

# Charakterisierung des Magnetfeldsensors MagVector 2 zur Vermessung der magnetischen Eigenschaften eines Photomultipliers für den CBM RICH Detektor

Bachelor-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of  
Science (B.Sc.) im Studiengang Physik



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

vorgelegt von

**Daniel Schwab**

Erstprüfer: Prof. Dr. Kampert

Zweitprüfer: Prof. Dr. Zeitnitz

Juni 2015

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | CBM-RICH-Detektor und die Magnetfeld-Problematik . . . . .  | 2         |
| 1.2      | Struktur . . . . .  | 3         |
| <b>2</b> | <b>Die Magnetfeldsonde MagVector2</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Allgemeine Beschreibung . . . . .   | 4         |
| 2.2      | Funktionalität des Sensors . . . . .  | 5         |
| 2.2.1    | Gain Drift . . . . .  | 5         |
| 2.2.2    | Low-Crosstalk-Modus . . . . .   | 5         |
| 2.2.3    | Low-Power-Modus . . . . .   | 5         |
| 2.3      | MagVector Evaluation-Boards . . . . .   | 6         |
| 2.4      | EPICS Interface und Shell-Skripte . . . . .   | 7         |
| <b>3</b> | <b>Die Helmholtz-Spulen</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1      | Berechnung der magnetischen Feldstärke als Funktion des Stroms und der<br>Windungszahl . . . . .  | 11        |
| 3.2      | Unsicherheiten und Fehlerfortpflanzung . . . . .  | 12        |
| <b>4</b> | <b>Kalibration der MagVector2-Sonde</b>   | <b>13</b> |
| 4.1      | Einleitung . . . . .  | 13        |
| 4.2      | Versuchsaufbau . . . . .  | 13        |
| 4.3      | Messungen . . . . .   | 18        |
| 4.4      | Ergebnisse . . . . .  | 20        |
| 4.4.1    | Abweichung zwischen Auslese-Board 1 und Auslese-Board 2 . . . . .   | 20        |
| 4.4.2    | Abweichung zwischen Helmholtz-Spule 1 und Helmholtz-Spule 2 . . . . .   | 21        |
| 4.4.3    | Überblick der korrigierten Werte aller Achsen und beider Auslese-Board-<br>Varianten im Mittel beider Helmholtz-Spulen bei Raumtemperatur . . . . . | 22        |
| <b>5</b> | <b>Charakterisierung der Sonde</b>  | <b>23</b> |
| 5.1      | Einleitung . . . . .  | 23        |
| 5.2      | Messungen/Ergebnisse . . . . .  | 23        |
| 5.2.1    | Einfluss des Low-Power-Modus und Low-Crosstalk-Modus auf die Ka-<br>libration . . . . .   | 23        |
| 5.2.2    | Einfluss des Ebenencrosstalks auf die Genauigkeit des Sensors . . . . .   | 25        |
| 5.2.3    | Einfluss des Low-Crosstalk-Modus auf das Ebenen-Rauschen . . . . .  | 28        |
| 5.2.4    | Langzeitstabilität . . . . .  | 29        |
| 5.2.5    | Temperatur-Kompensation . . . . .   | 31        |
| <b>6</b> | <b>Ortsaufgelöste Magnetfeldmessungen</b>   | <b>33</b> |
| 6.1      | Einleitung . . . . .  | 33        |
| 6.2      | Mu-Metall-Varianten . . . . .   | 34        |
| 6.3      | Versuchsaufbau . . . . .  | 36        |
| 6.4      | Messungen . . . . .   | 38        |
| 6.4.1    | (1) Die Untersuchung des Effektes der Mu-Metall-Abschirmung in der<br>Ebene vor dem PMT als Funktion des Abstandes . . . . .                        | 38        |
| 6.4.2    | (2) Die Abschirmungseffektivität in Abhängigkeit der Stromstärke, bzw.<br>Feldstärke . . . . .  | 42        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 6.4.3     | (3) Die Abschirmungsmessungen bezüglich des PMT's im Vergleich zum Mu-Metall . . . . .  | 43        |
| 6.5       | Ergebnisse . . . . .  | 45        |
| 6.5.1     | (1) Das Verhältnis der Magnetfeldmessung in der Ebene vor dem PMT ohne Abschirmung und in der Ebene vor dem PMT mit Abschirmung . . . . . | 45        |
| 6.5.2     | (2) Abschirmungsverhalten bei Variation des Magnetfeldes . . . . .  | 46        |
| 6.5.3     | (3) Wie groß ist der Effekt des PMT's im Vergleich zum Mu-Metall . . . . .  | 47        |
| 6.5.4     | (4) Vergleich beider Mu-Metalle . . . . .   | 50        |
| <b>7</b>  | <b>Zusammenfassung und Erwartung</b>  | <b>51</b> |
| <b>8</b>  | <b>Erklärung</b>  | <b>52</b> |
| <b>9</b>  | <b>Danksagung</b>   | <b>53</b> |
| <b>10</b> | <b>Anhang</b>   | <b>54</b> |
| 10.1      | Abbildungen und Tabellen . . . . .  | 54        |
| 10.1.1    | Kalibrationsmessungen erster Spule . . . . .  | 54        |
| 10.1.2    | Kalibrationsmessungen zweiter Spule . . . . .   | 59        |
| 10.1.3    | Abschirmungsmessungen . . . . .   | 65        |
| 10.2      | Listen . . . . .  | 68        |

# Abbildungsverzeichnis

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | CBM Aufbau bestehend aus dem Dipolmagneten an vorderster Stelle, gefolgt vom RICH-Detektor und weiteren Auswertungssystemen . . . . .   | 1  |
| 2  | Multianoden-Photomultiplier-Ebene in dunkelblau $2 \times 2.4 \text{m}^2$ . . . . .   | 2  |
| 3  | Veranschaulichung der drei Achsen des Hall-Sensors . . . . .  | 4  |
| 4  | Auslese-Board 1 . . . . .   | 6  |
| 5  | Auslese-Board 2 . . . . .   | 6  |
| 6  | Die Oberfläche der verwendeten Software zur Steuerung des XY-Positioniertisches bzw. zur simultanen Datenauslesung. . . . .   | 8  |
| 7  | Aufbau einer Helmholtz-Spule und der Feldlinienverlauf aus frontaler Sicht . . . . .  | 9  |
| 8  | Auf der rechten Seite ist die erste Helmholtz-Spule mit $N_1 = 30$ Windungen, auf der linken Seite die zweite Helmholtz-Spule mit $N_2 = 18$ Windungen zu sehen. . . . .                          | 10 |
| 9  | Die dritte Helmholtz-Spule mit $R_2 = 17 \text{cm}$ . . . . .   | 10 |
| 10 | Skizze des Versuchsaufbaus der Kalibrationsmessungen, bestehend aus allen Hauptkomponenten des Versuchs. . . . .  | 14 |
| 11 | Exzentrischer Hohlzylinder zur Ausmessung der y-Achse links und der xz-Achse rechts, des ersten Auslese-Boards . . . . .  | 15 |
| 12 | Zentrischer Hohlzylinder zur Ausmessung der z-Achse links und der xy-Achse rechts, des zweiten Auslese-Boards . . . . .   | 15 |
| 13 | Foto des Versuchsaufbaus der Kalibrationsmessungen in der Kälte-Wärme-Testkammer. Drehwinkel können an der Winkelschablone abgelesen werden . . . . .   | 16 |
| 14 | Fotos der Aussparungen an der Helmholtz-Spule von oben, links zu sehen und frontal, rechts zu sehen . . . . .   | 16 |
| 15 | Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .   | 18 |
| 16 | Vergleich zwischen der kalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .   | 19 |
| 17 | Vergleich zwischen der x-Achse des ersten und des zweiten Boards mit der ersten Helmholtz-Spule gemessen . . . . .  | 20 |
| 18 | Vergleich zwischen der ersten Helmholtz-Spule und der zweiten für das erste Auslese-Board und die x-Achse . . . . .   | 21 |
| 19 | Vergleich der Kalibration für die y-Achse, zweites Auslese-Board und zweite Helmholtz-Spule mit Low-Crosstalk-Modus, mit Low-Power-Modus und mit Low-Crosstalk-Modus u. Low-Power-Modus . . . . . | 24 |
| 20 | Quadratisches Mittel über alle Achsen vom ersten Auslese-Board in Abhängigkeit des Winkels in der xz-Ebene . . . . .  | 25 |
| 21 | Quadratisches Mittel über alle Achsen vom zweiten Auslese-Board in Abhängigkeit des Winkels in der xy-Ebene . . . . .   | 26 |
| 22 | Vergleich der Werte des quadratischen Mittels beider Boards in Abhängigkeit des Drehwinkels . . . . .   | 26 |
| 23 | Verteilung der Messwerte des quadratischen Mittels der xy-Ebene bei $45^\circ$ mit Low-Crosstalk-Modus und ohne . . . . .   | 28 |
| 24 | Verteilung der Messwerte der y-Achse des zweiten Boards bei circa 3 Tagen Messzeit mit 260 Einträgen bei festem Magnetfeldwert von $1.33 \text{mT}$ . . . . .                                     | 29 |
| 25 | Verteilung der Messwerte der y-Achse des zweiten Boards bei circa 3 Tagen Messzeit mit 260 Einträgen bei festem Magnetfeldwert von $1.33 \text{mT}$ und Power-Cycle . . . . .                     | 30 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 26 | Messung des Magnetfeldes bei konstantem Feld von 1.33mT unter Einfluss eines Temperaturprofils von -30°C bis +50° für den Gain 0,8,15 . . . . .   | 31 |
| 27 | Messung des Magnetfeldes bei konstantem Feld eines Permanentmagneten von circa 110mT unter Einfluss eines Temperaturprofils von -30°C bis +50° für den Gain 0,8,15 . . . . .  | 32 |
| 28 | Links (1) zwei rechtwinklig gebogene Bleche mit durchsichtigem dünnen Klebeband verbunden. Rechts (2) 4 ineinandergesteckte Einzelbleche . . . . .  | 34 |
| 29 | Skizze des Versuchsaufbaus der Abschirmungsmessungen, bestehend aus allen wichtigen Komponenten des Versuchs . . . . .  | 36 |
| 30 | Links der Versuchsaufbau in der 90°-Stellung, Winkel können durch eine Drehung am Halterungsarm eingestellt werden. Rechts die Kerben in 45° Abständen im Halterungsfuß zur Winkeleinstellung zu sehen. . . . .   | 37 |
| 31 | Vergleich beider Halterungen für die zwei Mu-Metall-Konstruktionen. Im unteren Bild ist zu sehen, dass das zweite Mu-Metall nicht wie das erste durch eine seitliche Schraube verschraubt wird, sondern in die Aussparung hineingeschoben wird. . . . .   | 37 |
| 32 | Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 1.7mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der ersten Mu-Metall-Konstruktion. . . . .  | 39 |
| 33 | Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 3.4mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der ersten Mu-Metall-Konstruktion. . . . .  | 39 |
| 34 | Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 10mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der ersten Mu-Metall-Konstruktion. . . . .   | 40 |
| 35 | Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 1.7mm Abstand zur Glasfläche und der zweiten Mu-Metall-Konstruktion. . . . .                     | 40 |
| 36 | Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 3.4mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der zweiten Mu-Metall-Konstruktion. . . . . | 41 |
| 37 | Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 10mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der zweiten Mu-Metall-Konstruktion. . . . .  | 41 |
| 38 | In der oberen Zeile die Histogramme der Verhältnisse zur Messung nur mit PMT und mit PMT und zusätzlicher Abschirmung bei 0.8A. In der unteren Zeile die Histogramme der Verhältnisse zur Messung nur mit PMT und mit PMT und zusätzlicher Abschirmung bei 0.4A . . . . .                               | 42 |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 39 | In der oberen Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses Messung ohne Metall-Komponenten,also das freie Feld zur Messung mit PMT zu sehen. In der unteren Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses der freien Feldmessung zur Messung mit Mu-Metall-Variante 1 abgebildet. . . . .   | 43 |
| 40 | In der oberen Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses Messung ohne Metall-Komponenten,also das freie Feld zur Messung mit PMT zu sehen. In der unteren Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses der freien Feldmessung zur Messung mit Mu-Metall-Variante 2 abgebildet. . . . .   | 44 |
| 41 | Die Histogramme in der untersten Zeile zeigen das Verhältnis der Messungen PMT durch Mu-Metall 1 geteilt im Verhältnis bei 0.8A und 0.4A . . . . .   | 46 |
| 42 | Die Histogramme in der untersten Zeile zeigen das Verhältnis der Messung ohne Metall-Komponenten und mit PMT und der Messung ohne Metall-Komponenten und mit Mu-Metall 1. . . . .  | 47 |
| 43 | Die Histogramme in der untersten Zeile zeigen das Verhältnis der Messung ohne Metall-Komponenten und mit PMT und der Messung ohne Metall-Komponenten und mit Mu-Metall 2. . . . .  | 49 |
| 44 | Oberste Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall. Die mittleren Histogramme zeigen analog das Verhältnis für das zweite Mu-Metall. Die untersten Histogramme liefern das Verhältnis der ersten durch die zweite Zeile, bzw Abschirmung durch das erste Metall durch die Abschirmung des zweiten Metalls. . . . . | 50 |
| 45 | Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .  | 54 |
| 46 | Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .  | 55 |
| 47 | Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .   | 56 |
| 48 | Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .   | 57 |
| 49 | Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die erste Helmholtz-Spule . . . . .   | 58 |
| 50 | Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die zweite Helmholtz-Spule . . . . .   | 59 |
| 51 | Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die zweite Helmholtz-Spule . . . . .   | 60 |
| 52 | Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die zweite Helmholtz-Spule . . . . .   | 61 |
| 53 | Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die zweite Helmholtz-Spule . . . . .  | 62 |
| 54 | Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die zweite Helmholtz-Spule . . . . .  | 63 |
| 55 | Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die zweite Helmholtz-Spule . . . . .  | 64 |
| 56 | Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall bei 90° und 1.7mm Abstand . . . . .   | 65 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 57 | Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall bei 90° und 3.4mm Abstand . . . . .  | 65 |
| 58 | Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall bei 90° und 10mm Abstand . . . . .   | 66 |
| 59 | Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das zweite Mu-Metall bei 90° und 1.7mm Abstand . . . . . | 66 |
| 60 | Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das zweite Mu-Metall bei 90° und 3.4mm Abstand . . . . . | 67 |
| 61 | Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das zweite Mu-Metall bei 90° und 10mm Abstand . . . . .  | 67 |

# Tabellenverzeichnis

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Vom Hersteller angegebene Kalibrierungswerte . . . . .   | 13 |
| 2  | Fit-Daten zur Abbildung 15 . . . . .   | 18 |
| 3  | Fit-Daten zur Abbildung 16 . . . . .   | 19 |
| 4  | Fit-Daten der Abbildung 17 . . . . .   | 20 |
| 5  | Fit-Daten der Abbildung 18 . . . . .   | 21 |
| 6  | Kalibrationswerte beider Auslese-Board-Varianten und aller Achsen im Mittel<br>beider Helmholtz-Spulen . . . . . | 22 |
| 7  | Fit-Werte zur Abbildung 19 . . . . .   | 24 |
| 8  | Fitwerte Zur Abbildung 23 . . . . .  | 26 |
| 9  | Fitwerte der Abbildung 23 . . . . .  | 28 |
| 10 | Fit-Daten zur Abbildung 25 u. 26 . . . . .   | 30 |
| 11 | Fit-Werte zur Abbildung 27 und 28 für ein kleines bzw. großes Feld . . . . .                                     | 32 |
| 12 | Fit-Daten zur Abbildung 45 . . . . .   | 54 |
| 13 | Fit-Daten zur Abbildung 46 . . . . .   | 55 |
| 14 | Fit-Daten zur Abbildung 47 . . . . .   | 56 |
| 15 | Fit-Daten zur Abbildung 48 . . . . .   | 57 |
| 16 | Fit-Daten zur Abbildung 49 . . . . .   | 58 |
| 17 | Fit-Daten zur Abbildung 50 . . . . .   | 59 |
| 18 | Fit-Daten zur Abbildung 51 . . . . .   | 60 |
| 19 | Fit-Daten zur Abbildung 52 . . . . .   | 61 |
| 20 | Daten zur Abbildung 53 . . . . .   | 62 |
| 21 | Fit-Daten zur Abbildung 54 . . . . .   | 63 |
| 22 | Fit-Daten zur Abbildung 55 . . . . .   | 64 |



# 1 Einleitung

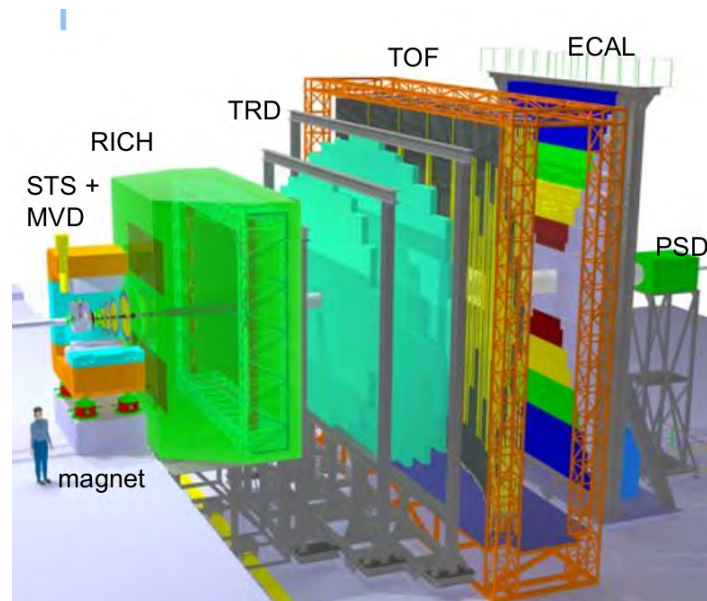


Abbildung 1: CBM Aufbau bestehend aus dem Dipolmagneten an vorderster Stelle, gefolgt vom RICH-Detektor und weiteren Auswertungssystemen

Das Compressed Baryonic Matter Experiment (CBM) verfolgt das zukünftige Ziel das QCD-Phasendiagramm bayrionischer Materie hoher Dichte und moderater Temperatur zu erforschen. Dabei soll insbesondere der Fragestellung bezüglich eines möglicherweise existierenden Phasenübergangs erster Ordnung, sowie der damit zusammenhängenden Existenz eines kritischen Punktes nachgegangen werden. Dazu sind Nukleonen-Nukleonen Streuexperimente mit Energien von bis zu 10 GeV pro Nukleon geplant. Um diese Streuexperimente auswerten zu können, sind verschiedene Detektoren erforderlich.

Einer dieser Detektoren ist der RICH-Detektor, ein Ringe Image Cherenkov Detector. Dieser übernimmt dabei die wichtige Funktion, Cherenkov Photonen orts aufgelöst nachzuweisen. Um dies zu ermöglichen soll die aktive Detektorfläche von circa  $2 \cdot 4m^2$  Fläche mit Multianoden-Photomultipliern ausgerüstet werden.

In Etwa 850 Photomultiplier mit einer aktiven Fläche von jeweils ungefähr  $5 \cdot 5cm^2$  sind hierfür erforderlich.

## 1.1 CBM-RICH-Detektor und die Magnetfeld-Problematik

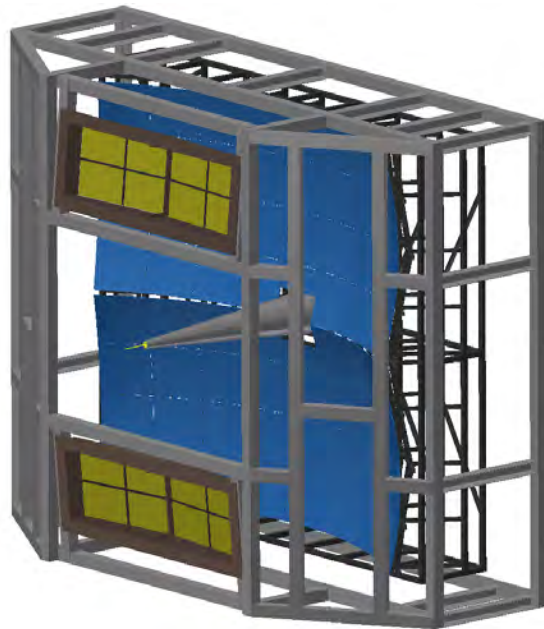


Abbildung 2: Multianoden-Photomultiplier-Ebene in dunkelblau  $2 \times 2.4 \text{m}^2$

Der RICH-Detektor befindet sich in unmittelbarer Nähe zum CBM-Dipolmagneten. Dieser ist zur Impulsbestimmung erforderlich. Durch diesen Aufbau treten magnetische Streufelder von über 10mT im Bereich der Photodetektor-Ebene auf.

Da die zur Bestückung der Detektorfläche verwendeten Multianoden-Photomultiplier nur bei Feldern von 1-2mT zuverlässig arbeiten, sind umfassende Abschirmmaßnahmen unverzichtbar.

Um die Streufelder im Bereich der Photodetektorfläche auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, sollen neben einer makroskopischen Abschirmbox, unter Umständen auch alle Photomultiplier separat abgeschirmt werden.

Da der Dipolmagnet im Experiment mit wechselnden Feldstärken betrieben wird, ist es nötig die Größe der Felder in der Nähe der PMT-Fläche kontrollieren zu können.

Hierzu ist geplant, die Detektor-Fläche mit vielen einzelnen Hall-Magnetfeldsensoren auszustatten.

Eine gut geeignete Hall-Sonde scheint der MagVecor2 zu sein.

Zwei Prototypen dieses Modells wurden beschafft und es wurde ein hierfür geeignetes Auslese-Board entwickelt, sodass die Sonde eingesetzt werden kann.

Im Rahmen der Bachelor-Thesis wurde die Sonde vorerst kalibriert, charakterisiert und im Anschluss getestet.

Der Fokus liegt hier auf der Hauptfragestellung, ob die Sonde im Bereich von Feldstärken bis zu 10mT effizient, bzw. zuverlässig und stabil misst.

Anschließend wurde die kalibrierte Hall-Sonde an einem XY-Positioniertisch angebracht um so erste Messungen bezüglich der Abschirmungseffektivität verschiedener Mu-Metall-Konfigurationen durchzuführen.

## 1.2 Struktur

Die Thesis ist in 7 Kapitel gegliedert.

Das erste Kapitel besteht aus einer allgemeinen Einleitung und der Beschreibung der Problematik, die dieses Bachelor-Thema erst ermöglicht hat.

Kapitel zwei befasst sich mit der näheren Beschreibung der Eigenschaften des MagVector2, sowie dem Überblick über beide Auslese-Board-Varianten und der nötigen Software zur Datenauslesung.

Das dritte Kapitel ist aus einem Vergleich aller verwendeten Spulen und deren Abmessungen, sowie der mathematischen Grundlage zur Feldberechnung und der damit verbundenen bestehenden Unsicherheit des Feldwertes aufgebaut.

Im vierten Kapitel wird der Sensor für beide Auslese-Boards und beide Kalibrations-Spulen im Mittel bei Raumtemperatur und im Grundeinstellungsbetrieb kalibriert.

Kapitel fünf liefert im Kern Erkenntnisse bezüglich der Langzeitstabilität für verschiedene Einstellungen der Sonde.

Das sechste Kapitel behandelt die Auswertung erster Abschirmungsmessungen mit kalibrierter Hall-Sonde.

Mit dem Kapitel 7 und damit letzten Kapitel endet diese Bachelor-Thesis mit einer Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse aller Praxisorientierten Kapitel.

## 2 Die Magnetfeldsonde MagVector2

### 2.1 Allgemeine Beschreibung

Der MV2, produziert vom schweizer Unternehmen Sensima Technology Sa, ist eine 3-Achsen-Hallsonde, in Form eines SMD-Bausteins der Fläche  $3 \times 3 \text{mm}^2$ , geeignet um magnetische Felder im Bereich des Erdmagnetfeldes, bis hin zu größeren Feldern im Bereich von 3T zu messen. Betrieben werden kann der Sensor im Spannungsbereich von 3.3V bis 5.5V.

Ein in den Chip integrierter Spannungswandler regelt eine zu hohe Spannung auf die Chip-Kern Versorgungsspannung von 3.3V herunter.

Der notwendige Versorgungsstrom liegt im Intervall von 17mA bis maximal 20mA.

Möglich ist es, den MagVector2 in einem Temperaturintervall von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+125^\circ\text{C}$  zu betreiben.

Der Chip hat ein digitales, sowie ein analoges Interface integriert.

Wahlweise kann durch die Konfiguration des D-A Input Pins entschieden werden, welcher Modus verwendet werden soll.

Liegt der D-A Pin an Groud an, ist das digitale Interface aktiv, andernfalls ist eine anliegende 5V Spannung notwendig, um das analoge Interface zu verwenden.

Für jede der 3 Achsen der Hall-Sonde, sowie für den eingebauten Temperatursensor existiert ein A/D Wandler, um das analoge Signal in ein digitales zu transformieren.

Der Messbereich ist in 4 Stufen konfigurierbar, im Bereich von 100mT , 300mT , 1000mT, 3000mT.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wird der digitale Ausgang gewählt, da so die Daten über eine Serial Peripheral Interface Schnittstelle (SPI) ausgelesen werden.

