

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: nein

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann
E-Mail: klaus.hofmann@ies.tu-darmstadt.de
Förderkennzeichen: 05P12RDRBG
Förderzeitraum: 01.07.2012 – 30.06.2015

Thema: R&D BESCHLEUNIGER: Neuartiger DC-Strahlstrom-
Transformator

Zuwendung: 146.400 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: eman.soliman@ies.tu-darmstadt.de
Zusätzlicher Name: Eman Soliman

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	Hadronen- und Kernphysik		Beschleunigerphysik
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	0		
Habilitationen:	0		
Publikationen:	4		
Konferenzbeiträge:	2		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	1		
Masterarbeiten:	2		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 01.12.2015 10:56 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Abschlussbericht

R&D BESCHLEUNIGER: Neuartiger DC-Strahlstrom-Transformator *R&D Accelerator: Novel DC-Beam Current Transformer*

Project Sponser: Projektträger DESY
 Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Principle Investigator: Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann

Zusammenfassung

Mit diesem Vorhaben wurde ein neuartiger DC Strahlstromtransformator (Novel DC Current Transformer (N-DCCT)) für den SIS 100 Beschleuniger im Rahmen des FAIR-Projekts ("Facility of Anti-proton and heavy Ion Research") konzipiert und als Prototyp implementiert. Das Grundprinzip hierbei ist es, mit einem magnetischen Sensor den magnetischen DC Fluss des Strahls zu detektieren. Die nicht-rückgekoppelte Anordnung wurde mit diskreten elektronischen Bauelementen implementiert. Als magnetischer Sensor wurde ein handelsüblicher IC verwendet. Verschiedene magnetische Sensoren, insbesondere GMR (Giant Magnetic Resistance) und TMR (Tunnelmagnetowiderstands) Sensoren, wurden analysiert und auf ihre Eignung (Funktionale und Rauschparameter) hin detailliert überprüft. Eine Testumgebung bei der GSI wurde eingerichtet um das nicht-rückgekoppelte Verhalten der Sensoren meßtechnisch zu erfassen. Das Ergebnis zeigte eine bessere Eignung der TMR im Vergleich zu den GMR-Sensoren. Der gewählte Typ TMR45F zeigte im neuartigen DC Strahlstromtransformator verbaut eine Empfindlichkeit von 1.56V/A sowie eine Auflösung von 128 μ A/ \sqrt Hz. Die durchgeführten Messungen wurden mit einem passenden DAQ System erfasst. Ein AC-Transformator ergänzt den TMR-Sensor um die gewünschte Breitbandigkeit für die Vermessung des Strahls herzustellen, von etwa 80 kHz bis in zu einigen MHz.

Darüberhinaus wurde eine geregelte Version des neuartigen DC Strahlstromtransformators implementiert. Die hierzu grundlegende Idee ist den magnetischen Fluss durch analoge Rückkopplung auf Null zu regeln, wobei der dazu notwendige elektrische Strom als leicht erfassbare Größe proportional zur Strahlintensität dient. Dieser elektrische Strom in der Rückkopplung kann über einen Widerstand (620 Ω) in eine elektrische Spannung gewandelt und mit analogen diskreten Komponenten weiterverarbeitet werden. Der rückgekoppelte elektrische Strom zur Auslöschung des magnetischen Flusses wird mit OTAs (Operational Transconductance Verstärkern) erzeugt. Die gemessene Empfindlichkeit und Auflösung dieses rückgekoppelten N-DCCTs betragen 5.02V/A and 15 μ A/ \sqrt Hz.

Für weiterführende Arbeiten werden zwei mögliche Szenarien für rückgekoppelte N-DCCTs vorgeschlagen: die erste Option könnte darin bestehen den Dynamikbereich und Sensitivität durch einen leistungsfähigeren ASIC zu verbessern, wobei der ASIC in einer rad-hard (Strahlungsharten) Technologie implementiert werden müsste. Als zweite Option erscheint es möglich über digital einstellbare Stromquellen den elektrischen Strom einzustellen, um ebenfalls den Dynamikbereich und Sensitivität gegenüber der analogen Version zu verbessern.

