

Magnetooptischer Messaufbau zur Strahlstrombestimmung

A Schlörit^{1,2}, H. Reeg¹, H.D. Bauer²

¹Strahldiagnose, GSI Darmstadt

²Fachbereich Physik, FH Wiesbaden

Abstract

Dieser Artikel beschäftigt sich mit einem neuen Sensorenkonzept für die Strahlstrommessung in einem Teilchenbeschleuniger. Messendes Element soll ein magnetooptischer Kristall sein, der im Luftspalt eines den Strahl umschließenden geteilten weichmagnetischen Ringkerns sitzt. Dieser dreht aufgrund des Faradayeffektes die Polarisationsachse eines einfallenden Laserstrahls in Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte im Ringkern. Über die Detektion dieser Drehung wird der Strom bestimmt.

1. Einleitung

Die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt plant eine Erweiterung der bisherigen Beschleunigerstruktur. Im Rahmen dieses FAIR-Projektes (Facility for Antiproton and Ion Research) müssen die bestehenden Sensoren zur Strahldiagnose auf die gestiegenen Anforderungen entweder angepasst oder neu entwickelt werden. Dieser Artikel beschreibt ein neues magnetooptisches Sensorenkonzept für ein Strahlstrom-Messsystem.

2. Grundlagen

Faradayeffekt

Beschreibt die Drehung der Polarisations Ebene β von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch ein transparentes Medium der Länge d , an das ein externes Magnetfeld B parallel zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle angelegt wurde.

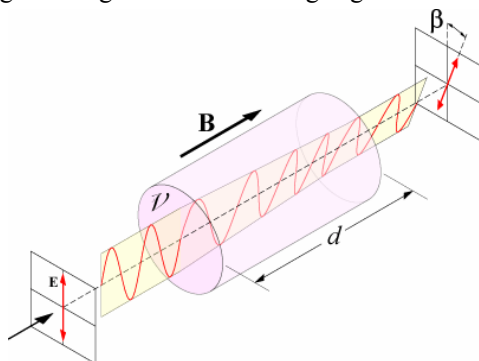


Abb. 1: Faradayeffekt

Verdetkonstante

Werkstoffkonstante eines magnetooptischen Kristalls, die den Zusammenhang zwischen Drehwinkel der Polarisationsachse und magnetischer Flussdichte beschreibt.

3. Konzept

In [3] wurde ein magneto-optischer Stromtransformator vorgestellt [Abb.2]

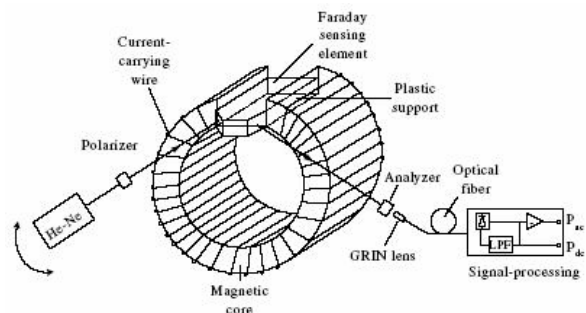


Abb. 2: optischer Stromtransformator [3]

Daraus abgeleitet lässt sich der hier vorgestellte Aufbau in folgende Funktionsgruppen unterteilen:

- Fktgrp. Laser
Laser, Polarisationsfilter, Einkoppeloptik
- Fktgrp. Ringkern
Ringkern, Aufbau mit Sensorenträger, magnetooptischer Kristall als Sensor
- Fktgrp. Auswertung
Auskoppeloptik, Polarisationsfilter, Photodetektor, Oszilloskop
- Fktgrp. Strahlsimulation
Funktionsgenerator, Verstärker
- Fktgrp. Arbeitspunkteinstellung
Stromquelle, Verstärker

3.1 Komponentenauswahl

Für eine weitere Auslegung des Systems wird eine Komponentenauswahl getroffen. Für den Laser sowie die Polarisations- und Koppeloptiken wurden Bauteile der Firma Schäfter & Kirchhoff verwendet. Im Einzelnen sind dies:

