2 Spulen um die einzelnen *Mu-Metall* Schalen integriert. Bei solch einer Entmagnetisierung wird mit den Spulen ein sinusförmiger magnetischer Fluss innerhalb des *Mu-Metall*s mit sinkender Amplitude erzeugt. Die Anfangsamplitude des Flusses ist dabei so hoch, dass die gesamte Schale in Sättigung gebracht wird. Dies bedeutet, dass alle *Weisschen*-Bezirke im Material neu ausgerichtet werden. Ist das Material gesättigt, wird die Amplitude des Wechselsignales verringert und die *Weisschen*-Bezirke richten sich im Idealfall so aus, dass

sich ihr Magnetfeld nach außen aufhebt. Nach einer solchen Entmagnetisierung der innersten Schale ist der Betrag des statischen magnetischen Restfeldes $|B_\mathrm{r}|$ im zentralen Volumen von $1\,\mathrm{m}^3$ im *BMSR*-2 kleiner als 2 nT und die maximale Feldänderung beträgt 12 pT/cm [38]. In den Schirmungen [12] und [13] konnte durch eine Weiterentwicklung der Entmagnetisierung im Vergleich zum *BMSR*-2 innerhalb eines vergleichbaren Volumens der maximale Betrag unter 1 nT und der Gradient auf rund 1 pT/cm verringert werden.

Der Zugang in ein *MSR* ist der größte Schwachpunkt der Schirmung. Sowohl die Größe der Zugangsöffnung als auch die Öffnungswege, welche die „Tür“-Elemente beschreiben, kann eine ungewollte Magnetisierung des Innenraumes verursachen. Der Zugang in das *BMSR*-2 ist durch vier pneumatisch verschiebbare Wandabschnitte von $(0{,}92\,\mathrm{x}\,1{,}9)\,\mathrm{m}^2$ Größe realisiert. Auf den Innen- und Außenseiten dieser Wandabschnitte ist jeweils das Schirmmaterial angebracht, welches beim Schließen der Tür auf die jeweilige Schale gepresst wird. Ist das *BMSR*-2 geöffnet, so befinden sich die mobilen Wandteile zwischen den einzelnen Schirmlagen und somit weiterhin im geschirmten Bereich. Damit wird gewährleistet, dass durch das Öffnen die inneren *Mu-Metall* Lagen der Tür nicht durch das 10.000-fach stärkere Erdmagnetfeld aufmagnetisiert werden. Ist die Tür des *BMSR*-2 geöffnet, dringt das Erdmagnetfeld durch die große Öffnung in den Innenraum ein. Um diesen Effekt zu verringern, kann durch eine zusätzliche statische Erdfeldkompensation mit zusätzlichen Spulen das eindringende Feld reduziert werden. Diese zusätzliche Kompensation wurde im *BMSR*-2 realisiert, wodurch die Differenz des Feldbetrages im Zentrum der Schirmung zwischen geschlossener und offener Tür rund 3 nT beträgt. Durch die spezielle Methode der Türöffnung und die zusätzliche Erdfeldkompensation wird eine Reproduzierbarkeit des Feldes im Zentrum der Kabine nach dem Öffnen und Schließen der Tür von rund 10 pT innerhalb weniger Minuten für alle drei Feldkomponenten erreicht. Die Feldänderung nach dem Schließen der Tür zeigt einen nahezu exponentiellen Verlauf, wobei die zeitliche Änderung des Feldes nach dem Abklingen des Türeffektes kleiner 5 pT innerhalb von 3 Stunden ist. Im Vergleich zum *BMSR*-2 wird der Zugang zum Innenraum des MSR der Technischen Universität München [13] durch die Fläche einer gesamten Wandseite von $2\mathrm{x}2\,\mathrm{m}^2$ realisiert. Dazu wurde eine Wand, bestehend aus zwei Lagen *Mu-Metall* und einer Lage Aluminium, hängend an einem Schienensystem befestigt. Um den Zugang zu öffnen werden Pneumatikzylinder, welche den magnetischen Schluss zwischen dem MSR und dem mobilen Wandabschnitt sicherstellen, gelöst und die Wand kann verschoben und aus dem Zugangsbereich geschwenkt werden. Damit kann das Erdfeld sowohl den Innenraum als auch die *Mu-Metall* Schichten der mobilen Wand aufmagnetisieren. Dies führt zu einer Erhöhung des Restfeldes nach dem Öffnen und Schließen des MSRs von rund 10 nT im Inneren des Raumes. Die Amplitude des Restfeldes kann jedoch durch das integrierte Entmagnetisierungssystem wieder auf unter 1 nT reduziert werden.

Auch die Temperatur beeinflusst die Eigenschaften eines *MSRs*. Aus diesem Grund wird der Innenraum des *BMSR*-2 durch eine Klimaanlage auf $\pm\,1\,^\circ\mathrm{C}$ konstant gehalten. Nach ei-

ner gezielten Änderung der Temperatur im Innenraum um 4 K konnte mit dem im Inneren fest montierten Vielkanal-SQUID-System [39] eine dauerhafte Änderung der magnetischen Flussdichte im Zentrum von rund 6 pT ermittelt werden. Aktuell ist der Wirkmechanismus der Temperatur auf die magnetische Flussdichte im *BMSR*-2 noch ungeklärt.

Wie diese Beschreibung von unterschiedlichen magnetischen Abschirmungen zeigt, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten magnetische Störungen zu reduzieren. Daher ist es wichtig bei der Planung eines neuen Experimentes die kritischen Parameter abzuschätzen, um die Eigenschaften der notwendigen magnetischen Schirmung an diese anzupassen. Dazu ist es wichtig, die Eigenschaften von vorhandenen Experimenten und deren Schirmungen zu studieren, um mögliche Verbesserungen vorzunehmen. In den Arbeiten [9, 10, 34, 38, 40] wurden die Eigenschaften von existierenden magnetischen Schirmungen mittels Fluxgate-, optische Präzessions- und SQUID-Magnetometer untersucht. Im folgenden Kapitel 2.2 werden diese drei Sensorarten und ihre messtechnischen Eigenschaften vorgestellt.

2.2. Sensoren zur Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen

2.2.1. Fluxgate

Fluxgate-Sensoren sind weitverbreitet, da sie neben ihrer kompakten und robusten Bauweise von wenigen Zentimetern einen großen Messbereich von sechs Größenordnungen abdecken. Ihr Messbereich erstreckt sich dabei von wenigen nano Tesla bis zu einigen milli Tesla. Sie bestehen im einfachsten Fall aus einem weichmagnetischen Stabkern mit einer Magnetisierungswicklung und einer Induktionswicklung. Durch einen sinusförmigen Strom mit einer Frequenz zwischen 3 kHz und 20 kHz durch die Magnetisierungswicklung wird der Stabkern periodisch in Sättigung gebracht. Befindet sich das Fluxgate in einem feldfreien Raum, so ist die induzierte Spannung in der Induktionsspule für den positiven und negativen Verlauf der Halbwelle identisch. Damit enthält das Frequenzspektrum neben der anregenden Frequenz noch deren ungeradzahligen Harmonischen. Befindet sich das Fluxgate in einem Hintergrundfeld, so addiert sich das zum Stabkern parallele Feld zu dem Feld, welches durch die Magnetisierungswicklung erzeugt wird. Da die somit induzierten Halbwellen asymmetrisch werden, entstehen zusätzlich geradzahlige Harmonische der anregenden Frequenz. Als eigentlicher Messwert für die Feldkomponente entlang des Stabkernes wird die zweite gerade Harmonische beim selektiven Verfahren und die Differenz der Zeitdauern zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen beim selektiven Verfahren verwendet. Durch das Messprinzip ist der ermittelte Messwert ein Maß für die absolute magnetische Flussdichte in Richtung des Stabkernes [41].

Diverse Hersteller bieten Geräte mit drei separaten Fluxgate-Sensoren in einem Gehäuse zur vektoriellen Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte an. Ein Beispiel für solch ein Messsystem ist das *Mag-03MC-L7* der Firma *Bartington Instruments*, welches in den Arbeiten [9, 10, 13] eingesetzt wurde. Jeder der drei Sensoren hat eine maximale Aussteuerung von $\pm 70\,\mu\mathrm{T}$ mit einer Bandbreite von DC- bis 3 kHz. Weiterhin werden Sensoren mit einer erweiterten Bandbreite von bis zu 12 kHz kommerziell angeboten. Dabei wird ein magnetisches Flussrauschen von bis zu $6\,\mathrm{pT}\,\sqrt{Hz}$ bei 1 Hz erreicht.

Generell weisen Fluxgate Sensoren einen Offset auf, der durch das Messprinzip und die Elektronik erzeugt wird. Dieser Offset wird beispielsweise für das *Mag-03MC-L70* mit $\pm 5\,\mathrm{nT}$ und einer Temperaturabhängigkeit von $\pm 0,1\,\mathrm{nT}/°\mathrm{C}$ angegeben. Um magnetische Flussdichten unterhalb der $\pm 5\,\mathrm{nT}$ absolut messen zu können, muss die Messunsicherheit durch die Bestimmung des Offsets verringert werden. In seiner Dissertation [42] beschreibt H. U. Auster mehrere Möglichkeiten, um dies zu realisieren. Eine davon beschreibt die relative Bewegung des Sensors in einem statischen Hintergrundfeld. Dabei ergibt sich der Offset für den Spezialfall einer 180 ° Drehung, um eine zur Messachse des Sensors orthogonale Achse, durch die Subtraktion des Messwertes vor und nach der Drehung. Da diese Art der Offsetbestimmung für das in dieser Arbeit entwickelte Messsystem übernommen wurde, wird dieses Verfahren detailliert in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

Die Linearität des *Mag-03MC-L70* Fluxgates wird mit besser 0,0015% und die Unsicherheit des Skalierungsfaktors mit kleiner $\pm 0,5\,\%$ vom Hersteller angegeben. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit ist keine Literatur bekannt, in der die Anwendung und die absolute Genauigkeit eines Fluxgates in magnetischen Flussdichten unterhalb von 1 nT beschrieben wird. Daher wird hier davon ausgegangen, dass die Linearität und die Unsicherheit des Skalierungsfaktors auch unterhalb von 1 nT mit den Angaben des Herstellers übereinstimmen. Somit ergibt sich eine theoretische Auflösung der absoluten magnetischen Flussdichte von besser 50 pT bei einer akkuraten Bestimmung des Offsets.

Um neben den Vektor- auch die neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte bestimmen zu können ist es möglich, mehrere Fluxgate-Magnetometer im Raum anzuordnen. Durch die Differenzen der Messwerte und des bekannten Abstandes lassen sich so bei geeigneter Anordnung die neun Komponenten des Gradiententensors bestimmen. Dieses Prinzip wurde beispielsweise in der Geologie zur Untersuchung magnetischer Anomalien eingesetzt [43]. Die Firma *Bartington Instruments* bietet Fluxgategradiometer an, mit denen drei der neun gesuchten Gardienten- und die drei Vektorkomponenten bestimmt werden können. Da dieses System aus zwei entlang einer Achse ausgerichteten 3-Achsen-Fluxgate-Magnetometer besteht, weist es die zuvor beschriebenen Eigenschaften auf. Zusätzlich wird ein Flussdichterauschen für den Gradienten mit einer Basislänge von 50 cm von kleiner $70\,\mathrm{pTrms}/\sqrt{Hz}/\mathrm{m}$ bei 1 Hz angegeben. Solch eine Anordnung von Fluxgates kann so erweitert werden, das alle neun Gradientenkomponenten bestimmt werden

können. So beschreibt Sui et al. in [16] eine kompakte Anordnung, in der mittels vier 3-Achsen-Fluxgatemagentometern und drei sphärischen Rückkoppelspulen die neun Komponenten innerhalb und außerhalb einer magnetisch geschirmten Umgebung bestimmt werden konnten. Sie geben ein Amplitudendichterauschen in geschirmter Umgebung von rund $600\,\mathrm{pT}/\sqrt{Hz}/\mathrm{m}$ bei einem 1 Hz und einer Basislänge von 10 cm an. Neben dem Rauschen machen die Autoren keine weiteren Angaben über die Unsicherheit bei der Bestimmung der neun Gradientenkomponenten.

2.2.2. Präzessions-Magnetometer

Eine weitere Art von Magnetometern sind die sogenannten optischen Präzessions-Magnetometer [44–47]. Diese Sensoren nutzen die kernmagnetische Resonanz (NMR), um den Betrag der absoluten magnetischen Flussdichte zu ermitteln. Das Messprinzip beruht auf der Bestimmung der sogenannten Larmorfrequenz f_L welche als Kreisfrequenz $\omega_\mathrm{L} = 2\pi f_\mathrm{L}$ über die Gleichung 2.6 vom umgebenden Magnetfeld und dem spezifischen gyromagnetischen Verhältnis γ des präzidierenden Mediums abhängt. Wie in der Gleichung beschrieben kann so nur der Betrag der absoluten magnetischen Flussdichte bestimmt werden.

$$\omega_\mathrm{L} = \frac{|B|}{\gamma} \tag{2.6}$$

Dieser Mechanismus, Bestimmung der Flussdichte mittels Frequenzmessung, begrenzt die Bandbreite der Sensoren. Würde also das magnetische Restfeld einer geschirmten Umgebung mit diesen Sensoren direkt untersucht, so wäre die Larmorfrequenz für beispielsweise Protonen $\approx 400\,\mathrm{Hz}$ oder Caesium $\approx 30\,\mathrm{Hz}$ bei einer Flussdichte von 10 nT. Die mögliche Bandbreite ist dann noch einmal deutlich geringer. Um dies zu umgehen könnte ein Haltefeld genutzt werden, dass die Larmorfrequenz erhöht und konstant hält. Eine Abweichung von dieser Frequenz würde kompensiert werden, wodurch dann der Kompensationsstrom proportional Restfeld der magnetischen Schirmung wäre. Auf eine vergleichbare Weise erreichten Jiménez-Martínez et al. bei einem Haltefeld von 11,4 µT mit ein *OPM* eine Bandbreite von 10 kHz mit einem Flussdichterauschen von $10\,\mathrm{pT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ [48].

Zusätzlich zu der Betragsbestimmung arbeiten aktuell mehrere Forschungsgruppen an Systemen, mit denen durch geschickte Anordnung und Anregung von Caesiumatomen neben dem Betrag auch die Vektorkomponenten der magnetischen Flussdichte bestimmt werden können. Da es sich hierbei um eine optische Methode handelt mit der die magnetische Flussdichte bestimmt wird, werden diese Sensoren im Folgenden als optische Präzessions-Magnetometer (OPM) bezeichnet. Zur Realisierung eines solchen Sensors werden beispielsweise am *PSI* mehrere Laser in einem Winkel von 90 ° zueinander und eine Erregerspule um eine Glaskugel mit Caesiumgas angeordnet. Durch die Laser wird eine Magnetisierung im Caesiumgas erzeugt. Mittels der Erregerspule kann dann eine Präzession der Caesium-

Kernspins um die äußere magnetische Flussdichte erzeugt werden, welche die Intensität des transmetierten Lichtes mit der Larmorfrequenz f_{L} moduliert. Diese Sensoren werden aktuell eingesetzt, um das von einer Spule erzeugte Magnetfeld ($\vec{B}_0$) von rund 1 µT innerhalb eines magnetischen Schirmes zu charakterisieren. Dabei soll die räumliche Änderung der drei Vektorkomponenten des $\vec{B}_0$-Feldes innerhalb eines Volumens vermessen werden. Solch eine Messung wurde 2013 am *PSI* erstmals erprobt [10]. Bei diesem System besteht jedoch zurzeit nicht die Möglichkeit, dass statische Restfeld der magnetischen Schirmung ohne das $\vec{B}_0$-Feld zu untersuchen [49]. Da es zum Zeitpunkt dieser Arbeit bis auf die Jahresberichte [9] und [10] des Experimentes am *PSI* noch keine weiteren Veröffentlichungen über das System gab, konnten hier keine Angaben über die Messunsicherheit gegeben werden.

Patton et al. stellen in ihrer Arbeit [50] einen Sensor vor, welcher ebenfalls auf Caesiumgas basiert. Jedoch arbeitet dieser zylinderförmige Sensor, im Gegensatz zu dem aus [10], rein optisch mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Länge von 5 cm. Mit diesem Sensor waren sie in der Lage, in einem Laborversuch neben dem Betrag auch zwei Vektorkomponenten der magnetischen Flussdichte zu bestimmen. So konnten sie eine mittels Spulen erzeugte magnetische Flussdichte von $|B|$ 946,5 nT mit einer Rauschdichte von 48 fT/$\sqrt{Hz}$ bei einer Integrationszeit von einer Sekunde messen. Um die vektorielle Auflösung ihres optischen-Magnetometers zu testen, kippten sie den Vektor der Flussdichte mit Hilfe einer zusätzlichen orthogonalen Spule. Die kleinste Querkomponente die mit diesem Sensor noch aufgelöst werden konnte betrug 1 pT. Im Ausblick ihrer Arbeit zeigten sie sich optimistisch, ihr Verfahren auf alle drei Komponenten der magnetischen Flussdichte zu erweitern und deren Auflösung auf rund 50 fT zu erhöhen.

2.2.3. SQUID-Magnetometer

In dieser Arbeit wurden dc-SQUID-Sensors als Detektoren eingesetzt, weswegen hier die messtechnischen Eigenschaften detaillierter beschrieben wurden als zuvor zum Fluxgate und zu den optischen Vektor-Magnetometern. Als Quellen wurden die Dissertation von Herrn Dr. M. Scheiner [51] und Herrn Dr. S. Hartwig [2] sowie „The SQUID Handbook“ Band zwei [52] verwendet.

Die letzten Jahrzehnte dominierte das Supraleitende Quanteninterferometer (SQUID), wenn es um die relative Ermittlung kleinster magnetischer Flussdichten mit höchster Empfindlichkeit und Bandbreite ging. Sie können zusammen mit einer SQUID-Elektronik als ein magnetischer Fluss zu Spannungswandler betrachtet werden. Wie im Namen schon beschrieben, werden diese Sensoren im supraleitenden Zustand betrieben. Abhängig von dem verwendeten Material, dass für die Herstellung der SQUIDs genutzt wird, unterscheidet man sie in sogenannte hochtemperatur supraleitende ($\mathrm{HT_c}$) und niedrigtemperatur

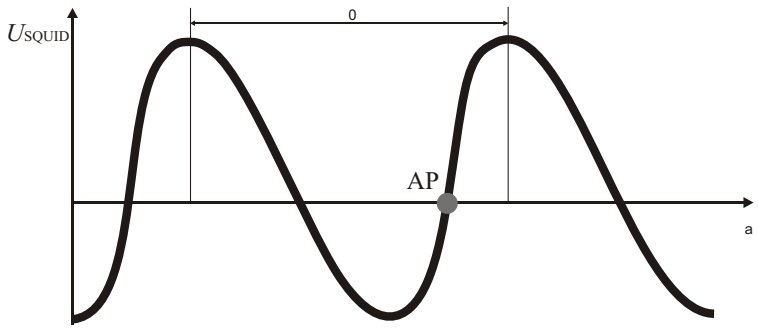


Abbildung 2.4.: Idealisierte Spannungs-Fluss-Kennline eines dc-SQUIDs

supraleitende (LT_c) SQUIDs. Die Bezeichnung richtet sich nach der Temperatur ab dem das Material supraleitend wird. Bei (HT_c)-SQUIDs liegt diese Temperatur bei rund 77 K und bei den (LT_c)-SQUIDs bei rund 4 K. Unabhängig vom verwendeten Material ist das Messprinzip der dc-SQUIDs gleich. Dabei weist der Zusatz „dc“ auf die direkte Koppelung zwischen zwei Josephson Kontakten durch einen supraleitenden Ring hin. Im weiteren wird auf den Zusatz „dc“ verzichtet, da nur auf diesen SQUID-Typ eingegangen wird.

Die sogenannte SQUID-Elektronik erzeugt einen konstanten Strom I_b, der durch das SQUID fließt. Das Signal U_{SQUID}, welches zwischen den beiden Josephson Kontakten abgegriffen werden kann, entspricht einer sich mit dem äußeren magnetischen Fluss Φ_a im SQUID periodisch ändernden, stark nichtlinearen Spannung, wie sie in Abbildung 2.4 idealisiert dargestellt ist. Eine Periode, der sogenannten Spannungs-Fluss- oder V-Φ-Kennline eines SQUIDs, entspricht genau $h/2e \approx 2,068 \cdot 10^{-15}$ Vs und wird als ein magnetischer Flussquant Φ_0 bezeichnet. Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum und e die Elementarladung.

Um einen linearen Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluss und der Ausgangsspannung zu erhalten, wird das SQUID in einer geschlossenen Flussregelschleife (FLL, Flux-Locked-Loop) betrieben. Diese Schleife erzeugt durch die Spannung V_b einen Arbeitspunkt (AP) auf der V-Φ-Kennline des SQUIDs, welcher durch einen Rückkoppelkreis konstant gehalten wird. Dieser Rückkopplungskreis ist schematisch in Abbildung 2.5 dargestellt.

Er besteht neben dem SQUID aus einem Verstärker, einem Integrator, einem Rückkoppelwiderstand R_f und einer Rückkoppelspule L_f. Zur Erzeugung des Rückkoppelflusses Φ_f wird die Spannung U_{SQUID} verstärkt und integriert. Der Ausgang des Integrators wird über den Rückkoppelwiderstand auf die Rückkoppelspule gegeben und erzeugt den magnetischen Fluss Φ_f. Das Ausgangssignal des Integrators steigt oder fällt solange, wie eine Abweichung zwischen dem von außen einkoppelnden Fluss Φ_a besteht. Ist die Abweichung gleich null, so entspricht der durch den Rückkoppelwiderstand fließende Strom der am SQUID orthogonal auftreffenden magnetischen Flussdichte. Das eigentliche Messsignal,

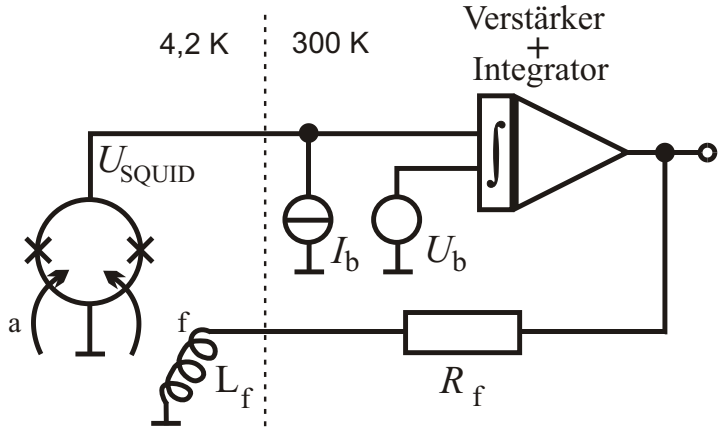
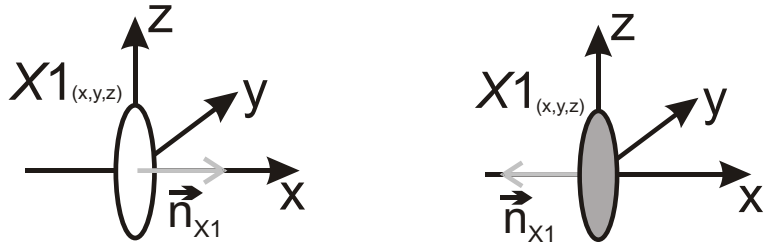


Abbildung 2.5.: Schematische Darstellung einer Fluss-Regelschleife für ein LT_c dc-SQUID

welches mit einer Datenerfassung aufgezeichnet wird, ist die am Rückkoppelwiderstand erzeugte Spannung. Da nur die zur SQUID Fläche orthogonale Komponente wirksam ist, wird immer nur eine Vektorkomponente der magnetischen Flussdichten gemessen. Mit geeigneten SQUID-Sensoren und FLL-Elektroniken können Flussdichten mit einer Frequenz von einem Herz bis einige 100 Mega Herz und Amplituden von wenigen femto Telsa [53] detektiert werden. Da es sich bei dem Messprinzip um eine Gegenkopplung handelt, begrenzt der Aussteuerbereich des Regelkreises den Dynamikbereich des Sensors. Dieser ergibt sich aus der Kombination von SQUID, Rückkoppelspule und FLL-Elektronik und beschreibt den maximalen äußeren Fluss, welcher durch die Rückkoppelspule kompensiert werden kann. Steigt die Amplitude über diese maximale Flussdichte an, so kann der Arbeitspunkt auf der V-Φ-Kennlinie nicht mehr stabil gehalten werden. Der Messwert würde dann beim maximalen Wert des Integrators bleiben obwohl der Fluss am Ort des SQUIDs weiter steigt. Soll die Flussdichte weiter gemessen werden, muss der Integrator auf Null gesetzt werden. Dieser Vorgang führt zu einem neuen Arbeitspunkt auf der V-Φ-Kennlinie und der Regelzyklus kann wieder von vorne beginnen.

Mit dieser Methode kann der beschränkte Aussteuerbereich auf ein vielfaches erweitert werden. Dieses Verfahren, kombiniert mit unterschiedlichen SQUIDs, wurde in [54] von einer Gruppe des „ipht“-Jena umgesetzt. Sie beschreiben ein System aus drei unterschiedlich großen SQUID-Sensoren, die jeweils in einer eigenen *FLL* betrieben werden. Mit einem ersten eindimensionalen Prototypen konnten sie erfolgreich eine Feldmodulation von mehr als 50 µT verfolgen, welches dem Betrag des Erdmagnetfeldes entspricht. Durch die Anordnung der unterschiedlich großen SQUIDs konnten sie einen Dynamikbereich von 190 dB erreichen. Dieser hohe Dynamikbereich ist notwendig, um die Verteilung der magnetischen Flussdichte der Erde mit einer Auflösung im Femtoteslabereich für beispielsweise geologische Anwendungen zu untersuchen.



(a) SQUID-Magnetometer 0 °

(b) SQUID-Magnetometer 180 °

Abbildung 2.6.: Prinzip der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte mittels 180 ° Rotation der Flächennormalen eines SQUIDs a) zeigt das SQUID $X1$ in der 0 ° und b) in der 180 ° Position.

2.3. Bestimmung des DC-Offsets von SQUID-Sensoren

Durch das geringe Eigenrauschen wurden (LT_c) SQUIDs ebenfalls wie FG- und optische Präzessions-Magnetometer bei der Charakterisierung von *MSRs* eingesetzt [12, 13, 38, 40]. Neben dem Eigenrauschen und Driftprozessen wurde auch die absolute magnetische Flussdichte und der Gradiententensor mit SQUIDs untersucht. Dies ist mit den hier vorgestellten SQUID-Sensoren nicht direkt möglich. Wird die FLL-Regelung eines ortsfesten SQUIDs in einer magnetisch geschirmten Umgebung geschlossen, so ist der Ausgangswert des Integrators nahe Null und unabhängig von der zu diesem Zeitpunkt am SQUID wirkenden magnetischen Flussdichte. Der Messwert setzt sich aus einem Bruchteil eines Φ_0 und einem elektronischen Offset der FLL-Elektronik zusammen. Dieser Startwert ist zeitlich stabil und ändert sich nur wenn der Aussteuerbereich der Regelschleife ausgeschöpft ist oder sie geöffnet wurde. Solange das nicht der Fall ist, wirkt der Anfangswert wie ein Offset des Sensors. Da dieser Offset zeitlich stabil ist, kann er durch die in [42] beschriebene Methode der Sensorrotation bestimmt und vom Messsignal abgezogen werden. Diese Methode soll hier unter idealisierten Bedingungen dargestellt werden.

$$B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})} = \vec{B}_{(\mathrm{x,y,z})} \cdot \vec{\mathrm{n}}_{\mathrm{X1}} + O^{\mathrm{X1}} \tag{2.7}$$

Die Gleichung 2.7 beschreibt die gemessene Flussdichte $B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ eines SQUIDs $X1$ am Ort (x,y,z), welches bei geschlossener Rückkoppelschleife am Ausgang der FLL-Elektronik abgegriffen werden kann. $\vec{B}_{(\mathrm{x,y,z})}$ ist der Vektor der absoluten magnetischen Flussdichte die am Ort des SQUIDs vorhanden ist. Da ein SQUID nur auf die Vektorkomponente empfindlich ist die parallel zu dessen Flächennormale $\vec{\mathrm{n}}_{\mathrm{X1}}$ ist, muss diese mit $\vec{B}_{(\mathrm{x,y,z})}$ multipliziert werden. Die Größe O^{X1} beinhaltet den gesamten Offset, der sich durch das SQUID selbst, die Regelschleife und die Datenerfassung ergibt. Abbildung 2.6a zeigt ein SQUID, dessen Flächennormale nur eine positive X-Komponente besitzt. Für diese Anordnung kann Gleichung 2.7 vereinfacht werden, wobei das hochgestellte X bei $B^{\mathrm{X}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ darauf hinweist, dass in dieser Größe nur noch die Projektion des Vektors $\vec{B}_{(\mathrm{x,y,z})}$ enthalten ist.

$$B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})} = \vec{B}_{(\mathrm{x,y,z})} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{n_{\mathrm{X1}}} + O^{\mathrm{X1}}$$

$$B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})} = B^{\mathrm{x}}_{(\mathrm{x,y,z})} + O^{\mathrm{X1}} \tag{2.8}$$

Die Gleichung 2.8 beinhaltet mit der Flussdichte $B^{\mathrm{x}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ und dem Offset O^{X1} des SQUIDs zwei Unbekannte. Um beide Größen bestimmen zu können, wird eine zweite Gleichung benötigt, welche durch die Rotation der SQUID Fläche um 180 ° (Abbildung 2.6b) erzeugt werden kann. Unter der Annahme, dass das Feld während der Rotation konstant bleibt, ändert sich für die zweite Messung $B^{\mathrm{X1'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ nur das Vorzeichen der Flächennormale, was in Gleichung 2.9 dargestellt wurde.

$$B^{\mathrm{X1'}}_{(\mathrm{x,y,z})} = \vec{B}_{(\mathrm{x,y,z})} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{n_{\mathrm{X1}}} + O^{\mathrm{X1}}$$

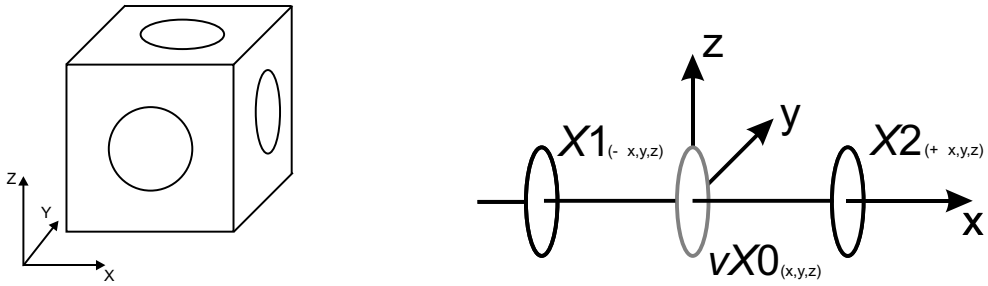
$$B^{\mathrm{X1'}}_{(\mathrm{x,y,z})} = -B^{\mathrm{x}}_{(\mathrm{x,y,z})} + O^{\mathrm{X1}} \tag{2.9}$$

Mit den Gleichungen 2.8 und 2.9 ist es möglich, sowohl eine Vektorkomponente der absoluten magnetische Flussdichte am Ort des SQUIDs als auch den Offset des SQUIDs zu bestimmen. Der so ermittelte Offset des SQUIDs ist solange stabil, wie der Arbeitspunkt durch die FLL-Elektronik gehalten werden kann.

$$O^{\mathrm{X1}} = \frac{B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})} + B^{\mathrm{X1'}}_{(\mathrm{x,y,z})}}{2} \tag{2.10}$$

$$B^{\mathrm{x}}_{(\mathrm{x,y,z})} = \frac{B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})} - B^{\mathrm{X1'}}_{(\mathrm{x,y,z})}}{2} \tag{2.11}$$

Thiel et al. beschrieben ein Messsystem [38], mit welchem die drei Komponenten der Flussdichte simultan bestimmt werden konnten. Hierfür wurden sechs $\mathrm{LT_c}$-SQUIDs mittig auf den Flächen eines Würfels angeordnet, welcher in einem mit flüssigem Helium gefüllten Kühlgefäß (Dewar) platziert wurde. Diese Anordnung ist in Abbildung 2.7a schematisch dargestellt. Das Messprinzip basiert darauf, die Gleichungen 2.10 und 2.11 auf den Mittelpunkt zwischen zwei gegenüberliegenden Sensoren zu erweitern. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.7b mit zwei Sensoren $X1$ und $X2$ vereinfacht dargestellt, wobei die beiden Sensoren die Flussdichte $B^{\mathrm{X1}}_{(\text{-}\Delta\mathrm{x,y,z})}$ und $B^{\mathrm{X1}}_{(+\Delta\mathrm{x,y,z})}$ am Ort $(-\Delta\mathrm{x,y,z})$ und $(+\Delta\mathrm{x,y,z})$ messen. Mit der Annahme, dass die Flussdichte zwischen den beiden Sensoren linear ist, entspricht



(a) Anordnung von SQUID-Sensoren nach Thiel et al.

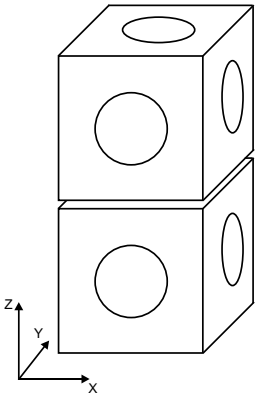
(b) Prinzpbild zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte nach Thiel et al.

Abbildung 2.7.: Prinzipdarstellung einer realisierten SQUID Anordnungen zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte im Zentrum eines Würfels. a) zeigt mit Kreisen schematisch die Anordnung der SQUIDs auf einem Würfel nach Thiel et al.. b) zeigt schematisch die räumliche Lage des virtuellen SQUIDs $vX0$ zentral zwischen den beiden realen SQUIDs $X1$ und $X2$.

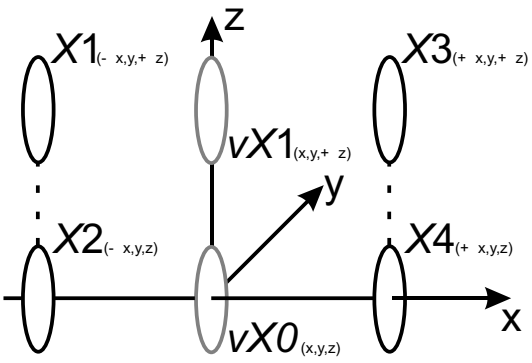
die Flussdichte $B^{\mathrm{vX0}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ nach Gleichung 2.12 dem Mittelwert der beiden.

$$B^{\mathrm{vX0}}_{(\mathrm{x,y,z})} = \frac{B^{\mathrm{X1}}_{(\text{-}\Delta\mathrm{x,y,z})} + B^{\mathrm{X2}}_{(+\Delta\mathrm{x,y,z})}}{2} \tag{2.12}$$

Dieser Wert kann als Messwert $B^{\mathrm{vX0}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ eines virtuellen SQUIDs $vX0_{(x,y,z)}$ am Ort (x,y,z) interpretiert werden. Um dessen Offset zu bestimmen, wurde die Anordnung 180 ° um die Z-Achse des Würfels rotiert und die Flussdichte $B^{\mathrm{vX0'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ gemessen. Auf diese beiden Messungen können dann die Gleichungen 2.10 und 2.11 angewendet werden, um den Offset sowie die Komponente der absoluten Flussdichte am Ort des virtuellen SQUIDs zu bestimmen. Da in dieser Anordnung jede der drei Raumrichtungen durch zwei SQUIDs abgedeckt wurde, konnten drei orthogonal zueinander stehende, virtuelle SQUIDs berechnet werden. Dabei unterscheidet sich die Bestimmung des Offsets für das in Z- empfindliche virtuelle SQUID von denen in X- und Y-Richtung. Um den Einfluss von magnetisierten Komponenten, beispielsweise der Dewar selbst, zu unterdrücken, wurden die SQUIDs zum Dewar fixiert. Um den Offset des virtuellen Z-SQUIDs zu ermitteln, hätte der Dewar 180° um eine horizontale Achse des Würfels gekippt werden müssen. Dies war mit dem genutzten Dewar nicht möglich. Stattdessen wurde der Dewar um 40° gekippt und in dieser Position um 180° rotiert. Mit diesen zwei Bewegungen und den zuvor bestimmten Werten für die X- und die Y-Richtung konnte der Offset für das in Z-Richtung empfindliche virtuelle SQUID bestimmt werden. Somit war es möglich, die drei Komponenten der absoluten magnetischen Flussdichte simultan zu bestimmen. Mit dieser Anordnung konnte in [12, 13, 38] die Verteilung des Restfeldes der absoluten magnetischen Flussdichte mit einer Gesamtunsicherheit von $\pm\,50\,\mathrm{pT}$ untersucht werden.



(a) Anordnung von SQUID-Sensoren nach Burghoff et al.



(b) Prinzipbild zur Bestimmung der relativen Gradienten nach Burghoff et al.

Abbildung 2.8.: Prinzipdarstellung einer realisierten SQUID Anordnungen zur Bestimmung der relativen magnetischen Flussdichte und fünf von neun Komponenten des Tensors 2.ter Ordnung a) Anordnung nach Burghoff et al. mit 11, als Kreisen schematisch dargestellten, SQUIDs auf zwei Würfeln. b) zeigt schematisch die Bestimmung einer Raumkomponente

Neben dem Vektor soll auch der Gradiententensor bestimmt werden. In dieser Arbeit ist der Begriff Gradient als die Änderung der magnetischen Flussdichte entlang einer Strecke definiert, dessen Wert auf die Länge der Strecke normiert ist. Die Strecke zwischen den beiden Messpunkten hängt von der Anwendung der Systeme ab und liegt bei den meisten Systemen im Bereich einiger Zentimeter. Dabei handelt es sich um eine etablierte Methode, die räumliche Änderung der magnetischen Flussdichte zu ermitteln. Diese wird beispielsweise bei der Lokalisation und Charakterisierung magnetischer Anomalien in der Geologie [15, 17, 55] eingesetzt. Burghoff et al. beschreiben in ihrer Arbeit [56] die Anwendung dieser Methode zur Messung der relativen Vektor- und Gradientenkomponenten von biomagnetischen Signalen eines menschlichen Herzens. Abbildung 2.8a zeigt die schematische Anordnung von 10 SQUID-Sensoren auf den äußeren Flächen zweier Würfel mit einer Kantenlänge von 3 cm, welche übereinander angeordnet wurden. Ein weiteres SQUID wurde zwischen den beiden Würfeln platziert. Die drei Vektorkomponenten wurden wie auch von Thiel et al. durch den Mittelwert von zwei gegenüberliegenden SQUIDs ermittelt. Da das System nicht rotiert wurde, konnten nur die zeitlichen Änderungen der räumlichen Verteilung der magnetischen Flussdichte gemessen werden. In der Abbildung 2.8b sind die vier Sensoren $X1$ bis $X4$ schematisch dargestellt.

Um den Gradienten g_{xx}, also die Änderung der X-Komponente der magnetischen Flussdichte entlang der X-Achse, zu bestimmen, wurde Gleichung 2.13 auf die Messwerte von $X1$ und $X2$ angewendet.

$$g_{\mathrm{xx}} = \frac{B^{\mathrm{X1}}_{(+\Delta\mathrm{x,y,z})} - B^{\mathrm{X2}}_{(-\Delta\mathrm{x,y,z})}}{+\Delta\mathrm{x} - (-\Delta\mathrm{x})} \tag{2.13}$$

Werden in die Gleichung 2.13 die Messwerte der in Y- und Z-Richtung empfindlichen SQUIDs eingesetzt, können ebenfalls die Gradienten g_{yy} und g_{zz} bestimmt werden. Mit der in Abbildung 2.8a gezeigten senkrechten Anordnung konnten neben den drei relativen Gradienten g_{xx}, g_{yy} und g_{zz} auch die zwei Gradienten g_{xz} und g_{yz} bestimmt werden. Hierfür wurden zuerst die Werte zweier virtueller SQUIDs $vX0_{(\mathrm{x,y,z})}$ und $vX1_{(\mathrm{x,y,+\Delta z})}$ bestimmt, die übereinander auf der Z-Achse des Würfels liegen und deren empfindliche Fläche in X-Richtung zeigten. Diese ergeben sich aus der Gleichung 2.12 mittels der Sensorpaare $X1$ und $X2$ sowie $X3$ und $X4$ aus Abbildung 2.8b. Um den Gradienten g_{xz} letztendlich zu bestimmen, werden die ermittelten Werte $B^{\mathrm{vX0}}_{(\mathrm{x,y,z})}$ und $B^{\mathrm{vX1}}_{(\mathrm{x,y,+\Delta z})}$ der virtuellen SQUIDs $vX0_{(\mathrm{x,y,z})}$ und $vX1_{(\mathrm{x,y,+\Delta z})}$ in die Gleichung 2.14 eingesetzt.

$$g_{\mathrm{xz}} = \frac{B^{\mathrm{vX1}}_{(\mathrm{x,y,\Delta z})} - B^{\mathrm{vX0}}_{(\mathrm{x,y,z})}}{\Delta \mathrm{z} \text{ - } \mathrm{z}} \tag{2.14}$$

Damit zeigen die beiden Arbeiten von Thiel et al. und Burghoff et al., dass die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und der Gradientenkomponenten mittels einzelner SQUID-Magnetometer grundsätzlich möglich ist.

3. Charakterisierung von MSRs

3.1. Standardisierung der Charakterisierung von MSRs

Im Folgenden wird ein Protokoll beschrieben um die magnetischen Eigenschaften von *MSRs* vergleichbar zu charakterisieren. Innerhalb dieses Protokolls werden vier Hauptpunkte:

1. Bestimmung des frequenzabhängigen Schirmfaktors
2. Bestimmung der zeitabhängigen magnetischen Drift
3. Bestimmung des frequenzabhängigen magnetischen Rauschens
4. Bestimmung der drei absoluten Vektorkomponenten sowie des Betrages und der neun Gradientenkomponenten des magnetischen Restfeldes
5. Bestimmung des Verlaufes der magnetischen Flussdichte innerhalb des zentralen Volumens

messtechnisch ermittelt. Um die Ergebnisse bewerten und mit anderen Schirmungen vergleichen zu können, sollten neben den messtechnischen Untersuchungen auch die Randbedingungen:

- verfügt der *MSR* über eine statische Erdfeldkompensation
- verfügt der *MSR* über eine geregelte Schirmung
- kann der *MSR* entmagnetisiert werden
- zeitabhängige Drift der magnetischen Flussdichte außerhalb des *MSRs*

erfasst, beschrieben und berücksichtigt werden. Weiterhin sollten alle Punkte im Sinne der Vergleichbarkeit mit anderen *MSR* immer gleich behandelt bzw. eingesetzt werden. Dies beginnt mit dem räumlichen Bezugssystem innerhalb des *MSRs*. Hierfür wird ein kartesisches Koordinatensystem eingeführt, dessen Ursprung im magnetischen Zentrum des

MSRs liegt. Das Zentrum ergibt sich aus der innersten *Mu-Metall*-Lage und ist der Ort mit dem höchsten Abstand zum *Mu-Metall*. Es wird ein rechtshändiges System aufgestellt, bei dem die Y-Achse (Abszisse) der Wandnormalen mit „Tür“ entspricht. Dabei zeigt die Normale der Wand in das *MSR* hinein. Weiterhin soll, wenn vorhanden, die zusätzliche statische und oder aktiv geregelte magnetische Kompensation während der gesamten Messzeit betrieben werden. Zusätzlich sollte während der gesamten Messzeit die Amplitude der äußeren magnetischen Flussdichte aufgezeichnet werden. Dies kann genutzt werden, um äußere Einflüsse von inneren Störungen wie beispielsweise die magnetische Drift, nach dem Schließen der Tür zu trennen. Außerdem kann durch den Vergleich des frequenzabhängigen magnetischen Rauschens innerhalb und außerhalb des *MSRs* eine Abschätzung für den real wirkenden Schirmfaktor ermittelt werden.

1. Bestimmung des frequenzabhängigen Schirmfaktors

Grundeigenschaft jeder magnetischen Schirmung ist dessen richtungs- und frequenzabhängiger magnetischer Schirmfaktor. Eine der häufigsten Anwendungen der hier betrachteten *MSRs* liegt im Bereich des Biomagnetismuses [36]. Dabei erstreckt sich der Frequenzbereich biomagnetischer bzw. bioelektrischer Signale beispielsweise bei der nichtinvasiven Elektroenzephalographie (EEG) und Magnetoenzephalographie (MEG) von nahe DC [1] bis über 1 kHz [57]. Innerhalb dieses Frequenzbereiches werden auch physikalische Grundlagenexperimente wie die Suche nach einem elektrischen Dipolmoment von fundamentalen Teilchen wie dem Neutron [7, 58] oder den Untersuchungen zur Lorentz-invarianze [59, 60] durchgeführt. Daraus folgernd sollte der Schirmfaktor des jeweiligen *MSRs* über den Frequenzbereich von 1 mHz bis hin zu 1 kHz untersucht werden. Da die meisten Experimente im Zentrum des *MSR* durchgeführt werden, sollte auch die Ermittlung des Schirmfaktors im magnetischen Zentrum erfolgen. Um einen eventuellen Einfluss der Tür oder der geometrischen Form des *MSRs* untersuchen zu können, sollte der Schirmfaktor für die drei Raumrichtungen X,Y,Z gemessen werden.

Die Amplitude der AC-Anregung soll 1 µT im magnetischen Zentrum betragen, wenn keine Schirmung vorhanden ist. Diese Amplitude hat sich bei den Herstellern von *MSRs* wie beispielsweise *VAC* und *IMEDCO* etabliert. Da das μ_r von hochpermeablen Materialien wie *Mu-Metall* abhängig von der äußeren magnetischen Flussdichte [37] ist, würde eine Veränderung der Anregungsamplitude auch eine Änderung der Schirmwirkung erzeugen und somit den Vergleich erschweren. Durch die Wahl einer einheitlichen Amplitude können die so ermittelten Schirmfaktoren mit denen vom Hersteller gemessenen Werte einfach verglichen und Veränderungen wie beispielsweise durch den Ab- und wieder Aufbau, den Transport [13] sowie während der Nutzung des *MSR* untersucht werden. Der Sensor muss neben der nötigen Bandbreite von 1 mHz bis hin zu 1 kHz auch die entsprechende Auflösung in diesem Bereich besitzen, um das im Inneren des *MSR* gedämpfte Signal messen zu können. Um den Schirmfaktor definiert für eine Frequenz ermitteln zu können, wird von den Herstellern als Signalform eine sinusförmige Änderung der Flussdicht genutzt. Dies

soll auch bei dem hier vorgeschlagenen Protokoll genutzt werden.

Zur Erzeugung der Anregungsflussdichte werden Spulen eingesetzt, wobei hier zwischen einer homogenen oder inhomogenen Anregung unterschieden wird. Da die Quellen realer magnetischer Störungen häufig weit entfernt von dem *MSR* sind, kann der durch sie erzeugte Feldverlauf über das Volumen des *MSR* als homogen angenommen werden. Solch ein Verlauf kann jedoch auf Grund der Größe eines *MSRs* nur selten durch Spulen realisiert werden. Daher wird die Bestimmung des Schirmfaktors häufig durch eine inhomogene magnetische Anregung realisiert [61, 62]. Aus diesem Grund soll auch bei dem hier vorgeschlagenen Protokoll mit einer solchen Anregung gearbeitet werden. Der Einfluss der Größe und der Entfernung der Spule zum *MSR* konnte innerhalb dieser Arbeit nicht untersucht werden. Erste Simulationen von Frau Sun[1], bezüglich des Einflusses der Größe der Quelle auf den Schirmfaktor eines *MSRs*, weisen aber auf rund 10 % [63] hin.

2. Bestimmung der zeitabhängigen magnetischen Drift
Um die magnetische Drift innerhalb des Schirmes zu untersuchen, wird das magnetische Messsystem im magnetischen Zentrum positioniert und entlang dem Koordinatensystem des *MSR* ausgerichtet. Um für weitere Analysen den Effekt der Tür von dem der Entmagnetisierung trennen zu können, sollte die Messung direkt nach einer Entmagnetisierung gestartet werden ohne den Schirm zwischendurch zu öffnen. Die Messzeit soll 10 Stunden und die Abtastrate mindestens 100 Hz betragen. Durch die gewählte Abtastrate kann diese Langzeitmessung ebenfalls zur Untersuchung des magnetischen Rauschens genutzt werden.

Die Anzahl und Position der Sensoren bei dieser Messung sollten so gewählt werden, dass neben den Vektorkomponenten auch Gradiometerinformationen zur Verfügung stehen. Dies kann beispielsweise durch die nachträgliche Bildung eines Softwaregradiometers erreicht werden. Die Durchführung der Messung ist so zu wählen, dass der Tag/Nachteinfluss innerhalb der Messungen abgebildet wird. Dies kann einerseits eine Absenkung der Klimatisierung oder, in großen Ballungsräumen wie Berlin, die Reduzierung von äußeren Störungen sein. Um diese Einflüsse differenzieren zu können, sollte die Drift der magnetischen Flussdichte innerhalb des *MSRs* simultan mit einem magnetischen Sensor außerhalb des *MSR* erfolgen. Es sollten weiterhin die Einflüsse einer möglichen geregelten Schirmung untersucht werden. Hierfür können Messungen sowohl mit aktivierter als auch mit deaktivierter Kompensationsreglung genutzt werden. Ebenso sollte der magnetische Driftprozess, ausgelöst durch das Schließen des Zuganges des *MSRs* messtechnisch erfasst werden.

3. Bestimmung des frequenzabhängigen magnetischen Rauschens
Zur Untersuchung des frequenzabhängigen magnetischen Rauschens sollte das Messsystem

[1] Doktorandin der Universität Harbin, China

ebenfalls im magnetischen Zentrum des *MSRs* positioniert und ausgerichtet sein. Die Messungen sollten so durchgeführt werden, dass ein Frequenzspektrum von 1 mHz bis 10 kHz abgedeckt wird. Als Einheit hat sich die Amplitude der spektralen Rauschleistungsdichte $\sqrt{S_\mathrm{B}}$ in $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ etabliert.

Für spätere Darstellungen sollte bei der Berechnung des Spektrums eine Mittelung genutzt werden. Zur Zeitoptimierung sollte daher die Langzeitmessung aus Punkt 2. für die Berechnung des niederfrequenten Spektrums genutzt und der fehlende höherfrequente Bereich durch zusätzliche Messungen abgedeckt werden. Dementsprechend sollten die zusätzlichen Messungen für den Bereich von 100 Hz bis 15 kHz direkt im Anschluss mit einer Messzeit von ≥ 10 s erfolgen.

4. Bestimmung der drei absoluten Vektorkomponenten sowie des Betrages und der neun Gradientenkomponenten des magnetischen Restfeldes

Wie schon in der Einleitung beschrieben ist die absolute magnetische Flussdichte und dessen Gradiententensor wichtig für eine Vielzahl von Experimenten. Da die meisten Experimente aus Gründen der Symmetrie im magnetischen Zentrum des *MSRs* durchgeführt werden, sollte das Restfeld exemplarisch für alle *MSRs* mindestens an diesem Punkt bestimmt werden. Dabei soll nicht nur der Betrag, sondern auch die drei Vektor- sowie die neun Gradientenkomponenten bestimmt werden.

Um den Einfluss der Entmagnetisierung darstellen zu können, soll diese Messung sowohl vor als auch nach einer Entmagnetisierung durchgeführt werden. Zur Minimierung von thermischen Effekten durch die Entmagnetisierung soll die Messung 1000 s nach der letzten Entmagnetisierung erfolgen. In dieser Zeit darf weder die Tür geöffnet noch der Zustand der Erdfeldkompensation geändert werden. Weiterhin sollte eine dritte Messung nach dem vollständigen Öffnen und wieder Schließen der Tür durchgeführt werden. Diese dient zum Abschätzen der Änderung des statischen Restfeldes durch das eindringende äußere Feld bei offener Schirmung. Um den statischen Effekt der Restfeldänderung zu untersuchen, soll diese Messung mindestens 1000 s nach dem Schließen der Tür durchgeführt werden.

5. Bestimmung des Verlaufes der magnetischen Flussdichte innerhalb des zentralen Volumens

Da für viele Experimente der Verlauf bzw. die räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte über das Volumen des Experimentes entscheidend ist [2, 5, 58], sollte dies ebenfalls innerhalb des Protokolls untersucht und festgehalten werden. Dabei hängt das Volumen von dem jeweiligen Experiment ab und reicht von wenigen Kubikzentimetern [2, 59, 60] bis zu mehreren 100 Kubikzentimetern [5, 14, 58]. Um die magnetische Flussdichte innerhalb eines Volumens zu erfassen, werden typischerweise die jeweiligen Sensoren während der Messung verschoben [5, 58]. Mit diesen Messungen können dann ortsaufgelöste Karten erstellt werden, welche den Verlauf der magnetischen Flussdichte visualisiert.

Dies wird in regelmäßigen Abständen am *nEDM* Experiment am Paul Scherrer Instituts mit Fluxgate Sensoren und seit dem Jahr 2014 zusätzlich mit optischen Präzessions-Magnetometer durchgeführt [9, 10, 64] um unteranderem ungewollte magnetische Quellen zu lokalisieren und zu reduzieren.

Da das Volumen der Experimente variiert, wird in dem hier vorgeschlagenen Protokoll das zentrale Volumen mit $(30\,\mathrm{x}\,30\,\mathrm{x}\,30)\,\mathrm{cm}^3$ vorgeschlagen. Innerhalb solch eines Volumens werden sowohl biomagnetische Messungen wie beispielsweise *MEG* [65], aber auch physikalische Grundlagen Experimente wie von Gemmel et al. [59] durchgeführt. Eine Vorgabe mit welchem räumlchen Abstand dieses Volumen abgerastert werden soll und somit eine räumliche Auflösung des magnetischen Restfeldes erreicht werden kann, wird an dieser Stelle nicht vorgegeben. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit sollte jedoch das Zentrum mehrfach angefahren und somit gemessen werden.

Zur Realisierung solch einer Messung wird eine Apparatur benötigt, welche die Verschiebung des eigentlichen Sensors ermöglicht. Durch die von der Apparatur realisierten Verschiebung bestimmt sie somit maßgeblich die räumliche Auflösung des in dieser Arbeit entwickelten Messsystems. Neben der mechanischen Genauigkeit beim Verschieben des Sensors darf aber vor allem die eigentliche Messgröße nicht durch magnetisch polarisierte Komponenten beeinflusst werden. Da eine solche Apparatur weder zur Verfügung stand noch innerhalb dieser Arbeit entwickelt werden konnte, wird die örtliche Auflösung innerhalb dieser Arbeit nicht weiter Verfolgt und untersucht.

Innerhalb dieser Arbeit wurde ein Vorschlag für solch ein Protokoll angefertigt und bei der in Kapitel 6.2 beschriebenen Charakterisierung der *Zuse-MSR* angewendet. Das ausgefüllte Protokoll ist dem Anhang B ab Seite 179 beigefügt. Um die damit ermittelten magnetischen Eigenschaften des *MSR*s schnell und übersichtlich mit anderen *MSR*s vergleichen zu können, wurde zusätzlich zum Protokoll das Tabellenblatt in Abbildung 3.1 entworfen. Es stellt die magnetischen Eigenschaften eines *MSR*s kompakt und übersichtlich auf einem Din A4 Blatt dar.

