

Modernisierung der Strahlpositionsregelung am Bonner Isochron Zyklotron

Béla D. Knopp

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

März 2022

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn, 28.03.2022
Datum


.....
Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. R. Beck
2. Gutachterin: Priv.-Doz. Dr. E. Soergel

Danksagung

Diese Arbeit ist nicht nur das Produkt meiner Anstrengungen, sondern auch die Anderer. Im Folgenden möchte ich einigen Personen danken, die diese Arbeit erst möglich gemacht haben, mir im Laufe des Projekts immer wieder neue Dinge beigebracht haben und mir bei Problemen verschiedener Art geholfen haben:

- Dennis Sauerland für die Betreuung auf Augenhöhe und das Vertrauen, meine eigenen Ansätze und Ideen in das Projekt einbringen zu dürfen.
- Maximilian Loepke für viele Stunden der Elektroniklehre und die Geduld bei Schwierigkeiten.
- Pascal Wolf, der mir bei jeglicher Frage zur Programmierung weitergeholfen hat und mich mit seiner Motivation und Expertise dafür begeistert hat.
- Prof. Dr. R. Beck für die Betreuung und Ermöglichung dieser Arbeit.
- Priv. Doz. Dr. E Soergel für die Übernahme der Zweitkorrektur.
- Der gesamten Arbeitsgruppe des Zyklotrons für die Möglichkeit an der Maschine selbst arbeiten zu können und die tolle Zeit, die ich trotz der Pandemie hier verbringen durfte.

Die obige Liste ist noch um einige Namen erweiterbar, auch diesen Leuten soll hiermit gedankt sein. Im Besonderen möchte ich meinen Eltern danken, welche trotz Fachfremdheit immer ein offenes Ohr für Probleme hatten sowie meinem ehemaligen Physik- und Klassenlehrer Matthias Borchardt, der in mir die Begeisterung für Physik geweckt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Strahllageregelung	3
2.1	Prinzip der Strahllagestabilisierung	3
2.2	Derzeitige Regelung	4
2.3	Arbeitsweise und Nachteile	5
3	Implementierung einer digitalen Regelung	6
3.1	Hardware	6
3.1.1	Schlitze	6
3.1.2	Korrektur-Magnete	7
3.1.3	Strom-Spannungs-Wandlung	7
3.1.4	Die Arduino-Plattform	8
3.1.5	Pegelwandler	10
3.1.6	Zusammengesetzte Schaltung der Pegelwandlung	11
3.2	Software	13
3.2.1	Regelung	13
3.2.2	Digitaler PI-Regler	15
3.2.3	Kommunikationslayout	17
3.3	Gesamtaufbau der modernisierten Regelung	18
4	Verifizierung der Regelungsfunktion im Strahlbetrieb	19
4.1	Schlitzzstellung und Strom-Spannungswandlung	19
4.2	Regelungstest	22
5	Fazit und Ausblick	26
A	Tabellen mit Rohdaten	28
	Literatur	31
	Glossar	33
	Abbildungsverzeichnis	34
	Tabellenverzeichnis	35

Einleitung

Teilchenbeschleuniger haben Anfang des 20. Jahrhunderts einen neuen Fachbereich der Physik begründet. Sie sind unabdinglich bei der Erforschung von Elementarteilchen und finden Anwendung in der Medizin und Technik. Dabei wurden über die Zeit verschiedene Beschleunigertypen entwickelt, welche durch ihre charakteristischen Eigenschaften (z.B. die beschleunigte Teilchenart, ihre Energie und der Strahlstrom) in unterschiedlichen Bereichen Verwendung finden. An Kreisbeschleunigern beispielsweise werden Teilchen in vielfachen Umläufen kontinuierlich beschleunigt, wodurch hohe Energien erreicht werden können. So beschleunigt der LHC am CERN¹ [1] Protonen auf bis zu 7 TeV um die Physik subatomarer Teilchen zu erforschen. Andere Arten sind beispielsweise Linearbeschleuniger, welche meist als Vorstufe zu Kreisbeschleunigern dienen, oder Zyklotrone. Letztere erreichen nicht so hohe Energien wie Kreisbeschleuniger, sondern beschleunigen Protonen oder schwerere geladene Atome auf kinetische Energien im MeV-Bereich. Hier finden sie durch ihre kompakte Bauweise vor allem Anwendung in der Kernforschung und Medizin.

Eine weitere Anwendung ist der Test strahlenresistenter Detektoren für Experimente der Hochenergie-Physik. So werden am Bonner Isochron Zyklotron [2] mit Hilfe eines Protonenstrahls von 14 MeV und etwa 1 μ A Strahlstrom Siliziumchips auf ihre Strahlenhärte überprüft. Hierbei kann die über Jahre akkumulierte Strahlendosis während ihres Betriebs innerhalb von wenigen Stunden appliziert werden. Dazu wird der Detektor vom Strahl möglichst homogen bestrahlt. Diese Anwendung setzt zeitlich konstante Strahleigenschaften, wie Position oder Strahlstrom, des Zyklotrons voraus. Diese können jedoch zum Beispiel durch Magnetfeldschwankungen in einzelnen Strahlführungselementen und Variation in der elektrischen Feldstärke, welche zur Strahlbeschleunigung verwendet wird, negativ beeinflusst werden. Zum Ausgleich dieser Schwankungen kommen daher Strahllageregelungen zum Einsatz.

Als Teil dieser Arbeit und im Rahmen der generellen Modernisierung des Bonner Isochron Zyklotrons wird die erste Strahlpositionsregelung nach der Extraktion digitalisiert und verbessert. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst die Komponenten der derzeitigen Regelung vorgestellt und im Folgenden in Kapitel 3 die überarbeiteten Komponenten beschrieben.

Zusätzlich dazu soll ein grundlegendes Regelungsmodul konzipiert werden, welches auch bei anderen Regelungsaufgaben Verwendung finden kann. Dazu werden zunächst die Komponenten der aktuell verwendeten analogen Regelung vorgestellt und mögliche Ansatzpunkte für Verbesserungen eruiert. Darauf

¹ Ausgeschriebene Abkürzungen: Large-Hadron-Collider am Conseil européen pour la recherche nucléaire

aufbauend wird das Prinzip einer neuen digitalen Strahlregelung vorgestellt und die Einsatzfähigkeit dieser Regelung anhand von Testmessungen mit einem ersten Prototypen demonstriert.