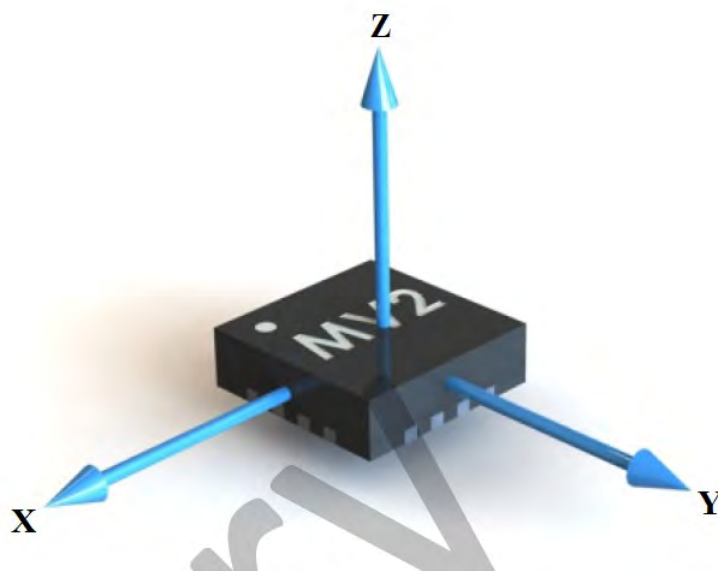


Abbildung 3: Veranschaulichung der drei Achsen des Hall-Sensors

## 2.2 Funktionalität des Sensors

Der Sensor kann in verschiedenen Betriebsmodi verwendet werden, konfigurierbar über das Setzen entsprechender Registerwerte.

### 2.2.1 Gain Drift

Wird der Sensor in anderer Umgebungstemperatur als der Raumtemperatur genutzt, ist es notwendig die temperaturabhängige Verschiebung der Empfindlichkeit der Achsen um einen Korrekturwert zu ändern.

Laut Hersteller kann der Gain nach folgender Formel errechnet werden:

$$G(T) = G_0 \cdot (1 + k (T - T_{RT})) \quad (1)$$

$T$  ist hierbei die momentane Temperatur,  $T_{RT}$  ist hierbei die Raumtemperatur,  $k$  ist ein Faktor der sich aus der möglichen Einstellung des Wertes Gain ergibt.

Dieser ist standartmäßig auf 8 eingestellt, sodass

$k = 0$  , binär ( $GD_0(LSB), GD_1, GD_2, GD_3(MSB) = 0, 0, 0, 1$ ).

Es ergibt sich ein einstellbarer Wert von 0 bis 15.

### 2.2.2 Low-Crosstalk-Modus

Wird ein Magnetfeld in nur eine Achsen-Richtung angelegt, führt dies dennoch zu einem geringen Messwert der anderen beiden Achsen, selbst bei einer perfekt in diese Richtung positionierten MagVector-Sonde. Hierfür ist der Ebenencrosstalk verantwortlich.

Feldwerte der Nachbar-Achsen greifen auf die betrachtete Achse über.

Um diese achenkorrelierende Ungenauigkeit zu vermindern, kann der Low-Crosstalk-Modus aktiviert werden, sodass die einzelnen Achsen besser voneinander getrennt werden.

Dies kann wiederum zu einem größeren Rauschen der einzelnen Achsen führen.

### 2.2.3 Low-Power-Modus

Der Low-Power-Modus vermindert die Stromaufnahme des MagVector2, was zu einer geringeren Betriebstemperatur führt. Allerdings kann sich hierdurch das Rauschen vergrößern.

## 2.3 MagVector Evaluation-Boards

Um die MagVector2-Sonde verwenden zu können, ist es erforderlich, dass diese auf einem dafür zugeschnittenem Auslese-Board montiert wird.

Das Auslese-Board hat dabei mehrere Funktionen.

Der SMD-Chip kann mit einer Betriebsspannung von 3.3V versorgt werden, der Chip kann durch die Form der Halterung optimal an die zu messende Position herangeführt werden und die Daten können über einen Serial Peripheral Interface Bus ausgelesen werden.

Angebunden an einen Raspberry Pi Minicomputer, welcher ebenfalls über einen SPI-Bus verfügt, stellt das vorliegende System ein autarkes Messsystem dar, welches flexibel einsetzbar ist.

Um variabler messen zu können wurden zwei verschiedene Auslese-Boards entwickelt.

Beim ersten Board sitzt der SMD-Chip längs der Halterung, beim zweiten Board ist der Chip orthogonal zur Halterung montiert.

In anderen Worten verläuft die z-Achse des ersten Boards orthogonal zur Halterungsfläche, während die z-Achse beim zweiten Board längs der Halterung verläuft.



Abbildung 4: Auslese-Board 1

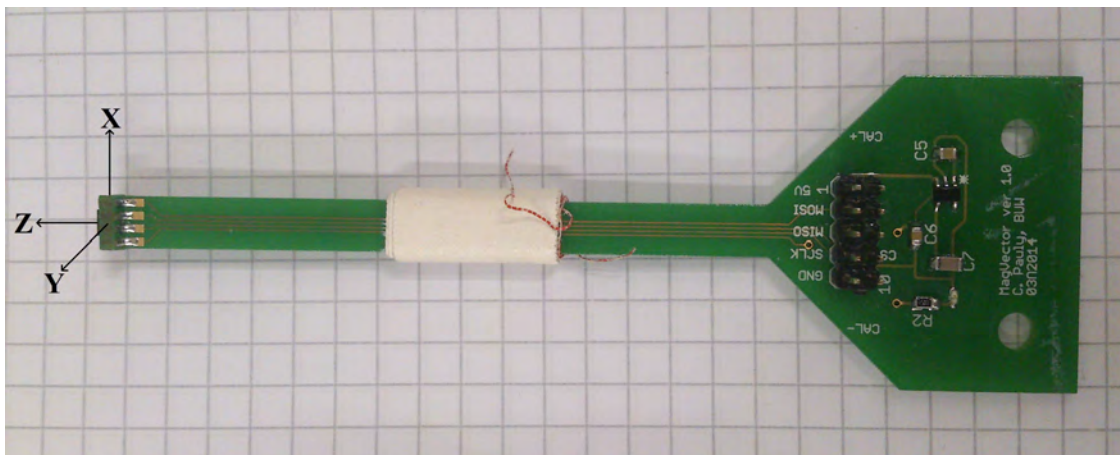


Abbildung 5: Auslese-Board 2

## 2.4 EPICS Interface und Shell-Skripte

Um die Daten auszulesen und zu verwalten ist es notwendig verschiedene Softwareumgebungen zu nutzen.

Für den ersten Versuchsteil wurden zunächst 2 Shell-Skripte verwendet. Das erste Shell-Skript liest nach jedem Tastendruck erneut Messdaten aus, während das zweite Skript die Angabe der Anzahl der Messpunkte sowie die Verzögerung zwischen zwei Messpunkten fordert.

Das erste Skript wurde genutzt um nach jeder händischen Änderung der Stromstärke erneut einen Datenpunkt auszulesen.

Das Zweite Skript hingegen wurde verwendet um Messdaten zur Langzeitstabilität zu erheben. Im Hauptteil der Bachelor-Arbeit, muss die XY-Tischsteuerung synchron mit der Datenauslesung des MagVector2 angesteuert werden.

Dazu wurden verschiedene Softwareinstrumente des EPICS Slow-Control-System verwendet. Hierzu wird ein EPICS-Input/Output-Controller auf dem Raspberry Pi gestartet.

Dieser ermöglicht durch das Abbilden aller Funktionen auf Prozessvariablen die Steuerung und die Datenauslesung über graphische Interfaces im Control System Studio (CSS).

Analog dazu wird die im zweiten Teil der Thesis verwendete XY-Tischsteuerung über einen Input/Output-Controller angesteuert.

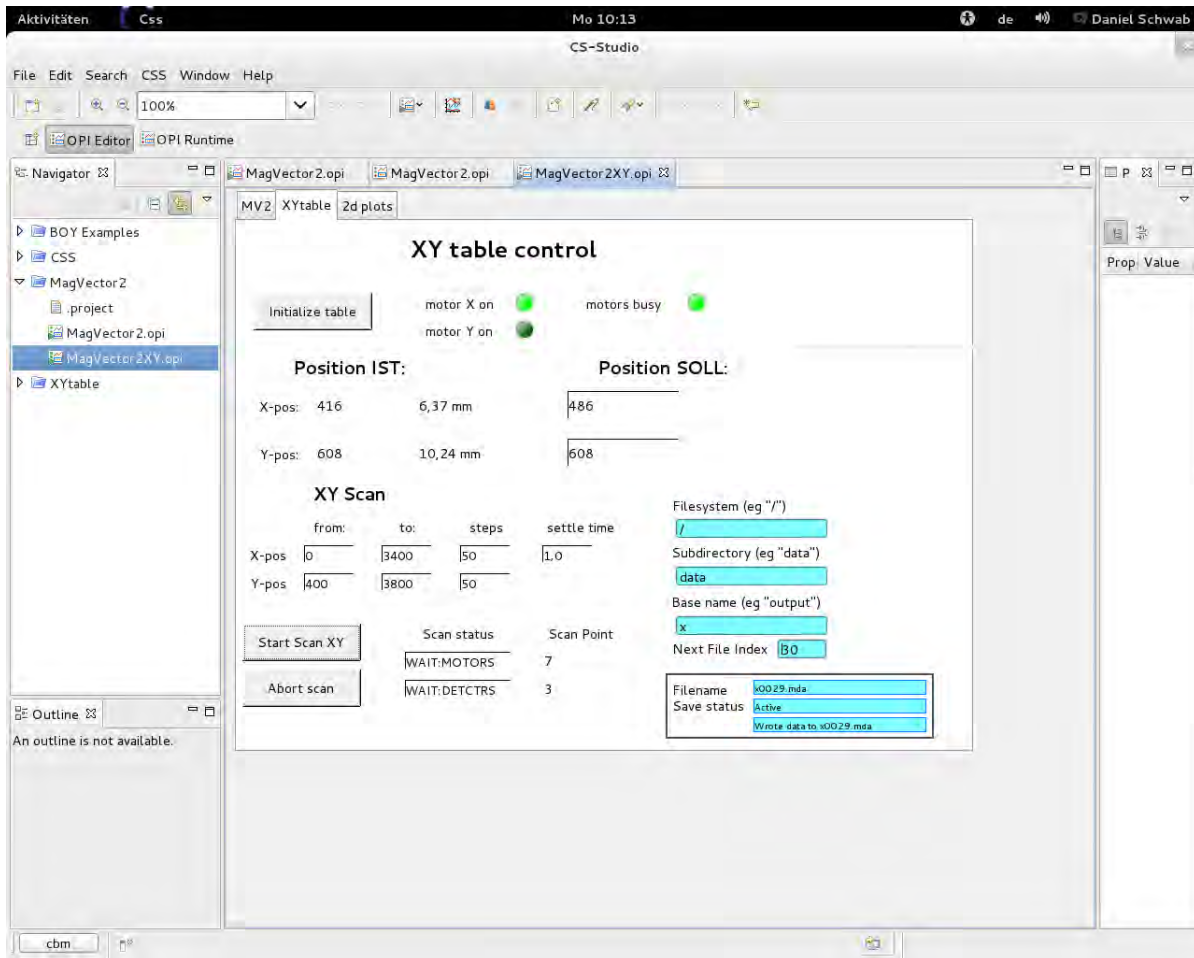


Abbildung 6: Die Oberfläche der verwendeten Software zur Steuerung des XY-Positioniertisches bzw. zur simultanen Datenauslesung.

- Intialize table: der Scanarm fährt in 0-Position.
- Position SOLL: hier kann der Scanarm an eine beliebige Stelle innerhalb der Reichweite in der Ebene bewegt werden.
- X-pos: Gibt den Startpunkt in der X-Richtung vor, bzw. den Endpunkt und die Auflösung durch das Fenster "steps".
- Y-pos: Bestimmt analog die y-Werte.
- Subdirectory: Gibt den Ordner an, in dem die Messdaten im Mda-Format erzeugt werden sollen.
- Base name: Bezeichnet den Dateinamen.
- Next File Index: Fortlaufende Nummer um keine Daten zu überschreiben.



### 3 Die Helmholtz-Spulen

Werden zwei gleich große Spulen mit dem Radius  $R$  im Abstand  $R$  bei gleichen Windungszahlen aufgestellt, überlagern sich die beiden Felder der Einzelspulen zu einem homogenen Feld in einem größeren Volumenbereich um die x-Achse herum, bezeichnet als Helmholtz-Spule.

Es wurden zwei verschiedene Helmholtz-Spulen zur Kalibration des MagVector2 mit unterschiedlichen Windungszahlen und unterschiedlichem Drahtdurchmesser gebaut.

Der Grund hierfür ist, dass bei gleichem Strom unterschiedlich hohe Magnetfelder erzeugt werden können.

So ist es möglich Kalibrationswerte im Mittel beider Spulen zu bestimmen, was wiederum die Unsicherheit verkleinert, die durch den Strom, Struktur der Windungen und den Radius der Spulen entsteht.

Eine weitere größere Helmholtz-Spule wurde im zweiten Teil der Arbeit zur Abschirmungsmessung verwendet.

Genaue Werte, wie beispielsweise die Wicklungszahl der Spule sind nicht bekannt, da diese nicht speziell für diesen Versuch gebaut wurde.

Da aber mit kalibrierten Hall-Sensoren gemessen wird und nur das Verhältnis der Messungen ohne und mit Abschirmung entscheidend ist, ist dies nicht weiter relevant.

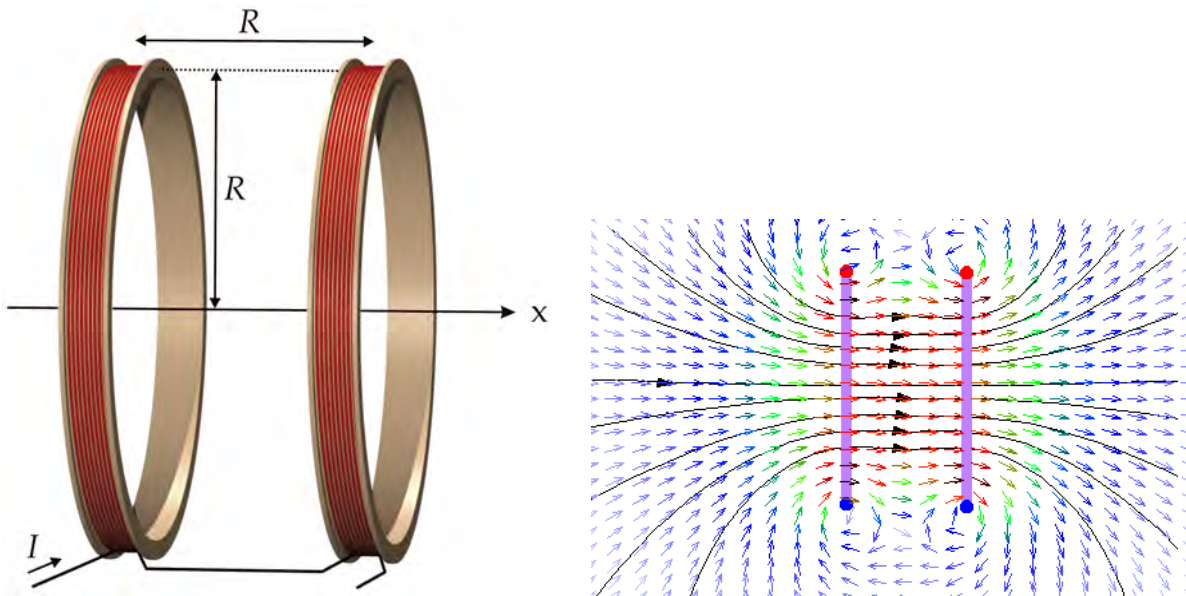


Abbildung 7: Aufbau einer Helmholtz-Spule und der Feldlinienverlauf aus frontaler Sicht

Die erste Helmholtz-Spule hat einen Radius von  $R = 3.65\text{cm}$ . Beide Spulenkörper sind mit  $N_1 = 30$  Windungen ausgestattet, bei einem Drahtdurchmesser von  $d_1 = 1\text{mm}$ . Die zweite Helmholtz-Spule verwendet den gleichen Radius  $R$ , die Spulenkörper sind mit  $N_2 = 18$  Windungen versehen, bei einem Drahtdurchmesser von  $d_2 = 1.5\text{mm}$ .

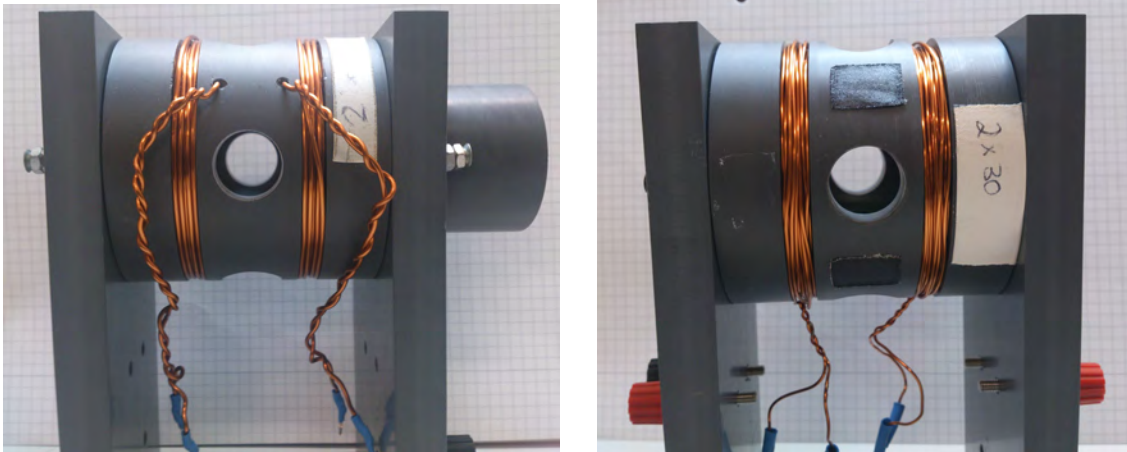


Abbildung 8: Auf der rechten Seite ist die erste Helmholtz-Spule mit  $N_1 = 30$  Windungen, auf der linken Seite die zweite Helmholtz-Spule mit  $N_2 = 18$  Windungen zu sehen.

Die dritte größere Helmholtz-Spule mit  $R_2 = 17\text{cm}$ .

Die Spulen sind hier allerdings im Abstand  $R_3 = 9\text{cm} \neq R_2$  platziert.

Dies liegt daran, dass die Spule nicht speziell für diese Thesis gebaut wurde.

So ist auch die Windungszahl unbekannt.

Da diese nicht für die Kalibration genutzt wird, sondern erst im zweiten Praxisteil zur Simulation externer Streufelder dient, ist dies nicht weiter von Belang.

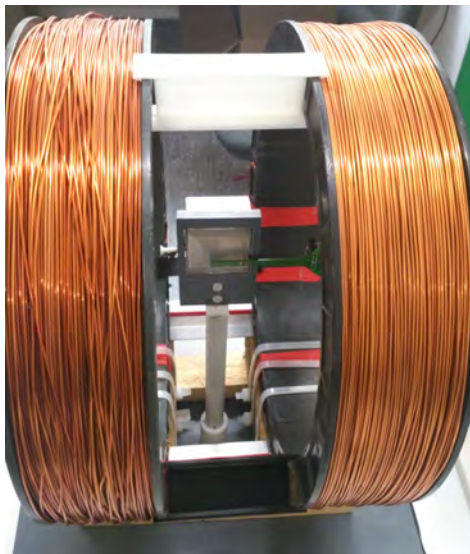


Abbildung 9: Die dritte Helmholtz-Spule mit  $R_2 = 17\text{cm}$

### 3.1 Berechnung der magnetischen Feldstärke als Funktion des Stroms und der Windungszahl

Das Biot-Savart-Gesetz liefert den idealisierten Zusammenhang zwischen der räumlich abhängigen infinitesimalen Magnetfeldstärke  $dB(r)$  und der Stromstärke die durch ein infinitesimales Leiterstück der Länge  $dl$  fließt.

$$dB(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \, dl \times \frac{r - r'}{|r - r'|^3} \quad (2)$$

Die gesamte magnetische Flussdichte ergibt sich durch Aufsummieren der einzelnen infinitesimalen Stücke  $dB(r)$  was mit der Stromdichte  $J(r')$  folgende Formel ergibt:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_V J(r') \times \frac{r - r'}{|r - r'|^3} dV \quad (3)$$

Da wir das Magnetfeld im Mittelpunkt bestimmen wollen, legen wir den Koordinatenursprung in den Mittelpunkt der beiden Einzelpulen der Helmholtz-Spule. Betrachten wir das Magnetfeld entlang der Symmetrieachse  $x$ , ergibt sich mit der Windungszahl  $N = 1$  und der Formel (2) die magnetische Flussdichte für eine Leiterschleife:

$$\vec{B}(x) = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \vec{e}_x \quad (4)$$

Das Magnetfeld im Mittelpunkt der Helmholtz-Spule berechnet sich als Überlagerung zweier Kreisströme im Abstand  $\pm \frac{R}{2}$

$$B\left(\frac{R}{2}\right) + B\left(\frac{-R}{2}\right) = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot I \cdot R^2 \left( \left( R^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} + \left( R^2 + \left(\frac{-R}{2}\right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} \right) \quad (5)$$

$$B\left(\frac{R}{2}\right) + B\left(\frac{-R}{2}\right) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{(R^2 + (\frac{R}{2})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

Mit der Feldberechnung  $B_H$  lässt sich der idealisierte Fall entlang der x-Achse in Abhängigkeit des Spulenradius  $R = 3.65\text{cm}$  und des Stroms  $I$  und der Windungszahl  $N$  berechnen.

$$B_H(R, I) = \frac{8 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot N}{\sqrt{125} \cdot R} \quad (7)$$

Bei einem gemessenem Stromintervall der ersten Spule von 0A bis 5.1A ergibt sich aus der Formel 7 bei 5.1A ein maximaler Feldwert von  $B_1 = 3.77mT$ .

Für die zweite Helmholtz-Spule ergibt sich bei einem Messbereich von 0A bis 10A ein maximaler Feldwert von  $B_1 = 4.43mT$ .

Hier ist anhand der Formel 7 klar, dass die Stromstärke der zweiten Spule um den gleichen Wert erhöht werden muss, um den sich die Windungszahlen unterscheiden, da beide Faktoren proportional eingehen.

Das Verhältnis der Windungszahlen beträgt  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{30}{18} = 1.66$ , so muss der Strom der zweiten Spule um 66% erhöht werden, um gleiche Magnetfeldstärken zu erreichen.

## 3.2 Unsicherheiten und Fehlerfortpflanzung

Die größten möglichen Unsicherheiten die hier bei der Berechnung auftreten können sind der Radius  $R = 3.65cm$ , der vor der Herstellung als mittlerer Radius der Dicke der Spulenwicklungen berechnet wurde, welcher hier mit  $\Delta R = 0,1cm$  bemessen wird und die Unsicherheit der Stromstärke die laut des Herstellers des Netzteils  $\Delta I = 0,01A$  beträgt.

Der Fehler  $\Delta R$  ist aufgrund der Präzision in der Fertigung der Spulen sehr klein bemessen. Mögliche weitere Fehlerquellen ergeben sich durch die Anordnung der Windungen jeder einzelnen Spule, sowie Stromänderungen aufgrund von wärmeabhängigen Widerstandsänderungen im Draht. Diese werden hier allerdings vernachlässigt.

Da eine Normalverteilung der Messwerte angenommen wird, wird die gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet.

Als Grundlage der Fehlerberechnung wird die Formel 7 verwendet.

So ergibt sich nach Gauß die Fehlerformel des Magnetfeldes im Mittelpunkt der Helmholtz-Spule.

$$\Delta B_H (R, I) = \sqrt{\left(\frac{\delta B}{\delta I} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\delta B}{\delta R} \cdot \Delta R\right)^2} \quad (8)$$

## 4 Kalibration der MagVector2-Sonde

### 4.1 Einleitung

Damit wir aus dem ADC-Wandler-Signal ein Magnetfeldwert erhalten können, benötigen wir für jede Achse eine Kalibrationskonstante.

Der Hersteller gibt hierfür ungefähre Richtwerte für die 4 Messbereiche als voreingestellten Wert an.

| Sensitivity | Min [LSB/mT] | Start Value [LSB/mT] | Max [LSB/mT] | Note                |
|-------------|--------------|----------------------|--------------|---------------------|
| 3T range    | 7.3          | 7.5                  | 7.8          | At room temperature |
| 1T range    | 22           | 22.5                 | 23           | At room temperature |
| 300mT range | 72           | 73.4                 | 74           | At room temperature |
| 100mT range | 213          | 214                  | 217          | At room temperature |

Tabelle 1: Vom Hersteller angegebene Kalibrierungswerte

Der Kalibrationswert berechnet sich zu

$$b_{slope} = \frac{1}{LSB/mT} \quad (9)$$

Für den relevanten Messbereich von 100mT errechnet sich ein Kalibrationswert von  $b_{slope} = 0.004672$  für die x,y und z-Achse.

Um zu überprüfen wie gut der Sensor vorkalibriert ist, bzw. um genauere Kalibrationswerte zu bestimmen, werden alle drei Achsen beider Auslese-Board-Varianten nacheinander im Inneren der beiden kleinen Helmholtz-Spulen ausgemessen.

Damit die Messergebnisse nicht durch Temperaturschwankungen verfälscht werden, laufen die Messungen in einer Kälte-Wärme-Testkammer bei Raumtemperatur ab.

### 4.2 Versuchsaufbau

Das Netzteil, sowie der Raspberry Pi und ein Digitalthermometer werden auf den Klimaschrank gestellt.

Kabelstränge können durch eine Öffnung in der oberen Gehäusewand in den inneren Raum der Testkammer geführt werden.

Damit keine Temperaturschwankungen durch die Öffnung hervorgerufen werden, wird diese mit einem flexiblen Gummistopfen verschlossen.

Durch ein äußeres Tastenfeld kann die Temperatur der Kammer eingestellt werden.

Um diese gegenzuprüfen verbleibt die Messspitze des Digitalthermometers durch die obere Öffnung geführt, während der Messung im Inneren.