Kompakte Übersicht der magnetischen Eigenschaften des MSR

Bezeichnung der Schirmung	

Eigenschaften

		innerer freier Raum		
Lagen	X ;X ; X	ΔX=.....m	ΔY=.....m	ΔZ=.....m
von innen nach außen	Permalloy;Aluminium;Permalloy			
aktive Schirmung	✕ / ✔			

Drift im mag. Zentrum

	innen pT/h	außen pT/h
Bx		
By		
Bz		

Schirmfaktor

Frequenz Hz	Sx #	Sy #	Sz #
0.010			
0.100			
1.000			
4.000			
18.000			
55.000			
78.000			
98.000			
298.000			
598.000			
798.000			
998.000			

mag. Rauschen im mag. Zentrum

	innen			außen		
Frequez	Bx fT/√Hz	By fT/√Hz	Bz fT/√Hz	Bx fT/√Hz	By fT/√Hz	Bz fT/√Hz
0.001						
1						
36						
98						
980						
9800						
14980						

statisches Restfeld im mag. Zentrum

	innen			zentrales inneres Volumen von (30x30x30)cm³ nach degauss		außen
Komponente	vor degauss nT	nach degauss nT	nach Tür auf / zu nT	max [nT]	min [nT]	nT
|B|						
B_x						
B_y						
B_z						

Gradient G_{ij} des statischen Restfeldes im mag. Zentrum (i=ΔBx,ΔBy,ΔBz) (j=Δx,Δy,Δz)

	vor der Entmagnetisierung			nach der Entmagnetisierung		
	Bx pT/cm	By pT/cm	Bz pT/cm	Bx pT/cm	By pT/cm	Bz pT/cm
x						
y						
z						

Methode	Methode

Abbildung 3.1.: Vorschlag einer kompakten Übersicht der magnetischen Eigenschaften einer magnetisch geschirmten Umgebung.

3.2. Auswahl des geeigneten Sensors

Anhand der in Kapitel 2.1 beschriebenen Eigenschaften wurden die Randbedingungen abgeleitet, welche ein Sensor erfüllen muss, um das in Kapitel 3.1 formulierte Protokoll zur Charakterisierung von magnetisch geschirmten Umgebungen umsetzen zu können. Diese Randbedingungen wurden in der Tabelle 3.1 zusammengefasst und den Eigenschaften der in Kapitel 2.2 beschriebenen drei Sensorarten gegenübergestellt. Erfüllt oder übertrifft der Sensor die geforderten Randbedingungen, so wurde dieses Feld mit einem „✓“ gekennzeichnet. Wurde zum Zeitpunkt der Recherche eine Bedingung nicht erfüllt, so wurde dies mit einem „X“ markiert. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Gradientenkomponenten wurde zwar als Randbedingung aufgenommen, die Eigenschaften der einzelnen Sensortypen diesbezüglich aber nicht verglichen, da keine Herstellerangaben gefunden wurden. Somit wurde diese Zeile mit einem „-“ markiert.

Tabelle 3.1.: Zusammenfassung der benötigten Randbedingungen eines Messsystems zur Charakterisierung von *MSRs*

Eigenschaft	Randbedingungen	Fluxgate	OPM	SQUID
Bandbreite	1 mHz - 10 kHz	✓	✓	✓
Systemrauschen bei 1 Hz	$\leq 10\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$	X	X	✓
Drift des Messsystems	$\leq$ 10 pT/h	✓	✓	✓
Messzeit	24 h	✓	✓	✓
messbarer Schirmfaktor	$100 \leq S \leq 10^8$	X	✓	✓
Unsicherheit für den Vektor	$\leq 50\,\mathrm{pT}$	X	X	✓
Unsicherheit für den Gradienten	$\leq 10\,\mathrm{pT/cm}$	-	-	-
mögliches Hintergrundfeld	$\leq 10\,\mathrm{nT}$	✓	✓	✓
maximale Größe des Messsystems	$\leq 60\,\mathrm{cm}$	✓	✓	✓
kommerziell verfügbar		✓	-	- / ✓

Die größten Vorteile der Fluxgate-Magnetometer sind deren kommerzielle Verfügbarkeit sowie die kompakten Bauformen. Ihr Eigenrauschen von $\geq 1\,\mathrm{pT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ für Frequenzen ≤ 1 Hz begrenzt jedoch die Auflösung bei Rauschmessungen sowie die Bestimmung von Schirmfaktoren von $S \geq 10^6$. Ähnlich verhält es sich bei der Bestimmung der Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte. Auster et al. zeigte, dass der Offset eines Fluxgates bestimmt werden kann [66]. Da jedoch weder vom Hersteller noch in Veröffentlichungen Werte für eine Empfindlichkeit gefunden wurden, ist die nötige absolute Auflösung als nicht erfüllt gekennzeichnet worden.

Die aktuellen Entwicklungen der optischen Präzessions-Magnetometer (*OPM*) zeigen sowohl eine Bandbreite von ≥ 10 kHz als auch ein magnetisches Systemrauschen von unter $10\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$. Allerdings wurden diese nur getrennt voneinander mit jeweils spezialisierten Sensoren erreicht. In [48] wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie *OPM*s mit diesen Eigenschaften kombiniert werden könnten. Solche Ausblicke wurden ebenfalls in [50] über die

Unsicherheit bei der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte gegeben. Da es sich bei den beschriebenen *OPM*s um neue Entwicklungen handelt, werden diese Sensoren noch nicht kommerziell vertrieben. Die Einzelkomponenten könnten jedoch erworben und ein solcher Sensor durch Entwicklungsarbeit aufgebaut werden. Daher wurde dieses Feld mit „-“ gekennzeichnet.

Der weite nutzbare Frequenzbereich von 1 mHz bis $\geq 100\,\mathrm{kHz}$ zusammen mit einem weißen Rauschniveau von $\leq 10\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ machen das SQUID zu einem sehr flexibel einsetzbaren und hochauflösenden Sensor. Um dies zu erreichen, ist der Einsatz einer Kühlung bis auf rund 4 K und den damit verbundenen Herausforderungen notwendig. So kann bei geeigneter Wahl des Kältegefäßes sowohl die geforderte Grenze der Eigendrift als auch die benötigte Messzeit realisiert werden. Bei der Auswahl einer geeigneten Kühlung muss jedoch auch die Größe des Messaufbaus berücksichtigt werden. Die in der Tabelle 3.1 angegebene maximale Größe ist eine Vorgabe, um die Flexibilität und die Mobilität des Sensors zu gewährleisten, um in möglichst vielen Schirmungen eingesetzt zu werden. Eine weitere Herausforderung bei einem möglichen Einsatz von SQUID-Sensoren ist die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte. Mit der durch die von Schnabel et al. erreichte Unsicherheit von $\pm 20\,\mathrm{pT}$ [67], bei einem gleichzeitig geringen Eigenrauschen von $\leq 10\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ bei 1 Hz wurde diese Eigenschaft als erfüllt gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den *OPM*s sind bei einem auf SQUID-Sensoren basierenden Messsystem die Einzelkomponenten kommerziell erhältlich und erfüllen dabei auch alle geforderten Eigenschaften, was in der Tabelle 3.1 mit einem „✓“ gekennzeichnet wurde. Um jedoch zu kennzeichnen, dass Entwicklungsarbeit geleistet werden musste, um die geforderten Randbedingungen als System zu erfüllen, wurde das Feld zusätzlich mit „-“ markiert.

Abgeleitet von der Tabelle 3.1 wurde in dieser Arbeit ein magnetisches Messsystem auf der Grundlage von SQUID-Sensoren entwickelt. Sie weisen, im Gegensatz zu Fluxgate- und OPM-Sensoren, sowohl die geforderte Bandbreite als auch das geforderte Systemrauschen innerhalb dieser auf. Diese Vorteile überwogen die Nachteile welche sich durch das benötigten Kühlgefäßes und die daraus resultierende beschränkte Messzeit ergeben. Weiterhin wurden in der Literatur bereits Messsysteme beschrieben, welche auf der Basis von SQUIDs die absolute magnetische Flussdichte mit einer Unsicherheit von besser $\pm 20\,\mathrm{pT}$ [38] und die relativen Gradienten [56] bestimmen konnten. Diese Arbeiten wurden aufgegriffen und so erweitert, dass neben der absoluten magnetischen Flussdichte auch der absolute Gradiententensor simultan für einen Raumpunkt bestimmt werden kann.

3.3. Adaptierte Sensoranordnung zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und deren Gradiententensor

Um die drei Vektor- und neun Gradientenkomponenten des Tensors der magnetischen Flussdichte absolut und simultan bestimmen zu können, wurden 12 SQUID-Magnetometer auf den sechs Flächen eines Würfels angeordnet. Dabei wurden die SQUIDs abweichend zu [38, 56] nicht fluchtend übereinander oder gegenüber platziert, sondern unter einem Winkel von 45° zur vertikalen und horizontalen Achse des Würfels.

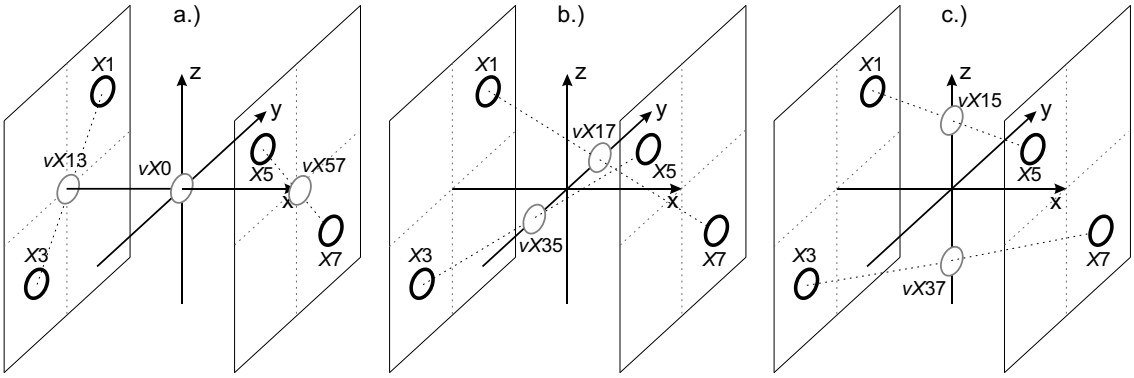


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung der SQUID Anordnung zur Bestimmung der absoluten Vektor- und Gradientenkomponente der magnetischen Flussdichte am Beispiel der X-Komponenten. a) zeigt die berechneten virtuellen SQUIDs zur Bestimmung der B_{x} und $\frac{\Delta B_{\mathrm{x}}}{\Delta x}$ Komponente. b) die Konfiguratiuon zur Bestimmung der Komponente $\frac{\Delta B_{\mathrm{x}}}{\Delta y}$ und c) die Konfiguratiuon zur Bestimmung der Komponente $\frac{\Delta B_{\mathrm{x}}}{\Delta z}$.

Abbildung 3.2 zeigt am Beispiel der in X-Richtung empfindlichen Sensoren schematisch diese Anordnung. Dabei wurde mit a), b) und c) drei mal die selbe Anordnung der vier SQUID-Sensoren $X1_{(-\Delta\mathrm{x},\Delta\mathrm{y},\Delta\mathrm{z})}$, $X3_{(-\Delta\mathrm{x},-\Delta\mathrm{y},-\Delta\mathrm{z})}$, $X5_{(\Delta\mathrm{x},-\Delta\mathrm{y},\Delta\mathrm{z})}$ und $X7_{(\Delta\mathrm{x},\Delta\mathrm{y},-\Delta\mathrm{z})}$ dargestellt. Die drei Abbildungen unterscheiden sich durch die virtuellen SQUIDs, welche durch Mittelwertbildung der verschieden realen SQUIDs gebildet werden können. Zur Bestimmung der Vektorkomponente B_{x} wurde jeweils der Mittelwert zwischen zwei Sensoren auf einer Würfelfläche gebildet. Diese entsprechen zwei gegenüberliegenden virtuellen SQUIDs $vX13_{(-\Delta\mathrm{x},0,0)}$ und $vX57_{(+\Delta\mathrm{x},0,0)}$. Wird wiederum der Mittelwert zwischen diesen Paaren gebildet, so entspricht dieses Ergebnis einem dritten virtuellen Sensor $vX0_{(0,0,0)}$ welcher sich im Zentrum des Würfels befindet (siehe Abbildung: 3.2 a). Damit kann die Methode von Thiel et al. zur Bestimmung der absoluten Vektorkomponenten angewendet werden. Durch die Anwendung dieser Anordnung auf die anderen 2x2 parallelen Flächen des Würfels, können die drei Vektorkomponenten simultan bestimmt werden.

Neben den Vektorkomponenten sollte die Änderung der magnetischen Flussdichte entlang

der drei Raumrichtungen ermittelt werden. Anders als bei [56] sollten jedoch auch die Gradienten der statischen Flussdichte bestimmt werden können. Durch die Anordnung der SQUIDs in Abbildung 3.2 a) kann der Gradient g_{xx} durch die Werte der beiden virtuellen SQUIDs $vX13_{(-\Delta\mathrm{x},0,0)}$ und $vX57_{(+\Delta\mathrm{x},0,0)}$ sowie der Gleichung 2.13 bestimmt werden. Um die Gradienten entlang der Y-Achse des Würfels zu bestimmen, also g_{xy}, wurde jeweils der Mittelwert aus den zwei Sensoren gebildet, die die selbe Y Ortskomponente(X_3, X_5 und X_1, X_7) haben. Daraus ergeben sich die in Abbildung 3.2 b) dargestellten virtuellen Sensoren $vX17_{(0,-\Delta\mathrm{y},0)}$ und $vX35_{(0,+\Delta\mathrm{y},0)}$. Zur Bestimmung des dritten Gradienten der X-Komponente g_{xz} werden die in Abbildung: 3.2 c) dargestellten virtuellen SQUIDs $vX37_{(0,0,-\Delta\mathrm{z})}$ und $VX15_{(0,0,+\Delta\mathrm{z})}$ aus den realen SQUIDs gebildet, welche die selbe Z Ortskomponente (X_1, X_5 und X_3, X_7) besitzen.

Um die Gradienten der Y- und Z-Komponente der magnetischen Flussdichte zu bestimmen, wurden die entsprechenden SQUIDs auf den anderen 4 Würfelflächen eingesetzt. Somit können mit dieser Anordnung aus 12 SQUID Magentometern sowohl die drei Vektor- als auch die neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte absolut und simultan bestimmt werden.

Um diese Prozedur umsetzen zu können folgt die Notwendigkeit, den Offset jedes einzelnen SQUIDs zu bestimmen. Daher wurden die Sensoren rotationssymmetrisch um die vertikale Würfelachse platziert, wodurch mittels Rotation und Verkippung der Anordnung um 45° jeweils die Hälfte der Sensorflächen deckungsgleich positioniert werden kann. Somit ist es möglich, durch die Bestimmung der Offsets von nur zwei SQUIDs auch die Offsets der anderen Sensoren zu ermitteln. Damit unterscheidet sich diese neue Prozedur von der von Thiel et al. in [38] beschriebene Methode, in der nur die Offsets der drei zentralen orthogonalen virtuellen SQUIDs bestimmt wurde.

Um die zuvor beschriebene Anordnung den gestellten Anforderungen entsprechend nutzen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues Messsystem bestehend aus SQUID-Sensoren, SQUID Elektronik, Kühlgefäß und einer Vorrichtung zur Durchführung der benötigten Rotation und Verkippung der Anordnung entwickelt und realisiert. Diese Komponenten werden im folgenden Kapitel 4 detailliert beschrieben.

4. Realisierung des magnetischen Messsystems

4.1. SQUID-Sensor

Mit diesem Messsystem soll es ermöglicht werden, neben der absoluten magnetischen Flussdichte auch das magnetische Eigenrauschen und den Schirmfaktor von magnetischen Schirmungen zu untersuchen. Daraus folgt, dass das Messsystem ein geringes Eigenrauschen und eine hohe Feldempfindlichkeit aufweisen muss. Alle drei Eigenschaften ergeben sich aus dem Zusammenspiel des SQUID-Sensors mit der genutzten FLL-Elektronik. Neben den Messeigenschaften des Systems mussten jedoch auch die Multikanaligkeit und die Miniaturisierung bei der Auswahl der SQUIDs und der FLL-Elektronik berücksichtigt werden. An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wird seit 2004 ein Multikanal SQUID-System mit 304 Sensoren zur Messung von biomagnetischen Signalen betrieben. Neben biomagnetischen Messungen wie in [1] wurden weiterhin Präzessionsmessungen an Edelgasen [6] und quantitative Rekonstruktion von magnetischen Nanopartikelverteilungen [68] durchgeführt. Dieses System ist modular aus 19 Messstäben mit jeweils 16-SQUIDs aufgebaut [39]. Damit besteht eine Langzeiterfahrung in den Bereichen Multikanaligkeit, Kompaktheit und verschiedensten Messanwendungen. Weiterhin waren die Sensoren und die FLL-Elektroniken in ausreichender Stückzahl und Qualität vorhanden. Aus diesen Gründen basiert das in dieser Arbeit entwickelte Messsystem sowohl auf den gleichen SQUID-Sensoren als auch auf der gleichen FLL-Elektronik.

Abbildung 4.1 zeigt ein Foto des eingesetzten SQUID-Sensors. Dieser setzt sich aus dem eigentlichen SQUID und einem Chipträger zusammen. Das auf Niob basierende SQUID

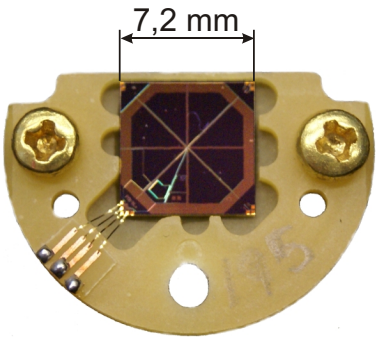


Abbildung 4.1.: Foto eines Chipträgers mit integriertem SQUID-Sensor *W9L*.

Tabelle 4.1.: Zusammenfassung der typischen Eigenschaften des verwendeten SQUID Typs

Bezeichnung		W9L	
mag. Rauschleistungsdichte ($\geq 1\,\mathrm{Hz}$)	$\sqrt{S_\mathrm{B}}$	≤ 2	$\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$
Feldempfindlichkeit	A_eff	460	pT/Φ_0
Stromempfindlichkeit	M_f	16,88	$\mu\mathrm{A}/\Phi_0$

wird mittels eines Mehrlagenprozesses auf einem Siliziumchip aufgetragen und mit einer quadratischen Kantenlänge von 7,2 mm ausgeschnitten. Zur Montage und Kontaktierung des SQUIDs wird es auf einen Chipträger aus Epoxidharz fixiert. Auf dem Chipträger sind Löcher sowie Lötpeds zur Montage vorgesehen, von denen aus das SQUID mittels Bonddrähten kontaktiert ist. Die typischen Werte des SQUID-Typs *W9L* sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst

Die Feldempfindlichkeit A_eff der verwendeten SQUIDs beträgt 460 pT/Φ_0 $\pm 1\%$ [69], und beschreibt die Änderung des magnetischen Flusses $\partial\Phi$ innerhalb der SQUID Fläche, die durch eine Änderung der äußeren magnetischen Flussdichte ∂B hervorgerufen wird. Neben A_eff geht auch die sogenannte Stromempfindlichkeit M_f des SQUIDs in den Skalierungsfaktor mit ein. Sie ist gegeben durch den Strom, der durch die Rückkoppelspule fließen muss, um im SQUID ein Φ_0 zu erzeugen und beträgt bei den verwendeten SQUIDs typischerweise 16,88 $\mu\mathrm{A}/\Phi_0$. Dieser Wert wurde empirisch durch den Hersteller *Star Cryoelektronis* bestimmt und wird in dieser Arbeit mit einer Unsicherheit von 1 % angenommen. Weiterhin zeichnet sich das *W9L*-SQUID durch ein typisches magnetisches Eigenrauschen von $\approx 1\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ in einem Frequenzbereich von rund 2 Hz bis 1 Mhz aus [70]. Das Eigenrauschen des Sensors weist weiterhin eine 1/f-Ecke bei ca. 2 Hz auf, wodurch es bei einer Frequenz von rund 1 Hz auf $\approx 2\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ ansteigt [70]. Dieser Rauschbeitrag ist jedoch nur ein Teilbeitrag zum Gesamtrauschen des Messsystems. Daher musste gewährleistet werden, dass die Beiträge durch die FLL-Elektronik und die Datenerfassung nicht dominieren. Um dies zu realisieren wurde von der *PTB* die in Abbildung 4.2 gezeigte FLL-Elektronik [51] speziell für den Einsatz bei Multikanalsystemen entwickelt, die sowohl ein geringes Eigenrauschen als auch eine kompakte Bauweise ermöglicht.

4.2. FLL-Elektronik

Die FLL-Elektronik wurde speziell für das Multikanalsystem [39] der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelt und ermöglicht es, bis zu 16 SQUIDs pro Elektronik in einer kompakten Bauform zu betreiben [71]. Abbildung 4.2 zeigt ein Foto der mit rund (3x3x10) cm^3 großen FLL-Elektronik. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben wurde, enthält diese Elektronik die Regelschleife, welche die Kennlinie des dc-SQUID-Sensors linearisiert. Die Regelschleife besteht aus dem eigentlichen SQUID-Sensor und der auf ihm plazierten

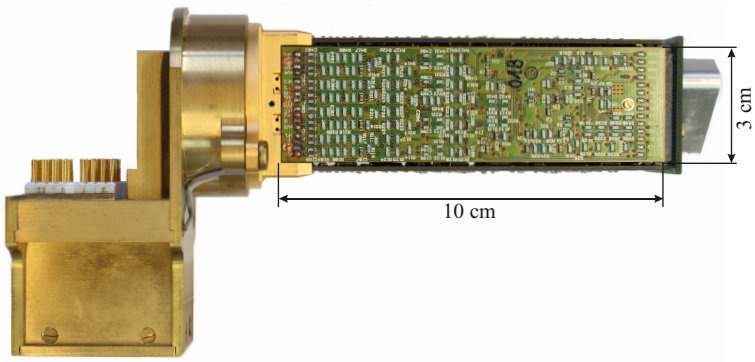


Abbildung 4.2.: Foto der verwendeten Multikanal FLL-Elektronik. Diese ist auf einem für das *Cube*-II-System entwickelten unmagnetischen Stecksystem montiert.

Rückkoppelspule, welche sich im flüssigen Helium befindet. Auf der bei Raumtemperatur betriebenen FLL-Elektronik befindet sich der Vorverstärker, der Integrator und der Rückkoppelwiderstand. Um das geringe Eigenrauschen der genutzten SQUIDs nicht zu erhöhen, wurden spezielle Vorverstärker und Integratoren eingesetzt, welche in der Dissertation von M. Scheiner [51] beschrieben sind. Mit diesen Baugruppen konnte ein weißes Eigenrauschen der FLL-Elektronik von $1\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$ und $10\mathrm{pA}/\sqrt{Hz}$ erreicht werden. Als Rückkoppelwiderstand ist auf der FLL-Elektronik ein SMD-Widerstand mit $10\,\mathrm{k}\Omega \pm 0{,}1\,\%$ fest für jeden Kanal eingebaut. Damit ergibt sich ein magnetischer Fluss-zu-Spannung Koeffizient G_{FLL} durch das SQUID und die FLL-Elektronik nach Gleichung 4.1 von $2{,}72\,\mathrm{nT/V}$

$$G_{\mathrm{FLL}} = \frac{A_{\mathrm{eff}}}{R_{\mathrm{f}} \cdot M_{\mathrm{f}}} \tag{4.1}$$

Durch den Ausgangsspannungsbereich der FLL-Elektronik von $\pm\,10\,\mathrm{V}$ und dem magnetischen Fluss-zu-Spannung Koeffizienten von rund $2{,}72\,\mathrm{nT/V}$ beträgt der mögliche Aussteuerbereich $\pm\,27{,}2\,\mathrm{nT}$, bei Vernachlässigung des SQUID Offsets. In der Tabelle 4.2 sind die Eigenschaften der FLL-Elektronik, in Kombination mit dem in 4.1 beschriebenen SQUID-Sensor zusammengestellt.

Ein Mikrocontroller dient zum Abgleich des Arbeitspunktes für jeweils vier SQUIDs und kann über eine serielle Schnittstelle angesteuert werden. Die Übertragung der Versorgungsspannung sowie der Steuer- und Messsignale erfolgt über ein Kabel, welches mit dem sogenannten Koppelrack verbunden ist. Dieses Koppelrack wurde von Herrn F. Petsche[1] entwickelt und stellt die Schnittstellen zur Datenerfassung, Kommunikation mittels *RS-485* und zur Spannungsversorgung dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Schnittstelle zur Datenerfassung durch zusätzliche Instrumentenverstärker am Eingang ergänzt. Diese dienen neben der Erhöhung des Gleichtaktunterdrückungsverhältnisses zur Verringerung der Ausgangsleistung der SQUID-Elektronik. Die Versorgungsspannung, die für den Betrieb des SQUID-Systems notwendig ist, beträgt $\pm 12\,\mathrm{V}$. Der Steuerrechner wird über

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB

Tabelle 4.2.: Zusammenfassung der für diese FLL-Elektronik typischen Eigenschaften.

Bezeichnung	Multikanal FLL-Elektronik		
Anzahl der möglichen SQUIDs		16	
elek. Rauschleistungsdichte ($\geq 1\,\mathrm{Hz}$)	$\sqrt{S_\mathrm{U}}$	≤ 1	$\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$
elek. Rauschleistungsdichte ($\geq 1\,\mathrm{Hz}$)	$\sqrt{S_\mathrm{I}}$	≤ 10	$\mathrm{pA}/\sqrt{Hz}$
Rückkoppelwiderstand	R_f	10	kΩ
mag. Fluss zu Spannung Koeffizienten	G_FLL	2,72	nT/V
Aussteuerbereich		$\pm 27{,}5$	nT
Ausgangsspannung	U_out-max	± 10	V
Bandbreite		30	kHz
Versorgungsspannung		± 12	V

die optisch entkoppelte RS-485 Schnittstelle verbunden und dient zum testen und einstellen des SQUID-*AP*. Um Störungen durch die Kommunikation der Controller während einer Messung zu vermeiden, wird der Controller während dieser Zeit in einen Ruhemodus versetzt. Während des Messbetriebes wird eine Steuerleitung genutzt, mittels derer das Messsystem zwischen dem Zustand FLL-Mode und Reset-Mode umgeschaltet werden kann. Dabei bezeichnet der FLL-Mode den eigentlichen Messzustand bei dem die Flussrückkoppelschleife geschlossen ist. Beim Reset-Mode ist die Rückkoppelschleife offen und der Integrator wird zurückgesetzt. Dieser Zustand wird auch als Reset bezeichnet, da der geschlossenen Rückkoppelschleife nach einem Reset wieder der gesamte Aussteuerbereich (abzüglich des Offsets) zur Verfügung steht. Die Signalleitungen der SQUIDs werden vom Koppelrack über Instrumentenverstärker zur Datenerfassung weitergeleitet.

Da die einzelnen Bauteile sowie der zum Betrieb notwendige elektrische Strom die Messungen beeinträchtigen kann und um die Bauhöhe des Gesamten Messsystem so gering wie möglich zu halten, wurde im Gegensatz zum Multikanalsystem der *PTB* [39] die Elektronik, wie in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt, steckbar gestaltet. Dafür wurde ein zusätzliches Gehäuse von S. Neuber[1] entwickelt, in das spezielle Steckverbinder der Firma *ODU* mit einer geringen magnetischen Remanenz eingesetzt werden. Neben der Reduzierung von magnetischen Einflüssen durch die Elektronik kann damit auch die Gesamthöhe auf rund 38 cm reduziert werden. Weiterhin erhöht dies die Flexibilität des neuen Messsystems gegenüber dem Multikanal System [39], da ein Wechsel zu anderen FLL-Elektroniken bzw. die Dezentralisierung der Elektronik schnell und einfach ermöglicht wird.

Alle Materialien, mit Ausnahme der eigentlichen Elektronik, wurden auf ihre magnetische Remanenz getestet. Dazu wurde das Material kurzzeitig einer statischen magnetischen Flussdichte von rund 50 mT ausgesetzt und danach in unmittelbarer ($\leq$ 5 cm) Nähe zu einem SQUID-Sensor bewegt. Betrug die mit dem SQUID gemessene Flussdichteänderung $\leq$ 100 pT so ist das Material zur Weiterverarbeitung verwendet worden. Um die magneti-

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB

sche Kontamination während der mechanischen Bearbeitung gering zu halten, wurden alle Komponenten auf einer speziell nur für Kunsttoffbearbeitung eingesetzte Fräsmaschine mit Luft- oder Reinwasserkühlung gefertigt. Nach der Bearbeitung wurden die Komponenten erneut auf magnetische Kontamination getestet.

4.3. Datenerfassung

Die Datenerfassung des Messsystems wurde mittels des PXI-Standards realisiert. Durch die Flexibilität, die dieses System bietet, konnte eine auf die Messaufgabe zugeschnittene Datenerfassung genutzt werden. Eingesetzt wurde die Karte-*PXI-4495* der Firma *National Instruments*. Die im Folgenden beschriebenen Eigenschaften dieser Karte wurden aus den Spezifikationen von *National Instruments* entnommen und in der Tabelle 4.3 zusammengestellt.

Tabelle 4.3.: Zusammenfassung der für die Datenerfassung typischen Eigenschaften.

Tech. Bezeichnung		PXI-4495	
Anzahl der analogen Eingänge		16	
elek. Kopplung der analogen Eingänge		DC	
elek. Rauschleistungsdichte ($\geq$ 1 kHz)	$\sqrt{S_{\mathrm{U}}}$	140	$\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$
optionale Eingangsverstärkung		10	
Analog zu Digital Konverter	Delta-sigma	24	bit
Aussteuerbereich		$\pm$ 10	V
max. Abtastrate		204,8	kS/s
max. eff. Bandbreite		81920	kHz

Die *PXI-4495* besitzt 16 Kanäle wobei jeder Kanal mit einem eigenen Delta-Sigma analog-zu digital-Konverter ausgestattet ist. Dieser ermöglicht es, das analoge Eingangssignal mit 24 bit und einer maximalen Rate f_{S} von 204,8 kHz abzutasten. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung des Antialiasing-Filters eine verfügbare Bandbreite von $0,4 \cdot f_{\mathrm{S}}$. Dies entspricht einem nutzbaren Frequenzbereich von DC bis rund 80 kHz. Die 24-bit des Delta-Sigma Konverters entsprechen der nominellen Auflösung, welche jedoch durch das Eigenrauschen der Karte und nichtlineare Verzerrungen in der praktischen Anwendung nicht erreicht werden. Daher wird die Auflösung eines idealen Konverters mit 18-bit [2] angenommen. Der Eingangsspannungsbereich beträgt $\pm$ 10 V und deckt damit den Aussteuerbereich der FLL-Elektronik komplett ab. Die Rauschleistungsdichte dieser Karte beträgt bei 1 kHz $140\,\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$, was zu einer Erhöhung des unkorrelierten Spannungsrauschens des SQUIDs mit der FLL-Elektronik von typischer weise $700\,\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$ (entspricht $2\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ bei 2,72 nT/V), von rund 2 % führt. Dieser Beitrag kann auf 20 ppm verringert werden, wenn der auf der Karte integrierte Vorverstärker genutzt werden kann. Ist dieser aktiv, so darf die Amplitude des Eingangssignal $\pm$ 1 V nicht überschreiten. Wie jede DC-

gekoppelte Datenerfasssung weist auch die *PXI-4495* einen Offset auf, der für jeden Kanal und nach einem erfolgten Selbstabgleich mit $\pm 500\,\mu\text{V}$ angegeben wird. Weiterhin weist jeder Kanal eine Unsicherheit des Verstärkungsfaktors A_{Gain} auf. Diese wird nach einem Selbstabgleich mit bis zu 0,5 % angegeben. Zur Steuerung der Datenerfassung wurde das PXI-System mit einer Schnittstellenkarte erweitert, welche mittels Lichtwellenleiter mit einem PC verbunden wurde. Damit konnten sowohl Masseschleifen als auch Störungen durch den PC vermieden werden.

4.4. Anordnung der SQUIDs auf dem Sensorkopf

Die in Kapitel 3.3 vorgestellte Methode erfordert eine spezielle Anordnung der SQUID-Magnetometer auf einer, im Folgenden als Sensorkopf bezeichneten Haltestruktur. Die Realisierung dieser Anordnung hatte mehrere Randbedingungen, welche die Dimensionierung der Abstände zwischen den einzelnen Sensoren vorgab.

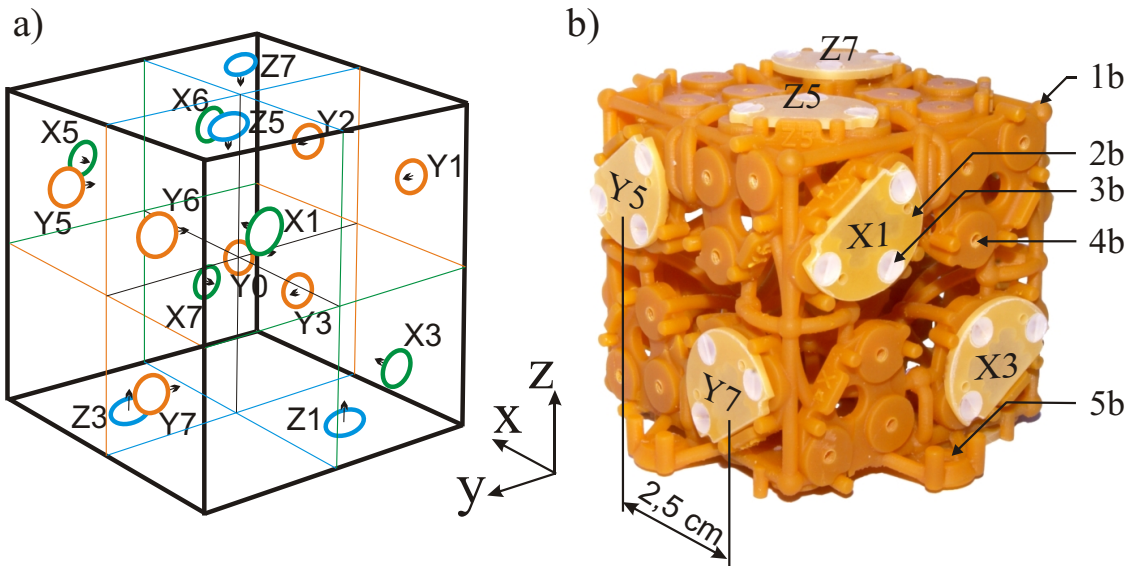


Abbildung 4.3.: Schemazeichnung (a) und Foto (b) des Sensorkopfes mit den darauf positionierten SQUID-Sensoren. Auf der Schemazeichnung (a) wurden alle 16 SQUIDs als Kreise abgebildet. Deren Positionen im Raum wurden in der Tabelle 4.4 zusammengefasst. Auf dem Foto des Sensorkopfes (1b) sind sechs von maximal 25 Chipträgern (2b) mit Nylonschrauben (3b) sichtbar befestigt. Dafür verfügt jede mögliche Chipträgerposition am Sensorkopf über drei Bohrungen mit einem metrischen 2,5 mm Gewinde (4b). Der mit 5b gekennzeichnete Steg dient zum verschrauben des Sensorkopfes mit dem Sensorkopfhalter

Um die drei Vektorkomponenten im Zentrum der würfelförmigen Anordnung simultan bestimmen zu können, wurde der Mittelwert aus gegenüberliegenden SQUIDs gebildet. Da der Feldverlauf zwischen den beiden Sensoren jedoch unbekannt ist, hat der Mittelwert

eine zusätzliche Unsicherheit. Diese nimmt mit sinkendem Abstand zwischen den beiden Sensoren ab. Gegen einen minimalen Sensorabstand spricht die simultane Bestimmung der drei Vektor- sowie der Gradientenkomponenten. Die Größenordnung der in magnetisch geschirmten Umgebungen zu erwartenden Gradienten beträgt typischerweise einige pT/cm. Da die Differenz zwischen den beiden Messpunkten mit steigendem Abstand zunimmt, ist in diesem Fall ein größerer Abstand der Sensoren zueinander zu bevorzugen. Für einen großen Abstand zwischen den Sensoren spricht ebenfalls das dann geringere Übersprechen zwischen den Sensoren. Jedes SQUID produziert durch Ströme in der Ein- und Rückkoppelspule sowie durch die Hin- und Rückleitungen zur FLL-Elektronik Magnetfelder. Diese beeinflussen den Messwert von benachbarten SQUIDs, was als Übersprechen bezeichnet wird. Um diesen Effekt zu verringern, sollte der Abstand zwischen zwei SQUIDs groß sein. Für das 83-Kanal SQUID-System der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wurde das Übersprechen der SQUIDs abgeschätzt. Die planar angeordneten Sensoren hatten einen Abstand zwischen den beiden Mittelpunkten der feldempfindlichen Flächen von 30 mm. Zusätzlich zu den planar angeordneten SQUIDs befanden sich auch orthogonale SQUIDs in einem Abstand von rund 10 mm. Für diese SQUID-Anordnung wurde ein Übersprechen von kleiner 1% angegeben [69]. Da das Layout dieses Sensors zu dem in dieser Arbeit eingesetzten Sensor nur sehr geringfügig verändert wurde, ist diese Abschätzung übernommen worden.

Als ein weiterer begrenzender Faktor für den maximalen Sensorabstand muss die Öffnung der Dewar-Gefäße berücksichtigt werden. Ihr Aufbau und deren Funktion werden detaillierter in Kapitel 4.5 beschrieben. Die Öffnung dieser Gefäße begrenzt den maximalen Abstand der SQUIDs zueinander. Durch die nicht perfekte thermische Isolierung dieser Gefäße verdampft das Helium und muss regelmäßig nachgefüllt werden. Damit beschränkt dieser Zyklus eine durchgängige Messzeit und sollte so lang wie möglich sein. Da das Messsystem ein geringes Gesamtvolumen aufweisen soll, reduziert sich auch das mögliche Heliumreservoir. Dies führt weiterhin zu einem schlechteren Verhältnis zwischen Reservoir und Öffnung. Als Kompromiss wurde einen Durchmesser von 70 mm vom Hersteller realisiert. Dadurch darf bei einem würfelförmigen Sensorkopf die Kantenlänge von 50 mm nicht überschritten werden. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, ist das eigentliche SQUID auf einem Chipträger fixiert, um dieses einfach und reversibel montieren und elektrisch kontaktieren zu können. Die Form dieses Trägers entspricht einem Halbkreis mit einem Durchmesser von rund 20 mm (siehe Abbildung: 4.1). Um die Chipträger einfach und sicher, aber mit maximalen Abstand zueinander montieren zu können, wurde ein Würfel mit einer Kantenlänge von 50 mm gewählt. Auf jeder einzelnen Fläche wurde das Zentrum der SQUIDs auf den gegenüberliegenden Ecken eines Quadrates mit einer Seitenlänge von 2,5 cm platziert. Abbildung 4.3 a) zeigt mit Kreisen schematisch die Anordnung der für die simultane Bestimmung der Vektor- und Gradientenkomponenten nötigen 12 SQUID-Sensoren auf dem Würfel. Da mit der verwendeten FLL-Elektronik bis zu 16 SQUIDs gleichzeitig betrieben werden können war es möglich, vier zusätzliche SQUIDs zu verwenden. Diese vier zusätz-

Tabelle 4.4.: Bezeichnung der 16 SQUID-Sensoren und ihre Position zum Würfelzentrum

Name	Position [mm]			$\vec{n}$ für 0°		
	x	y	z	x	y	z
$X1$	-25,0	12,5	12,5	1	0	0
$X3$	-25,0	-12,5	-12,5	1	0	0
$X5$	25,0	-12,5	12,5	-1	0	0
$X6$	25,0	12,5	12,5	-1	0	0
$X7$	25,0	12,5	-12,5	-1	0	0
$Y0$	0,0	0,0	0,0	0	-1	0
$Y1$	-12,5	-25,0	12,5	0	1	0
$Y2$	12,5	-25,0	12,5	0	1	0
$Y3$	12,5	-25,0	-12,5	0	1	0
$Y5$	12,5	25,0	12,5	0	-1	0
$Y6$	-12,5	25,0	12,5	0	-1	0
$Y7$	-12,5	25,0	-12,5	0	-1	0
$Z1$	-12,5	-12,5	-25,0	0	0	1
$Z3$	12,5	12,5	-25,0	0	0	1
$Z5$	-12,5	12,5	25,0	0	0	-1
$Z7$	12,5	-12,5	25,0	0	0	-1

lichen SQUIDs wurden ebenfalls in der schematischen Darstellung in Abbildung 4.3 a) als X6, Y0, Y2 und Y6 eingezeichnet. Um diese flexibel anordnen zu können, wurden alle Ecken des Quadrates auf der Würfelfläche so konstruiert, dass je ein Chipträger mittels drei Nylonschrauben (siehe Abbildung 4.3 3b) montiert werden kann. Um die Unsicherheit bei der Bestimmung der drei Vektorkomponenten im Zentrum zu verringern, wurde eine zusätzliche Position für einen SQUID-Sensor im Zentrum des Würfels geschaffen. Dieses SQUID wird direkt um sein Zentrum rotiert, womit dessen Offset und die drei Komponenten der absolut magnetischen Flussdichte bestimmt werden können. Diese Möglichkeit unterscheidet sich von den bereits vorhandenen Systemen [38, 56] welche die absolute Flussdichte nur mittels virtuellen SQUIDs bestimmt haben. Für das hier beschriebene zentrale reale SQUID muss somit die Voraussetzung einer linearen Flussdichteänderung am Messort nicht berücksichtigt werden. Die verbleibenden drei zusätzlichen SQUIDs wurden jeweils auf den freien oberen Positionen der X- und Y-Flächen montiert. An diesen Positionen ist es möglich auch deren Offsets zu bestimmen. Zusätzlich konnten somit zwei gegenüberliegende sogenannte Dreibeine gebildet werden, welche zwei zusätzliche Schätzwerte für die relative und durch die Offsetbestimmung auch für die absolute magnetische Flussdichte liefern. In der Tabelle 4.4 sind die Positionen der SQUID-Mittelpunkte zum Würfelzentrum und deren Flächennormalen zusammengetragen.

Zur Herstellung des Sensorkopfes wurde ein 3D-Druckverfahren, das auf Photo-Polymerisation basiert, mit einer örtlichen vertikalen Auflösung von $\pm 30\,\mu$m und einer horizontalen Auflösung von $\pm 60\,\mu$m gewählt. Abbildung 4.3 b) zeigt ein Foto des SQUID-Halters, der

im Folgenden als Sensorkopf bezeichnet wird. Dieser wurde von Herrn D. Gutkelch[1] konstruierten und von der Firma *Phanos GmbH* hergestellt. Die Vorteile des Verfahrens für diese spezielle Anwendung lagen in:

- der Reduktion des Materialvolumens, was zu einer Erhöhung des zur Verfügung stehenden Kühlmittelvolumens führt,
- der einfachen Herstellung der Haltestruktur für den zentralen SQUID-Sensor und
- die extrem schnelle und damit kostengünstige Herstellung von verschiedenen Anordnungen / Materialien im Vergleich zum konventionellen Verfahren.

Da diese Fertigungsmethode für diese Anwendung zuvor noch nicht eingesetzt wurde, waren mehrere Test vor dem endgültigen Einsatz notwendig. Dabei waren die drei wichtigsten Eigenschaften der thermische Ausdehnungskoeffizent, die vernachlässigbar kleine magnetische Remanenz und die mechanische Elastizität, um mehrfaches thermisches Zyklieren zu realisieren. Zur Herstellung des Sensorkopfes wurde das Material Acrylnitril-Butadien-Styrol (*ABS*) genutzt. Dabei handelt es sich um einen Kunststoff ohne zusätzliches Füllmaterial. Dieses bietet sowohl eine geringe geometrische Unsicherheit bei der Erzeugung des Sensorkopfes, als auch vergleichbare Materialeigenschaften wie beispielsweise Polymethylmethacrylat (*PMMA*), welches in den Arbeiten [38, 56, 72] eingesetzt wurde.

Da sich der Sensorkopf in unmittelbarer Nähe zu den SQUIDs befindet, musste die magnetische Remanenz so gering wie möglich sein. Wie bei der Steckerlösung der FLL-Elektronik wurde der Sensorkopf kurzzeitig einer statischen magnetischen Flussdichte von rund 50 mT ausgesetzt und danach in unmittelbarer ($\leq$ 5 cm) Nähe zu einem SQUID-System bewegt. Als obere Grenze wurde jedoch die maximale Auflösungsgrenze dieser Messprozedur von $\approx$ 2 pT im *BMSR*-2 festgelegt.

Der relative thermische Ausdehnungskoeffizient $\Delta L/L$ für Kunststoffe variiert sehr stark. So wurde beispielsweise eine relative Längenänderung bei der Abkühlung von Raumtemperatur zu 4 K bei PMMA und Teflon (PTFE) von -1,4 % und -2,1 % gemessen [73]. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit konnte keine Quelle über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von ABS bis zu Temperaturen von 4 K gefunden werden. Da der Wert für *ABS* bei Raumtemperatur zwischen PTFE und PMMA liegt [74], wurde der Mittelwert von -1,8 % benutzt.

Da bei diesem Messsystem speziell auf die Mobilität Wert gelegt wurde und der Dewar aus Sicherheitsgründen bei längeren Transporten nicht mit flüssigem Helium gefüllt sein darf, wird der Sensorkopf zwangsläufig häufig zykliert. Um dies zerstörungsfrei zu gewährleisten, wurde bei der Konstruktion darauf geachtet, dass keine Spalten oder Sacklöcher

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB

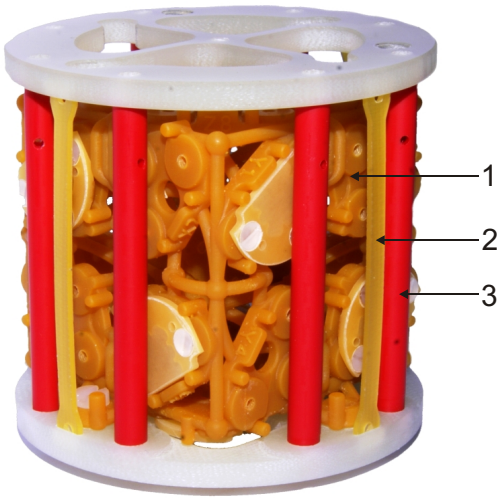
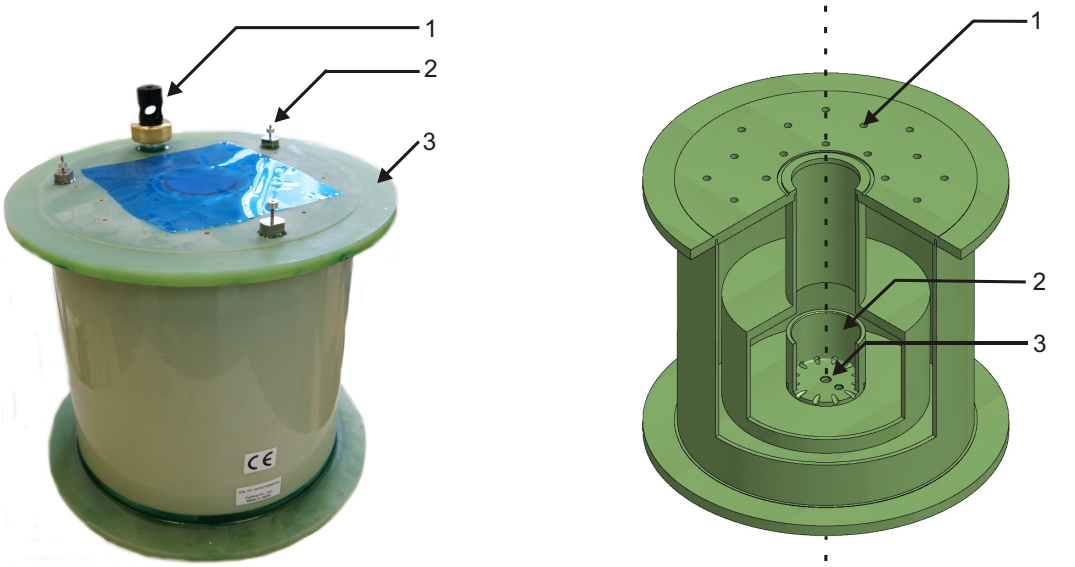


Abbildung 4.4.: Foto des Sensorkopfes (1) im Sensorkopfhalter (3) der durch Federelemente (2) im Dewar fixiert wird.

vorhanden sind, in denen sich Wasser durch Kondensation sammeln kann. Dieses würde sich beim Abkühlen ausdehnen und zu einem Bruch führen. Weiterhin ist der Sensorkopf mechanischen Belastungen ausgesetzt, da sowohl die Chipträger mittels Nylonschrauben am Sensorkopf und der Sensorkopf selbst mittels Nylonschrauben an einer Haltestruktur aus GFK befestigt wurde. Dass er diesen Belastungen auch bei Temperaturen von 4 K widersteht, wurde vor der Montage der eigentlichen SQUIDs mit leeren Chipträgern in mehreren Zyklierungsversuchen getestet. Dabei konnten keine Risse im Material nach jeweils vier Zyklierungen mit flüssigem Stickstoff (Siedetemperatur ≈ 77 K) und flüssigem Helium (Siedetemperatur ≈ 4 K) durch visuelle Prüfung nachgewiesen werden.

Um den Sensorkopf im Dewar zu positionieren und zu befestigen, wurde dieser in eine Haltestruktur aus GFK und Polyvinylchlorid (PVC) mit einem äußeren Durchmesser von 70 mm montiert. Abbildung 4.4 zeigt ein Foto der von S. Neuber[1] konstruierten Haltestruktur mit dem integrierten Sensorkopf. Zur Verringerung von mechanischen Vibrationen wurden Federelemente (siehe Abbildung 4.4, 2) ebenfalls aus GFK integriert. Dies ist notwendig, um bei magnetischen Messungen innerhalb eines magnetischen Gradientenfeldes Störsignale zu dämpfen. Neben der Dämpfung von Vibrationen dienen die Federelemente zum Zentrieren und Fixieren der Haltestruktur im späteren Dewar. Der Boden und der Deckel der Haltestruktur sind über acht Stangen aus rotem PVC miteinander verbunden. Um den Sensorkopf reproduzierbar und mit einer festen Ausrichtung im Dewar positionieren zu können, wurden an der Unterseite der Haltestruktur zwei zylinderförmige Stifte vorgesehen. Diese wurden so gefertigt, dass sie in zwei Senkungen im Innengefäß des speziell für diese Arbeit angefertigten Dewar (siehe Kapitel 4.5) passen. Um eine geringe Toleranz der Stifte in den Senkungen zu erreichen, wurde die Geometrie der beiden Senkungen im Gefäß mit einem computergesteuerten Präzessionskoordinatenmessgerätes der

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB



(a) Foto des *Cube*-II-Dewars

(b) Schnittansicht einer Konstruktionszeichnung des *Cube*-II-Dewars

Abbildung 4.5.: Foto und Schemazeichnung des *Cube*-II-Dewars. a1: Vakuumventil, a2: einem von drei Kontakten zum inneren HF-Schirm, a3: Montagering, b1: Senkungen mit M4-Gewinde, b2: GFK-Topf, b3: Zentrierungssenkungen

Firma *HEXAGON Metrology* vermessen und die Stifte auf der Basis dieser Messergebnisse gefertigt.

4.5. *Cube*-II-Dewar

Die in dieser Arbeit eingesetzten LT_c-SQUID-Sensoren werden auf der Basis von Niob aufgebaut, welches eine Sprungtemperatur von 9,7 K bei Normaldruck [75] aufweist. Diese Temperaturen können durch eine Vielzahl von Methoden realisiert werden. Eine etablierte Möglichkeit diese Temperaturen über einen begrenzten Zeitraum zu erzeugen, ist der Einsatz von flüssigem Helium (Siedetemperatur 4,15 K Normaldruck [76]) in doppelwandigen, vakuumisierten und verspiegelten Gefäßen. Diese Art von Kühlgefäßen werden nach dem Physiker *Sir James Dewar* benannt. Die Herausforderung bei dieser Art von Kühlung ist die thermische Isolierung zwischen dem Außengefäß mit 300 K und dem Innengefäß mit rund 4 K. Dies hat zur Folge, dass das flüssige Helium im Dewar verdampft und somit periodisch oder kontinuierlich nachgefüllt werden muss, um die Temperatur im Inneren des Dewars auf unter 9,7 K zu halten.

Abbildung 4.5a zeigt ein Foto des Dewars, welcher in Zusammenarbeit mit der Firma *Cryogenic & Sperconducting Technology Fujihira*, Herrn Dr. A. Schnabel[1], D. Gutklech[1]

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB

und S. Neuber[1] für das in dieser Arbeit realisierte Messsystem entwickelt wurde. Er weist einen Durchmesser von 37 cm und eine Höhe von 31 cm auf. In diesem Volumen konnte ein Reservoir für das flüssige Helium von rund 3,2 Liter integriert werden. Dieser Dewar wird im Folgenden als *Cube*-II bezeichneten, wobei die Erweiterung -II als Unterscheidung zu einem ähnlichen Dewar dient, welcher als Prototyp in Kapitel 6.1 eingesetzt wurde.

Um die Charakterisierung von *MSRs* nicht zu verfälschen, sollte der Dewar neben einer geringen magnetischen Remanenz auch ein geringeres thermisch induziertes magnetisches Rauschen aufweisen. Daher wurde *GFK* als Material für den Dewar eingesetzt. Um das zur thermischen Isolierung benötigte Vakuum im Dewar zu erzeugen, wurde ein Ventil an der Oberseite befestigt (siehe Abbildung 4.5a, 1). Im Vakuum wurden vom Hersteller mehrere Lagen metallbedampfter Kunststofffolie (Mylar-Folie) integriert, welcher als thermischer Strahlenschild und als Schirm gegen höherfrequente elektromagnetische Störungen dient. Dieser HF-Schirm wurde mittels drei elektrisch leitfähig verbundenen Titanschrauben nach außen kontaktiert (siehe Abbildung 4.5a2). Zusätzlich wurde an der inneren Oberseite des Heliumreservoirs ein elektrisch isoliertes Kupfergeflecht fixiert, welches an den Seiten bis nach unten in das flüssige Helium verläuft. Die im Vergleich zum GFK hohe thermische Leitfähigkeit verringert den thermischen Gradienten, welcher sich durch die Öffnung des Dewars an der Oberseite ergibt. Um den Dewar so kompakt wie möglich in einem Gestell zu befestigen, wurden die Ober- und Unterseite des Dewar nicht bündig mit dem äußeren Zylinder abgeschlossen (siehe Abbildung 4.5a, 3). Durch den so erzeugten Überlapp soll der Dewar in einen Manipulator integriert werden (siehe Abbildung 5.9).