Bericht

❖ Einführung

Dieser Bericht stellt die Zusammenfassung und Abschlussbericht des Projekts "Neuartiger DC-Strahlstromtransformator" dar. Projektziel war einen neuartigen DC-Strahlstromtransformator für den SIS100-Beschleuniger im Rahmen des FAIR projects zu konzipieren und prototypisch zu implementieren. Das vorliegende Projekt baute auf früheren Erkenntnissen der GSI in Kooperation mit der Universität Kassel auf. In diesem ersten Projekt wurde die Architektur eines nicht-rückgekoppelten Strahlstromtransformators beschrieben, siehe Abb. 1.

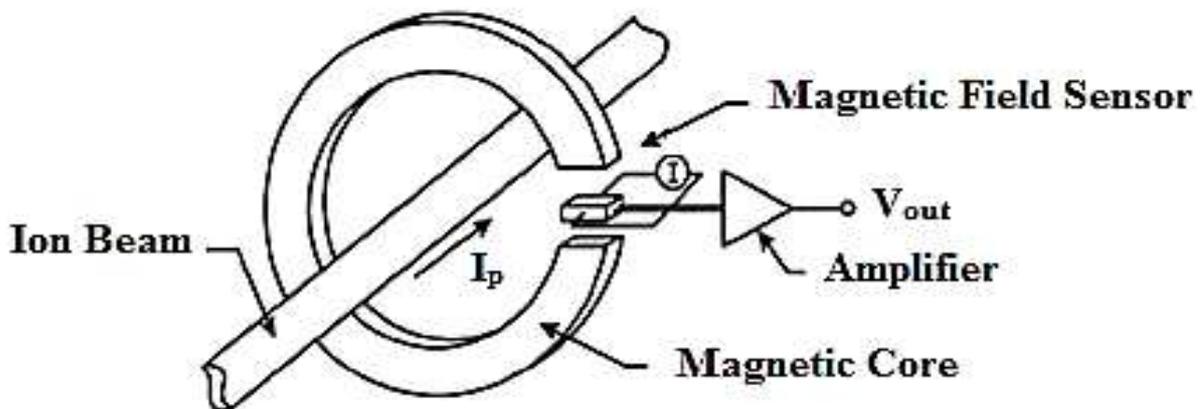


Abb. 1: Open-loop Novel DCCT Design Structure

Diese Anordnung bestand aus einem geschlitzten magnetischen Ringkern mit hoher Permeabilität, einem magnetischen Sensor und einem elektrischen Verstärker. Diese nicht-rückgekoppelte Anordnung transformierte das durch den Strahl hervorgerufene magnetische DC Feld in ein elektrisches Signal, wobei hier ein leistungsfähiger magnetischer Sensor zum Einsatz kommt. Der magnetische Ring dient zur Führung und Konzentration des azimuthalen magnetischen Flusses, der durch den Strahl hervorgerufen wird, und verstärkt somit den magnetischen Fluss am Schlitz, in den der magnetische Sensor eingebracht ist. In diesem Vorgängerprojekt wurden praktische Untersuchungen zu geeigneten magnetischen Kernen und magnetischen Sensoren durchgeführt. Als Ergebnis wurde ein magnetischer Kern bestehend aus einer bandförmigen gewickelten ferromagnetischen Legierung (VITROVAC 6025 F) mit hoher magnetischer Permeabilität gewählt. Bezüglich der Auswahl des magnetischen Sensors wurden damals anisotropische GMR-Sensoren (AMR) sowie Hall-Sensoren favorisiert, aufgrund der Tatsache der hohen Empfindlichkeit der GMR-Sensoren und deren simple Ansteuerung. Daher wurden in dem vorliegenden neuen Projekt zunächst ebenfalls GMR-Sensoren untersucht. Die folgenden Spezifikationen und Vorhaben wurden dabei festgehalten:

- Theoretische Untersuchungen (mit Systemmodellen) zur Untersuchung verschiedener Sensoren und Systemkonzepte
- Entwurf des rückgekoppelten Systems als Zielarchitektur
- Entwurf des finalen Systems als Leiterplatte
- Integration eines AC-Transformators zusammen mit dem DCCT
- Bandbreite des Systems von DC bis 20 MHz.
- Auflösung der Strahlintensität mit mind. $100 \mu A/\sqrt{Hz}$

- Untersuchungen zur Eignung eines ASICs oder diskreter Komponenten zur Implementierung.