Die Strahllageregelung am Bonner Isochron Zyklotron

Die Beschleunigeranlage um das Bonner Isochron Zyklotron [2] besteht, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, aus dem eigentlichen 6-sektorigen Isochron-Zyklotron und sechs Strahlwegen, welche dauerhafte Experimentieraufbauten ermöglichen. Der Strahl besteht dabei meist aus Protonen, Deuteronen oder α -Teilchen mit 7 bis 14 MeV pro Nukleus, aber auch schwereren Kernen bis $^{12}\text{C}^{4+}$. Zur Erzeugung des Teilchenstroms wird eine **Electron Cyclotron Resonance-Quelle** (ECR-Quelle) verwendet. Mittels einer Niedrigenergiestrahlführung werden die Teilchen sodann vertikal in die Mitte des Zyklotrons injiziert, wo sie zunächst in die Beschleunigungsebene gelenkt werden. Nach der Beschleunigung auf genannte Energien wird der Strahl in die Hochenergiestrahlführung extrahiert und zu den Experimenten geleitet. Damit der Strahl dabei auf der gewünschten Position bleibt, werden Strahlpositionsregelungen verwendet. Die grundlegende Idee, die Umsetzung sowie resultierende Problematiken, welche diese mit sich bringen, werden im Folgenden kurz erläutert. Letztere dienen als Motivationsgrundlage für eine Modernisierung der Regelungsumsetzung.

2.1 Prinzip der Strahllagestabilisierung

Die Lageregelung des Strahls, zu sehen in Abbildung 2.2, nach der Extraktion wird in verschiedenen Funktionselementen durchgeführt. Zunächst wird die Strahlposition mit Hilfe von zwei Schlitzbacken gemessen, welche von links und rechts bzw. oben und unten in den Strahl gefahren werden. Durch Auftreffen eines Teils der Strahlteilchen auf die elektrisch isolierten Schlitzbacken kann ein Strom gemessen werden und so, unter Annahme einer radialsymmetrischen transversalen Ladungsverteilung des Strahl, die Strahlposition bestimmt werden. Die gemessenen Ströme liegen hierbei im mehrstelligen nA-Bereich.

Um die gewonnene Information verarbeiten zu können, wird der durch die auftreffenden Strahlteilchen erzeugte Strom in eine Spannung der Größenordnung 10 V umgewandelt (IU-Wandlung). Aus den beiden Spannungswerten wird nun eine Regelgröße ermittelt. Hierbei bietet sich beispielsweise die Bildung der Differenz an. Ist diese Null, so passiert der Strahl mittig, ist der Wert ungleich Null, so ist der Strahl horizontal bzw. vertikal verschoben.

Eine Regelung berechnet ein Ausgangssignal, welches wiederum ein spannungsgeregeltes Netzgerät ansteuert. Dieses verändert, entsprechend der Strahlposition, die Magnetfeldstärke eines Korrektur-

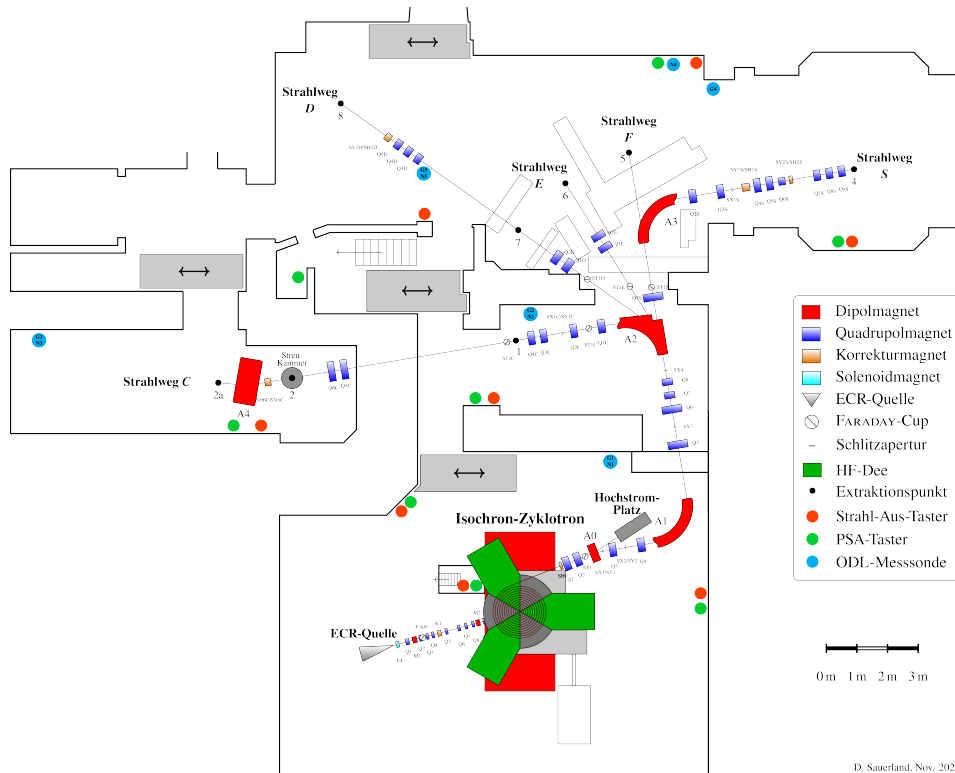


Abbildung 2.1: Ein Übersichtsplan des Bonner Isochron Zyklotrons. Entnommen aus [2].

Magneten und lenkt den Strahl somit dargestellt ab, sodass dieser mit der gewünschten Position durch die Schlitze propagiert.

Um die Strahlage, d.h. die Position *und* den Winkel des Strahls für die nachfolgende Hochenergiestrahlführung zu stabilisieren, werden für horizontale und vertikale Ebene je zwei Schlitze mit je einem eigenen Korrektur-Magneten und Regler verwendet.

2.2 Derzeitige Regelung

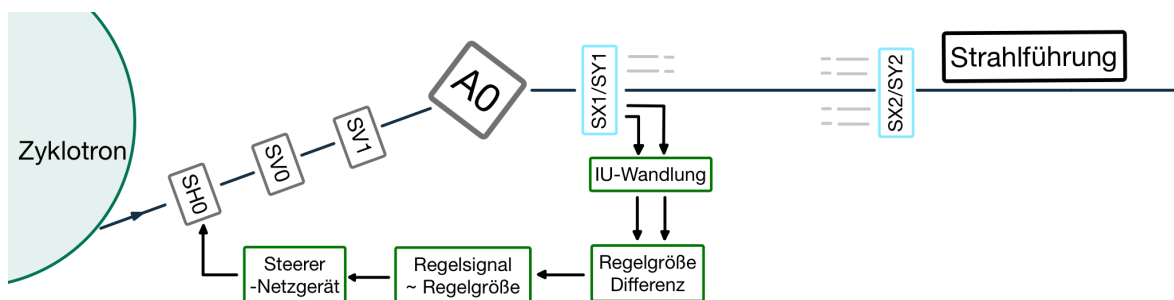


Abbildung 2.2: Schematische Zeichnung der Schlitzanordnung und Regelung.

Am Bonner Isochron Zyklotron sind die einzelnen Funktionselemente der Strahllageregelung verschieden positioniert. Dies ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die besagten Schlitze und Korrektur-Magnete, welche in der Realität Zusatzwicklungen um die fokussierenden Quadrupol-Magnete sind, befinden sich in der Hochenergie-Strahlführung. Alle anderen Komponenten werden von Operateuren lokal im Kontrollraum bedient.

Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, bilden 2 Schlitze, aufgeteilt in 1 Schlitzpaar mit je einem Korrektur-Magneten, eine Regelungseinheit. Der abgegriffene Strahlstrom wird über etwa 50 m Kabel bis zur verstärkenden IU-Wandlung geführt und in eine Spannung von 0 bis 10 V umgewandelt¹. Der Stromwert, welcher nach der Wandlung 10 V entspricht, kann per Drehknopf zwischen 7 verschiedenen von 10 bis 10 000 nA eingestellt werden.

Wie in Abbildung 2.2 zu sehen, ist die Regelgröße die Differenz der gebildeten Spannungen. Es ist außerdem auffällig, dass die messenden Schlitze nach beiden korrigierenden Magneten positioniert sind. Daher beeinflussen sich die eigentlich unabhängigen Regelungen gegenseitig. Um eine gewisse Entkopplung einer Ebene zu erreichen, werden unterschiedliche Zeitkonstanten der Größenordnung Sekunde verwendet.

2.3 Arbeitsweise und Nachteile

Die analoge Umsetzung bringt dabei einige Nachteile mit sich, welche teilweise nur recht aufwendig behebbar sind.

- Die Regelungsparameter werden durch elektrische Bauteile definiert, welche auf Grund ihrer Größe nur begrenzt einbaubar sind und so die Möglichkeit zur schnellen Variation der Regelparameter verhindern.
- Das Verhalten der Regelung ist abhängig vom Strahlstrom. Die Regelgröße der Differenz ist proportional dazu und beeinflusst somit die Amplitude der Regelung entsprechend.
- Bricht der Strahlstrom ein, so führt dies zu einem Null-Signal und einem Aussetzen der Regelung. Setzt der Strahl wieder ein, so muss er erneut in die korrekte Strahllage gelenkt werden.

All diese Probleme, ihre Ursache und Behebung werden im Verlaufe der Arbeit noch einmal aufgegriffen und im Detail erklärt.

¹ Da die Strahlteilchen ausschließlich positive Ladung tragen, sind auch die gemessenen Ströme immer vom gleichen Vorzeichen.

Implementierung einer digitalen Regelung

Der Aufbau einer modernisierten Regelung mit digitalen Ansatz erfordert einige grundlegende Überlegungen bezüglich der Anforderungen an die Regelung wie Regelgeschwindigkeit, die Wahl einer Regelgröße und der Regelkonstanten¹ sowie Ansteuerung der Netzgeräte.

Dazu werden im folgenden Abschnitt 3.1 zunächst verwendete Hardware-Komponenten vorgestellt, welche Teil der Modernisierung sind. Dazu gehört eine digital ansteuerbare Strom-Spannungswandlung sowie die Microcontroller, in welchen der digitale Regler implementiert wird und benötigte Schaltkreise. Ein digitaler Ansatz erfordert entsprechend Programmierung und algorithmische Umsetzung von zuvor analogen Schaltungen. Diese Software, welche zusammen mit der zuvor beschriebenen Hardware fungiert, wird im entsprechenden Abschnitt 3.2 erläutert. Abschließend gibt Abschnitt 3.3 einen Überblick über die Funktionsweise dieses ersten Prototypen der Regelung.

3.1 Hardware

Zunächst soll die modernisierte Hardware beschrieben werden. Hierbei wird der regelungstechnische Ansatz aus Abschnitt 2.1 nicht verändert, sondern nur die Umsetzung verfeinert und modernisiert.

3.1.1 Schlitze

Die sogenannten Schlitze sind übliche Bauteile in der Beschleunigerphysik. Sie bestehen aus zwei identischen leitenden Metallbacken², welche es, durch heranzufahren von zwei Seiten an den Strahl, möglich machen seine Position zu messen, indem der durch den auftreffenden Teilchenstrom erzeugte Strom gemessen wird. Dabei geht man davon aus, dass der Strahl eine rotationssymmetrische Ladungsdichteverteilung senkrecht zur Flugrichtung aufweist, sodass durch ein symmetrisches Einfahren der Schlitzbacken zur Strahlrohrmitte³ eine entsprechende Positionsabweichung⁴ des Strahls dazu gemessen werden kann.

Die Schlitze können dabei in einem Intervall von 0 bis 12 mm bezüglich der Strahlrohrmitte positioniert

¹ Die geregelte Größe und die Parameter zur Berechnung.

² Diese sind elektrisch isoliert und so dick, dass auftreffende Strahlteilchen in dieser gestoppt werden.

³ Der Bezugspunkt kann auch von der Mitte abweichen, wenn dementsprechend eingestellt.

⁴ Die Position entspricht dem transversalen Ladungsschwerpunkt.

werden, um die vom Strahl getroffene Fläche zu justieren. Für den Strom $I_{L/R/U/D}$ (left, right, up, down) an einem linken/rechten/oberen/unteren Schlitz gilt dann

$$I_{k,\alpha} = \alpha_k \cdot I_{\text{Strahl}} \quad \text{mit } 0 \leq \alpha \quad \text{und } k = L, R, U, D, \quad (3.1)$$

wobei α den Anteil am Strahlstrom bezeichnet. Um dem Strahl möglichst wenig Teilchen zu entnehmen, ist α meist im Bereich weniger Prozent. Basierend auf der beschriebenen Annahme ist α ausschließlich abhängig von der Strahl- und Schlitzposition.

3.1.2 Korrektur-Magnete

Um den Strahl ablenken und seine Position steuern zu können, werden Elektromagnete verwendet. Die beschleunigten geladenen Teilchen sind in deren Magnetfeldern der LORENTZkraft ausgesetzt und werden abgelenkt [3, S. 89 f.]. Der Ablenkwinkel kann durch Einstellung von Magnet- bzw. Stromrichtung und -stärke bestimmt werden.

Da Elektromagneten effektiv Spulen sind, welche durch das Prinzip des stromdurchflossenen Leiters ein Magnetfeld aufbauen, steigt der elektrische Widerstand bei größer werdenden Anregungsfrequenzen an und begrenzt die mögliche Bandbreite mit der diese Korrektur-Magnete angesteuert werden können auf einige Kilohertz. Dies limitiert somit die Geschwindigkeit mit der der Strahlstrom abgelenkt werden kann. Angesteuert werden die Korrektur-Magnete von Steerer-Netzgeräten, welche eine Spannung von -10 bis 10 V in einen proportionalen Strom umwandeln.