Um die im Kapitel 4.4 beschriebene Haltestruktur des Sensorkopfes in den Dewar einzusetzen, verfügt er über eine Öffnung mit einem Durchmesser von 70 mm. Die Öffnung mündet in das Flüssigheliumreservoir, auf dessen Boden zentral ein Topf aus GFK fixiert wurde. Dieser Topf ist in Abbildung 4.5b mit 2 markiert. Er dient, zusammen mit den in der Haltestruktur des Sensorkopf esintegrierten Federelementen, als Vibrationsdämpfung und Fixierung für den Sensorkopf. Um diesen reproduzierbar und rotationssymmetrisch im *Cube*-II positionieren zu können, befinden sich am Boden des Topfes zwei Senkungen. Die in Abbildung 4.5ab mit 3) gekennzeichnete Senkung liegt dabei mit einer Toleranz von $\pm 0{,}1$ mm auf der Rotationsachse des Dewars.

4.6. *Cube*-II-Isoliereinsatz

Um die Öffnung des *Cube*-II-Dewars nach dem Einsetzen des Sensorkopf thermisch isoliert zu verschließen, wurde ein spezieller Isoliereinsatz, wie er in Abbildung 4.6 dargestellt ist, entwickelt und realisiert. Die thermische Isolierung wurde durch 12 cm Polystyrol und mehrere Lagen verspiegelte Mylarfolie realisiert. Diese Schichten werden über drei GFK-

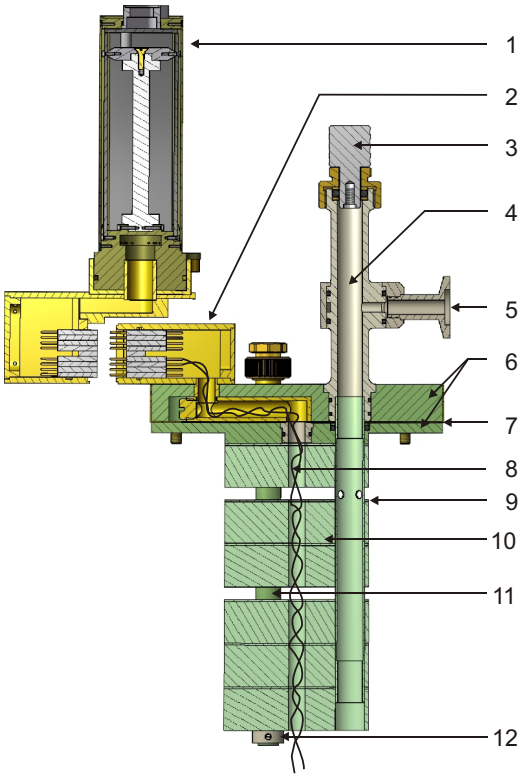


Abbildung 4.6.: Schnittansicht der Schemazeichnung des *Cube*-II-Isoliereinsatzes. 1) FLL-Elektronik, 2) Steckverbinder, 3) Stopfen, 4) Zugang zum befüllen des Dewars, 5) Anschluss für das Heliumabgas, 6) Doppellagiger GFK-Deckel, 7) HF-Schirm, 8) Kanal für die Drähte der SQUID-Sensoren, 9) verspiegelte Mylarfolie, 10) Polystyrol-Isolierung, 11) Rohr für den Heliumfüllstandsensor, 12) Arretierring

Rohren geschoben und durch zwei aus Polyetheretherketon (PEEK) gefertigte Arretierringe fixiert. Die Rohre selbst werden für das Befüllen des Dewars mit flüssigem Helium, als Auslass von verdampften Heliumgas, zum Bestimmen des Heliumfüllstandes sowie des Heliumgasdrucks genutzt.

Um thermisch induzierte Ströme während des Kippens des Dewars um 45° zu vermeiden, wurde im Vergleich zum Isoliereinsatz des Multikanalsystems der PTB [39], der Auslass für das verdampfende Helium (siehe Abbildung: 4.6, Nr. 4 und 5) komplett aus PEEK gefertigt. Während des Kippens verdampft mehr flüssiges Helium und kühlt die gesamte Strecke des Heliumabgases ab. Dadurch wird ein Temperaturgradient erzeugt, welcher in elektrisch leitfähigen Materialien einen elektrischen Strom und damit auch ein Magnetfeld erzeugt. Dieser Effekt wurde von B.V.Vasiliev in [77] beschrieben und konnte in einem Laborversuch qualitativ nachvollzogen werden. Dieses zusätzliche Magnetfeld würde die Bestimmung des SQUID-Offsets verfälschen weswegen die gesamten Strecke des Heliumabgases aus nicht leitfähigem Material hergestellt wurde.

Dieses Vorgehen wurde konsequent auch auf den Deckel des Isoliereinsatzes angewendet,

welcher aus GFK gefertigt wurde. Um trotzdem hochfrequente elektromagnetische Störungen zu dämpfen besteht der Deckel aus zwei separaten Scheiben, zwischen denen eine nach außen elektrisch kontaktierte 300 µm dicke Messingfolie eingebracht wurde. Diese dient als Erweiterung des im Dewar implementierten HF-Schirms bei minimalem Einsatz von elektrisch leitfähigem Material.

Um den Wärmeeintrag in das Heliumreservoir so gering wie möglich zu halten, wurde auf eine zusätzliche mechanische Verbindung zwischen dem Isoliereinsatz und dem Sensorkopf verzichtet. Einzige mechanische Verbindung sind die 64 Kupferdrähte (vier pro SQUID) mit einem Durchmesser von jeweils 50 µm. Diese dienen als elektrische Verbindung zwischen dem in Abbildung 4.6, 2) markierten Steckverbinder auf dem Deckel des Dewars und den SQUIDs im flüssigen Helium.

Alle für den Isoliereinsatz verwendeten Materialien wurden vor und nach der Bearbeitung auf magnetische Remanenz hin untersucht. Dafür wurde, wie bei der FLL-Elektronik das Material kurzzeitig einer statischen magnetischen Flussdichte von rund 50 mT ausgesetzt und als oberer Grenzwert eine gemessene Flussdichteänderung von ≤ 100 pT in 5 cm Entfernung festgelegt.

4.7. Automatische Befüllung des *Cube*-II-Dewars

Das Heliumreservoir des *Cube*-II fasst rund 3,2 Liter flüssiges Helium, welches durch die nicht perfekt thermische Isolierung ständig verdampft. Wird nicht rechtzeitig flüssiges Helium nachgefüllt, verdampft der *Cube*-II-Dewar das gesamte Heliumvolumen innerhalb von 28 Stunden. Um die Temperatur im Heliumreservoir unterhalb der Sprungtemperatur der SQUIDs zu halten, muss daher der Dewar periodisch mit flüssigem Helium befüllt werden. Dieser Füllvorgang wird vollautomatisch von einer Elektronik gesteuert, welche von Herrn F. Petsche[1] für diesen Dewar entwickelt wurde. Um diesen Vorgang gesteuert durchführen zu können, wurde zusätzlich ein Heliumfüllstandsensor und ein Drucksensor am Dewar montiert. Beim Unterschreiten eines festgelegten Schwellwertes startet die Füllprozedur automatisch. Das Füllen basiert dabei auf dem Überheberprinzip, bei dem zwei mit flüssigem Helium gefüllte Reservoirs mit einem doppelwandigen und vakuumisierten Rohr, dem Überheber, verbunden sind. Dafür wird in einem Reservoir, im Folgenden als Kanne bezeichnet, ein Überdruck erzeugt, wodurch das Helium in den Dewar mit geringerem Druck fließt. Um den Druck gezielt zu erzeugen, wird mit einem Heizwiderstand in der Kanne das flüssige Helium verdampft. Das führt in der sonst geschlossenen Kanne zur Erhöhung des Gasdrucks. Dieser wird solange erhöht, bis ein Schwellwert überschritten oder der Füllstand des Dewars die obere Abschaltschwelle erreicht hat. Da diese Proze-

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB

dur vollautomatisch abläuft, ist der manuelle Teil auf das Austauschen der leeren Kanne reduziert. Bei einer 100 Liter Kanne beträgt dieser Zyklus rund 13 Tage.

Das Messprinzip des Heliumfüllstandsensors basiert auf der Messung des Ohmschen Widerstandes eines im flüssigen Helium supraleitenden Drahtes. Da die magnetische Flussdichte aus einem Supraleiter verdrängt wird [20], würde dies zu einer lokalen Änderung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit des Füllstandes führen. Um diesen Einfluss zu vermeiden, wird der Heliumfüllstandsensor während der Messungen entfernt.

4.8. Manipulator

Um den Offset jedes einzelnen SQUIDs bestimmen zu können, muss die Ausrichtung der Sensoren relativ zum Magnetfeld verändert werden. Dies wurde durch die Rotation und Verschiebung des *Cube*-II-Dewars mit den im Inneren fixierten SQUID-Sensoren realisiert. Um dies reproduzierbar und mit einer geringen geometrischen Unsicherheit von $\leq 0{,}5\,\mathrm{mm}$ und $\leq 0{,}5\,^\circ$ umzusetzen, wurde der in Abbildung 4.7 a. dargestellte Manipulator von S. Neuber[1] entwickelt.

Da der Manipulator das eigentliche Messignal nicht beeinflussen sollte, wurden nur Materialien verwendet, die eine vernachlässigbare magnetische Remanenz aufwiesen. Um dies zu gewährleisten, wurde neben Baumwollharzgewebe (*HGW2082*) auch Polyoxymethylen (*POM*) eingesetzt und wie beim Isoliereinsatz vor und nach der Bearbeitung auf magnetische Remanenz hin untersucht. Lag die magnetische Flussdichte des gemessenen Materials über 100 pT in 5 cm Abstand zum SQUID-Sensor, so wurde dieser Bereich des Materials großflächig entfernt und wenn nötig ersetzt.

Der Manipulator setzt sich aus zwei einzelnen Komponenten, dem Drehgestell (3a) und der Bodenplatte (8a) zusammen. Das Drehgestell wurde auf Kugeln gelagert, die es ermöglichen, Gefäße bis zu einem Eigengewicht von 200 kg mit geringer Reibung zu bewegen. Durch die im Vergleich zu zwei flachen Gleitpartnern reduzierte Reibung, ist weniger Kraft für die Manipulation notwendig bei gleichzeitig verringerter elektrostatischer Aufladung. Dies ist wichtig, da bei einer elektrischen Entladung häufig der aktuelle Arbeitspunkt verloren geht. Im Extremfall kann es auch zur Zerstörung des SQUID kommen. Die Achse, um welche das Drehgestell rotiert wird, befindet sich im Zentrum der Bodenplatte (1c). Durch die gefräste Winkelcodierung (8a) auf der Bodenplatte kann mit dem Arretierungsstift (7a) das Drehgestell in $(5{,}0 \pm 0,5)^\circ$ Schritten um die zentrale Achse rotiert werden.

Um den Offset der in Z-Richtung empfindlichen SQUIDs zu bestimmen, muss das Zentrum des Sensorkopfes um $45\,^\circ$ gekippt werden. Um dies reproduzierbar umzusetzen, wurde

[1] Arbeitsgruppe 8.22 Messtechnik für Biosignale der PTB

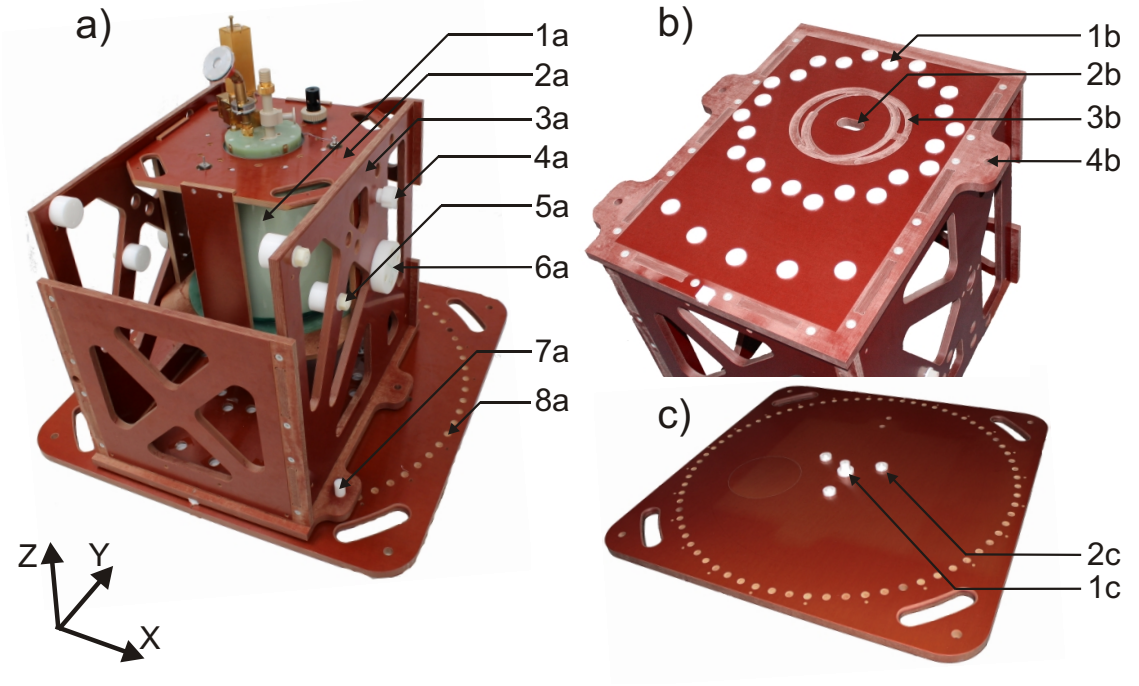


Abbildung 4.7.: Foto des realisierten Manipulators. a) Manipulator. 1a: *Cube*-II-Dewar, 2a: Halter des *Cube*-II-Dewars, 3a: Drehgestell, 4a: Sicherungsschraube, 5a: 45 ° Anschlag, 6a: Kippachse, 7a: Arretierungsstift, 8a: Bodenplatte mit einer Winkelcodierung in 5,0 ° Schritten; b) Detailansicht der Unterseite des Drehgestells. 1b.: Kugellager, 2b.: Führungsspur für die zwei Rotationsachsen, 3b.: Führungsspur für die Rotationsbewegungen, 4b.Bohrung für Arretierungsstift. c) Detailansicht der Grundplatte. 1c.: zentrale Drehachse, 2c.: drei Führungsstifte

der Dewar so auf zwei Achsen (6a) gelagert, dass die Kippachse durch das Zentrum des Sensorkopfes verläuft. Der Kippwinkel des *Cube*-II wird durch zwei spezielle Anschläge (5a) mit einer Unsicherheit von $\leq \pm 0,5\,^\circ$ eingestellt. Sowohl in der Aufrechten (0 °) als auch in der gekippten Position wird der Dewar durch zwei Sicherungsschrauben fixiert.

Für die Bestimmung der einzelnen SQUID-Offsets ist neben der zentralen vertikalen Rotationsachse eine zusätzliche, um 25 mm in X-Richtung verschobene, Rotationsachse erforderlich. Diese wurde durch das Verschieben des Drehgestells relativ zur Bodenplatte, entlang einer Führungsspur im Drehgestell (Abbildung: 4.7, 2b) realisiert. Damit sich das Drehgestell während der Rotation nicht verschiebt, ist eine mit 3b. gekennzeichnete Führungsspur in den äußeren Boden des Drehgestelles eingelassen worden. Diese, zusammen mit den Führungsstiften (2c.) in der Bodenplatte, geben sowohl die Rotationsrichtung als auch die Rotationsachse vor. Um einer Fehlbedienung vorzubeugen wurde die Spur so konstruiert, dass die Rotation um die Mittelachse des Dewars nur im mathematisch positiven Drehsinn und bis maximal 270 ° erfolgen kann. Wird die Drehachse um 25 mm verschoben, kann das Drehgestell nur im mathematisch negativen Drehsinn und um ma-

Tabelle 4.5.: Zusammenstellung der Positionsbezeichnungen und der Ausrichtung des Sensorkopfes relativ zum Koordinatensystem der zu untersuchenden Umgebung. Die mit einem Stern markierten Positionen sind notwendig um den Offset aller 16 SQUID-Sensoren bestimmen zu können.

Bezeichnung der Position	Rotation Z-Achse	Rotation X-Achse	Translation X-Achse
Pos-00*	0 °	0 °	0 mm
Pos-01*	90 °	0 °	0 mm
Pos-02*	180 °	0 °	0 mm
Pos-03	270 °	0 °	0 mm
Pos-04	180 °	0 °	0 mm
Pos-05	90 °	0 °	0 mm
Pos-06	0 °	0 °	0 mm
Pos-07*	0 °	45 °	0 mm
Pos-08	90 °	45 °	0 mm
Pos-09*	180 °	45 °	0 mm
Pos-10	270 °	45 °	0 mm
Pos-11	180 °	45 °	0 mm
Pos-12	90 °	45 °	0 mm
Pos-13	0 °	45 °	0 mm
Pos-14*	0 °	45 °	25 mm
Pos-15*	180 °	45 °	25 mm
Pos-16	0 °	45 °	25 mm
Pos-17	0 °	45 °	0 mm
Pos-18	0 °	0 °	0 mm
Pos-19	0 °	0 °	25 mm
Pos-20	0 °	0 °	0 mm

ximal 180 ° verdreht werden. Damit sind die beiden Zustände voneinander getrennt und würden bei einer Vertauschung während der Messung sofort auffallen.

4.9. Prozedur zur Bestimmung der Offsets aller SQUIDs

Um die Offsets aller 16 SQUIDs bestimmen zu können, wurde, wie zuvor in den Kapiteln 4.4 und 4.8 beschrieben, der Dewar rotiert, gekippt und verschoben. Als Startposition gilt die 0 ° Stellung des Dewars. Damit wird das Zentrum des Sensorkopfes als Ursprung eines rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems festgelegt. Der Sensorkopf wurde so im *Cube*-II-Dewar fixiert, dass die Flächennormale der Sensoren $X1$ und $X3$ in dieser Position nur eine positive X-Komponente, $Y1$, $Y2$ und $Y3$ eine positive Y-Komponente sowie $Z1$ und $Z3$ eine positive Z-Komponente besitzen. Dies ist der erste Messpunkt der mit allen 16 SQUIDs aufgezeichnet wird.

Im Anschluss wird das Drehgestell um die Z-Achse 270 ° rotiert und jeweils in 90 ° Abständen die magnetische Flussdichte mit allen SQUIDs gemessen. Ist dies erfolgt, so kann der Offset des zentralen SQUIDs $Y0$ mittels Gleichung 2.10 bestimmt werden. Weiterhin können die zwei Offsets der zentralen virtuellen SQUIDs für die X- und Y-Richtung bestimmt werden. Somit kann die absolute magnetische Flussdichte der X- und Y-Komponente sowohl mit dem realen SQUID $Y0$ als auch mit den beiden virtuellen SQUIDs *vX0* und *vY0* bestimmt werden. Weiterhin wurde die Flussdichte am Ort des SQUIDs $X1$ zur Position 0 ° mit den SQUID $Y5$, $X5$ und $Y1$ während der Positionen 90 °, 180 ° und 270 ° gemessen. Dies trifft weiterhin auf die SQUIDs $Y7$, $X7$ und $Y3$ in Verbindung mit dem SQUID $X3$ zu. Die zusätzlichen SQUIDs $X6$, $Y2$ und $Y6$ werden ebenfalls bei dieser Rotation nacheinander zur Deckung gebracht.

Um den Offset der in Z-Richtung empfindlichen SQUIDs bestimmen zu können, wird der Dewar um die X-Achse des Sensorkopfes gekippt, wodurch die SQUIDs $X1$ und $X3$ senkrecht übereinander stehen. Wird das Drehgestell in diesem Zustand um die zentrale Drehachse des Manipulators rotiert, so werden die Z-SQUIDs deckungsgleich mit den SQUIDs $Y1$, $Y3$, $Y5$ und $Y7$ gebracht wodurch sie nacheinander am selben Ort die magnetische Flussdichte bestimmen. Zusätzlich wird bei dieser Rotation das SQUID $X1$ deckungsgleich mit $X6$ gebracht.

Durch diese beiden Rotationen (im aufrechten und gekippten Zustand des Dewars) um die Zentrale Achse des Manipulators wurde somit die magnetische Flussdichte mittels der SQUIDs $X1$ und $X3$ direkt oder indirekt an denselben Orten bestimmt wie zuvor von den anderen Sensoren. Um die Offsets der SQUIDs $X1$ und $X3$ zu berechnen, wird das Drehgestell um 2,5 cm entlang der Führungsspur verschoben. Befindet sich der Dewar dann in der 45 ° Position, so liegen diese SQUIDs senkrecht übereinander und entlang der zentralen Rotationsachse des Manipulators. Somit können die Flächennormalen in dieser Position um 180 ° gedreht und die Offsets mittels Gleichung 2.10 bestimmt werden.

Die benötigten Positionen zur Bestimmung der SQUID-Offsets sowie der absoluten Vektor- und Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte wurden in der Tabelle 4.5 zusammengefasst. Zusätzlich wurden die zur Offsetbestimmung notwendigen Positionen mit einem Stern gekennzeichnet. Für die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte werden zusätzliche Positionen durch den Manipulator realisiert um neben der Reproduzierbarkeit zusätzlich Messwerte über einzelne Gradientenkomponenten zu erhalten. Abbildung 4.8 zeigt den zeitlichen Verlauf des Messsignals des $Y0$-SQUIDs, welches sich im Zentrum des Sensorkopfes befindet, während die in der Tabelle 4.5 beschriebenen Positionen eingenommen wurden.

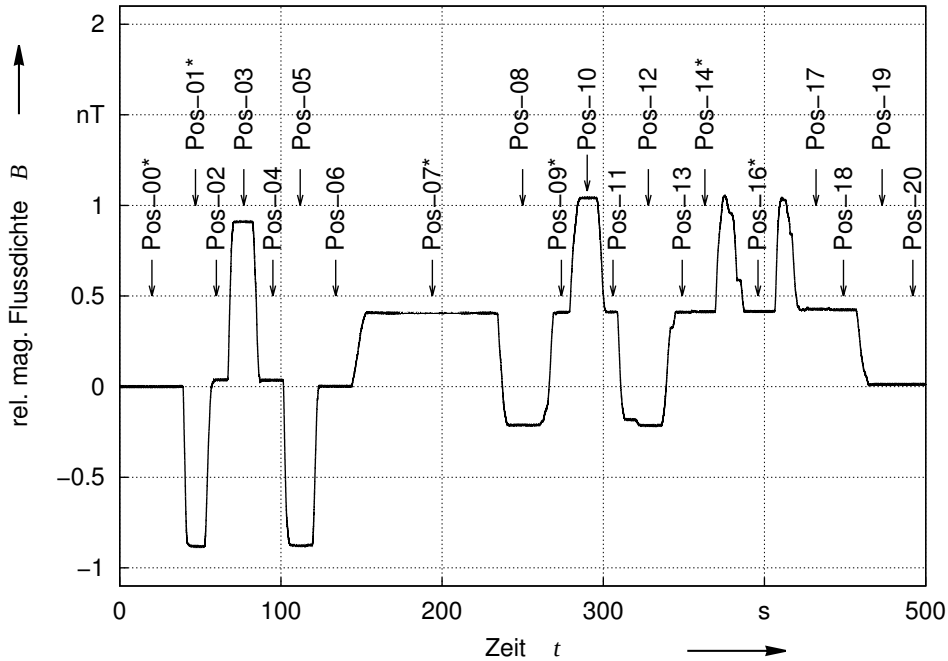


Abbildung 4.8.: Beispiel eines Zeitsignals des SQUIDs $Y0$ während der in Tabelle 4.5 beschriebenen Abläufe. Diese Messung fand im Zentrum des *BMSR*-2 ohne die Erzeugung zusätzlicher magnetischer Felder statt.

5. Charakterisierung des magnetischen Messsystems

5.1. Messzeit des *Cube*-II-Systems

Die verwendeten SQUID-Sensoren vom Typ W9L können bis zu einer Temperatur von $\leq 9\,\mathrm{K}$ eingesetzt werden. Um diese Temperatur zu gewährleisten, muss der Dewar regelmäßig mit flüssigem Helium nachgefüllt werden. Als unterer Grenzwert des Füllstandes des *Cube*-II-Dewar wurden 10 % festgelegt. Ist dieser Füllstand erreicht, muss das Messsystem aus der Schirmung genommen und gefüllt werden. Somit ist der Zeitraum, in der das Messsystem verwendet werden kann, begrenzt und wird im Folgenden als maximale Messzeit bezeichnet. Wird das Messsystem statisch für beispielsweise Rausch- oder Driftmessungen verwendet, so beträgt die maximale Messzeit 20 Stunden. Wird das Messsystem nur verschoben oder rotiert, ist die kurzfristige Erhöhung der Abdampfrate vernachlässigbar. Um die absolute magnetische Flussdichte und den Gradiententensor bestimmen zu können, wird der Dewar um 45° gekippt. Wird zum Beispiel ein Messszenario angenommen, bei dem das System jeweils nach 30 Minuten für zehn Minuten gekippt wird, so verkürzt sich die Messzeit von zuvor 20 Stunden auf rund acht Stunden und ermöglicht damit zwölf Kippbewegungen zwischen zwei Füllzyklen.

5.2. Übersprechen der SQUID-Sensoren

Um das Übersprechen zwischen den SQUID-Sensoren abschätzen zu können, wurde die Rückkoppelspule eines SQUIDs mit einem periodischen Signal betrieben und die Amplitude der selben Frequenz mit den anderen SQUIDs gemessen. Zur Signalerzeugung wurde ein SQUID gewählt, welches mit zwei benachbarten orthogonalen SQUIDs ein Dreibein bildete, um eine maximale Abschätzung für das Übersprechen vornehmen zu können. Zur Signalerzeugung wurde die Rückkoppelspule des SQUIDs $Y6$ genutzt. Als Amplitude wurde eine magnetische Flussdichte am Ort der Rückkoppelspule von rund 1 nT gewählt. Die beiden orthogonalen SQUIDs mit der geringsten Entfernung sind $Z7$ und $X1$. Die Messsiganle der beiden SQUIDs weisen eine Spitzen-Spitzen-Amplitude des von $Y6$ erzeugten Signales von rund 5 pT auf. Die beiden SQUIDs $Y5$ und $Y7$ befinden sich auf der selben

Würfelfläche wie $Y6$, mit einem Abstand der jeweiligen Mittelpunkte der SQUIDs von 25 mm. Sie weisen eine Amplitude von $\leq 3\,\mathrm{pT}$ auf. Mit dem SQUID $Y0$, welches im Zentrum des Würfels positioniert wurde und einen Abstand von rund 28mm aufweist, konnte eien Amplitude von rund 1 pT ermittelt werden. Somit konnte ein maximales Übersprechen von $\leq 0{,}5\,\%$ bestimmt werden, welches damit auch der Abschätzung in Kapitel 4.4 entspricht.

5.3. Position und Ausrichtung der SQUIDs zur Dreh- und Kippachse des *Cube*-II-Systems im Manipulator

Um die Position der einzelnen SQUIDs zu prüfen, wurde eine dünne magnetische Nadel schrittweise an den SQUID-Sensoren (außerhalb des Dewars) vorbeigeführt. Durch den geringen Durchmesser von 1 mm und der im Vergleich zum Abstand zu den SQUIDs (250 mm) kurzen Länge der Nadel von 15 mm, kann sie als magnetischer Dipol angenommen werden. Die Nadel wurde orthogonal zu den feldempfindlichen Flächen der SQUIDs bis zu der Position bewegt, an der das vom SQUID gemessene Signal maximal wurde. Um den Winkel zwischen der Nadel und dem SQUID während der Verschiebung nicht zu verändern, wurde sie in einem Würfel aus *PMMA* fixiert. Um ein systematisches und reproduzierbares Verfahren zu realisieren, wurden auf dem Würfel zwei zueinander orthogonale Linien markiert, welche entlang von Millimeterpapier per Hand ausgerichtet und verschoben wurden. Das Millimeterpapier wurde so an der Kippachse des Manipulators (siehe Abbildung: 4.7 6a) befestigt, dass sich ein zweiachsiges kartesisches Koordinatensystem ergibt, dessen Ursprung die Achse war. Um Störsignale während der Messung zu vermeiden, wurde diese im *BMSR*-2 durchgeführt. Dabei wurde die Nadel entlang des Millimeterpapiers von oben nach unten und von links nach rechts bewegt. Jede Position wurde für eine Sekunde gehalten und die Messwerte über diesen Zeitraum gemittelt. Dazu wurde das Ausgangssignal der FLL-Elektronik mit 250 Hz kontinuierlich abgetastet und gespeichert. Abbildung 5.1 zeigt am Beispiel des SQUIDs $X1$ die gemittelten Amplituden während die Nadel horizontal von 25 mm auf 5 mm verschoben wurde. An den Verlauf der dargestellten Kurve wurde ein Polynom zweiter Ordnung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,997 angenähert und dessen Maximum durch die Nullstelle der ersten Ableitung des angenäherten Polynoms bei 13,3 mm bestimmt. Diese Prozedur wurde für alle 16 SQUIDs jeweils für zwei Raumrichtungen durchgeführt. Dabei wurde eine Unsicherheit bei der Bestimmung der Sensorpositionen durch die Verschiebung der Nadel von $\pm\,2$ mm abgeschätzt. Sie wird durch die Unsicherheit der Position des Millimeterpapiers zur Kippachse und das Ablesen der Position durch die Markierungen auf dem *PMMA*-Würfel dominiert. Auf die Bestimmung der jeweils dritten Raumkomponente der Position, dem Abstand zwischen der Nadel und dem SQUID, wurde auf Grund der unbekannten magnetischen Dipolstärke der Nadel verzichtet. Die ermittelten Positionen aller 16 SQUIDs stimmten, im Rahmen der

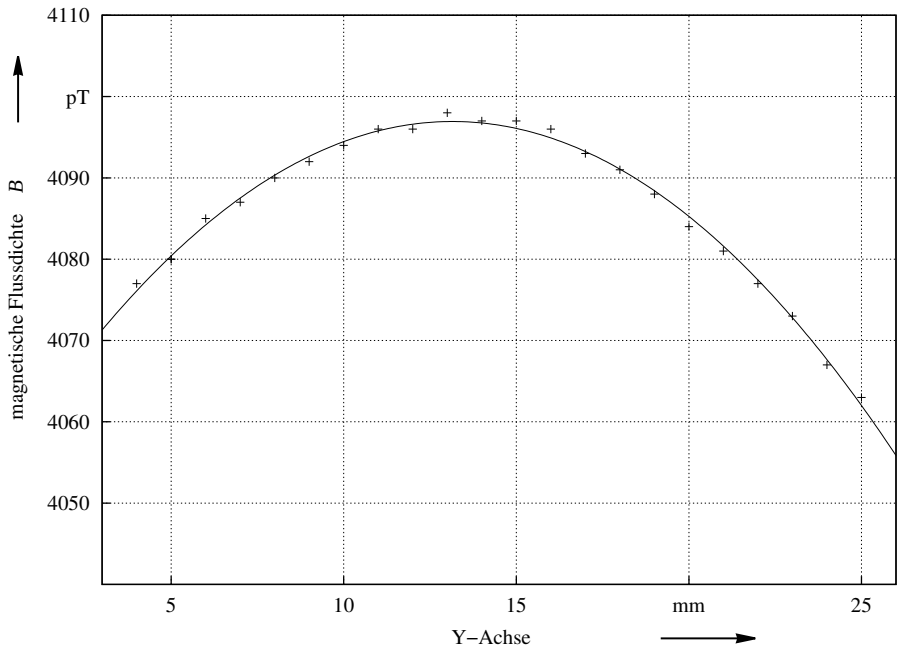


Abbildung 5.1.: Signalamplitude des SQUIDs $X1$ (+) während die Nadel horizontal an diesem vorbeigefahren wurde und Polinomfunktion zweiter genäherte Ordnung (-).

abgeschätzten Messunsicherheit, mit den Positionen bei Raumtemperatur überein. Durch diese Übereinstimmung wurde, bei gleicher Unsicherheit, die drei Raumkomponente der Sensorposition mit der Position bei Raumtemperatur (siehe Tabelle 4.4) angenommen.

Neben der Position des SQUIDs wurde auch deren Verkippung zueinander untersucht. Dazu wurde das Messsystem im Zentrum eines dreiachsigen Helmholtz-Spulen-Systems (HH-Spule) positioniert. Eine HH-Spule besteht aus zwei kurzen Spulen welche parallel auf einer Achse positioniert werden. Ihr Abstand entspricht dabei dem Radius einer Spule. Fließt die selbe elektrische Stromstärke gleichsinnig durch beide Spulen, so erzeugen sie im Zentrum eine homogene Feldverteilung mit einer Vorzugsrichtung entlang ihrer gemeinsamen Achse. Es wurden drei orthogonal zueinander positionierte Helmholtz-Spulen entlang der X-, Y- und der Z-Achse im Zentrum des *BMSR*-2 aufgebaut. Im Folgenden werden diese Spulen verkürzt als HH-X, HH-Y und HH-Z bezeichnet. Da für die Auswertung die Spulen HH-X und HH-Y redundant sind, wurde die HH-Y in dieser Arbeit nicht betrieben. Sie wurde aber aus Gründen der mechanischen Stabilität mit aufgebaut (siehe Abbildung 5.8). Die beiden verwendeten Spulen weisen einen Durchmesser von 160 cm und 140 cm auf, wobei die Größere in X-Richtung installiert wurde. Mit jeweils 60 Windungen Kupferdraht wird ein Strom-zu-Fluss Übertragungsfaktor der beiden HH-Spulen von rund 67 nT/mA (HH-X) und 77 nT/mA (HH-Z) erreicht. Der auf rund $5 \cdot 10^{-4}$ homogene Bereich der beiden HH-Spulen erstreckte sich mit 8 cm für die HH-X und 7 cm für die HH-Z und ist damit größer als der würfelförmige Sensorkopf mit einer Kantenlänge von 5 cm.

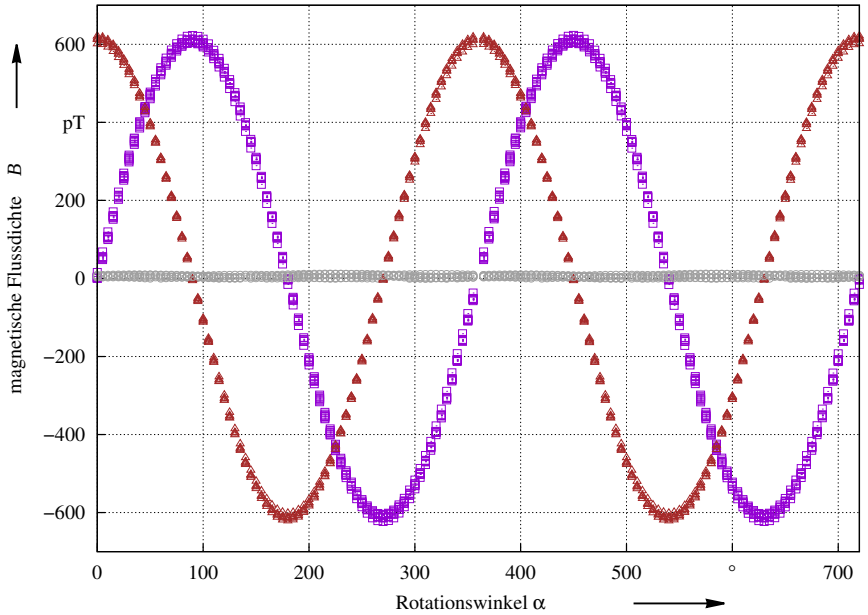


Abbildung 5.2.: Amplitudenverlauf der X-SQUIDs (△), der Y-SQUIDs (□) und der Z-SQUIDs (x) im *Cube*-II während der Rotation des Dewars in einem in X-Richtung ausgerichteten homogenen Hintergrundfeld von rund 600 pT um die zentrale Manipulatorachse um 720 °.

Die beiden HH-Spulen wurden nacheinander mit einem sinusförmigen Strom betrieben. Die Frequenz des Stroms betrug 28 Hz mit einer Amplitude von rund 600 pT. In diesem Wechselfeld wurde der *Cube*-II um die zentrale Achse des Manipulators um 720 ° gedreht und die Signale aller SQUIDs alle 5 ° aufgezeichnet. Nach der Messung wurde für jedes SQUID die Signalamplitude im Frequenzspektrum bei 28 Hz durch ein Programm (Ton-Extraktion) von der Firma *National Instruments* bestimmt. Dies wurde separat für die HH-X und die HH-Z Spule durchgeführt.

Abbildung 5.2 zeigt den Amplitudenverlauf aller 16 SQUIDs während der Drehung im Hintergrundfeld der HH-X Spule. Durch die Rotation ergab sich ein sinus- bzw. cosinusförmiger Verlauf für die in X- und Y-Richtung empfindlichen SQUIDs. Durch die Nulldurchgänge der Amplitudenverläufe zwischen den X- und Y-Sensoren wurde eine mittlere Orthogonalität von $(89,9 \pm 0,5)\,°$ der Sensoren bestimmt. Die Parallelität unter den jeweiligen X- und Y-Sensoren wurde mit besser $\pm 0,5\,°$ bestimmt. Um die Fehlwinkel der in Z-Richtung empfindlichen SQUIDs zu bestimmen, wurden die Spitze-Spitze-Amplituden der vier Sensoren während der 720 ° Rotation ausgewertet. Diese ergaben eine mittlere Orthogonalität zur X- und Y-Ebene von $(89,2 \pm 0,5)\,°$. Um die Verkippung der X- und Y-Sensoren zur Z-Achse bestimmen zu können, wurde die gleiche Messung mit der HH-Z Spule durchgeführt. Ausgewertet wurden die Spitze-Spitze-Amplituden der X- und Y-Sensoren während der Rotation, welche eine mittlere Orthogonalität von $(89,7 \pm 0,1)\,°$ ergaben.

5.4. Magnetische Drift

Um das magnetische Driftverhalten innerhalb magnetisch geschirmter Umgebungen charakterisieren zu können, muss die vom Messsystem selbst verursachte Drift bekannt sein. Dazu wurde das *Cube*-II-System rund eine Stunde nach dem Füllen mit flüssigem Helium im Zentrum des magnetisch geschirmten Raumes *BMSR*-2 positioniert und die magnetische Flussdichte über rund 10,5 Stunden mit einer Abtastrate von 30 Hz gemessen. Die Messung wurde eine Minute nach dem Schließen der *BMSR*-2-Tür gestartet.

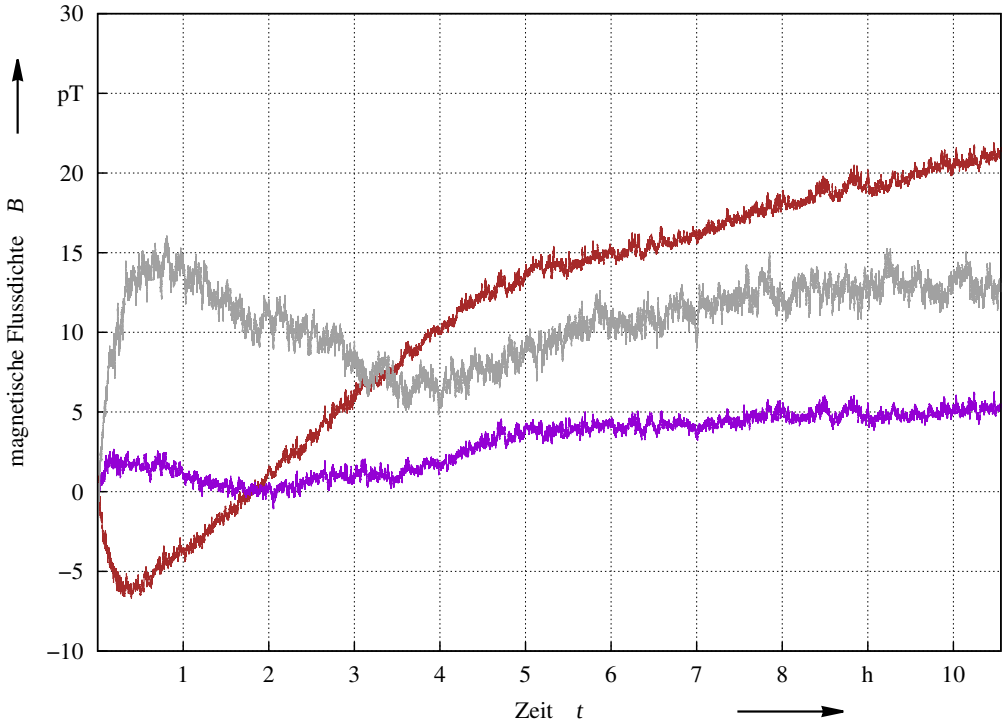


Abbildung 5.3.: Zeitlicher Verlauf der relativen magnetische Flussdichte des SQUIDs $X5$ (braun), des SQUIDs $Y2$ (violett) und des SQUIDs $Z7$ (grau) im *Cube*-II-Dewar im *BMSR-2*

Abbildung 5.3 zeigt exemplarisch für jede Raumrichtung das jeweilige SQUID mit der größten Änderung der magnetischen Flussdichte innerhalb der Messzeit. Zur besseren Darstellung wurde der Mittelwert der ersten 1000 Messwerte des jeweiligen SQUIDs von der gesamten Kurve abgezogen. Für die B_x-Komponente wurde das SQUID $X5$ mit einer maximalen Änderung von 29 pT ausgewählt (Abbildung 5.3 braun). Der Verlauf zeigt zwei konkurrierende Prozesse mit entgegengesetzter Ausrichtung. Der erste Prozess dominiert für 24 Minuten und erzeugt eine Feldänderung von rund 6 pT. Nach Ablauf der 24 Minuten dominiert ein über die gesamte Messzeit steigender Prozess.

Als Referenz für die B_y-Komponente wurde das SQUID $Y2$ mit einer maximalen Änderung der magnetischen Flussdichte über die gesamte Messzeit von rund 5 pT gewählt.

Dabei zeigt sich ebenfalls bei dem in Abbildung 5.3 violett dargestellten Verlauf ein Überschwingverhalten, was auf mehrere konkurrierende Prozesse hinweist. Die mit dem SQUID $Z7$ bestimmte Flussdichte erreicht ein erstes lokales Maximum nach zehn Minuten mit rund 2 pT. Dieser Wert bleibt für rund 30 Minuten konstant bis er wieder auf den Startwert von 0 pT abfällt. Nach rund zwei Stunden steigt das Signal wieder über sechs Stunden auf das globale Maximum von rund 5 pT an und bleibt dann konstant. Somit erreicht sowohl die B_y- als auch die B_z-Komponente einen annähernd stabilen Wert nach rund neun Stunden, während die B_x-Komponente auch nach über 10 Stunden weiter ansteigt.

Die stärkste Änderung der B_z-Komponente wurde mit dem SQUID $Z7$ aufgezeichnet. Der in Abbildung 5.3 grau dargestellte Kurvenverlauf zeigt eine maximale Änderung während der gesamten Messzeit von rund 14 pT. Dieses Maximum wurde nach 48 Minuten erreicht und fällt wieder auf ein lokales Minimum von 6 pT nach rund 4 Stunden ab. Ab diesem Zeitpunkt nähert sich der Messwert des SQUID $Z7$ wieder dem Wert von 7 pT an und bleibt ab dem Erreichen nach rund neun Stunden nahezu konstant.

Um das Driftverhalten des *Cube*-II-Systems von der Drift der magnetischen Flussdichte innerhalb des *BMSR*-2 trennen zu können, wurden parallel SQUIDs des Multikanal-Systems [39] mit aufgezeichnet. Die vom Multikanal-System genutzten SQUIDs wiesen einen Abstand von rund 40 cm zum *Cube*-II-Dewar und somit rund 60 cm zum Zentrum des Sensorkopfes auf. Die unabhängige Datenerfassung des Multikanal-Systems wurde ebenfalls mit einer Abtastrate von 30 Hz betrieben und simultan mit dem *Cube*-II-System gestartet. Auch die Messwerte des Multikanal-Systems wurden um den Mittelwert der ersten 1000 Werte des jeweiligen SQUIDs verringert. Der Dewar des Multikanal-Systems verdampft während der Messzeit von 10,5 Stunden 16 % des Heliumlevels. Durch die somit um rund den Faktor drei geringere Heliumabdampfrate (*Cube*-II-Dewar $\approx 50\,\%$) wurde davon ausgegangen, dass eine durch den Heliumfüllstand verursachte magnetische Drift im Multikanal-Systems geringer ausfällt.

Abbildung 5.4 zeigt den Verlauf der magnetischen Flussdichte, der sich durch die Subtraktion der jeweils in X-, Y- und Z-Richtung empfindlichen SQUID-Sensoren des *Cube*-II- und des Multikanal-Systems ergibt. Die farbliche Zuordnung wurde entsprechend der Abbildung 5.3 gewählt. Diese Darstellung zeigt eine systemabhängige Änderung innerhalb der ersten 3,5 Stunden. Durch die im Vergleich zum *Cube*-II-Dewar geringere relative Abdampfrate des Multikanal Dewars wurde davon ausgegangen, dass diese Abweichung durch das *Cube*-II-System verursacht wurde. Wie in Kapitel 4.6 beschrieben wurde, erzeugt ein thermischer Gradient in einem elektrisch leitfähigen Material ein nach außen messbares Magnetfeld [77]. Eine mögliche Ursache der gezeigten Drift im *Cube*-II-System könnte das noch nicht erreichte thermische Gleichgewicht nach dem Füllen des Dewas sein. Kurz nach dem Befüllen des Dewars mit flüssigem Helium zeigt dieser eine erhöhte Abdampfrate. Dadurch strömt mehr und kälteres Heliumgas durch den Hals und den Isoliereinsatz des

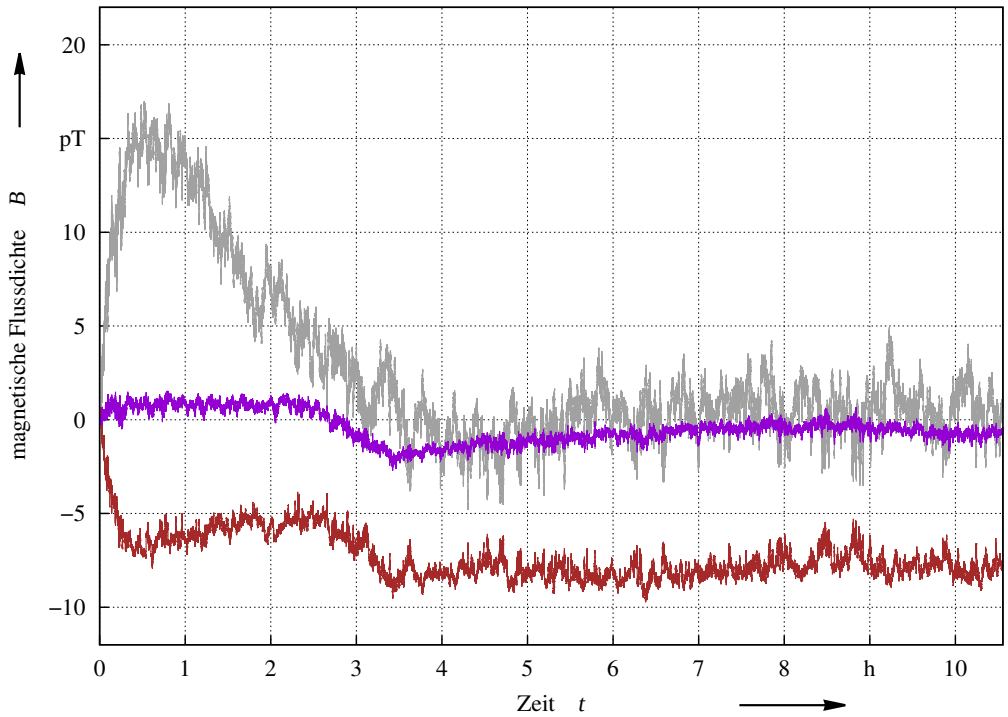


Abbildung 5.4.: Zeitlicher Verlauf der relativen Differenz der magnetischen Flussdichte zwischen dem *Cube*-II-Dewar und dem Multikanal-System im *BMSR*-2. Braun zeigt die relative Differenz zweier in X-, violett zweier in Y- und grau zweier in Z-Richtung empfindlichen SQUID-Sensoren.

Cube-II-Dewars nach außen. Aus diesem Grund war ein Schwerpunkt bei der Entwicklung des Isoliereinsatzes die Minimierung der Kontaktpunkte zwischen dem kalten Heliumgas und elektrisch leitfähigen Flächen. Da jedoch auch ein möglichst geschlossener HF-Schirm um den Dewar realisiert werden sollte, wurde die Trennung nur durch wenige Millimeter GFK realisiert. Neben dem Isoliereinsatz können auch elektrisch leitfähige Strukturen im Vakuumgefäß des Dewars solche Driften verursachen. Es wurde zwar bei der Entwicklung des *Cube*-II-Dewars versucht, solche Materialien zu vermeiden, aus Gründen der geringen Bauhöhe des Dewars konnte jedoch nicht gänzlich auf diese verzichtet werden.

Nach dieser Zeit wird die Drift in beiden Systemen durch eine äußere homogene Drift dominiert, was sich in dem konstanten waagerechten Verlauf der drei Kurven aus Abbildung 5.4 im Vergleich zur Abbildung 5.3 zeigt. Somit kann die starke Drift der B_x-Komponente in Abbildung 5.3 von 29 pT auf eine Drift des Restfeldes innerhalb des *BMSR*-2s zurückgeführt werden.

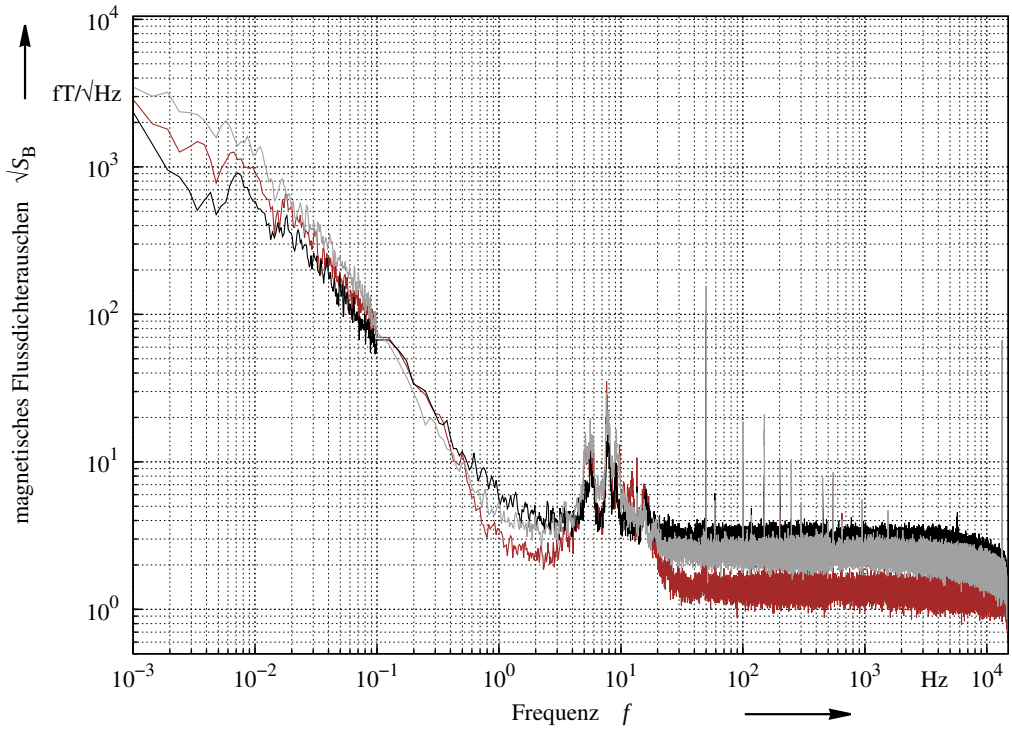


Abbildung 5.5.: Aus drei Messungen zusammengefasstes und 20-fach arithmetisch gemitteltes magnetisches Flussdichterauschen der SQUIDs $X1$ (braun), $Y0$ (schwarz) und $Z5$ (grau) im *Cube*-II-Dewar. Die Bereiche teilen sich auf in 1 mHz bis 99 mHz, 100 mHz bis 499 Hz und 500 Hz bis 15 kHz. Die Messung fand im magnetischen Zentrum des *BMSR*-2 statt.

5.5. Das magnetische Gesamtrauschen

Um das magnetische Rauschen des *Cube*-II-Systems zu charakterisieren, wurde es im magnetischen Zentrum des *BMSR*-2 ausgerichtet und die magnetische Flussdichte aufgezeichnet. Diese Zeitdaten wurden nachträglich mittels einer, von *National Instruments* zur Verfügung gestellten, schnellen Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzraum transformiert. Dabei wurde als Einheit $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ gewählt, was dem Amplitudendichtespektrum der magnetischen Flussdichte mit einer Bandbreite von einem Herz entspricht. Um die Varianz der Rauschdichte zu verringern, wurden die gemessenen Daten in 20 gleich lange Zeitabschnitte unterteilt. Von jedem dieser einzelnen Zeitabschnitt wurde das Frequenzspektrum bestimmt und arithmetisch gemittelt. Um über den gesamten Frequenzbereich von 1 mHz bis 15 kHz bei einer Mittelungszahl von 20 ein Spektrum darstellen zu können, hätte die Messzeit rund sieben Stunden mit einer Abtastrate von 30 kHz (Antialiasing) betragen müssen. Um die Datenmenge gering zu halten und die Berechnung des Spektrums zu vereinfachen, wurden drei Messungen mit den folgenden Abtastraten und Messzeiten durchgeführt:

1. Abtastrate: 300 Hz, Messzeit: 43.200 s (12 h)

2. Abtastrate: 3.000 Hz, Messzeit: 1.000 s

3. Abtastrate: 30.000 Hz, Messzeit: 100 s.

Die sich ergebenden Frequenzspektren wurden übereinander dargestellt, wobei aus der ersten Messung der Bereich von 1 mHz bis 99 mHz, von der zweiten Messung der Bereich von 100 mHz bis 499 Hz und von der dritten Messung der Bereich von 500 Hz bis 15 kHz genutzt wurde. Abbildung 5.5 zeigt dieses Spektrum für die SQUIDs $X1$, $Y0$ und $Z5$. Diese SQUIDs wurden exemplarisch ausgewählt, da sie das höchste weiße magnetische Flussdichterauschen der jeweiligen Richtung bei 98 Hz aufwiesen. So konnte für $X1$ ein weißes Rauschniveau von $\leq 1,6\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, für $Y0$ von $\leq 3,0\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ und für das SQUID $Z5$ von $\leq 2,7\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ ermittelt werden. Damit zeigen diese SQUIDs eine leichte Erhöhung des weißen Rauschniveaus gegenüber den Angaben des Herstellers. Diese Erhöhung wird durch die im *Cube*-II-Dewar verwendete Maylar-Folie sowie das im Innern des Heliumreservoirs fixierte Kupfergeflecht verursacht. Diese Effekte treten ebenfalls im Multikanal-System und im Niedrigfeld Spektrometer der PTB auf [2, 39]. Da das Heliumreservoir eine zylindrische Form besitzt, müssten diese Einflüsse identisch auf die X- und Y-SQUIDs wirken. Wieso es zu einer richtungsunabhängigen Verdopplung des weißen Rauschniveaus von 1,6 $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ auf 3,0 $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ kommt, konnte noch nicht vollkommen aufgeklärt werden. Oberhalb von 14,4 kHz ist die Wirkung des Anitaliasingfilters dominierend.