Fktgrp. Laser

- He-Ne Laser mit polarisationserhaltender Faseroptik, 35mw Leistung, Polarisationsverhältnis 500:1, Rauschen < 1%
- Polarisierender Strahlteilerwürfel 10000:1
- Faser-Kollimator mit integrierter Mikrooptik

Fktgrp. Ringkern

- Der Ringkern [RK] inklusive Aufbau und Auslegung wurde bereits realisiert [4]
- Der magnetooptische Kristall wurde von FEE Idar-Oberstein über Prof. Bauer [8] bereitgestellt. Es liegen 3 Testmuster (2 Zylinder & 1 Scheibe) vor. Hierbei handelt es sich um Terbium-Gallium-Granat (TGG) [5].

Fktgrp. Auswertung

- Faser-Kollimator mit integrierter Mikrooptik
- Polarisierender Strahlteilerwürfel 10000:1
- ultraschnelle Photodiode UPD-500 von Alphalas [7]
- Oszilloskop TDS 3014

Fktgrp. Strahlerzeugung / Offseteinstellung¹

- Funktionsgenerator HP 8165A
- Verstärker Rohrer
- Stromquelle [2]
- Verstärker Kepco

3.2 Funktionsablaufplan

Ein Laserstrahl wird mittels eines Strahlteilerwürfels linear polarisiert und per Kollimator in den magnetooptischen Kristall eingekoppelt. Dieser sitzt im Spalt eines geschlitzten Ringkerns, der per Offsetwicklung vormagnetisiert ist. Erfolgt nun über eine zweite axiale Wicklung eine Spannungsinduktion in den RK, ändert sich die magnetische Flussdichte im Ringkern und damit im Luftspalt. Bei entsprechender Auslegung der Strahlbahnen zum Verlauf der magnetischen Feldlinien dreht sich die Polaritätsachse des Laserstrahls in Abhängigkeit zur Änderung des B-Feldes. Der ausgekoppelte Strahl trifft nun auf einen zweiten Polarisationsfilter, der vor einer Photodiode sitzt. Diese sieht nun eine Helligkeitsänderung die durch die Drehung der Polarisationsachse bedingt ist. Über die Änderung der Helligkeit lässt sich somit auf den ursprünglichen Strahlstrom rückschließen.

Im nächsten Schritt erfolgt nun die theoretische Auslegung des Systems.

¹ Dieser Teil beinhaltet Arbeiten von [9]

4. Abschätzung der maximalen Intensität

Das Transmissionsverhältnis des linear polarisierten Laserstrahls durch den zweiten Polarisationsfilter lässt sich durch das Gesetz von Malus (1.1) beschreiben. φ beschreibt hierbei den Winkel zwischen der Schwingungsrichtung des Laserstrahls und dem Bereich der maximalen Transmission des Polarisationsfilters.

$$P_{Out} = P_{in} * \cos^2 * \varphi \quad (1.1)$$

Abb. 3 zeigt diese \cos^2 - Verteilung. Die Vorzugsrichtung des Polarisationsfilters ist nun um 45° gegenüber der Polarisationsachse des Lasers gedreht, woraus sich ein Transmissionsverhältnis

P_{Out} / P_{in} von 0,5 ergibt.