Im folgenden sollen die Arbeitspakete und Meilensteine des Vorhabens beschrieben werden.

❖ **Arbeitspakete und Meilensteine**

1. Entwurf der N-DCCT Systemarchitektur basierend auf GMR-Sensoren

Als erstes Arbeitspaket und Meilenstein stand das grundlegende Verständnis des Gesamtsystems N-DCCT, basierend aus den Einzelkomponenten (Halbschlitz-Fluxkonzentrator mit hoher Permeabilität) und den elektrischen Komponenten auf der Leiterplatte. Es wurde der GMR-Sensor mit der höchsten Empfindlichkeit gewählt. Zusätzlich wurde ein elektrischer Verstärker zur Verstärkung des Signals eingeführt. Die Leiterplatte wurde entworfen, und simulatorisch an die übrigen Komponenten angebunden. Meßtechnisch wurde ein Permanentmagnet verwendet um Signale zu erzeugen, wobei die Ergebnisse mit denen von Hall-Sensoren verglichen wurden. Hierbei zeigte sich eine hohe Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis.

2. Testen der neuartigen Tunnel MR Sensoren

Mit diesem Vorhaben wurde 2013, fünf Jahre nach Beendigung des Vorgängerprojekts begonnen. Seit 2008 gab es signifikante Fortschritte bei kommerziellen MR Sensoren, insbesondere durch die Einführung von TMR Sensoren. Es schien daher naheliegend diese neue Typen in das Konzept einzubeziehen, da diese eine höhere Empfindlichkeit sowie bipolares Verhalten gegenüber GMR-Sensoren versprachen. Kommerzielle TMR-Sensoren sind seit 2010 verfügbar, innerhalb dieses Vorhabens wurden verschiedene Typen erworben und auf Leiterplatten integriert getestet. Die höhere Empfindlichkeit der TMR gegenüber den GMR-Sensoren wurde bestätigt..

3. Testen des nicht-rückgekoppelten N-DCCTs

Als nächsten Schritt wurde das Gesamtverhalten des nicht-rückgekoppelten N-DCCTs mit TMR-Sensor (sowie auch mit GMR-Sensor) anhand eines bei der GSI implementierten Prototypen evaluiert. In den Schlitz des magnetischen Führungsringes wurde eine Leiterplatte mit MR-Sensor eingebracht, ein stromdurchflossener Draht simulierte den Strahlstrom. Das Gesamtsystem wurde in ein metallisches Gehäuse eingebracht, um vor äußeren magnetischen Einflüssen geschützt zu sein. Der erste Test wurde nur mit einer Leiterplatte durchgeführt, bei einem zweiten Test wurden zwei Leiterplatten jeweils in den oberen und unteren Schlitz des Rings eingebracht. Ein DC-Strom von ± 0.28 A wurde mit Hilfe eines Labornetzgeräts erzeugt. Die beiden Sensortypen (GMR und TMR) arbeiteten beide wie geplant und Messungen konnten durchgeführt werden. Das TMR-Sensormodell „TMR45F“ zeigte hierbei die höchste Empfindlichkeit. Die nicht-rückgekoppelte N-DCCT Empfindlichkeit betrug im Fall, dass ein einzelner TMR-Sensor genutzt wird 0.566 V/A sowie 1.5 V/A bei Nutzung von zwei Sensoren in den beiden Luftspalten des Ringkerns.

4. Rauschanalyse des nicht-rückgekoppelten N-DCCTs

Um die effektive Auflösung des nicht-rückgekoppelten N-DCCTs zu bestimmen, wurde eine Rauschanalyse durchgeführt, wobei im Fokus die MR-Sensoren standen. Beide Sensortypen rauschen intrinsisch durch elektrische und magnetische Eigenschaften. Diese Rauscheigenschaften und -ursachen sind denen in elektrischen Halbleitern sehr ähnlich, und können daher mit thermischen, Schrot- und 1/f-Rauschen gut beschrieben und modelliert werden.