Eine Liste der wichtigsten Komponenten des Aufbaus befindet sich im Anhang.

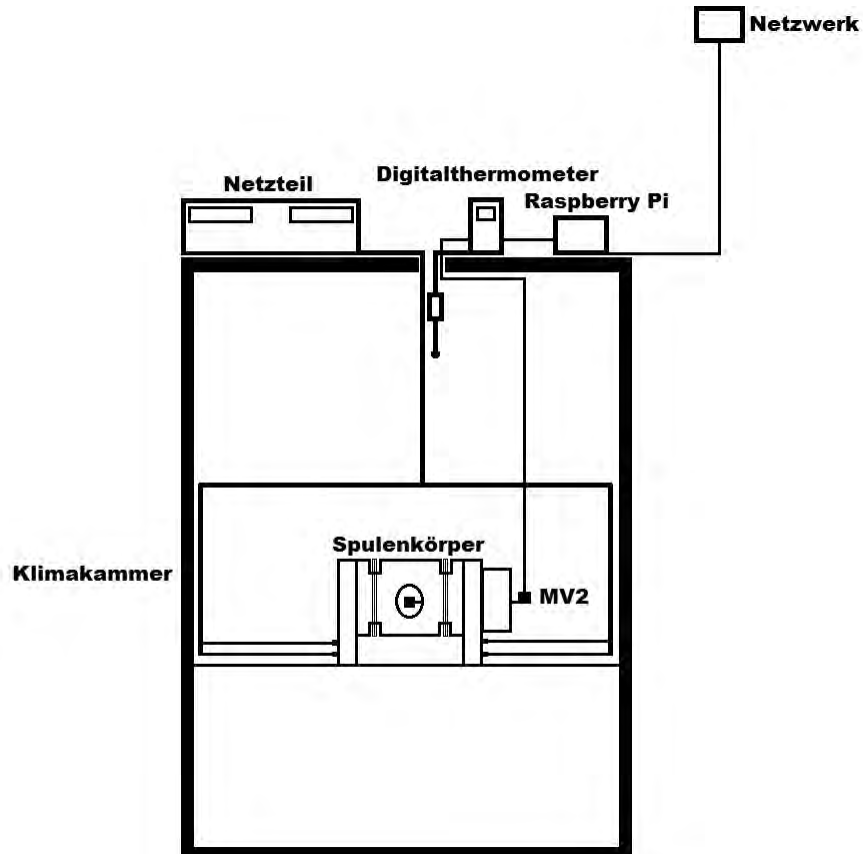


Abbildung 10: Skizze des Versuchsaufbaus der Kalibrationsmessungen, bestehend aus allen Hauptkomponenten des Versuchs.

Ab hier ist der Versuchsaufbau abhängig davon, welcher der beiden Sonden ausgemessen werden soll. Das Auslese-Board 1 und das Auslese-Board 2 benötigen unterschiedliche Hohlzylinder in die sie hineingeschoben werden, damit diese unter einer Rotation nicht aus der Mittelachse der Helmholtz-Spule austreten.

So wird von einem exzentrischen Hohlzylinder gesprochen, wenn der Zylinder mit Ausschnitt versetzt zur Mittelachse (Symmetrieachse) des Körpers gemeint ist.

Hingegen wird von einem zentrischen Hohlzylinder gesprochen, wenn der Ausschnitt sich in der Mittelachse befindet.

Hier wird im Rahmen des Kapitels von den Achsen des Sensors geredet, nicht von den Achsen der Spule.

- **I) Ausleseboard 1:** Um die x Achse auszumessen wird der exzentrische kleinere Hohlzylinder mit einem Radius von 1cm frontal eingeschoben, um die z-Achse zu messen muss der Zylinder einmalig um  $90^\circ$  gedreht werden. Um die y-Achse auszumessen wird der größere exzentrische Zylinder mit einem Radius von 2.5cm seitlich eingeführt.

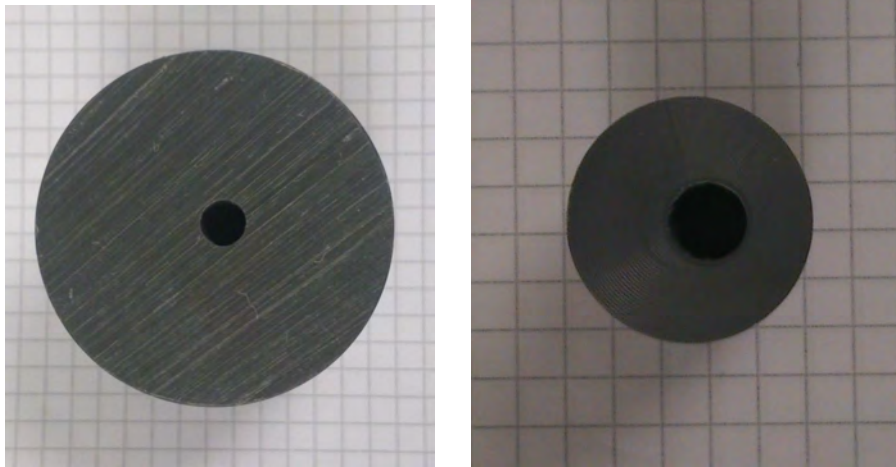


Abbildung 11: Exzentrischer Hohlzylinder zur Ausmessung der y-Achse links und der xz-Achse rechts, des ersten Auslese-Boards

- **II) Auslese-Board 2:** Da der Chip orthogonal angebracht ist, misst man anstatt x und z die x und y-Achse, die z-Achsenkonfiguration entspricht der y-Achsenkonfiguration von Chip 1. Verwendet werden hier aber zentrische Zylinder mit sonst gleichen Abmessungen, da die Halterungsachse im Mittelpunkt des Chips liegt.

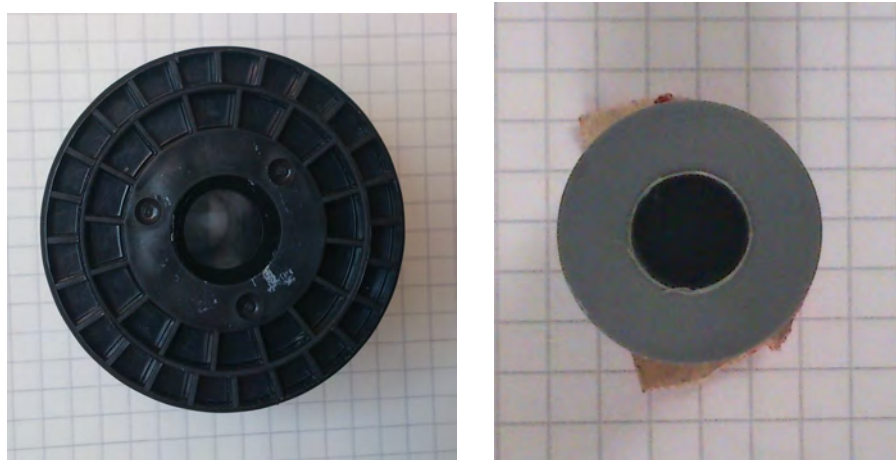


Abbildung 12: Zentrischer Hohlzylinder zur Ausmessung der z-Achse links und der xy-Achse rechts, des zweiten Auslese-Boards

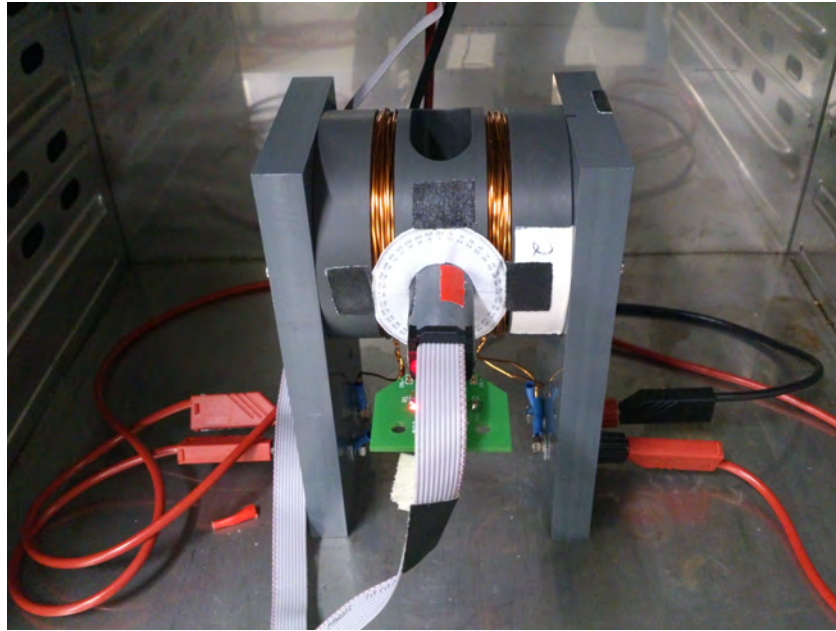


Abbildung 13: Foto des Versuchsaufbaus der Kalibrationsmessungen in der Kälte-Wärme-Testkammer. Drehwinkel können an der Winkelschablone abgelesen werden

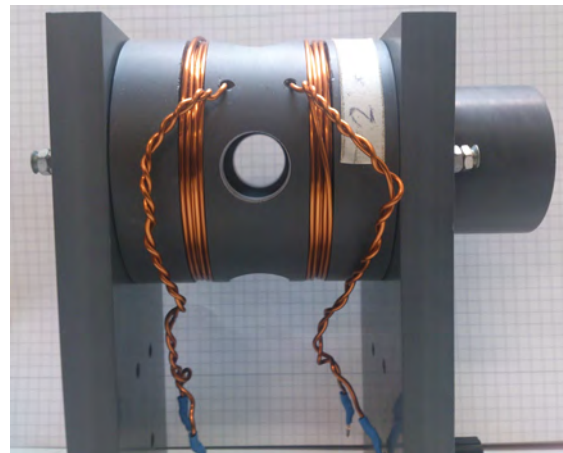
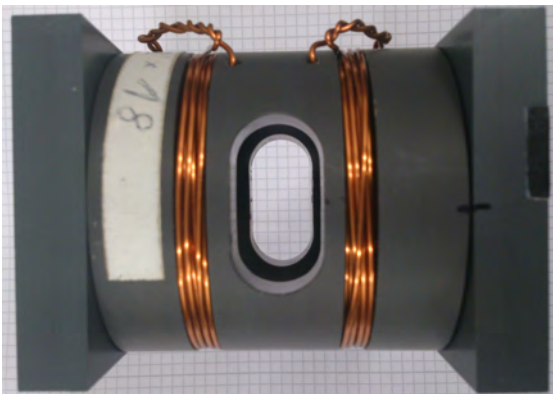


Abbildung 14: Fotos der Aussparungen an der Helmholtz-Spule von oben, links zu sehen und frontal, rechts zu sehen

Begonnen wird die Messung mit dem ersten Auslese-Board, der ersten Helmholtz-Spule und der x-Achse. Zunächst wird der Versuchsaufbau präpariert.

Dazu wird das Auslese-Board in den exzentrischen Hohlzylinder geschoben und mit Klebeband fixiert. Im Anschluss wird der Zylinder in die runde Aussparung frontal so weit hineingeschoben bis der Chipkopf über Augenmaß im Mittelpunkt sitzt.

Dies kann durch 2 Aussparungen und somit 2 Dimensionen kontrolliert werden. Einmal wird von oben auf die Spule geschaut, dann von der Seite.

Die Aussparungen sind symmetrisch um den Mittelpunkt, sodass die Position gut abgeglichen werden kann. Sitzt der Chip im Mittelpunkt, wird ein Klebestreifen um den Zylinder des Chips angebracht, damit dieser nur um eine feste Tiefe hineingeschoben werden kann und die Messung reproduzierbar ist. Die beiden Spulen werden in Reihe verkabelt, damit der gleiche Strom durch beide fließt. Jetzt wird der Aufbau luftdicht im Klimaschrank abgeriegelt.



Anschließend wird die Stärke des Magnetfeldes für jede Achse separat von 0.3A bis 5.1A in 0.3A-Schritten gemessen. Für die zweite Helmholtz-Spule wird in einem Intervall von 0.5A bis 10A in 0.5A-Schritten gemessen.

Durch einmaliges Drehen des Hohlzylinders um  $90^\circ$  wird die y-Achse analog vermessen. Der Winkel kann dabei anhand einer Schablone abgelesen werden. Bei allen Messungen wird mit den Grundeinstellungen der Sensoren gemessen. Mit anderen Worten, es wird mit dem Gainwert 8 ( keine Änderung ), ohne Low-Power-Modus, ohne Low-Crosstalk-Modus gemessen.

### 4.3 Messungen

An dieser Stelle werden nur die Messdaten der ersten Helmholtz-Spule anhand des ersten Auslese-Boards und der x-Achse der Sonde aufgelistet.

Weitere Grafiken befinden sich im Anhang.

Alle Messdaten wurden durch folgende Geradengleichung angepasst:

$$f(x) = a \cdot x + b \quad (10)$$

Der Fitparameter wird mit  $a_{sca}^{zustand}$  bezeichnet. Der Index `sca` bezeichnet hier:

- Spule = {1,2}
- Chip = {1,2}
- Achse = {x,y,z}
- zustand = {alt,neu}

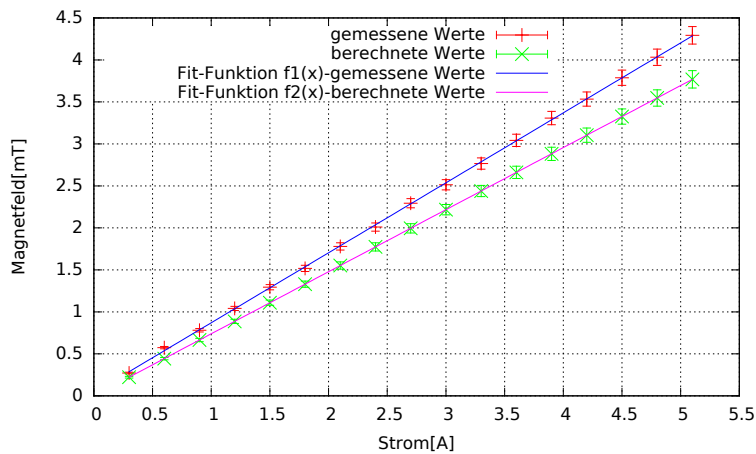


Abbildung 15: Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b     | $\chi^2$ |
|---------------|-------------------|-------|----------|
| f1(x)         | $0.833 \pm 0.005$ | 0.037 | 0.690    |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | 0     | 0        |
| Verhältnis[%] | $1.128 \pm 0.01$  |       |          |

Tabelle 2: Fit-Daten zur Abbildung 15

Die x-Achse weist eine Abweichung von circa  $(12,8 \pm 0.01)\%$  auf, das reduzierte Chi-Quadrat  $\chi^2$  von 0.690 spricht für eine Verteilung der Messwerte, welche weitestgehend der Geradenfunktion entspricht..

Auslese-Board 1, x-Achse mit dem kalibriertem Steigungswert  $a_{11x}^{neu}$

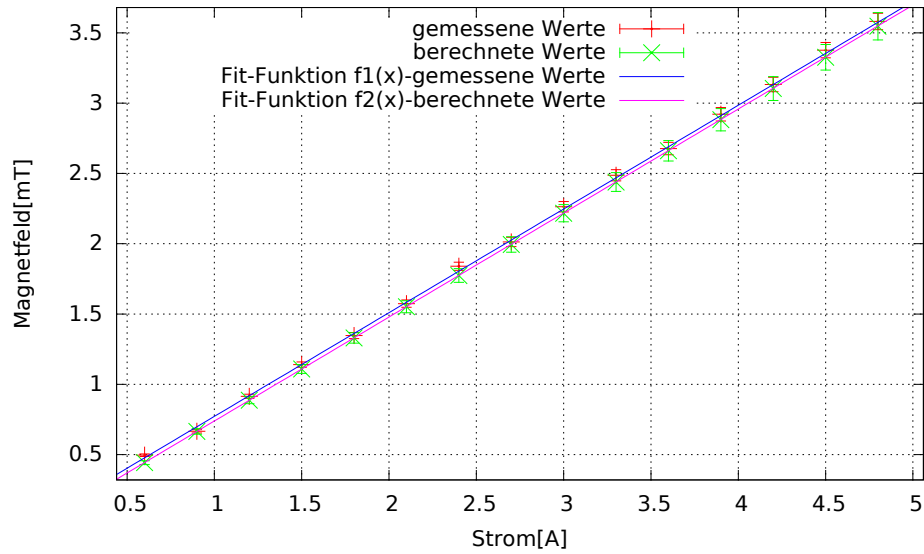


Abbildung 16: Vergleich zwischen der kalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b     | $\chi^2$ |
|---------------|-------------------|-------|----------|
| f1(x)         | $0.737 \pm 0.005$ | 0.034 | 1.133    |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | 0     | 0        |
| Verhältnis[%] | $0.997 \pm 0.001$ |       |          |

Tabelle 3: Fit-Daten zur Abbildung 16

Hier zu sehen ist das der um 12.8% reduzierte  $b_{slope} = 0.004672$  gut deckend mit  $(99.7 \pm 0.1)\%$  im Rahmen der Fehler mit dem theoretischem Verlauf das Magnetfeldes liegt.

## 4.4 Ergebnisse

Alle Ergebnisse werden nur anhand der x-Achse der Sonde diskutiert, weitere Plots befinden sich im Anhang. Zunächst werden die bestimmten Kalibrationswerte beider Auslese-Boards anhand der ersten Spule verglichen. So kann je nach Wahl des Boards die Abweichung bezüglich der Kalibration berücksichtigt werden.

### 4.4.1 Abweichung zwischen Auslese-Board 1 und Auslese-Board 2

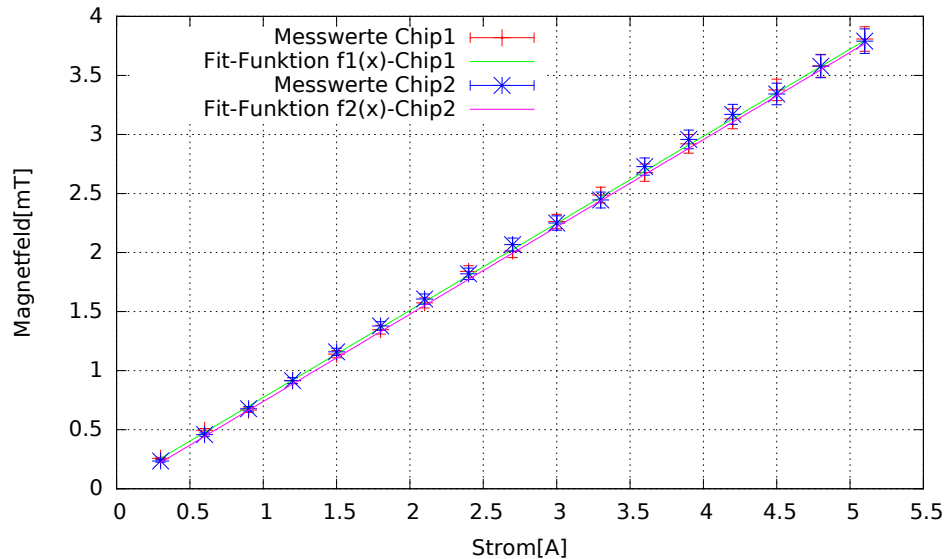


Abbildung 17: Vergleich zwischen der x-Achse des ersten und des zweiten Boards mit der ersten Helmholtz-Spule gemessen

|                 | a                 | b                  | $\chi^2$ |
|-----------------|-------------------|--------------------|----------|
| Chip1: $f_1(x)$ | $0.738 \pm 0.006$ | $0.0345 \pm 0.009$ | 1.134    |
| Chip2: $f_2(x)$ | $0.751 \pm 0.003$ | $0.010 \pm 0.004$  | 0.179    |
| Verhältnis      | $0.982 \pm 0.008$ |                    |          |

Tabelle 4: Fit-Daten der Abbildung 17

Anhand der Tabelle ist zu sehen, dass der Fit des ersten Boards mit dem des zweiten Boards fast nahezu übereinstimmt. Die Abweichung beträgt hier marginale 1.8% zwischen beiden Boards. Das reduzierte  $\chi^2$  fällt hier mit 0.179 etwas kleiner aus. Der Wert für  $\chi^2$  weicht aber in beiden Fällen nicht stark vom Wert 1 ab, sodass auch hier der Zusammenhang einer Geradengleichung erfüllt ist. Es macht also keinen größeren Einfluss welches der beiden Boards verwendet wird, so kann zwischen den Boards je nach Einsatzziel flexibel gewechselt werden.

#### 4.4.2 Abweichung zwischen Helmholtz-Spule 1 und Helmholtz-Spule 2

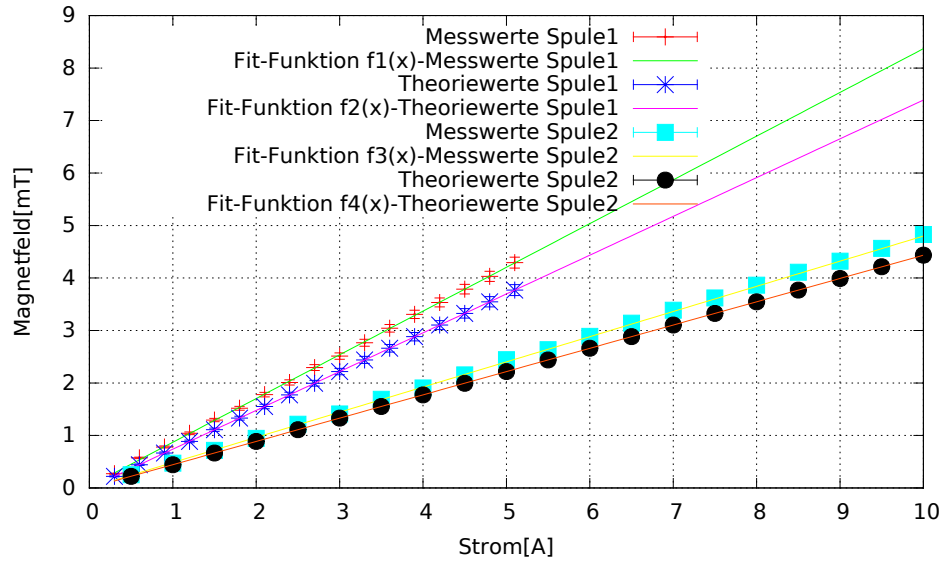


Abbildung 18: Vergleich zwischen der ersten Helmholtz-Spule und der zweiten für das erste Auslese-Board und die x-Achse

|   | a                       | b                                     | $\chi^2$ |
|---|-------------------------|---------------------------------------|----------|
| Spule1: f1(x)                               | $0.833 \pm 0.006$       | $0.037 \pm 0,008$                     | 0.690    |
| Spule1: f2(x)                               | $0.739 \pm 0.001$       | $7 \cdot 10^{-5} \pm 1 \cdot 10^{-4}$ | 0        |
| Abweichung Spule1 [%]                       | $12.71 \pm 0.82$        | -                                     | -        |
| Spule2: f3(x)                               | $0.475 \pm 0.004$       | $0.009 \pm 0.006$                     | 0.447    |
| Spule2: f4(x)                               | $0.443 \pm 0.001$       | $1 \cdot 10^{-4} \pm 1 \cdot 10^{-4}$ | 0        |
| Abweichung Spule2 [%]                       | $7.2 \pm 0.90$          | -                                     | -        |
| Mittelwert der Abweichung [%]               | $9.92 \pm 0.61$         | -                                     | -        |
| $b_{slope}$                                 | 0.004672                | -                                     | -        |
| Korrigiert um den Mittelwert $b_{1x}^{kor}$ | $0.004205 \pm 0.000028$ | -                                     | -        |

Tabelle 5: Fit-Daten der Abbildung 18

Der Vergleich beider Spulen ergibt einen Durchschnittswert in der Abweichung nach dem alle Endwerte berechnet werden. Für die x-Achse und das erste Board ergibt sich für die erste Helmholtz-Spule eine Abweichung ohne Kalibration von  $(12.7 \pm 0.8)\%$ , für die zweite Spule ergibt sich hier  $(7.2 \pm 0.9)\%$ .

Damit ergibt sich der Durchschnittswert von  $(9.9 \pm 0.6)\%$  als Endwert. Die Güte des Fits ist mit einem  $\chi^2$  von 0.690 und 0.447 sehr ähnlich. Der unterschiedliche Wert der Abweichung der Spulen ergibt sich durch verschieden starke Unsicherheiten der beiden Spulen. Die größere Unsicherheit hierbei ist der Unterschied in der Anordnung der Windungen, da beide Spulen von Hand gewickelt wurden. Nach diesem Verfahren wurden für alle Achsen und beide Boards die korrigierten mittleren Kalibrationswerte errechnet.

### 4.4.3 Überblick der korrigierten Werte aller Achsen und beider Auslese-Board-Varianten im Mittel beider Helmholtz-Spulen bei Raumtemperatur

Der um den Mittelwert beider Spulen korrigierte Wert wird mit  $b_{ca}^{kor}$  bezeichnet.