Der weiße Rauschverlauf wird zwischen 13,4 kHz und 50 Hz von einer Vielzahl von schmalen Störpeaks unterbrochen. Die hohe und sehr schmale Störfrequenz bei 13,321 kHz tritt unabhängig von der magnetischen Schirmung auf. Daher wurde von einer Störung in der Elektronik des Messsystems ausgegangen dessen Ursprung noch nicht geklärt werden konnte. Eine Quelle kann die zu den SQUID-Sensoren nahe FLL-Elektronik sein. Im Vergleich zum Multikanalsystem, bei welchem die Elektronik rund einen Meter entfernt zu den SQUID-Sensoren fixiert wurde, beträgt die Distanz beim *Cube*-II-System maximal 30 cm. Dieser Einfluss muss zu einem späteren Zeitpunkt durch den dezentralen Betrieb der FLL-Elektronik (Adapterkabel) überprüft werden. Bei rund 5,7 kHz dominiert eine rund 70 Hz breite Störung, welche in den Y-SQUIDs mit rund 10 $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ am stärksten ist. Da diese Störung in anderen Schirmungen nicht auftrat, wurde davon ausgegangen, dass es sich um eine Störung im *BMSR*-2 handelte. Unterhalb von 1 kHz werden die Störungen durch Vielfache der Netzfrequenz verursacht, wobei deren Amplituden unter 10 $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ bleiben. Die Netzfrequenz selbst weist dagegen eine Amplitude von rund 60 $\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ auf. Die Ursachen hierfür liegen in dem Netzbetrieb der Datenerfassung sowie der FLL-Elektronik, aber auch an dem fest im *BMSR*-2 montierten und dauerhaft betriebenen Multikanalsystem.

Abbildung 5.6 zeigt detaillierter das niederfrequente Rauschen aus Abbildung 5.5 für den Bereich von 0,8 Hz bis 120 Hz. In diesem Spektrum ist neben den Störungen durch die Netzfrequenz bei 50 Hz und 100 Hz, eine weitere Störung bei 59 Hz und 118 Hz zu erkennen.

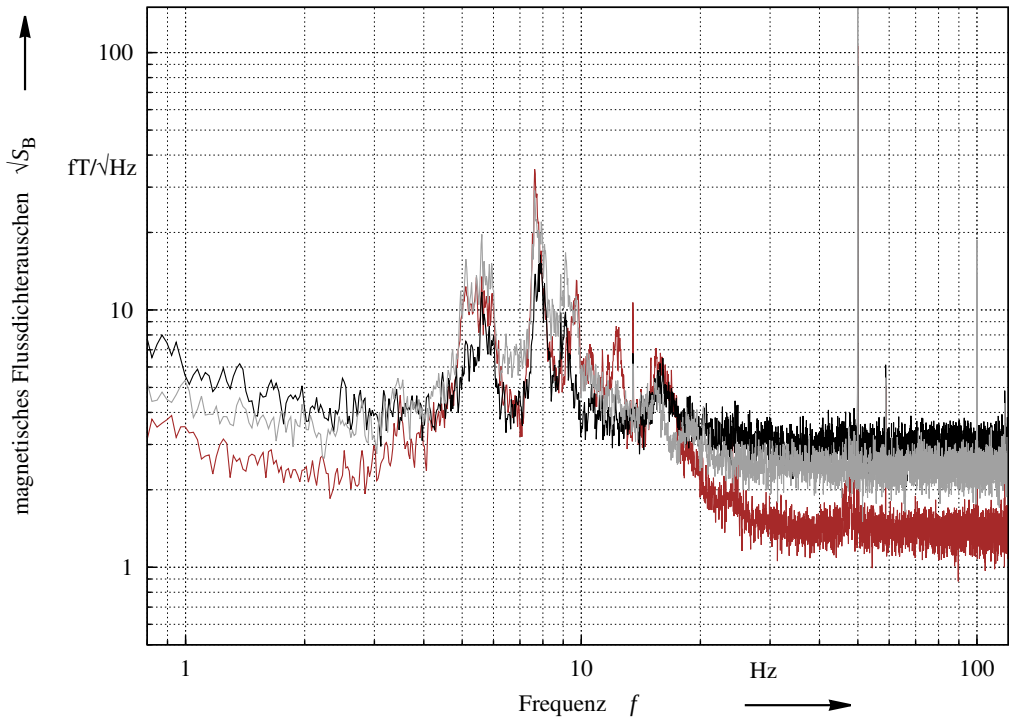


Abbildung 5.6.: Ausschnitt des magnetischen Flussdichterauschens von 0,8 Hz bis 120 Hz aus Abbildung 5.5 (SQUIDs $X1$ (braun), $Y0$ (schwarz), $Z5$ (grau)).

Da diese Störung auch in anderen magnetischen Schirmungen mit dem *Cube*-II-System gemessen werden konnte, wird von einer Quelle im Messsystems selbst ausgegangen. Deren Wirkmechanismus ist jedoch zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht geklärt. Unterhalb von 30 Hz geht der weiße Verlauf des magnetischen Flussdichterauschens in ein 28 Hz breites Artefakt über. Dieses wird maßgeblich durch die beiden mechanischen Eigenresonanzen des *BMSR*-2 um 5,5 Hz und 7,5 Hz dominiert [38]. Dabei schwingt sowohl der *BMSR*-2, das *Cube*-II-System als auch der Sensorkopf im *Cube*-II-Dewar im jeweiligen Hintergrundfeld. Die Amplituden des Artefakts sind somit von der Schwingungsamplitude und dem magnetischen Gradienten abhängig in dem die Sensoren sich bewegen. Innerhalb dieses Artefaktes befindet sich bei 13,5 Hz eine sehr schmale Störung, die nicht mit mechanischen Schwingungen erklärt werden kann.

Unterhalb einer Frequenz von einem Herz gehen die Ausläufer des durch mechanische Schwingungen induzierten Artefakts in einen 1/f-Anstig über (siehe Abbildung 5.5). Die Amplitude des magnetischen Flussdichterauschens liegt bei 1 Hz noch unterhalb von $7\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$. Dieser Anstieg wurde neben dem intrinsischen Rauschen der SQUID-Sensoren, durch urbane Störungen hervorgerufen, welche nicht gänzlich von der Schirmung des *BMSR*-2 gedämpft werden können. Diese durch die Berliner U-Bahn dominierten Störungen haben ihre Hauptkomponente bei rund 10 mHz [39], was sich in der Änderung der Steigung unterhalb dieser Frequenz zeigt. Durch diese Abflachung der Steigung konnte mit dem *Cube*-II-System ein magnetisches Flussdichterauschen bei 1 mHz von unter $4\mathrm{pT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$

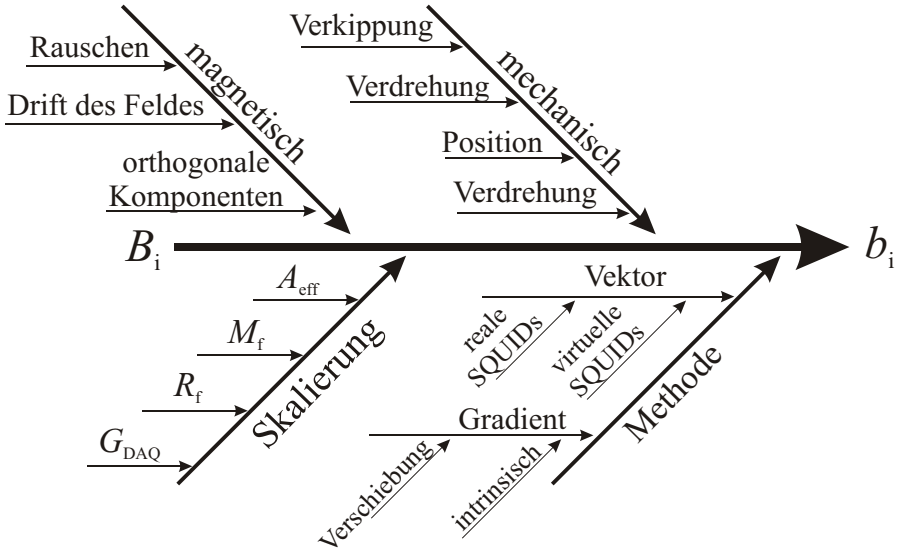


Abbildung 5.7.: Zusammenstellung der einzelnen Einflussgrößen zur Bestimmung der Messunsicherheit

innerhalb des *BMSR*-2 ermittelt werden.

5.6. Betrachtung der Messunsicherheit bei der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte

5.6.1. Einführung

Um die Messunsicherheit bestimmen zu können, wurden alle Einflussgrößen zusammengetragen und in der Abbildung 5.7 als sogenanntes Ichikawa Diagramm zusammengefasst. Es setzt sich aus den drei Einflussgrößen: Skalierung, mechanisch und magnetisch zusammen, welche die unterschiedlichen Beiträge zur Messunsicherheit beschreiben. Die vierte Einflussgröße ist die Methode, die zur Ermittlung der gesuchten Größe eingesetzt wird.

Im folgenden werden die in Abbildung 5.7 dargestellten Einflussgrößen auf die Messunsicherheit beschrieben und am Beispiel einer Messung (R01) im Restfeld des *BMSR*-2 betrachtet und bewertet. Dies wurde in der folgenden Reihenfolge durchgeführt.

- Die Skalierung der Messwerte (Kap. 5.6.2).
- Die Bestimmung der einzelnen SQUID Offsets (Kap. 5.6.3).
- Die Bestimmung der drei Vektorkomponenten sowie des Betrags der magnetischen

Flussdichte (Kap. 5.6.4) mit:

  - dem zentralen SQUID $Y0$,
  - und den drei zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$.

- Die Bestimmung der neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte (Kap. 5.6.5) mit der:
  - intrinsischen Methode und
  - und der Methode der Verschiebung des Messsystems.

Am Ende dieses Kapitels wurden die Messunsicherheiten der zwei Methoden der Vektorbestimmung und der Gradientenbestimmung gegenübergestellt.

Die Bestimmung der Messunsicherheit wurde an Hand des „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ kurz *GUM* durchgeführt. Diese Richtlinie beschreibt das Vorgehen bei der Bestimmung der Messunsicherheit, um die ermittelten Messgrößen national und international vergleichen zu können [78]. Das gesuchte Ergebnis wird mit:

$$Y = y \pm U = y \pm k \cdot u_{\mathrm{c}}(y) \tag{5.1}$$

angegeben, wobei mit Y die Ausgangs- bzw. gesuchte Größe und y als dessen bester Schätzwert bezeichnet wird. Das Intervall von $y - U$ bis $y + U$ beschreibt den Bereich, von dem erwartet wird, dass er einen bestimmten Anteil der Werte umfasst, die Y zugeordnet werden. Das durch die erweiterte Messunsicherheit U begrenzte Intervall ergibt sich durch die Multiplikation der kombinierten Standardmessunsicherheit $u_{\mathrm{c}}(y)$ mit dem Erweiterungsfaktor k. Ist $u_{\mathrm{c}}(y)$ normalverteilt und der Erweiterungsfaktor $k = 2$, so umfasst dieser Bereich 95,5 % aller Werte für Y [78]. Um die Ausgangsgröße Y zu bestimmen, muss in den meisten Fällen eine mathematische Funktion f:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_{\mathrm{N}}) \tag{5.2}$$

gelöst werden, welche von den Eingangsgrößen X_{i} abhängt. Um die kombinierte Standardabweichung $u_{\mathrm{c}}(y)$ bestimmen zu können, müssen die einzelnen Standardunsicherheiten $u(x_{\mathrm{i}})$ der Eingangsgrößen X_{i} gewichtet berücksichtigt werden. Diese Wichtung wird über den Empfindlichkeitskoeffizienten c_{i} erreicht, welcher sich aus der jeweiligen partiellen Ableitung:

$$c_{\mathrm{i}} = \frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}} \tag{5.3}$$

der Funktion f (siehe Gl. 5.2) nach X_{i} ergibt. Die kombinierte Standardmessunsicherheit

$u_\mathrm{c}(y)$ kann dann mit Gleichung 5.4 bestimmt werden.

$$u_\mathrm{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (c_\mathrm{i} \cdot u(x_\mathrm{i}))^2} \tag{5.4}$$

5.6.2. Skalierung der Messwerte

Die mit Skalierung bezeichnete Gruppe in Abbildung 5.7 beschreibt die Gesamtskalierung G^ij des Messwertes, welcher mit der Datenerfassung gespeichert wird und für jeden Messwert berücksichtigt werden muss. Dabei ergibt sich G^ij nach Gleichung 5.5 aus dem Produkt des Fluss-zu-Spannung Koeffizienten $G^\mathrm{ij}_\mathrm{FLL}$ (Gl. 4.1) und dem Verstärkungsfaktors der Datenerfassung G_DAQ zu:

$$G^\mathrm{ij} = G_\mathrm{FLL} \cdot G_\mathrm{DAQ} = \frac{A_\mathrm{eff}}{R_\mathrm{f} \cdot M^\mathrm{ij}_\mathrm{f}} \cdot G_\mathrm{DAQ}. \tag{5.5}$$

Da die Stromempfindlichkeit M^ij_f SQUID spezifisch ist, stehen die Indexe ij für die in der Tabelle 4.4 aufgelisteten 16 SQUIDs. Der Index i steht für X,Y, Z und j für die Zahlen von 0 bis 8. Um die einzelnen Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen aus Gleichung 5.5 zu bestimmen, wurden die Angaben der Hersteller bzw. der Entwickler über Fertigungs- und Bauteiltoleranzen genutzt und als Halbbreite Δa der Grenzen einer Rechteckverteilung angenommen. Damit ergibt sich die Standardunsicherheit $u(x_\mathrm{i})$ nach [78] durch:

$$u(x_\mathrm{i}) = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}} \tag{5.6}$$

Die einzelnen Eingangsgrößen X_i, deren Standardunsicherheiten $u(x_\mathrm{i})$ sowie die jeweiligen Sensitivitätskoeffizienten c_i wurden in der Tabelle 5.1 zusammengefasst. Die Größe M^ij_f wurde vom Hersteller für jedes SQUID einzeln bestimmt und bei der Berechnung der einzelnen Skalierungsfaktoren separat berücksichtigt. Zur besseren Übersicht wurde in der Tabelle 5.1 der Mittelwert dieser 16 Stromempfindlichkeiten angegeben. Mit der Gleichung 5.4 und den in Tabelle 5.1 zusammengestellten Größen konnte ein mittlerer Gesamtskalierungsfaktor von (2,72±0,05) nT/V bestimmt werden. Wendet man diese Abschätzung auf eine messtechnisch ermittelte Spannung von beispielsweise 0,368 V an, so kann diesem Messwert eine Flussdichte von $(1,001 \pm 0,015)$ nT zugeordnet werden. Zusätzlich wurde eine Spalte mit der Bezeichnung *index* in der Tabelle 5.1 eingefügt, welche den Prozentsatz angibt mit welchem die Varianz des Ergebnisses auf die Varianz der entsprechenden Eingangsgröße im Budget zurückgeht [79]. Dieser Index der einzelnen Eingangsgrößen zeigt, dass die Beiträge A_eff und M_f mit jeweils 48 % die Unsicherheit der Gesamtskalierung dominieren.

Tabelle 5.1.: Zusammenstellung der kombinierten Messunsicherheit der Gesamtskalierung G^{ij} und deren Beiträge. $f =$ Gleichung 5.5

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	index
A_{eff} [T/Φ]	460E^{-12}	2,7E^{-12}	$\frac{A_{\mathrm{DAQ}}}{R_{\mathrm{f}} \cdot M_{\mathrm{f}}}$	=	5,9	48 %
M_{f} [A/Φ]	16,88E^{-6}	96E^{-9}	$\frac{A_{\mathrm{DAQ}} \cdot (-A_{\mathrm{eff}}) \cdot R_{\mathrm{f}}}{(R_{\mathrm{f}} \cdot M_{\mathrm{f}})^2}$	=	-160E^{-6}	48 %
R_{f} [Ω]	10E^{3}	10	$\frac{A_{\mathrm{DAQ}} \cdot (-A_{\mathrm{eff}}) \cdot M_{\mathrm{f}}}{(R_{\mathrm{f}} \cdot M_{\mathrm{f}})^2}$	=	-270E^{-15}	0 %
G_{DAQ}	1	1,7E^{-3}	$\frac{A_{\mathrm{DAQ}}}{R_{\mathrm{f}} \cdot M_{\mathrm{f}}}$	=	2,7E^{-9}	4 %
$G^{\mathrm{ij}} = (2{,}72 \pm 0{,}05)\,\mathrm{nT/V}$						

5.6.3. Bestimmung der einzelnen SQUID Offsets

Eine Besonderheit des *Cube*-II-Systems ist die Möglichkeit, neben relativen Messungen auch die Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte bestimmen zu können. Dazu muss jedoch der sich durch das beschriebene Messprinzip des SQUIDs ergebende Offset bestimmt und vom Messwert abgezogen werden, um die absolute magnetische Flussdichte zu erhalten. In dieser Arbeit wurden zwei Methoden genutzt, um den Offset aller 16 eingesetzten SQUID-Sensoren zu ermitteln. Die erste und direkte Methode basiert auf der in [66] und [38] beschriebenen relativen Bewegung der Flächennormalen des Sensors in einem Hintergrundfeld. Diese Methode wurde für die drei SQUIDs $Y0$, $X1$ und $X3$ und die beiden virtuellen zentralen SQUIDs $vX0$ und $vY0$ umgesetzt. Die Offsets der anderen 12 SQUIDs und des dritten virtuellen SQUIDs $vZ0$ wurden mit der zweiten Methode bestimmt. Bei dieser wird mit bereits offsetkompensierten Sensoren die magnetische Flussdichte an einem Ort gemessen und diese Werte als Referenz für die Bestimmung der gesuchten SQUID Offsets der anderen SQUIDs genutzt. Im Folgenden werden die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Offsets abhängig von den beiden Methoden betrachtet.

Methode-1

Mit Hilfe des Manipulators wurden die Flächennormale der drei SQUID-Sensoren $Y0$, $X1$ und $X3$ im Zentrum des Manipulators um dessen Z-Achse rotiert. Nach Gleichung 2.10 entspricht der Mittelwert aus den beiden Messwerten vor und nach der Drehung dem Offset des jeweiligen SQUIDs. Um die Messunsicherheit für die Bestimmung der Offsets mit der Methode-1 durchführen zu können, wurde Gleichung 2.10 zu:

$$O^{\mathrm{ij}} = \frac{(U^{\mathrm{ij}} \cdot G^{\mathrm{ij}}) - (U^{\mathrm{ij'}} \cdot G^{\mathrm{ij}}) + B_{\mathrm{Rot}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Pos}}}{2} + B_{\mathrm{Kipp}} \tag{5.7}$$

erweitert. Dabei beschreibt U^{ij} und $U^{\mathrm{ij'}}$ die mit der Datenerfassung aufgezeichnete Ausgangsspannung des SQUIDs ij vor und nach der 180 ° Drehung. Jeder gespeicherte Mess-

wert wurde aus dem arithmetischen Mittelwert mit einer Messzeit von 1 s bestimmt. Zusätzlich zum Mittelwert wurde auch dessen Standardabweichung gespeichert, um jedem Messwert eine normalverteilte Standardunsicherheit $u_{\mathrm{i}}(U^{\mathrm{ij}})$ zuordnen zu können. Diese ergibt sich durch den Quotienten aus der experimentell bestimmten Standardabweichung σ und der Wurzel der Einzelmessungen n [78] durch:

$$u_{\mathrm{i}}(U^{\mathrm{ij}}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \tag{5.8}$$

Die zusätzlichen Summanden B_{Kipp}, B_{Rot}, B_{Δ} und B_{Pos} wurden in Gleichung 5.7 eingefügt, um die magnetischen und mechanischen Beiträge zur Messunsicherheit zu beschreiben. Dabei wurden den Eingangsgrößen jeweils der Wert Null mit einer Standardmessunsicherheit zugeordnet. Damit konnte die Gleichung 2.10 erweitert werden ohne den Wert des Messergebnisses zu beeinflussen, aber den Einfluss dieser Größe auf die kombinierte Standardmessunsicherheit. Dies ist ein mögliches Vorgehen, wobei alle bekannten systematischen Abweichungen korrigiert werden sollen [78].

B_{Kipp}

Im Idealfall würde die Flächennormale der X- und Y- SQUIDs keine Z-Komponente aufweisen während es um die Z-Achse 180 ° rotiert wird. In Kapitel 5.3 konnte jedoch gezeigt werden, dass die in X- und Y-Richtung ausgerichteten SQUIDs eine Orthogonalität zur Z-Achse von (89,9 $\pm$ 0,5) ° aufweisen. Somit ist das SQUID auch auf die B_{z}-Komponente der magnetischen Flussdichte empfindlich, was sich durch die 180 ° Rotation nicht aufhebt. Diese von der B_{z}-Komponente abhängige Unsicherheit bei der Bestimmung des Offsets wurde in Gleichung 5.7 durch den Beitrag B_{Kipp} beschrieben. Da diese Unsicherheit auf beide Messwerte vor und nach der Rotation wirkt, wurde sie nicht wie die anderen Unsicherheiten halbiert. Um die Standardmessunsicherheit von B_{Kipp} zu bestimmen, wurde eine Abweichung der Orthogonalität zur Z-Achse von $\pm\,0,5\,^{\circ}$ berücksichtigt (siehe Kapitel 5.3) und der sich damit ergebende Beitrag im SQUID durch:

$$u(B_{\mathrm{Kipp}}) = \frac{sin(0,5\,^{\circ}) \cdot B_{\mathrm{z}}}{\sqrt{3}}. \tag{5.9}$$

bestimmt. Dabei wurde eine Rechteckverteilung angenommen mit einer Halbbreite von $sin(0,5\,^{\circ}) \cdot B_{\mathrm{z}}$. Bei dieser Abschätzung wurde die Korrelation zwischen der Standardmessunsicherheit von B_{Kipp} und der der B_{z}-Komponente nicht berücksichtigt.

B_{Rot}

Um das SQUID um 180 ° zu rotieren wurde der in Kapitel 4.8 beschriebene Manipulator eingesetzt. Durch Löcher in dem Drehgestell und der Grundplatte konnte eine Unsicherheit bei der Realisierung der 180 ° von $\leq \pm 0{,}5\,^{\circ}$ erzielt werden. Um diese Unsicherheit bei der Bestimmung des SQUID Offsets abbilden zu können, wurde in Gleichung 5.7 der Beitrag B_{Rot} eingefügt. Wie zuvor bei B_{Kipp} wird der Wert von B_{Rot} mit Null angenommen

und diesem die Standardmessunsicherheit $u(B_{\mathrm{Rot}})$ zugeordnet. Diese Unsicherheit ergibt sich aus dem Sinus des Fehlwinkels von $\pm 0,5\,^{\circ}$ mit welcher die vermeintlich orthogonale Komponente unterschätzt und die parallele Komponente überschätzt wird. Dieser Beitrag wurde ebenfalls als Halbbreite einer Rechteckverteilung angenommen, wodurch sich die Standardmessunsicherheit:

$$u(B_{\mathrm{Rot}}) = \frac{sin(0,5^{\circ})(B_{\mathrm{x}} + B_{\mathrm{y}})}{\sqrt{3}}. \tag{5.10}$$

ergibt. Da sich diese Unsicherheit nur auf den Messwert nach der Rotation auswirkt, geht B_{Rot} im Gegensatz zu B_{Kipp} mit einem Faktor 0,5 ein. Wie schon zuvor, wurde bei dieser Abschätzung keine Korrelation zwischen der Standardmessunsicherheit von B_{Rot} und der, der B_{x}- und B_{y}-Komponente berücksichtigt.

B_{Δ}

Da für die Bestimmung des Offsets zwei Messwerte miteinander verrechnet werden, die zeitlich versetzt gemessen wurden, muss die magnetische Drift während dieser Zeit berücksichtigt werden. Dies wurde in Gleichung 5.7 durch den Beitrag B_{Δ} abgebildet. Dabei wird der Wert von B_{Δ} ebenfalls mit Null angenommen und diesem Wert die Standardmessunsicherheit $u(B_{\Delta})$ zugeordnet. Um diese zu ermitteln, wurde die Reproduzierbarkeit während der Rotation berücksichtigt. Wie in der Tabelle 4.5 dargestellt, werden während der Rotation mehrere redundante Positionen angefahren und die magnetische Flussdichte dort gemessen. Die Standardmessunsicherheit $u(B_{\Delta})$ wurde als eine Rechteckverteilung angenommen, dessen Halbbreite sich aus der mittleren Abweichung zwischen den redundanten Messwerten des jeweiligen SQUIDs in der $0\,^{\circ}$, $90\,^{\circ}$ und $180\,^{\circ}$ Positionen ergibt. Da die magnetische Drift nur den Messwert nach der $180\,^{\circ}$ Rotation beeinflusst geht auch dieser Beitrag im Gegensatz zu B_{Kipp} mit einem Faktor 0,5 in Gleichung 5.7 ein.

$B_{\mathbf{Pos}}$

Die Abweichung der SQUID Positionen zwischen Raumtemperatur und 4,2 K wurde in Kapitel 5.3 mit maximal $\pm\,2$ mm ermittelt. Durch die für die Offsetbestimmung notwendige Rotation der SQUID Fläche um die $\pm\,2$ mm verschobene Achse bewegt sich das Zentrum der SQUID Fläche um $\pm\,4$ mm. Damit muss die Änderung der magnetischen Flussdichte entlang dieser Strecke bei der Bestimmung des Offsets berücksichtigt werden. Dies wurde in Gleichung 5.7 durch den Beitrag B_{Pos} abgebildet und dessen Wert ebenfalls mit Null angenommen. Die Standardmessunsicherheit $u(B_{\mathrm{Pos}})$ wurde als rechteckverteilt angenommen, wobei sich dessen Halbbreite aus dem Produkt der Verschiebung des Sensors um 4 mm und dem Gradienten der magnetischen Flussdichte g_{xy} respektive g_{yx} ergibt. Diese Gradienten werden durch die Verschiebung des Messsystems um 2,5 cm entlang der im Manipulator vorgegebenen Führungsspur bestimmt.

Diese Betrachtung der kombinierten Messunsicherheit wurde am Beispiel der Messung

R01 für das zentrale SQUIDs $Y0$ in Tabelle A.6 auf Seite 146 zusammengestellt. Dafür wurden die einzelnen Eingangsgrößen aus Gleichung 5.7 zusammengefasst und die beiden Messwerte in den Positionen des Manipulators Pos-00 und Pos-02 (siehe Tabelle 4.5) genutzt. Für dieses Beispiel konnte ein Offset O^{Y0} von (335 ± 9) pT bestimmt werden. Der Index dieser Betrachtung zeigt, dass die beiden Beiträge B_{Rot} und G^{Y0} mit 57 % respektive 40 % die kombinierte Messunsicherheit bei der Bestimmung des SQUID Offsets deutlich dominieren. Bei der Bestimmung der Offsets von $X1$ und $X3$ wird dieselbe Unsicherheitsbetrachtung durchgeführt ausgenommen der Bestimmung von B_{Δ}. Wie in der Tabelle 4.5 dargestellt, werden die SQUIDs von der Position Pos-14* zur Pos-15* direkt um 180 ° gedreht ohne Messwerte in Zwischenpositionen aufzuzeichnen. Die darauffolgende Pos-16* entspricht dann wieder der Pos-14*, wodurch die magnetische Drift (u(B_{Δ})) zwischen Pos-14* und Pos-16* durch die kürzere Zeit kleiner im Vergleich zur Bestimmung des Offsets von $Y0$ ist. Am Beispiel der Messung R01 führt diese Verkürzung zu einer Verringerung der Standardmessunsicherheit $u(B_{\Delta})$ von rund 1 pT auf unter 0,5 pT.

Um die drei Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte simultan bestimmen zu können, werden die drei zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ durch die in Kapitel 3.3 beschriebene Mittelwertbildung berechnet. Der Offset der virtuellen SQUIDs $vX0$ und $vY0$ wird durch dieselbe 180 ° Rotation bestimmt wie zuvor für das reale SQUID $Y0$. Dazu wurde die Gleichung 5.7 um jeweils die Messwerte vor und nach der 180 ° Drehung der einzelnen realen SQUIDs auf den Flächen des Sensorkopfes zu:

$$\begin{aligned} O^{\mathrm{vi0}} = & \frac{(U^{\mathrm{i1}} + U^{\mathrm{i1'}})G^{\mathrm{i1}} + (U^{\mathrm{i3}} + U^{\mathrm{i3'}})G^{\mathrm{i3}} + (U^{\mathrm{i5}} + U^{\mathrm{i5'}})G^{\mathrm{i5}} + (U^{\mathrm{i7}} + U^{\mathrm{i7'}})G^{\mathrm{i7}}}{8} \\ & + \frac{2B_{\mathrm{Kipp}} + B_{\mathrm{Rot}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Pos}}}{2} \end{aligned} \tag{5.11}$$

erweitert, wobei der Index i für die Raumrichtung x bzw. y steht. Die zusätzlichen Beiträge B_{Rot}, B_{Δ} und B_{Pos} wurden halbiert, da sie nur die Messung nach der Rotation beeinflussen.

In den Tabellen A.17 und A.18 auf den Seiten 152 und 153 wurden die Betrachtungen der kombinierten Messunsicherheit der Bestimmung der Offsets der zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$ und $vY0$ am Beispiel der Messung R01 dargestellt. Für dieses Beispiel konnte der Offset von O^{vX0} mit (-278 ± 8) pT und O^{vY0} mit (-381 ± 8) pT bestimmt werden. Der Index in den Tabellen A.17 und A.18 zeigt, dass die Unsicherheit der 180 ° Rotation die Messunsicherheiten mit jeweils 82 % und 70 % dominiert.

Der Offset des zentralen virtuellen SQUIDs $vZ0$ konnte nicht auf diese Weise bestimmt werden, da der Dewar nicht um 180 ° gekippt werden konnte. Die Unsicherheit der Bestimmung des Offsets wurde mit der zweiten Methode ermittelt, welche im Folgenden erst für die noch fehlenden 12 realen SQUIDs und dann für das virtuelle SQUID $vZ0$ beschrieben wird.

Methode-2

Um die Bestimmung der SQUID Offsets möglichst effizient und mit möglichst wenig mechanischem Aufwand zu erreichen, wurden lediglich drei Offsets von den insgesamt 16 realen SQUIDs direkt durch eine 180 ° Rotation bestimmt. Die Offsets der restlichen 12 realen SQUIDs und des virtuellen $vZ0$ SQUIDs wurden indirekt durch Referenzmessungen ermittelt. Dazu wurde an mehreren Orten mit den zuvor Offsetkorregierten SQUIDs und danach an denselben Orten mit den restlichen SQUIDs gemessen. Damit konnten die noch fehlenden Offsets durch:

$$O^{\mathrm{ij}} = U^{\mathrm{ij}} - U^{\mathrm{X1}} - O^{\mathrm{X1}} + B_{\mathrm{Kipp}} + B_{\mathrm{Rot}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Pos}} \tag{5.12}$$

für $i = \mathrm{x}$, y und $j = 1$, 5,

$$O^{\mathrm{ij}} = U^{\mathrm{ij}} - U^{\mathrm{X3}} - O^{\mathrm{X3}} + B_{\mathrm{Kipp}} + B_{\mathrm{Rot}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Pos}} \tag{5.13}$$

für $i = \mathrm{x}$, y und $j = 3$, 7 und

$$O^{\mathrm{Yj}} = U^{\mathrm{Yj}} - U^{\mathrm{X6}} - O^{\mathrm{X6}} + B_{\mathrm{Kipp}} + B_{\mathrm{Rot}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Pos}} \tag{5.14}$$

für $j = 2$, 6 bestimmt werden. Für die in X- und Y-Richtung empfindlichen SQUIDs wird die Referenzmessung durch die 180 ° Drehung und die spezielle rotationssymmetrische Anordnung der SQUIDs erreicht. Neben der Unsicherheit der zuvor bestimmten Offsets wurde weiterhin die magnetische Drift B_{Δ} während der Rotation, die Abweichungen zwischen den einzelnen Messorten B_{Pos} und die Verkippung B_{Kipp} sowie Verdrehung der Sensoren B_{Rot} berücksichtigt. Da die Bestimmung der Offsets während der selben Rotationsbewegung wie bei der Methode-1 genutzt wurde, sind dieselben Werte für die zusätzlichen Unsicherheiten eingesetzt worden.

Für das SQUID $Y1$ konnte beispielsweise in der Messung R01 der Offset O^{Y1} mit (-425 ± 17) pT bestimmt werden. Der Index in Tabelle A.7 Seite 147 zeigt, dass die Unsicherheit der Rotation die Messunsicherheit mit 65 % dominiert. Die Betrachtung der Messunsicherheit für die Bestimmung der Offsets aller SQUIDs wurde als Tabellen A.1 bis A.19 dem Anhang A beigefügt. Die innerhalb der Messung R01 im *BMSR*-2 bestimmten SQUID Offsets mit deren kombinierten erweiterten Messunsicherheiten wurden in der Tabelle 5.2 zusammengestellt und auf Seite 79 dargestellt.

Um den Offset der in Z-Richtung empfindlichen SQUIDs zu bestimmen, wurden die Y-SQUIDs als Referenzsensoren genutzt. Während der Pos-07* ist der Dewar 45 ° um die X-Achse des Sensorkopfes gekippt. Wird er in dieser Position 180 ° um die Z-Achse des Manipulators gedreht (Pos-09*), so wird die magnetische Flussdichte an denselben Orten sowohl von den Z-SQUIDs als auch von den Y-SQUIDs gemessen und die Offsets der

Z-SQUIDs können durch:

$$O^{\mathrm{Zj}} = U^{\mathrm{Zj}} - U^{\mathrm{Yj}} - O^{\mathrm{Yj}} + B_{\mathrm{Kipp}} + B_{\mathrm{Rot}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Pos}} \tag{5.15}$$

für $j = 1,\ 3,\ 5,\ 7$ bestimmt werden. Da die Offsets der Z-SQUIDs somit indirekt über die Y-SQUIDs bestimmt werden, erhöht sich deren Unsicherheit um die Unsicherheit der Offsets der Y-SQUIDs. Dabei wurden die Gleichungen 5.12 und 5.13 auf die Y- und Z-SQUIDs angepasst und die Messpunkte entsprechend der Pos-07* und -08* aus Tabelle 4.5 genutzt. Es wurde eine kombinierte erweiterte Messunsicherheit für die Bestimmung der Offsets der Z-SQUIDs von $\pm\,24\,\mathrm{pT}$ bis $\pm\,29\,\mathrm{pT}$ für die Messung R01 ermittelt. Durch die somit bekannten Offsets der Z-SQUIDs könnte ebenfalls der Offset des zentralen virtuelle Z-SQUID $vZ0$ bestimmt werden. Um die Unsicherheit so gering wie möglich zu halten, wurde jedoch das zentrale reale SQUID $Y0$ als Referenzsensor genutzt. Durch die Kippung des Sensorkopfes um die X-Achse ($45\,^{\circ}$) und des zuvor bestimmten Offsets O^{Y0} von $Y0$, kann der Offset O^{vZ0} des zentralen virtuelle Z-SQUID $vZ0$ durch:

$$O^{\mathrm{vZ0}} = U^{\mathrm{vZ0}} - \frac{U^{\mathrm{Y0}} \cdot G^{\mathrm{Y0}} - O^{\mathrm{Y0}} - B_{\mathrm{y}} \cdot cos(\alpha)}{sin(\alpha)} + B_{\mathrm{Kipp,Z}} + B_{\Delta,\mathrm{Kipp}} + B_{\mathrm{Pos}}. \tag{5.16}$$

bestimmt werden. Dabei entspricht B_{y} der durch $Y0$ ermittelten Vektorkomponente der magnetischen Flussdichte und α dem Winkel um den das Zentrum des Sensorkopfes gekippt wurde. Die zusätzlichen Terme $B_{\mathrm{Kipp,Z}}$ und B_{α} dienen der Abschätzung der Messunsicherheit und wurden wie bei der Methode-1 mit einem Wert Null angenommen. Die Standardunsicherheit $u(B_{\mathrm{Kipp,Z}})$ wurde durch die in Kapitel 5.3 beschriebene Orthogonalität der Z-SQUIDs zur X- und Y-Achse von $(89,2\ \pm\ 0,5)\,^{\circ}$ bestimmt. Dieser Beitrag wurde als rechteckverteilt angenommen, wobei die Halbbreite durch:

$$u(B_{\mathrm{Kipp,Z}}) = \frac{cos(89,2^{\circ}) \cdot (B_{\mathrm{x}} + B_{\mathrm{y}})}{\sqrt{3}} \tag{5.17}$$

bestimmt wurde. $B_{\Delta,\mathrm{Kipp}}$ wurde ebenfalls mit dem Wert Null angenommen, wobei deren Standardunsicherheit $u(B_{\Delta,\mathrm{Kipp}})$ der relativen Änderung der magnetischen Flussdichte entspricht, die nach dem Kippen des Dewar um $45\,^{\circ}$ über 100 Sekunden mit dem Y_0 SQUID ermittelt wurde. Diese Änderung wurde als Halbbreite einer Rechteckverteilung interpretiert, wodurch dieser Wert durch $\sqrt{3}$ geteilte wurde, um $u(B_{\Delta,\mathrm{Kipp}})$ zu bestimmen. Der Wert U^{vZ0} in Gleichung 5.16 entspricht dabei dem Mittelwert der vier in Z-Richtung empfindlichen SQUIDs:

$$U^{\mathrm{vZ0}} = \frac{U^{\mathrm{Z1}} + U^{\mathrm{Z3}} + U^{\mathrm{Z5}} + U^{\mathrm{Z7}}}{4}, \tag{5.18}$$

wobei die Messwerte direkt vor der Kippung des Sensorkopfes aufgezeichnet wurden (Pos. 06 Tabelle 4.5).

Die bei der Bestimmung von O^{vZ0} abgeschätzte kombinierte erweiterte Messunsicherheit

wurde in der Tabelle A.19 Seite 154 dargestellt. Es konnte ein Offset für $vZ0$ von -74 pT, mit einer kombinierten erweiterten Messunsicherheit von ± 26 pT ermittelt werden. Mit einem Index von 42 % und 24 % dominiert dabei die Unsicherheit der zuvor mit dem SQUID $Y0$ ermittelten Vektorkomponente B_{y} und dessen Offset O^{Y0} die Messunsicherheit. Auch bei dieser Betrachtung der Unsicherheit wurden alle Beiträge als unkorreliert betrachtet.

5.6.4. Bestimmung der drei Vektorkomponenten sowie des Betrags der magnetischen Flussdichte mit dem zentralen SQUID $Y0$

Um die Vektorkomponenten B_{x} und B_{y} im Zentrum des Sensorkopfes mit dem zentralen realen SQUID $Y0$ zu bestimmen, wurden die Messwerte des SQUIDs in den Positionen Pos-05 (90°) und Pos-06 (0°) des Manipulators aus Tabelle 4.5 genutzt. Diese Positionen wurden genutzt, um die Zeit zwischen der Kippung des Dewars und damit dem Messpunkt zur Bestimmung der B_{z} so kurz wie möglich zu halten. Die Werte wurden dann durch die Subtraktion des zuvor bestimmten Offsets O^{Y0} korrigiert. Um den Einfluss der Orthogonalität des SQUIDs zur Z-Achse zu berücksichtigen, wurde zusätzlich B_{Kipp} integriert, wodurch B_{x} durch:

$$B_{\mathrm{x}} = U^{\mathrm{Y0}}_{\text{Pos-05}} \cdot G^{\mathrm{Y0}} - O^{\mathrm{Y0}} + B_{\mathrm{Kipp}} \tag{5.19}$$

ermittelt werden konnte. Der Index in Tabelle A.20 Seite 155 zeigt, dass die Unsicherheit der Skalierung u(G^{Y0}) durch die hohe Amplitude des Messwertes mit 53 % in die Gesamtunsicherheits Bestimmung der B_{x} Komponente eingeht. Die Unsicherheit des Offsets macht 47 % der Gesamtunsicherheit aus. Für die Messung R01 konnte so die X-Komponente der magnetischen Flussdichte in der Pos-05 mit (230 ± 13) pT bestimmt werden.

Da zwischen der Messung in Pos-05 und -06 die magnetische Flussdichte driftet, wurde für die Bestimmung der B_{y} Komponente zusätzlich B_{Δ} eingefügt. Weiterhin wurde die Unsicherheit der 90 ° Rotation durch die Integration des Parameters B_{Rot} in:

$$B_{\mathrm{y}} = U^{\mathrm{Y0}}_{\text{Pos-06}} \cdot G^{\mathrm{Y0}} - O^{\mathrm{Y0}} + B_{\mathrm{Kipp}} + B_{\Delta} + B_{\mathrm{Rot}} \tag{5.20}$$

berücksichtigt. Für die Messung R01 konnte eine Amplitude der Y-Komponenten der magnetischen Flussdichte von (463 ± 17) pT in der Pos-06 bestimmt werden. Der Index dieser Unsicherheitsbetrachtung in Tabelle A.20 zeigt, dass mit 67 % die Unsicherheit des Drehwinkels von $(90{,}0 \pm 0{,}5)$ ° dominiert.

Für die Bestimmung der B_{z} Komponente wurde das *Cube*-II-System 45 ° um die X-Achse des Sensorkopfes gekippt. Da das SQUID $Y0$ im Zentrum der Kippachse positioniert ist, kippt nur die Flächennormale $\vec{n}_{\mathrm{Y0}}$ und der Mittelpunkt bleibt am Ort. Durch die zuvor ermittelte B_{y}-Komponente und den bekannten Kippwinkel kann B_{z} bestimmt werden. Demzufolge musste bei der Bestimmung der Messunsicherheit für B_{z} sowohl die Unsicher-

heit der B_{y}-Komponente als auch die des Kippwinkels und die der magnetischen Drift $B_{\Delta,\mathrm{Kipp}}$ berücksichtigt werden.

$$B_{\mathrm{z}} = \frac{U^{\mathrm{Y0}}_{\text{Pos-07}} \cdot G^{\mathrm{Y0}} - O^{\mathrm{Y0}} - B_{\mathrm{y}} \cdot cos(\alpha)}{sin(\alpha)} + B_{\Delta,\mathrm{Kipp}} \tag{5.21}$$

Für die Messung R01 konnte eine Amplitude der Z-Komponente der magnetischen Flussdichte von 80 pT mit einer kombinierten erweiterten Messunsicherheit von ± 23 pT bestimmt werden (Tabelle A.20). Deren Index zeigt, dass die beiden Unsicherheiten der B_{y}-Komponente und des SQUID Offsets das Gesamtbudget mit 52 % und 30 % dominieren. Für diese Betrachtung wurde keine Korrelation zwischen den Unsicherheitsbeiträgen berücksichtigt.

Um den Betrag der magnetischen Flussdichte im Zentrum des Sensorkopfes bestimmen zu können, wurden die drei Vektorkomponenten quadratisch addiert zu:

$$|B| = \sqrt{(B_{\mathrm{x}})^2 + (B_{\mathrm{y}})^2 + (B_{\mathrm{z}})^2}. \tag{5.22}$$

Angewendet auf die Messung R01 ergibt sich für den mit $Y0$ im Zentrum des Sensorkopfes sukzessiv bestimmten Betrags $|B|$ eine absolute magnetische Flussdichte von (523 ± 16) pT (siehe TabelleA.25 Seite 159).

5.6.5. Bestimmung der drei Vektorkomponenten sowie des Betrags der magnetischen Flussdichte mit den drei zentralen virtuellen SQUIDs *vX0*, *vY0* und *vZ0*

Aus den jeweiligen SQUIDs auf den Flächen des Würfels wurden die drei orthogonalen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ im Zentrum des Sensorkopfes gebildet, welche die drei Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte simultan für den selben Ort durch:

$$B_{\mathrm{i}} = \frac{U^{\mathrm{i1}} \cdot G^{\mathrm{i1}} + U^{\mathrm{i3}} \cdot G^{\mathrm{i3}} + U^{\mathrm{i5}} \cdot G^{\mathrm{i5}} + U^{\mathrm{i7}} \cdot G^{\mathrm{i7}}}{4} - O^{\mathrm{Vi0}} + B_{\mathrm{i,orth}}. \tag{5.23}$$

bestimmen. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass die Änderung der magnetischen Flussdichte zwischen den jeweiligen SQUIDs linear verläuft. Da die eigentliche Messung der drei Komponenten simultan geschieht, muss bei deren Unsicherheitsbetrachtung die Drift der magnetischen Flussdichte nicht berücksichtigt werden. Als zusätzlicher Parameter wurde die Orthogonalität $B_{\mathrm{i,orth}}$ der drei Sensoren zueinander berücksichtigt. Dieser Parameter wird durch den Kosinus der in Kapitel 5.3 bestimmten mittleren Orthogonalität der jeweiligen SQUIDs zu den anderen beiden Komponenten bestimmt. Die jeweiligen Komponenten und Winkel wurden in der Tabelle A.21 Seite 156 zusammengestellt und

der Standardabweichung $u(B_{\mathrm{i,orth}})$ zugeordnet.

Die so beschriebene Betrachtung der Messunsicherheit für die Bestimmung der drei Vektorkomponenten mit den zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ wurde in den Tabellen A.22, A.23 und A.24 auf den Seiten 156 bis 158 dem Anhang A beigefügt. So konnte für die Messung R01 eine B_{x}-Komponente von (228 ± 8) pT, eine B_{y}-Komponente von (462 ± 8) pT und eine B_{z}-Komponente von (80 ± 30) pT in der Position Pos-00 bestimmt werden. Mit 96 %, 95 % und 75 % zeigt der in den Tabellen dargestellt Index, dass die Unsicherheit aller drei Komponenten durch die der Offsets der virtuellen SQUIDs dominiert wird. Weiterhin geht die höhere Winkelabweichung der Z-SQUIDs mit 25 % in das Unsicherheitsbudget ein. Der Betrag der magnetischen Flussdichte $|B|$ im Zentrum des Sensorkopfes, bestimmt durch die virtuellen SQUIDs und Gleichung 5.22 konnte mit (521 ± 9) pT bestimmt werden. Dabei dominiert, wie der Index in Tabelle A.26 Seite 159 zeigt, der Beitrag der B_{y}-Komponente die Gesamtmessunsicherheit. Dies wurde durch ihren im Vergleich zu den anderen beiden Komponenten hohen Messwert und dem damit verbundenen hohen Empfindlichkeitskoeffizenten verursacht. Dieser ist für die ausgewertete Beispielmessung R01 um rund den Faktor 6 höher als im Vergleich des Koeffizienten von B_{z}.

5.6.6. Bestimmung der neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte mittels der intrinsischen Methode

Durch die in Kapitel 3.3 beschriebene und realisierte Anordnung der einzelnen SQUID-Sensoren ist es möglich, die neun relativen Gradientenkomponenten g_{mn} der magnetischen Flussdichte simultan und ohne zusätzliche Bewegungen zu untersuchen. Mit dem entwickelten Dewar sowie Manipulator und nach der in Kapitel 4.8 beschriebenen speziellen Prozedur ist es weiterhin möglich, die neun Gradientenkomponeten absolut zu bestimmen. Dafür werden die Messwerte U^{ij} bestimmt und die Komponente der magnetischen Flussdichte B^{ij} am Ort des SQUIDs mit:

$$B^{\mathrm{ij}} = (U^{\mathrm{ij}} \cdot G^{\mathrm{ij}}) - O^{\mathrm{ij}} + B_{\mathrm{i,orth}} \tag{5.24}$$

bestimmt. Dabei bezeichnet G^{ij} und O^{ij} den jeweiligen Skalierungsfaktor und Offset des SQUIDs. Um die in Kapitel 5.3 beschriebene Verkippung und Verdrehung der einzelnen SQUIDs zueinander berücksichtigen zu können, wurde der Beitrag $B_{\mathrm{i,orth}}$ eingefügt. Dessen Wert wurde wie schon bei den zuvor beschriebenen Unsicherheitsbetrachtungen als Null angenommen. Die Standardabweichung $u(B_{\mathrm{i,orth}})$ wurde, wie in Tabelle A.21 dargestellt, durch die Addition der beiden Orthogonalen magnetischen Vektorkomponenten bestimmt, die jeweils mit dem Kosinus der ermittelten mittleren Orthogonalität multipliziert wurden. Die magnetische Drift wurde für diese Art der Bestimmung nicht berücksichtigt, da

alle Gradientenkomponenten simultan bestimmt werden. Diese Methode ist jedoch nicht unabhängig von der magnetischen Drift, da sie bei der Bestimmung der einzelnen SQUID Offsets berücksichtigt werden muss.

Durch die somit bekannte Verteilung der magnetischen Flussdichte können die neun Gradientenkomponenten wie folgt bestimmt werden.

$$\begin{pmatrix} g_{\mathrm{xx}} & g_{\mathrm{yx}} & g_{\mathrm{zx}} \\ g_{\mathrm{xy}} & g_{\mathrm{yy}} & g_{\mathrm{zy}} \\ g_{\mathrm{xz}} & g_{\mathrm{yz}} & g_{\mathrm{zz}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B^{\mathrm{X5}}+B^{\mathrm{X7}}-B^{\mathrm{X1}}-B^{\mathrm{X3}}}{2d} & \frac{B^{\mathrm{Y3}}+B^{\mathrm{Y5}}-B^{\mathrm{Y7}}-B^{\mathrm{Y1}}}{2d} & \frac{B^{\mathrm{Z3}}+B^{\mathrm{Z7}}-B^{\mathrm{Z1}}-B^{\mathrm{Z5}}}{2d} \\ \frac{B^{\mathrm{X1}}+B^{\mathrm{X5}}-B^{\mathrm{X7}}-B^{\mathrm{X3}}}{2d} & \frac{B^{\mathrm{Y5}}+B^{\mathrm{Y7}}-B^{\mathrm{Y1}}-B^{\mathrm{Y3}}}{2d} & \frac{B^{\mathrm{Z3}}+B^{\mathrm{Z5}}-B^{\mathrm{Z1}}-B^{\mathrm{Z7}}}{2d} \\ \frac{B^{\mathrm{X1}}+B^{\mathrm{X5}}-B^{\mathrm{X3}}-B^{\mathrm{X7}}}{2d} & \frac{B^{\mathrm{Y1}}+B^{\mathrm{Y5}}-B^{\mathrm{Y3}}-B^{\mathrm{Y7}}}{2d} & \frac{B^{\mathrm{Z5}}+B^{\mathrm{Z7}}-B^{\mathrm{Z1}}-B^{\mathrm{Z3}}}{2d} \end{pmatrix} \tag{5.25}$$

Dabei steht d für den Abstand zwischen den jeweils zwei Punkten, zwischen denen die Gradienten g_{xx}, g_{yy} und g_{zz} bestimmt werden. Für den verwendeten Sensorkopf bei Raumtemperatur beträgt dieser Abstand $(5,00 \pm 0,01)$ cm. Die Strecke zwischen den Punkten der anderen sechs Gradientenkomponenten beträgt $(2,50 \pm 0,01)$ cm. Durch den Betrieb bei 4,2 K schrumpft der Sensorkopf, jedoch konnte durch die Lokalisation der SQUID-Sensoren in Kapitel 5.3 die Position auf $\pm 0,2$ cm validiert werden. Daher wurde die Standardabweichung $u(d)$ des für die Bestimmung der Gradienten genutzten Abstandes als Rechteckverteilung mit einer Halbbreite von 0,2 cm interpretiert.

Die Betrachtung der Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten durch die Verschiebung des Messsystems wurde am Beispiel der Messung R01 durchgeführt und dem Anhang A als Tabellen A.27 bis A.35 beigefügt. Die neun Gradientenkomponenten, welche durch die intrinsische Methode im Restfeld des *BMSR*-2 bestimmt werden konnten, wurden in der Tabelle 5.4 dargestellt. Die dominierenden Beiträge des aufgestellten Unsicherheitsbudgets dieser Methode sind für alle Komponenten die jeweiligen SQUID Offsets. Diese Beiträge machen in der Summe über 80 % der abgeschätzten Messunsicherheit aus jeder Komponente. Damit sind die ermittelten Unsicherheiten fast aller neun Komponenten höher als die eigentlichen Messwerte.

5.6.7. Bestimmung der neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte mittels der Methode der Verschiebung des Messsystems

Um die neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte unabhängig vom SQUID Offset bestimmen zu können, wurden drei relative Bewegungen der SQUID-Sensoren genutzt. Dafür wurde das *Cube*-II-System entlang der X-, Y- und Z-Achse um die Strecke d verschoben, wobei sich der Gradient durch die jeweilige Änderung der magnetischen

Flussdichte normiert auf d ergibt. Die Verschiebung entlang der X- und Y-Achse wurde durch die in Abbildung 4.7 mit 2b gekennzeichnete Führungsspur von (25,0 ±0,1) mm realisiert. Für die Bewegung entlang der Z-Achse wurde das System um (17,0 ±0,1) mm angehoben. Als Sensoren wurden hier die zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ genutzt. Der Gradient ergibt somit zu:

$$g_{\mathrm{mn}} = \frac{(U^{\mathrm{i1}\prime} - U^{\mathrm{i1}})G^{\mathrm{i1}} + (U^{\mathrm{i3}\prime} - U^{\mathrm{i3}})G^{\mathrm{i3}} + (U^{\mathrm{i5}\prime} - U^{\mathrm{i5}})G^{\mathrm{i5}} + (U^{\mathrm{i7}\prime} - U^{\mathrm{i7}})G^{\mathrm{i7}} + B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d}, \tag{5.26}$$

wobei die mit einem Anstrich (') gekennzeichneten Messwerte der einzelnen SQUIDs nach und die ohne Anstrich vor der Bewegung des Messsystems aufgezeichnet wurden. Da während der Verschiebung des Messsystems die magnetische Flussdichte driftet, wurde der Parameter $B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ integriert. Er entspricht der Differenz zwischen dem Messwert des jeweils betrachteten virtuellen SQUIDs vor der Verschiebung und nach der Rückkehr des Messsystems zum Ausgangspunkt. Die dazu durchgeführte Betrachtung der Messunsicherheit wurde am Beispiel der Messung R01 durchgeführt und dem Anhang A in den Tabellen A.36 bis A.44 beigefügt. Die neun Gradientenkomponenten, welche durch die Methode der Verschiebung des Messsystems im Restfeld des *BMSR*-2 bestimmt werden konnten, wurden in der Tabelle 5.4 dargestellt. Der dominierende Beitrag des aufgestellten Unsicherheitbudgets dieser Methode ist die Drift der magnetischen Flussdichte während der Bewegung des Messsystems. Es konnte eine Differenz der beiden Messwerte vor der Bewegung und nach der Rückkehr des Systems zum Ausgangspunkt zwischen maximal 3,2 pT und 0,3 pT ermittelt werden. Diese Werte zeigen, im Rahmen der kombinierten erweiterten Messunsicherheit, eine Symmetrie und Spurfreiheit der 3x3 Matrix, welche die mit den Gleichungen 2.2 und 2.3 getroffenen Aussagen bestätigt.