Das entstehende magnetische Rauschen ist ebenfalls vom externen angelegten magnetischen Feld abhängig. Eine detaillierte Untersuchung wurde durchgeführt und zeigte dass das Schrotrauschen bei TMR-Sensoren dominanter als bei GMR-Sensoren ist, was zu stärker rauschbehafteten TMR-Sensoren führt. Diesen theoretischen Überlegungen folgten praktische Analysen die diese Ergebnisse bestätigten. Um jedoch zu einem abschliessenden Urteil zukommen musste ein „Detektionsfaktor“, definiert als Verhältnis des Ausgangsrauschens bezogen auf die spektrale Dichte und der Empfindlichkeit des Sensors, bestimmt werden. Dieser Faktor wurde auch meßtechnisch erfasst. Ein niedriger Wert bedeutet eine höhere Empfindlichkeit bezüglich eines magnetischen Felds. Da TMR-Sensoren eine höhere Ausgangsspannung gegenüber GMR-Sensoren aufweisen, resultiert dies in einem niedrigeren Detektionsfaktor. Als Beispiel wurde für eine Teststrom eines Drahtes von $128 \mu\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ für den TMR45F Sensor ein Detektionsfaktor von $16\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei DC bestimmt. Dieser Detektionsfaktor bestimmt die Auflösung des nicht-rückgekoppelten N-DCCTs, da er direkt den kleinsten bestimmbareren Strom angibt.

5. Entwurf und Implementierung des rückgekoppelten N-DCCT

Ein Hauptziel des Projekts war der Entwurf eines N-DCCTs basierend auf dem „Zero Flux“-Prinzips. Das Konzept ist ähnlich dem von kommerziellen DCCTs, verwendet jedoch eine Modulationstechnik. Das „Zero Flux“-Prinzip wird erreicht durch Erzeugung eines Feedbacksignals in eine Windung eines Transformators, wobei das so erzeugte magnetische Feld des ursprüngliche Feld kompensiert. Der hierfür notwendige Strom ist eine direkt meßbare Größe des so kompensierten magnetischen Felds, ggfs. skaliert durch die Windungen des Transformators. Die Architektur des neuen Systems wird in Abb. 2 gezeigt. Zur Implementierung dieses Systems werden ausschliesslich kommerzielle elektronische Bauelemente verwendet. Mittels eines OTAs (operational transconductance amplifiers) wird der Strom aus einer Spannung erzeugt. Die N-Windungen des Transformators werden mit einem kleinen elektrischen Widerstand abgeschlossen. Diese dort anfallende elektrische Spannung dient als präziser Meßwert des kompensierten magnetischen Felds.

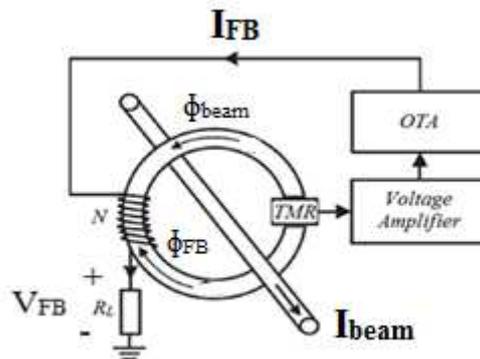


Abb. 2: Proposed Closed-loop N-DCCT Structure

Eine Leiterplatte mit den elektronischen Komponenten wurde entworfen und in Betrieb genommen. Die somit gemessene Sensitivität des rückgekoppelten N-DCCTs beträgt 5.02V/A .

6. Integration des AC-Transformators in den N-DCCTs

Ein weiteres Projektziel war der Entwurf eines Stromtransformators zur Messung der Strahlintensität mit hoher Bandbreite, von DC bis 20 MHz. Die MR Sensoren können bis ca. 80 kHz verwendet werden, für darüber liegende Frequenzen fällt die Ausgangsamplitude eines TMR-Sensors erheblich ab. Für höhere Frequenzen wurde daher ein AC Transformator verwendet, dessen Windungen um den magnetischen Kern angebracht wurden.

7. Setup des Datenerfassungssystems

Echtzeitmessungen des Strahlstroms wurden durch Anpassung eines kommerziellen, drahtgebundenen Datenerfassungssystems (DAQ) im Messtunnel vorgenommen. Hierfür fand auch eine bei der GSI entwickelte Software (Front-End Software Architecture, FESA) Anwendung. Durch das DAQ können die Meßwerte erfasst und gespeichert werden.