Der Index  $ca$  bezeichnet:

- Chip = {1,2}
- Achse = {x,y,z}

|                         | x                                      | y                                      | z                                      |
|-------------------------|--|--|--|
| Board1: $b_{1a}^{kor}$  | $b_{1x}^{kor} = 0.004205 \pm 0.000028$ | $b_{1y}^{kor} = 0.004207 \pm 0.000013$ | $b_{1z}^{kor} = 0.004706 \pm 0.000020$ |
| mittlere Abweichung [%] | $-9.92 \pm 0.61$                       | $-9.96 \pm 0.27$                       | $+0.72 \pm 0.42$                       |
| Board2: $b_{2a}^{kor}$  | $b_{2x}^{kor} = 0.004037 \pm 0.000021$ | $b_{2y}^{kor} = 0.004080 \pm 0.000015$ | $b_{2z}^{kor} = 0.004647 \pm 0.000024$ |
| mittlere Abweichung [%] | $-13.59 \pm 0.44$                      | $-12.67 \pm 0.32$                      | $-0.54 \pm 0.50$                       |

Tabelle 6: Kalibrationswerte beider Auslese-Board-Varianten und aller Achsen im Mittel beider Helmholtz-Spulen

Als Kernergebnis ergibt sich die Übersichtstabelle 6, die auf den Messungen mit dem Gainwert 8 (keine Änderung), ohne Low-Power-Modus und ohne Low-Crosstalk-Modus basiert. Zu sehen sind hier jeweils die einzustellenden Slope-Werte für jede Achse als Mittelwert beider Spulen. Das Vorzeichen der Abweichung ist hier als Richtung der Korrektur zu verstehen. Negative Werte werden nach unten hin korrigiert, positive Werte nach oben hin.

Es ergibt sich für das erste Auslese-Board und die x-Achse eine mittlere Abweichung vom voreingestellten Wert  $b_{slope} = 0.004672$  von  $(-9.92 \pm 0.61)\%$ . Für die y-Achse ergeben sich sehr ähnliche Werte mit  $(-9.96 \pm 0.27)\%$ . Nur die z-Achse muss um einen sehr kleinen Wert noch oben angepasst werden, dieser liegt bei  $(+0.72 \pm 0.42)\%$ . Beim zweiten Board liegt die x-Achsen-Abweichung bei  $(-13.59 \pm 0.44)\%$ , was eine Abweichung von Board 1 zu Board 2 von  $(3.67 \pm 0.75)\%$  ausmacht. Die y-Achsen-Abweichung liegt mit  $(-12.67 \pm 0.32)\%$  etwas niedriger, verglichen mit dem ersten Board beträgt die Abweichung  $(2.71 \pm 0.42)\%$ . Die z-Achsen-Abweichung fällt wie auch beim ersten Board mit  $(0.54 \pm 0.50)\%$  sehr klein aus, der Vergleich beider Boards ergibt eine Abweichung von  $(1.26 \pm 0.65)\%$ .

Im Verhältnis zu den anderen Achsen ist dieser Korrekturwert kleiner als  $\frac{1}{10}$ . Dies ist auf eine von Werk aus recht passende Vorkalibration der Achse zurückzuführen. Mit den oberen und unteren Grenzen fällt die Abweichung von Board zu Board im gesamten in den Wertebereich von 4.42% bis 0.61%. Da alle Fitwerte der Kalibrationsmessungen im Toleranzbereich der Fehler liegen, kann angenommen werden, dass diese sinnvoll bemessen wurden. Hieraus folgt die Schlussfolgerung, dass sich der realistische Fehlerwert aller Achsen und beider Boards in einem Intervall von  $\pm 0.27\%$  bis  $\pm 0.61\%$  bewegt, was für eine sehr stabile Kalibration spricht.

Die Übersichtstabelle 6 ist das zentrale Ergebnis des ersten Teils der Bachelor-Thesis, der Kalibration und dient als Nachschalgewerk für die zu verwendenden Kalibrationswerte beider Boardvarianten im Mittel beider Spulen bei Raumtemperatur.

## 5 Charakterisierung der Sonde

### 5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden verschiedene Messungen ausgewertet, die das Langzeitstabilitätsverhalten der Sonde prüfen. Darunter eine Langzeitmessung eines konstanten Magnetfeldes über mehrere Tage inklusive Power-Cycle. Doch zuvor werden die zwei Funktionen des Sensors, darunter der Low-Power-Modus, sowie der Low-Crosstalk-Modus auf ihren Einfluss bezüglich der Kalibration analysiert. So kann ein möglicherweise verfälschter Kalibrationswert von den Ergebnissen der Langzeitmessungen differenziert werden. An dieser Stelle muss hinsichtlich der Einstellungen des Sensors während der Messungen drauf hingewiesen werden, dass diese sich nur von den Grundeinstellungen unterscheiden, wenn dies kenntlich gemacht wird. Die Grundeinstellungen sind ein Gainwert von 8, Low-Power-Modus und Low-Crosstalk-Modus durch den Registerwert als inaktiv gekennzeichnet. Als abschließende Messung wird ein konstantes Feld für verschiedene Gain-Werte über ein Temperaturprofil ausgemessen. Laut Hersteller sollen dadurch die Messungen temperaturunabhängig werden.

### 5.2 Messungen/Ergebnisse

#### 5.2.1 Einfluss des Low-Power-Modus und Low-Crosstalk-Modus auf die Kalibration

Gemessen wird hier das Magnetfeld der kalibrierten  $y$ -Achse für die zweite Helmholtz-Spule des zweiten Boards für einen Strom von 3A bis 7A in 0.5A-Schritten. Zunächst nur mit aktivem Crosstalk, im Anschluss mit aktivem Low-Power-Modus und ohne Crosstalk und abschließend mit Crosstalk und Low-Power-Modus. Diese Geraden werden mit der Kalibrationsgeraden der Grundeinstellung verglichen. So kann als Endresultat die Aussage getroffen werden, ob der MagVector2 mit anderen Einstellungen als den Grundeinstellungen neu kalibriert werden muss.

## Messungen

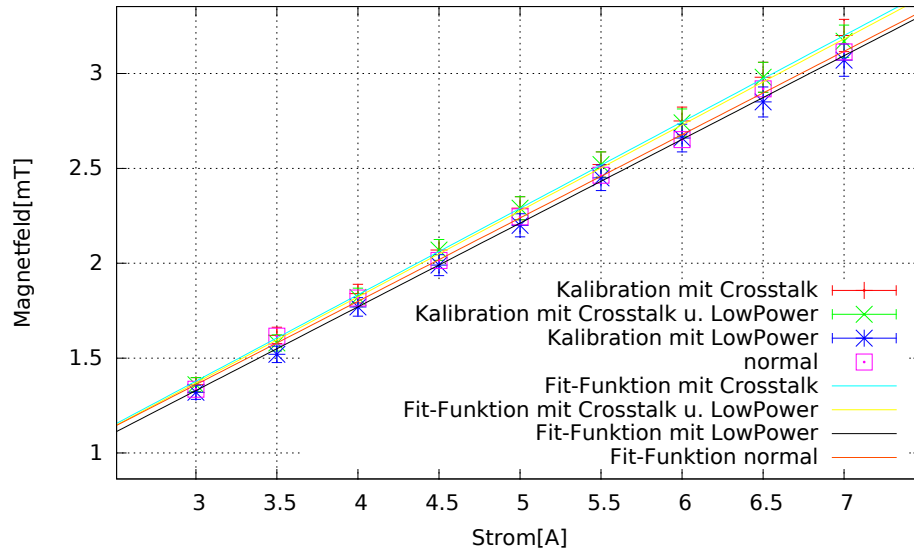


Abbildung 19: Vergleich der Kalibration für die y-Achse, zweites Auslese-Board und zweite Helmholtz-Spule mit Low-Crosstalk-Modus, mit Low-Power-Modus und mit Low-Crosstalk-Modus u. Low-Power-Modus

|  | a                 | b                 | $\sigma$ |
|--|-------------------|-------------------|----------|
| Crosstalk:                                 | $0.455 \pm 0.001$ | $0.013 \pm 0.001$ | 0.066    |
| Crosstalk u. LowP.:                        | $0.453 \pm 0.002$ | $0.010 \pm 0.006$ | 0.646    |
| LowPower:                                  | $0.441 \pm 0.002$ | $0.006 \pm 0.003$ | 0.183    |
| normal:                                    | $0.439 \pm 0.002$ | $0.043 \pm 0.004$ | 0.319    |
| Abweichung Crosstalk von normal [%]        | $3.64 \pm 0.53$   |                   |          |
| Abweichung Crosst. u. LowP. von normal [%] | $3.19 \pm 0.83$   |                   |          |
| Abweichung LowP. von normal [%]            | $0.45 \pm 0.59$   |                   |          |

Tabelle 7: Fit-Werte zur Abbildung 19

## Ergebnisse

Der Low-Crosstalk-Modus weicht mit  $(3,64 \pm 0.002)\%$  am stärksten von der normalen Einstellung ab. Die Streuung des Fits ist mit 0.066 verglichen mit den anderen Fits am niedrigsten. Die Güte des Fits des Low-Crosstalk- kombiniert mit dem Low-Power-Modus ist am schlechtesten mit 0.646. Erklärbar durch geringfügig größere Schwankungen der Messwerte durch die beiden Modi. Wird der Low-Crosstalk-Modus in Kombination mit dem Low-Power-Modus betrachtet beträgt die Abweichung mit  $(3,19 \pm 0.004)\%$  etwas weniger als nur der Crosstalk. Erklärbar ist dieser Effekt durch den geringeren Betriebsstrom des MagVector2 im LowPower-Modus, wodurch der Crosstalk-Modus einen geringeren Einfluss auf die Kalibration hat. Am geringsten fällt die Abweichung beim LowPower-Modus mit nur  $(0,45 \pm 0.003)\%$  aus. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Abweichung in einem Intervall von nur  $-0.14\%$  bis  $+4.17\%$  bewegt und das der MagVector2 für diese Einstellungen nicht neu kalibriert werden muss.



## 5.2.2 Einfluss des Ebenencrosstalks auf die Genauigkeit des Sensors

Zunächst wird der Einfluss des Ebenencrosstalks auf die Genauigkeit des Sensors untersucht. Dazu wird das erste und das zweite Auslese-Board für ein konstantes Feld in Abhängigkeit eines Drehwinkels von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  in  $30^\circ$  Schritten in der  $xz$ -Ebene, bzw. in der  $xy$ -Ebene vermessen. Werte die außerhalb des Fehlerbereiches liegen, können so dem Ebenencrosstalk zugeordnet werden, wodurch es möglich ist, die Größe des Crosstalks abzuschätzen. Verwendet wird die zweite Helmholtz-Spule mit den zugehörigen Kalibrationswerten, da bei Verwenden des Mittelwertes der Kalibration aus beiden Spulen die Spulenabweichung mit hineinfallen würde. Für den Strom  $I$  werden  $2,2\text{A}$  gewählt, was einem theoretischem Magnetfeld von  $0.975\text{mT}$  entspricht.

### Messungen

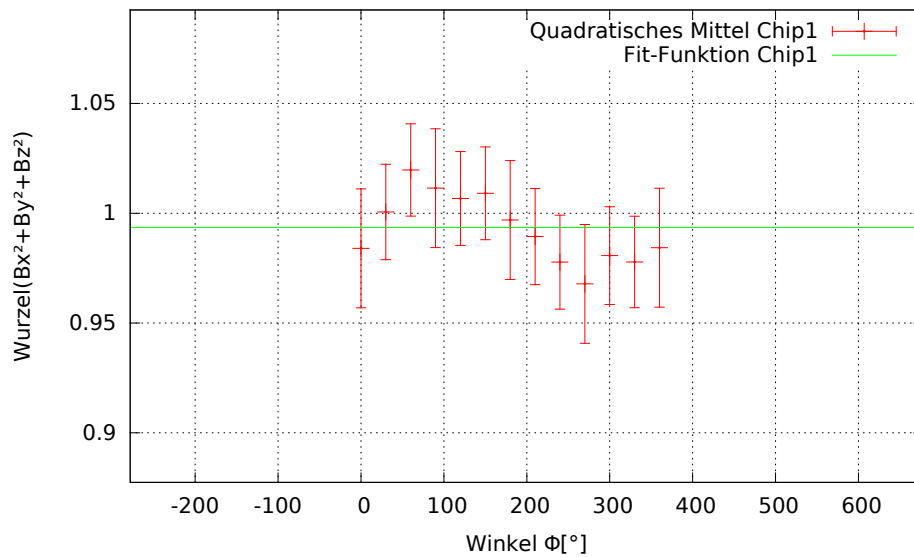


Abbildung 20: Quadratisches Mittel über alle Achsen vom ersten Auslese-Board in Abhängigkeit des Winkels in der  $xz$ -Ebene

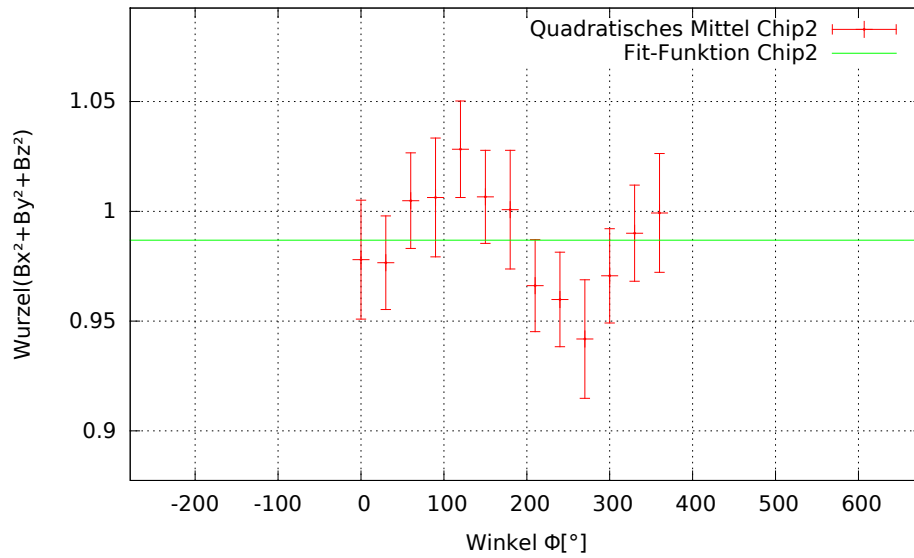


Abbildung 21: Quadratisches Mittel über alle Achsen vom zweiten Auslese-Board in Abhängigkeit des Winkels in der xy-Ebene

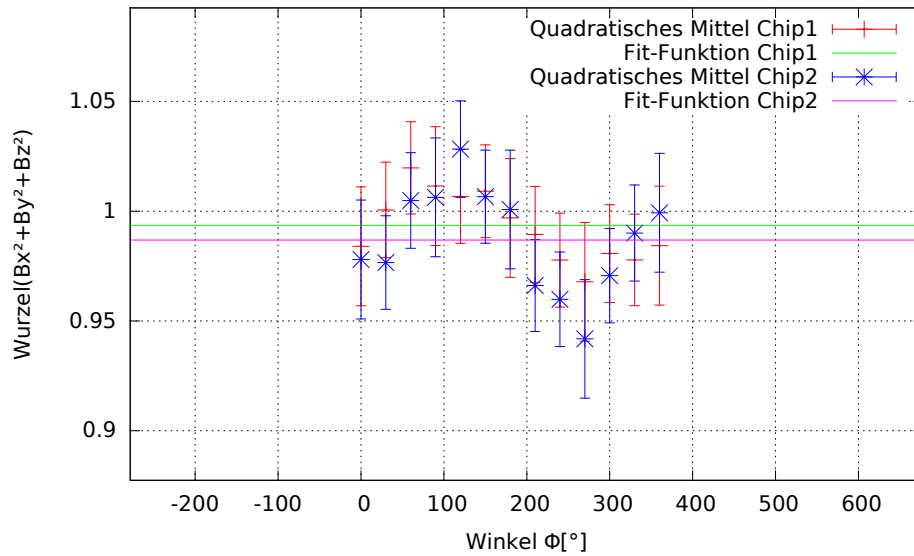


Abbildung 22: Vergleich der Werte des quadratischen Mittels beider Boards in Abhängigkeit des Drehwinkels

|                               | $\sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)} [\text{mT}]$ | $\sigma$ |
|-------------------------------|--|----------|
| Auslese-Board 1               | $0.993 \pm 0.004$                            | 0.472    |
| Auslese-Board 2               | $0.986 \pm 0.007$                            | 1.029    |
| Sollwert [mT]                 | 0.975  |          |
| Abweichung Chip1 [mT]         | $0.018 \pm 0.004$                            |          |
| Abweichung Chip2 [mT]         | $0.011 \pm 0.007$                            |          |
| Abweichung Chip1 zu Chip2 [%] | $0.71 \pm 0.82$                              |          |

Tabelle 8: Fitwerte Zur Abbildung 23

## Ergebnisse

Der Fit des quadratischen Mittels über den kompletten Winkelbereich liegt für das erste Board bei  $(0,993 \pm 0,004)$ mT. Bemessen am Sollwert von 0.975mT ergibt sich eine Abweichung von  $(0,018 \pm 0,004)$ mT für die xz-Achse. Für das zweite Auslese-Board ergibt sich eine Abweichung von  $(0,011 \pm 0,007)$ mT für die xy-Achse. Diese Abweichungen sind auf den Ebenencrosstalk zurückzuführen. Der Fit-Wert  $\sigma$  fällt für das erste Board etwas kleiner aus. Dies ist bei betrachten des Plots auf eine kleinere Streuung der Messwerte zurückzuführen. Board 1 und Board 2 weichen nur um etwa  $(0,71 \pm 0,80)\%$  ab. Hier fällt auf, dass der Fehler größer ist als der Messwert. Erklärbar ist dies durch die sehr geringe Abweichung des quadratischen Mittels zwischen Board 1 und Board 2. Als Endergebnis dieses Kapitels kann gesagt werden, dass der Ebenencrosstalk in einem Größenbereich von  $\frac{1}{100}$ mT liegt.

### 5.2.3 Einfluss des Low-Crosstalk-Modus auf das Ebenen-Rauschen

Untersucht wird hier im genaueren der Einfluss des Low-Crosstalk-Modus auf das ebenenübergreifende Rauschen. Wird der Modus aktiviert, sollte das quadratische Mittel über alle Achsen in seiner Größe leicht abfallen, da so Werte die von einer Achse auf die andere überspringen, reduziert werden sollen. Gemessen wird mit dem zweiten Auslese-Board und der zweiten Helmholtz-Spule bei einer Winkeleinstellung von 45° zunächst ohne Crosstalk-Modus und dann mit, sodass die Werte gleichermaßen auf die xy-Achse aufgeteilt werden, bei einem konstantem Strom von 3A, was einem berechnetem Feld von 1.33mT entspricht. Gemessen wird dieses über 10 Minuten mit 120 Einträgen. Umgerechnet wird die Feldstärke alle 5 Sekunden gemessen. Für jeden Messpunkt wird das quadratische Mittel errechnet und die Häufigkeiten werden dargestellt, um so eine Änderung des relevanten Wertes zu beobachten.

#### Messungen

Der Fit wird mit folgender Gaus-Funktion erstellt:

$$G(x) = \frac{a}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (11)$$

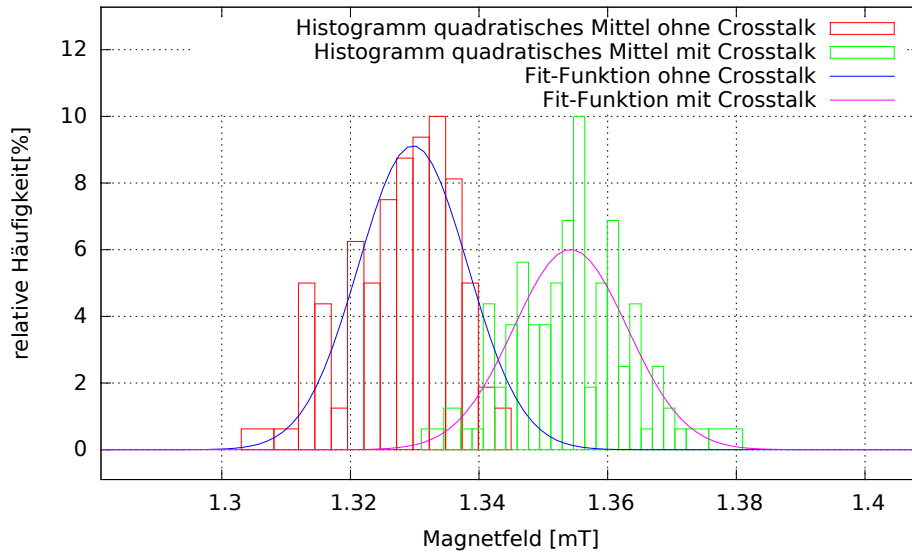


Abbildung 23: Verteilung der Messwerte des quadratischen Mittels der xy-Ebene bei 45° mit Low-Crosstalk-Modus und ohne

|                | a             | $\sigma$      | $\mu$         |
|----------------|---------------|---------------|---------------|
| ohne Crosstalk | 0.1941±0.0210 | 0.0085±0.0010 | 1.3297±0.0009 |
| mit Crosstalk  | 0.1337±0.0156 | 0.0089±0.0012 | 1.3542±0.0011 |
| Abweichung [%] |               |               |               |

Tabelle 9: Fitwerte der Abbildung 23

## Ergebnisse

Hingegen der Erwartung reduziert sich das quadratische Mittel nicht, sondern es steigt von  $\mu_1 = 1.329\text{mT}$  auf  $\mu_2 = 1.3542\text{mT}$  an.

Die Streuung  $\sigma$  unterscheidet sich nur in der fünften Nachkommastelle, ist also näherungsweise gleich geblieben. Der Anstieg des Wertes des quadratischen Mittels kann auf einen Fehler im Sensor hindeuten, da der Registerwert des Low-Crosstalk-Modus möglicherweise invertiert ist, sodass der Modus dauerhaft aktiv ist und erst deaktiviert wird, wenn der Registerwert auf aktiviert steht.

### 5.2.4 Langzeitstabilität

Um den MagVector2 bezüglich seiner Langzeitstabilität inklusive Power-Cycle bewerten zu können wird bei einem Strom von 3A ein konstantes Feld von 1.33mT über circa 3 Tage aufgeteilt in 260 Messpunkte vermessen. Umgerechnet wurde alle 1000 Sekunden ein Messwert erhoben. Gemessen wird mit der y-Achse des zweiten Boards.

Die Winkeleinstellung beträgt  $0^\circ$ . Im Anschluss wurde die gleiche Messung nach Ein- und Ausschalten des MagVector 2 mit gleichen Einstellungen erneut vorgenommen. Als Kernaussage kann durch diese Messungen gesagt werden, ob der MagVector2 auch bei längerem Gebrauch zuverlässig arbeitet.

## Messungen

Die Messergebnisse wurden wie zuvor mit der Gauß-Formel 11 gefittet.

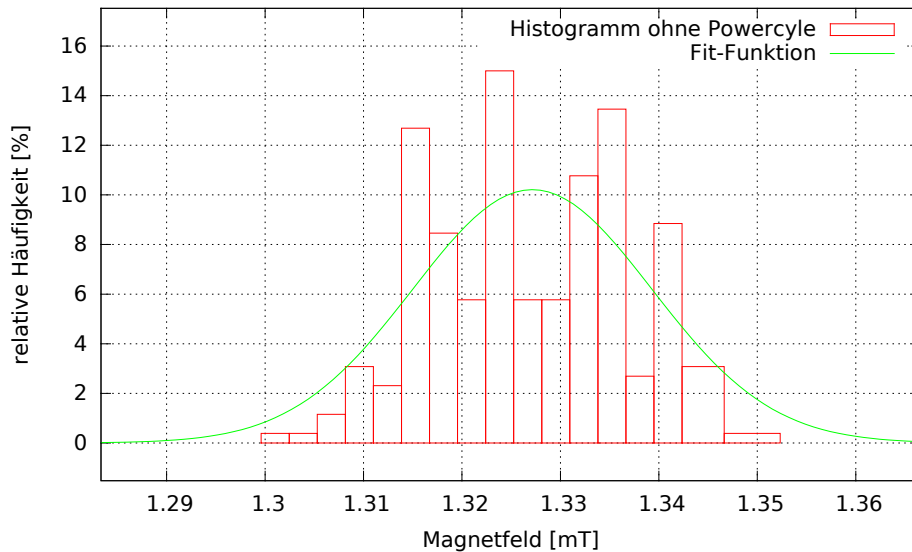


Abbildung 24: Verteilung der Messwerte der y-Achse des zweiten Boards bei circa 3 Tagen Messzeit mit 260 Einträgen bei festem Magnetfeldwert von 1.33mT

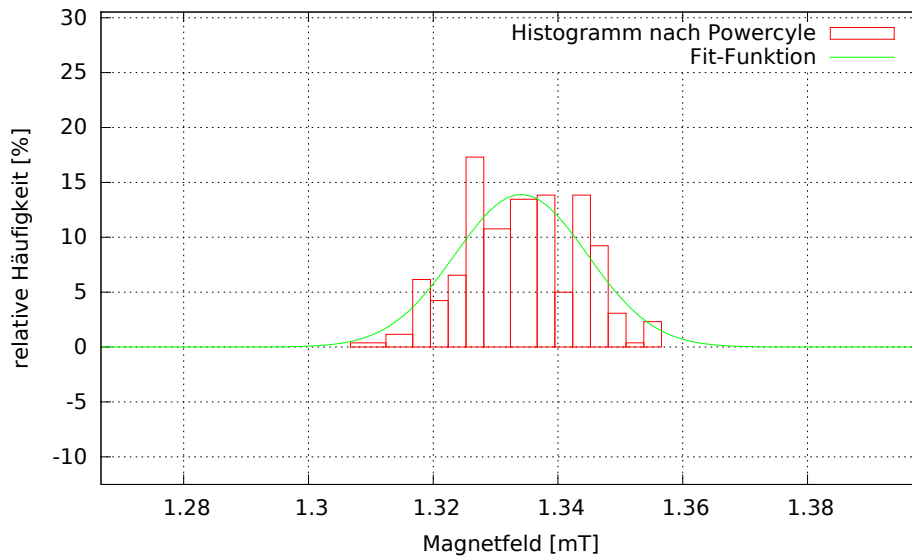


Abbildung 25: Verteilung der Messwerte der y-Achse des zweiten Boards bei circa 3 Tagen Messzeit mit 260 Einträgen bei festem Magnetfeldwert von 1.33mT und Power-Cycle

|  | $a$                 | $\sigma$            | $\mu$               |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| ohne Power-Cycle                       | $0.3112 \pm 0.0544$ | $0.0122 \pm 0.0026$ | $1.3271 \pm 0.0024$ |
| mit Power-Cycle                        | $0.3697 \pm 0.0522$ | $0.0106 \pm 0.0019$ | $1.3341 \pm 0.0016$ |
| Abweichung ohne und mit Power-Cycle[%] | $+15.82 \pm 18.92$  | $-14.59 \pm 32.25$  | $+2.89 \pm 2.16$    |

Tabelle 10: Fit-Daten zur Abbildung 25 u. 26

## Ergebnisse

Werden die Fit-Daten miteinander verglichen fällt sofort auf, dass der Mittelwert  $\mu$  mit einer Differenz von  $(+2.89 \pm 2.16)\%$  leicht gewachsen ist, sich im Grunde aber kaum unterscheidet. Die Streuung  $\sigma$  mit  $(-14.59 \pm 32.25)\%$  dagegen hat abgenommen. Beide unterscheiden sich um circa 15%, zudem sind die prozentualen Fehlerwerte von  $\sigma$  im Verhältnis zum eigentlichen Wert um einiges größer als es bei  $\mu$  der Fall ist. Im Rahmen der Größe der Einzelfehler ist dies aber verständlich. Gesagt werden kann, dass die Streuung nach dem Power-Cycle definitiv wie im Plot zu sehen etwas abgenommen hat, allerdings ist der Mittelwert  $\mu$  beider Messungen auf  $\frac{1}{100}$ mT stabil. Daher kann hier kein negativer Einfluss eines Power-Cycles im Rahmen des Langzeitgebrauchs festgestellt werden.