3.1.3 Strom-Spannungs-Wandlung

Für die Strom-Spannungs-Wandlung⁵ wird das sogenannte *Readout-Board*, basierend auf [4, Abschnitt 3.3.2, S. 13 - 16], verwendet. In dieser Anwendung werden hierbei vier Eingänge benutzt, wobei jeweils zwei für ein Schlitzpaar verwendet werden. Für diese zwei Paare können getrennt Verstärkungsfaktoren eingestellt werden, welche mit $v = 10, 50, 100, 500, 1\,000, 5\,000$ und $10\,000$ nA/5V nahe an den bisher verwendeten $10, 30, 100, 300, 1\,000, 3\,000$ und $10\,000$ nA/10V liegen. Wichtig bei Verstärkung von Strömen dieser Größenordnung ist ein relativ dazu geringes Eingangsrauschen und kleinen Biasstrom der verwendeten ICs, dies wurde in diesem Fall durch den Einbau von Bauteilen entsprechender Eigenschaften berücksichtigt.

Die Strom-Spannungs-Wandlung gibt dann die Spannung

$$U_k(I_{k,\alpha}, v) = \frac{1}{v} \cdot I_{k,\alpha} \quad (\text{s. Gleichung (3.1)}) \quad (3.2)$$

in Abhängigkeit des Eingangsstroms I und des gewählten Verstärkungsfaktors v aus. Die ausgegebene Spannung liegt dabei in einem Intervall von 0 bis 5 V. Die Einstellung der Verstärkungsfaktoren erfolgt dabei via I²C-Protokoll⁶ und einen entsprechenden Controller auf dem Board. Der benötigte Aufbau wird im Abschnitt 3.2.3 näher erläutert. Eine weitere wichtige Eigenschaft dieses Boards ist das geringe Eigenrauschen und kleine Bias-Ströme⁷ der verwendeten ICs.

⁵ Basierend auf den physikalischen Buchstaben I und U für Strom und Spannung auch als IU-Wandlung bezeichnet.

⁶ I²C (Inter-Integrated Circuit) ist ein serielles Protokoll zur Verbindung integrierter Schaltkreise auf einer Platine [5].

⁷ Entgegen der idealisierten Annahme, fließen in einem Operationsverstärker immer kleine Ströme, welche zu einer Spannungsdifferenz zwischen den Eingängen führt (s. Abschnitt 3.1.5) [6].

3.1.4 Die Arduino-Plattform

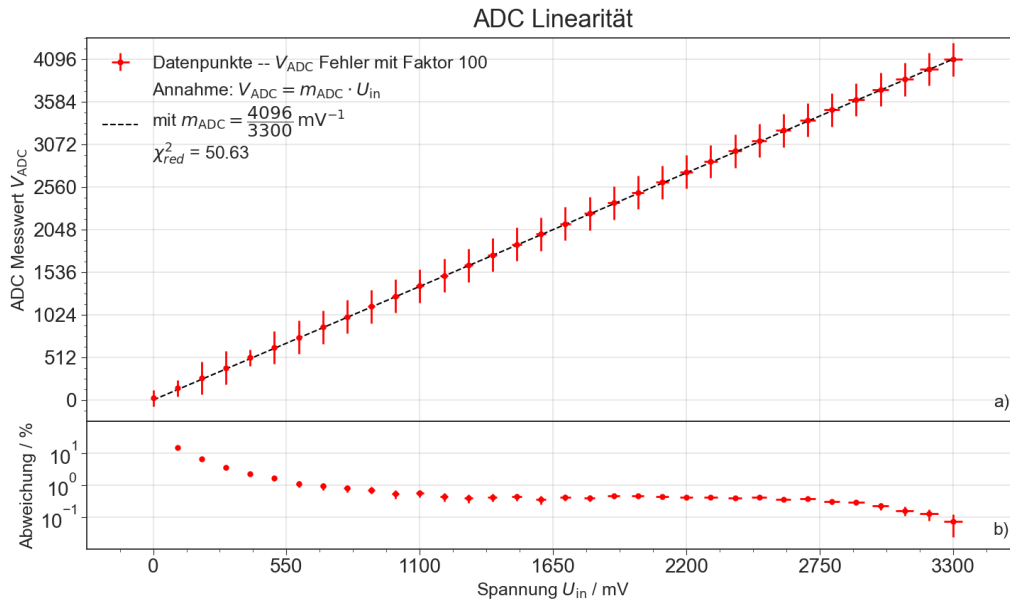


Abbildung 3.1: Überprüfung der Linearität des Analog-Digital-Wandlers des Arduino Due. Unterabbildung a) zeigt die Übereinstimmung mit der theoretischen linearen Annahme, b) die prozentuale Abweichung davon. Die Rohdaten sind in Tabelle A.1 im Anhang einzusehen.

An vielen Stellen soll die derzeitige Umsetzung digitalisiert werden. Hier wurde auf verschiedene Boards der Arduino-Plattform⁸ gesetzt. Im Detail wird dabei jetzt auf den Arduino Due [8] eingegangen, welcher als grundlegender Teil der neuen digitalen Regelung auftritt. Sein 32-bit ARM-Prozessor SAM3X [9] mit einer Taktrate von bis zu 84 MHz ermöglicht die schnelle Verarbeitung und Ausgabe von Daten über Analog/Digital-Schnittstellen. Dazu gehört ein 12-Kanal-Analog-Digital-Wandler (ADC) [9, S. 1317 ff.] und ein 2-Kanal-Digital-Analog-Wandler (DAC)⁹ [9, S. 1355 ff.]. Diese wurden mit Hilfe des verwiesenen Datenblattes so konfiguriert, dass diese an den oberen Grenzen der möglichen Abtastrate operieren. Dabei sind jeweils etwa 2 MHz Samplingrate bei einer Auflösung von 12-bit, also 4095 diskreten Werten, erreicht worden. Messdaten bezüglich der Geschwindigkeit werden dabei ausschließlich für das Gesamtsystem der Regelung im entsprechenden Abschnitt 4.2 vorgestellt.

Neben der Geschwindigkeit ist auch die Linearität der Ein- und Ausgabe relevant – der eingelesene Wert sollte linear mit dem angelegten Spannungswert zusammenhängen. Der ADC des Arduino Due kann Spannungswerte im Intervall 0 bis 3 300 mV digitalisieren, der DAC eine Spannung von 550 bis 2 750 mV analog ausgeben. Die Daten bezüglich der entsprechenden Messungen sind in den Abbildungen 3.1 und 3.2 zu sehen. Auffällig ist zunächst Übereinstimmung mit der angenommenen Gerade,

⁸ Eine quelloffene Elektronik-Plattform, welche benutzerfreundliche Software und Hardware bereitstellt [7].