❖ Projektergebnis

Ein erstes wesentliches Ergebnis des Forschungsprojekts ist der Nachweis der Verwendbarkeit von Tunneling-Magneto-Resistance Sensoren (TMR) für den skizzierten Anwendungsfall eines DC- Strahlstromtransformators. Mithilfe einer eigens konzipierten Verstärkerschaltung konnten verschiedene GMR- und TMR-Sensoren einheitlich charakterisiert und der optimale Sensortyp ermittelt werden. Mithilfe der nicht-rückgekoppelten Schaltung wurde für ein System aus zwei TMR Sensoren in den beiden Luftspalten eines geschlitzten ferromagnetischen Ringkerns die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen, wobei der Zielwert von $100 \mu\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ deutlich unterschritten wurde. Anhand von theoretischen Untersuchungen zum Rauschverhalten der unterschiedlichen Sensortypen wurde der Detektionsfaktor als wesentlicher Optimierungsparameter ermittelt und die Detektionsfaktoren verschiedener Sensoren experimentell bestimmt. Der Aufbau eines stabilen gegengekoppelten Systems, basierend auf Operational Transconductance Amplifiers (OTA) bestätigte die zuvor durchgeführten Schaltungssimulationen. Mit diesem Prototyp eines N-DCCT konnte eine Sensitivität von $5,02 \text{ V/A}$ bei einer Auflösung von $15 \mu\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreicht werden. Die ursprünglich anvisierte elektronische Integration des AC-Zweiges konnte nur im Rahmen von Simulationsrechnungen behandelt werden. Das Hauptziel der Entwicklung eines funktionsfähigen Novel DCCT Prototyps innerhalb der technischen Spezifikationen wurde damit vollständig erreicht, und das Projekt konnte mit gutem Erfolg abgeschlossen werden. Der vorliegende Prototyp bildet nach weiterer Detailausarbeitung eine geeignete Grundlage für den Einsatz als Intensitätsmessinstrument in einem Teilchenbeschleuniger.

❖ Weiterführende Arbeiten

Das Projektteam denkt über weiterführende Arbeiten hinsichtlich einer ASIC-Implementierung der Elektronik zur weiteren Erhöhung der Sensitivität bzw. der Implementierung von digital gesteuerten Stromquellen nach und hat hierfür einen weiteren Antrag im Rahmen einer deutsch-ägyptischen Forschungsinitiative gestellt.

Veröffentlichungen

1. Eman Soliman, Klaus Hofmann, Hansjörg Reeg and Marcus Schwickert, "Sensor Studies for Novel DC Current Transformer Application," Proceedings of International Beam Instrumentation Conference 2014, September 2014, pp. 624-628
2. Shehzaad Saleem "Design of a PCB for Novel- DC Current Transformer (N-DCCT) Project," Seminar: Integrated Electronic System Design Information and Communication Engineering, June 2014
3. Iván Felipe Martínez Valencia, "Noise Analysis of Magneto-Resistance Sensors," Seminar: Integrated Electronic System Design Information and Communication Engineering, April 2015
4. William Cibille, "Design of an AC Transformer for the FAIR facilities" Master Thesis, August 2015
5. Niranjana Jayakumar, "PCB Design of OTA based closed loop Novel DC Current Transformer," Seminar: Integrated Electronic System Design Information and Communication Engineering, August 2015
6. Suraj Kodihalli, "Design of digital feedback control loop for N-DCCT," Seminar: Integrated Electronic System Design Information and Communication Engineering, August 2015
7. Robin Sinha, "Design of Linear Operational Transconductance Amplifier for Novel Direct Current-Current Transformer" Master Thesis, September 2015
8. Iván Felipe Martínez Valencia, "Noise Analysis for Closed loop Novel DC Current Transformer," Bachelor Thesis, October 2015
9. Eman Soliman, Klaus Hofmann, Hansjörg Reeg and Marcus Schwickert, "Noise Study of Open-loop Direct Current-Current Transformer using Magneto-Resistance Sensors," Sensor Application Symposium, Italy 2016 (submitted for review)