### 5.2.5 Temperatur-Kompensation

Die Funktion des Gain-Parameters hat das Ziel die Temperatur-Abhängigkeit der Messwerte automatisch zu kompensieren. Gemessen wird die x-Achse des zweiten Boards mit der zweiten Helmholtz-Spule bei einem festem Stromwert von 3A und einem daraus resultierendem Feldwert von 1.33mT für ein Temperaturprofil von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}\text{C}$  für den Gain 0, 8, 15. Der Winkel beträgt hierbei  $0^{\circ}$ . Eine zweite Messung für einen Permanentmagneten im Bereich von 105mT bis 115mT wurde durchgeführt.

Da die Messung aller Gainwerte einen zu großen Zeitaufwand zur Folge hätte, wurden daher die Randwerte 0, 15 und der mittlere Bereich vermessen. Dadurch können Tendenzen bestmöglich erkannt werden, bzw. kann die Funktion des Chips auf Funktionalität überprüft werden.

#### Messungen

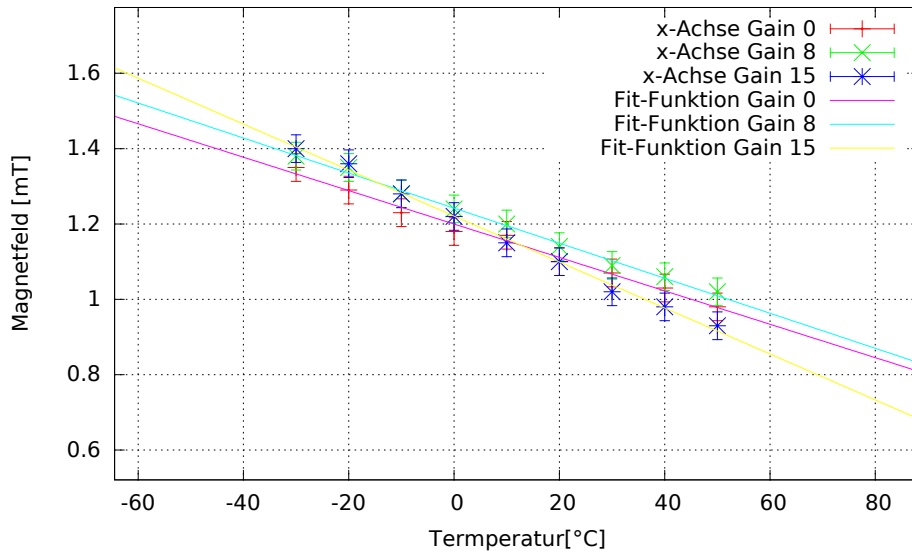


Abbildung 26: Messung des Magnetfeldes bei konstantem Feld von 1.33mT unter Einfluss eines Temperaturprofils von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}$  für den Gain 0,8,15

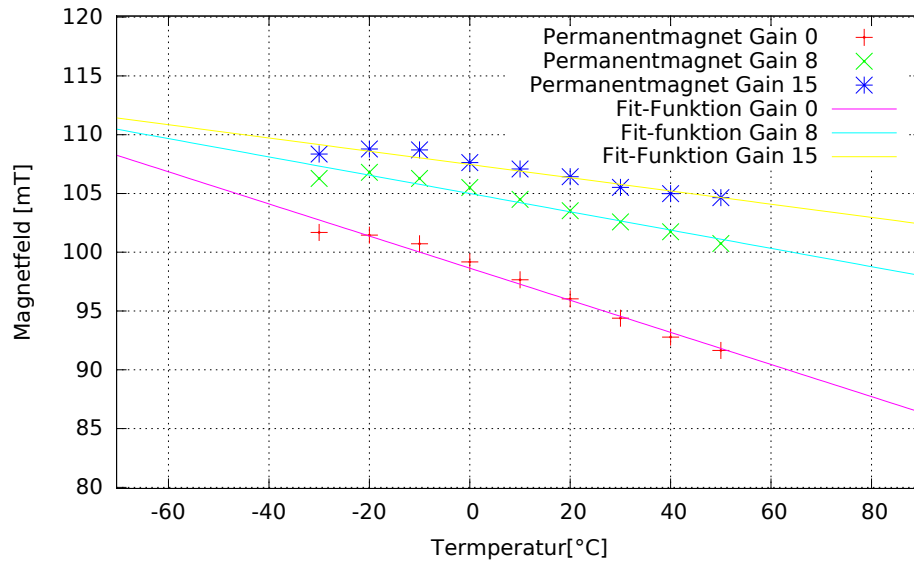


Abbildung 27: Messung des Magnetfeldes bei konstantem Feld eines Permanentmagneten von circa 110mT unter Einfluss eines Temperaturprofils von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}$  für den Gain 0,8,15

|                      | $a$                    | $\sigma$ |
|----------------------|------------------------|----------|
| Gain 0 kleines Feld  | $-0.00443 \pm 0.00018$ | 0.137    |
| Gain 0 großes Feld   | $-0.13654 \pm 0.00737$ | 0.326    |
| Gain 8 kleines Feld  | $-0.00465 \pm 0.00013$ | 0.073    |
| Gain 8 großes Feld   | $-0.07777 \pm 0.00678$ | 0.276    |
| Gain 15 kleines Feld | $-0.00610 \pm 0.00015$ | 0.099    |
| Gain 15 großes Feld  | $-0.05628 \pm 0.00561$ | 0.189    |

Tabelle 11: Fit-Werte zur Abbildung 27 und 28 für ein kleines bzw. großes Feld

## Ergebnisse

Bei einem kleinen Magnetfeld ist keine ausreichende Temperaturkompensation festzustellen. Am geringsten wird das Feld bei der Gain-Einstellung 0 vom Temperaturprofil beeinflusst, allerdings ist der Wert mit  $(-0.00443 \pm 0.00018) \frac{\text{mT}}{\text{K}}$  immer noch unzureichend, wie im Plot zu erkennen. Bei optimaler Kompensation sollte im idealisierten Fall eine Parallele zur Temperatur-Achse vorliegen. Da die Temperaturkompensation bei einem derart kleinen Magnetfeld von 1.33mT möglicherweise nicht greift, wird eine zweite Messung mit einem Permanentmagneten im Bereich von 105mT bis 115mT ausgewertet. Hier fällt eine umgekehrte Tendenz auf. Die beste Kompensation liegt bei einem Gain-Wert von 15 mit  $(-0.00610 \pm 0.00015) \frac{\text{mT}}{\text{K}}$  vor. Aber auch hier ist die Korrektur der Messwerte unzureichend. Schlussfolgernd ist der Korrekturbereich viel zu klein und es liegt hier ein Defizit des Mag-Vector2 vor. Die Sonde sollte daher mit den Grundeinstellungen, mit dem Gain-Wert 8 verwendet werden. Um möglichst Temperaturunabhängig messen zu können, ist es aber dennoch möglich den Sensor offline zu korrigieren.



## 6 Ortsaufgelöste Magnetfeldmessungen

### 6.1 Einleitung

In Folge der hohen magnetischen Streufelder in der Nähe der Photomultiplier-Ebene im Größenbereich von bis zu 30mT, ist es unverzichtbar Abschirmmaßnahmen zu ergreifen, um diese Felder auf einen toleranten Bereich von 1-2mT zu reduzieren. Neben einer makroskopischen Eisen-Abschirmbox, steht die Frage bezüglich der zusätzlichen Abschirmung jedes einzelnen PMT's durch eine Mu-Metall-Ummantelung offen. Nach den Ergebnissen der Kalibration und der Charakterisierung der MagVector2-Sonde sollen hier erste Messungen gezeigt werden, um die Effektivität einer derartigen Einzel-Abschirmung abzuschätzen.

Aus diesem Grund wird die Sonde samt erstem Ausleseboard an einen XY-Positioniertisch gekoppelt, sodass das Magnetfeld in der Ebene vor der PMT-Glasebene gemessen werden kann. An dieser Stelle wird drauf hingewiesen, dass der Fokus der Thesis auf der MagVector2-Sonde und der Fragestellung, ob diese für die geplanten Feldmessungen beim CBM-Experiment tauglich ist, liegt. Die Auswertung der ersten Abschirmungsmessungen liefert als Ergebnis nur grobe Tendenzen.

## 6.2 Mu-Metall-Varianten

Mu-Metall, eine Nickel-Eisen-Legierung (circa 70-81% Nickel) hat die Eigenschaft hoher magnetischer Permeabilität, wodurch äußere Feldlinien in Richtung des Materials gezogen werden. Dadurch kann eine Abschirmung im Inneren Bereich einer Mu-Metall-Ummantelung erreicht werden. Für die Abschirmungsmessungen werden zwei verschiedene Konstruktionen verwendet. Bei beiden Bauformen ist es möglich das durch die Verformung des Mu-Metalls Gitterfehler im Material entstehen, die zu einer abfallen Permeabilität führen können. Um diese Problematik zu lösen, kann das Blech nach der Verformung ausgeglüht werden. Im Rahmen der Thesis wurde das Metall nicht nachbearbeitet.

### Zwei rechtwinklig gebogene Bleche (1)

Die erste Mu-Metall-Variante besteht aus zwei rechtwinklig gebogenen 0.8mm dicken Blechen die durch einen durchsichtigen dünnen Klebestreifen über die äußere Fläche verbunden werden.

### Vier ineinandergesteckte Bleche (2)

Die zweite Mu-Metall-Variante besteht aus vier ebenfalls 0.8mm dicken ineinandergesteckten Mu-Metall-Blechen. Ineinandergesteckt werden können diese über jeweils 2 Einschnitte mit der Tiefe der halben Breite in jedem der Bleche an den äußeren Rändern.

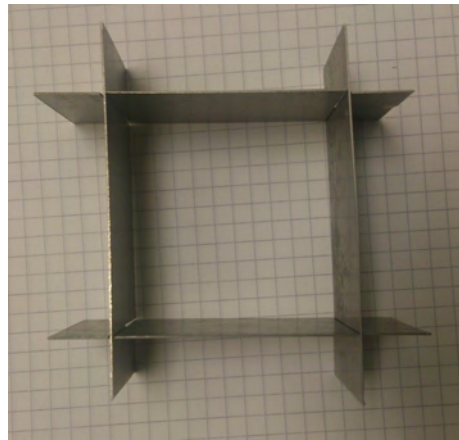
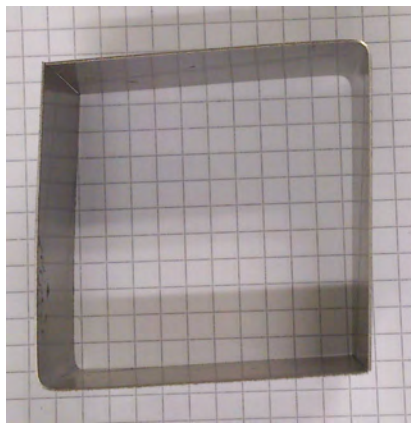


Abbildung 28: Links (1) zwei rechtwinklig gebogene Bleche mit durchsichtigem dünnen Kleband verbunden. Rechts (2) 4 ineinandergesteckte Einzelbleche

**Vorteile beider Bauformen:**

Bei der ersten Konstruktion besteht der Vorteil, dass jeder PMT einzeln durch das Metall ummantelt wird. Das sollte zu einer stabileren, konstanten Abschirmung führen.

Die zweite Konstruktion kann besser auf ganze Gruppen von PMT's angewendet werden, da so eine größere Gitterform erstellt werden kann. Diese ist im Gegenzug aber nicht an jedes PMT separat angepasst. Darüber hinaus schließen beide Bauformen mit der PMT-Glasfläche bündig ab.

## 6.3 Versuchsaufbau

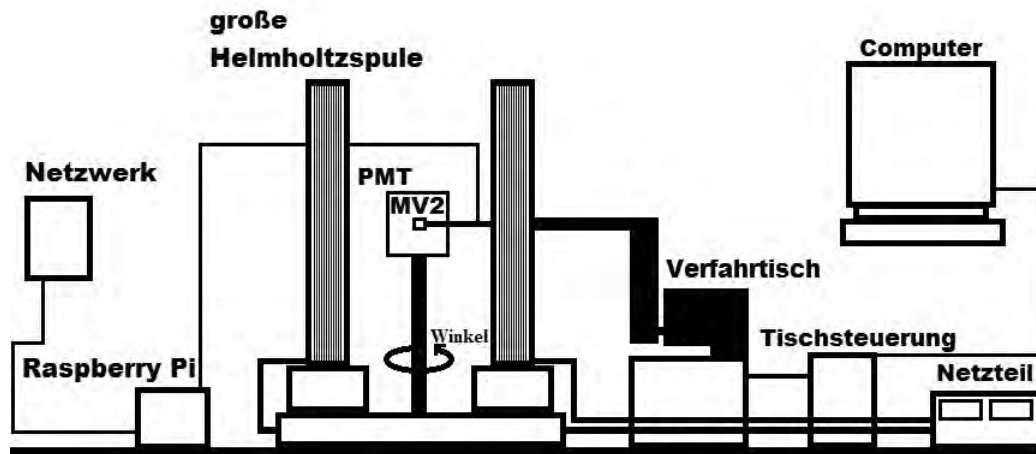


Abbildung 29: Skizze des Versuchsaufbaus der Abschirmungsmessungen, bestehend aus allen wichtigen Komponenten des Versuchs

Zunächst wird der Mittelpunkt der Bodenplatte durch Diagonallinien ausgemessen und das Spulenpaar wird fixiert. Ab hier ist zu erwähnen, dass die Bauteile, die die Halterungen der beiden Mu-Metall-Versionen betreffen durch einem 3D-Drucker hergestellt wurden. Dann wird der Halterungsfuß verschraubt, in die das Kunststoffrohr der Halterung hineingesetzt wird. Die Bodenhalterung besitzt Kerben die in  $45^\circ$  Abständen am Außenrand angeordnet sind. So kann die PMT-Halterung um einen Winkelwert gedreht werden, sodass nicht die Spulen gedreht werden müssen, um verschiedene Streufelder zu simulieren. Es wurden zwei verschiedene Halterungen gebaut, da auch 2 verschiedene Mu-Metall-Konstruktionen vermessen werden. Beide Halterungen sind so geschaffen, dass die Oberfläche des PMT's im Mittelpunkt der Spulen sitzt. Zudem wurde ein Kunststoffrahmen mit den entsprechenden Maßen der Mu-Metall-Konstruktion für Messungen ohne Abschirmung hergestellt, welcher ersatzweise für das Abschirmmetall um den PMT gestülpt werden kann, damit dieser beim Einspannen in die Halterung an gleicher Position sitzt. Der MagVector2 wird an den Verfahrtisch angebracht. Dieser kann dann je nach Winkel des PMT's von außen in das Feld so hineingeschoben und fixiert werden, dass der MV2 die Ebene vor dem PMT mit gewünschtem Abstand abrastern kann. Eine Liste der wichtigsten Komponenten des Aufbaus befindet sich im Anhang.

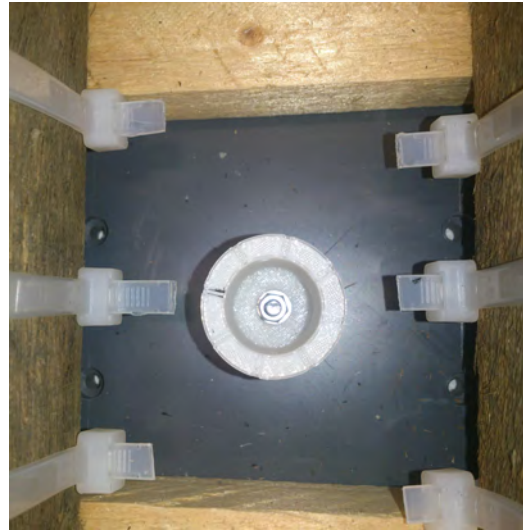
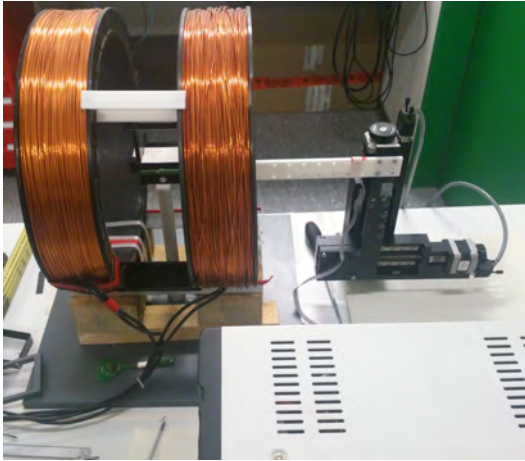


Abbildung 30: Links der Versuchsaufbau in der 90°-Stellung, Winkel können durch eine Drehung am Halterungsarm eingestellt werden. Rechts die Kerben in 45° Abständen im Halterungsfuß zur Winkeleinstellung zu sehen.

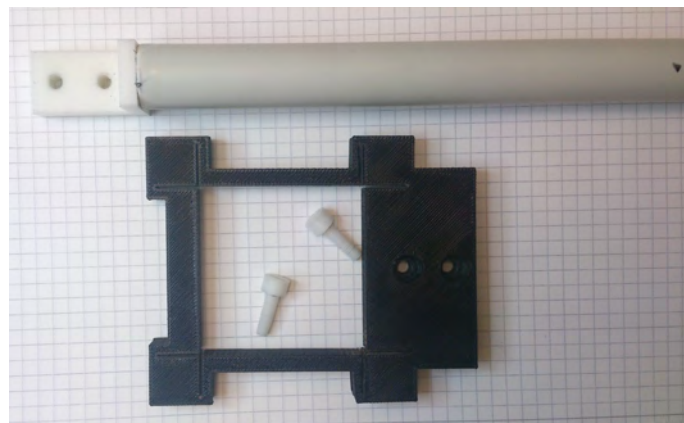


Abbildung 31: Vergleich beider Halterungen für die zwei Mu-Metall-Konstruktionen. Im unteren Bild ist zu sehen, dass das zweite Mu-Metall nicht wie das erste durch eine seitliche Schraube verschraubt wird, sondern in die Aussparung hineingeschoben wird.

## 6.4 Messungen

Um die Histogramme der Messdaten deuten zu können sind folgende Informationen wichtig:

- Die x-Achse des Histogramms entspricht dem Ort des Scanarms in horizontaler Richtung, die y-Achse entspricht dem vertikalem Verlauf.
- Jeder Datenpunkt in der Ebene enthält einen zugeordneten Magnetfeldwert.
- Unterschiede in der Feldstärke werden durch unterschiedliche Farben bzw. Farbstärken gekennzeichnet.
- Abzulesen an der rechtsbündig befindlichen Legende eines jeden Plots.
- Der Wert der Legende ist einheitenlos, da nur Verhältnisse aufgetragen werden.
- Da die Hauptkomponente den größten Anteil am Magnetfeld besitzt, unterscheidet sich das Histogramm des quadratischen Mittels aller Achsen nur geringfügig vom Histogramm der Hauptkomponente.

Alle ersten Abschirmungsmessungen können in 3 grundlegende Messungen unterteilt werden, worauf die Auswertung basiert.

### 6.4.1 (1) Die Untersuchung des Effektes der Mu-Metall-Abschirmung in der Ebene vor dem PMT als Funktion des Abstandes

Gemessen wird die Stärke des Mu-Metall-Effektes in Abhängigkeit des Abstandes, um hierdurch eine genauere Aussage bezüglich der Reichweite des Abschirmungseffektes machen zu können. Dazu wird bei 1.7mm, 3.4mm und 10mm Abstand jeweils einmal nur mit PMT und einmal mit PMT und der jeweiligen Mu-Metall-Konfiguration das Magnetfeld in der gesamten Fläche gemessen. Anschließend werden die Verhältnisse für die Hauptkomponente und für das quadratische Mittel aus allen Achsen bestehend aufgetragen.

Durchgeführt wird dies für zwei Winkeleinstellungen. Bei  $0^\circ$  verläuft die Glasfläche des PMT's parallel zur Fläche, die die beiden Spulen der Helmholtz-Spule einnehmen. Bei  $90^\circ$  verläuft die Fläche orthogonal zur Spulenfläche. Mit anderen Worten, trifft die Hauptkomponente des B-Felds bei  $0^\circ$  orthogonal auf die Glasfläche, bzw. verlaufen die Feldlinien längs des Mu-Metalls, währenddessen die Feldlinien bei  $90^\circ$  längs der Glasfläche, bzw. orthogonal auf die Fläche des Mu-Metalls treffen. Zum Verständnis kann die Abbildung 30 betrachtet werden.

Um den Abstand zwischen Sensor und PMT-Glasfläche zu ändern, wird die Position der großen Helmholtz-Spule und des XY-Tisches angepasst. Die Abstände 1.7mm und 3.4mm wurden durch zwei Kunststoffplättchen die genau der Wanddicke 1.7mm entsprechen, ausgemessen. Der 10mm Abstand wurde durch einen Zollstock bestimmt. In der Software wird eine Auflösung von 50x50 Datenpunkten eingestellt, wodurch eine Messdauer von circa 2 Stunden anfällt.

Für den Stromwert der Spule wird 1A eingestellt, woraus eine Feldstärke von circa 4mT resultiert. Wärmeabhängige Stromschwankungen wurden während der Messung keine beobachtet, was verständlich ist, da ein Strom von 1A für eine solch große Spule keine große Belastung darstellt. Hier werden nur die  $0^\circ$  Messungen für beide Mu-Metall-Versionen exemplarisch aufgelistet. Die  $90^\circ$  Messungen sind im Anhang zu finden.

## Die erste Mu-Metall-Konfiguration bei 0 °

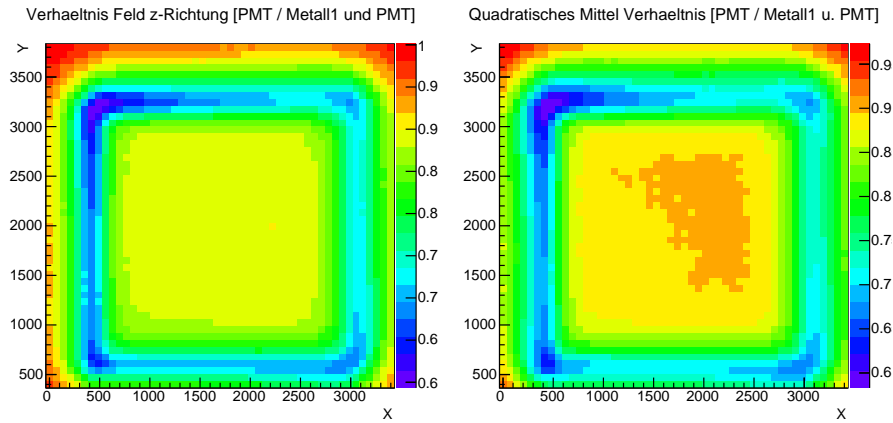


Abbildung 32: Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 1.7mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der ersten Mu-Metall-Konstruktion.

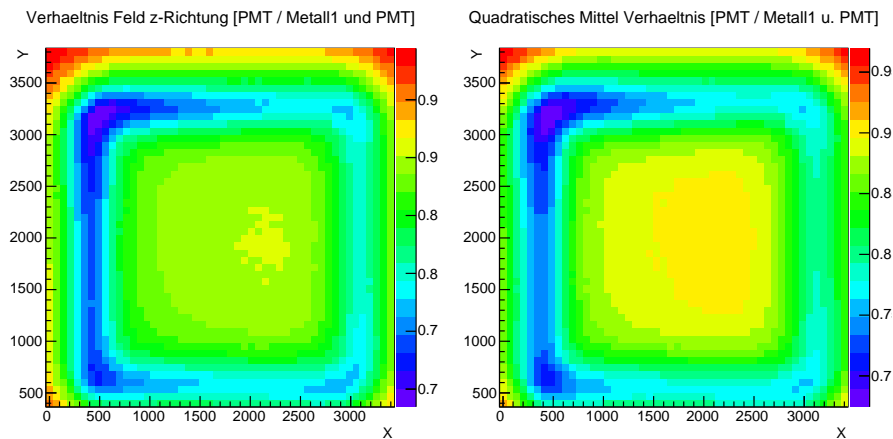


Abbildung 33: Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 3.4mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der ersten Mu-Metall-Konstruktion.