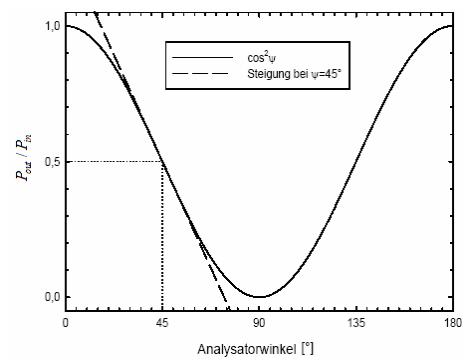


Abb. 3: \cos^2 Verteilung der Transmission am Polarisator

Dies ist der Bereich der größten Steigung wodurch eine kleine Änderung um $\Delta\varphi$ zu einer größtmöglichen Intensitätsänderung ΔP führt. Für ein P_{in} von 35mW ergibt sich somit eine Leistung von P_{out} 17,5mW am Detektor welcher bei 633nm eine Empfindlichkeit von $0,45A/W^2$ hat und somit zu einem Strom von 15,75mA führt. Bei Abgriff mittels einer 50Ω Messleitung und Auswertung am Oszilloskop ergibt sich eine Spannung von 790mV. Nicht beachtet wurde die mögliche Sättigung der PD, sodass von einer weiteren Begrenzung des maximalen Stroms nach unten auszugehen ist. Fa. Alphalas selbst gibt keine obere Grenze an, sondern rät, die Sättigung zu ermitteln. Zu berücksichtigen ist ebenfalls eine weitere Absenkung der Intensität des Lasers durch die Dämpfung des kompletten optischen Aufbaus. Diese kann durch eine Erhöhung der Ausgangsleistung des Lasers ausgeglichen werden. In diesem Fall ist zu beachten, dass es

² Unter der Annahme, dass der Lichtfleck den Sensor komplett bestrahlt. Dies erfordert einen Strahlradius von ca. 0,56mm. Ggf. muss der kleinere Strahlradius mit einer höheren Leistung (unter Beachtung der Sättigung / Zerstörschwelle) ausgeglichen werden.

nicht zu punktuellen thermischen Überbelastungen im TGG / in der PD kommt.

5. Abschätzung der kleinsten detektierbaren Drehung

Zu bestimmen ist nun die kleinste noch detektierbare Änderung ΔP an der Photodiode, welche vom Gesamttrauschen des Systems abhängt.

Das System soll ein minimales SNR (Signal to Noise Ratio = Signal Rausch Verhältnis) von 2:1 haben. Es setzt sich aus dem Eingangssignal ΔP sowie den NEP (Noise equivalent Power = äquivalenten Rauschleistung) des Messaufbaus multipliziert mit der Messbandbreite zusammen (1.2).

$$2 = \frac{\Delta P}{(NEP_{\text{Detektor}} + NEP_{\text{Laser}}) * \sqrt{Hz}} \quad (1.2)$$

Die NEP des Detektors beträgt laut Datenblatt $3,6 * 10^{-15} \text{ Watt} * \sqrt{Hz}$. Die NEP der Lichtquelle wurde nach [1] geschätzt. Dort wurde ein 5mW Laser der Firma Linos mit einem NEP von $1,2 * 10^{-10} \text{ Watt} * \sqrt{Hz}$ vermessen. Linos gibt für seine Laser eine Performance Stability von $< 5\%$ an. Für den im Aufbau verwendeten Laser von S&K wird das Rauschen mit $< 1\%$ RMS angegeben was auf ein geringeres Rauschen schließen lässt. Linear extrapoliert ergibt sich nun ein NEP Laser 35mW von $8,96 * 10^{-10} \text{ Watt} * \sqrt{Hz}$ (genähert über den Faktor 7). Die kleinste detektierbare Leistungsänderung ΔP beträgt somit für eine Messbandbreite von 200kHz [2] $8 * 10^{-7} \text{ Watt}$. Aus der Intensitätsbestimmung ergibt sich eine Leistung von 17,5mW für die 45° Position des Polfilters. Das kleinstmögliche $\Delta\varphi$ ergibt sich nun mit (1.3)

$$\frac{17,5 * 10^{-3} \text{ W} + 8 * 10^{-7} \text{ W}}{35 * 10^{-3} \text{ W}} = \frac{P_{\text{Out}}}{P_{\text{in}}} \quad (1.3)$$

zu einem Verhältnis von $5,00023 * 10^{-1}$. Eingesetzt in (1.1) führt dies zu einem $\Delta\varphi$ von $1,30962 * 10^{-3} \text{ }^\circ$. Dies ist somit die rauschbedingt kleinste noch detektierbare Polarisationsänderung des Systems.