5.6.8. Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Betrachtung der Messunsicherheiten

In diesem Kapitel wurden die Betrachtungen der Messunsicherheit für das in dieser Arbeit entwickelte und realisierte *Cube*-II-Messsystem am Beispiel der Messung R01 im magnetischen Restfeld des *BMSR*-2 beschrieben. Im Folgenden sollen die ermittelten Werte und deren Unsicherheiten der Offsets sowie der mit den jeweils zwei Methoden bestimmten Vektor- und Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte gegenübergestellt und diskutiert werden.

SQUID Offsets

In der Tabelle 5.2 wurden die 16 Offsets der realen und die drei Offsets der zentralen virtuellen SQUIDs zusammengefasst. Durch die unterschiedlichen Arten der Bestimmung der Offsets variiert die daraus folgende kombinierte erweiterte Messunsicherheit zwischen ± 7 pT und ± 33 pT. Die geringste Unsicherheit konnte für die virtuellen SQUIDs $vX0$

Tabelle 5.2.: Zusammenstellung aller SQUID Offsets und deren kombinierten erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Leermessung der HH-X Spule innerhalb des *BMSR*-2 (Tabelle 5.6).

SQUID	Offset pT	SQUID	Offset pT	SQUID	Offset pT
$X1$	(-284 ± 9)	$Y0$	(-335 ± 9)	$Z1$	(-133 ± 24)
$X3$	(-300 ± 9)	$Y1$	(-426 ± 20)	$Z3$	(-245 ± 25)
$X5$	(373 ± 20)	$Y2$	(366 ± 33)	$Z5$	(-152 ± 27)
$X6$	(133 ± 23)	$Y3$	(-618 ± 17)	$Z7$	(-144 ± 29)
$X7$	(157 ± 17)	$Y5$	(255 ± 22)		
		$Y6$	(692 ± 28)		
		$Y7$	(194 ± 23)		
$vX0$	(-278 ± 7)	$vY0$	(-381 ± 8)	$vZ0$	(-74 ± 26)

und $vY0$ erreicht werden. Durch die Mittelwertbildung von 4 unterschiedlichen Sensoren weisen die Werte der virtuellen SQUIDs zwar ein um den Faktor 2 höheres magnetisches Rauschen auf, welches jedoch gegenüber der Unsicherheit des Drehwinkels und des Skalierungsfaktors vernachlässigbar ist. Durch die Mittelung verringert sich jedoch der Einfluss der Skalierungsunsicherheit um den Faktor acht. Da für die Abschätzung der Gesamtmessunsicherheit der Offsetbestimmung die selben zusätzlichen Unsicherheitsbeiträge und Standardmessunsicherheiten angenommen wurden wie bei der Bestimmung des Offsets des realen SQUIDs $Y0$ ist die kombinierte erweiterte Messunsicherheit der Offsets der virtuellen SQUIDs $vX0$ und $vY0$ im Vergleich kleiner.

Die höchste Unsicherheit bei der Ermittlung des Offsets konnte mit ± 33 pT für das SQUIDs $Y2$ ermittelt werden. Diese hohe Unsicherheit wurde mit 50 % durch die Unsicherheit des verwendeten Offsets des SQUIDs $X6$ dominiert. Zusätzlich zu diesem Beitrag war aber auch der gemessene Spannungswert hoch, was zu einem hohen Beitrag durch die Unsicherheit des Skalierungsfaktors führte.

Unsicherheit der bestimmten Vektorkomponenten

Durch die Bestimmung der SQUID Offsets war es möglich, die drei Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte im Zentrum des Sensorkopfes zu bestimmen. Dazu wurde das reale SQUID $Y0$ und die drei virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ eingesetzt. Die mit den beiden Methoden bestimmten Komponenten und Beträge wurden zusammen mit den ermittelten kombinierten erweiterten Messunsicherheiten in der Tabelle 5.3 gegenübergestellt. Die beiden maßgeblichen Unterschiede dabei waren zum einen die für $Y0$ sukzessive Art der Bestimmung der drei Komponenten und zum anderen

die Verwendung des Mittelwertes aus jeweils vier unterschiedlichen und örtlich verteilten SQUIDs. Beide Eigenschaften führten zu einer geringeren Gesamtmessunsicherheit bei der Bestimmung von B_x und B_y mit den virtuellen SQUIDs im Vergleich zum SQUID $Y0$. Dies wurde maßgeblich durch den um den Faktor vier geringeren Empfindlichkeitskoeffizenten des Skalierungsfaktors der virtuellen SQUIDs im Gegensatz zu $Y0$ verursacht. Durch die geringeren Unsicherheiten der ermittelten Vektorkomponenten konnte ebenfalls

Tabelle 5.3.: Gegenüberstellung der durch das zentrale reale SQUID $Y0$ und die drei zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ ermittelten Werte für die absolute magnetische Flussdichte im *BMSR*-2 in der Pos-00 des Manipulators (siehe Tabelle 4.5).

Sensor	B_x pT	B_y pT	B_z pT	$\|B\|$ pT
$Y0$	(230 ± 13)	(463 ± 17)	(80 ± 23)	(523 ± 16)
$vX0$, $vY0$, $vZ0$	(228 ± 8)	(462 ± 8)	(80 ± 30)	(521 ± 9)

der daraus bestimmte Betrag der magnetischen Flussdichte $|B|$ für das Zentrum des Sensorkopfes mit einer um den Faktor rund zwei geringeren Unsicherheit bestimmt werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass für die virtuellen SQUIDs die Annahme getroffen wurde, dass die magnetische Flussdichte zwischen den Sensoren linear verläuft. Dass diese Annahme getroffen werden konnte, zeigen die im Rahmen der Messunsicherheit übereinstimmenden Amplituden der drei Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte für das Zentrum des Sensorkopfes in Tabelle 5.3.

Unsicherheit der bestimmten Gradientenkomponenten

Durch die spezielle Anordnung der SQUID-Sensoren und die Möglichkeit der Verschiebung des Messsystems konnten zwei Methoden realisiert werden, um die neun Komponenten des Gradienten der magnetischen Flussdichte zu bestimmen. Die durch die beiden Methoden bestimmten Komponenten wurden zusammen mit den ermittelten kombinierten erweiterten Messunsicherheiten in der Tabelle 5.4 gegenübergestellt. Diese zeigt, dass die Unsicherheiten der intrinsischen Methode im Vergleich zur Verschiebung des Messsystems um fast eine Größenordnung höher ist. Dass dieser Unterschied so deutlich ausfällt, liegt unter anderem an der geringen zeitlichen Drift der magnetischen Flussdichte innerhalb des *BMSR*-2. Die jeweiligen Werte zeigen eine Überlappung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit, die für $k = 2$ bestimmt werden konnte.

Tabelle 5.4.: Gegenüberstellung der ermittelten neun Gradientenkomponenten im Zentrum des *BMSR*-2 durch die Methode der Verschiebung und der intrinsischen Methode gemessen. Es wurde die selbe Messung ausgewertet, die für die Leermessung der HH-X Spule in Tabelle 5.6 genutzt wurde.

Methode		ΔB_x $\frac{pT}{cm}$	ΔB_y $\frac{pT}{cm}$	ΔB_z $\frac{pT}{cm}$
intrinsisch	Δx	(-1 ± 3)	(-3 ± 9)	(8 ± 11)
	Δy	(-7 ± 6)	(-5 ± 4)	(-4 ± 11)
	Δz	(5 ± 6)	(-2 ± 9)	(-6 ± 6)
Verschiebung	Δx	$(0,9 \pm 0,2)$	$(-3,8 \pm 1,5)$	$(3,6 \pm 0,3)$
	Δy	$(-2,5 \pm 0,4)$	$(-2,0 \pm 0,8)$	$(3,7 \pm 0,7)$
	Δz	$(2,6 \pm 0,8)$	$(2,5 \pm 0,9)$	$(0,3 \pm 0,3)$

5.7. Validierung der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und deren Gradientenkomponenten

5.7.1. Beschreibung des Messaufbaus

Um das *Cube*-II-Messsystem und die in Kapitel 3.3 beschriebene Methode zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und deren Gradienten zu validieren, wurden diese auf berechenbare Flussdichten zurückgeführt. Dazu wurde das in Kapitel 5.3 beschriebene dreiachsige Helmholtz-Spulensystem eingesetzt. Die sich durch eine bekannte Stromstärke ergebende Feldverteilung wurde unter idealisierten Bedingungen nach dem Gesetz von *Biot-Savart* berechnet. Diese berechneten Werte wurden dann zur Validierung der mit dem *Cube*-II-System messtechnisch ermittelten Werte genutzt.

Um den Einfluss des hohen μ_r der *Mu-Metall* Wände auf das Spulenfeld so gering wie möglich zu halten, wurden die Spulen auf einem Holzpodest im magnetischen Zentrum des *BMSR*-2s positioniert, wodurch der Einfluss der Wände symmetrisch auf das Feld wirkte. Das Messsystem, bestehend aus dem *Cube*-II und dem Manipulator, wurde auf $\pm 0{,}5$ cm im Zentrum der Spulen positioniert. Die Ausrichtung der Spulen und des *Cube*-II-Systems wurde so durchgeführt, dass das in Kapitel 3.1 beschriebene kartesische Koordinatensystem realisiert wurde. Abbildung 5.8 zeigt diesen Messaufbau innerhalb des *BMSR*-2s.

Die Bestimmung der drei Vektorkomponenten wurde mittels der homogenen Feldvertei-

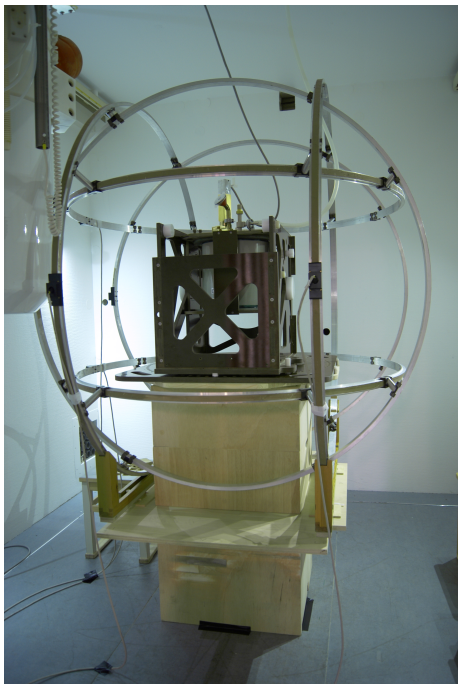


Abbildung 5.8.: Foto des *Cube*-II-Systems im Zentrum des Spulensystems und des *BMSR*-2.

lung der Spulen HH-X und HH-Z validiert. Um die Bestimmung der neun Gradientenkomponenten zu validieren, wurde ein linearer Feldgradient durch eine anti-Helmholtz-Spule (aHH-Spule) genutzt. Eine aHH-Spule entsteht durch die gegensinnige Stromrichtung innerhalb des Spulenpaares einer HH-Spule, wodurch sie einen nahezu linearen Anstieg der magnetischen Flussdichte entlang ihrer gemeinsamen Achse erzeugt. Da die aHH-Spule auf dem selben Spulenkörper wie die HH-Spule gewickelt wurde, sind die Durchmesser und Spulenachsen identisch. Der Strom-zu-Fluss-Übertragungsfaktor der beiden aHH-Spulen betrug, mit jeweils einer Windung Kupferdraht, rund 16,76 nT/(A·cm) für die in X-Richtung (aHH-X) und 21,85 nT/(A·cm) für die in Z-Richtung (aHH-Z) installierte Spule. Der Übertragungsfaktor entspricht der Änderung der magnetischen Flussdichte entlang der gemeinsamen Hauptachse, wobei eine Strecke von ± 6 cm betrachtet wurde. Um den Nulldurchgang des Feldverlaufs im Zentrum der aHH Spulenkonfiguration zu vermeiden, wurde zusätzlich ein homogenes Magnetfeld mit der HH-Spule überlagert.

Die Spulen wurden mit einer mehrkanaligen Konstantstromquelle $CSE - 1$ der Firma *Magnicon GmbH* mit einem konstanten Gleichstrom betrieben. Zur Ansteuerung der HH- und aHH-Spulen wurden zwei Kanäle mit einem maximalen Ausgangsstrom von jeweils ± 50 mA genutzt. Die durch die Spulen fließende Stromstärke wurde mit einer kalibrierten digitalen Multimeter-Karte PXI-4072 vor und nach den Messungen ermittelt. Dabei wurden die zwei Eingangsmessbereiche 20 mA und 200 mA der Karte genutzt. Die kombinierte erweiterte Messunsicherheit für diese beiden Bereiche wurde mit $\pm 0,9$ µA und ± 6 µA für k=2 bestimmt. Es konnte eine Stromstärke durch die HH-X und HH-Z Spu-

le von $(-89,9 \pm 0,9)\,\mu\text{A}$ und $(-90,1 \pm 0,9)\,\mu\text{A}$ bestimmt werden. Für die Stromstärke durch die aHH-X und aHH-Z wurden $(24,974 \pm 0,006)\,\text{mA}$ und $(24,975 \pm 0,006)\,\text{mA}$ ermittelt.

5.7.2. Simulation der Verteilung der magnetischen Flussdichte im Spulensystem

Die Verteilung der magnetischen Flussdichte, welche durch die HH- und aHH-Spulen in Verbindung mit den gemessenen Stromstärken erzeugt werden sollten, wurde unter idealisierten Randbedingungen von Frau Höfner simuliert. Dazu wurden die X- und Z-Spulen aus 1 mm dünnen und 2,9 cm (X-Spule) sowie 2,5 cm (Z-Spule) langen stromdurchflossenen Leiterbahnstücke nachgebildet. Da keine Informationen über die Wicklungsart der Spulen vorlag, wurde nur eine Leiterschleife berechnet und der Strom I durch die einzelnen Leiterbahnstücken mit dem Faktor der Windungszahl N multipliziert. Das von jedem Leiterbahnstück erzeugte Feld wurde mittels der Gleichung 5.27, dem Gesetz von *Biot-Savart* [80], für ein Raster von 11 mal 11 Punkten mit einem Abstand von 12,5 mm in der horizontalen Ebene um das Spulenzentrum herum berechnet.

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0 I N}{4\pi} \int_S \frac{d\vec{s}\,' \times (\vec{r} - \vec{r}\,')}{|\vec{r} - \vec{r}\,'|^3} \tag{5.27}$$

Diese 121 Punkte wurden für insgesamt drei vertikale Ebenen mit einem Abstand von -17 mm, 0 mm und 17 mm zum Zentrum bestimmt. Dabei beschreibt $\vec{r}\,'$ den Ort und $\vec{s}\,'$ die Länge der einzelnen Leiterbahnstücke, $\vec{r}$ die Orte der 363 berechneten Punkte und μ_0 die magnetische Feldkonstante im Vakuum mit $4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{N}}{\text{A}^2}$.

Berechnete Komponenten der Helmholtz-Spulen

Für das Zentrum der HH-X Spule wurde eine Amplitude der B_x-Komponente von $(-6,063 \pm 0,061)\,\text{nT}$ und für die B_z-Komponente der HH-Z Spule von $(-6,944 \pm 0,069)\,\text{nT}$ berechnet. Durch die idealisierte Betrachtung der beiden HH-Spulen, ohne Windungsfehler und ohne die Wechselwirkung mit den *Mu-Metall* Wänden, sind die zur Hauptachse orthogonalen Vektorkomponenten mehr als vier Größenordnungen kleiner. Die dargestellte kombinierte erweiterte Messunsicherheit für k=2 wurde nur durch die Unsicherheit bei der Bestimmung der Stromstärke ermittelt. Die Werte wurden in der Tabelle 5.5 den durch das *Cube*-II-System messtechnisch ermittelten Werten gegenübergestellt.

Berechnete Komponenten der anti-Helmholtz-Spulen

Um die Bestimmung des Gradiententensors zu validieren, wurde dem homogenen Feld der HH-Spulen ein linearer Gradient der magnetischen Flussdichte mittels der beiden aHH-Spulen überlagert. Es wurde ein Strom von $(24,974 \pm 0,006)\,\text{mA}$ durch die aHH-X

Spule und $(24,975 \pm 0,006)$ mA durch die aHH-Z Spule gemessen. Die Verteilung der magnetischen Flussdichte wurde für die selben Ortspunkte und unter den selben idealen Bedingungen wie zuvor bei den HH-Spulen simuliert.

In der Tabelle 5.7 wurden die simulierten Gradientenkomponenten zusammengefasst. Dabei wurden die neun Gradientenkomponenten mit einer Basislänge von 2,5 cm entlang der X- und der Y-Achse sowie 1,7 cm entlang der Z-Achse gebildet. Diese Basislängen wurden gewählt, da sie bei der messtechnischen Validierung der Gradientenbestimmung mittels der Methode der Verschiebung mit einer geringen Unsicherheit umgesetzt werden konnten. Nach der intrinsischen Methode mit dem *Cube*-II-System ergibt sich eine Basislänge der drei Gradienten g_{xx}, g_{yy} und g_{zz} von 5 cm (Kantenlänge des Würfels). Diese Unterschiede zwischen den Basislängen der mittels *Biot-Savart* berechneten und der gemessenen Gradientenkomponenten wurde auf Grund der Linearität der aHH Spulen als vernachlässigbar akzeptiert. Die Unterschiede der Simulierten Gradientenkomponenten der aHH-X und HH-Z Spulen durch die Variation der Basislängen von 1,7 cm zu 2,5 cm auf 5 cm konnte mit unter einem Prozent bestimmt werden. Durch die idealisierte Betrachtung der Spulen wurden sechs der jeweils neun Komponenten mit mehr als vier Größenordnungen kleineren Beträgen ermittelt. Da hier die Bestimmung der Gradientenkomponenten validiert wurde, ist auf die Darstellung der drei Vektorkomponenten aus Gründen der Übersicht verzichtet worden.

5.7.3. Bestimmung der Vektor- und Gradientenkomponenten mit dem *Cube*-II-System

Um die zuvor berechnete Feldverteilung der Spulen messtechnisch zu bestimmen, wurde das Messsystem, wie in Kapitel 4.9 beschrieben, durch den Manipulator in 21 unterschiedliche Positionen ausgerichtet und die magnetische Flussdichte gemessen. In der Tabelle 4.5 wurden diese 21 Positionen mit der jeweiligen Ausrichtung des Messsystems zusammengefasst.

Die Signale der 16 SQUID-Sensoren wurden mit einer Rate von 300 Messungen pro Sekunde kontinuierlich abgetastet und gespeichert. Ist das Messsystem entsprechend einer der 21 Positionen aus der Tabelle 4.5 ausgerichtet worden, wurden zusätzlich die Messwerte der 16-SQUIDs über eine Sekunde arithmetisch gemittelt und zusammen mit deren Standardabweichung als ASCII-Werte gespeichert.

Um den Einfluss des unbekannten Restfeldes des *BMSR*-2 vom Spulenfeld trennen zu können, wurden jeweils zwei Messungen mit der selben Stromstärke aber unterschiedlicher Polarität und eine Messung mit ausgeschalteter Stromquelle durchgeführt. Um den elektronischen Offset der Konstantstromquellen vernachlässigen zu können, wurde die Än-

derung der Polarität durch die Vertauschung der Spulenanschlüsse realisiert und somit die eingestellte Amplitude des Stromes konstant gelassen. Durch die Subtraktion und Halbierung der Messwerte der magnetischen Flussdichte mit unterschiedlicher Polarität des Stromes wurde das Restfeld des *BMSR*-2 unterdrückt. Werden dagegen die beiden Messwerte addiert, so wird das von der Spule erzeugte Magnetfeld unterdrückt.

Die Vektorkomponenten der HH-Spulen

Die durch die oben beschriebenen Messungen ermittelten Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte wurden in der Tabelle 5.5 den mittels „Biot-Savart“ berechneten Werten gegenübergestellt. Dabei liegen die Abweichungen zwischen den berechneten und den messtechnisch ermittelten Werten bei 2,7 % für die Hauptkomponente der HH-X und 0,6 % für die Hauptkomponente der HH-Z Spule. Durch die Unterdrückung des Restfeldes des *BMSR*-2s wurden die Querkomponenten der HH-X Spule mit 15 pT und 42 pT für B_y und B_z bestimmt. Die Querkomponenten der HH-Z Spule wurden mit 10 pT und 1 pT für B_x und B_y ermittelt.

Tabelle 5.5.: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen absoluten magnetischen Flussdichte im Zentrum der Spulen HH-X und HH-Z für die gemessenen Stromstärken $(-89,9 \pm 0,9)$ µA und $(-90,1 \pm 0,9)$ µA. Die in der Zeile „Messen“ dargestellten Werte wurden durch die Subtraktion der messtechnisch ermittelten Flussdichten für die postitive und negative Stromstärke ermittelt.

		B_x nT	B_y nT	B_z nT
HH-X	Berechnung	$(-6,063 \pm 0,061)$	$(0,000 \pm 0,000)$	$(0,000 \pm 0,000)$
	Messung	$(-6.232 \pm 0,057)$	$(0.002 \pm 0,044)$	$(0.010 \pm 0,136)$
HH-Z	Berechnung	$(0,000 \pm 0,000)$	$(0,000 \pm 0,000)$	$(-6,944 \pm 0,069)$
	Messung	$(0,009 \pm 0,058)$	$(0,001 \pm 0,058)$	$(-6,950 \pm 0,140)$

Die Vektorkomponenten des Restfeldes des *BMSR*-2

Werden die beiden Messungen mit unterschiedlicher Polarität addiert und halbiert, so wird der sich ändernde Teil der magnetischen Flussdichte unterdrückt und das Restfeld des *BMSR*-2 dominiert. Das so ermittelte Restfeld betrug für beide HH-Spulen und alle drei Komponenten der absoluten magnetischen Flussdichte weniger 500 pT. Der Vergleich zwischen der Kompensation des HH-X und HH-Z Spulenfeldes zeigt eine maximale Differenz von 7 pT zwischen den beiden B_z-Komponenten. Die beiden B_x-Komponenten unterscheiden sich um 5 pT und die beiden B_y-Komponenten um 2 pT (siehe Tabelle 5.6).

Um diese Ergebnisse direkt mit dem Restfeld des *BMSR*-2 vergleichen zu können, wurde

Tabelle 5.6.: Gegenüberstellung der gemessenen Werte für das Restfeld des *BMSR-2*s. Die Ermittlung fand durch den Polaritätswechsel des Stromes durch die HH-Spulen und direkt im Anschluss bei abgeschalteter Stromquelle statt. Die dargestellten Flussdichten wurden mit den zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ in der Pos-00 aus Tabelle 4.5 ermittelt.

		B_x	B_y	B_z
		nT	nT	nT
HH-X	Polaritätswechsel	$(0,229 \pm 0,057)$	$(0,463 \pm 0,044)$	$(0,082 \pm 0,136)$
	Leermessung (R01)	$(0,228 \pm 0,008)$	$(0,462 \pm 0,008)$	$(0,080 \pm 0,030)$
HH-Z	Polaritätswechsel	$(0,234 \pm 0,058)$	$(0,461 \pm 0,058)$	$(0,075 \pm 0,140)$
	Leermessung (R02)	$(0,235 \pm 0,008)$	$(0,461 \pm 0,008)$	$(0,081 \pm 0,036)$

nach den Messungen mit einer Spule die Stromquelle abgeschaltet und die resultierende magnetische Flussdichte mit dem *Cube*-II- System bestimmt. Diese beiden Messungen zeigen eine Reproduzierbarkeit für die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte von 7 pT. Diese Ergebnisse wurden als Leermessung R01 und R02 den Ergebnissen aus der Addition der unterschiedlichen Polaritäten in der Tabelle 5.6 gegenüberstellt. Dieser Vergleich zeigt eine Übereinstimmung der direkt gemessenen Vektorkomponenten des magnetischen Restfeldes des *BMSR*-2 mit denen, die durch die Unterdrückung des Spulenfeldes der HH-X und HH-Z Spulen ermittelt werden konnten. Die maximale Abweichung liegt bei 6 pT und wurde für die B_z-Komponente der HH-Z Spule ermittelt. Wird die kombinierte erweiterte Messunsicherheit berücksichtigt, so liegen alle ermittelten Messwerte innerhalb des $k = 2$ Intervalls von 95,5 %.

Die Gradientenkomponenten der aHH-Spulen

Nach Abzug der einzelnen SQUID Offsets wurden die neun Gradientenkomponenten der aHH-Spulen aus den zwölf SQUIDs wie in Kapitel 3.3 beschrieben bestimmt. Die so ermittelten Werte wurden in der Zeile „intrinsisch“ der Tabelle 5.7 den mittels „Biot-Savart“ berechneten Komponenten gegenübergestellt. Die Abweichung zwischen den für die aHH-X Spule berechneten und den gemessenen Gradientenkomponenten g_{yy} und g_{zz} liegen unter 10 %. Durch den höheren Wert der Hauptkomponente g_{xx} der aHH-X Spule konnte hier eine Abweichung von rund 6 % bestimmt werden. Für die aHH-Z Spule konnte eine Abweichung zwischen den berechneten und den gemessenen Komponenten g_{xx} und g_{yy} von unter 4 % ermittelt werden. Die Hauptkomponente g_{zz} weist dagegen eine Abweichung von 7 % auf. Betrachtet man die Spur der beiden 3x3 Matrizen sollte diese nach Gleichung 2.2 Null ergeben. Dies trifft auf die berechneten Werte zu. Bei den messtechnisch ermittelten Werten kann eine Abweichung von 15 pT/cm für die aHH-X und 25 pT/cm für die aHH-Z Spule ermittelt werden.

Tabelle 5.7.: Gegenüberstellung der berechneten und mittels Offsetkompensation sowie Verschiebung gemessenen Gradientenkomponenten im Zentrum der HH- und aHH-Spulen für die gemessenen Stromstärken $(-89,9 \pm 0,9)\,\mu\text{A}$ und $(24,974 \pm 0,006)\,\text{mA}$ für die HH-X und aHH-X Spulen sowie $(-90,1 \pm 0,9)\,\mu\text{A}$ und $(24,975 \pm 0,006)\,\text{mA}$ für die HH-Z und aHH-Z Spulen. Aus Gründen der Darstellung wurde die kombinierte erweiterte Messunsicherheit für k=2 hier in Klammern abgebildet. Dabei bezieht sich die Angabe in den Klammern auf die letzten Ziffern des besten Schätzwertes.

		HH-X und aHH-X			HH-Z und aHH-Z		
Methode		ΔB_x $\frac{\text{pT}}{\text{cm}}$	ΔB_y $\frac{\text{pT}}{\text{cm}}$	ΔB_z $\frac{\text{pT}}{\text{cm}}$	ΔB_x $\frac{\text{pT}}{\text{cm}}$	ΔB_y $\frac{\text{pT}}{\text{cm}}$	ΔB_z $\frac{\text{pT}}{\text{cm}}$
Berechnung	Δx	420 (0)	0 (0)	0 (0)	-275 (0)	0 (0)	0 (0)
	Δy	0 (0)	-210 (0)	0 (0)	0 (0)	-275 (0)	0 (0)
	Δz	0 (0)	0 (0)	-210 (0)	0 (0)	0 (0)	550 (0)
intrinsisch	Δx	397 (48)	0 (107)	101 (128)	-265 (30)	-4 (66)	-48 (74)
	Δy	72 (90)	-191 (53)	9 (128)	-6 (54)	-270 (33)	68 (73)
	Δz	20 (89)	-17 (107)	-191 (65)	4 (54)	-2 (66)	510 (42)
Verschiebung	Δx	413 (38)	-4 (2)	4 (1)	-267 (25)	-3 (1)	4 (1)
	Δy	-2 (0)	-205 (19)	2 (3)	-3 (2)	-271 (26)	5 (1)
	Δz	19 (2)	-9 (3)	-208 (28)	-8 (4)	-43 (9)	532 (71)

Weiterhin weicht die nach Gleichung 2.3 geforderte Symmetrie der Gradienten g_xy, g_xz und g_zy verglichen mit deren um die Spur der Matrix gespiegelten Partner für die Messungen um maximal 81 pT/cm ab. Verglichen mit den unter idealen Bedingungen berechneten Werten ist die Abweichung mit maximal 101 pT/cm noch höher. Für die aHH-Z Spule zeigt sowohl die Symmetrie als auch der Vergleich mit den berechneten Werten eine geringere Abweichung von maximal 40 pT/cm. Wird die kombinierte erweiterte Messunsicherheit berücksichtigt, so liegen alle berechneten und messtechnisch ermittelten Werte überdeckend in dem durch k=2 aufgespannten Intervall von 95,5 %.

Zusätzlich zur Bestimmung durch die einzelnen SQUIDs, können die Gradientenkomponenten auch durch die Verschiebung des Messsystems relativ zu den Spulen bestimmt werden. Hierfür wurden die drei orthogonalen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ sukzessiv um 2,5 cm entlang der X- und Y-Achse verschoben und 1,7 cm angehoben. Die so ermittelte Änderung der magnetischen Flussdichte entlang der verschobenen Strecke ist unabhängig vom Offset des SQUIDs und kann somit direkt als Maß für die jeweilige Komponente des Gradienten genutzt werden. Mit diesen insgesamt drei Verschiebungen konnten die neun

Gradientenkomponenten bestimmt werden. Die so ermittelten Werte wurden ebenfalls in der Tabelle 5.7 den berechneten und den mittels der intrinsischen Methode bestimmten Werten gegenübergestellt.

Durch diese Art konnten die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Komponenten der jeweiligen Spur für beide aHH-Spulen auf unter 4 % reduziert werden. Dies macht sich auch in der durch die Gleichung 2.2 geforderten Spur bemerkbar, welche sich für die aHH-X Spule auf 0 pT/cm reduzierte. Die Abweichungen der messtechnisch ermittelten Symmetrie der beiden 3x3 Matrizen konnte ebenfalls auf maximal 15 pT/cm für die aHH-X und 48 pT/cm für die aHH-Z Spule verringert werden. Die maximale Abweichung zwischen den berechneten Gradienten g_{xy}, g_{xz} und g_{zy} sowie deren Spiegelungen, mit den durch die Verschiebung ermittelten Werten konnte auf 43 pT/cm reduziert werden. Wird die kombinierte erweiterte Messunsicherheit für die Methode der Verschiebung berücksichtigt, so liegen alle berechneten und messtechnisch ermittelten Werte überdeckend in dem durch k=2 aufgespannten Intervall.

5.8. Diskussion der Ergebnisse zum *Cube*-II-System

5.8.1. Erreichte messtechnische Eigenschaften

Die messtechnischen Eigenschaften des SQUID-Systems *Cube*-II wurden in der Tabelle 5.8 zusammengefasst und den in Kapitel 3.2 beschriebenen Randbedingungen gegenübergestellt.

Es konnte die benötigte Bandbreite von 10 kHz mit einem magnetischen Flussdichterauschen des Messsystems von unter 6 fT $\sqrt{\mathrm{Hz}}$ zwischen 1 Hz und 15 kHz realisiert werden. Durch das niedrige Eigenrauschen des Messsystems kann es zur Ermittlung des magnetischen Schirmfaktors und zur Untersuchung von magnetischen Störungen innerhalb von *MSRs* eingesetzt werden. Die benötigte geringe magnetische Eigendrift des Messsystems von unter 10 pT/h erreicht das *Cube*-II-System nach rund drei Stunden (siehe Abbildung 5.4). Innerhalb der ersten drei Stunden konnte mit Hilfe eines Referenzsystems eine magnetische Drift von etwa 15 pT/h nachgewiesen werden. Diese Einschränkung konnte nur für die in Z-Richtung empfindlichen SQUID-Sensoren nachgewiesen werden. Nach den drei Stunden betrug die Drift der Z-SQUIDs kleiner 5 pT/h und zeigte keine dominierenden Prozesse. Die magnetische Drift der X- und Y-Sensoren konnte nach rund 30 Minuten bis zum Ende der Messzeit mit unterhalb von 5 pT/h bestimmt werden.

Die gewünschte Messzeit von 24 Stunden konnte auf Grund der geringen Größe des Dewars und dem damit verbundenen geringen Flüssigheliumvolumens von 3,2 Litern mit

Tabelle 5.8.: Gegenüberstellung der geforderten Randbedingungen und der realisierten Eigenschaften des *Cube*-II-Systems innerhalb des *BMSR*-2

Eigenschaft	Randbedingungen	*Cube*-II
Bandbreite	1 mHz - 10 kHz	1 mHz - $\geq$ 10 kHz
Systemrauschen bei 1 Hz	$\leq 10\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$	$\leq 6\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$
Drift des Messsystems	$\leq$ 10 pT/h	$\leq$ 5 pT/h (für 3 h$\leq$t$\leq$20h)
Messzeit	24 h	$\approx$ 20 h ohne, $\approx$ 8 h mit Kippung
messbarer Schirmfaktor	$100 \leq S \leq 10^8$	$\leq 10^8$
Unsicherheit der Vektorkomponenten	$\leq$ 50 pT	$\leq \pm 30$ pT (mit $Y0$) $\leq \pm 23$ pT (mit $vX0$ $vY0$ und $vZ0$) (für statisches Restfeld im *BMSR*-2)
Unsicherheit der Gradientenkomponenten	$\leq 10\,\frac{pT}{cm}$	$\leq \pm 11\,\frac{pT}{cm}$ (intrinsisch) $\leq \pm 2\,\frac{pT}{cm}$ (Verschiebung) (für statisches Restfeld im *BMSR*-2)
Hintergrundfeld	$\leq$ 10 nT	$\leq$ 20 nT
Größe des Messsystems	$\leq$ 60 cm	(85 x 85 x 85) cm^3

20 Stunden noch nicht erreicht werden. Durch die zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte benötigten 45 ° Kippung des Dewars verringert sie sich noch einmal. Bei einem Messszenario, bei dem alle 30 Minuten der Dewar für 5 Minuten um 45 ° gekippt wurde, musste nach acht Stunden unterbrochen werden, da sonst die Kühlung der SQUID-Sensoren nicht mehr sichergestellt werden konnte.

Da das Messsystem in unterschiedlichen magnetischen Schirmungen eingesetzt werden sollte, war eine geforderte Eigenschaft des Messsystems eine kompakte Bauform. Dafür wurde erfolgreich ein speziell entwickelter aus *GFK* gefertigter Dewar mit einem Durchmesser von 37 cm und einer Höhe mit angeschlossener FLL-Elektonik von 54 cm eingesetzt. Um die benötigten Bewegungen des SQUID-Systems zu realisieren, wurde ein Manipulator entwickelt. Durch diesen Manipulator vergrößerte sich die Dimension des Messsystems auf (85 x 85 x 85) cm^3. Damit überschreitet das System zwar die benötigte Größe, jedoch wurde der Dewar so konzipiert, dass durch den Einsatz eines kompakten Manipulators die geforderten Abmaße eingehalten werden können (siehe Abbildung 5.9).

Eine Aufgabe bei der Charakterisierung von magnetisch geschirmten Umgebungen ist die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte und dessen Gradienten. Um die Be-

stimmung dieser Größen zu validieren, wurden innerhalb des *BMSR*-2 berechenbare magnetische Flussdichten mit Spulen erzeugt. Die Bestimmung von zwei der drei Vektorkomponenten wurden mit Helmholtz-Spulen validiert. Nach der Kompensation des unbekannten Restfeldes des *BMSR*-2 durch die unterschiedliche Polarität des Stromes durch die Spulen konnte eine Abweichung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Wert von 169 pT für die B_x- und 6 pT für die B_z-Komponente ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für B_x und B_z konnte nur für die Bestimmung der Z-Komponente eine Übereinstimmung zwischen dem theoretischen und dem gemessenen Wert erreicht werden. Da die ermittelte B_x Komponente der HH-X Spule größer als der berechnete Wert war, konnte dies nicht durch eine Verdrehung zwischen dem Messsystem und dem Spulensystem erklärt werden. Daher wurde als Ursache für die Abweichung die idealisierten Bedingungen bei der Berechnung der magnetischen Flussdichten gemacht. Diese wurde durch die Bestimmung des magnetischen Restfeldes des *BMSR*-2 bestätigt. Durch die unterschiedlichen Polaritäten des elektrischen Stromes konnte das durch die Spulen erzeugte Magnetfeld unterdrückt und somit das Restfeld des *MSR* bestimmt werden. Diese Werte wurden mit dem direkt ermittelten Restfeld (Leermessung R01) verglichen. Dabei konnte eine maximale Abweichung zwischen den beiden Spulen von 7 pT und zwischen den Spulen und dem direkt ermittelten Restfeld von 6 pT ermittelt werden. Da diese Abweichungen sowohl für die direkte- als auch für die Addition der Spulenfelder innerhalb der Messunsicherheit lagen, wurde die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte als validiert betrachtet.

Bei der Entwicklung dieses Messsystems wurde eine spezielle Anordnung der SQUID-Sensoren realisiert, welche es erlaubt, die neun Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte im Zentrum des Sensorkopfes simultan zu bestimmen. Dazu mussten die Offsets aller zwölf Sensoren bestimmt und vom jeweiligen Messwert abgezogen werden. Danach konnten die Gradienten durch unterschiedliche Kombinationen der Sensoren bestimmt werden. Durch den Einsatz berechenbarer linearer Gradienten mit anti Helmholtz-Spulen innerhalb des *BMSR*-2 wurde diese Methode validiert. Wird die kombinierte erweiterte Messunsicherheit für die intrinsische Methode berücksichtigt, so liegen alle berechneten und messtechnisch ermittelten Werte überdeckend in dem durch k=2 aufgespannten Intervall.

Zusätzlich zur Bestimmung der Gradientenkomponenten durch die speziell angeordneten SQUIDs wurde das Messsytem entlang der drei Richtungen X, Y und Z verschoben und die Änderung der magnetischen Flussdichte auf die zurückgelegte Strecke normiert. Durch diese relative Messung konnten die neun Gradientenkomponenten unabhängig vom SQUID Offset und so, mit Ausnahme der Komponente g_{zz}, mit einer geringeren Messunsicherheit bestimmt werden. Diese Ausnahme wurde durch die unterschiedlichen Basislängen verursacht. Die durch die Methode der Verschiebung messtechnisch ermittelten Messwerte zeigen, im Rahmen der kombinierten erweiterten Messunsicherheit, eine Übereinstimmung

mit den berechneten Werten für alle untersuchten Komponenten.

Damit konnte die benötigte Bestimmung der Gradientenkomponenten unter Berücksichtigung des aufgestellten Unsicherheitsbudgets validiert und die Funktion der intrinsischen Methode nachgewiesen werden.

5.8.2. Vergleich des *Cube*-II-Systems mit bereits vorhandene Multikanal SQUID-Systemen.

Vergleich mit anderen stationären Multikanal SQUID-Systemen
Das innerhalb dieser Arbeit entwickelte und realisierte Multikanal SQUID Messsystem *Cube*-II verfügt über 16 LT_c-SQUID-Sensoren mit einem weißen Rauschniveau von $1{,}3\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ bis $6\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ in einem Frequenzbereich von 2 Hz bis über 15 kHz. Viele Multikanal SQUID-Systeme werden im Bereich der biomagnetischen Messungen wie beispielsweise für *MEG* [34, 39, 81] Messungen bzw. für kombinierte *MEG* und bildgebende Messungen genutzt [3, 82, 83] eingesetzt. Solche Messsysteme erreichen mit bis zu $0{,}7\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ bei 1 kHz [84] ein um den Faktor rund zehn geringeres magnetisches Eigenrauschen und eine Messzeit von mehr als fünf Tagen. Weiterhin weisen sie ein geringeres magnetisches Eigendriftverhalten und zum Teil eine höhere Anzahl von Sensoren im Vergleich zum *Cube*-II-System auf. Um diese Eigenschaften zu erreichen, werden größere und meist innerhalb der magnetischen Schirmung montierte Dewargefäße verwendet. Das *Cube*-II-System wurde dagegen möglichst kompakt entwickelt, um ein Höchstmaß an Mobilität bei gleichzeitig niedrigem magnetischen Eigenrauschen und Eigendriftverhalten zu erreichen.

Vergleich mit anderen mobilen SQUID-Systemen
Mobile SQUID-Systeme werden unter anderem in der medizinischen Forschung als *MEG*-Systeme [23, 85] eingesetzt. Das von Okada et al. in [85] vorgestellte *MEG*-System wurde speziell für Kinder entwickelt und kann ohne magnetische Schirmung in Krankenhäusern eingesetzt werden. Es verfügt über 76 LT_c-SQUID Gradiometer und erreicht ein Flussdichterauschen von bis zu $17\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ bei 1 kHz in ungeschirmter Umgebung. Um sowohl den Liegekomfort der zu untersuchenden Person als auch eine ausreichende Messzeit zu gewährleisten, beträgt das Gesamtvolumen dieses Systems $(100 \times 200 \times 110)\,\mathrm{cm}^3$ mit einem Gewicht von 200 kg. Vergleicht man dieses System mit dem *Cube*-II-System inklusive Manipulator, konnte beim *Cube*-II sowohl die Mobilität auf Grund des geringeren Volumens von $(85 \times 85 \times 85)\,\mathrm{cm}^3$ und dem geringeren Gewicht von $< 100\,\mathrm{kg}$ verbessert werden, sowie das geringere magnetische Eigenrauschen auf $\leq 6\,\mathrm{fT}$ für Frequenzen $\geq 30\,\mathrm{Hz}$ verringert werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass diese Verbesserungen auf Grund der unterschiedlichen Anwendungen möglich werden.

Weiterhin werden mobile SQUID-Systeme in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, wie

von Hatsukade et al. und Isawa et al. in [86, 87] beschrieben, eingesetzt. Dafür sind die SQUID-Sensoren an einem Roboter befestigt und werden an den zu prüfenden Werkstücken entlang bewegt. Dabei detektieren die Sensoren die Änderung der magnetischen Flussdichte, die durch das Prüfstück verursacht werden. Als Sensoren wurden bei diesen Systemen HT_c-SQUIDs verwendet, um eine möglichst lange Messzeit zu gewährleisten. Diese wurde jedoch in den Veröffentlichungen nicht näher beschrieben. Trotz der elektrisch gesteuerten Motoren und des metallischen Materials des Roboters weisen die Gradiometer der SQUID-Systeme nur ein um rund den Faktor 100 erhöhtes magnetisches Flussdichterauschen im Vergleich mit dem *Cube*-II-System auf. Die durch die Motoren verursachten Störungen werden durch zusätzliche Kompensationsspulen reduziert. Damit ist es möglich, die SQUIDs auch während der Bewegung zu betreiben. Da das *Cube*-II-System nur in magnetisch geschirmten Umgebungen betrieben wird und bei dessen Entwicklung und Fertigung nur Materialien mit geringer magnetischer Remanenz eingesetzt wurden, ist der Einsatz von zusätzlichen Kompensationsspulen nicht nötig.

Ein weiterer großer Anwendungsbereich für mobile SQUID-Systeme ist die Untersuchung von Änderungen des Magnetfeldes der Erde. Diese Messungen werden genutzt, um nach archäologischen Formationen, Mineralien und Öl [15, 55, 88–92], aber auch nach militärischen Gegenständen wie Minen [17, 93] effizient zu suchen. Da diese Messungen ohne magnetische Schirmungen durchgeführt werden, müssen die eingesetzten Sensoren entweder das statische Magnetfeld der Erde durch die Anwendung eines Gradiometers unterdrücken oder deren Dynamikbereich muss groß genug sein. Dies ist insbesondere der Fall, wenn wie bei [91] das mit *JESSY STAR* bezeichnete SQUID-System mit einem Flugzeug oder Hubschrauber über das Zielgebiet geflogen wird. Die Herausforderungen ein SQUID-System so zu betreiben, liegen in den Bewegungen der Sensoren relativ zum Magnetfeld der Erde und die Störungen durch das Flugzeug oder den Hubschrauber. Durch die spezielle Anordnung und nachträgliche Bearbeitung der Messdaten, sowohl der SQUID-Magnetometer als auch der Gradiometer konnte mit dem in [91] von Stolz et.al beschriebenen System ein magnetisches Eigenrauschen von rund $10\,\mathrm{nT}/\sqrt{Hz}$ mit den Magnetometern und $100\,\mathrm{fT}/(\mathrm{m}\cdot\sqrt{Hz})$ mit den Gradiometern während des Fluges erreicht werden. Weiterhin wurden die Sensoren in diesem mobilen System so angeordnet, dass sowohl die zeitlichen Änderungen der drei Vektorkomponenten der magnetischen Flussdichte als auch die der neun Komponenten des Gradiententensors simultan gemessen wurden.

Der Vorteil des in dieser Arbeit entwickelten *Cube*-II-Systems gegenüber dem *JESSY STAR*-System ist das geringere Volumen und das geringere Gewicht, wodurch es sich flexibler innerhalb räumlich begrenzter Abschirmungen bewegen lässt. So wäre der Einsatz des *JESSY STAR*-Systems innerhalb der magnetischen Schirmung am Paul Scherrer Institut nicht möglich. Die Beweglichkeit ermöglicht es weiterhin mit dem *Cube*-II-System neben den zeitlichen Änderungen auch die absolute magnetischen Flussdichte zu bestimmen. Dies wäre mit den Sensoren im *JESSY STAR*-Systems ebenfalls möglich, auf Grund

des Platzmangels jedoch nicht realisierbar. Weiterhin ist das magnetische Eigenrauschen der im *Cube*-II eingesetzten SQUID-Magnetometer geringer und die absolute Empfindlichkeit höher. Diese Unterschiede sind ebenfalls den verschiedenen Einsatzgebieten der beiden Messsysteme geschuldet. So kann mittels des *Cube*-II-Systems weder in der Nähe eines Flugzeugs oder Helikopters gemessen werden, noch die absolute magnetische Flussdichte außerhalb einer magnetischen Schirmung bestimmt werden. Auch ist die mögliche Messzeit des *JESSY STAR*-Systems mit zwei bis drei Tagen angegeben, was mehr als doppelt so lang im Vergleich zum *Cube*-II-System ist.

Die zuvor beschriebenen Systeme waren nur in der Lage die Änderung der magnetischen Flussdichte zu detektieren. Mit dem in [94] von He et al. beschriebenen SQUID-System ist es jedoch möglich, in ungeschirmter Umgebung die Komponenten der magnetischen Flussdichte absolut zu bestimmen. Dafür wird die Flussdichte am Ort eines HT_c-SQUIDs mit einer Kompensationsspule konstant gehalten. Um dies zu realisieren, wird der Strom durch die Spule entsprechend dem Ausgangssignal des SQUID-Sensors variiert. Das SQUID und die Spule sind innerhalb des Dewar Gefäßes fixiert, wodurch sich ein konstanter Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom durch die Spule und der magnetischen Flussdichte am Ort des SQUIDs ergibt. Wird das mobile SQUID-System im Raum bewegt, so ist der zur Kompensation benötigte elektrische Strom proportional zur Vektorkomponente parallel zur Flächennormale des SQUIDs. Wird das SQUID rotiert und gekippt, können die drei Vektorkomponenten der absoluten Flussdichte auch in magnetisch ungeschirmten Umgebungen bestimmt werden [94]. Somit basiert dieses System auf dem selben Funktionsprinzip wie das des *Cube*-II-Systems, jedoch mit einem erhöhten Dynamikbereich des Sensors. Auf Grund der verwendeten HT_c-SQUID Technologie ist das Eigenrauschen des Sensors mit rund $80\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ [94] um mehr als den Faktor 10 höher als bei den Sensoren im *Cube*-II-System. Da den in [94] angegebenen $80\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ keine Frequenz zugeordnet werden konnte, wurde für den Vergleich mit dem *Cube*-II-System eine Frequenz von 98 Hz gewählt. Zusätzlich zum erhöhten Eigenrauschen der Sensoren ist es weiterhin nicht möglich mit dem in [94] beschriebenen System, die drei Vektorkomponenten und die neun Gradientenkomponenten simultan zu bestimmen.

Wie dieses Kapitel zeigt, konnte zum Zeitpunkt dieser Arbeit kein direkt vergleichbares auf SQUID-Sensoren basierendes Multikanalmesssystem gefunden werden, mit welchem die drei Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte mit einer Unsicherheit von $\leq 23\,\mathrm{pT}$ bestimmt werden können. Weiterhin sind die in der Literatur beschriebenen LT_c-Systeme mit vergleichbarem weißen Rauschniveau von $1{,}3\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ bis $6\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ größer und schwerer als das *Cube*-II-System. Somit ist das *Cube*-II-System, bezogen auf den geplanten Anwendungsbereich, ein neues und zum Zeitpunkt dieser Arbeit einzigartieges Messsystem.

5.8.3. Potential zur Verbesserung des *Cube*-II-Systems.

Das in Kapitel 5.6 aufgestellte Unsicherheitsbudget zeigt, dass neben der zeitlichen Stabilität der magnetischen Flussdichte der Skalierungsfaktor mit einer relativen Unsicherheit von 1,7 % ($k = 2$) einen dominierenden Beitrag zur Gesamtunsicherheit des Messsystems beiträgt. Dieser Beitrag wurde wiederum durch die Unsicherheit der Feldempfindlichkeit und der Stromempfindlichkeit der verwendeten SQUID-Sensoren dominiert. Um die Unsicherheiten dieser Größen zu senken, muss deren Bestimmung verbessert werden. Hierzu erarbeitete J.-H. Storm innerhalb seiner Masterarbeit [95] an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt einen Messaufbau zur Untersuchung der Feldempfindlichkeit von dc SQUID-Magnetometern. Mit seinem Aufbau erreichte er eine k=2 Unsicherheit bei der Bestimmung der Feldempfindlichkeit von unter 0,5 %. Dieser Aufbau könnte genutzt werden, um sowohl die Feldempfindlichkeit als auch die Stromempfindlichkeit jedes einzelnen Sensors zu bestimmen und somit die relative Unsicherheit des Messsystems um einen Faktor drei verbessern. Zusätzlich sollte vor dem Start der Messungen darauf geachtet werden, dass der *AP* des SQUIDs nahe bei Null liegt. Damit wird eine Erhöhung des Unsicherheitsbeitrages durch einen unnötig hohen Offset des Messwertes vermieden.

Bei der Validierung der Bestimmung der Vektor- und Gradientenkomponenten in Kapitel 5.7.3 sind Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten der magnetischen Flussdichte aufgetreten. Diese Abweichungen müssen untersucht und verringert werden. Dazu sollten neben einem Referenzsensor, wie beispielsweise einem Fluxgatemagnetometer, auch die Berechnungen und die Dimensionen der einzelnen Spulen überprüft und die hohe Permeabilität der *Mu-Metall* Wände berücksichtigt werden.

Mit dem in dieser Arbeit realisierten SQUID Messsystem konnte die benötigte Messzeit von ≥ 24 Stunden nicht realisiert werden. Hier muss das Konzept der thermischen Isolierung der Deckelkonstruktion überarbeitet werden. In der aktuellen Version wird das verdampfte, jedoch im Vergleich zur Raumtemperatur kalte Heliumgas direkt über den in Abbildung 4.6 mit 4. gekennzeichneten Rohr aus dem Dewar geführt. Um den Wärmeeintrag in das Flüssigheliumreservoir zu verringern und somit die Messzeit zu verlängern, muss dieses Heliumgas zum Kühlen genutzt werden. Das Heliumgas sollte daher zwischen dem Hals des Dewars und dem Isoeinsatz aus Polystyrol und Mylarfolie über eine möglichst lange Strecke nach oben strömen und dann erst über eine Öffnung aus dem Dewar gelangen. Dies könnte durch eine Helixstruktur an der Außenseite des Isoliereinsatzes erreicht werden. Ob damit auch die Reduktion der Messzeit durch das Kippen des Dewars verringert werden kann, konnte zu diesem Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden.

Der in dieser Arbeit genutzte Manipulator wurde nicht auf die kompakte Bauform des *Cube*-II-Dewars hin optimiert, sondern sollte flexibel auch für größere Dewar-Gefäße eingesetzt werden können. Daher besteht hier eine hohes Potential den Manipulator so an

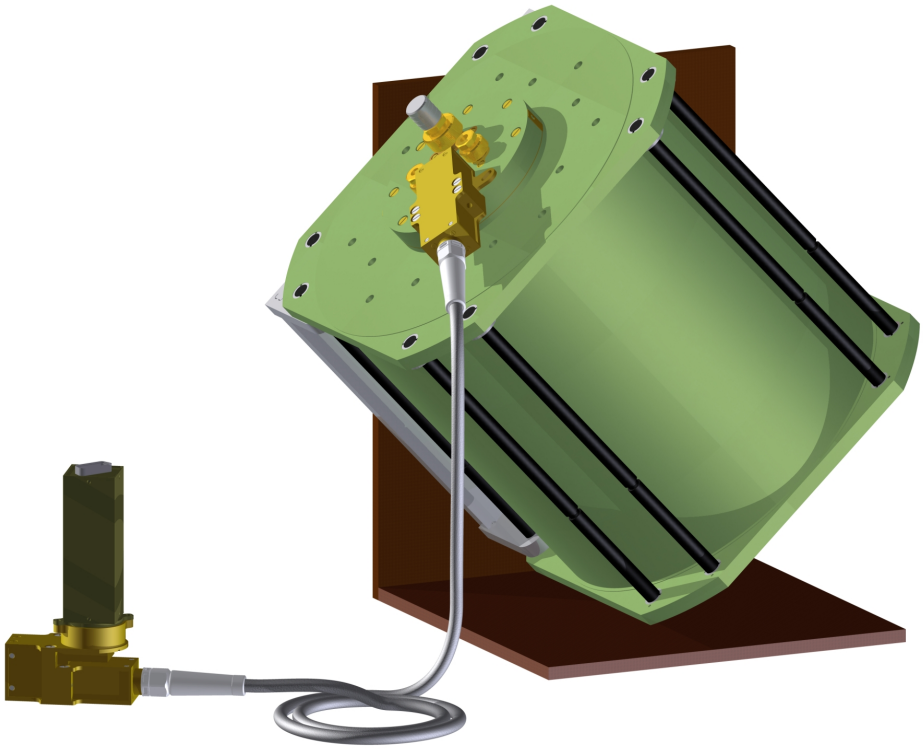


Abbildung 5.9.: 3D-Modell des *Cube*-II-Systems mit integriertem miniaturisiertem Manipulator und dezentraler FLL-Elektronik

das *Cube*-II-System anzupassen, dass ein kompaktes, mobiles und von außen steuerbares Messsystem zur Charakterisierung von magnetisch geschirmten Umgebungen zur Verfügung steht. Mit solch einem kompakten Messsystem sollen die magnetischen Schirmungen von beispielsweise dem bereits laufenden *nEDM* Experiment am Paul Scherrer Institut in der Schweiz oder das im Aufbau befindliche *nEDM*-Experiment an der Technischen Universität München magnetisch charakterisiert werden. Beide Experimente nutzen einen zylindrischen Schirm mit einem Durchmesser von $\geq 1{,}2\,\mathrm{m}$, wobei das eigentliche Experiment in dessen Zentrum installiert wird. Ist der magnetische Schirm geschlossen, darf sich aus Gründen der Sicherheit kein Mensch mehr innerhalb des geschirmten Volumens aufhalten. Daher soll das *Cube*-II-System inklusive dem adaptierten Manipulator kompakt genug sein, um die magnetische Flussdichte im Zentrum und innerhalb eines begrenzten Volumens von $(30 \times 30 \times 30)\,\mathrm{cm}^3\,\mathrm{cm}$ messen zu können. Abbildung 5.9 zeigt eine kompakte Möglichkeit wie der Dewar gekippt und rotiert werden kann.