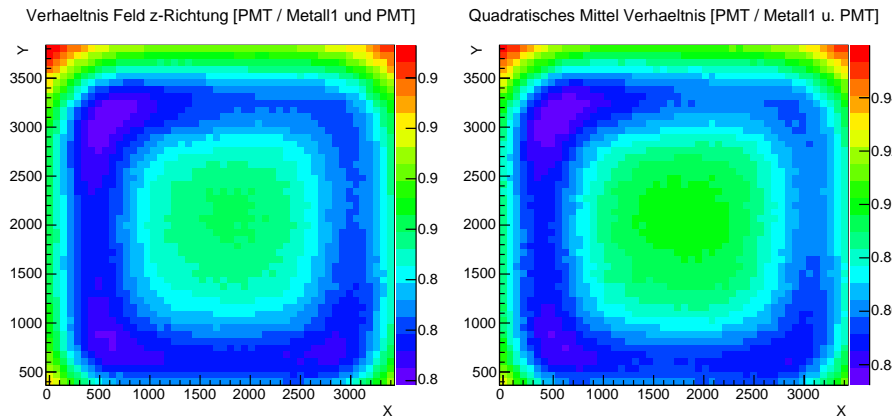


Abbildung 34: Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 10mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der ersten Mu-Metall-Konstruktion.

### Die zweite Mu-Metall-Konfiguration bei 0°

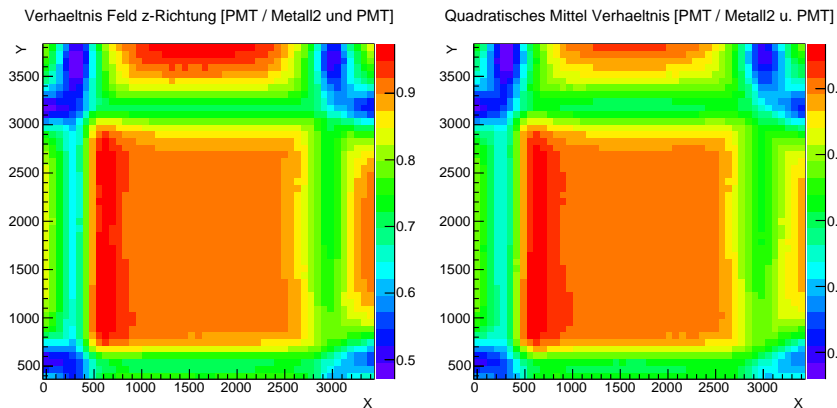


Abbildung 35: Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 1.7mm Abstand zur Glasfläche und der zweiten Mu-Metall-Konstruktion.



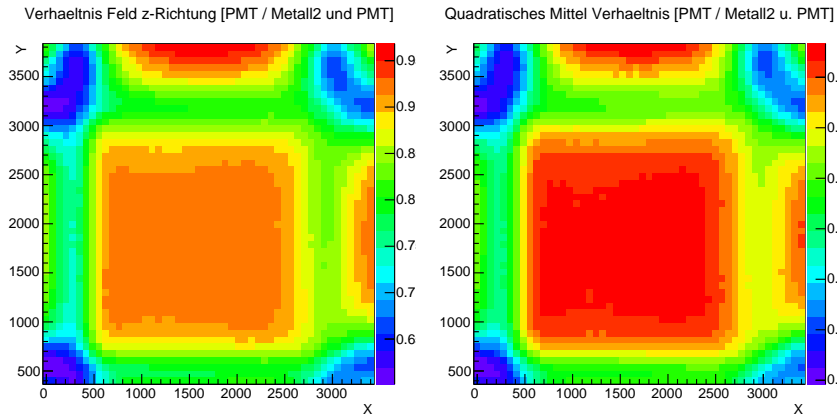


Abbildung 36: Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 3.4mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der zweiten Mu-Metall-Konstruktion.

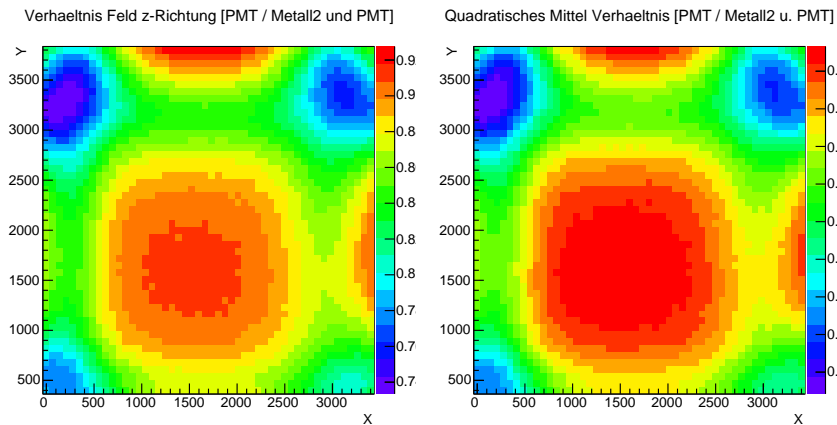


Abbildung 37: Links das Histogramm vom Verhältnis ohne Abschirmung und mit Abschirmung der Hauptkomponente des B-Feldes. Rechts das Histogramm des Verhältnisses vom quadratischen Mittel aller Achsen. Gemessen bei 10mm Abstand zur Glasfläche, einem Strom von 1A und der zweiten Mu-Metall-Konstruktion.

### 6.4.2 (2) Die Abschirmungseffektivität in Abhängigkeit der Stromstärke, bzw. Feldstärke

Da zu hohe Felder einen Sättigungseffekt im Mu-Metall auslösen können, wird der Abschirmeffekt bei zwei weiteren Stromstärken 0.8A und 0.4A in der gesamten Ebene vermessen. Respektive 3.2mT und 1.6mT als Feldwert. Die zuvor eingestellte Stromstärke betrug 1A bzw. entsprach die Feldgröße 4mT. Falls kein Sättigungseffekt auftritt, sollte bei Betrachten des Verhältnisses von 0.8A zu 0.4A ein linearer Verlauf zu erkennen sein. Ab hier wurde die Auflösung auf 10x10 Datenpunkte reduziert, da so die Messdauer enorm reduziert werden konnte.

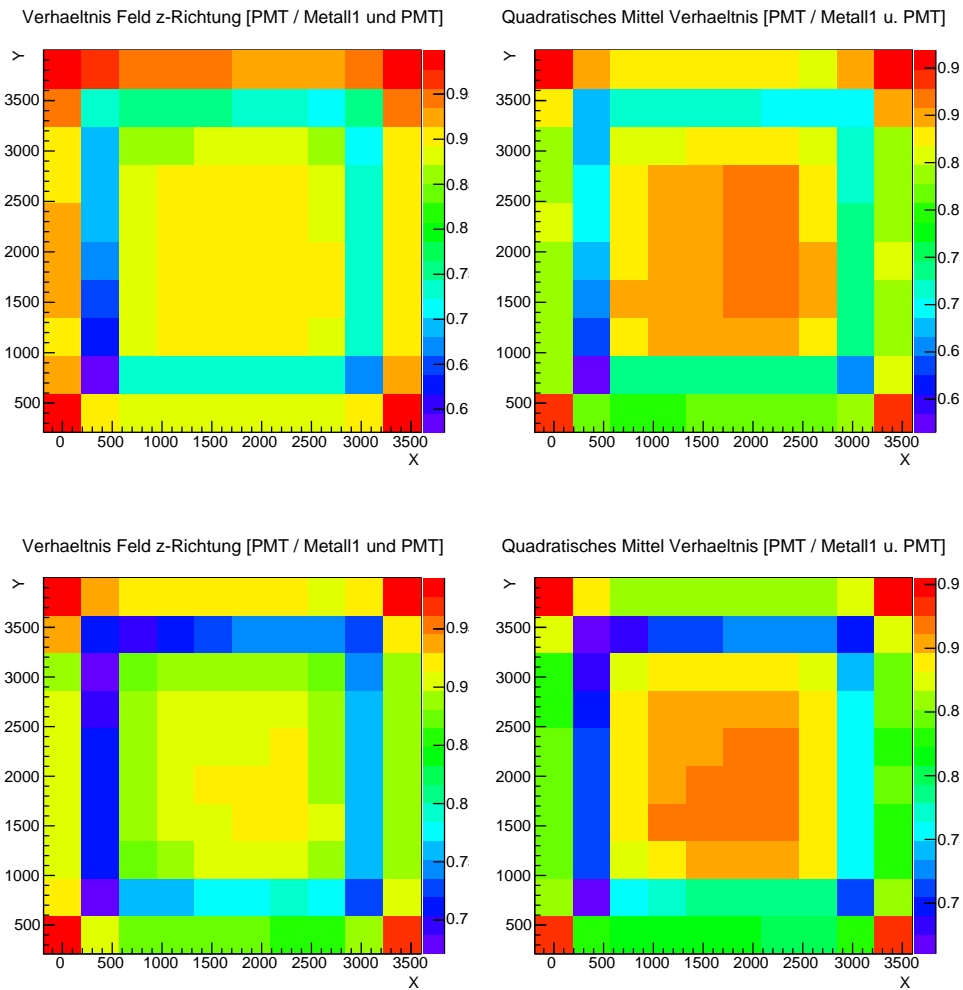


Abbildung 38: In der oberen Zeile die Histogramme der Verhältnisse zur Messung nur mit PMT und mit PMT und zusätzlicher Abschirmung bei 0.8A. In der unteren Zeile die Histogramme der Verhältnisse zur Messung nur mit PMT und mit PMT und zusätzlicher Abschirmung bei 0.4A

### 6.4.3 (3) Die Abschirmungsmessungen bezüglich des PMT´s im Vergleich zum Mu-Metall

Da der Photomultiplier in einem Stahlgehäuse sitzt, sollte dieser auch ohne Abschirmung durch Mu-Metall, Effekte hinsichtlich des Magnetfeldes zeigen. Um die Größen der Einzeleffekte vergleichen zu können, werden hier Messungen ohne jeglichen Metall-Einfluss und Messungen mit der jeweiligen alleinigen Metall-Komponente vorgenommen. So kann der Einzeleffekt des PMT´s mit beiden Mu-Metall-Konstruktionen verglichen werden. Möglicherweise können so weitere Argumente für oder gegen eine Einzelabschirmung der Photomultiplier gefunden werden. Gemessen wird bei einem Einstellungswinkel von  $90^\circ$  mit einer Stromstärke von 1A, respektive einem Feld von circa 4mT.

#### PMT verglichen mit der ersten Mu-Metall-Konstruktion

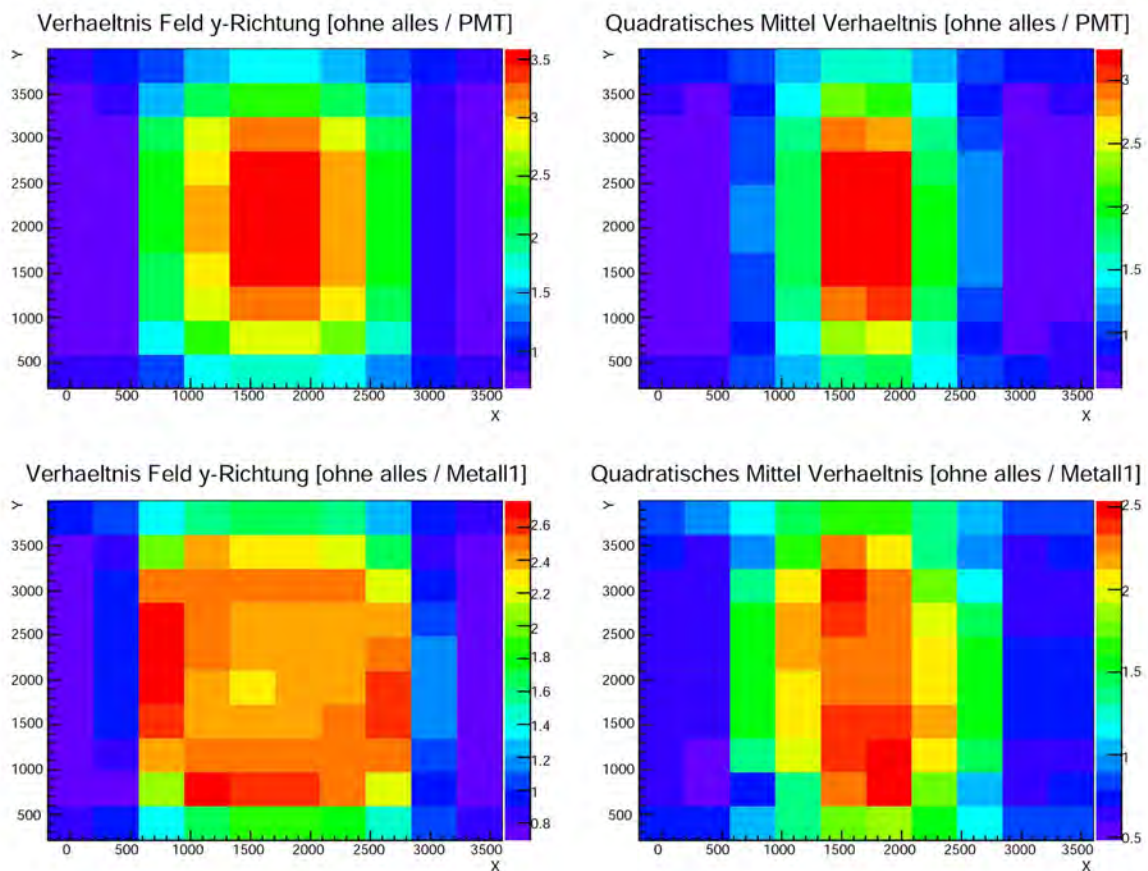


Abbildung 39: In der oberen Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses Messung ohne Metall-Komponenten, also das freie Feld zur Messung mit PMT zu sehen. In der unteren Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses der freien Feldmessung zur Messung mit Mu-Metall-Variante 1 abgebildet.

## PMT verglichen mit der zweiten Mu-Metall-Konstruktion

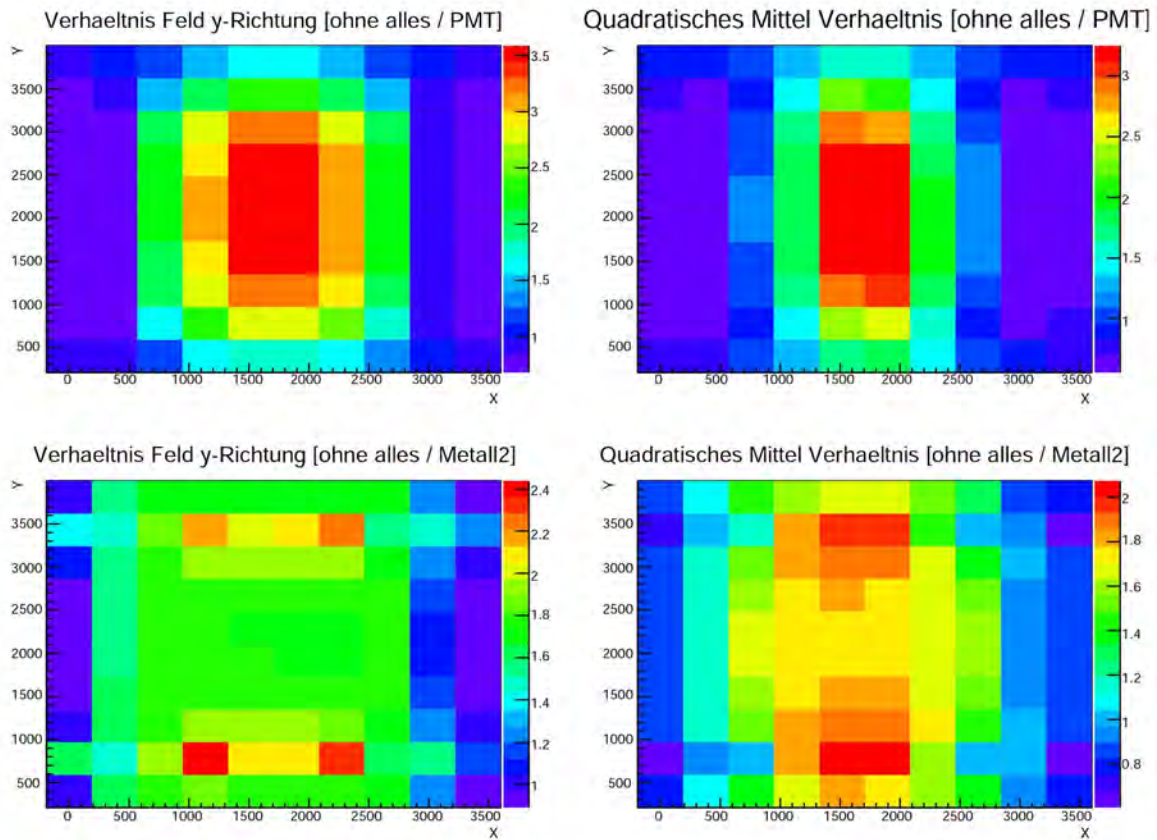


Abbildung 40: In der oberen Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses Messung ohne Metall-Komponenten, also das freie Feld zur Messung mit PMT zu sehen. In der unteren Zeile sind die Histogramme des Verhältnisses der freien Feldmessung zur Messung mit Mu-Metall-Variante 2 abgebildet.

## 6.5 Ergebnisse

### 6.5.1 (1) Das Verhältnis der Magnetfeldmessung in der Ebene vor dem PMT ohne Abschirmung und in der Ebene vor dem PMT mit Abschirmung

Das Verhältnis liegt bei allen 3 Abständen zwischen 0.8 und 0.9. Das Magnetfeld nur mit PMT ist also kleiner im Inneren als das Feld mit zusätzlicher Mu-Metall-Abschirmung. Das ist dadurch zu erklären, dass das Mu-Metall verstärkt äußere Feldlinien in Richtung der Metallflächen zieht. So wird sogar eine Verstärkung der Magnetfeldstärke im Mittelpunkt des PMTs erreicht.

Es ist gut zu sehen das die Abstandsänderung einen deutlichen Einfluss auf den Effekt des Mu-Metalls hat. Bei 1,4mm ist eine noch viel schärfere Struktur zu erkennen, als bei 3.7mm und 10mm. Bei 10mm ist insbesondere die grüne Fläche im Inneren zu sehen, diese hat mit einem Wert von mindestens 0.9 etwas zugenommen im Vergleich zur gelben Fläche bei 1.7mm, dort liegt der Wert zwischen 0.8 und 0.9. Der Effekt des Mu-Metalls hat also mit dem Abstand geringfügig abgenommen. Auch die zweite  $\mu$ -Metall-Variante zeigt weiteren Erkenntnisse. Hier liegt das Verhältnis bei 0.8 bis 0.9, wie zuvor auch.

Der Strukturunterschied zwischen dem ersten und zweiten  $\mu$ -Metall ist deutlich durch den Anteil des überstehenden Metalls zu erkennen. Zusammenfassend kann hier gesagt werden, der Effekt des Mu-Metalls nimmt bei einem Abstand von 10mm schon sichtbar ab, bzw. ist der Einfluss nicht mehr so scharfkantig. Des Weiteren spricht die Verstärkung im Inneren nicht grundsätzlich gegen eine Abschirmung durch Mu-Metall, denn betrachtet man die Größenverhältnisse der Helmholtz-Spule, bzw. des Mu-Metalls, wird der Gesamtfeldlinienverlauf möglicherweise durch eine zu kleine Spule verfälscht.

## 6.5.2 (2) Abschirmungsverhalten bei Variation des Magnetfeldes

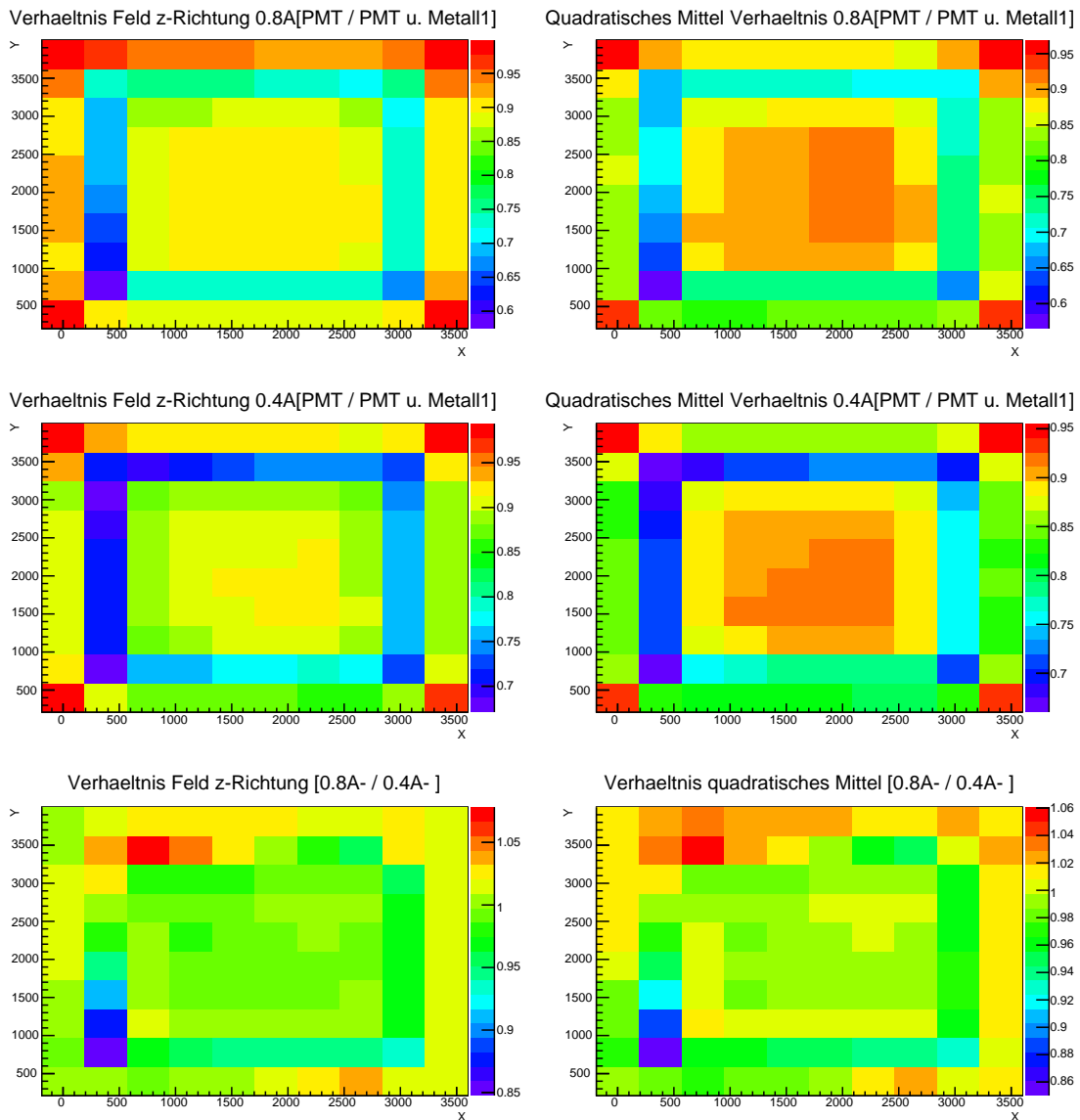


Abbildung 41: Die Histogramme in der untersten Zeile zeigen das Verhältnis der Messungen PMT durch Mu-Metall 1 geteilt im Verhältnis bei 0.8A und 0.4A

Werden die beiden Histogramme der dritten Zeile begutachtet, ist zu sehen das die grüne Fläche innerhalb des Metallrahmens genau im mittleren Bereich von 1.05 bis 0.95 liegt. Somit ändert sich der Effekt des Mu-Metalls linear mit der Feldstärke und es kann davon ausgegangen werden, dass bei Feldern von circa 3.2mT kein Sättigungseffekt auftritt.