⁹ ADC/DAC sind elektronische Bauteile, welche als Schnittstelle zwischen analogen und digitalen Signalen dienen. Der ADC wandelt hierbei analoge Spannungen linear in entsprechende digitale Bit-Werte um, wohingegen ein DAC Bit-Werte in analoge Spannungen konvertiert.

wobei allerdings die Fehler der Datenpunkte diese nicht einschließen. Dies liegt an den kleinen Fehlern auf die Messwerte, welche aus der Spannungsquelle beim ADC und -messgerät beim DAC resultieren. Eine genauere Betrachtung liefert die prozentuale Abweichung. Diese zeigen auf, dass vor allem bei Spannungen über 500 mV die Abweichungen unter 1 % sinken. Analog zu vorheriger Beobachtung schließen die Messfehler jeweils nicht die theoretische Annahme ein. χ_{red}^2 von deutlich über 1 stützen diese Aussage quantitativ. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die digitale-analog Schnittstellen in der Realität keine linearen Zusammenhänge aufweisen. Allerdings sind die Abweichungen so gering, dass von einer linearen Abhängigkeit ausgegangen werden kann. Die relevant Spannungen um 1,1 V am DAC und der einstellbare Spannungsbereich am ADC, welche für kleinste Abweichung über genannten 500 mV liegen sollten, begründen im Folgenden die Annahme der Linearität am ADC und DAC. Die Grundlage dieser Annahme wird in Abschnitt 3.2.2 begründet.

Wie beschrieben, sind die Ein- und Ausgabespannungen des ADC und DAC begrenzt. Allerdings erfolgt die Strom-Spannungswandlung auf ein Intervall von 0 bis 5 V (s. Gleichung (3.2)) und die Ansteuerung der Steerer-Netzgeräte benötigt eine Eingangsspannung von -10 bis 10 V (vgl. Abschnitt 3.1.2). Daher muss eine Pegelwandlung zwischen diesen Bauteilen und dem Arduino erfolgen. Der Aufbau dieser wird im folgenden Abschnitt erläutert.

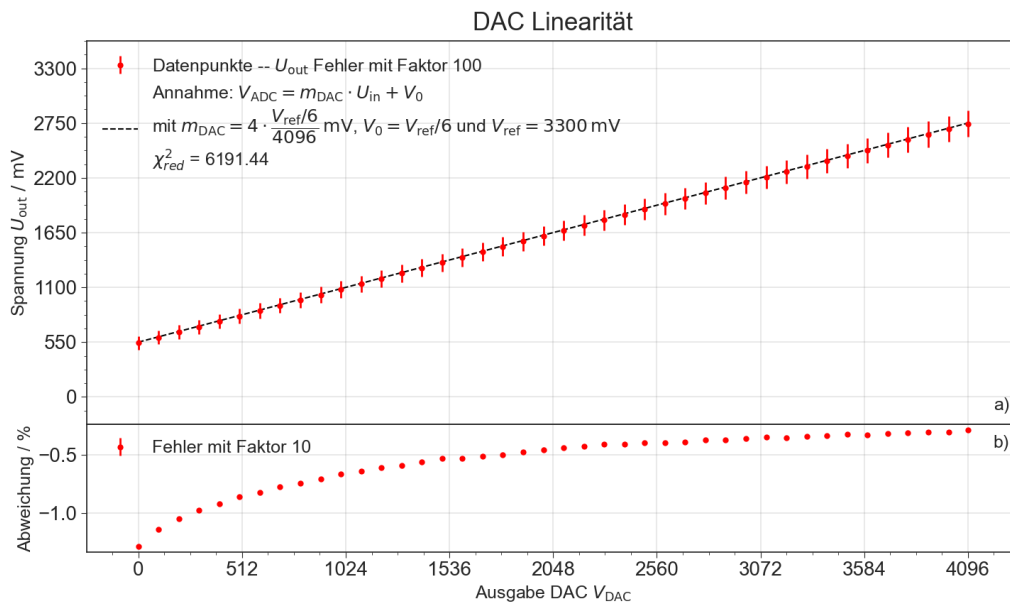


Abbildung 3.2: Verifizierung der Linearität des Digital-Analog-Wandlers des Arduino Due. Unterabbildung b) zeigt die relative Abweichung der Datenpunkte aus Unterabbildung a) von der theoretischen Annahme. Dabei wurde auf die Größe des eingestellten Bit-Werts des DACs kein Fehler angenommen. Tabelle A.2 im Anhang enthält die Daten.

3.1.5 Pegelwandler

Die Umsetzung der Spannung erfordert zwei getrennte Schaltkreise. Einer soll das Eingangssignal von einer maximalen Amplitude von 5 auf höchstens 3,3 V abschwächen. Zudem sollte eine mögliche Spannungsverschiebung ausgeglichen werden können, welche durch verschiedene Bezugspotentiale oder Bias-Ströme auftreten kann. Ein zweiter Schaltkreis ist dafür zuständig die DAC-Ausgabe von 550 bis 2 750 mV auf, für die Steerer-Netzgeräte-Ansteuerung notwendigen, -10 bis 10 V zu übersetzen.

Die geforderten Schaltkreiseigenschaften sind durch Kombination bestimmter Operationsverstärker-Schaltungen zu erreichen. Diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Operationsverstärker-Schaltungen

Essentielle Komponente einer jeden solchen Schaltung ist, wie der Name sagt, ein (oder mehrere) Operationsverstärker [10, S. 133 f.] (OP). Dies sind ICs¹⁰, welche zwei Eingänge, den invertierenden und nicht-invertierenden Eingang sowie einen Ausgang besitzen¹¹ und sich in der Theorie durch folgende Eigenschaften¹² auszeichnen.

- Die Eingangsspannungsdifferenz liegt unendlich verstärkt am Ausgang an ($U_{\text{Out}} = \infty \cdot (U_+ - U_-)$). Dabei ist die Ausgangsspannung begrenzt durch die Versorgungsspannung.
- Es fließt kein Strom in die Eingänge.
- Der Ausgangswiderstand ist vernachlässigbar.
- Liegt an den Eingängen die gleiche Spannung an, so ist die Ausgangsspannung 0 V.

Eine Besonderheit bei Schaltungen mit OPs ist die Gegenkopplung des Ausgangs auf einen der Eingänge. So ist der Anwendungsbereich von der simplen Differenzverstärkung erweiterbar auf aktive Operationen mit den Eingangssignalen.

Mit Hilfe dieser Regeln sind nun unter anderem die folgenden Schaltkreise realisierbar.

Nicht-Invertierender Verstärker Möchte man eine Spannung verstärken, so bietet sich der nicht-invertierende Verstärker an, wie er in Abbildung 3.3 gezeigt ist [10, S. 229 f.]. Hierbei wird die zu verstärkende Spannung an den nicht-invertierenden Eingang gelegt und Ausgang über einen Spannungsteiler mit den Widerständen R_1 und R_2 an den invertierenden Eingang rückgekoppelt. Eine kurze Rechnung ergibt eine Verstärkung von $v = 1 + R_2/R_1$.

Spannungsfolger Ein interessanter Grenzfall des nicht-invertierenden Verstärkers ist der für $R_1 \rightarrow \infty$ und $R_2 \rightarrow 0$ – der Spannungsfolger [10, S. 230]. In diesem Fall entspricht die Ausgangsspannung der angelegten. Die Besonderheit dieser Schaltung ist ihr hoher Eingangs- und niedriger Ausgangswiderstand. Somit bleibt die vorgelagerte Schaltung¹³ unbelastet und eine nachfolgende Schaltung kann von der Versorgungsspannung mit Strom versorgt werden.