Maßgeblich für das Rauschen ist die Lichtquelle, wobei nach [1] Laserdioden ein geringeres Rauschen als herkömmliche He-Ne-Laser aufweisen. Es ist zu erwarten, dass die Rauschleistung der

Lichtquelle bei geeigneter Auslegung des Systems noch weiter reduziert werden kann. So gibt es von S&K speziell auf eine geringe Rauschleistung ausgelegte Laserdioden. Eine Kompensation der Intensitätsschwankungen des Lasers ist ebenso vorstellbar. Hierzu könnte der aus dem polarisierenden Strahlteilerwürfel austretenden „Reststrahl“ genutzt werden.

Zu beachten ist ferner, dass durch eine veränderte Signalauswertung ein zusätzliches Rauschen in das System gebracht werden kann.

5. Auslegung des magnetooptischen Kristalls

Der Faradayeffekt ist wegababhängig. Ziel muss es darum sein, den Laserstrahl möglichst lange parallel zu den Flusslinien im Luftspalt im Inneren des Kristalls zu führen. [3] beschreibt eine Möglichkeit. Hierbei wird die optische Weglänge durch Mehrfachreflexionen erhöht (Abb.2)

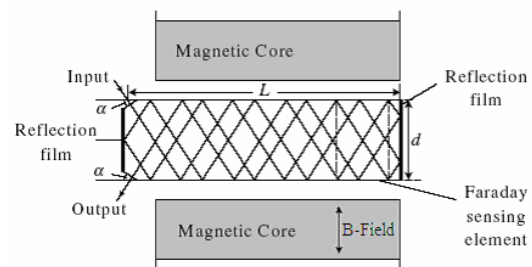


Abb. 4: Mehrfachreflexionen im TGG

Mit (1.4) führt dies zu ≈ 25 Reflexionen in einem TGG mit $30 \times 8 \text{ mm}$.

$$N = \frac{4 * L}{d} \sqrt{n_1^2 - 1} = \frac{4 * 3 * 10^{-2} \text{ m}}{8 * 10^{-3} \text{ m}} \sqrt{1,963^2 - 1} \quad (1.4)$$

Die optische Weglänge beträgt somit 200mm (1.5).

$$L_{\text{opt}} = N * d = 8 \text{ mm} * 25 \quad (1.5)$$

Hierbei gilt, dass wie in Abb.4 dargestellt, ein Teil des TGG's außerhalb des Ringkerns liegt. Für diesen Bereich wird das B-Feld und somit die Rotation der Polarisationsachse sicherlich geringer sein, dies wurde aber in 1. Näherung vernachlässigt.

6. Abschätzung des kleinsten messbaren Strahlstroms

In Kapitel 4. wurde $\Delta\varphi_{\text{min}}$ mit $1,30962 * 10^{-3} \text{ }^\circ$ bestimmt. Durch den in [4] realisierten Aufbau zur Messung des Strahlstroms mittels geteilter Flusskonzentratoren (Abb.5) werden die Abmaße des einzusetzenden magnetooptischen Kristalls festgelegt. Dies schlägt sich in der optischen Weglänge L_{opt} nieder (Kapitel 5).

³ Im Versuch „Untersuchung TGG“ wurde ein älteres Polarimeter (Perkin-Elmer Typ 241), welches eine Auflösung von 3 Digits nach dem Komma erreichte, genutzt. $\Delta\varphi$ liegt somit im Bereich des „Möglichen“.