### 6.5.3 (3) Wie groß ist der Effekt des PMT's im Vergleich zum Mu-Metall

#### Vergleich PMT zu Metall 1 bei 90°

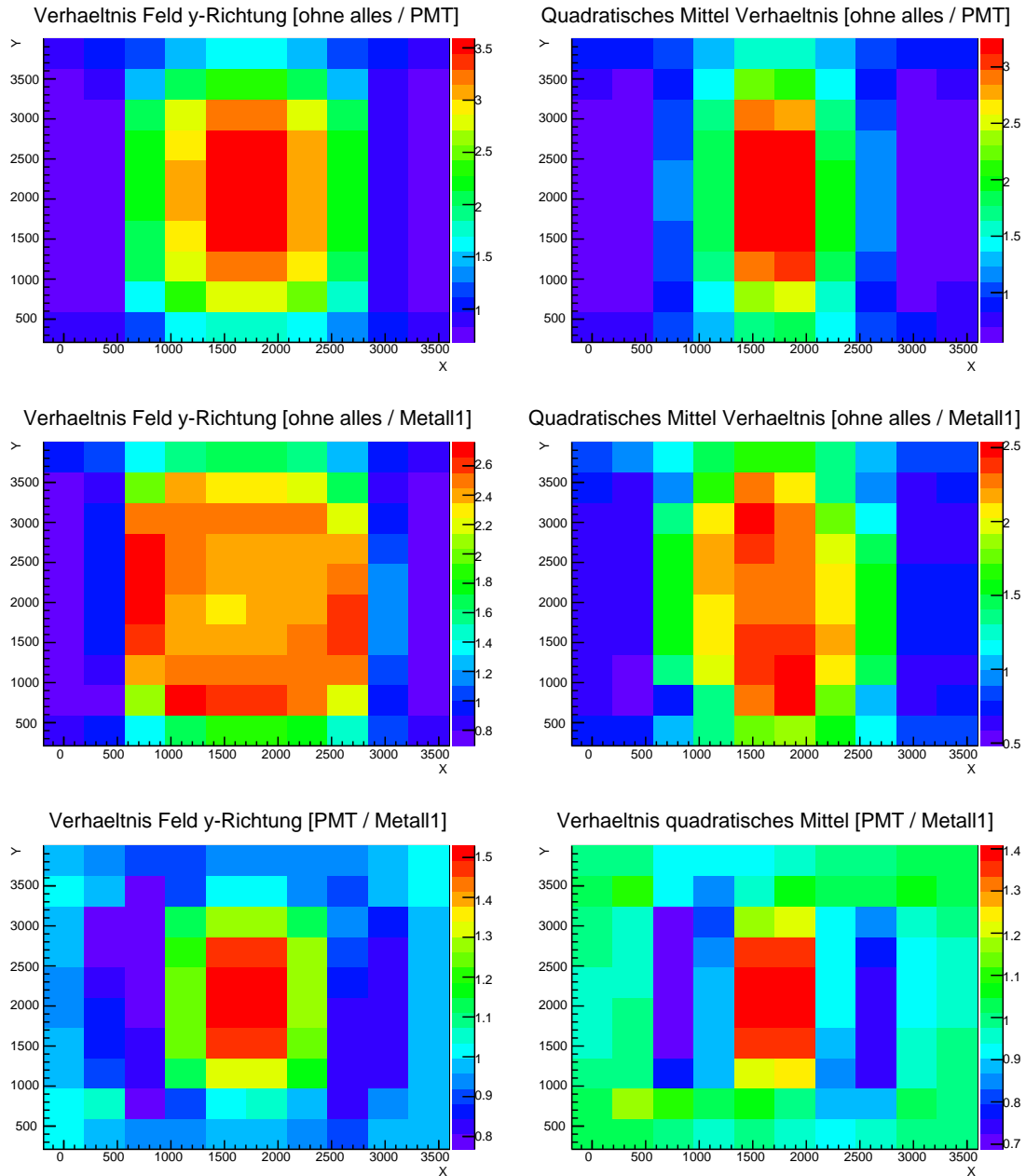


Abbildung 42: Die Histogramme in der untersten Zeile zeigen das Verhaeltnis der Messung ohne Metall-Komponenten und mit PMT und der Messung ohne Metall-Komponenten und mit Mu-Metall 1.

Bei der ersten Messung bei einem Einstellungswinkel von 90° fällt im Vergleich zur 0° Messung direkt auf, dass diesmal der Wert des Verhaeltnisses der Messung ohne jegliche Metall-Komponenten und der Messung mit PMT größer als 1 ist. Im Mittelpunkt liegt der Wert sogar bei über 3 zu sehen in der ersten Zeile der Histogramme, gekennzeichnet durch die rote Fläche. Wird die zweite Zeile der Histogramme betrachtet ist erkennbar, dass der Wert des Verhaeltnisses der Messung ohne Metall-Komponenten und der Messung mit der ersten

Mu-Metall-Konstruktion bei ungefähr 2.4 liegt. Dies ist gut zu verstehen, da die Feldlinien bei  $90^\circ$  Einstellungswinkel jetzt genau orthogonal auf die Mu-Metall-Fläche treffen und so oberhalb und unterhalb des PMT's entlanglaufen. Die Dritte Zeile der Histogramme liefert das entscheidende Resultat der Messung. Hier ist das Verhältnis der ersten beiden Messungen ausgewertet. Im Bereich der roten Fläche ist der Einfluss des Mu-Metalls also schwächer als der des PMT's. Allerdings zeigt das Mu-Metall an den Übergängen bei  $x = 600$  und  $x=2600$  einen stärkeren Effekt als der PMT. Diese Messung liefert keine Argumente, die gegen eine Einzelabschirmung der Photomultiplier sprechen.



## Vergleich PMT zu Metall 2 bei 90°

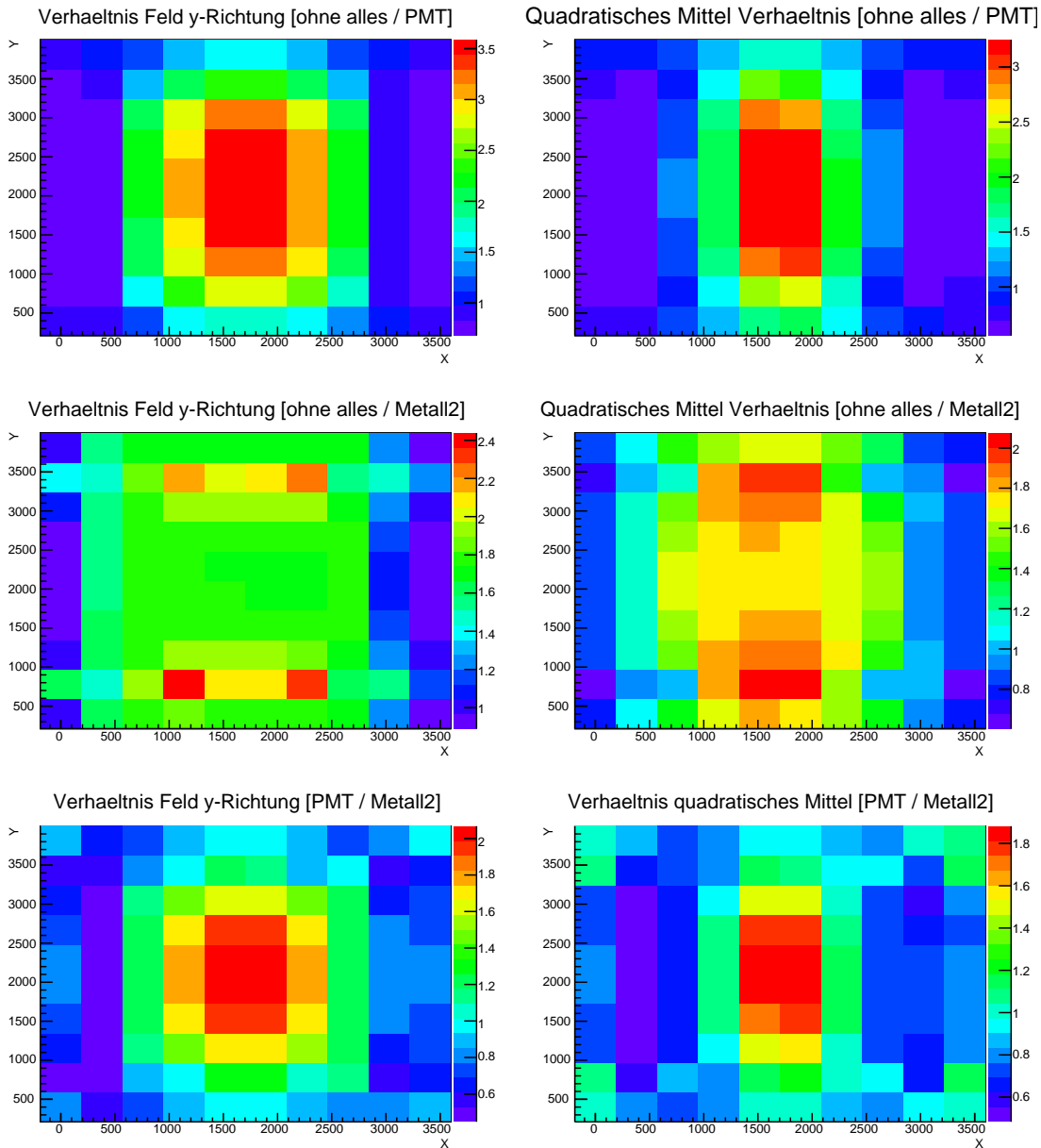


Abbildung 43: Die Histogramme in der untersten Zeile zeigen das Verhältnis der Messung ohne Metall-Komponenten und mit PMT und der Messung ohne Metall-Komponenten und mit Mu-Metall 2.

Im Vergleich zum ersten Metall zeigt die zweite Variante eine etwas schwächere Abschirmung verglichen mit dem Abschirmeffekt des PMT's. Während das Ergebnis der Messung zuvor einen Verhältniswert von 2.2 bis 2.4 ergibt, liefert die zweite Abschirmvariante nur ein Verhältnis von circa 1.8, zu sehen im ersten Histogramm in der zweiten Zeile. So übertrifft der Effekt des zweiten Metalls an keiner Stelle die des PMT's alleine. Hieraus folgt die Erkenntnis, dass die erste Mu-Metall-Variante bessere Abschirmergebnisse liefert. Jedoch sollte auch durch das Verwenden der zweiten Konstruktion eine bessere Gesamtabschirmung erreicht werden.

### 6.5.4 (4) Vergleich beider Mu-Metalle

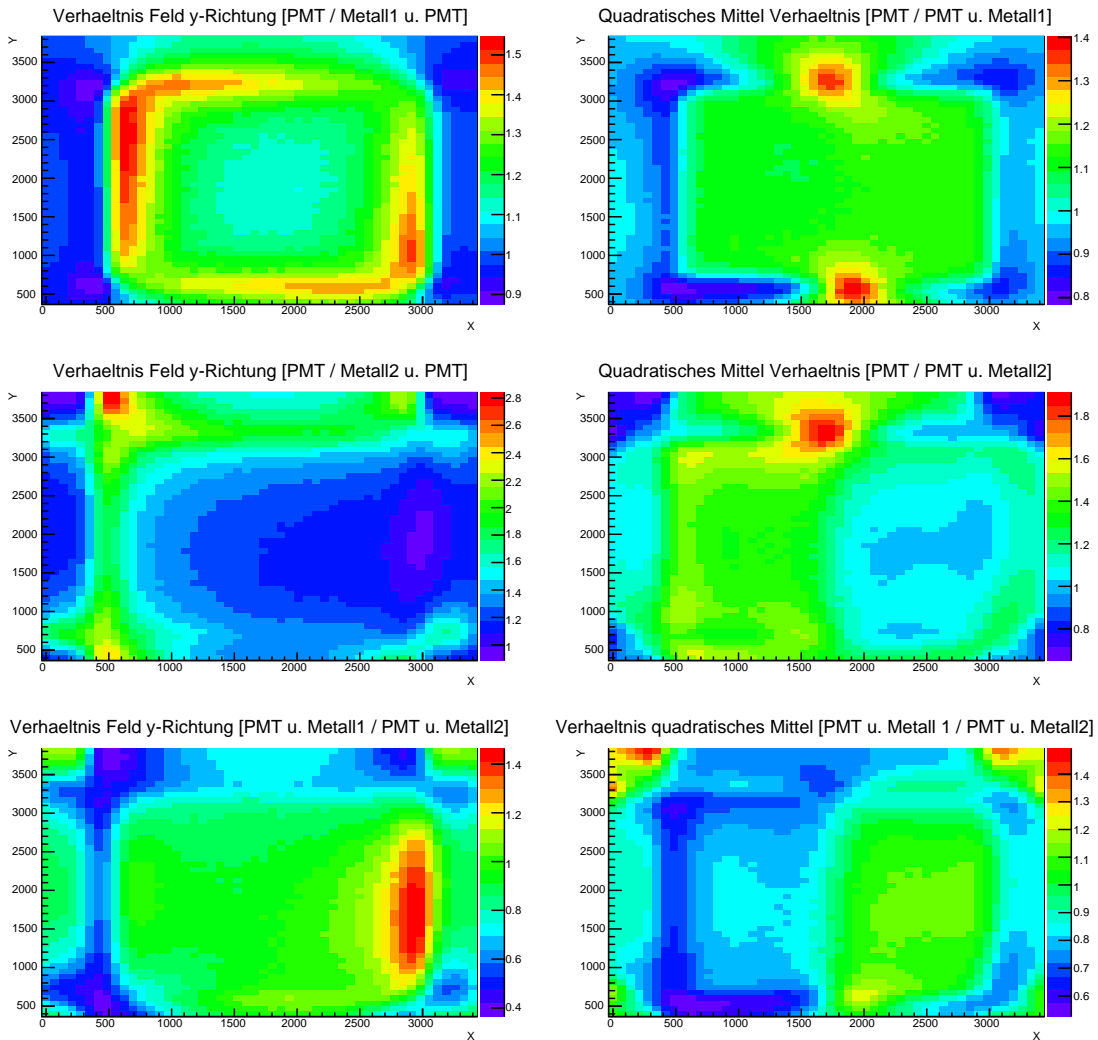


Abbildung 44: Oberste Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall. Die mittleren Histogramme zeigen analog das Verhältnis für das zweite Mu-Metall. Die untersten Histogramme liefern das Verhältnis der ersten durch die zweite Zeile, bzw Abschirmung durch das erste Metall durch die Abschirmung des zweiten Metalls.

Die oberste Zeile liefert das Verhältnis der Messung mit dem alleinigen PMT und der Messung des PMT's mit zusätzlicher Abschirmung durch das erste Metall. Hier liegt die Abschirmung durch die grüne Fläche veranschaulicht bei circa 1.2 bis 1.3, also zwischen 20% und 30%. Die zweite Histogrammzeile zeigt analog die Ergebnisse für die zweite Mu-Metall-Konstruktion. Auffällig ist hier die linke obere grüne Randfläche mit werten bis zu 2 im Verhältnis. Möglicherweise auf den Einfluss der überstehenden Metallflächen zurückzuführen. Um eine genauere Aussage hierüber machen zu können, müssten weitere detailliertere Magnetfeldmessungen durchgeführt werden. Wird das Verhältnis der beiden Metalle bewertet, zu sehen in der dritten Zeile, kann gesagt werden dass im Mittel durch die grüne Fläche mit dem Wert 1 dargestellt, beide Metalle ein gleichermaßen gutes Abschirmverhalten zeigen.

## 7 Zusammenfassung und Erwartung

Im ersten Praxisteil der Thesis wurde die MagVector2-Sonde erfolgreich durch den Mittelwert aus beiden kleinen Helmholtz-Spulen im Rahmen der Fehlerwerte kalibriert. Die Schwankungen zwischen den zwei verschiedenen Auslese-Boards fallen mit unter 5% kaum ins Gewicht. Auch die Langzeitmessungen inklusive Power-Cycle ergaben sehr konstante, stabile Ergebnisse. Die Abweichungen konnten hier auf eine Größenordnung von  $\frac{1}{100}$ mT eingegrenzt werden. Der einzige wirkliche negative Aspekt des Sensors betrifft die automatische Temperaturkompensation, da hier keine ausreichende Korrekturgerade ausgemessen werden konnte. Allerdings ist es dennoch möglich eine Korrektur durch eine entsprechende Programmierung einzubringen. Die ersten Abschirmungsmessungen mit der kalibrierten und charakterisierten Sonde ergeben im Kern die Erkenntnisse, dass die Mu-Metall-Konstruktionen bei Feldern von 3.2mT keine Sättigungseffekte zeigen, dass der Effekt des PMT-Materials im Mittelpunkt der Glasfläche eine etwas größere Abschirmung als das alleinige Mu-Metall aufweist und dass auf die Abschirmungsfläche orthogonal treffende Feldlinien bei beiden Abschirmungsvarianten zu 20% bis 30% im Inneren reduziert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Sensor stabil und zuverlässig mit geringen Schwankungen im niedrigsten der vier Messbereiche (bis 100mT) arbeitet und durchaus geeignet ist, um die Streufelder am CBM-Experiment zu messen. Des Weiteren zeigen erste Abschirmungsmessungen, dass die zusätzliche Einzelabschirmung durchaus sinnvoll sein kann. Um an dieser Stelle eine verlässliche Aussage tätigen zu können, müssten weitere konkretere Abschirmungsmessungen folgen.

## 8 Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Bachelor-Thesis selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

01.06.2015

(Daniel Schwab)

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine Bachelor-Thesis wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen und im Rahmen von externen Qualitätssicherungsmaßnahmen des Studiengangs zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt werden kann.

Korrektur- oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

01.06.2015

(Daniel Schwab)

## 9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Menschen bedanken, ohne deren Hilfe das Verfassen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Hier ist zu erwähnen, dass die Reihenfolge der Auflistung nicht den Wert der Unterstützung misst.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Karl Heinz Kampert bedanken, da er mir die Möglichkeit bot, an einem interessantem Thema zu arbeiten. Weiterer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Christian Pauly, der mir zu jeder Zeit sehr engagiert zur Seite stand. Ich bedanke mich bei Dennis Pfeifer, da es mir nur durch Seine Hilfe möglich war, verschiedene Präzisionsbauteile des Versuchsaufbaus zu fertigen. Des Weiteren danke ich Jahangir Pouryamout, da auch er an der Fertigung einzelner Bauteile des Aufbaus beteiligt war. Bedanken möchte ich mich auch bei Jörg Förtsch, da er bei Unklarheiten immer Hilfsbereitschaft zeigte. Dank gilt auch Frau Ingrid Schaarwächter, für die Unterstützung bei formalen Problemen.

# 10 Anhang

## 10.1 Abbildungen und Tabellen

### 10.1.1 Kalibrationsmessungen erster Spule

Auslese-Board 1, y-Achse

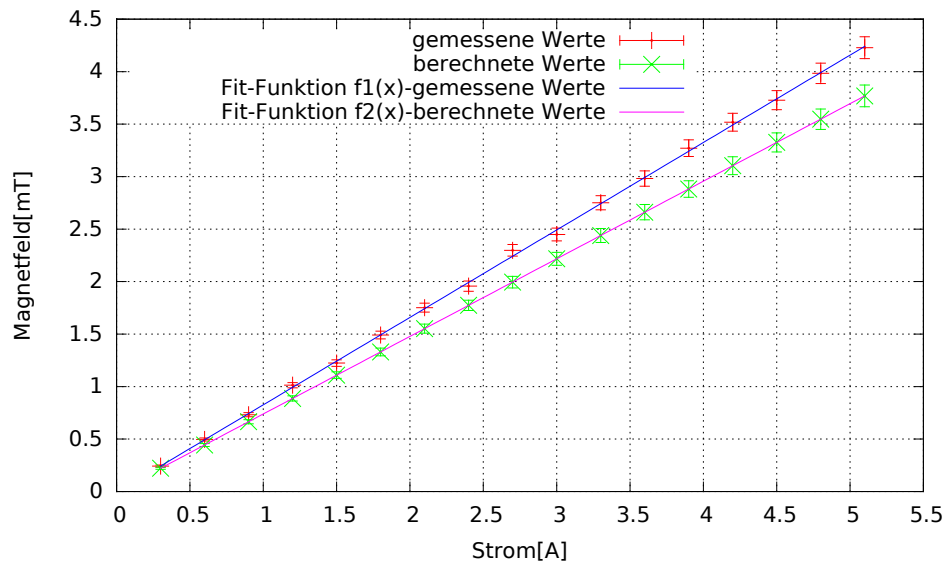


Abbildung 45: Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.833 \pm 0.004$ | -0.007 | 0.251    |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | 7e-005 | 1e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.127 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 12: Fit-Daten zur Abbildung 45

## Auslese-Board 1, z-Achse

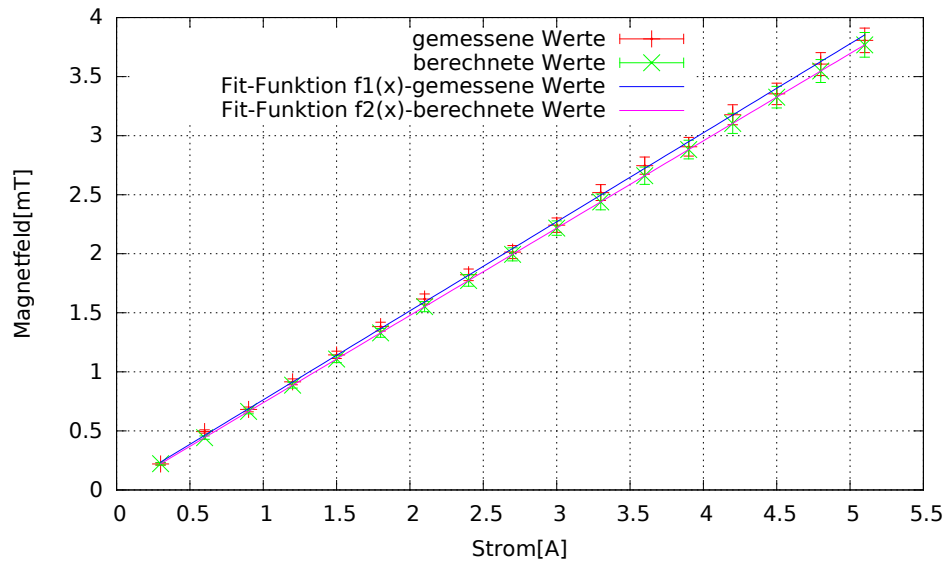


Abbildung 46: Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b        | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|----------|----------|
| f1(x)         | $0.754 \pm 0.006$ | 0.009    | 0.69     |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | $7e-005$ | $1e-004$ |
| Verhältnis[%] | $1.020 \pm 0.001$ |          |          |

Tabelle 13: Fit-Daten zur Abbildung 46

## Auslese-Board 2, x-Achse

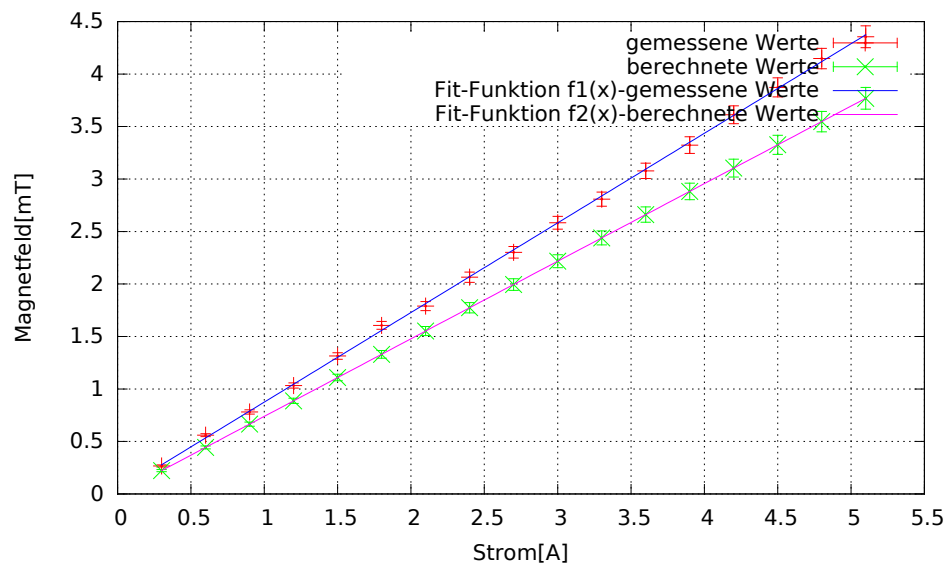


Abbildung 47: Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b                  | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------------------|----------|
| f1(x)         | $0.853 \pm 0.005$ | $0.022 \pm 0.006$  | 0.532    |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | $7e-005 \pm 0.001$ | 1e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.156 \pm 0.001$ |                    |          |

Tabelle 14: Fit-Daten zur Abbildung 47



## Auslese-Board 2, y-Achse

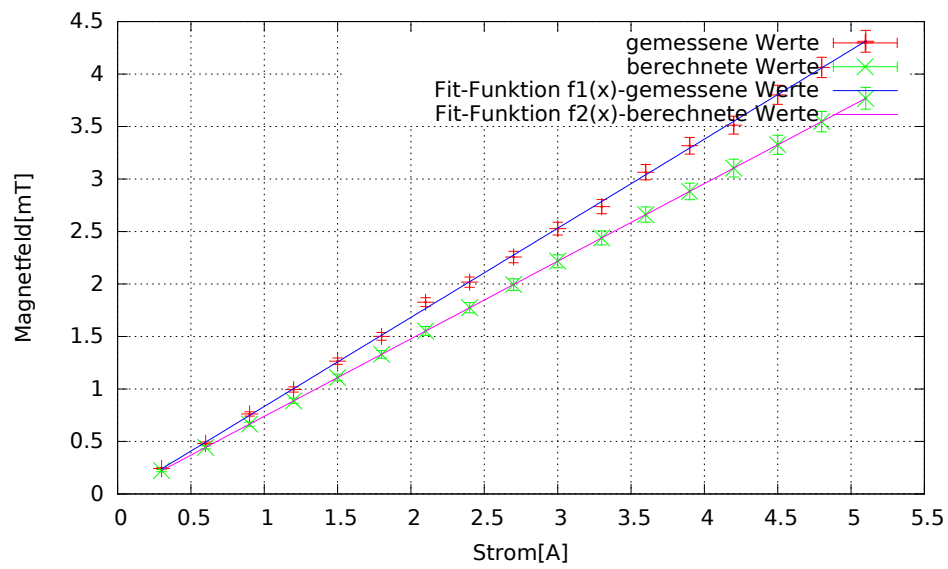


Abbildung 48: Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.849 \pm 0.004$ | -0.016 | 0.308    |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | 7e-005 | 1e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.148 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 15: Fit-Daten zur Abbildung 48