Um die für die Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte nötige Messprozedur mit dem *Cube*-II-System innerhalb des geschlossenen Schirmes realisieren zu können, muss der Manipulator von außen steuerbar sein. Dabei müssen alle Aktuatoren außerhalb der magnetischen Schirmung oder im Rahmen der zu untersuchenden Flussdichte „unmagnetisch“ sein. Diese Automatisierung sollte weiterhin die Verschiebung des Messsystems beinhalten um den Verlauf der magnetischen Flussdichte innerhalb des im Protokoll ge-

forderten Volumens von $(30\,\mathrm{x}\,30\,\mathrm{x}\,30)\,\mathrm{cm}^3$ zu untersuchen.

6. Anwendung der zwei SQUID-Systeme *Cube*-I und *Cube*-II

6.1. Einsatz des Prototypen *Cube*-I am Paul Scherrer Institut

Am Paul Scherrer Institut (PSI) Schweiz wird seit 2004 ein Spin-Präzessions-Experiment zur Bestimmung des elektrischen Dipolmomentes des Neutrons (nEDM) betrieben. Wie schon zuvor beschrieben, ist ein essentieller Teil dieses Experimentes die magnetische Schirmung. Sie besteht am PSI aus vier Lagen *Mu-Metall* in zylindrischer Form. Um das Unsicherheitsbudget des *nEDM*-Experimentes aufstellen zu können, müssen unter anderem die magnetischen Eigenschaften des Volumens, in dem das Experiment durchgeführt wird, regelmäßig charakterisiert werden. Hierfür wird die räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte innerhalb des Volumens mit Fluxgate- und optischen-Magnetometern untersucht. Neben der Amplitudenverteilung der magnetischen Flussdichte müssen auch Störsignale und das magnetische Rauschen charakterisiert werden. Durch die geringe Bandbreite des optischen Präzessions-Magnetometers von wenigen Hz und das hohe Eigenrauschen der Fluxgate-Magnetometer von einigen $\mathrm{pT}/\sqrt{Hz}$ gegenüber einigen $\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ von $\mathrm{LT_c}$-SQUID-Magnetometern, bestand großes Interesse solche Sensoren innerhalb des *nEDM*-Schirmes einzusetzen. T. Bryṡ et. al zeigten 2005 eine solche Implementierung eines SQUID-Systems in den *nEDM*-Schirm [40]. Dabei wurde ein mit flüssigem Helium gefüllter Dewar eingesetzt, welcher über einen langen und schmalen Bereich verfügte. Dieser wurde von außen durch ein zentrales Loch in den magnetischen Schirm bis zum Zentrum des Experimentes geführt. Im Inneren des Dewars befanden sich $\mathrm{LT_c}$-SQUID-Magnetometer mit denen dann starr an einem Punkt gemessen werden konnte.

Um solche Messungen in einem Volumen mit den Vorzügen der $\mathrm{LT_c}$-SQUIDs durchzuführen, wurde zu Beginn dieser Arbeit der Prototyp des miniaturisierten Dewars entwickelt und realisiert. Dieses *Cube*-I genannte SQUID-System bestand aus einem dem *Cube*-II ähnlichen Dewar, sechs *W9L* $\mathrm{LT_c}$-SQUIDs und zwei kommerziellen FLL-Elektroniken der Firma *Magnicon*. Die sechs SQUIDs waren auf den Flächen eines Würfels mit einer Kantenlänge von 3 cm befestigt und sollten die Verteilung der absoluten magnetischen Flussdichte, wie von Thiel et al. beschrieben [38], bestimmen. Dies war jedoch auf Grund von thermisch

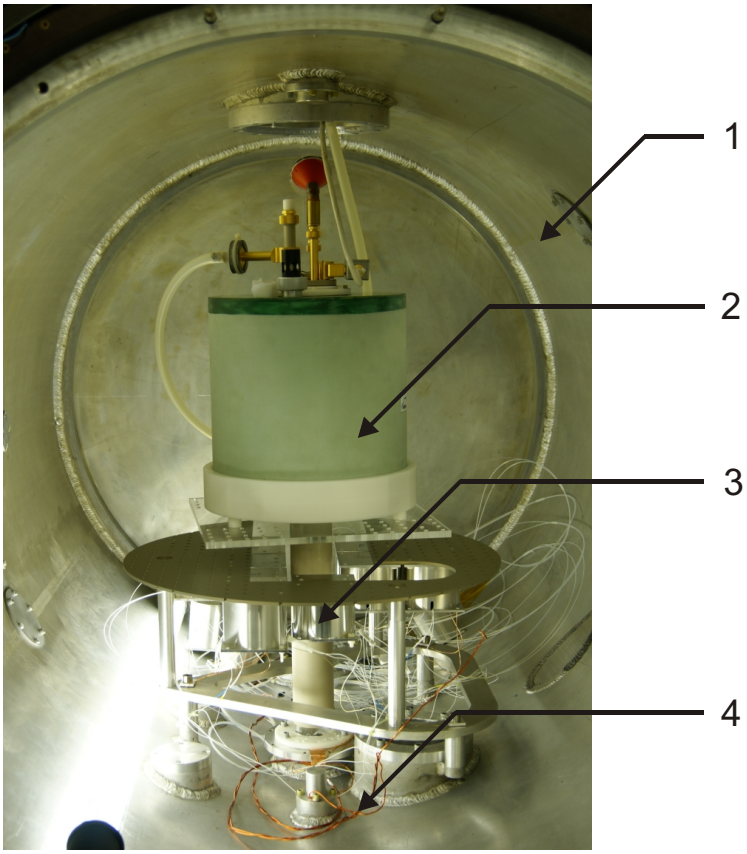


Abbildung 6.1.: Fote des *Cube*-I-Systems (2) im magnetischen Zentrum der zylindrischen *Mu-Metall* Schirmung des *nEDM* Experimentes am Paul Scherrer Institut Schweiz. Zwischen der innersten Lage *Mu-Metall* und dem *Cube*-I befindet sich der mit 1. markierte Aluminiumzylinder, welcher als Vakuumkammer dient. Unterhalb des Dewars befinden sich die mit 3. markierten optischen Caesium-Präzessions-Magnetometer und deren mit 4. markierten Kupferleitungen zur Erzeugung des 3,4 kHz Anregungsfeldes.

induzierten dynamischen Magnetfeldern während des Kippens des *Cube*-I-Dewar nicht möglich. Die Amplitude dieser magnetischen Störungen war so hoch, dass der Aussteuerbereich des SQUID-Systems mit maximal $\pm 300\,\mathrm{nT}$ nicht ausreichte, um den Arbeitspunkt während der für die Offsetbestimmung notwendigen $45\,^{\circ}$ auszuregeln. Weiterhin hatte das *Cube*-I-System im Vergleich zum *Cube*-II-System ein höheres niederfrequentes Rauschen welches auf den selben thermischen Prozess wie bei der Verkippung zurückgeführt wurde. Das mit dem *Cube*-I-System gemessene Flussdichterauschen im *BMSR*-2 betrug bei 1 Hz rund $10\,\mathrm{ft}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ für die X- und Y- und $20\,\mathrm{ft}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ für die Z-SQUIDs. Auf Grund dieser thermisch induzierten Störungen wurden nur magnetische Stör- und Driftprozesse sowie Rauschmessungen innerhalb des *Mu-Metall* Schirms des PSI durchgeführt. Der dafür verwendete Messaufbau wurde in Abbildung 6.1 dargestellt. Auf diesem Foto ist der *Cube*-I gezeigt, welcher sich im Zentrum der *nEDM*-Schirmung befindet. Weiterhin ist im Hintergrund der aus Aluminium bestehende Vakuumzylinder (Abbildung: 6.1 1.) sowie die optischen Caesium-Präzessions-Magnetometer (Abbildung: 6.1 3.) zu erkennen.

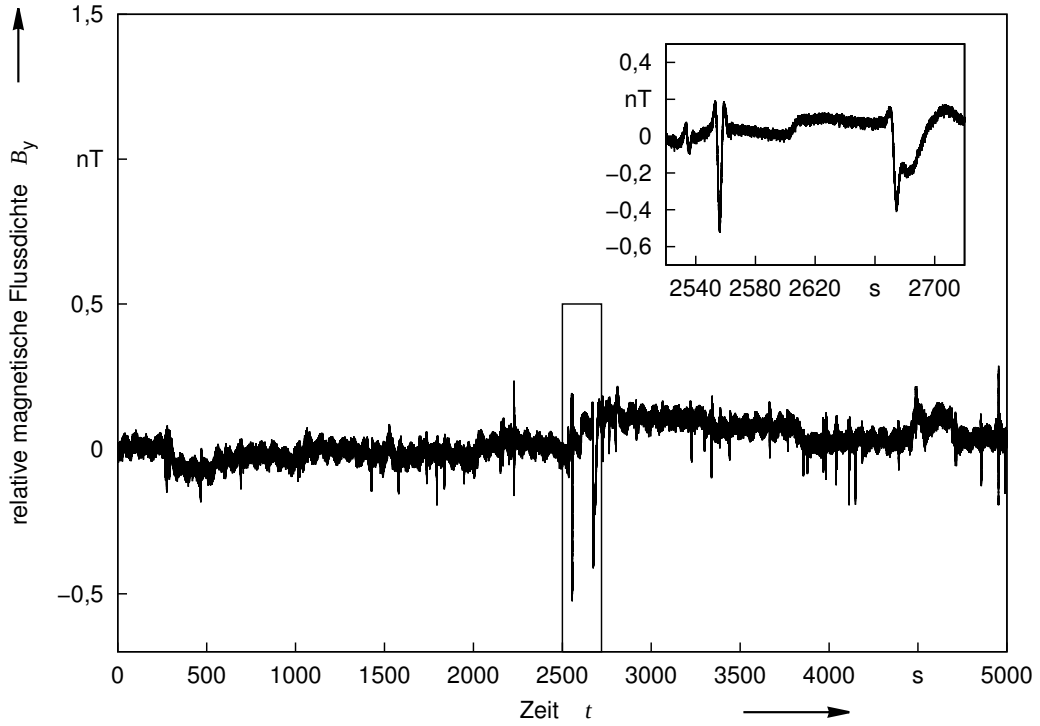


Abbildung 6.2.: Messung der relativen magnetischen Flussdichte B_y über 5000 Sekunden zwischen 10 und 12 Uhr mittags im zylindrischen *nEDM*-Schirm des *PSI*. Zusätzlicher Zeitausschnitt von 200 s für eine detailliertere Darstellung einer Störung zwischen 2520 s 2720 s.

Um Störprozesse richtungsabhängig zu untersuchen, wurde das *Cube*-I-System im Zentrum des *nEDM*-Schirms ausgerichtet und die Änderungen der magnetischen Flussdichte mit einer Abtastrate von 250 Hz zwischen 10 Uhr und 12 Uhr mittags aufgezeichnet. Abbildung 6.2 zeigt die B_y-Komponente für ein Zeitintervall von 5000 s. Zu erkennen sind zahlreiche Störungen mit Amplituden von bis zu 600 pT, welche durch äußere Störungen verursacht wurden. Diese hohe Störung wurde zusätzlich als Bildausschnitt mit einer gedehnten Zeitachse in Abbildung 6.2 dargestellt. Zu erkennen sind Störungen mit zeitlichen Änderungen im Bereich von wenigen Sekunden. Diese Messungen waren für das Experiment von Interesse, da eine Stabilität der magnetischen Flussdichte im Zentrum der Schirmung über 100 s von 100 fT als Ziel für das geplante Unsicherheitsbudget benötigt wurde [96]. Aus diesen Gründen werden die Messungen zum *nEDM*-Experiment nur noch nachts durchgeführt, wo solche schnellen Änderungen der magnetischen Flussdichte nicht auftreten.

Neben den Störungs- und Driftprozessen wurde das magnetische Flussdichterauschen untersucht, da weder Fluxgats- noch die optischen Präzessions-Magnetometer in der Lage waren, im femto Teslabereich Rauschprozesse zu untersuchen. Dabei sollte die Höhe des weißen Rauschniveaus bestimmt und die Belastung des magnetischen Rauschspektrums mit Störungen aufgezeigt werden. Als Auflösungsgrenze wurde ein Rauschspektrum ge-

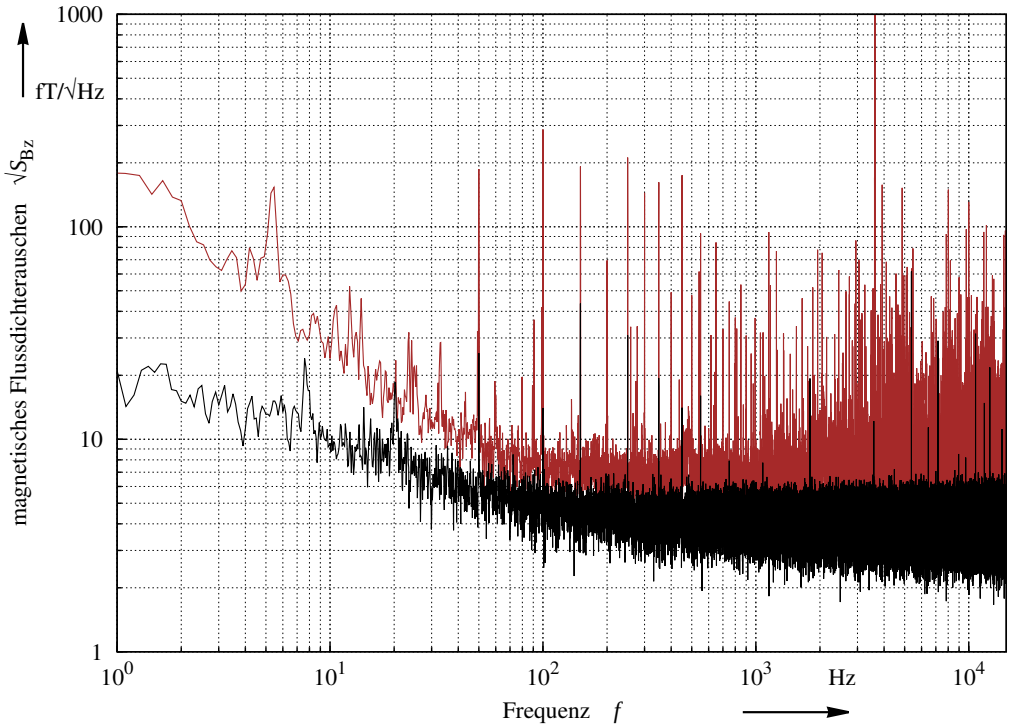


Abbildung 6.3.: Das Magnetische Flussdichterauschen der B_z-Komponente gemessen im magnetischen Zentrum des *BMSR-2* (schwarz) und des zylindrischen *nEDM*-Schirms des *PSI* (braun).

nutzt, welches zuvor im *BMSR*-2 gemessen wurde.

Dieser Vergleich ist in Abbildung 6.3 anhand der beiden mit dem *Cube*-I-System gemessenen Spektren dargestellt. Dabei wurde hier nur die jeweilige B_z-Komponente dargestellt, da diese durch das für das Experiment nötige Messfeld von rund 1 µ ausgezeichnet ist. Das Messsystem wurde für beide Messungen am jeweiligen magnetischen Zentrum ausgerichtet und die magnetische Flussdichte mit einer Abtastrate von 30 kHz für 100 Sekunde aufgezeichnet. Die Messung in der *nEDM*-Schirmung wurde 1 Uhr nachts mit allen für das Experiment benötigten magnetischen Quellen durchgeführt, um dem Zustand während eines Experimentes nahe zu kommen. Die Zeitdaten wurden mittels der FFT von *National Instrument* transformiert, wobei eine arithmetische Mittelung der Spektren von 10 genutzt wurde. Die Messung im *nEDM*-Schirm (Abbildung: 6.3 braun) zeigt eine deutliche Belastung der höherfrequenten magnetischen Flussdichte durch 50 Hz und deren harmonischen im Vergleich zum *BMSR*-2 (schwarz). Die Ursache hierfür liegt an einem fehlenden faradayschen HF-Schirm um die *Mu-Metall*-Schirmung wie es beim *BMSR*-2 der Fall ist (siehe 2.1). Diese Störungen wurden durch die direkt unter und neben dem *Mu-Metall*-Schirm positionierte Steuerelektronik, Netzteile, Netzversorgung, Computer und mobile Telefone verursacht. Eine detaillierte Analyse der einzelnen Störungen wurde an dieser Stelle nicht durchgeführt, da nur ein begrenztes Zeitfenster für diese Messungen zur Verfügung stand. Neben den Harmonischen der Netzfrequenz ist bei 3,4 kHz eine sehr schmale und hohe

Störung im Spektrum zu erkennen. Diese entspricht der Larmor-Frequenz der fest verbauten optischen Caesium-Präzessions-Magnetometer bei einem B_0-Feld von 1 µT. Diese Frequenz wird von den für die Caesium-Magnetometer benötigten Anregungsspulen verursacht, welche rund 30 cm von den SQUIDs entfernt waren. Der für die Erzeugung des Anregungsfeldes notwendige Strom wurde über die beiden in Abbildung 6.1 (4) am Boden des inneren Zylinders zu erkennenden verdrillten Kupferleitungen zu den einzelnen Spulen geführt. Weiterhin ist eine leichte aber signifikante Erhöhung des weißen Rauschniveaus von rund $4\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ innerhalb des *BMSR*-2 auf 5 bis $6\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ innerhalb des *nEDM*-Schirms des *PSI* zu erkennen. Da diese Erhöhung ebenfalls unabhängig vom Zustand der zusätzlichen magnetischen Quellen war, ist davon ausgegangen worden, dass sie durch die hohe Störbelastung der SQUID-Sensoren verursacht wurde.

Unterhalb von 100 Hz steigt das magnetische Rauschen im *Cube*-I-Dewar innerhalb des *BMSR*-2 durch die thermisch induzierten Rauschprozesse auf über $15\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ bei 4 Hz an. Durch diese Erhöhung ist von den mechanisch induzierten Schwingungen innerhalb des *BMSR*-2 (siehe Abbildung: 5.5) nur noch die Störung bei 7,5 Hz zu erkennen. Innerhalb der *nEDM*-Schirmung (braune Kurve) steigt das magnetische Rauschen auf $55\,\mathrm{fT}/\sqrt{Hz}$ bei 4 Hz an. Als Ursache für diese Erhöhung konnten neben dem geringeren Schirmfaktor im Vergleich zum *BMSR*-2 die zusätzlichen magnetischen Quellen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Störung bei rund 5,2 Hz im braunen Spektrum wurde als mechanisch induziertes Schwingungsartefakt identifiziert.

Das eigentliche Ziel, die Durchführung des in Kapitel 3.1 beschriebenen Protokolls zur Charakterisierung von *MSRs*, konnte jedoch aus den oben beschriebenen Gründen mit dem *Cube*-I-SQUID-System innerhalb der *nEDM*-Schirmung des Paul Scherrer Institutes nicht durchgeführt werden. Daraufhin wurde der *Cube*-I-Dewar untersucht, um die Störung während der 45 ° Kippung zu ermitteln. Dabei stellte sich heraus, dass bei der Herstellung des *Cube*-I massive Kupferplatten im Vakuumgefäß eingesetzt wurden. Dies korrespondierte mit dem in Z-Richtung erhöhten niederfrequenten magnetischen Rauschen, welches mit den SQUIDs im *Cube*-I-Dewar gemessen werden konnte. Die Ursache dafür könnte die elektrische Leitfähigkeit des Materials sein, welches thermisch induziertes magnetisches Rauschen erzeugt [35]. Zusätzlich wiesen diese Kupferplatten zinnhaltige Lote auf. Herr Dr. A. Schnabel konnte durch einen künstlich erzeugten Temperaturgradienten innerhalb einer ähnlichen Kupferplatte mit aufgebrachtem zinnhaltigen Lot eine vergleichbare magnetische Reaktion mit einem rund 5 cm entfernten SQUID-System nachweisen [97]. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde innerhalb dieser Arbeit zusammen mit Herrn Dr. A. Schnabel und dem Hersteller *Fujihira* der *Cube*-II-Dewar entwickelt, bei dem sowohl auf die Kupferplatten, als auch auf die zinnhaltigen Lote verzichtet werden konnte. Durch diese Entwicklung konnte das in Kapitel 3.1 beschriebene Protokoll zur Charakterisierung von *MSRs* mit dem *Cube*-II-System ermöglicht werden. Da die Messzeit am *nEDM*-Experiment des *PSI*s jedoch begrenzt war, konnte die Charakterisierung dieses *MSRs* innerhalb dieser

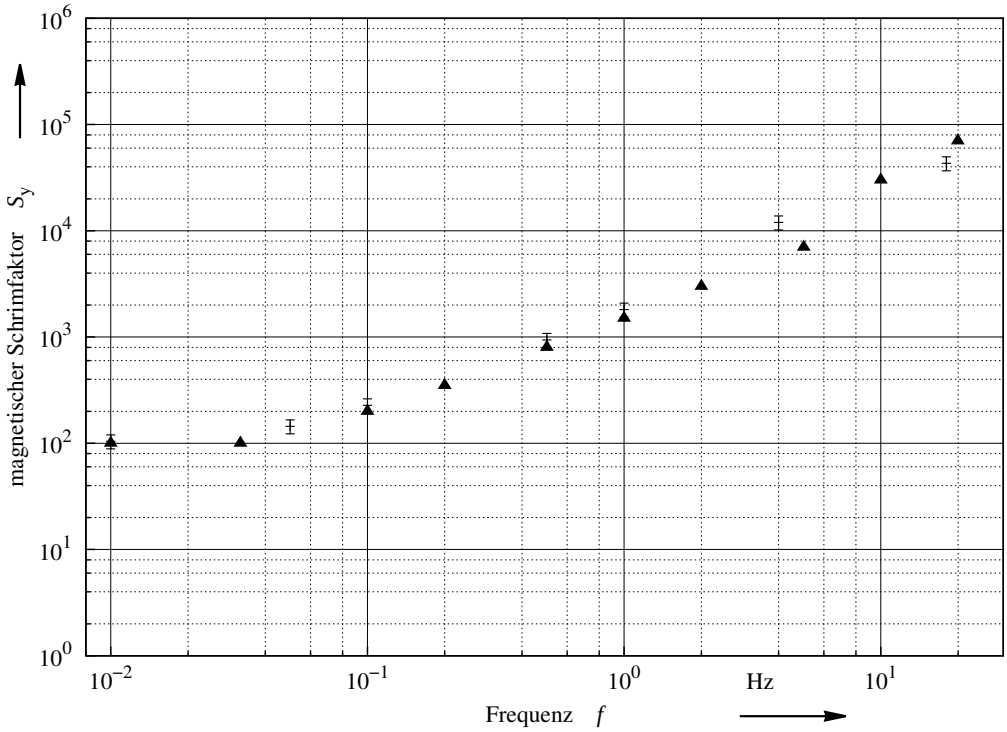


Abbildung 6.4.: Vergleich des frequenzabhängigen Schirmfaktors des *Zuse-MSR* ermittelt mit dem *Cube*-II-System (+) und vom Hersteller *VAC* (▲) vor der Installation an der PTB. Die mit dem *Cube*-II-System ermittelten Werte wurden mit Messunsicherheit dargestellt, welche jeweils durch einen waagerechten Balken über und unter dem besten Schätzwert abgegrenzt wurde.

Arbeit nicht durchgeführt werden.

6.2. Charakterisierung einer 2-lagigen Mu-Metallschirmung mit dem *Cube*-II-System

6.2.1. Schirmfaktor

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten SQUID-Messsystems *Cube*-II konnte das in Kapitel 3.1 vorgestellte Protokoll an der *Zuse-MSR* umgesetzt werden. Die *Zuse-MSR* ist eine magnetische Schirmung, bestehend aus zwei Lagen *Mu-Metall* und einer dazwischen liegenden Schale Aluminium. Im Zentrum dieses geschirmten Raumes von $(2{,}5 \times 2{,}5 \times 2{,}3)\,\mathrm{m}^3$ konnte vom Hersteller *Vacuumschmelze* (*VAC*) bei 0,01 Hz ein Schirmfaktor von ≈ 100 ermittelt werden. Das *Cube*-II-System konnte zur Bestimmung des frequenzabhängigen Schirmfaktors des *Zuse-MSR* eingesetzt werden. Dazu wurde das *Cube*-II-System auf einem Holzpodest so im magnetischen Zentrum ausgerichtet, dass das in Kapitel 3.1 beschriebe kartesische Koordinatensystem genutzt werden konnte. Zur Erzeugung der äußeren ma-

gnetischen Flussdichte diente eine zylindrische Spule mit einem mittleren Durchmesser von 17,5 cm und einer Länge von 4,9 cm. Die Rotationsachse der Zylinderspule wurde entlang der Y-Achse des *MSRs* ausgerichtet und mit einer Distanz von 2,5 m zum magnetischen Zentrum und 1 m vor der Tür des *MSR* ausgerichtet. Die Spule wurde mit einem Frequenzgenerator *Agilent 33500b* und einem Leistungsverstärker *Agilent 6655A* betrieben. Um den Schirmfaktor S nach Gleichung 2.5 bestimmen zu können, wurde die Komponente der magnetischen Flussdichte entlang der Rotationsachse der Spule im magnetischen Zentrum des *MSRs* ohne magnetische Schirmung berechnet und durch den Messwert des *Cube*-II dividiert. Die Berechnung wurde mittels dem Gesetz von Biot-Savart vorgenommen, wobei als Stromstärke die mit einer Stromzange PR 30 der Firma *LEM-Messtechnik* gemessene Amplitude eingesetzt wurde. Da die Spule und der Verstärker nicht für solch eine Messung dimensioniert waren, konnte der Schirmfaktor nur bis zu einer Frequenz von 18 Hz bestimmt werden. Da somit nur die Realisierbarkeit der Bestimmung des Schirmfaktors getestet werden konnte, wurde nur der Schirmfaktor der Y-Richtung untersucht.

Abbildung 6.4 zeigt die beiden frequenzabhängigen Schirmfaktoren S_y der *Zuse-MSR* von 10 mHz bis $\approx$ 20 Hz, welche mit dem *Cube*-II-System und vom Hersteller *VAC* vor der Installation an der PTB ermittelt wurden. Von 10 mHz bis 1 Hz stimmen die beiden Schirmfaktoren im Rahmen der Messunsicherheit überein. Oberhalb von 1 Hz weichen die mit dem *Cube*-II-System ermittelten Werte um einen Faktor von rund 1,7 ab. Da der Schirmfaktor für steigende Frequenzen von der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb der jeweiligen Schirmlagen abhängt, könnte die Abweichung durch eine isolierende Oxidschicht der Türkontakte verursacht werden. Weiterhin muss auch die Ausrichtung der Spule zum *MSR* verbessert und die erzeugte Amplitude der magnetischen Flussdichte durch die Anregungsspule ohne die Anwesenheit einer *MSR* intensiver validiert werden.

6.2.2. Magnetische Drift

Um die magnetische Drift innerhalb der *Zuse-MSR* zu untersuchen, wurde das Messsysten entsprechend des vorgeschlagenen Protokolls (siehe Kapitel 3.1) im magnetischen Zentrum ausgerichtet. Die Schirmung wurde entsprechend der in [12] beschriebenen Methode entmagnetisiert und die Messung nach einer Wartezeit von 1000 s gestartet. Die Messzeit betrug rund 13 Stunden mit einer Abtastrate der Datenerfassung von 300 Hz. Um die Temperatur konstant zu halten, wurde die Klimatisierung der magnetischen Schirmung während der gesamten Messzeit betrieben. Die aktiv geregelte Kompensation wurde für diese Messung nicht genutzt. Die Messung wurde um 20:35 Uhr gestartet, um die Reduktion der urbanen magnetischen Störungen in der Nacht abbilden zu können.

Abbildung 6.5 zeigt die drei Komponenten, B_x (braun), B_y (schwarz) und B_z (grau) der relativen magnetischen Flussdichte über eine Messzeit von rund 10 Stunden. Dafür wurde

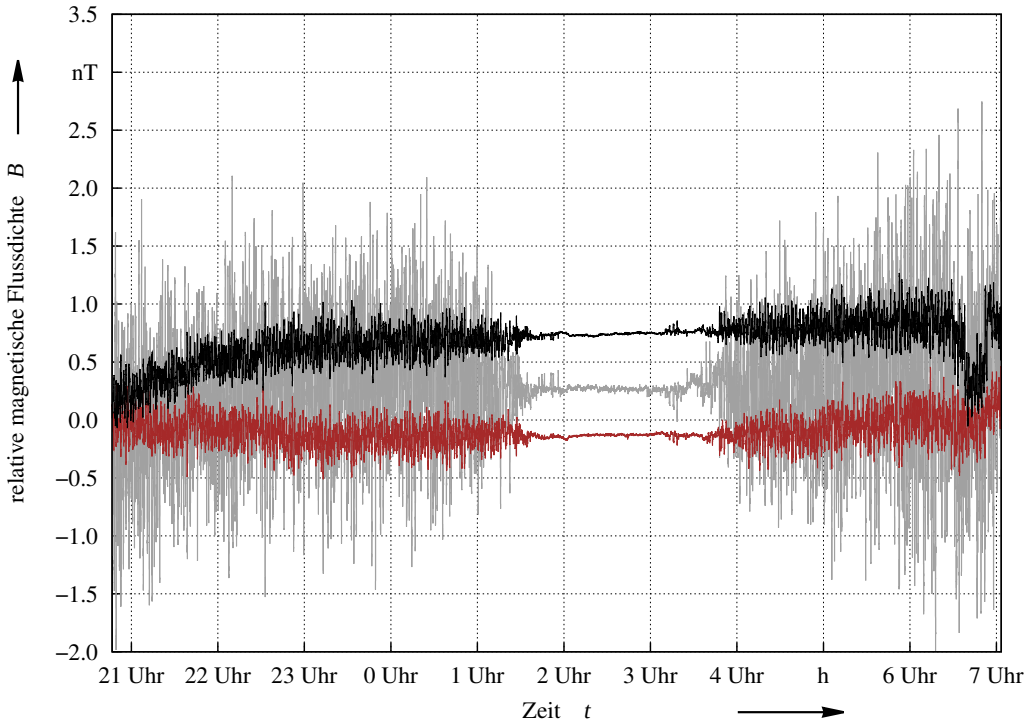


Abbildung 6.5.: Änderung der relativen magnetischen Flussdichte im magnetischen Zentrum der *Zuse-MSR* über eine Messzeit von rund 10 Stunden. Dargestellt sind die drei Komponenten B_x- (braun), B_y- (schwarz) und B_z (grau) von 21 Uhr abends bis 7 Uhr morgens. Die Verringerung der Amplituden aller drei Komponenten der Flussdichte zwischen 1:30 Uhr und 3:30 Uhr werden durch die Betriebspause der Berliner U-Bahn verursacht.

der Mittelwert der ersten 1000 Messwert jedes SQUIDs bestimmt und von allen Werten abgezogen. Es ist eine Langzeitdrift zu erkennen, welche besonders in der B_y-Komponente mit rund 0,75 nT während der gesamten Messzeit ausgeprägt ist. Dagegen zeigen die B_x- und B_z-Komponenten mit 0,15 nT und 0,25 nT eine geringe Feldänderung.

Bedingt durch den niederfrequenten Schirmfaktor von rund 100 dominieren die äußeren Störungen besonders entlang der vertikalen Z-Achse des *Zuse-MSR*. Hier wurden Änderungen der magnetischen Flussdichte von rund ± 1,5 nT mit einer Periodendauer von 100 s ermittelt. Dies korrespondiert mit den äußeren Störungen, welche mit einem Fluxgate aufgezeichnet wurden und eine Änderung von rund ± 100 nT aufwiesen. Die beiden anderen orthogonalen Komponenten weisen innerhalb der Schirmung eine geringere Änderung der magnetischen Flussdichte von rund ± 0,2 nT auf. Um den Einfluss der urbanen Störungen darstellen zu können, fand die Messung nachts statt. Dieser Effekt zeigt sich in allen drei Komponenten durch das Absinken der Änderung der magnetischen Flussdichte zwischen 1:30 Uhr und 3:30 Uhr. Diese Zeitspanne entspricht genau der Betriebspause der Berliner U-Bahn, welche mit Gleichstrom betrieben wird. Während dieser Zeit reduziert sich die Flussdichteänderung in allen drei Komponenten auf unter ± 0,03 nT. Nach dem Ende der

Betriebspause steigt die Änderung der Flussdichte wieder an. Die in der B_y-Komponente gemessene Störung von rund 0,5 nT um 6:30 Uhr wurde durch Arbeiten direkt vor der *Zuse-MSR* verursacht. Der Einfluss der aktiv geregelten Kompensation wurde hier nicht weiter untersucht, da er schon in [12] mit rund einem Faktor 7 für die B_z-Komponente ermittelt wurde.

6.2.3. Magnetisches Rauschen

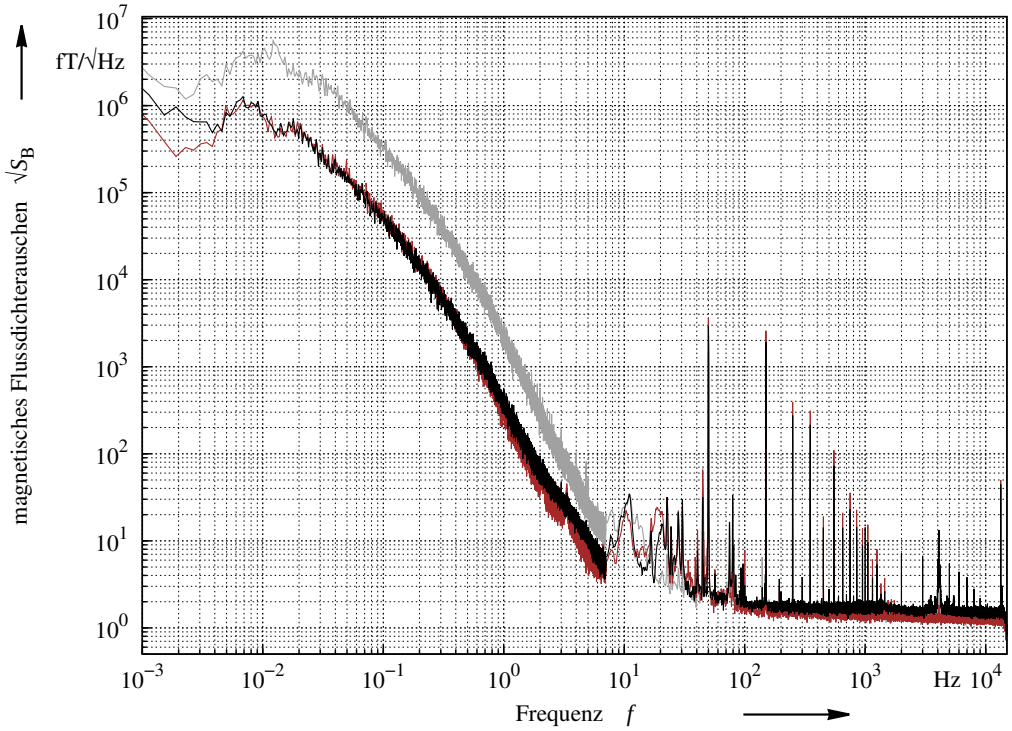


Abbildung 6.6.: Mit dem *Cube*-II-System ermitteltes Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte im magnetischen Zentrum der *Zuse-MSR*. Dargestellt sind die drei Komponenten B_x- (braun), B_y- (schwarz) und B_z (grau). Das Spektrum setzt sich aus drei sequenziellen Messungen zusammen: 1 mHz bis 7 Hz, 7 Hz bis 1,3 kHz und 1,3 kHz bis 15 kHz.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wurde die Messung der Langzeitdrift genutzt, um das niederfrequente Spektrum der magnetischen Flussdichte mit einer Mittelungszahl von 18 darstellen zu können. Zusätzlich wurden im Anschluss der Langzeitmessung zwei weitere Messungen mit einer Abtastrate von 3 kHz und 30 kHz sowie einer kürzeren Messzeit von 226 s und 118 s aufgezeichnet (siehe Protokoll im Anhang B ab der Seite 179). Das in Abbildung 6.6 dargestellte Rauschspektrum wurde aus den drei Spektren der Einzelmessungen wie folgt zusammengesetzt:

- Messung 1, Abtastrate 300 Hz, Bereich im Frequenzspektrum 1 mHz bis 7 Hz, 18 Mittelungen

- Messung 2, Abtastrate 3.000 Hz, Bereich im Frequenzspektrum 7 Hz bis 1,3 kHz, 50 Mittelungen

- Messung 3, Abtastrate 30.000 Hz, Bereich im Frequenzspektrum 1,3 kHz bis 15 kHz 100 Mittelungen.

Für die Darstellung der B_x-Komponente (Abbildung: 6.6 braun) wurde das SQUID $X6$, für die B_y-Komponente das SQUID $Y6$ und für die B_z-Komponente das SQUID $Z7$ ausgewählt. Diese wiesen bei der Charakterisierung des *Cube*-II-Messsystems im *BMSR*-2 ein geringes weißes Rauschniveau auf. Aus der Abbildung 6.6 lässt sich ein weißes Rauschniveau von $\leq 2\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ in einem Frequenzbereich von 15 kHz bis 100 Hz für die drei Komponenten der magnetischen Flussdichte ablesen. Damit dominiert das Eigenrauschen des *Cube*-II-Systems, welches in Kapitel 5.5 innerhalb des *BMSR*-2 mit $\leq 3\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ für alle SQUIDs bestimmt wurde. Die bei 13.321 kHz in allen 16 Kanälen zu findende Störung konnte ebenfalls im *BMSR*-2 gemessen werden. Es konnte eine rund 250 Hz breite Störung bei 4,1 kHz mit einer Amplitude von rund $5\,\mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ ebenfalls in allen drei Raumrichtungen detektiert werden. Zwischen 9 kHz bis 2 kHz wird das weiße Rauschniveau der Y-SQUIDs alle 1000 Hz von Störungen durchdrungen. Erst unterhalb von 2 kHz überschreiten diese Störungen auch in den X- und Z-SQUIDs das jeweilige weiße Rauschniveau, wobei sich deren Abstand auf 100 Hz beziehungsweise 50 Hz reduziert. Bei all diesen Störungen handelt es sich um Vielfache der 50 Hz Netzfrequenz, welche im Vergleich zur Charakterisierung des *Cube*-II-Systems innerhalb des *BMSR*-2 hier mit höherer Amplitude und höherer Anzahl auftraten. So weist die Störung bei 50 Hz innerhalb der *Zuse-MSR* eine Amplitude von rund $2\,\mathrm{pT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ auf. Neben der Netzfrequenz konnten unterhalb von 100 Hz eine Vielzahl von weiteren Störungen, wie zum Beispiel bei 79 Hz, 75 Hz und 45 Hz, 30 Hz und 7 Hz aufgezeigt werden. Diese werden maßgeblich durch die Klimatisierung erzeugt, welche zur Stabilisierung der Temperatur innerhalb des *MSRs* nötig war. Unterhalb der 7 Hz steigt das magnetische Flussdichterauschen bis zu einem Maximum bei 10 mHz von $1\,\mathrm{nT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ für die X- und Y-SQUIDs und rund $4\,\mathrm{nT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ für die Z-SQUIDs an, was wiederum mit den in Abbildung 6.5 gezeigten Zeitdaten korrespondiert.

6.2.4. Absolute magnetische Flussdichte und dessen Gradient

Die *Zuse-MSR* wird hauptsächlich für bildgebende Messungen der kernmagnetischen Resonanz genutzt bei welcher mit magnetischen Flussdichten im Bereich von mehreren zehn Millitesla makroskopische Magnetisierungen in den Proben erzeugt werden [3]. Diese hohen Flussdichten werden vorzugsweise entlang der Z-Achse des *MSR* erzeugt, was zu einer Erhöhung sowohl des statischen Restfeldes als auch des Gradienten führt. Um ein reproduzierbares und niedriges Restfeld für beispielsweise spektroskopische Messungen zur Verfügung stellen zu können wurde dieser *MSR* mit einer automatischen Entmagnetisie-

rung ausgestattet [12]. Deren Einfluss auf das Restfeld und den Gradienten wurde mit Hilfe des *Cube*-II-Systems durch zwei Messungen im magnetischen Zentrum untersucht. Dazu wurden die drei Vektor- und neun Gradientenkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte vor und nach einer Entmagnetisierung für das Zentrum des *MSR* ermittelt. Die Messungen selbst fanden während der Betriebspause der Berliner U-Bahn, zwischen 2:00 Uhr und 3:00 Uhr statt.

Tabelle 6.1.: Gegenüberstellung der Vektorkomponenten sowie der Beträge der absoluten magnetischen Flussdichte vor und nach der Entmagnetisierung im Zentrum der *Zuse-MSR*. Die angegebenen kombinierten erweiterten Messunsicherheiten entsprechen $k = 2$.

	B_x nT	B_y nT	B_z nT	$\|B\|$ nT
vorher	$(5{,}155 \pm 0{,}160)$	$(6{,}404 \pm 0{,}166)$	$(-8{,}469 \pm 0{,}598)$	$(11{,}803 \pm 0{,}444)$
nachher	$(0{,}420 \pm 0{,}017)$	$(0{,}699 \pm 0{,}019)$	$(\ 0{,}604 \pm 0{,}129)$	$(\ 1{,}015 \pm 0{,}078)$

Die Werte der Vektorkomponenten der absoluten magnetischen Flussdichte vor und nach der Entmagnetisierung wurden zusammen mit deren Beträgen in der Tabelle 6.1 gegenübergestellt. Vor der Entmagnetisierung konnte im Zentrum des *Zuse-MSR* ein Betrag von $(11{,}84 \pm 0{,}74)$ nT ermittelt werden. Die stärkste Komponente dieses Vektors ist B_z mit einer Amplitude von $(-8{,}26 \pm 0{,}52)$ nT. Dies korrespondiert mit der zuvor durchgeführten kernmagnetischen Resonanz, bei welcher rund 50 mT eingesetzt wurden, um eine makroskopische Probenmagnetisierung zu erzeugen. Die beiden Querkomponenten sind mit $(5{,}16 \pm 0{,}34)$ nT und $(6{,}39 \pm 0{,}40)$ nT für die B_x und B_y deutlich geringer als B_z, jedoch verglichen mit dem Zustand nach der Entmagnetisierung um einen Faktor zehn höher. Der sich nach der Entmagnetisierung ergebende Betrag der absoluten magnetischen Flussdichte wurde mit $(1{,}03 \pm 0{,}16)$ nT ermittelt. Da sich die Unsicherheit bei der Bestimmung der SQUID-Offsets mit sinkender Flussdichte ebenfalls verringert (siehe Kap.: 5.6), ist neben der reduzierten Amplituden auch eine Verringerung der Messunsicherheit zwischen den beiden Messungen zu beobachten. Nach der Entmagnetisierung wird die Unsicherheit bei der Ermittlung der absoluten magnetischen Flussdichte durch die nicht ausreichend gedämpften äußeren Schwankungen der Flussdichte ($S \approx 100$) während der Bestimmung der SQUID Offsets dominiert. Innerhalb der Schirmung wurden Schwankungen während der Messzeit von $\pm 0{,}03$ nT gemessen.

Um die Gradienten innerhalb der *Zuse-MSR* zu ermitteln, wurde das Messsystem jeweils entlang der X- und Y- um 2,5 cm verschoben. Für die Verschiebung entlang X konnte die Spur des Manipulators genutzt werden. Um die Bewegung in Y zu realisieren, wurde die Grundplatte des Manipulators um das Zentrum 90 ° rotiert. Somit stand die selbe Spur für die Y Verschiebung zur Verfügung. Die Bewegung in Z wurde durch das Anheben des Ma-

Tabelle 6.2.: Gegenüberstellung der Gradientenkomponenten magnetischen Flussdichte vor und nach der Entmagnetisierung im Zentrum der *Zuse-MSR*. Die Messung erfolgte durch die Verschiebung des Messsystems. Aus Gründen der Darstellung wurde die kombinierte erweiterte Messunsicherhert (k=2) hier in Klammern abgebildet. Dabei bezieht sich die Angabe in den Klammern auf die letzten Ziffern des besten Schätzwertes.

	vorher			nachher		
	ΔB_x	ΔB_y	ΔB_z	ΔB_x	ΔB_y	ΔB_z
	$\frac{pT}{cm}$	$\frac{pT}{cm}$	$\frac{pT}{cm}$	$\frac{pT}{cm}$	$\frac{pT}{cm}$	$\frac{pT}{cm}$
Δx	12 (2)	-27 (10)	-2 (26)	-2 (5)	-2 (2)	-28 (31)
Δy	-41 (22)	-39 (10)	-39 (4)	-9 (15)	4 (10)	-14 (19)
Δz	-35 (15)	-54 (13)	30 (29)	-15 (4)	-2 (15)	2 (0)

nipulators um 2 cm umgesetzt. Die sich durch diese räumliche Änderung des Messsystems ergebende Flussdichteänderung wurde auf die jeweils verschobene Strecke normiert und die so ermittelten neun Gradientenkomponenten berechnet. Dies wurde ebenfalls vor und nach der Entmagnetisierung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser beiden Messungen wurden in der Tabelle 6.2 gegenübergestellt. Dabei ist auch für die Gradientenkomponeten eine Reduktion durch die Entmagnetisierung zu erkennen. Warum die Gradienten $\Delta B_z/\Delta x$ und $\Delta B_x/\Delta z$ nach der Entmagnetisierung höher als die anderen sieben Komponenten sind, konnte zu diesem Zeitpunkt noch nicht geklärt werden. Für beide 3x3 Matrizen des Gradiententesors lässt sich unter Berücksichtigung der abgeschätzten Messunsicherheit sowohl die Symmetrie als auch die sich zu Null ergebende Spur erkennen.

6.2.5. Diskussion der Charakterisierung der *Zuse-MSR*

Zur Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften des *Zuse-MSR* wurde das in Kapitel 3.1 beschriebene Protokoll angewendet. Die ermittelten Werte wurden in die vorgeschlagene kompakte Übersicht eingetragen und in Abbildung 6.7 dargestellt. Durch den Einsatz des *Cube*-II-Messsystems konnten bis auf den Schirmfaktor entlang der X- und Z-Richtung sowie im höherfrequenten Bereich von S_y alle vorgeschlagenen Parameter über den gewünschten Messbereich untersucht werden. Die Abweichungen zwischen den hier ermittelten und den vom Hersteller zur Verfügung gestellten Schirmfaktoren konnte auf Grund von fehlenden Messunsicherheiten nicht untersucht werden. Weiterhin waren die Spule und der Leistungsverstärker, die genutzt wurden um die äußere Störung zu erzeugen, nicht auf diese Anwendung angepasst. Hier muss ein Messaufbau geschaffen werden, der es ermöglicht, die nötigen Flussdichten bei den gewünschten Frequenzen zu erzeugen.

Hierzu sollten die Arbeiten [61, 62] studiert und ein angepasster Messaufbau realisiert werden.

Bei dem Vergleich der magnetischen Drift innerhalb und außerhalb der *Zuse-MSR* zeigte sich unter Berücksichtigung des niederfrequenten Schirmfaktors von 100 für die B_{y}- und die B_{z}-Komponente eine vergleichbare Tendenz. Die mittels Fluxgate außerhalb der Schirmung ermittelte B_{x} Komponente zeigte eine fast lineare Drift von 30 nT über die gesamte Messzeit von zehn Stunden. Innerhalb der Schirmung konnte mit dem *Cube*-II-System solch eine Drift nicht nachgewiesen werden. Durch die Höhe und Dauer der Feldänderung wurde von einem defekten Fluxgate Sensor ausgegangen.

Durch den direkten Vergleich des magnetischen Restfelds innerhalb des *Zuse-MSR* vor und nach einer Entmagnetisierung konnte deren Einfluss dargestellt werden. Dies zeigt weiterhin, dass weder die Amplitude noch die Richtung des magnetischen Restfeldes direkt abhängig von der äußeren magnetischen Flussdichte ist, sondern maßgeblich durch die Remanenz der *Mu-Metall* Wände dominiert wird.

Kompakte Übersicht der magnetischen Eigenschaften des MSR

Bezeichnung der Schirmung

Zuse-MSR. Diese Kammer wird überwiegend für Bildgebung mittels Niedrigfeld-NMR genutzt bei der magnetische Flussdichten von bis zu 50mT angewendet werden.

Eigenschaften

Lagen	**1 ;1 ; 1**
von innen nach außen	Permalloy;Aluminium;Permalloy
aktive Schirmung	**X**

innerer freier Raum

ΔX=2,5 m	ΔY=2,5 m	ΔZ=2,3 m

Drift im mag. Zentrum

	innen pT/h	außen pT/h
Bx	15	30000
By	75	8000
Bz	25	5000

Schirmfaktor

Frequenz Hz	Sx #	Sy #	Sz #
0.010		104	
0.100		228	
1.000		1810	
4.000		12007	
18.000		43211	
55.000			
78.000			
98.000			
298.000			
598.000			
798.000			
998.000			

mag. Rauschen im mag. Zentrum

	innen			außen		
Frequez	**Bx fT/√Hz**	**By fT/√Hz**	**Bz fT/√Hz**	**Bx fT/√Hz**	**By fT/√Hz**	**Bz fT/√Hz**
0.001	600	1663	2891	$98\cdot10^{6}$	$98\cdot10^{6}$	$200\cdot10^{6}$
1	437	558	3694	$400\cdot10^{3}$	$200\cdot10^{3}$	$1700\cdot10^{3}$
36	3	2	3	$51\cdot10^{3}$	$21\cdot10^{3}$	$51\cdot10^{3}$
98	2	2	3	$24\cdot10^{3}$	$7\cdot10^{3}$	$24\cdot10^{3}$
980	2	2	3	$2\cdot10^{3}$	$2\cdot10^{3}$	$2\cdot10^{3}$
9800	1	2	2			
14980	1	2	2			

statisches Restfeld im mag. Zentrum

	innen			zentrales inneres Volumen von (30x30x30)cm³ nach degauss		außen
Komponente	**vor degauss nT**	**nach degauss nT**	**nach Tür auf / zu nT**	**max [nT]**	**min [nT]**	**nT**
|B|	11.80±0.44	1.02±0.08				43127±190
B_x	5.16±0.16	0.42±0.02				6540±33
B_Y	6.40±0.17	0.70±0.02				-13840±69
B_z	-8.47±0.60	0.60±0.13				-40320±202

Gradient G_{ij} des statischen Restfeldes im mag. Zentrum (i=ΔBx,ΔBy,ΔBz) (j=Δx,Δy,Δz)

	vor der Entmagnetisierung			nach der Entmagnetisierung		
	Bx pT/cm	**By pT/cm**	**Bz pT/cm**	**Bx pT/cm**	**By pT/cm**	**Bz pT/cm**
x	12±2	-27±10	-2±26	-2±5	-2±2	-28±31
y	-41±22	-39±10	-39±4	-9±15	4±10	-14±19
z	-35±15	-54±13	30±29	-15±4	-2±15	2±0
	Methode			**Methode**		
	Verschiebung über 2,5 cm in X- und Y-Richtung und 2 cm in Z-Richtung			Verschiebung über 2,5 cm in X- und Y-Richtung und 2 cm in Z-Richtung		

Abbildung 6.7.: Zusammenfassung der charakteristischen magnetischen Eigenschaften der magnetischen Schirmung *Zuse-MSR*.

7. Ausblick

Mit dem *Cube*-II-Messsystem und dem vorgestellten Protokoll zur Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen wurde die Grundlage geschaffen, um *MSRs* unter vergleichbaren Bedingungen zu untersuchen. Wenn das vorgeschlagene Protokoll auf bereits existierende *MSR* angewendet wird, kann eine Datenbank erzeugt werden. Die darin enthaltenen Informationen, besonders die möglichen Vergleiche zwischen den *MSRs* können genutzt werden, um neue Ansätze in der Weiterentwicklung geschirmter Umgebungen zu erreichen. Neben der Neuentwicklung könnten aber auch bereits existierende Schirmungen von einer solchen Datenbank profitieren. Die Betreiber einer magnetischen Schirmung wären somit in der Lage die eigene Schirmung mit baugleichen Typen zu vergleichen und eventuelle Defizite wie beispielsweise ein hohes Restfeld oder zu hohe Driften des Restfeldes durch geeignete Veränderungen zu optimieren.

Weiterhin zeigt diese Arbeit die Herausforderungen zwischen den Eigenschaften des magnetischen Messsystems und der wirkenden magnetischen Flussdichte in den *MSR*s zu unterscheiden. Für Experimente, bei denen die Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften ein wesentlicher Beitrag im Unsicherheitsbudget ist, kann das *Cube*-II-System zur zusätzlichen Validierung eingesetzt werden. Solch ein Vorgehen ist beispielsweise für *EDM* Experimente vorstellbar, bei denen Fluxgate- und optische Präzessions-Magnetometer zur Charakterisierung eingesetzt werden. Hier könnte das auf SQUID-Magnetometern basierende Messsystem zusätzliche Informationen vor allem über das magnetische Rauschen und die Homogenität des *MSR* liefern.

Das hier vorgestellte kompakte Messsystem und die standardisierte Messprozedur kann als Basis dienen, um das Abnahmeprotokoll für die Übergabe eines *MSR* vom Hersteller an den Kunden zu erweitern.

Literaturverzeichnis

[1] M. Burghoff, T. H. Sander, A. Schnabel, D. Drung, L. Trahms, G. Curio, and B.-M. Mackert. dc magnetoencephalography: Direct measurement in a magnetically extremely-well shielded room. *Applied Physics Letters*, 85:6278, 2004.

[2] S. Hartwig. Konzeption und realisierung eines messsystems für grundlagenexperimente in der niedrigfeld-magnetresonanz. *Dissertation, Technische Universität Ilmenau*, 2011.

[3] I. Hilschenz, R. Körber, H.-J. Scheer, T. Fedele, H.-H. Albrecht, A. M. Cassara, S. Hartwig, L. Trahmsa, J. Haase, and M. Burghoff. Magnetic resonance imaging at frequencies below 1 khz. *Magnetic Resonance Imaging*, 31:171, 2013.

[4] M. A. Rosenberry and T. E. Chupp. Atomic electric dipole moment measurement using spin exchange pumped masers of 129Xe and 3He. *Physical Review Letters*, 86:22, 2001.

[5] C.A. Baker, G. Ban, K. Bodek, M. Burghoff, Z. Chowdhuri, M. Daum, M. Fertl, et al. The search for the neutron electric dipole moment at the paul scherrer institute. *Physics Procedia*, 17:159, 2011.

[6] C Gemmel, W Heil, S Karpuk, K Lenz, Ch Ludwig, Yu Sobolev, K Tullney, M Burghoff, W Kilian, S Knappe-Grüneberg, et al. Ultra-sensitive magnetometry based on free precession of nuclear spins. *The European Physikal Journal*, 57:303, 2010.

[7] Jonathan Engel, Michael J. Ramsey-Musolf, and U. van Kolck. Electric dipole moments of nucleons, nuclei, and atoms: The standard model and beyond. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 71:21, 2013.

[8] S. Knappe, T. H. Sander, O. Kosch, F. Wiekhorst, J. Kitching, and L. Trahms. Ultra-sensitive magnetometry based on free precession of nuclear spins. *Applied Physics Letters*, 97:133703, 2010.

[9] M. Burghoff, A. Schnabel, J. Voigt, G. Ban, V. Hélaine, T. Lefort, Y. Lemiére, et al.