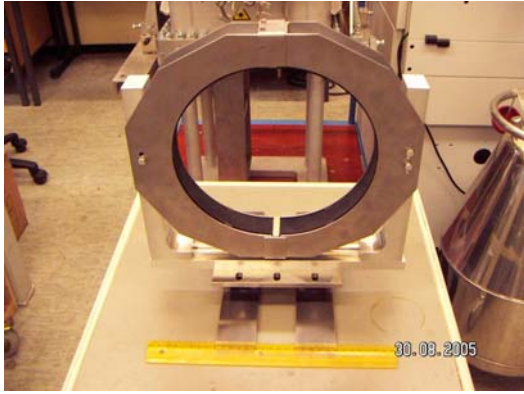


Abb. 5 Flusskonzentrator

Die Drehung der Polarisationsachse durch den Faradayeffekt lässt sich nach (1.6) bestimmen. V ist hierbei die Verdetkonstante.

$$\Delta\varphi = \vec{B} * L_{opt} * V \quad (1.6)$$

Die kleinste detektierbare B-Feld Änderung wird nach (1.7) bestimmt zu $8,53 * 10^{-7} T$.

$$\Delta\vec{B} = \frac{\Delta\varphi}{(V * L_{opt})} = \frac{1,30962 * 10^{-3} \text{°} T m}{(7678 \text{°} * 0,2 m)} \quad (1.7)$$

wobei die Verdetkonstante aus den Herstellerunterlagen gegeben ist.

Nach entsprechenden Simulationen [4] kann für den Aufbau mit geteiltem Ringkern (8mm Spaltweite) bei 1A Strahlstrom ein B-Feld von $\approx 8,46 * 10^{-5} T$ erreicht werden. Diese Ergebnisse wurden durch Testmessungen sowie der rechnerischen Näherung in [4] bestätigt. Durch die relative Permeabilität μ_r von 11,65 (Untersuchung TGG mit dem Polarimeter 241) steigert sich die magnetische Flussdichte im Luftspalt auf $\approx 9,86 * 10^{-4} T$ für 1A Strahlstrom. Rückgerechnet mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 führt dies zu einem gerade noch detektierbaren Strom im mA Bereich.

7. Untersuchung Verdetkonst. / Permeabilität

Aus der Literaturrecherche sowie den Herstellerangaben ergab sich die Verdetkonstante von Terbium-Gallium-Granat mit $143 \text{ rad} / T m = 7678 \text{°} / T m$. Dies soll nun geprüft werden. Hierzu wurde für das Polarimeter⁴ Typ 241 von Perkin Elmer eine Spule (89 Windungen) angefertigt (Abb.6). Die Mittelbohrung dient der Aufnahme des TGGs. Mit steigendem Strom wird das Magnetfeld im inneren der Spule stärker und die Drehung der Polarisationsachse des Lichtstrahls im Sensor nimmt zu.



Abb. 6: Polarimeter nach Perkin Elmer

Hierbei zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Strom und der Drehung der Polarisationsachse. Für einen Strom von 3,009 Ampere wurde beispielsweise eine Polarisationsänderung von $1,006 \text{°}$ gemessen, dies soll nun rechnerisch geprüft werden.

Das H-Feld der Spule lässt sich mit (1.8) zu $357,068 \text{ A/m}$ bestimmen.

$$\vec{H} = \frac{I * N}{L} = \frac{3,009 A * 89}{750 * 10^{-3} m} \quad (1.8)$$

Mit (1.9) führt dies zu einer Drehung von $0,086 \text{°}$ was aber nicht den Messwerten entspricht.

$$\begin{aligned} \varphi &= V * \vec{B} * L_{opt} \\ &= V * \mu_0 * \mu_r * \vec{H} * L_{opt} \\ &= 7678 \frac{\text{°}}{T m} * 1,256 * 10^{-6} \frac{H}{m} * 1 * 357,068 \frac{A}{m} * 25,08 * 10^{-3} m \\ &= 0,086 \text{°} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Da aus den Unterlagen keinerlei Informationen über die relative Permeabilität von TGG vorlagen, wurde diese mit 1 angenommen. Mit einem einfachen Magneten konnte aber nachgewiesen werden, dass das TGG eine Permeabilität > 1 haben muss. Stellt man (1.9) nun nach μ_r um zeigt sich, dass eine relative Permeabilität von 11,65 vorliegen muss (1.10).