## Auslese-Board 2, z-Achse

z-Achse

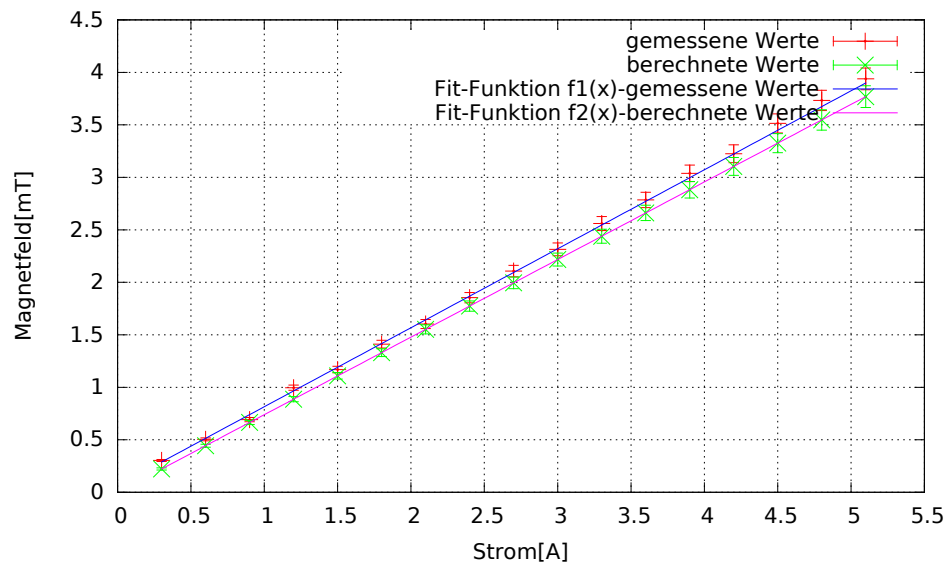


Abbildung 49: Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die erste Helmholtz-Spule

|               | a                 | b        | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|----------|----------|
| f1(x)         | $0.752 \pm 0.007$ | 0.062    | 0.852    |
| f2(x)         | $0.739 \pm 0.001$ | $7e-005$ | $1e-004$ |
| Verhältnis[%] | $1.017 \pm 0.001$ |          |          |

Tabelle 16: Fit-Daten zur Abbildung 49

## 10.1.2 Kalibrationsmessungen zweiter Spule

### Auslese-Board 1, x-Achse

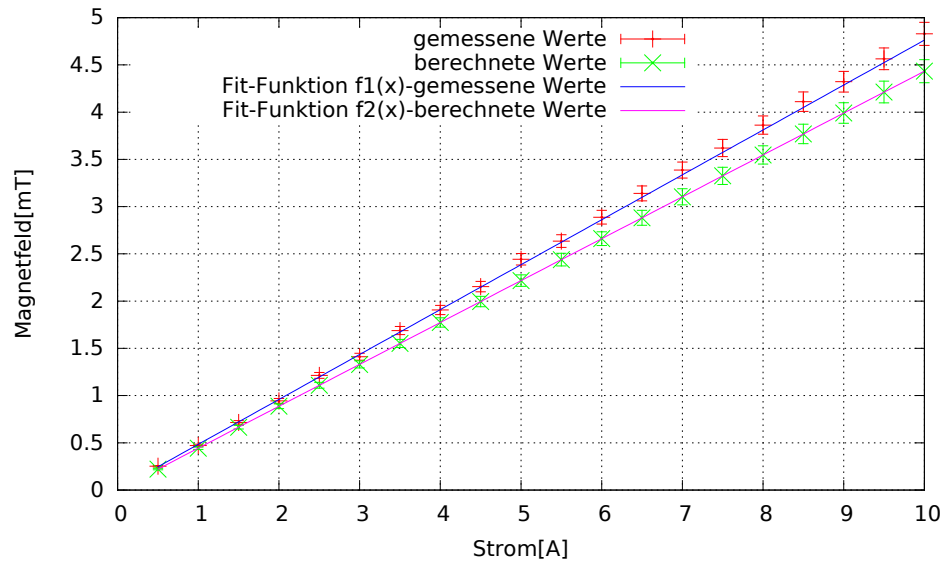


Abbildung 50: Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die zweite Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.475 \pm 0.004$ | 0,008  | 0.446    |
| f2(x)         | $0.443 \pm 0.001$ | 1e-004 | 3e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.072 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 17: Fit-Daten zur Abbildung 50

## Auslese-Board 1, y-Achse

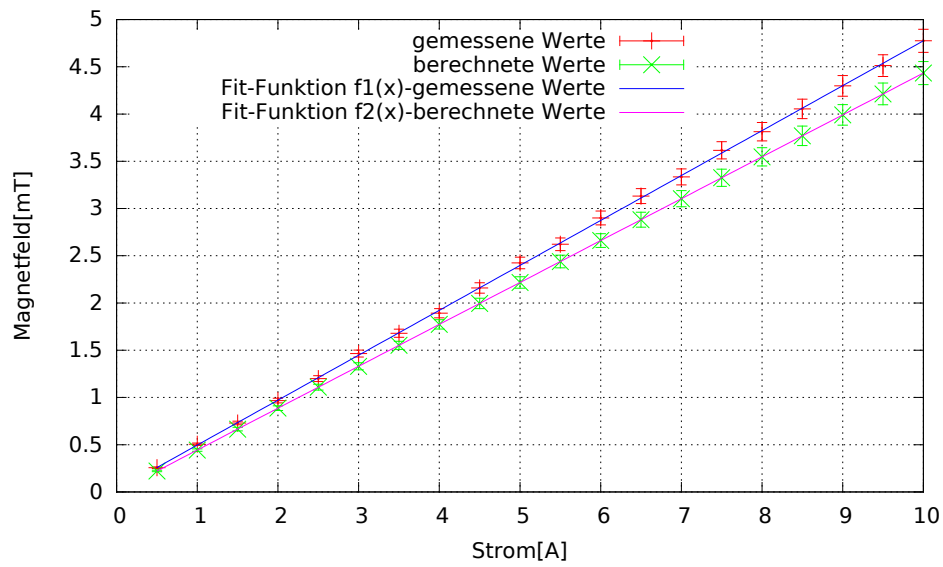


Abbildung 51: Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die zweite Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.475 \pm 0.001$ | 0.021  | 0.106    |
| f2(x)         | $0.443 \pm 0.001$ | 1e-004 | 3e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.072 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 18: Fit-Daten zur Abbildung 51

## Auslese-Board 1, z-Achse

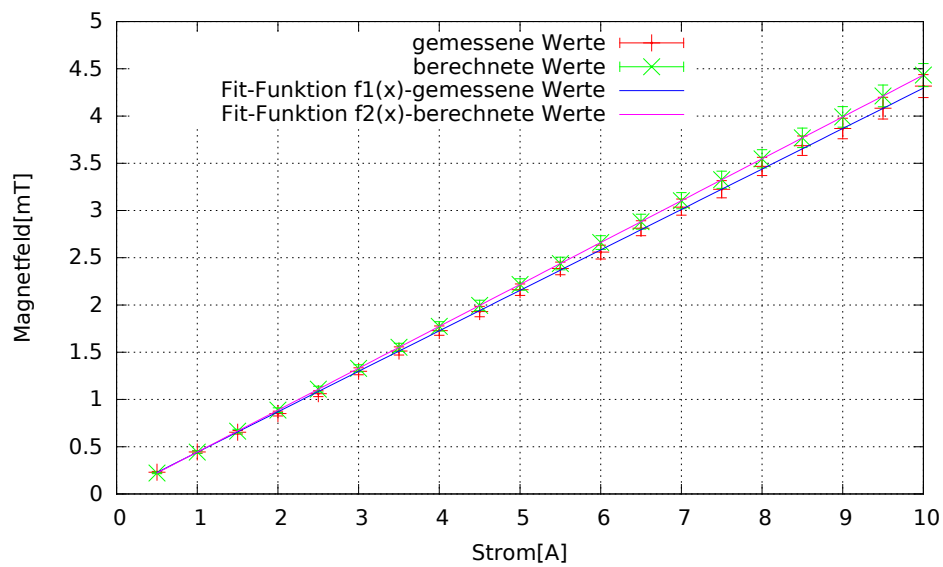


Abbildung 52: Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom ersten Board für die zweite Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.428 \pm 0.001$ | 0.002  | 0.102    |
| f2(x)         | $0.443 \pm 0.001$ | 1e-004 | 3e-004   |
| Verhältnis[%] | $0.966 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 19: Fit-Daten zur Abbildung 52

## Auslese-Board 2, x-Achse

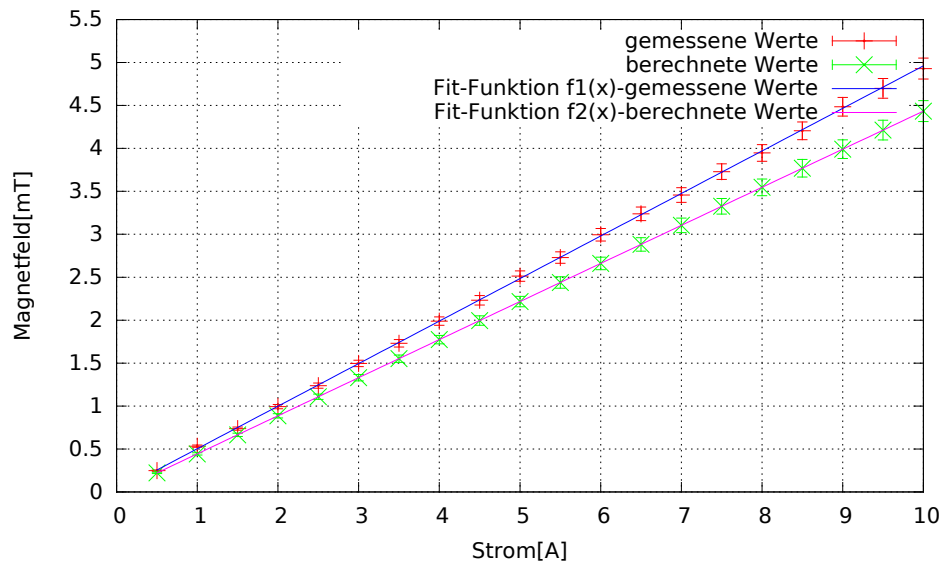


Abbildung 53: Vergleich zwischen der unkalibrierten x-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die zweite Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.495 \pm 0.002$ | 0.007  | 0.409    |
| f2(x)         | $0.443 \pm 0.001$ | 1e-004 | 3e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.117 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 20: Daten zur Abbildung 53

## Auslese-Board 2, y-Achse

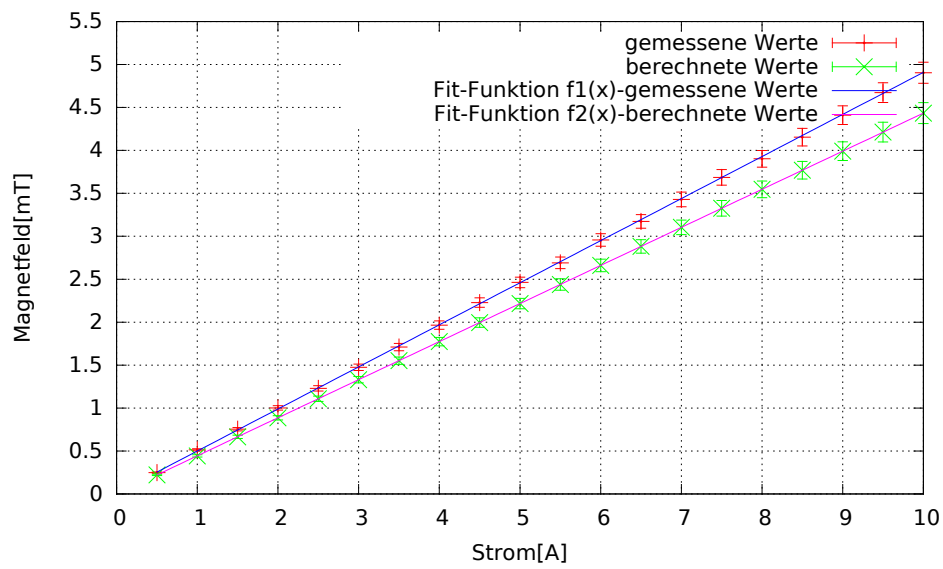


Abbildung 54: Vergleich zwischen der unkalibrierten y-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die zweite Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.489 \pm 0.001$ | 0.009  | 0.161    |
| f2(x)         | $0.443 \pm 0.001$ | 1e-004 | 3e-004   |
| Verhältnis[%] | $1.104 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 21: Fit-Daten zur Abbildung 54

## Auslese-Board 2, z-Achse

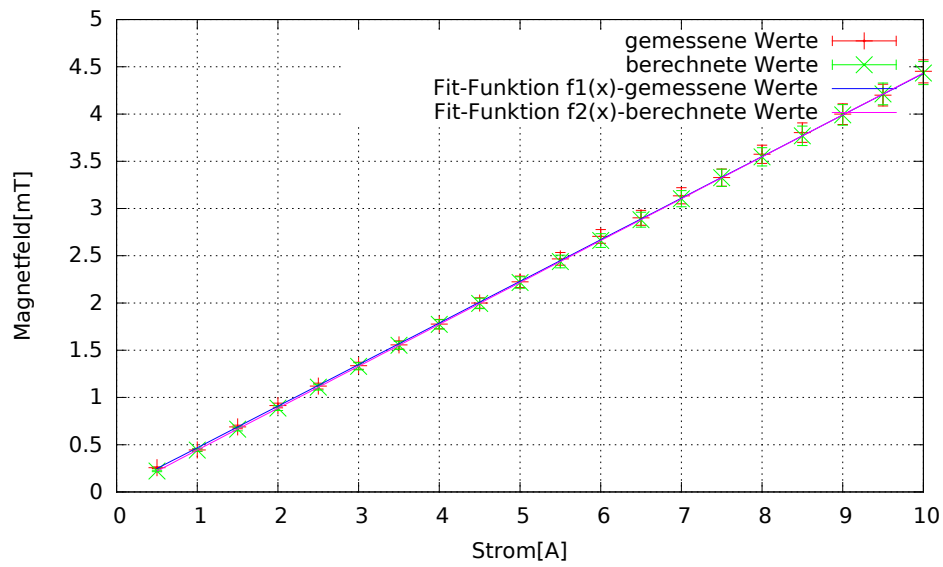


Abbildung 55: Vergleich zwischen der unkalibrierten z-Achse und dem durch die Theorie bestimmten Soll-Wert vom zweiten Board für die zweite Helmholtz-Spule

|               | a                 | b      | $\sigma$ |
|---------------|-------------------|--------|----------|
| f1(x)         | $0.440 \pm 0.002$ | 0.028  | 0.320    |
| f2(x)         | $0.443 \pm 0.001$ | 1e-004 | 3e-004   |
| Verhältnis[%] | $0.993 \pm 0.001$ |        |          |

Tabelle 22: Fit-Daten zur Abbildung 55



### 10.1.3 Abschirmungsmessungen

#### Die erste Mu-Metall-Konfiguration (1) bei 90°

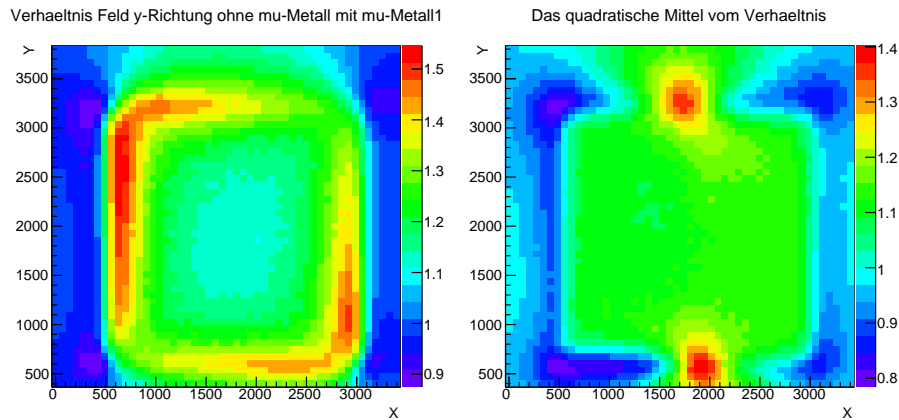


Abbildung 56: Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall bei 90° und 1.7mm Abstand

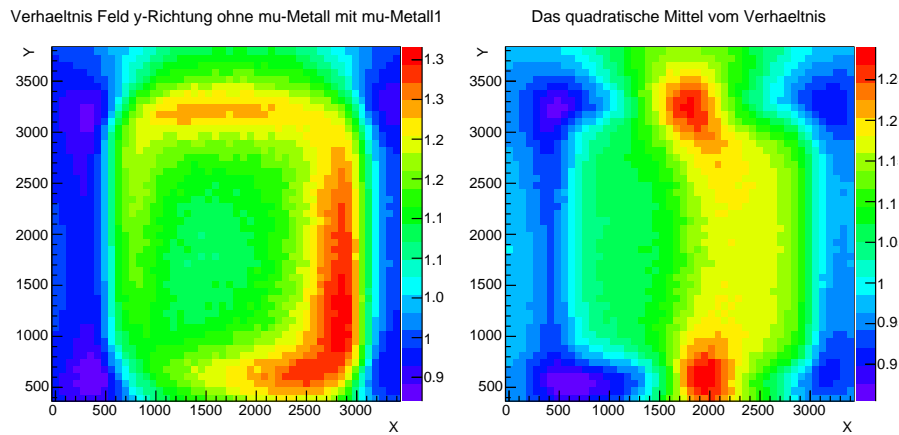


Abbildung 57: Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall bei 90° und 3.4mm Abstand

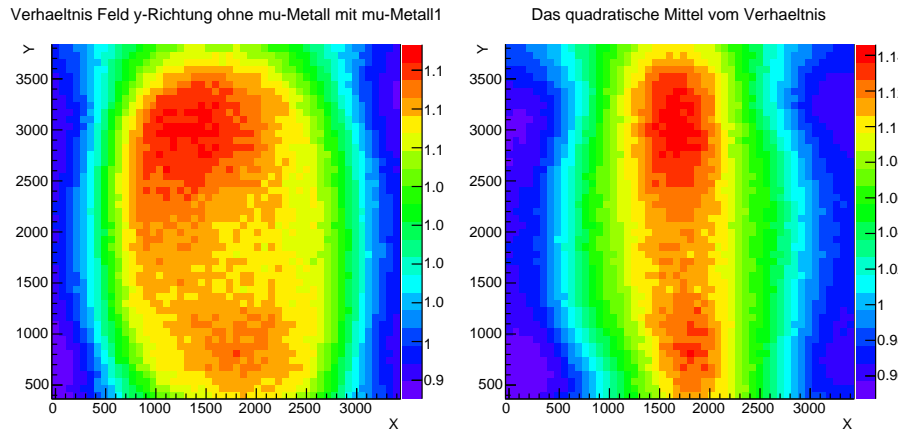


Abbildung 58: Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das erste Mu-Metall bei  $90^\circ$  und 10mm Abstand

### Die zweite Mu-Metall-Konfiguration (2) bei $90^\circ$

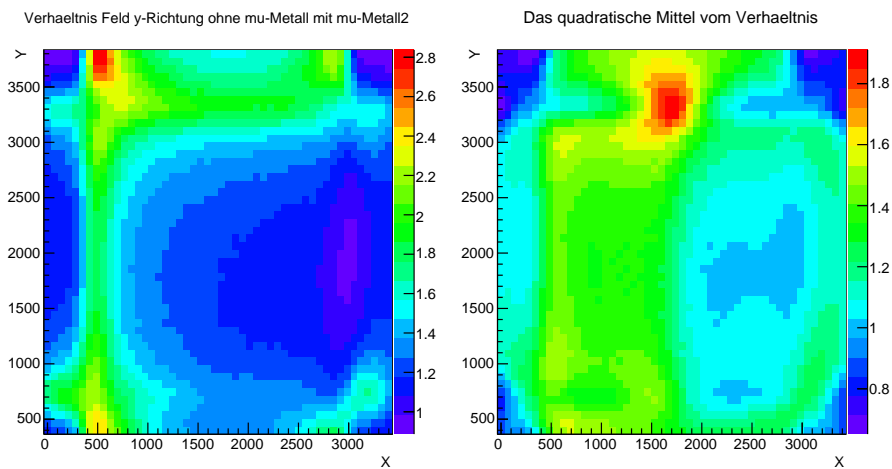


Abbildung 59: Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das zweite Mu-Metall bei  $90^\circ$  und 1.7mm Abstand

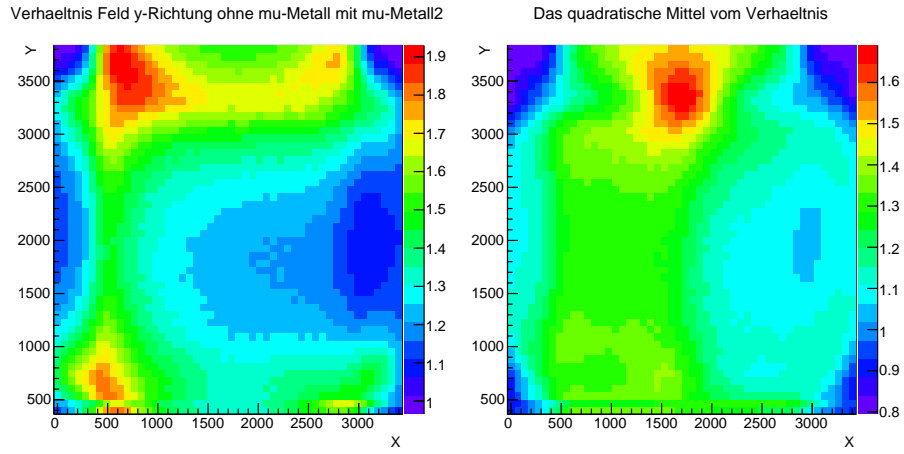


Abbildung 60: Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das zweite Mu-Metall bei 90° und 3.4mm Abstand

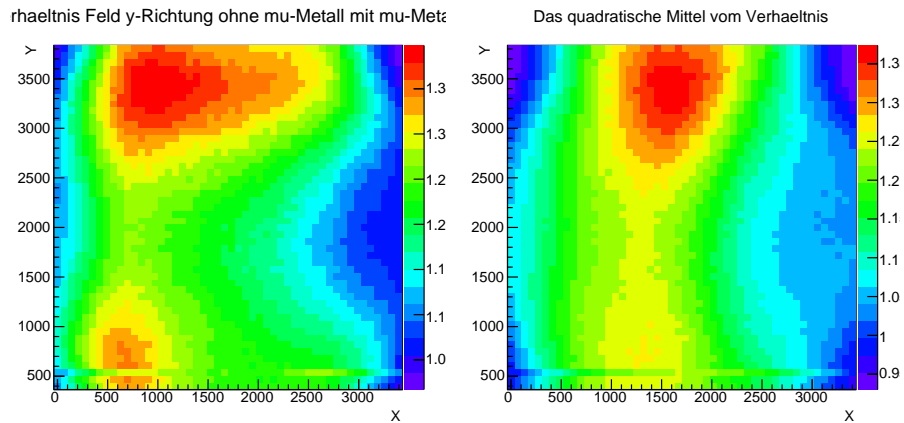


Abbildung 61: Histogramme zeigen das Verhältnis der Messung nur mit PMT und das der Messung mit PMT und zusätzlicher Abschirmung durch das zweite Mu-Metall bei 90° und 10mm Abstand

## 10.2 Listen

### **Auflistung der wichtigsten Komponenten des Versuchsaufbaus der Kalibrationsmessungen:**

- Helmholtz-Spule mit 2x30 Windungen und 1.0mm Durchmesser Draht
- Helmholtz-Spule mit 2x18 Windungen und 1.5mm Durchmesser Draht
- Hohlzylinder für die z-Achse zentrisch
- Hohlzylinder für die xy-Achse zentrisch
- Hohlzylinder für y-Achse exzentrisch
- Hohlzylinder für xz-Achse exzentrisch
- Netzteil des Typs PS 2316 - 050 vom Hersteller Elektro-Automatik
- Digitalthermometer des Typs GTH 175 / MO -199 bis +199°C vom Hersteller Greisinger electronic
- Kälte-Wärme-Testkammer vom Hersteller Binder
- Raspberry Pi

### **Auflistung der wichtigsten Komponenten des Versuchsaufbaus der Abschirmungsmessungen:**

- XY-Positioniertisch
- Netzteil des Typs PS 2316 - 050 vom Hersteller Elektro-Automatik
- gesamte Halterung des ersten Rahmens
- gesamte Halterung des zweiten Rahmens
- defekter Photomultiplier des Typs Hamatsu H850
- erste Mu-Metall-Konstruktion
- zweite Mu-Metall-Konstruktion
- Kunststoffrahmen der Maße des Mu-Metall-Rahmens
- Kunststoffplättchen zur Abstandsmessung der Wanddicke 1.7mm
- große Spule
- Tischsteuerung des XY-Positioniertisches
- Raspberry Pi

# Literaturverzeichnis

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Mu-Metall>
- [2] <https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger.htm>
- [3] <http://www.fair-center.de/de/fuer-nutzer/experimente/cbm/introduction.html>
- [4] <http://de.wikipedia.org/wiki/Tscherenkow-Strahlung>
- [5] <http://slideplayer.org/slide/211298/>
- [6] allgemeine Beschreibung des MV2: DATASHEET des MV2
- [7] <http://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Spule>
- [8] <http://de.wikipedia.org/wiki/Biot-Savart-Gesetz>
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Fehlerfortpflanzung>
- [10] <http://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung>
- [11] <http://monacor.dk/import/media/FLE/Ps-2332.pdf>
- [12] [https://greisinger.de/files/upload/de/produkte/bda/GTH175PT\\_d.pdf](https://greisinger.de/files/upload/de/produkte/bda/GTH175PT_d.pdf)
- [13] <http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2006-Nov-34-1.pdf>
- [14] [http://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Spule#Berechnung\\_der\\_magnetischen\\_Flussdichte](http://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Spule#Berechnung_der_magnetischen_Flussdichte)
- [15] Email von C. Pauly (enthaltene Bilder zum CBM-Aufbau)
- [16] CBMProgressreportMagvector der Universität Wuppertal, erhalten durch Email von C.Pauly