¹⁰ Integrierte Schaltkreise (eng.: integrated circuits)

¹¹ Die Eingänge sind meist durch die Indices - bzw. + gekennzeichnet, der Ausgang durch *Out*.

¹² Auch als die *Goldenen Regeln* bekannt.

¹³ Die Schaltung, welche die anliegende Spannung bereitstellt.

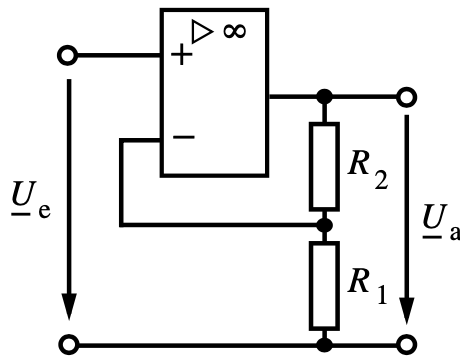


Abbildung 3.3: Schaltung eines nicht-invertierenden Verstärkers. Entnommen aus [10, S. 230 Bild 12.1].

Invertierender Verstärker Ist das Ziel, die eingehende Spannung des Eingangssignals zu verkleinern, so kann dies nicht mit einem Nicht-invertierenden Verstärker erreicht werden, da die Verstärkung hier immer ≥ 1 ist. Statt dessen muss ein invertierender Verstärker [10, S. 230] verwendet werden. Seine Schaltung ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Hierbei wird das Eingangssignal mit $v = -R_2/R_1$ verstärkt.

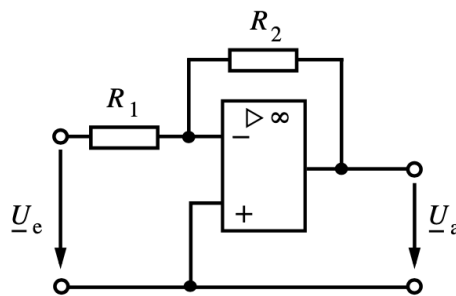


Abbildung 3.4: Schaltung eines invertierenden Verstärkers. Die Bildquelle ist [10, S. 231 Bild 12.3].

Subtrahierer Eine weitere verwendete Operationsverstärker-Schaltung ist die des Subtrahierers, welche in Abbildung 3.5 gezeigt ist. Dieser berechnet die Spannungsdifferenz der Eingänge und verstärkt bzw. verringert diese. Werden alle Widerstände $R_{1,N,2,P}$ gleich gewählt, so ist die Verstärkung 1.

3.1.6 Zusammengesetzte Schaltung der Pegelwandlung

Mit Hilfe dieser Operationsverstärker-Schaltungen können im Folgenden die benötigten Pegelwandler aufgebaut werden. Als tatsächliche ICs kommen zwei ICs mit integrierten Operationsverstärkern zum Einsatz. Zum Einen wird der INA105 [11], welcher sich durch integrierte lasergetrimmte Widerstände von etwa $25 \text{ k}\Omega$ ¹⁴ auszeichnet, zum Anderen der OPA4277 [12] verwendet, welcher vier Operationsverstärker, die sich eine Spannungsversorgung teilen, in einem IC kombiniert. Diese Bauweisen ermöglichen

¹⁴ Wichtiger als der exakte Widerstandswert ist eine geringe Abweichung dieser voneinander. Diese liegt beim INA105 bei höchstens 0,01 %.

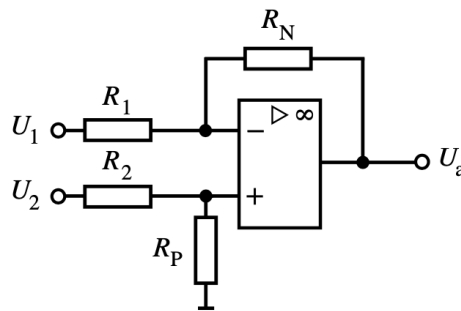


Abbildung 3.5: Schaltung eines Subtrahierers. Entnommen aus [10, S. 232 Bild 12.5].

präzisere und kompaktere Schaltungen als erreicht werden können, würden ausschließlich einzelne Operationsverstärker verwendet.

Eingang

Wie beschrieben, wird am Eingang eine Spannung von 0 bis 5 V erwartet, der ADC des Arduino Due kann allerdings nur 0 bis 3,3 V verarbeiten. Die Schaltung mit dem in Abbildung 3.6 sichtbaren Schaltbild soll diese Spannungsumwandlung durchführen. Die Eingangsstufe ist hierbei ein Subtrahierer mit Bezugspunkts-Ausgleich [11, S. 6 FIGURE 2], um ein mögliches Bezugspotential- und Bias-Strom-Spannungsversatz zu kompensieren. Ersteres ist Folge der unterschiedlichen Etagen auf denen IU-Wandlung bzw. Verstärkung und Pegelwandler liegen, da das jeweilige Bezugspotential ein anderes sein kann. Die Abweichung liegt im Bereich weniger 100 mV. Außerdem können Erdschleifen entstehen, welche das Eingangssignal mit Oszillationen von Vielfachen der Netzfrequenz von 50 Hz stören. Die resultierende, um diesen Hub bereinigte Spannung wird im Folgenden mit einem invertierenden Verstärker um den Faktor von $V = -0,6$ abgeschwächt. Die Justierungen dieser Größen erfolgt mit Potentiometern. So wird insgesamt das Eingangsintervall von 0 bis 5 V auf 0 bis 3,3 V skaliert. Um den Einfluss des unbekanntem Eingangswiderstand vom ADC zu unterdrücken wird abschließend ein Spannungsfollower eingebaut.

Ausgang

Der DAC des Arduino Due gibt Spannungen im Bereich 550 bis 2 750 mV aus. Die Steerer-Netzgeräte der Korrektur-Magnete, siehe Abschnitt 3.1.2, arbeiten allerdings mit Eingangsspannungen zwischen -10 und 10 V. Daher wird die im Folgenden beschriebene Schaltung mit dem in Abbildung 3.7 zu sehenden Schaltbild für die Pegelwandlung verwendet. Die erste Stufe ist ein Spannungsfollower, somit bleibt der DAC unbelastet. Da die Ausgabe bipolar sein soll, werden als nächstes mit einem Subtrahierer $1\,650$ mV abgezogen. Somit entspricht eine DAC-Spannung von $3\,300/2$ mV nun 0 V, dies wird relevant bei der Programmierung der Regelung (vgl. 3.2.2).

Die Spannung liegt jetzt in einem Bereich von $-1\,100$ bis $1\,100$ mV. Als nächste Stufe kommt ein nicht-invertierender Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor von $9,1$ zum Einsatz, um die maximale Ausgabespannung auf ± 10 V zu bringen. Als abschließende Stufe wird wieder ein Spannungsfollower verwendet, um eine Impedanztrennung zwischen Verstärkung und Steerer-Netzgerät zu erreichen.