Progress report 2012 of psi proposal r-05-03.1: Measurement of the neutron electric dipole moment. *PSI*, 2013.

[10] M. Burghoff, A. Schnabel, J. Voigt, G. Ban, V. Hélaine, T. Lefort, Y. Lemiére, et al. Progress report 2013 of psi proposal r-05-03.1: Measurement of the neutron electric dipole moment. *PSI*, 2014.

[11] J. Bork, H. D. Hahlbohm, R. Klein, and A. Schnabel. The 8-layered magnetically shielded room of the ptb: Design and construction. *Proceedings of the 12th International Conference on Biomagnetism, Helsinki*, 2001.

[12] J. Voigt, S. Knappe-Grüneberg, A. Schnabel, R. Körber, and M. Burghoff. Measures to reduce the residual field and field gradient inside a magnetically shielded room by a factor of more than 10. *Metrology and Measurement Systems*, 20:239, 2013.

[13] I. Altarev, E. Babcock, D. Beck, M. Burghoff, S. Chesnevskaya, T. Chupp, Degenkolb, et al. A magnetically shielded room with ultra low residual field and gradient. *Review of Scientific Instruments*, 85:075106, 2014.

[14] I. Altarev, M. Bales, D. H. Beck, T. Chupp, K. Fierlinger, P. Fierlinger, F. Kuchler, T. Lins, M. G. Marino, B. Niessen, G. Petzoldt, U. Schläpfer, A. Schnabel, J. T. Singh, R. Stoepler, S. Stuiber, M. Sturm, B. Taubenheim, and J. Voigt. A large-scale magnetic shield with 106 damping at millihertz frequencies. *Journal of Applied Physics*, 117, 2015.

[15] P.W. Schmidt, D. Clark, K. Leslie, M. Bick, D. Tilbrook, and C. Foley. Getmag a squid magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration. *Exploration Geophysics*, 35:297, 2004.

[16] Y. Sui, G. Li, S. Wang, and J. Lin. Compact fuxgate magnetic full-tensor gradiometer with spherical feedback coil. *Review of Scientific Instruments*, 85:014701, 2014.

[17] J. Vrba. *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications.* Kluwer Academic Publishers, 1995.

[18] H. Kaden. *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik.* Springer, 2006.

[19] D. Budgker and D. F. Jackson Kimball. *Optical Magnetometry.* Cambridge University Press, 2013.

[20] W. Meissner and R. Ochsenfeld. Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*, 21:787, 1933.

[21] R. Ackermann, F. Wiekhorst, A. Beck, D. Gutkelch, F. Ruede, A. Schnabel, U. Steinhoff, D. Drung, J. Beyer, C. Assmann, L. Trahms, H. Koch, T. Schurig, R. Fischer, M. Bader, H. Ogata, and H. Kado. Multichannel SQUID System With Integrated Magnetic Shielding for Magnetocardiography of Mice. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17:827, 2007.

[22] F. Wiekhorst. persönliche Mitteilung. *Physikalisch Technische Bundesanstalt*, 2014.

[23] H. Ohta and T. Matsui. Whole-head squid system in a superconducting magnetic shield. *Physica C Superconductivity*, 341:2713, 2000.

[24] S. Afach, G. Bison, K. Bodek, F. Burri, Z. Chowdhuri, M. Daum, M. Fertl, B. Franke, et al. Dynamic stabilization of the magnetic field surrounding the neutron electric dipole moment spectrometer at the Paul Scherrer Institute. *Journal of Applied Physics*, 116:084510, 2014.

[25] J. Clarke, M. Hatridge, and M. Mößle. Squid-detected magnetic resonance imaging in microtesla fields. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 9:389, 2007.

[26] H. Henke. *Elektromagnetische Felder: Theorie und Anwendung (German Edition)*. Springer, 2007.

[27] T. J. Summer, J.-M. Pendlbury, and K.-F. Stmith. Convectional magnetic shielding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20:1095, 1987.

[28] E. Baum and J. Bork. Systematic design of magnetic shields. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 101:69, 1991.

[29] D. Cohan. A Shielded Facility for Low-Level Magnetic Measurements. *Applied Physics Letters*, 38:1295, 1967.

[30] D. Cohen, U. Schläpfer, S. Ahlfors, M. Hämäläinen, and E. Halgren. New six-layer magnetically-shielded room for meg. *Biomag Proceed*, 2002.

[31] D. Cohen. Large-volume conventional magnetic shields. *Revue de Physique Appliquée*, 5:53, 1970.

[32] G. Kajiwara, K. Harakawa, H. Ogata, and H. Kado. High-performance magnetically shielded room. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 32:2582, 1996.

[33] C. Holmlund, M. Keipi, T. Meinander, A. Penttinen, and H. Seppä. Novel concepts in magnetic shielding. *CiteSeerX*, page 968, 2000.

[34] S. Khan and D. Cohen. Note: Magnetic noise from the inner wall of a magnetically shielded room. *Review of Scientific Instruments*, 84:056101, 2013.

[35] J. Nenonen, J. Montonen, and T Katila. Thermal noise in biomagnetic measurements. *Review of Scientific Instruments*, 67:2397, 2009.

[36] U. Schläfper. persönliche Mitteilung, 2014.

[37] VACUUMSCHMELZE GmbH. Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge PHT-001. *Firmenschrift*, 2002.

[38] F. Thiel, A. Schnabel, S. Knappe-Grüeneberg, D. Stollfuß, and M. Burghoff. Demagnetization of magnetically shielded rooms. *Review of Scientific Instruments*, 78:035106, 2007.

[39] F. Thiel, A. Schnabel, S. Knappe-Grüneberg, M. Burghoff, D. Drung, F. Petsche, S. Bechstein, U. Steinhoff, et al. The 304 squids vector magnetometer system for biomagnetic measurements in the berlin magnetically shielded room 2. *Biomedizinische Technik*, 50:169, 2005.

[40] T. Bryś, S. Czekaj, M. Daum, P. Fierlinger, D. George, R. Henneck, M. Kasprzak, K. Kirch, et al. Magnetic field stabilization for magnetically shielded volumes by external field coils. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 554:527, 2005.

[41] F. Primdahl. The fluxgate magnetometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 12:241, 1979.

[42] H.U. Auster. Kalibrierung von fluxgate magnetometern mittels relativbewegungen zwischen sensor und magnetfeld. *Dissertation, Technische Universität Carola Wilhelmina zu Braunschweig*, 2000.

[43] G. Bartington and C. E. Chapman. A high-stability fluxgate magnetic gradiometer for shallow geophysical survey applications. *Archaeological Prospection*, 11:19, 2004.

[44] Dmitry Budker and Michael Romalis. Optical magnetometry. *Nature Physics*, 3:227, 2007.

[45] G. Bison. Development of an optical cardio-magnetometer. *Dissertation, Technische Universität Freibur, Schweiz*, 2004.

[46] V. Schultze, R. IJsselsteijn, T. Scholtes, S. Woetzel, and H.-G. Meyer. Characteri-

stics and performance of an intensity-modulated optically pumped magnetometer in comparison to the classical m x magnetometer. *Optics express*, 20:14201, 2012.

[47] R. Mhaskar, S. Knappe, and J. Kitching. A low-power, high-sensitivity micromachined optical magnetometer. *Applied Physics Letters*, 101:241105, 2012.

[48] R. Jiménez-Martínez, W. Griffith, S. Knappe, J. Kitching, and M. Prouty. High-bandwidth optical magnetometer. *Journal of the Optical Society of America B*, 29:3398, 2012.

[49] G. Bison. persönliche Mitteilung, 2013.

[50] B. Patton, E. Zhivun, D. C. Hovde, and D. Budker. All-optical vector atomic magnetometer. *Phys. Rev. Lett.*, 113:013001, 2014.

[51] M. Scheiner. Neuartige systemkonzepte zur messsignalerfassung für supraleitende quanteninterferometer. *Dissertation, Technische Universität Berlin*, 2005.

[52] J. Clarke and A.I. Braginski. *The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems.* Wiley-VCH, 2004.

[53] D. Drung and H. Koch. An integrated DC SQUID magnetometer with variable additional positive feedback. *Superconductor Science and Technology*, 7:242, 1994.

[54] T. Schönau, M. Schmelz, V. Zakosarenko, R. Stolz, M. Meyer, S. Anders, L. Fritzsch, and H.-G. Meyer. Squid-based setup for the absolute measurement of the earth's magnetic field. *Superconductor Science and Technology*, 26:035013, 2013.

[55] H.-G. Meyer, R. Stolz, A. Chwala, and M. Schulz. Squid technology for geophysical exploration. *physica status solidi (c)*, 2:1504, 2005.

[56] M. Burghoff, H. Schleyerbach, D. Drung, L. Trahms, and H. Koch. A vector magnetometer module for biomagnetic application. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 9:4069, 1999.

[57] T Fedele, H J Scheer, M Burghoff, G Curio, and R Körber. Ultra-low-noise eeg/meg systems enable bimodal non-invasive detection of spike-like human somatosensory evoked responses at 1khz. *Physiological Measurement*, 36:357, 2015.

[58] I. Altarev, C. A. Baker, G. Ban, G. Bison, K. Bodek, M. Daum, P. Fierlinger, P. Geltenbort, K. Green, M. G. D. van der Grinten, E. Gutsmiedl, P. G. Harris, W. Heil, R. Henneck, M. Horras, P. Iaydjiev, S. N. Ivanov, N. Khomutov, K. Kirch, S. Kistryn, A. Knecht, P. Knowles, A. Kozela, F. Kuchler, M. Kuźniak, T. Lauer, B. Lauss, T. Le-

fort, A. Mtchedlishvili, O. Naviliat-Cuncic, A. Pazgalev, J. M. Pendlebury, G. Petzoldt, E. Pierre, G. Pignol, G. Quéméner, M. Rebetez, D. Rebreyend, S. Roccia, G. Rogel, N. Severijns, D. Shiers, Yu. Sobolev, A. Weis, J. Zejma, and G. Zsigmond. Test of lorentz invariance with spin precession of ultracold neutrons. *Phys. Rev. Lett.*, 103:081602, 2009.

[59] C. Gemmel, W. Heil, S. Karpuk, K. Lenz, Yu. Sobolev, K. Tullney, M. Burghoff, W. Kilian, S. Knappe-Grüneberg, W. Müller, A. Schnabel, F. Seifert, L. Trahms, and U. Schmidt. Limit on lorentz and *cpt* violation of the bound neutron using a free precession ^{3}He/^{129}Xe comagnetometer. *Phys. Rev. D*, 82:111901, 2010.

[60] K. Tullney, F. Allmendinger, M. Burghoff, W. Heil, S. Karpuk, W. Kilian, S. Knappe-Grüneberg, W. Müller, U. Schmidt, A. Schnabel, F. Seifert, Yu. Sobolev, and L. Trahms. Constraints on spin-dependent short-range interaction between nucleons. *Phys. Rev. Lett.*, 111:100801, 2013.

[61] S. Odawara, K. Muramatsu, S. Komori, K. Kamata, K. Yamazaki, T. Yamaguchi, M. Sakakibara, et al. Method for evaluating shielding factor of double layered magnetically-shielded rooms for uniform magnetic field using exciting coils placed on one side. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46:2357, 2010.

[62] S. Odawara, K. Muramatsu, Y. Gao, S. Komori, K. Yamazaki, T. Shinnoh, T. Yamaguchi, M. Sakakibara, et al. Condition of exiting coils used in evaluation of shielding factor of magnetically shielded rooms for uniform magnetic field. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47:4274, 2011.

[63] Z. Sun. persönliche Mitteilung, 2014.

[64] M. Burghoff, A. Schnabel, J. Voigt, G. Ban, V. Hélaine, T. Lefort, Y. Lemiére, et al. Progress report 2014 of psi proposal r-05-03.1: Measurement of the neutron electric dipole moment. *PSI*, 2015.

[65] R. Hari and R. Salmelin. Human cortical oscillations: a neuromagnetic view through the skull. *Trends in Neurosciences*, 20:44, 1997.

[66] H.U. Auster, K.H. Fornacon, E. Georgescu, K.H. Glassmeier, and U. Motschmann. Calibration of flux-gate magnetometers using relative motion. *Measurement Science and Technology*, 13:1124, 2002.

[67] A. Schnabel, D. Drung, S. Knappe-Grüneberg, and M Burghoff. A cubic squid arrangement for the measurement of the dc magnetic field vector. *Proceedings of the Biomag*, 2006.

[68] M. Liebl, U. Steinhoff, F. Wiekhorst, A. Coene, J. Haueisen, and L. Trahms. Quantitative reconstruction of a magnetic nanoparticle distribution using a non-negativity constraint. *Biomedizinische Technik*, 58, 2013.

[69] D. Drung. The PTB 83-SQUID system for biomagnetic applications in a clinic. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5:2112, 1995.

[70] D. Drung. High-performance DC SQUID read-out electronics. *Physica C: Superconductivity*, 368:134, 2002.

[71] S Bechstein, F Petsche, M Scheiner, D Drung, F Thiel, A Schnabel, and Th Schurig. Digitally controlled high-performance dc squid readout electronics for a 304-channel vector magnetometer. *Journal of Physics: Conference Series*, 43:1266, 2006.

[72] A. Schnabel, M. Burghoff, S. Hartwig, F. Petsche, U. Steinhoff, D. Drung, and H. Koch. A sensor configuration for a 304 squid vector magnetometer. *Proceedings of the Biomag*, 14:638, 2003.

[73] G. Ventura and L. Risegari. *The Art of Cryogenics: Low-Temperature Experimental Techniques.* Elsevier, 2008.

[74] Kern GmbH. Werkstoffdatenbank RIWETA 4.1, 2014.

[75] C. Buzea and K. Robbie. Assembling the puzzle of superconducting elements: a review. *Superconductor Science and Technology*, 18:R1, 2005.

[76] Y. Zhang, J.R.G. Evans, and S. Yang. Corrected values for boiling points and enthalpies of vaporization of elements in handbooks. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56:328, 2011.

[77] B.V. Vasiliev. The new thermo-magnetic effect in metals. *Universal Journal of Physics and Application*, 2:221, 2014.

[78] JCGM100:2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. *Bureau Internationaö des Poids et Measures*, 2008.

[79] Metrodata GmbH. *GUM Workbench Benutzerhandbuch für Version 1.3 und 2.3 und 2.4.* Metrodata GmbH, 2011.

[80] L. Bergmann and C. Schaefer. *Lehrbuch Der Experimentalphysik: Lehrbuch der Experimentalphysik 2. Elektromagnetismus (German Edition).* Walter De Gruyter Inc, 2006.

[81] A I Ahonen, M S HÃ¤mÃ¤lÃ¤inen, M J Kajola, J E T Knuutila, P P Laine, O V Lounasmaa, L T Parkkonen, J T Simola, and C D Tesche. 122-channel squid instrument for investigating the magnetic signals from the human brain. *Physica Scripta*, 1993:198, 1993.

[82] V.S. Zotev, A.N. Matlachov, P.L. Volegov, H.J. Sandin, M.A. Espy, J.C. Mosher, A.V. Urbaitis, S.G. Newman, and Robert H. Kraus. Multi-Channel SQUID System for MEG and Ultra-Low-Field MRI. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 17:839, 2007.

[83] P. T. Vesanen, J. O. Nieminen, K. C. J. Zevenhoven, J. Dabek, L. T. Parkkonen, A. V. Zhdanov, J. Luomahaara, J. Hassel, J. Penttilä, J. Simola, A. I. Ahonen, J. P. Mäkeä, and R. J. Ilmoniemi. Hybrid ultra-low-field mri and magnetoencephalography system based on a commercial whole-head neuromagnetometer. *Magnetic Resonance in Medicine*, 69:1795, 2013.

[84] F. El-Nahhas. Aufbau, charakterisierung, kalibrierung und anwendung eines dreikanal-squid-messsystems. *Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin*, 2015.

[85] Y. Okada, K. Pratt, C. Atwood, A. Mascarenas, R. Reineman, J. Nurminen, and D. Paulson. Babysquid: A mobile, high-resolution multichannel magnetoencephalography system for neonatal brain assessment. *Review of Scientific Instruments*, 77:024301, 2006.

[86] K. Isawa, S. Nakayama, M. Ikeda, S. Takagi, S. Tosaka, and N. Kasai. Robotic 3d squid imaging system for practical nondestructive evaluation applications. *Physica C: Superconductivity*, 432:182, 2005.

[87] Y. Hatsukade, K. Yotsugi, and S. Tanaka. Mobile HTS-squid NDE system with robot arm and active shielding using fluxgate. *Physica C: Superconductivity*, 468:1932, 2008.

[88] A. Chwala, R. Stolz, R. IJsselsteijn, V. Schultze, N. Ukhansky, H.-G. Meyer, and T. Schüler. Squid gradiometers for archaeometry. *Superconductor Science and Technology*, 14:1111, 2001.

[89] M. Schiffler, M. Queitsch, R. Stolz, A. Chwala, W. Krech, H.-G. Meyer, and N. Kukowski. Calibration of squid vector magnetometers in full tensor gradiometry systems. *Geophysical Journal International*, 198:954, 2014.

[90] C.P. Foley, D.L. Tilbrook, K.E. Leslie, R.A. Binks, G.B. Donaldson, J. Du, S.K. Lam, P.W. Schmidt, and D.A. Clark. Geophysical exploration using magnetic gradiometry based on hts squids. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 11:1375, 2001.

[91] R. Stolz, V. Zakosarenko, M. Schulz, A. Chwala, L. Fritzsch, H.-G. Meyer, and E.O. Köstlin. Magnetic full-tensor squid gradiometer system for geophysical applications. *The Leading Edge*, 25:178, 2006.

[92] V. Schultze, A. Chwala, R. Stolz, M. Schulz, S. Linzen, H.-G. Meyer, and T. Schüler. A superconducting quantum interference device system for geomagnetic archaeometry. *Archaeological Prospection*, 14:226, 2007.

[93] S.T. Keenan, J.A. Young, C.P. Foley, and J. Du. A high -T_c flip-chip SQUID gradiometer for mobile underwater magnetic sensing. *Superconductor Science and Technology*, 23:025029, 2010.

[94] D. F. He and H. Itozaki. Measuring the absolute magnetic field using high- t_c squid. *Journal of Physics: Conference Series*, 43:1227, 2006.

[95] J.-H. Storm. Untersuchung der magnetischen feldempfindlichkeit eines dc squid-magnetometers. *Masterarbeit, Brandenburgische Technische Universität Cottbus*, 2013.

[96] M. Burghoff, A. Schnabel, J. Voigt, G. Ban, V. Hélaine, T. Lefort, Y. Lemiére, et al. Progress report 2009 of psi proposal r-05-03.1: Measurement of the neutron electric dipole moment. *PSI*, 2010.

[97] A. Schnabel. persönliche Mitteilung, 2012.

Genutzte Abkürzungen und Symbole

Genutzte Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
aHH	anti Helmholtz-Spule
AP	Arbeitspunkt des SQUID-Sensors
BMSR-2	magnetisch geschirmter Raum der PTB in Berlin, Deutschland
Cs	Symbol für das chemische Element Caesium
DC	Gleichspannungs- bzw. Gleichstromwert
dc	direkt gekoppelte Josephson Kontakte
EEG	Elektroenzephalographie
FFT	Schnelle Fourier-Transformation
FLL	Flussregelschleife
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
He	Symbol für das chemische Element Helium
HF	Hochfrequenz
HGW-2082	Hartgewebe bestehend aus Baumwollfeingewebe und Epoxidharz
HH	Helmholtz-Spule
$\mathbf{HT_c}$	hochtemperatur supraleitend
$\mathbf{LT_c}$	niedrigtemperatur supraleitend
MSR	magnetisch geschirmter Raum
MEG	Magnetoenzephalographie
nEDM	elektrisches Dipolmoment des Neutrons
NMR	kernmagnetische Resonanz
OPM	optisches Präzessions-Magnetometer

PEEK	Polyetheretherketon
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
Pos.	Position des *Cube*-II-Systems während der Messprozedur
PSI	Paul Scherrer Institut
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTFE	Polytetrafluorethylen
PXI	ein Standard für modulare Messgeräte
RS-485	differentielle, serielle Kommunikationsschnittstelle
SNR	Signal-Zu-Rauschverhältnis
SQUID	supraleitendes Quanteninterferometer
W9L	Bezeichnung eines speziellen an der PTB entwickelten SQUID-Typs
Xe	Symbol für das chemische Element Xenon

Genutzte Symbole

$A_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{ij}}$	feldempfindliche Fläche des SQUIDs i,j
$\lvert B \rvert$	Betrag der magnetischen Flussdichte
$\vec{B}$	magnetische Flussdichte
$\vec{B}_{\mathrm{a}}$	magnetische Flussdichte ohne magnetische Schirmung
$\vec{B}_{\mathrm{i}}$	magnetische Flussdichte mit magnetische Schirmung
$\vec{B}$x,y,z	magnetische Flussdichte am Ort x,y,z
B_{x}	x-Komponente der magnetischen Flussdichte
B_{y}	y-Komponente der magnetischen Flussdichte
B_{z}	z-Komponente der magnetischen Flussdichte

$B^{\mathrm{x}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	x-Komponente der magnetischen Flussdichte am Ort (x,y,z)
$B^{\mathrm{y}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	y-Komponente der magnetischen Flussdichte am Ort (x,y,z)
$B^{\mathrm{z}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	z-Komponente der magnetischen Flussdichte am Ort (x,y,z)
B_0	magnetisches Haltefeld
B_Δ	Unsicherheitsbeitrag durch die magn. Drift des zu messenden Feldes
$B_{\Delta,\mathrm{Kipp}}$	Unsicherheitsbeitrag durch magn. Drift während der 45 ° Kippung
$B_{\mathrm{i,orth}}$	Unsicherheitsbeitrag durch die Orthogonalität der Sensoren untereinander
B_{Kipp}	Unsicherheitsbeitrag durch die Verkippung der SQUIDs
B_{Pos}	Unsicherheitsbeitrag durch die Positionierung der SQUIDs
B_{rep}	Unsicherheitsbeitrag durch die magn. Drift während der Verschiebung
$B^{\mathrm{X1}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $X1$
$B^{\mathrm{X3}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $X3$
$B^{\mathrm{X5}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $X5$
$B^{\mathrm{X6}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $X6$
$B^{\mathrm{X7}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $X7$
$B^{\mathrm{Y0}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y0$
$B^{\mathrm{Y1}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y1$
$B^{\mathrm{Y2}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y2$
$B^{\mathrm{Y3}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y3$
$B^{\mathrm{Y5}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y5$
$B^{\mathrm{Y6}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y6$
$B^{\mathrm{Y7}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Y7$
$B^{\mathrm{Z1}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Z1$
$B^{\mathrm{Z3}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Z3$
$B^{\mathrm{Z5}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Z5$
$B^{\mathrm{Z7}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $Z7$
$B^{\mathrm{vX0}}_{\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $vX0$
$B^{\mathrm{vY0}}_{\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $vY0$
$B^{\mathrm{vZ0}}_{\mathrm{x,y,z})}$	Messwert der magnetischen Flussdichte mittels dem SQUID $vZ0$
$B^{\mathrm{X1'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180 ° gedrehten SQUID $X1$
$B^{\mathrm{X3'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180 ° gedrehten SQUID $X3$
$B^{\mathrm{X5'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180 ° gedrehten SQUID $X5$

$B^{\mathrm{X6'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $X6$
$B^{\mathrm{X7'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $X7$
$B^{\mathrm{Y0'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y0$
$B^{\mathrm{Y1'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y1$
$B^{\mathrm{Y2'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y2$
$B^{\mathrm{Y3'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y3$
$B^{\mathrm{Y5'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y5$
$B^{\mathrm{Y6'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y6$
$B^{\mathrm{Y7'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Y7$
$B^{\mathrm{Z1'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Z1$
$B^{\mathrm{Z3'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Z3$
$B^{\mathrm{Z5'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Z5$
$B^{\mathrm{Z7'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $Z7$
$B^{\mathrm{vX0'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $vX0$
$B^{\mathrm{vY0'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $vY0$
$B^{\mathrm{vZ0'}}_{(\mathrm{x,y,z})}$	Messwert des um 180° gedrehten SQUID $vZ0$
c_{i}	Empfindlichkeitskoeffizient
d	Abstand zweier Punkte, zwischen denen der Gradient bestimmt wird
Δx	Entfernung zwischen zwei Punkten entlang der x-Achse
Δy	Entfernung zwischen zwei Punkten entlang der y-Achse
Δz	Entfernung zwischen zwei Punkten entlang der z-Achse
e	Elementarladung $= 1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$
f_{L}	Larmorfrequenz
Φ_0	magnetisches Flussquant $= 2,068 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{Vs}$
Φ_{a}	äußerer magnetischer Fluss
Φ_{f}	magnetischer Fluss durch die Rückkoppelspule
Φ	magnetischer Fluss
$G^{\mathrm{ij}}_{\mathrm{FLL}}$	Fluss-zu-Spannung Koeffizient i,j
$G^{\mathrm{ij}}_{\mathrm{DAQ}}$	Verstärkungsfaktor des Datenerfassungskanals i,j
G^{ij}	Gesamtverstärkungsfaktor für das SQUID i,j
g_{mn}	Gradientenkomponenten der magnetischen Flussdichte

γ	gyromagnetisches Verhältnis
H	magnetische Feldstärke
h	Plancksches Wirkungsquantum $= 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
I_b	Biasstrom zur Arbeitspunkteinstellung des SQUIDs
I	elektrische Stromstärke
L_f	Induktivität der Rückkoppelspule
k	Erweiterungsfaktor
M_f^ij	Stromempfindlichkeit des SQUIDs i,j
μ	magnetische Permeabilität
μ_0	magnetische Feldkonstante $= 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$
μ_r	stoffspezifische magnetische Permeabilität
N	Anzahl der Windungen auf einer Spule
n	Anzahl der Einzelmessungen
$\vec{n}_\mathrm{X1}$	Flächennormale des SQUIDs $X1$
$\vec{n}_\mathrm{X3}$	Flächennormale des SQUIDs $X3$
$\vec{n}_\mathrm{X5}$	Flächennormale des SQUIDs $X5$
$\vec{n}_\mathrm{X6}$	Flächennormale des SQUIDs $X6$
$\vec{n}_\mathrm{X7}$	Flächennormale des SQUIDs $X7$
$\vec{n}_\mathrm{Y0}$	Flächennormale des SQUIDs $Y0$
$\vec{n}_\mathrm{Y1}$	Flächennormale des SQUIDs $Y1$
$\vec{n}_\mathrm{Y2}$	Flächennormale des SQUIDs $Y2$
$\vec{n}_\mathrm{Y3}$	Flächennormale des SQUIDs $Y3$
$\vec{n}_\mathrm{Y5}$	Flächennormale des SQUIDs $Y5$
$\vec{n}_\mathrm{Y6}$	Flächennormale des SQUIDs $Y2$
$\vec{n}_\mathrm{Y7}$	Flächennormale des SQUIDs $Y3$
$\vec{n}_\mathrm{Z1}$	Flächennormale des SQUIDs $Z1$
$\vec{n}_\mathrm{Z3}$	Flächennormale des SQUIDs $Z3$
$\vec{n}_\mathrm{Z5}$	Flächennormale des SQUIDs $Z5$
$\vec{n}_\mathrm{Z7}$	Flächennormale des SQUIDs $Z7$
∇	Nabla-Operator
O^ij	Offset des SQUID i,j
O^X1	Offset des SQUIDs $X1$

O^{X3}	Offset des SQUIDs $X3$
O^{X5}	Offset des SQUIDs $X5$
O^{X6}	Offset des SQUIDs $X6$
O^{X7}	Offset des SQUIDs $X7$
O^{Y0}	Offset des SQUIDs $Y0$
O^{Y1}	Offset des SQUIDs $Y1$
O^{Y2}	Offset des SQUIDs $Y2$
O^{Y3}	Offset des SQUIDs $Y3$
O^{Y5}	Offset des SQUIDs $Y5$
O^{Y6}	Offset des SQUIDs $Y2$
O^{Y7}	Offset des SQUIDs $Y3$
O^{Z1}	Offset des SQUIDs $Z1$
O^{Z3}	Offset des SQUIDs $Z3$
O^{Z5}	Offset des SQUIDs $Z5$
O^{Z7}	Offset des SQUIDs $Z7$
ω_{L}	Larmorkreisfrequenz
R_{f}	elektrischer Widerstand der Rückkoppelspule
$\vec{r}$	Ort der zu berechnenden magnetischen Flussdichte
$\vec{r'}$	Ort des Leiterbahnabschnittes
S	magnetischer Schirmfaktor
$\sqrt{S_{\mathrm{B}}}$	magnetisches Flussdichterauschen normiert auf 1 Hz Bandbreite
$\sqrt{S_{\mathrm{I}}}$	elektrisches Stromrauschen normiert auf 1 Hz Bandbreite
$\sqrt{S_{\mathrm{U}}}$	elektrisches Spannungsrauschen normiert auf 1 Hz Bandbreite
s	Länge des Leiterbahnabschnittes
σ	Standardabweichung
T	Temperatur
T_{c}	Sprungtemperatur
U	erweiterte Messunsicherheit
U^{ij}	elektrische Spannung gemessen am SQUID i,j
$U^{\mathrm{ij'}}$	elektrische Spannung am, um 180 ° gedrehten, SQUID i,j
u	Standardmessunsicherheit

u_{c}	kombinierte Standardmessunsicherheit
U_{SQUID}	Spannung am SQUID Sensor
$U_{\mathrm{out\text{-}max}}$	maximale Ausgangsspannung der FLL-Elektronik
V_{b}	Biasspannung zur Arbeitspunkteinstellung des SQUIDs
$vX0_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des virtuellen SQUIDs $vX0$ am Ort (x,y,z)
$vY0_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des virtuellen SQUIDs $vY0$ am Ort (x,y,z)
$vZ0_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des virtuellen SQUIDs $vZ0$ am Ort (x,y,z)
X_{i}	Eingangsgröße
$X1_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $X1$ am Ort (x,y,z)
$X3_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $X3$ am Ort (x,y,z)
$X5_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $X5$ am Ort (x,y,z)
$X6_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $X6$ am Ort (x,y,z)
$X7_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $X7$ am Ort (x,y,z)
$Y0_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y0$ am Ort (x,y,z)
$Y1_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y1$ am Ort (x,y,z)
$Y2_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y2$ am Ort (x,y,z)
$Y3_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y3$ am Ort (x,y,z)
$Y5_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y5$ am Ort (x,y,z)
$Y6_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y6$ am Ort (x,y,z)
$Y7_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Y7$ am Ort (x,y,z)
Y	Ausgangsgröße bzw. gesuchte Größe
y	bester Schätzwert von Y
$Z1_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Z1$ am Ort (x,y,z)
$Z3_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Z3$ am Ort (x,y,z)
$Z5_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Z5$ am Ort (x,y,z)
$Z7_{(\mathrm{x,y,z})}$	Bezeichnung des realen SQUIDs $Z7$ am Ort (x,y,z)

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematische Darstellung der drei Schirmungsprinzipien. 7

2.2. Schematisches Bild vom Berlin Magnetically Shielded Room-2 (*BMSR*-2) 10

2.3. Frequenzabhängiger Schirmfaktor des *Zuse-MSR* und des *BMSR*-2 11

2.4. Idealisierte Spannungs-Fluss-Kennline eines dc-SQUIDs 17

2.5. Schematische Darstellung einer Fluss-Regelschleife für ein LT_c dc-SQUID 18

2.6. Prinzip der Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte mittels 180 ° Rotation der Flächennormalen eines SQUIDs 19

2.7. Prinzipdarstellung einer realisierten SQUID Anordnungen zur Bestimmung der absoluten magnetischen Flussdichte im Zentrum eines Würfels. 21

2.8. Prinzipdarstellung einer realisierten SQUID Anordnung zur Bestimmung der relativen magnetischen Flussdichte und fünf von neun Komponenten des Tensors 2.ter Ordnung. 22

3.1. Vorschlag einer kompakten Übersicht der magnetischen Eigenschaften einer magnetisch geschirmten Umgebung. 30

3.2. Schematische Darstellung der SQUID Anordnung zur Bestimmung der absoluten Vektor- und Gradientenkomponente der magnetischen Flussdichte am Beispiel der X-Komponenten. 33

4.1. Foto eines Chipträgers mit integriertem SQUID-Sensor *W9L*. 35
4.2. Foto der verwendeten Multikanal FLL-Elektronik. . . . 37
4.3. Schemazeichnung und Foto des Sensorkopfes mit den darauf positionierten SQUID-Sensoren. 40
4.4. Foto des Sensorkopfes im Sensorkopfhalter. 44
4.5. Foto und Schemazeichnung des *Cube*-II-Dewars. 45
4.6. Schnittansicht der Schemazeichnung des *Cube*-II-Isoliereinsatzes. 47
4.7. Foto des realisierten Manipulators. 50
4.8. Beispiel eines Zeitsignals des SQUIDs $Y0$ während der in Tabelle 4.5 beschriebenen Abläufe. 53

5.1. Signalamplitude des SQUIDs $X1$ während die Nadel horizontal an diesem vorbeigefahren wurde und eine genäherte Polinomfunktion zweiter Ordnung 57
5.2. Amplitudenverlauf der X-, Y- und Z-SQUIDs im *Cube*-II während der Rotation des Dewars in einem in X-Richtung ausgerichteten homogenen Hintergrundfeld von rund 600 pT um die zentrale Manipulatorachse um 720 °. 58
5.3. Zeitlicher Verlauf der relativen magnetische Flussdichte des SQUIDs $X5$, $Y2$ und $Z7$ im *Cube*-II-Dewar im *BMSR-2* 59
5.4. Zeitlicher Verlauf der relativen Differenz der magnetischen Flussdichte zwischen dem *Cube*-II-Dewar und dem Multikanal-System im *BMSR*-2. 61

5.5. Aus drei Messungen zusammengefasstes und 20-fach arithmetisch gemitteltes magnetisches Flussdichterauschen der SQUIDs $X1$, $Y0$ und $Z5$ im *Cube*-II-Dewar im *BMSR*-2. 62
5.6. Ausschnitt des magnetischen Flussdichterauschens von 0,8 Hz bis 120 Hz aus Abbildung 5.5 64
5.7. Zusammenstellung der einzelnen Einflussgrößen zur Bestimmung der Messunsicherheit 65
5.8. Foto des *Cube*-II-Systems im Zentrum des Spulensystems und des *BMSR*-2. 82
5.9. 3D-Modell des *Cube*-II-Systems mit integriertem miniaturisiertem Manipulator und dezentraler FLL-Elektronik 95

6.1. Fote des *Cube*-I-Systems im magnetischen Zentrum der zylindrischen *Mu-Metall* Schirmung des *nEDM* Experimentes am Paul Scherrer Institut Schweiz. 98
6.2. Messung der relativen magnetischen Flussdichte B_{y} über 5000 Sekunden zwischen 10 und 12 Uhr mittags im zylindrischen *nEDM*-Schirm des *PSI*. 99
6.3. Das Magnetische Flussdichterauschen der B_{z}-Komponente gemessen im magnetischen Zentrum des *BMSR-2* und des zylindrischen *nEDM*-Schirms des *PSI*. 100
6.4. Vergleich des frequenzabhängigen Schirmfaktors des *Zuse-MSR* ermittelt mit dem *Cube*-II-System und vom Hersteller *VAC* vor der Installation an der PTB. 102
6.5. Änderung der relativen magnetischen Flussdichte im magnetischen Zentrum der *Zuse-MSR* über eine Messzeit von rund 10 Stunden. 104
6.6. Mit dem *Cube*-II-System ermitteltes Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte im magnetischen Zentrum der *Zuse-MSR*. 105

6.7. Zusammenfassung der charakteristischen magnetischen Eigenschaften der magnetischen Schirmung *Zuse-MSR*. 110

Tabellenverzeichnis

3.1. Zusammenfassung der benötigten Randbedingungen eines Messsystems zur Charakterisierung von *MSRs* . . 31

4.1. Zusammenfassung der typischen Eigenschaften des verwendeten SQUID Typs 36
4.2. Zusammenfassung der für diese FLL-Elektronik typischen Eigenschaften. 38
4.3. Zusammenfassung der für die Datenerfassung typischen Eigenschaften. 39
4.4. Bezeichnung der 16 SQUID-Sensoren und ihre Position zum Würfelzentrum 42
4.5. Zusammenstellung der Positionsbezeichnungen und der Ausrichtung des Sensorkopfes relativ zum Koordinatensystem der zu untersuchenden Umgebung. 51

5.1. Zusammenstellung der kombinierten Messunsicherheit der Gesamtskalierung G^{ij} und deren Beiträge. $f =$ Gleichung 5.5 68
5.2. Zusammenstellung aller SQUID Offsets und deren kombinierten erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Leermessung der HH-X Spule. 79
5.3. Gegenüberstellung der durch das zentrale reale SQUID $Y0$ und die drei zentralen virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ ermittelten Werte für die absolute magnetische Flussdichte 80

5.4. Gegenüberstellung der ermittelten neun Gradientenkomponenten im Zentrum des *BMSR*-2 durch die Methode der Verschiebung und der intrinsischen Methode gemessen. 81
5.5. Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen absoluten magnetischen Flussdichte im Zentrum der Spulen HH-X und HH-Z 85
5.6. Gegenüberstellung der gemessenen Werte für das Restfeld des *BMSR-2*s. 86
5.7. Gegenüberstellung der berechneten und mittels Offsetkompensation sowie Verschiebung gemessenen Gradientenkomponenten im Zentrum der HH- und aHH-Spulen 87
5.8. Gegenüberstellung der geforderten Randbedingungen und der realisierten Eigenschaften des *Cube*-II-Systems innerhalb des *BMSR*-2 89

6.1. Gegenüberstellung der Vektorkomponenten sowie der Beträge der absoluten magn. Flussdichte vor und nach der Entmagnetisierung im Zentrum der *Zuse-MSR*. . . 107
6.2. Gegenüberstellung der Gradientenkomponenten magnetischen Flussdichte vor und nach der Entmagnetisierung im Zentrum der *Zuse-MSR*. 108

A.1. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X1} 144
A.2. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X3} 144
A.3. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X5} 145

A.4. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X6} 145

A.5. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X7} 146

A.6. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y0} 146

A.7. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y1} 147

A.8. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y2} 147

A.9. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y3} 148

A.10. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y5} 148

A.11. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y6} 149

A.12. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y7} 149

A.13. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z1} 150

A.14. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z3} 150

A.15. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z5} 151

A.16. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z7} 151

A.17. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Offset Bestimmung von $vX0$ für die in Tabelle 5.6 dargestellte Messung R01. . 152

A.18. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Offset Bestimmung von $vY0$ für die in Tabelle 5.6 dargestellte Messung R01. . 153

A.19. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Offset Bestimmung von $vZ0$ für die in Tabelle 5.6 dargestellte Messung R01. . 154

A.20. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der drei Komponenten der absoluten magnetischen Flussdichte und dessen Betrag am Beispiel der Messung R01. 155

A.21. Zusammensetzung der Standardabweichung $u(B_{\mathrm{i,orth}})$ durch den Winkel zwischen der Hauptkomponente und den jeweils anderen beiden Komponenten 156

A.22. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Vektorkomponente B_{x}(Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01. 156

A.23. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Vektorkomponente B_{Y}(Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01. 157

A.24. Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Vektorkomponente B_{Z}(Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01. 158

A.25. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Betrages $|B|$ durch das zentrale reale SQUID $Y0$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. . . . 159

A.26. Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Betrages $|B|$ durch die drei virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. 159

A.27. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xx} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 160

A.28. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xy} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 161

A.29. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xz} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 162

A.30. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yx} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 163

A.31. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yy} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 164

A.32. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yz} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 165

A.33. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zx} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 166

A.34. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zy} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 167

A.35. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zz} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. 168

A.36. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xx} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in X-Richtung. 169

A.37. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xy} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in Y-Richtung. 170

A.38. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xz} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Anheben des Messsystems um 1,7 cm in Z-Richtung. 171

A.39. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yx} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in X-Richtung. 172

A.40. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yy} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in Y-Richtung. 173
A.41. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yz} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 1,7 cm in Z-Richtung. 174
A.42. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zx} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in X-Richtung. 175
A.43. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zy} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in Y-Richtung. 176
A.44. Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zz} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 1,7 cm in Z-Richtung. 177

Anhang A. Tabellen

Tabelle A.1.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X1} von $X1$ am Beispiel der Messung R01. f= Gleichung 5.7

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{X1} [V]	-23,20E^{-3}	1,67E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{2}$	=	1,35E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X1'}}$ [V]	-187,57E^{-3}	1,15E^{-6}	$\frac{U^{\mathrm{X1}}+U^{\mathrm{X1'}}}{2}$	=	1,35E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	26,47E^{-12}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{2}$	=	-105,39E^{-3}	40 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,82E^{-12}	0,5	=	0,5	59 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	0,5	=	0,5	0 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	0,5	=	0,5	0 %
$O^{\mathrm{X1}} = (\text{-}284 \pm 9)$ pT						

Tabelle A.2.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X3} von $X3$ am Beispiel der Messung R01. f= Gleichung 5.7

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{X3} [V]	-28,71E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{2}$	=	1,39E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X3'}}$ [V]	-186,86E^{-3}	1,15E^{-6}	$\frac{U^{\mathrm{X3}}+U^{\mathrm{X1'}}}{2}$	=	1,39E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	27,36E^{-12}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{2}$	=	-107,78E^{-3}	42 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,82E^{-12}	0,5	=	0,5	56 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
$O^{\mathrm{X3}} = (\text{-}300 \pm 9)$ pT						

Tabelle A.3.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X5} von $X5$ am Beispiel der Messung R01. $f=$ Gleichung 5.12

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{X5} [V]	001,80E^{-3}	1,91E^{-6}	G^{X5}	=	2,71E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	26,59E^{-12}	U^{X5}	=	221,80E^{-3}	34 %
U^{X1} [V]	-20,74E^{-3}	1,56E^{-6}	G^{X1}	=	-2,70E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	26,46E^{-12}	U^{X1}	=	20,74E^{-3}	0 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	1	=	1	19 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	0 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	34 %
B_{Δ} [T]	0	7,49E^{-12}	1	=	1	42 %
B_{Pos} [T]	0	575,91E^{-15}	1	=	1	0 %
$O^{\mathrm{X5}} = (373 \pm 20)$ pT						

Tabelle A.4.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X6} von $X6$ am Beispiel der Messung R01. $f=$ Gleichung 5.12

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{X6} [V]	126,25E^{-3}	7,27E^{-6}	G^{X6}	=	2,74E^{-9}	0 %
G^{X6} [T/V]	2,74E^{-9}	26,86E^{-12}	U^{X6}	=	126,25E^{-3}	9 %
U^{X1} [V]	-24,31E^{-3}	1,85E^{-6}	G^{X1}	=	-2,68E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	26,46E^{-12}	U^{X1}	=	24,31E^{-3}	0 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	1	=	1	15 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	0 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	34 %
B_{Δ} [T]	0	7,49E^{-12}	1	=	1	42 %
B_{Pos} [T]	0	575,91E^{-15}	1	=	1	0 %
$O^{\mathrm{X6}} = (127 \pm 23)$ pT						

Tabelle A.5.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{X7} von $X7$ am Beispiel der Messung R01. $f=$ Gleichung 5.13

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{X7} [V]	143,03E^{-3}	1,44E^{-6}	G^{X7}	=	2,72E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	26,78E^{-12}	U^{X7}	=	143,03E^{-3}	17 %
U^{X3} [V]	-24,12E^{-3}	1,56E^{-6}	G^{X3}	=	-2,79E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	27,36E^{-12}	U^{X3}	=	24,12E^{-3}	1 %
O^{X3} [T]	-300,48E^{-12}	4,54E^{-12}	1	=	1	24 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	55 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{X7}} = (157 \pm 17)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.6.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y0} von $Y0$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.7

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y0} [V]	-46,20E^{-3}	1,15E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y0}}}{2}$	=	1,37E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y0'}}$ [V]	290,10E^{-3}	1.21E^{-6}	$\frac{U^{\mathrm{Y0}}+U^{\mathrm{Y0'}}}{2}$	=	1,37E^{-9}	0 %
G^{Y0} [T/V]	2,75E^{-9}	23,34E^{-12}	$\frac{G^{\mathrm{Y0}}}{2}$	=	0.12	40 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	0,5	=	0,5	57 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
$O^{\mathrm{Y0}} = (335 \pm 9)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.7.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y1} von $Y1$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.12

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y1} [V]	15,40E^{-3}	0,98E^{-6}	G^{Y1}	=	2,72E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	26,63E^{-12}	U^{Y1}	=	15,40E^{-3}	0 %
U^{X1} [V]	68,34E^{-3}	0,87E^{-6}	G^{X1}	=	-2,69E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,69E^{-9}	26,46E^{-12}	U^{X1}	=	-68,34E^{-3}	5 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	1	=	1	27 %
B_Kipp [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	1 %
B_Rot [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	65 %
B_Δ [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_Pos [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{Y1}} = (\text{-}426 \pm 20)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.8.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y2} von $Y2$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.14

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y2} [V]	-346,41E^{-3}	1,15E^{-6}	G^{Y2}	=	2,73E^{-9}	0 %
G^{Y2} [T/V]	2,73E^{-9}	26,78E^{-12}	U^{Y2}	=	-346,41E^{-3}	32 %
U^{X6} [V]	52,61E^{-3}	1,50E^{-6}	G^{X6}	=	-2,74E^{-9}	0 %
G^{X6} [T/V]	2,74E^{-9}	26,86E^{-12}	U^{X6}	=	52,61E^{-3}	1 %
O^{X6} [T]	126,87E^{-12}	11,62E^{-12}	1	=	1	50 %
B_Kipp [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	0 %
B_Rot [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	17 %
B_Δ [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	0 %
B_Pos [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	0 %
$O^{\mathrm{Y2}} = (\text{-}674 \pm 33)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.9.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y3} von $Y3$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.13

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y3} [V]	-55,89E^{-3}	0,98E^{-6}	G^{Y3}	=	2,71E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	26,64E^{-12}	U^{Y3}	=	-55,89E^{-3}	3 %
U^{X3} [V]	59,42E^{-3}	0,98E^{-6}	G^{X1}	=	-2,79E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	27,36E^{-12}	U^{X1}	=	-59,42E^{-3}	4 %
O^{X3} [T]	-300,48E^{-12}	4,54E^{-12}	1	=	1	28 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	63 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{Y3}} = (\text{-}618 \pm 17)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.10.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y5} von $Y5$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.12

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y5} [V]	-64,86E^{-3}	0,98E^{-6}	G^{Y5}	=	2,77E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	27,26E^{-12}	U^{Y5}	=	-64,86E^{-3}	3 %
U^{X1} [V]	-266,58E^{-3}	0,81E^{-6}	G^{X1}	=	-2,70E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	26,46E^{-12}	U^{X1}	=	266,58E^{-3}	48 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	1	=	1	19 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	45 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{Y5}} = (255 \pm 22)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.11.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y6} von $Y6$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.14

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y6} [V]	73,63E^{-3}	1,21E^{-6}	G^{Y6}	=	2,68E^{-9}	0 %
G^{Y6} [T/V]	2,68E^{-9}	26,28E^{-12}	U^{Y6}	=	73,63E^{-3}	2 %
U^{X6} [V]	-132,30E^{-3}	0,75E^{-6}	G^{X6}	=	-2,74E^{-9}	0 %
G^{X6} [T/V]	2,74E^{-9}	26,86E^{-12}	U^{X6}	=	132,30E^{-3}	6 %
O^{X6} [T]	126,87E^{-12}	11,62E^{-12}	1	=	1	67 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	0 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	23 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	0 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	0 %
$O^{\mathrm{Y6}} = (686 \pm 28)$ pT						

Tabelle A.12.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Y7} von $Y7$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.13

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y7} [V]	-93,79E^{-3}	0,98E^{-6}	G^{Y7}	=	2,71E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	26,59E^{-12}	U^{Y7}	=	-93,79E^{-3}	6 %
U^{X3} [V]	-268,46E^{-3}	0,87E^{-6}	G^{X3}	=	-2,79E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	27,36E^{-12}	U^{X3}	=	-59,42E^{-3}	52 %
O^{X3} [T]	-300,48E^{-12}	4,54E^{-12}	1	=	1	20 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	2	=	2	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	45 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{Y7}} = (194 \pm 23)$ pT						

Tabelle A.13.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z1} von $Z1$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.15

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Z1} [V]	97,81E^{-3}	7,21E^{-6}	G^{Z1}	=	2,72E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	26,73E^{-12}	U^{Z1}	=	97,81E^{-3}	5 %
U^{Y3} [V]	-80,61E^{-3}	1,85E^{-6}	G^{Y3}	=	-2,71E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	26,64E^{-12}	U^{Y3}	=	80,61E^{-3}	3 %
O^{Y3} [T]	-618,82E^{-12}	4,43E^{-12}	1	=	1	53 %
B_{Kipp} [T]	0	1,16E^{-12}	2	=	2	4 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	33 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{Z1}} = (\text{-}133 \pm 24)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.14.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z3} von $Z3$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.15

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Z3} [V]	54,55E^{-3}	7,16E^{-6}	G^{Z3}	=	2,68E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	26,28E^{-12}	U^{Z3}	=	54,55E^{-3}	1 %
U^{Y1} [V]	-13,18E^{-3}	1,62E^{-6}	G^{Y1}	=	-2,72E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	26,73E^{-12}	U^{Y1}	=	13,18E^{-3}	0 %
O^{Y1} [T]	-426,49E^{-12}	10,17E^{-12}	1	=	1	65 %
B_{Kipp} [T]	0	1,16E^{-12}	2	=	2	4 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	33 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{\mathrm{Z3}} = (\text{-}245 \pm 25)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.15.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z5} von $Z5$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.15

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_i)$	$\frac{\partial f}{\partial X_i}$		c_i	Index
U^{Z5} [V]	-87,38E^{-3}	7,10E^{-6}	G^{Z5}	=	2,74E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	26,91E^{-12}	U^{Z5}	=	-87,38E^{-3}	3 %
U^{Y5} [V]	-49,17E^{-3}	1,79E^{-6}	G^{Y5}	=	-2,77E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	27,23E^{-12}	U^{Y5}	=	49,18E^{-3}	1 %
O^{Y5} [T]	254,70E^{-12}	11,01E^{-12}	1	=	1	67 %
B_{Kipp} [T]	0	1,16E^{-12}	2	=	2	4 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	33 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	1 %
$O^{Z5} = (152 \pm 27)$ pT						

Tabelle A.16.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Offset O^{Z7} von $Z7$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.15

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_i)$	$\frac{\partial f}{\partial X_i}$		c_i	Index
U^{Z7} [V]	-199,73E^{-3}	7,33E^{-6}	G^{Z7}	=	2,73E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	26,78E^{-12}	U^{Z7}	=	-199,73E^{-3}	16 %
U^{Y7} [V]	-76,36E^{-3}	1,67E^{-6}	G^{Y7}	=	-2,71E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	26,59E^{-12}	U^{Y7}	=	76,36E^{-3}	2 %
O^{Y7} [T]	193,88E^{-12}	11,38E^{-12}	1	=	1	71 %
B_{Kipp} [T]	0	1,16E^{-12}	2	=	2	3 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	25 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	1	=	1	0 %
$O^{Z7} = (-144 \pm 29)$ pT						

Tabelle A.17.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Offset Bestimmung von $vX0$ für die in Tabelle 5.6 dargestellte Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. f= Gleichung 5.11

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{X1} [V]	-20,74E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{8}$	=	0,35E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X1'}}$ [V]	-189,32E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{8}$	=	0,35E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,92E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X1}}+U^{\mathrm{X1'}}}{8}$	=	26,25^{-3}	3 %
U^{X3} [V]	-24,12E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{8}$	=	0,35E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X3'}}$ [V]	-187,10E^{-3}	0,64E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{8}$	=	0,35E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X3}}+U^{\mathrm{X3'}}}{8}$	=	26,40^{-3}	4 %
U^{X5} [V]	-48,66E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X5'}}$ [V]	-221,80E^{-3}	1,91E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X5}}+U^{\mathrm{X5'}}}{8}$	=	33,81^{-3}	6 %
U^{X7} [V]	20,65E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X7'}}$ [V]	-143,03E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X7}}+U^{\mathrm{X7'}}}{8}$	=	15,30^{-3}	1 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	0,5	=	0,5	82 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	0,5	=	0,5	2 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
$O^{\mathrm{vX0}} = (\text{-}278 \pm 8)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.18.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Offset Bestimmung von $vY0$ für die in Tabelle 5.6 dargestellte Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.11

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Y1} [V]	15,40E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y1'}}$ [V]	-327,15E^{-3}	1,21E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y1}}+U^{\mathrm{Y1'}}}{8}$	=	-38,97^{-3}	4,9 %
U^{Y3} [V]	-55,89E^{-3}	1,39E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y3'}}$ [V]	-390,01E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y3}}+U^{\mathrm{Y3'}}}{8}$	=	-55,74^{-3}	10 %
U^{Y5} [V]	-64,86E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{8}$	=	0,35E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y5'}}$ [V]	-390,06E^{-3}	1,10E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{8}$	=	0,35E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y5}}+U^{\mathrm{Y5'}}}{8}$	=	-56,86^{-3}	11 %
U^{Y7} [V]	-93,79E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y7'}}$ [V]	240,56E^{-3}	1,10E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{8}$	=	0,34E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7}}+U^{\mathrm{Y7'}}}{8}$	=	18,35^{-3}	1 %
B_{Kipp} [T]	0	401,78E^{-15}	1	=	1	1 %
B_{Rot} [T]	0	6,81E^{-12}	0,5	=	0,5	70 %
B_{Δ} [T]	0	969,83E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
B_{Pos} [T]	0	867,89E^{-15}	0,5	=	0,5	1 %
$O^{\mathrm{vY0}} = (\text{-}381 \pm 8)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.19.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit am Beispiel der Offset Bestimmung von $vZ0$ für die in Tabelle 5.6 dargestellte Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. f= Gleichung 5.16

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
U^{Z1} [V]	-7,67E^{-3}	15,76E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z1}}}{4}$	=	-1,92^{-3}	0 %
U^{Z3} [V]	-45,73E^{-3}	15,82E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4}$	=	0,67E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3}}}{4}$	=	-11,43^{-3}	0 %
U^{Z5} [V]	-29,00E^{-3}	16,86E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4}$	=	0,67E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5}}}{4}$	=	7,25^{-3}	0 %
U^{Z7} [V]	90,34E^{-3}	16,45E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4}$	=	-0,68E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7}}}{4}$	=	-22,59^{-3}	0 %
U^{Y0} [V]	17,90E^{-3}	3,52E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{Y0}}}{\alpha}$	=	3,88E^{-9}	0 %
G^{Y0} [T/V]	2,75E^{-9}	23,34E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{Y0}}}{\alpha}$	=	25,31^{-3}	0 %
O^{Y0} [T/V]	334,62E^{-9}	4,50E^{-12}	$\frac{-1}{\alpha}$	=	-1,41^{-3}	24 %
B_Y [T]	462,98^{-12}	8,30E^{-12}	-1	=	-1	42 %
α [rad]	$1/\sqrt{2}$	3,58E^{-3}	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$	=	767,54E^{-12}	5 %
$B_{\mathrm{Kipp,Z}}$ [T]	0	5,59E^{-12}	1	=	1	19 %
$B_{\Delta,\mathrm{Kipp}}$ [T]	0	4,00E^{-12}	1	=	1	10 %
B_{Pos} [T]	0	0,87E^{-12}	1	=	1	0 %

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = \frac{-B_\mathrm{Y}}{\alpha} + \frac{U^{\mathrm{Y0}} \cdot G^{\mathrm{Y0}} - O^{\mathrm{Y0}} - B_\mathrm{Y} \cdot \alpha}{\alpha^2}$$

$$O^{\mathrm{vZ0}} = (\text{-}75 \pm 22)\,\mathrm{pT}$$

Tabelle A.20.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der drei Komponenten der absoluten magnetischen Flussdichte und dessen Betrag am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 (Tabelle 5.6). $f=$ Gleichung 5.19 für B_x, 5.20 für B_Y und 5.21 für B_z. Aus Platzgründen wurde die partielle Ableitung der Gleichung 5.21 nach α in einer gesonderten Zeile aufgeführt.

	Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
$u(B_\mathrm{x})$ Pos-05	$U^{\mathrm{Y0}}_{\text{Pos-05}}$ [V]	205,75E^{-3}	3,52E^{-6}	G^{Y0}	=	2,75E^{-9}	0 %
	G^{Y0} [T/V]	2,75E^{-9}	23,34E^{-12}	U^{Y0}	=	205,75E^{-3}	53 %
	O^{Y0} [T/V]	343,62E^{-9}	4,51E^{-12}	-1	=	-1	47 %
	B_Kipp [T]	0	5,60E^{-12}	1	=	1	0 %
	$B_\mathrm{x}(\text{Pos-05}) = (230 \pm 13)\,\mathrm{pT}$						
$u(B_\mathrm{Y})$ Pos-06	$U^{\mathrm{Y0}}_{\text{Pos-06}}$ [V]	-46,74E^{-3}	13,86E^{-6}	G^{Y0}	=	2,75E^{-9}	0 %
	G^{Y0} [T/V]	2,75E^{-9}	23,34E^{-12}	U^{Y0}	=	-46,74E^{-3}	2 %
	O^{Y0} [T/V]	334,62E^{-9}	4,51E^{-12}	-1	=	-1	29 %
	B_Kipp [T]	0	0,40E^{-12}	1	=	1	0 %
	B_Δ [T]	0	0,97E^{-12}	1	=	1	1 %
	B_Rot [T]	0	6,81E^{-12}	1	=	1	67 %
	$B_\mathrm{Y}(\text{Pos-06}) = (463 \pm 17)\,\mathrm{pT}$						
$u(B_\mathrm{z})$ Pos-07	$U^{\mathrm{Y0}}_{\text{Pos-07}}$ [V]	-17,90E^{-3}	3,52E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y0}}}{\alpha}$	=	3,88E^{-9}	0 %
	G^{Y0} [T/V]	2,75E^{-9}	23,34E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y0}}}{\alpha}$	=	-25,31^{-3}	0 %
	O^{Y0} [T/V]	343,62E^{-9}	4,51E^{-12}	$\frac{1}{\alpha}$	=	1,41^{-3}	30 %
	B_Y [T]	461,48^{-12}	4,51E^{-12}	-1	=	-1	52 %
	$B_{\Delta,\mathrm{Kipp}}$ [T]	0	4,00E^{-12}	1	=	1	12 %
	α [rad]	$1/\sqrt{2}$	3,58E^{-3}	$\frac{\partial f}{\partial \alpha}$	=	-767,54E^{-12}	6 %
	$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = \frac{-B_\mathrm{Y}}{\alpha} + \frac{U^{\mathrm{Y0}} \cdot G^{\mathrm{Y0}} - O^{\mathrm{Y0}} - B_\mathrm{Y} \cdot \alpha}{\alpha^2}$						
	$B_\mathrm{z}(\text{Pos-07}) = (80 \pm 23)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.21.: Zusammensetzung der Standardabweichung $u(B_{\mathrm{i,orth}})$ durch den Winkel zwischen der Hauptkomponente und den jeweils anderen beiden Komponenten

$u(B_{\mathrm{i,orth}})$	zur X-Achse		zur Y-Achse		zur Z-Achse
$u(B_{\mathrm{x,orth}}) =$		$+$	$\cos(89,9\,^\circ) \cdot B_{\mathrm{y}}$	$+$	$\cos(89,7\,^\circ) \cdot B_{\mathrm{z}}$
$u(B_{\mathrm{y,orth}}) =$	$\cos(89,9\,^\circ) \cdot B_{\mathrm{x}}$	$+$		$+$	$\cos(89,7\,^\circ) \cdot B_{\mathrm{z}}$
$u(B_{\mathrm{z,orth}}) =$	$\cos(89,2\,^\circ) \cdot B_{\mathrm{x}}$	$+$	$\cos(89,2\,^\circ) \cdot B_{\mathrm{y}}$	$+$	

Tabelle A.22.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Vektorkomponente B_{x}(Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. (Tabelle 5.6). f= Gleichung 5.23

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{X1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-20,74E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4}$	=	0,67E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,91E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X0}}}{4}$	=	-5,18E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{X3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-24,12E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4}$	=	0,70E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X3}}}{4}$	=	-6,03E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{X5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-48,66E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X5}}}{4}$	=	-12,16E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{X7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	20,65E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X7}}}{4}$	=	5,16E^{-3}	0 %
O^{vX0} [T/V]	-277,70E^{-12}	3,69E^{-12}	-1	=	-1	96 %
$B_{\mathrm{X,orth}}$ [T]	0	0,71E^{-12}	1	=	1	4 %
$B_{\mathrm{x}}(\text{Pos-00}) = (228 \pm 8)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.23.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Vektorkomponente B_{Y}(Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f =$ Gleichung 5.23

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Y1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	15,40E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y0}}}{4}$	=	3,85E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{Y3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-55,89E^{-3}	1,39E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y3}}}{4}$	=	-13,97E^{-3}	1 %
$U^{\mathrm{Y5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	65,86E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4}$	=	0,69E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y5}}}{4}$	=	16,21E^{-3}	1 %
$U^{\mathrm{Y7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	93,79E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7}}}{4}$	=	23,45E^{-3}	2 %
O^{vY0} [T/V]	-380,90E^{-12}	4,08E^{-12}	-1	=	-1	95 %
$B_{\mathrm{Y,orth}}$ [T]	0	0,47E^{-12}	1	=	1	1 %
$B_{\mathrm{y}}(\text{Pos-00}) = (462 \pm 8)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.24.: Zusammenstellung der kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Vektorkomponente B_{Z}(Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f =$ Gleichung 5.23

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Z1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	7,69E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z0}}}{4}$	=	-1,92E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{Z3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-45,63E^{-3}	1,15E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4}$	=	0,67E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3}}}{4}$	=	-11,41E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{Z5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-28,96E^{-3}	1,50E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4}$	=	0,69E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5}}}{4}$	=	-7,24E^{-3}	0 %
$U^{\mathrm{Z7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	90,73E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7}}}{4}$	=	22,68E^{-3}	0 %
O^{vZ0} [T/V]	-73,83E^{-12}	12,87E^{-12}	-1	=	-1	75 %
$B_{\mathrm{Z,orth}}$ [T]	0	5,60E^{-12}	1	=	1	25 %
$B_{\mathrm{z}}(\text{Pos-00}) = (80 \pm 30)\,\mathrm{pT}$						

Tabelle A.25.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Betrages $|B|$ durch das zentrale reale SQUID $Y0$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.22

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
B_x [T]	230,42E^{-12}	6,60E^{-12}	$\frac{B_\mathrm{x}}{\sqrt{(B_\mathrm{x})^2+(B_\mathrm{y})^2+(B_\mathrm{z})^2}}$	=	0,44	13 %
B_y [T]	462,98E^{-12}	8,30E^{-12}	$\frac{B_\mathrm{y}}{\sqrt{(B_\mathrm{x})^2+(B_\mathrm{y})^2+(B_\mathrm{z})^2}}$	=	0,88	82 %
B_z [T]	79,75E^{-12}	11,55E^{-12}	$\frac{B_\mathrm{z}}{\sqrt{(B_\mathrm{x})^2+(B_\mathrm{y})^2+(B_\mathrm{z})^2}}$	=	0,15	5 %
$\lvert B\rvert = (\text{-}523 \pm 16)$ pT						

Tabelle A.26.: Zusammenstellung der Beiträge zur kombinierten und erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung des Betrages $|B|$ durch die drei virtuellen SQUIDs $vX0$, $vY0$ und $vZ0$ am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2. $f=$ Gleichung 5.22

Bezeichnung (X_i)	X_i	$u(X_\mathrm{i})$	$\frac{\partial f}{\partial X_\mathrm{i}}$		c_i	Index
B_x [T]	228,04E^{-12}	3,78E^{-12}	$\frac{B_\mathrm{x}}{\sqrt{(B_\mathrm{x})^2+(B_\mathrm{y})^2+(B_\mathrm{z})^2}}$	=	0,44	13 %
B_y [T]	461,96E^{-12}	4,17E^{-12}	$\frac{B_\mathrm{y}}{\sqrt{(B_\mathrm{x})^2+(B_\mathrm{y})^2+(B_\mathrm{z})^2}}$	=	0,89	63 %
B_z [T]	80,08E^{-12}	29,79E^{-12}	$\frac{B_\mathrm{z}}{\sqrt{(B_\mathrm{x})^2+(B_\mathrm{y})^2+(B_\mathrm{z})^2}}$	=	0,15	24 %
$\lvert B\rvert = (\text{-}521 \pm 9)$ pT						

Tabelle A.27.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xx} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{X1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-20,74E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X1}}}{2d}$	=	0,5E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,91E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X1}}}{2d}$	=	-5,18E^{-3}	0 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	8 %
$B_{\mathrm{X1,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	3 %
$U^{\mathrm{X3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-24,12E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X3}}}{2d}$	=	0,70E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X3}}}{2d}$	=	-6,03E^{-3}	0 %
O^{X3} [T]	-300,48E^{-12}	4,54E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	8 %
$B_{\mathrm{X3,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	3 %
$U^{\mathrm{X5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-48,66E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X5}}}{2d}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X5}}}{2d}$	=	-12,16E^{-3}	1 %
O^{X5} [T]	372,62E^{-12}	10,17E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	41 %
$B_{\mathrm{X5,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	3 %
$U^{\mathrm{X7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	20,65E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X7}}}{2d}$	=	0,68E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X7}}}{2d}$	=	5,16E^{-3}	0 %
O^{X7} [T]	157,01E^{-12}	8,61E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	30 %
$B_{\mathrm{X7,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	3 %
d [cm]	5,00	0,12	$\frac{B^{\mathrm{X5}}+B^{\mathrm{X7}}-B^{\mathrm{X1}}-B^{\mathrm{X3}}}{2d^2}$	=	1	0 %
$g_{\mathrm{xx}}(\text{Pos-00}) = (\text{-}1 \pm 3)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.28.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xy} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{X1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-20,74E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X1}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,91E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X1}}}{2d}$	=	-4,15E^{-3}	0 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	8 %
$B_{\mathrm{X1,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	3 %
$U^{\mathrm{X3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-24,12E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X3}}}{2d}$	=	-0,56E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X3}}}{2d}$	=	4,52E^{-3}	0 %
O^{X3} [T]	-300,48E^{-12}	4,54E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	8 %
$B_{\mathrm{X3,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	3 %
$U^{\mathrm{X5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-48,66E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X5}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X5}}}{2d}$	=	9,73E^{-3}	0 %
O^{X5} [T]	372,62E^{-12}	10,17E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	41 %
$B_{\mathrm{X5,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	3 %
$U^{\mathrm{X7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	20,65E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X7}}}{2d}$	=	-0,55E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X7}}}{2d}$	=	4,13E^{-3}	0 %
O^{X7} [T]	157,01E^{-12}	8,61E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	30 %
$B_{\mathrm{X7,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	3 %
d [cm]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{X1}}+B^{\mathrm{X5}}-B^{\mathrm{X7}}-B^{\mathrm{X3}}}{2d^2}$	=	1	1 %

$$g_{\mathrm{xy}}(\text{Pos-00}) = (\text{-}6 \pm 6)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.29.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xz} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{X1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-20,74E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X1}}}{2d}$	=	-0,54E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,91E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X1}}}{2d}$	=	-4,15E^{-3}	0 %
O^{X1} [T]	-284,16E^{-12}	4,43E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	8 %
$B_{\mathrm{X1,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	3 %
$U^{\mathrm{X3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-24,12E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X3}}}{2d}$	=	-0,56E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X3}}}{2d}$	=	4,82E^{-3}	0 %
O^{X3} [T]	-300,48E^{-12}	4,54E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	8 %
$B_{\mathrm{X3,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	3 %
$U^{\mathrm{X5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-48,66E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X5}}}{2d}$	=	0,34E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X5}}}{2d}$	=	3,49E^{-3}	0 %
O^{X5} [T]	372,62E^{-12}	10,17E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	42 %
$B_{\mathrm{X5,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	3 %
$U^{\mathrm{X7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	20,65E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{-G^{\mathrm{X7}}}{2d}$	=	0,55E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{-U^{\mathrm{X7}}}{2d}$	=	4,13E^{-3}	0 %
O^{X7} [T]	157,01E^{-12}	8,61E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	30 %
$B_{\mathrm{X7,orth}}$ [T]	0	2,73E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	3 %
d [cm]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{X1}}+B^{\mathrm{X5}}-B^{\mathrm{X3}}-B^{\mathrm{X7}}}{2d^2}$	=	1	0 %
$g_{\mathrm{xz}}(\text{Pos-00}) = (4 \pm 6)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.30.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yx} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Y1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	15,40E^{-3}	0,92E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{2d}$	=	-0,54E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Y1}}}{2d}$	=	-3,08E^{-3}	0 %
O^{Y1} [T]	-426,49E^{-12}	10,17E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	23 %
$B_{\mathrm{Y1,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	1 %
$U^{\mathrm{Y3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-55,89E^{-3}	1,39E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y3}}}{2d}$	=	-11,12E^{-3}	1 %
O^{Y3} [T]	-617,82E^{-12}	8,61E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	17 %
$B_{\mathrm{Y3,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	0 %
$U^{\mathrm{Y5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	65,86E^{-3}	0,98E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{2d}$	=	-0,55E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Y5}}}{2d}$	=	12,97E^{-3}	1 %
O^{Y5} [T]	254,70E^{-12}	11,01E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	27 %
$B_{\mathrm{Y5,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	0 %
$U^{\mathrm{Y7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	93,79E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7}}}{2d}$	=	-18,76E^{-3}	1 %
O^{Y7} [T]	193,88E^{-12}	11,38E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	29 %
$B_{\mathrm{Y7,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	0 %
d [cm]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{Y3}}+B^{\mathrm{Y5}}-B^{\mathrm{Y7}}-B^{\mathrm{Y1}}}{2d^2}$	=	1,25E^{-}12	0 %
$g_{\mathrm{yx}}(\text{Pos-00}) = (\text{-}3 \pm 8)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.31.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yy} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Y1}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	15,40E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{2d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y1}}}{2d}$	=	1,54E^{-3}	0 %
O^{Y1} [T]	-426,49E^{-12}	10,17E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	23 %
$B_{\mathrm{Y1,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	0 %
$U^{\mathrm{Y3}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	-55,89E^{-3}	1,39E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{2d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Y3}}}{2d}$	=	5,59E^{-3}	0 %
O^{Y3} [T]	-617,82E^{-12}	8,61E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	17 %
$B_{\mathrm{Y3,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	0 %
$U^{\mathrm{Y5}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	65,86E^{-3}	0,98E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{2d}$	=	0,28E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Y5}}}{2d}$	=	-6,49E^{-3}	1 %
O^{Y5} [T]	254,70E^{-12}	11,01E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	27 %
$B_{\mathrm{Y5,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	0,10	1 %
$U^{\mathrm{Y7}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	93,79E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{2d}$	=	-2,71E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7}}}{2d}$	=	9,38E^{-3}	1 %
O^{Y7} [T]	193,88E^{-12}	11,38E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	0,1	29 %
$B_{\mathrm{Y7,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	1 %
d [cm]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{Y5}}+B^{\mathrm{Y7}}-B^{\mathrm{Y1}}-B^{\mathrm{Y3}}}{2d^2}$	=	-31,22E^{-}12	0 %
$g_{\mathrm{yy}}(\mathrm{Pos\text{-}00}) = (-5 \pm 4)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.32.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yz} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Y1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	15,40E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y1}}}{2d}$	=	3,08E^{-3}	0 %
O^{Y1} [T]	-426,49E^{-12}	10,17E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	23 %
$B_{\mathrm{Y1,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	1 %
$U^{\mathrm{Y3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-55,89E^{-3}	1,39E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{2d}$	=	-0,54E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Y3}}}{2d}$	=	11,18E^{-3}	0 %
O^{Y3} [T]	-617,82E^{-12}	8,61E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	17 %
$B_{\mathrm{Y3,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	0 %
$U^{\mathrm{Y5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	65,86E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{2d}$	=	0,55E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y5}}}{2d}$	=	12,97E^{-3}	1 %
O^{Y5} [T]	254,70E^{-12}	11,01E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	27 %
$B_{\mathrm{Y5,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	1 %
$U^{\mathrm{Y7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	93,79E^{-3}	0,98E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{2d}$	=	-0,54E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Y7}}}{2d}$	=	18,76E^{-3}	1 %
O^{Y7} [T]	193,88E^{-12}	11,38E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,2	29 %
$B_{\mathrm{Y7,orth}}$ [T]	0	1,56E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	0 %
d [cm]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{Y1}}+B^{\mathrm{Y5}}-B^{\mathrm{Y3}}-B^{\mathrm{Y7}}}{2d^2}$	=	0,88E^{-}12	0 %
$g_{\mathrm{yz}}(\text{Pos-00}) = (\text{-}2 \pm 8)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.33.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zx} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Z1}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	7,69E^{-3}	0,75E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{2d}$	=	-0,54E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Z1}}}{2d}$	=	-1,54E^{-3}	0 %
O^{Z1} [T]	-132,68E^{-12}	11,79E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	18 %
$B_{\mathrm{Z1,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	2 %
$U^{\mathrm{Z3}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	-45,63E^{-3}	1,15E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3}}}{2d}$	=	-9,13E^{-3}	0 %
O^{Z3} [T]	-244,56E^{-12}	12,61E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	21 %
$B_{\mathrm{Z3,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	2 %
$U^{\mathrm{Z5}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	-28,96E^{-3}	1,50E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{2d}$	=	-0,55E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Z5}}}{2d}$	=	5,80E^{-3}	0 %
O^{Z5} [T]	151,56E^{-12}	13,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	24 %
$B_{\mathrm{Z5,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	2 %
$U^{\mathrm{Z7}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	90,73E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{2d}$	=	5,46E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7}}}{2d}$	=	18,15E^{-3}	0 %
O^{Z7} [T]	-144,19E^{-12}	14,68E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	29 %
$B_{\mathrm{Z7,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	2 %
d [T]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{Z3}}+B^{\mathrm{Z7}}-B^{\mathrm{Z1}}-B^{\mathrm{Z5}}}{2d^2}$	=	-3,35E^{-12}	0 %
$g_{\mathrm{zx}}(\mathrm{Pos\text{-}00}) = (8 \pm 11)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.34.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zy} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Z1}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	7,69E^{-3}	0,75E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{2d}$	=	-0,54E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Z1}}}{2d}$	=	-1,54E^{-3}	0 %
O^{Z1} [T]	-132,68E^{-12}	11,79E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	18 %
$B_{\mathrm{Z1,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	2 %
$U^{\mathrm{Z3}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-45,63E^{-3}	1,15E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{2d}$	=	0,54E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3}}}{2d}$	=	-9,13E^{-3}	0 %
O^{Z3} [T]	-244,56E^{-12}	12,61E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	21 %
$B_{\mathrm{Z3,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	2 %
$U^{\mathrm{Z5}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	-28,96E^{-3}	1,50E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{2d}$	=	0,55E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5}}}{2d}$	=	-5,80E^{-3}	0 %
O^{Z5} [T]	151,56E^{-12}	13,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	24 %
$B_{\mathrm{Z5,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	2 %
$U^{\mathrm{Z7}}_{\text{Pos-00}}$ [V]	90,73E^{-3}	1,56E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{2d}$	=	-5,46E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Z7}}}{2d}$	=	-18,15E^{-3}	0 %
O^{Z7} [T]	-144,19E^{-12}	14,68E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,20	29 %
$B_{\mathrm{Z7,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,20	2 %
d [T]	2,50	0,12	$\frac{B^{\mathrm{Z3}}+B^{\mathrm{Z5}}-B^{\mathrm{Z1}}-B^{\mathrm{Z7}}}{2d^2}$	=	1,65E^{-12}	0 %
$g_{\mathrm{zy}}(\text{Pos-00}) = (-4 \pm 11)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.35.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zz} (Pos-00) der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch die intrinsische Methode. f= 5.24 und 5.25

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
$U^{\mathrm{Z1}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	7,69E^{-3}	0,75E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{2d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Z1}}}{2d}$	=	-0,77E^{-3}	0 %
O^{Z1} [T]	-132,68E^{-12}	11,79E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	18 %
$B_{\mathrm{Z1,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	2 %
$U^{\mathrm{Z3}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	-45,63E^{-3}	1,15E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{2d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	-$\frac{U^{\mathrm{Z3}}}{2d}$	=	4,56E^{-3}	0 %
O^{Z3} [T]	-244,56E^{-12}	12,61E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	21 %
$B_{\mathrm{Z3,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	2 %
$U^{\mathrm{Z5}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	-28,96E^{-3}	1,50E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{2d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5}}}{2d}$	=	-2,90E^{-3}	0 %
O^{Z5} [T]	151,56E^{-12}	13,49E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	24 %
$B_{\mathrm{Z5,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	2 %
$U^{\mathrm{Z7}}_{\mathrm{Pos\text{-}00}}$ [V]	90,73E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{2d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7}}}{2d}$	=	9,07E^{-3}	0 %
O^{Z7} [T]	-144,19E^{-12}	14,68E^{-12}	-$\frac{1}{2d}$	=	-0,10	29 %
$B_{\mathrm{Z7,orth}}$ [T]	0	3,49E^{-12}	$\frac{1}{2d}$	=	0,10	2 %
d [T]	5,00	0,12	$\frac{B^{\mathrm{Z5}}+B^{\mathrm{Z7}}-B^{\mathrm{Z1}}-B^{\mathrm{Z3}}}{2d^2}$	=	1,17E^{-12}	0 %
$g_{\mathrm{zz}}(\mathrm{Pos\text{-}00}) = (\text{-}6 \pm 5)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$						

Tabelle A.36.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xx} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in X-Richtung. $f=$ Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{X1} [V]	-20,82E^{-3}	1,44E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X1'}}$ [V]	-19,61E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,92E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X1'}}-U^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	121,20^{-6}	0 %
U^{X3} [V]	-23,92E^{-3}	1,44E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	-0,28E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X3'}}$ [V]	-22,77E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	0,28E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X3'}}-U^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	11,41^{-6}	0 %
U^{X5} [V]	48,16E^{-3}	0,64E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X5'}}$ [V]	47,72E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X5'}}-U^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	47,10^{-6}	0 %
U^{X7} [V]	-21,28E^{-3}	0,58E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X7'}}$ [V]	-21,87E^{-3}	0,81E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X7'}}-U^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	58,60^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	193,28E^{-15}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	76 %
d [cm]	2,5	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	-372,95E^{-}15	24 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{X1'}}-U^{\mathrm{X1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{X3'}}-U^{\mathrm{X3}})G^{\mathrm{X3}}+(U^{\mathrm{X5'}}-U^{\mathrm{X5}})G^{\mathrm{X5}}+(U^{\mathrm{X7'}}-U^{\mathrm{X7}})G^{\mathrm{X7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{xx}} = (0{,}9 \pm 0,2)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.37.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xy} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in Y-Richtung. f= Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{Y1} [V]	-246,21E^{-3}	0,92E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y1'}}$ [V]	-243,90E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y1'}}-U^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	230,40^{-6}	0 %
U^{Y3} [V]	-304,72E^{-3}	1,10E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	-0,28E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y3'}}$ [V]	-302,71E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	0,28E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y3'}}-U^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	200,60^{-6}	0 %
U^{Y5} [V]	185,47E^{-3}	1,50E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	-0,28E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y5'}}$ [V]	182,84E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	0,28E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y5'}}-U^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	262,70^{-6}	0 %
U^{Y7} [V]	151,79E^{-3}	1,61E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y7'}}$ [V]	149,60E^{-3}	1,50E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7'}}-U^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	218,90^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	0,35E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	60 %
d [cm]	2,5	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	1,00E^{-}12	40 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{Y1'}}-U^{\mathrm{Y1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{Y3'}}-U^{\mathrm{Y3}})G^{\mathrm{Y3}}+(U^{\mathrm{Y5'}}-U^{\mathrm{Y5}})G^{\mathrm{Y5}}+(U^{\mathrm{Y7'}}-U^{\mathrm{Y7}})G^{\mathrm{Y7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{xy}} = (\text{-}2{,}5 \pm 0,4)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.38.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{xz} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Anheben des Messsystems um 1,7 cm in Z-Richtung. f= Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{X1} [V]	-21,25E^{-3}	1,50E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X1'}}$ [V]	-19,50E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,92E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X1'}}-U^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	257,35^{-6}	0 %
U^{X3} [V]	-24,54E^{-3}	1,56E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	-0,41E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X3'}}$ [V]	-22,99E^{-3}	1,50E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	0,41E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X3'}}-U^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	227,94^{-6}	0 %
U^{X5} [V]	48,99E^{-3}	0,69E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X5'}}$ [V]	47,36E^{-3}	0,87E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X5'}}-U^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	240,29^{-6}	0 %
U^{X7} [V]	-20,35E^{-3}	0,64E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X7'}}$ [V]	-21,83E^{-3}	0,69E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X7'}}-U^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	216,62^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	0,61E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,59	81 %
d [cm]	1,7	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	-1,51E^{-}12	19 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{X1'}}-U^{\mathrm{X1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{X3'}}-U^{\mathrm{X3}})G^{\mathrm{X3}}+(U^{\mathrm{X5'}}-U^{\mathrm{X5}})G^{\mathrm{X5}}+(U^{\mathrm{X7'}}-U^{\mathrm{X7}})G^{\mathrm{X7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{xz}} = (2{,}6 \pm 0,8)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.39.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yx} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in X-Richtung. f= Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{Y1} [V]	16,61E^{-3}	0,75E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y1'}}$ [V]	12,92E^{-3}	0,81E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y1'}}-U^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	-369,20^{-6}	0 %
U^{Y3} [V]	-54,62E^{-3}	1,33E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y3'}}$ [V]	-58,03E^{-3}	1,33E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y3'}}-U^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	341,60^{-6}	0 %
U^{Y5} [V]	-66,28E^{-3}	0,75E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	-0,28E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y5'}}$ [V]	-62,86E^{-3}	0,75E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	0,28E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y5'}}-U^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	-341,80^{-6}	0 %
U^{Y7} [V]	-95,16E^{-3}	0,87E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y7'}}$ [V]	-91,92E^{-3}	0,81E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7'}}-U^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	-323,80^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	1,87E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	95 %
d [cm]	2,5	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	1,50E^{-}12	5 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{Y1'}}-U^{\mathrm{Y1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{Y3'}}-U^{\mathrm{Y3}})G^{\mathrm{Y3}}+(U^{\mathrm{Y5'}}-U^{\mathrm{Y5}})G^{\mathrm{Y5}}+(U^{\mathrm{Y7'}}-U^{\mathrm{Y7}})G^{\mathrm{Y7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{yx}} = (\text{-}3{,}8 \pm 1,5)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.40.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yy} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in Y-Richtung. f= Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{X1} [V]	67,96E^{-3}	0,87E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X1'}}$ [V]	66,34E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{X1} [T/V]	2,70E^{-9}	22,92E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X1'}}-U^{\mathrm{X1}}}{4d}$	=	-162,20^{-6}	0 %
U^{X3} [V]	59,11E^{-3}	0,87E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	-0,28E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X3'}}$ [V]	57,65E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	0,28E^{-9}	0 %
G^{X3} [T/V]	2,79E^{-9}	23,70E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X3'}}-U^{\mathrm{X3}}}{4d}$	=	-145,60^{-6}	0 %
U^{X5} [V]	-29,27E^{-3}	1,27E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X5'}}$ [V]	-27,03E^{-3}	1,27E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{X5} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X5'}}-U^{\mathrm{X5}}}{4d}$	=	-224,50^{-6}	0 %
U^{X7} [V]	-105,18E^{-3}	0,92E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{X7'}}$ [V]	-103,22E^{-3}	0,87E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{X7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{X7'}}-U^{\mathrm{X7}}}{4d}$	=	-196,40^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	1,00E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	95 %
d [cm]	2,5	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	794,92E^{-}15	5 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{X1'}}-U^{\mathrm{X1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{X3'}}-U^{\mathrm{X3}})G^{\mathrm{X3}}+(U^{\mathrm{X5'}}-U^{\mathrm{X5}})G^{\mathrm{X5}}+(U^{\mathrm{X7'}}-U^{\mathrm{X7}})G^{\mathrm{X7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{yy}} = (\text{-}2{,}0 \pm 0,8)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.41.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{yz} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 1,7 cm in Z-Richtung. f= Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{Y1} [V]	15,82E^{-3}	1,04E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y1'}}$ [V]	17,80E^{-3}	0,92E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Y1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y1'}}-U^{\mathrm{Y1}}}{4d}$	=	290,50^{-6}	0 %
U^{Y3} [V]	-55,45E^{-3}	1,44E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y3'}}$ [V]	-53,74E^{-3}	1,27E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Y3} [T/V]	2,71E^{-9}	23,07E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y3'}}-U^{\mathrm{Y3}}}{4d}$	=	250,44^{-6}	0 %
U^{Y5} [V]	-65,33E^{-3}	1,04E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	-0,41E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y5'}}$ [V]	-66,57E^{-3}	0,81E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	0,41E^{-9}	0 %
G^{Y5} [T/V]	2,77E^{-9}	23,58E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y5'}}-U^{\mathrm{Y5}}}{4d}$	=	183,53^{-6}	0 %
U^{Y7} [V]	-94,20E^{-3}	1,15E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Y7'}}$ [V]	-95,52E^{-3}	0,87E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Y7} [T/V]	2,71E^{-9}	23,03E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Y7'}}-U^{\mathrm{Y7}}}{4d}$	=	179,85^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	0,69E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,59	85 %
d [cm]	1,7	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	-1,45E^{-}12	15 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{Y1'}}-U^{\mathrm{Y1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{Y3'}}-U^{\mathrm{Y3}})G^{\mathrm{Y3}}+(U^{\mathrm{Y5'}}-U^{\mathrm{Y5}})G^{\mathrm{Y5}}+(U^{\mathrm{Y7'}}-U^{\mathrm{Y7}})G^{\mathrm{Y7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{yz}} = (2{,}5 \pm 0,9)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.42.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zx} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in X-Richtung. $f=$ Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{Z1} [V]	-9,45E^{-3}	0,75E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z1'}}$ [V]	-6,19E^{-3}	0,81E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z1'}}-U^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	326,30^{-6}	0 %
U^{Z3} [V]	-47,52E^{-3}	1,44E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z3'}}$ [V]	-44,58E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3'}}-U^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	293,90^{-6}	0 %
U^{Z5} [V]	31,28E^{-3}	1,56E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z5'}}$ [V]	27,74E^{-3}	1,56E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5'}}-U^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	354,10^{-6}	0 %
U^{Z7} [V]	-88,22E^{-3}	1,62E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z7'}}$ [V]	91,87E^{-3}	1,73E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7'}}-U^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	364,60^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	0,21E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	20 %
d [cm]	2,5	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	-1,46E^{-}12	80 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{Z1'}}-U^{\mathrm{Z1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{Z3'}}-U^{\mathrm{Z3}})G^{\mathrm{Z3}}+(U^{\mathrm{Z5'}}-U^{\mathrm{Z5}})G^{\mathrm{Z5}}+(U^{\mathrm{Z7'}}-U^{\mathrm{Z7}})G^{\mathrm{Z7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{zx}} = (3{,}6 \pm 0,4)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.43.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zy} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 2,5 cm in Y-Richtung. f= Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{Z1} [V]	-6,46E^{-3}	1,15E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z1'}}$ [V]	-3,18E^{-3}	0,98E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z1'}}-U^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	328,20^{-6}	0 %
U^{Z3} [V]	-53,70E^{-3}	2,54E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z3'}}$ [V]	-50,42E^{-3}	3,00E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3'}}-U^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	327,30^{-6}	0 %
U^{Z5} [V]	32,65E^{-3}	1,96E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z5'}}$ [V]	28,75E^{-3}	2,25E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5'}}-U^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	389,50^{-6}	0 %
U^{Z7} [V]	-088,32E^{-3}	2,14E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	-0,27E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z7'}}$ [V]	-91,63E^{-3}	2,66E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	0,27E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7'}}-U^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	330,80^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	0,82E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	78 %
d [cm]	2,5	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	-1,50E^{-}12	22 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{Z1'}}-U^{\mathrm{Z1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{Z3'}}-U^{\mathrm{Z3}})G^{\mathrm{Z3}}+(U^{\mathrm{Z5'}}-U^{\mathrm{Z5}})G^{\mathrm{Z5}}+(U^{\mathrm{Z7'}}-U^{\mathrm{Z7}})G^{\mathrm{Z7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{zy}} = (3{,}7 \pm 0{,}7)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Tabelle A.44.: Zusammenstellung der kombinierten erweiterten Messunsicherheit für die Bestimmung der Gradientenkomponenten g_{zz} der absoluten magnetischen Flussdichte am Beispiel der Messung R01 innerhalb des *BMSR*-2 durch das Verschieben des Messsystems um 1,7 cm in Z-Richtung. $f=$ Gleichung 5.26

Bezeichnung (X_{i})	X_{i}	$u(X_{\mathrm{i}})$	$\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}$		c_{i}	Index
U^{Z1} [V]	-7,76E^{-3}	1,10E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z1'}}$ [V]	-8,04E^{-3}	0,87E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Z1} [T/V]	2,72E^{-9}	23,15E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z1'}}-U^{\mathrm{Z1}}}{4d}$	=	-40,44^{-6}	0 %
U^{Z3} [V]	-45,75E^{-3}	2,31E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z3'}}$ [V]	-45,71E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Z3} [T/V]	2,68E^{-9}	22,76E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z3'}}-U^{\mathrm{Z3}}}{4d}$	=	5,29^{-6}	0 %
U^{Z5} [V]	29,19E^{-3}	1,79E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z5'}}$ [V]	28,75E^{-3}	1,67E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Z5} [T/V]	2,74E^{-9}	23,30E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z5'}}-U^{\mathrm{Z5}}}{4d}$	=	64,85^{-6}	0 %
U^{Z7} [V]	-90,51E^{-3}	1,85E^{-6}	-$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	-0,40E^{-9}	0 %
$U^{\mathrm{Z7'}}$ [V]	-91,04E^{-3}	1,44E^{-6}	$\frac{G^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	0,40E^{-9}	0 %
G^{Z7} [T/V]	2,73E^{-9}	23,19E^{-12}	$\frac{U^{\mathrm{Z7'}}-U^{\mathrm{Z7}}}{4d}$	=	78,53^{-6}	0 %
$B_{\Delta,\mathrm{rep}}$ [T]	0	0,25E^{-12}	$\frac{1}{d}$	=	0,40	98 %
d [cm]	1,7	0,12	$\frac{\partial f}{\partial d}$	=	-1,46E^{-}12	2 %

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{(U^{\mathrm{Z1'}}-U^{\mathrm{Z1}})G^{\mathrm{X1}}+(U^{\mathrm{Z3'}}-U^{\mathrm{Z3}})G^{\mathrm{Z3}}+(U^{\mathrm{Z5'}}-U^{\mathrm{Z5}})G^{\mathrm{Z5}}+(U^{\mathrm{Z7'}}-U^{\mathrm{Z7}})G^{\mathrm{Z7}}+B_{\Delta,\mathrm{rep}}}{4d^2}$$

$$g_{\mathrm{zz}} = (3{,}0 \pm 0{,}3)\ \frac{\mathrm{pT}}{cm}$$

Anhang B. Protokoll Zuse-MSR

Protokoll zur Charakterisierung von magnetisch geschirmten Umgebungen

Durchführender:

Name:	Jens Voigt
Datum (yyyy.mm.dd):	2014.07.15

MSR:

Land	Deutschland
Stadt	Berlin
Institut	Physikalisch Technische Bundesanstalt
Anzahl der Lagen Mu-Metall von innen nach außen Mu-Metall + Alu / Cu + Mu-Metall	1+1+1
Dicke einer Lage	1 mm
Innenmaße (Mu-Metall, X, Y, Z)	
Aktive Schirmung	Ja, aber nicht in betrieb

Messsystem:

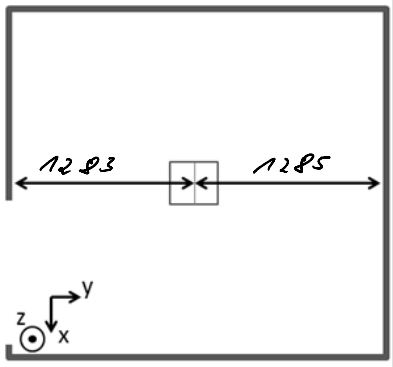
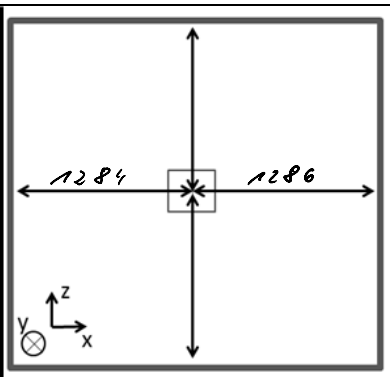
innen	Cube-II
außen	Mag-03MC-L70
Datenerfassung	PXI+4495 SQUID / PXI+4495 Fluxgate (nicht synchronisiert)

Foto:

Vorbereitung

- Füllstand im Cube-II: 90% bis 30%
- Neuen Ordner anlegen: yyyymmdd_[Name des MSRs]
- Ausrichtung:
  - Cube-II:
    - Zentrum gemessen von der innersten Schirmlage besser ±2 mm
    - Ausrichtung des Cube-II auf besser 0,2° (auf 800 mm ±2 mm = 0,14°) rechtshändiges kartesisches Koordinatensystem Y+ zeigt von der Tür in das Innere des MSRs und Z- nach Oben
    - Foto:
  - Fluxgate:
    - Wenn vorhanden außerhalb der aktiven Schirmung
    - Positioniert auf einer der Verlängerten Achsen (X, Y, Z) des Cube-II Systems
    - Ausrichtung des Fluxgats auf besser 1 ° bezogen auf das SQUID Sytem
    - Foto:
- Start des Messsystems mindestens 1 Stunde vor dem Start der Messung
  - PXI-System
  - SQUID-Systems
  - Fluxgate

Drift + Rauschen

Position des SQUID Systems bezogen auf den Sensorkopf	 Blick von Oben (links ist die Tür)	 Blick von der Tür in denen MSR

Programm zur Datenerfassung	

Messung 1. (Drift + NF-Noise)

Helium Level	85 %
LHe Level Sensor demontiert	✓
Zeitpunkt der letzten Entmagnetisierung	> 2 Tage
Zeitpunkt der Türschließung	> 1 h
SQUIDs Check + Reset	✓
Alle 16 SQUIDs nutzen	✓
Fluxgate Check	✓
Datum / Uhrzeit	16.07.2014
Dateinamen (yyyymmdd_[Nam MSRs]_NF)	20140716_Zuse_NF
Abtastrate (300 Hz)	✓
Messzeit (> 36.000 s)	46792 s
Startzeitpunkt	20:35:41 / 16.7
Stoppzeit der Datenerfassung	08:43:28 / 17.7

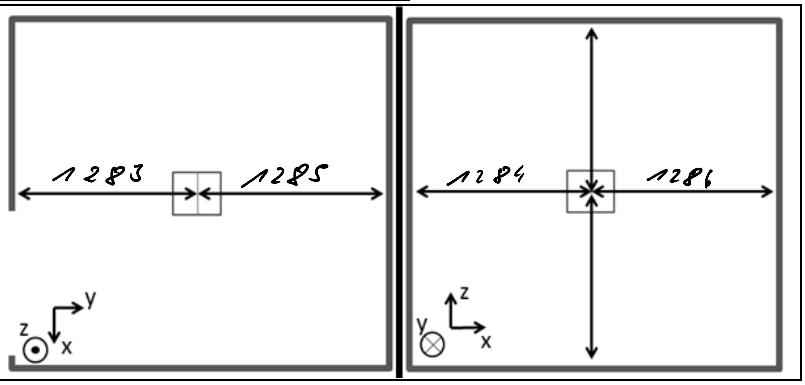
Messung 2. (MF)

Datum / Uhrzeit	17.07.2014 / 8:44
Dateinamen (yyyymmdd_[Nam MSRs]_MF)	20140717_Zuse_MF
Alle 16 SQUIDs nutzen	✓
Abtastrate (3 kHz)	✓
Messzeit (> 100 s)	226 s
Startzeitpunkt	08:44:21
Stoppzeit der Datenerfassung	08:48:10

Messung 3. (HF)

Datum / Uhrzeit	17.07.2014 /
Dateinamen (yyyymmdd_[Nam MSRs]_HF)	20140717_Zuse_HF
Alle 16 SQUIDs nutzen	✓
Abtastrate (30 kHz)	✓
Messzeit (> 10 s)	118 s
Startzeitpunkt	8:48:37
Stoppzeit der Datenerfassung	8:50:36

Absolute mag. Flussdichte + Gardienten

Position des SQUID Systems bezogen auf den Sensorkopf	

Programm zur Datenerfassung	Main_Monitor_rev3.vi

Messung 4. (Restfeld, Gradienten vor der Entmagnetisierung)

Helium Level (maximal 80 %)	63 %
LHe Level Sensor demontiert	✓
Start der aktiven Schirmung	× nicht genutzt
Zeitpunkt der Türschließung	~ 10 min
Zeitpunkt der letzten Entmagnetisierung	> 1 Tag
SQUIDs Check + Reset	✓
Fluxgate Check	✓
Datum / Uhrzeit	16.07.2014 / 01:31:33
Dateinamen (yyyymmdd_[Nam MSRs]_absB_befor_deg)	20140716_Zuse_abs_befor_deg
Abtastrate (300 Hz)	✓
Ausrichtung des Manipulators auf Pos. 0 (0°, Aufrecht)	✓
Person innen	Jens Voigt
Person außen	Dr. S. Knappe-Grüneberg
Start der Messprozedur	1:37:40 (am)
Ablauf siehe: Siehe Tabelle 4	✓
Stoppzeit der Datenerfassung	2:22:39

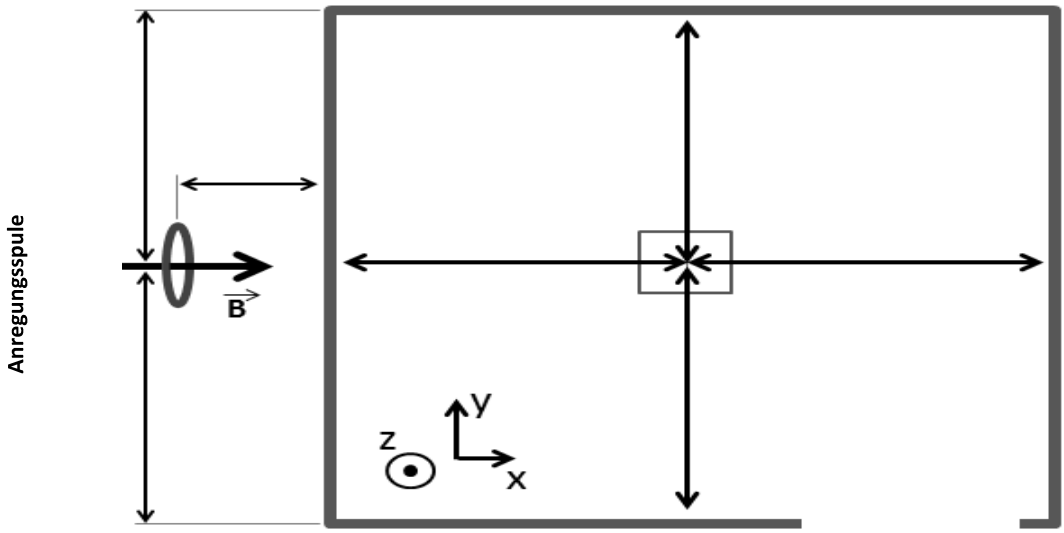
Messung 5. (Restfeld, Gradienten nach der Entmagnetisierung)

Helium Level (maximal 80 %)	~ 51 % nicht neu gemessen
LHe Level Sensor demontiert	✓
Start der aktiven Schirmung	× nicht aktiviert
Zeitpunkt der Türschließung	~ 35 min
Zeitpunkt der letzten Entmagnetisierung	~ 300 sec
SQUIDs Check + Reset	✓
Fluxgate Check	✓
Datum / Uhrzeit	16.07.2014 /
Dateinamen (yyyymmdd_[Nam MSRs]_absB_after_deg)	20140716_tuse_abs_after_deg
Abtastrate (300 Hz)	✓
Ausrichtung des Manipulators auf Pos. 0 (0°, Aufrecht)	✓
Person innen	Jens Voigt
Person außen	Dr. S. Knappe Grüneberg
Start der Messprozedur	3:13:32 (am)
Ablauf siehe: Siehe Tabelle 4	✓
Stoppzeit der Datenerfassung	4:18:28

Messung 6. (Schirmfaktor)

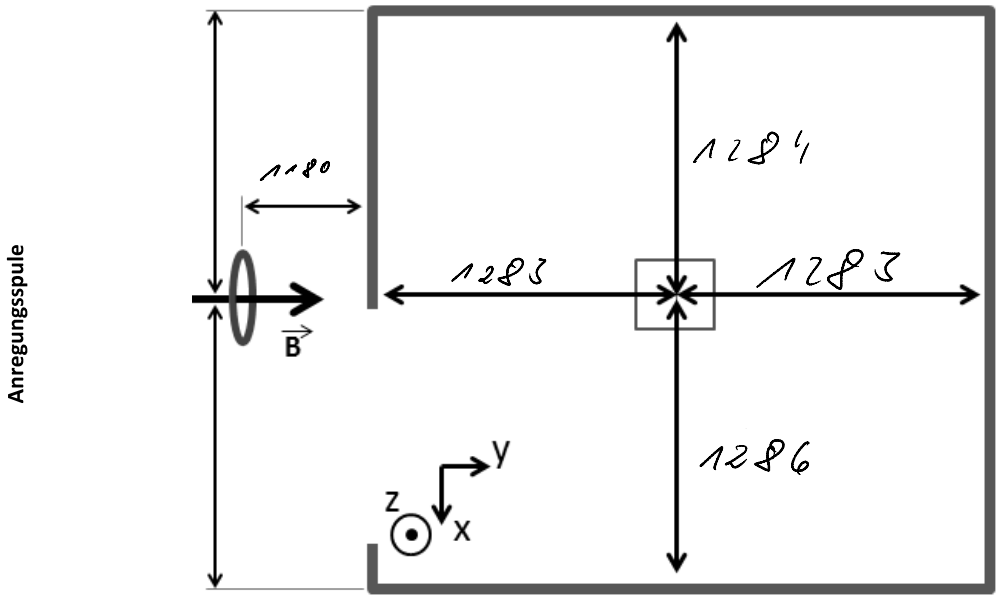
Helium Level	77 %
Bezeichnung der Anregungsspule	LF_Pol
Bezeichnung Frequenzgenerator	Agilent 33500b
Bezeichnung Leistungsverstärker	Hubert
Bezeichnung Stromzange	PR30 LME-Messtechnik
Zeitpunkt der letzten Entmagnetisierung	> 10h
Zeitpunkt der Türschließung	~ 10 min
SQUIDs Check + Reset	✓
Leistungsverstärker Check	✓
Stromzange Check	✓
Strom muss so gewählt werden, dass ohne Schirmung 1 µT am Ort des SQUIDs erzeugt würde	✓ aber nur bis zu einer Freq. von 18Hz f > 18Hz hat die Spannung des Verstärkers nicht mehr ausgereicht
Datum / Uhrzeit	17.07.2014 / 17:14
Ausrichtung des Manipulators auf Pos. 0 (0°, Aufrecht)	✓
Startzeitpunkt	17:14
Ablauf siehe: Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3	✓ (nur Tabelle 2 genutzt)
Start der Messprozedur	17:14
Stoppzeit der Datenerfassung	17:51
die Stromzange wurde kont. aufgezeichnet mit Ch 5 des zweiten PXI-Systems	

Tabelle 1 Parameter zur Bestimmung des Schirmfaktors in X-Richtung



Anregung **[Hz]**	Sample Freq. [Hz]	Messzeit [S]	Dateiname	Check	Kommentar
0,01	300	1000	X_SF_0Hz01	✘	nicht umgesetzt
0,05	300	1000	X_SF_0Hz05	✘	nicht umgesetzt
0,1	300	500	X_SF_0Hz1	✘	nicht umgesetzt
0,5	300	500	X_SF_0Hz5	✘	nicht umgesetzt
1	300	100	X_SF_1Hz	✘	nicht umgesetzt
4	300	100	X_SF_4Hz	✘	nicht umgesetzt
18	3000	100	X_SF_18Hz	✘	nicht umgesetzt
55	3000	100	X_SF_55Hz	✘	nicht umgesetzt
98	30000	10	X_SF_98Hz	✘	nicht umgesetzt
480	30000	10	X_SF_480Hz	✘	nicht umgesetzt
980	30000	10	X_SF_980Hz	✘	nicht umgesetzt

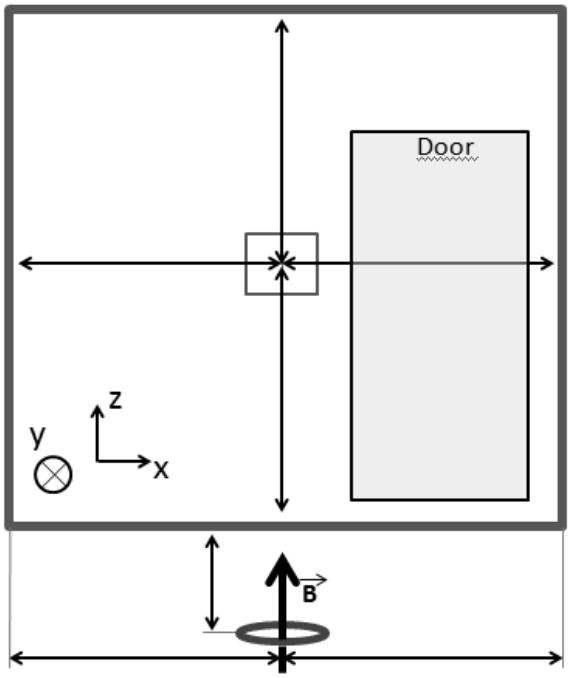
Tabelle 2 Parameter zur Bestimmung des Schirmfaktors in Y-Richtung



Anregung [Hz]	Sample Freq. [Hz]	Messzeit [S]	Dateiname	Check	Kommentar
0,01	300	1000	Y_SF_0Hz01	✓	
0,05	300	1000	Y_SF_0Hz05	✓	
0,1	300	500	Y_SF_0Hz1	✓	
0,5	300	500	Y_SF_0Hz5	✓	
1	300	100	Y_SF_1Hz	✓	
4	300	100	Y_SF_4Hz	✓	
18	3000	100	Y_SF_18Hz	✓	
55	3000	100	Y_SF_55Hz	✗	1 µT konnte nicht erreicht werden
98	30000	10	Y_SF_98Hz	✗	1 µT konnte nicht erreicht werden
480	30000	10	Y_SF_480Hz	✗	1 µT konnte nicht erreicht werden
980	30000	10	Y_SF_980Hz	✗	1 µT konnte nicht erreicht werden

Tabelle 3 Parameter zur Bestimmung des Schirmfaktors in Z-Richtung

Anregungsspule



Anregung [Hz]	Sample Freq. [Hz]	Messzeit [S]	Dateiname	Check	Kommentar
0,01	300	1000	Z_SF_0Hz01	✘	nicht umgesetzt
0,05	300	1000	Z_SF_0Hz05	✘	nicht umgesetzt
0,1	300	500	Z_SF_0Hz1	✘	nicht umgesetzt
0,5	300	500	Z_SF_0Hz5	✘	nicht umgesetzt
1	300	100	Z_SF_1Hz	✘	nicht umgesetzt
4	300	100	Z_SF_4Hz	✘	nicht umgesetzt
18	3000	100	Z_SF_18Hz	✘	nicht umgesetzt
55	3000	100	Z_SF_55Hz	✘	nicht umgesetzt
98	30000	10	Z_SF_98Hz	✘	nicht umgesetzt
480	30000	10	Z_SF_480Hz	✘	nicht umgesetzt
980	30000	10	Z_SF_980Hz	✘	nicht umgesetzt

Tabelle 4: Positionen zur Bestimmung der drei Vektor und neun Gradientenkomonenten der absoluten magnetischen Flussdichte.

	Kurzzeichen	Bezeichnung	Rotation		Translation		
			Z-Achse	X-Achse	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
Tensor (Verschiebung)	Pos-00	0_1	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-01	0_move	0 °	0 °	25 mm	0 mm	0 mm
	Pos-02	0_2	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-03	90_rot_1	90 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-04	90_rot_move	90 °	0 °	0 mm	25 mm	0 mm
	Pos-05	90_rot_2	90 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-06	0_3	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-07	lift 2 cm	0 °	0 °	0 mm	0 mm	20 mm
Vektor + Tensor (intrinsisch)	Pos-08	0_4	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-09	90_1	90 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-10	180_1	180 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-11	270_1	270 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-12	180_2	180 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-13	90_2	90 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-14	0_5	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-15	0_45°_1	0 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-16	0_45°_1_repro	0 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-17	90_45°_1	90 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-18	180_45°_1	180 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-19	270_45°_1	270 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-20	180_45°_2	180 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-21	90_45°_2	90 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-22	0_45°_2	0 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-23	0_45°_move	0 °	45 °	25 mm	0 mm	0 mm
	Pos-24	180_45°_move	180 °	45 °	25 mm	0 mm	0 mm
	Pos-25	0_45°_move_2	0 °	45 °	25 mm	0 mm	0 mm
	Pos-26	0_45°_3	0 °	45 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-27	0_6	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm
	Pos-28	0_6_repro	0 °	0 °	0 mm	0 mm	0 mm

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

1. Herr Dr. A. Schnabel: Interpretation der vom Dewar *Cube*-I erzeugten thermisch induzierten Magnetfeldern und bei der Erarbeitung eines Konzeptes zur Vermeidung dieses Effektes bei dem Dewar *Cube*-II

2. Herr S. Neuber und Herr D. Gutkelch: Konstruktion des Dewars *Cube*-II, des steckbaren Gehäuses für die genutzten FLL-Elektronik, des Manipulators, des Isoliereinsatzes, der Haltestruktur des Sensorkopfes und des Sensorkopfes selbst.

3. F. Petsche: Entwicklung der automatischen Befüllung des *Cube*-I- und *Cube*-II-Dewars und des Koppelracks.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

(Ort, Datum) (Unterschrift)