$$\begin{aligned} \mu_r &= \frac{\varphi}{V * \mu_0 * \vec{H} * L_{opt}} \\ &= \frac{1,006}{7678 \frac{\text{°}}{T m} * 1,256 * 10^{-6} \frac{H}{m} * 357,068 \frac{A}{m} * 25,08 * 10^{-3} m} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Fehlerbetrachtung: Die Anlage wurde bei eingebauten TGG auf 0° Drehung kalibriert. Es lagen keine Standards vor. Windungszahl ± 2 was einem Feldstärkefehler von 2,25% entspricht.

8. Untersuchung der Transmission

Mittels eines Photospektrometers Hitachi U-3400 sollten die von [5] gelieferten Transmissionskurven (gemittelter Wert $\approx 79\%$ bei einer 3-4mm dicken Probe) überprüft werden. Die Transmission für den

⁴ Detektiert die Drehung der Polarisationsachse eines Prüflichtstrahls durch ein Medium

8mm sowie den 25mm Stab unterscheidet nicht sonderlich und liegt bei T (gemittelt) $\approx 68\%$ für den 25mm Stab bei 600nm, T (gemittelt) $\approx 74\%$ für den 8mm Stab bei 600nm. Somit kann die Absorption im TGG nicht der ausschlaggebende Faktor sein. Die obigen Transmissionsverluste sind eher in den Kopplungsverlusten beim Ein- sowie dem Auskoppeln durch die Reflexion R zu finden. (1.11) zeigt dies noch einmal für einen Kopplungsvorgang.

$$R = \left(\frac{n_{rel} - 1}{n_{rel} + 1} \right)^2 = 10,5\%; n_{rel} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.11)$$

Relevant ist dies vor allem dadurch, dass die Verdetkonstante temperaturabhängig ist und die maximale Leistung die eingekoppelt werden kann, absorptionsbedingt (Temperaturerhöhung) begrenzt wäre.

Fehlerbetrachtung: (1.11) ist eine Näherung für den senkrechten Einfall, im Versuch konnte dieser senkrechte Einfall des Testlichtstrahls nicht exakt geprüft werden, sodass von einem zusätzlichen Fehler für die Reflexion auszugehen ist, was die Transmissionsunterschiede erklären sollte. Die tatsächlich absorbierte Leistung im TGG beläuft sich dementsprechend auf wenige Prozent. Darum ist die Temperaturerhöhung zu vernachlässigen. Bei einer späteren exakten Auslegung des Systems sollte aber dennoch auf lokale Intensitätsmaxima im Kristall Rücksicht genommen werden.

9. Bestimmung des Brechungsindex

Mittels des Brewsterwinkels soll der Brechungsindex von TGG bei 633nm bestimmt werden. Hierzu wurde eine scheibenförmige TGG-Probe mitsamt einem Leistungsdetektor auf einem drehbaren Tisch montiert (Abb.8)

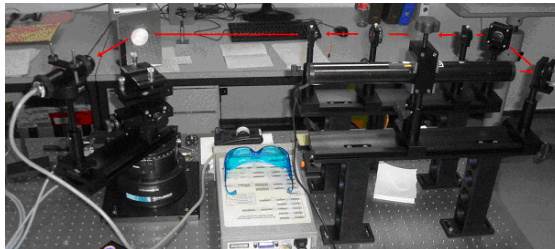


Abb. 7: Brewsterwinkel

Der horizontal polarisierte Laser hat unter dem Brewsterwinkel ein Intensitätsminimum. Dieses liegt für 633nm bei 63° was zu einem Brechungsindex von $n = 1,963$ führt.