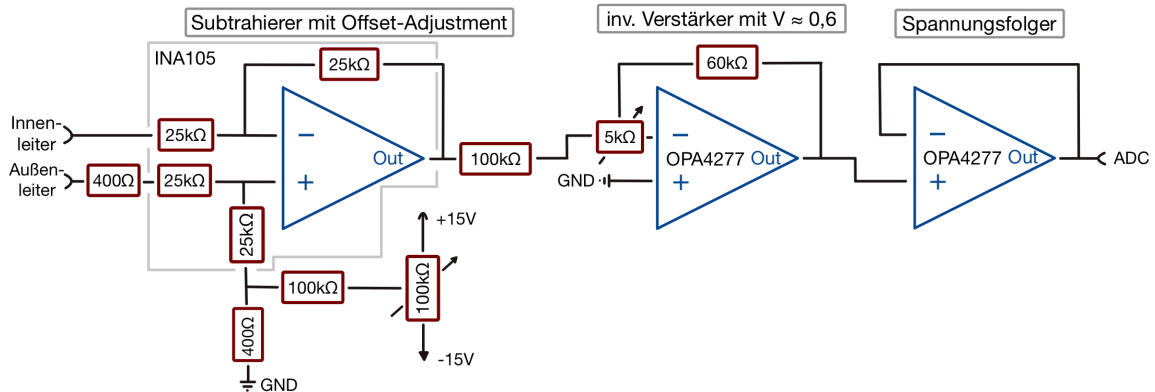


Abbildung 3.6: Schaltbild des Eingangs-Pegelwandlers. Potentiometer ermöglichen die Einstellung des Nullpunktes bezogen auf das lokale Bezugspotential sowie die Verstärkung.

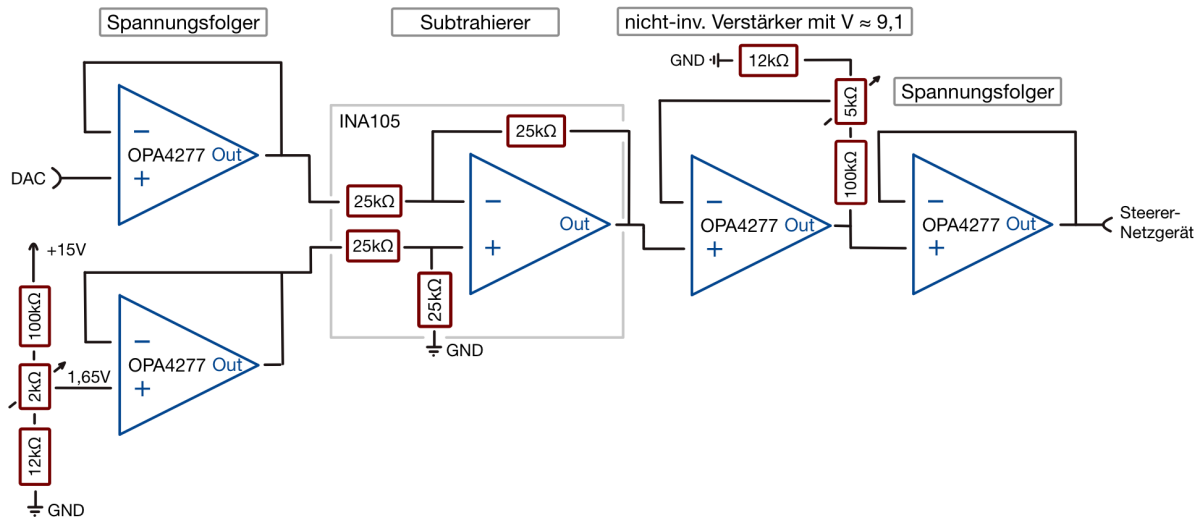


Abbildung 3.7: Schaltbild des Ausgangs-Pegelwandlers. Potentiometer ermöglichen die exakte Einstellung von Spannungsabzug und Verstärkung.

3.2 Software

3.2.1 Regelung

Möchte man die von Störungen beeinflusste Zustandsgröße eines System automatisiert regeln, so benötigt man eine Regelung [13, Kap. 1]. Diese arbeitet nach folgendem Prinzip: Es gibt eine Eingangsgröße oder auch Regelabweichung, welche sich durch Differenzbildung zwischen Sollwert und einer sich aus dem Systemzustand ergebenden Regelgröße ergibt. Um die Zustandsgröße des Systems zu regeln, wird aus der Eingangsgröße ein Regelsignal errechnet und auf ein Stellmodul gegeben, welches diese wie gewünscht beeinflusst. Im Folgenden soll näher auf die verwendete PI-Regelung eingegangen werden.

PI-Regler

Ein PI-Regler (*Proportional-Integral-Regler*) [14, S. 170 f.] nutzt ein mathematisches Verfahren aus proportional und integraler Berechnung, um aus der Regelabweichung $e(t)$ ein Regelsignal $u(t)$ zu berechnen. Zunächst soll der Proportionalteil P erklärt werden. Hierbei wird das eingehende Signal mit einer einstellbaren Konstante k_p multipliziert:

$$u_p(t) = k_p \cdot e(t) \quad \text{mit } k_p \in \mathbb{R} \quad (3.3)$$

Das Regelsignal folgt hier direkt dem Eingangssignal und ist somit für sprungartige Veränderungen des Systems geeignet. Allerdings ist ein Proportionalteil bei vielen Anwendungen nicht ausreichend, um erfolgreich gegenzusteuern. Dies ist Folge der Verkleinerung der Gegensteuerung mit Abnahme des Abstands vom Sollwert. Da es zusätzlich immer eine Störung gibt, die meist gegen die Regelung arbeitet, stellt sich zwangsweise ein konstanter Abstand zwischen Zustandsgröße und Sollwert. Wird zusätzlich k_p zu groß gewählt, so wird die Störamplitude durch die Regelung überkompensiert und verstärkt, was ein instabiles System zur Folge hat. Entsprechende Beobachtungen werden im Abschnitt 4.2 gemacht. Eine mögliche Lösung ist die Suche nach einem exakten Parameter, der das System präzise regelt. Dieser schwankt aber durch äußere Einflüsse mit der Zeit und erfordert zudem eine hochpräzise Feinjustierung, welche mit steigender Anzahl an abhängigen Regelungen wie im Fall der Strahlregelung an Komplexität zunimmt. Daher wird der Wert des Proportional-Teils allgemein etwas zu klein eingestellt und zusätzlich ein Integral-Teil verwendet.