Zur Fehlerbetrachtung: Der Sensor zeigte ein Rauschen von 10pW, das Leistungsminimum bei

633nm betrug 314,3 nW. Ein Offset durch Restlicht im Raum ging hier ebenso mit ein. Justiert wurde der Spiegel rechtwinklig zur Strahlachse über die optische Sichtlinie bzw. deren Reflexion im Spiegel. Es ist eine Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ zu erwarten.

10. Einfluss der Spaltbreite auf das System

In [4] wurde gezeigt, dass die magnetische Flussdichte im Luftspalt für eine sehr große Permeabilität des Ringkerns mit (1.12) genähert werden kann.

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \frac{I}{d} \quad (1.12)$$

Sie ist somit nur von der Spaltweite abhängig, und nicht von der Geometrie des Ringkerns. Weiterhin nimmt die Spaltweite Einfluss nach (1.4) auf die Anzahl der möglichen Reflexionen im Inneren des TGG. Je dünner die Schicht umso mehr Reflexionen entstehen. Allerdings bleibt die optische Weglänge nach (1.5) gleich. Das minimal noch detektierbare B-Feld beträgt nach Kap.6,8, $53 \cdot 10^{-7} T$. Somit ist es erstrebenswert, die Spaltweite d möglichst klein zu wählen denn dadurch steigt wiederum die mag. Flussdichte bei gleich bleibendem Strahlstrom. Das heißt, es lassen sich kleinere Strahlströme detektieren. Mittels eines erweiterten Ringkernmodells (Abb.9), welches auf Simulationen aus [4] basiert, soll dies nun untersucht werden.

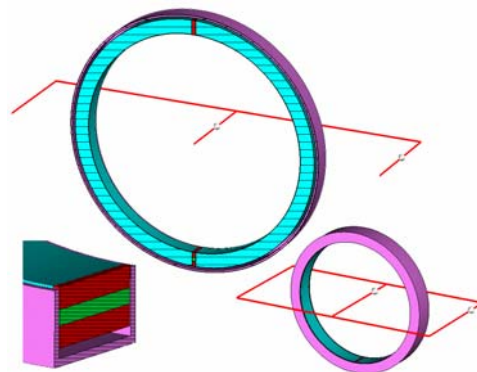


Abb. 8: Ringkernmodell Simulation

Hierzu wurde der Spalt auf beiden Seiten auf 4mm reduziert. Gleichzeitig wurde im unteren Bereich der TGG (grün) mit einer relativen Permeabilität von 11 eingefügt. Im oberen Bereich wurde der Spalt mit einem weichmagnetischen Werkstoff (rot / CMD-5005 / CMI- Ferrite) magnetisch kurzgeschlossen. μ Metall wurde für die Abschirmung (violett) eingesetzt. In Rot sind die Strompfade (Gesamtstrom 1A) dargestellt. Entlang der Mittellinie des RK wurde nun das B-Feld aufgenommen (Abb.10). Die Minima in der Kurve zeigen die Bereiche der Luftspalte an. Hierbei zeigt sich, dass

das linke Minimum (das B-Feld im oberen Luftspalt) stärker ist als im Bereich des TGG's. Dies liegt an der deutlich stärkeren Permeabilität von CMD50055. Im Bereich des unteren Luftspaltes, also im Inneren des TGG ergab die Simulation für 1A Strahlstrom ein B-Feld von $\approx 1,209 \cdot 10^{-3} T$. Nach Kapitel 6 sollte die erwartete Auflösung des Systems somit bei $\approx 0,5mA$ liegen.

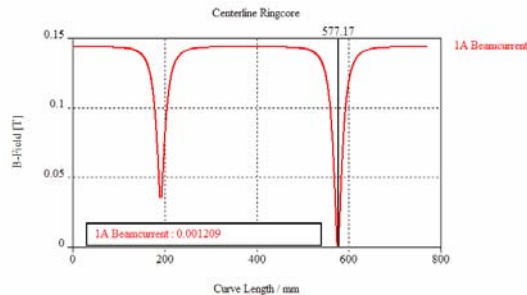


Abb. 9: B-Feld entlang der Mittellinie durch den Ringkern

Die Grenze der minimal möglichen Weite des Luftspalts lässt sich nur grob schätzen. Zu erwarten ist zum Beispiel, dass es unterhalb eines Grenzwertes zu starken Überlagerungen und Interferenzen durch die ein- bzw. ausfallende Welle an der Grenzfläche kommt.

Weiterhin sind die Effekte die beim Einkoppeln des Laserstrahls bzw. der Führung in Reflexion im Inneren des TGG's noch nicht ausreichend untersucht.

11. Ausblick

Für das oben beschriebene System wird der minimal detektierbare Strahlstrom in der Größenordnung von $\approx 0,5mA$ liegen wobei die Auflösung sich durch die Verwendung von rauscharmen Lasern bzw. entsprechenden Aufbauten weiter verbessern lässt. Als kritischster Punkt stellt sich im Moment die Optik im Bereich des TGG's da. Fragestellungen hierbei sind zum Beispiel:

- Justierung der Ein-Auskopplung
- Justage der exakten Strahlführung
- Einfluss von externen Störgrößen wie Schwingen und Feldern
- Durchmesser und Intensität des Laserstrahls
- Minimale Dicke des TGG

Im nächsten Schritt sollten diese Aufgaben untersucht werden. Ferner gilt es das obige Konzept mithilfe eines realen Aufbaus auf Tauglichkeit zu überprüfen. Um hohe Kosten bei der Anschaffung des TGGs zu vermeiden, kann hierbei auf ein billigeres Material, welches eine geringere Verdetkonstante zeigt, zurückgegriffen werden. SF-57 / Flintglas / Schott wäre zum Beispiel hierzu geeignet. Die Firma thinXXS in Saarbrücken ist nach [1] in der Lage die Bearbeitung des Kristalls vorzunehmen. Mittels der im Fachbereich Physik vorrätigen Technik (Laseroptik sowie Sensortechnik) und der von der GSI Darmstadt bereitgestellten Helmholtzspule sollte somit ein Testaufbau zur weiteren Untersuchung der Strahlführung möglich sein.

12. Quellenangaben

[1] Brenner, S.; „Ein Faseroptischer Faraday-Effekt-Positionssensor für die Interventionelle Magnetresonanztomographie“. DKfz Heidelberg, 2006

[2] persönliches Gespräch Dipl.-Ing. H. Reeg. GSI Darmstadt, 2007

[3] Yi, B.; Chu, B.C.B.; Chiang, K.S.; „Magneto-optical electric-current sensor with enhanced sensitivity“. Measurement science and Technology 13, 2002

[4] Schlörit, A.; „Entwurf, Auslegung und Aufbau von teilbaren, geschlitzten Flusskonzentratoren für Strahlstrom-Messsensorik“. GSI Darmstadt 2006

[5] Hersteller: FEE Idar Oberstein, 2006

[6] Liehr, S.; „Optical Measurement of Currents in Power Converters“. Electrical Measurement Technology report XR-EE-MST 2006:001, Stockholm 2006

[7] Hersteller: Fa. Alphas, Göttingen, 2006

[8] persönliches Gespräch Prof. Dr. H.D. Bauer. FH Wiesbaden, 2007

[9] Häpe, M.; „Magnetische Strahlstrommessung hoher Dynamik mittels optimierter magneto-resistiver (MR) Sensortechnik im GSI-FAIR-Projekt“. GSI Darmstadt, 2007

⁵ Zu beachten ist hierbei, dass in einem realen Aufbau die Grenzflächen Ringkern CMD Stück möglichst plan aufeinander liegen müssen. Inwieweit sich das mit der unebenen Bandstruktur von Vitrovac 6025F realisieren lässt, muss noch untersucht werden. Ebenso ist die Simulationsgenauigkeit in diesem Bereich durch die maximale Anzahl verfügbarer Netzzellen beschränkt.