Dieser berechnet das zeitliche Integral über alle eingehenden Werte und ist somit für langsame Veränderungen geeignet während gleichzeitig der Nachteil des Proportional-Teils ausgeglichen wird.

$$u_I(t = 0) = k_I \cdot \int_{t'=-\infty}^{t'=0} e(t') dt' \quad \text{mit } k_I \in \mathbb{R} \quad \text{und } [k_I] = \text{Hz} \quad (3.4)$$

Weicht das Regelsignal trotz Proportional-Teil von dem Sollwert ab so wird das Integral so lange größer bis die Gegenregelung ausreichend ist. Auch das Integral kann skaliert werden. Dazu wird es mit k_I multipliziert. $1/k_I$ nennt man auch die Zeitkonstante, da sie die Änderungsrate angibt mit der die Amplitude des Regelsignals des Integral-Teils $u_I(t)$ bei konstanter Regelabweichung ansteigt.

Das ausgegebene Regelsignal setzt sich durch Addition von u_p und u_I zusammen.

Regelgröße

Das bisherige System verwendet auch auf einen PI-Regler. Jedoch gibt es noch mehr Eigenschaften einer Regelung als zuvor genannt. Dazu gehört die Wahl einer geeigneten Regelgröße. Wie bereits in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.3 erläutert, kann als Eingang nur mit Spannungen gearbeitet werden, welche über jeweils eigene Konstanten $\alpha_{L/R/U/D}$ proportional zum Strahlstrom sind. Eine geeignete Regelgröße sollte allerdings nicht abhängig vom absoluten den Schlitz treffenden Stahlstrom, sondern vom Stromverhältnis eines Schlitzpaares I_L/I_R sein, da der Strahlstrom unter Umständen mit der Zeit variiert, die Strahlposition aber identisch geblieben ist. Daher wird folgende Regelgröße N_H für die

entsprechenden Schlitzpaare gewählt¹⁵:

$$N_H = \frac{U_L - U_R}{U_L + U_R} \stackrel{3.1}{=} \frac{\alpha_L - \alpha_R}{\alpha_L + \alpha_R} = \frac{\alpha_L/\alpha_R - 1}{\alpha_L/\alpha_R + 1} \in [-1; 1] \quad (3.5)$$

Wie man sieht, hängt durch die Normierung auf die Gesamtspannung, die resultierende Regelgröße nicht vom Strahlstrom ab und bleibt somit konstant unter Veränderung dessen. Stellt man die Normierung wie dargestellt um, so erkennt man außerdem, dass sie ausschließlich vom Verhältnis der Proportionalitätskonstanten und nicht einzeln von ihnen abhängt. Die Ableitung nach einer der Konstanten

$$\left(\frac{dN_H}{d\alpha_{L,R}} \right)_{\frac{\alpha_L}{\alpha_R} = \text{konst.}} = 0 \quad (3.6)$$

unter der Annahme, dass das Verhältnis der beiden konstant bleibt, ist 0.

Die resultierende Regelgröße nimmt Werte von -1 bis 1 an. Ist dieser < 0 bzw. > 0 so ist der Strahl rechts- bzw. linksverschoben, wobei die beiden Extrema auf einen vollständig verschobenen Strahlengang schließen lassen, wobei in diesem Fall nur einer der beiden Schlitze vom Strahl getroffen wird. Der Sollwert der Regelung ist ein Wert von $N_{L/R} = 0$.

Ein Nachteil dieser Regelgröße ist das Verhalten bei kleinem bzw. nicht vorhandenem Strahlstrom. In diesem Fall wird werden sowohl die Summe $U_L + U_R$ als auch die Differenz $U_L - U_R$ in Gleichung (3.5) Null, wodurch die Regelgröße singularär wird und somit kleinste Änderungen, z.B. hervorgerufen durch Rauschen, erratische Variationen dieser Größe hervorrufen und so eine Regelung unmöglich machen. Deshalb wird ein Sample-and-Hold Algorithmus eingesetzt, der die Regelung pausiert und die Berechnung einer neuen Regelgröße unterbricht, sollte die anliegende Spannungssumme unter einen vorgegebenen Wert fällt.

Die vorangegangenen Betrachtungen gelten analog auch für $L \rightarrow U, R \rightarrow D$ und $H \rightarrow V$ also ein vertikales Schlitzpaar.

3.2.2 Digitaler PI-Regler

Im Folgenden soll die digitale Umsetzung der Regelung erläutert werden. Dabei wird zunächst auf die Ermittlung der Regelgröße eingegangen. Der folgende Paragraph beschreibt die Berechnung des Regelsignals aus der Regelgröße. Die gesamte PI-Regelung wird im darauffolgenden Abschnitt im Kontext der Strahlregelung erklärt.

Ermittlung der Regelgröße Wie in Abschnitt 3.2.1 bereits beschrieben, ist die Ermittlung einer Regelgröße ein essentieller Bestandteil einer Regelung. Abbildung 3.8 zeigt einen schematischen Ablauf dieses Prozesses. Zunächst sind die spannungsgewandelten Signale eines Schlitzpaares einzulesen. Dabei werden abwechselnd mehrere Werte beider aufgenommen – dies minimiert den zeitlichen Versatz zwischen den Datenpunkten – und anschließend gemittelt, um Rauschen zu unterdrücken. Bevor die Regelgröße bestimmt wird, ist zunächst zu bestimmen, ob das Sample-And-Hold Glied einsetzen soll. Dazu wird die mittlere Spannungssumme beider Eingänge mit dem äquivalenten Bit-Wert von

¹⁵ L, R, H stehen für links, rechts und horizontal.

1 V verglichen. Ist die Summe größer, so wird durch Divisionsbildung von Differenz durch Summe entsprechend Gleichung (3.5) die Regelgröße berechnet. Andernfalls wird die Regelung pausiert.

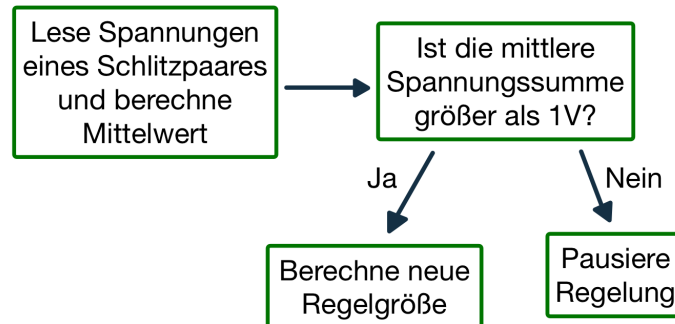


Abbildung 3.8: Schaubild zur Ermittlung der Regelgröße.

Berechnung des Regelsignals Wie beschrieben wird nun aus der Regelgröße das Regelsignal berechnet. Dazu wird der Algorithmus eines digitalen PI-Reglers, basierend auf einer Arduino-Bibliothek aus Quelle [15], verwendet. Abbildung 3.9 beinhaltet ein Schaubild zum implementierten Algorithmus. Zunächst wird die zuvor berechnete Regelgröße entgegengenommen und entsprechend des Abschnitt 3.2.1 ein Proportional- und Integralanteil berechnet und die jeweiligen Werte aufsummiert. So erhält man bereits ein erstes Regelsignal. Um den verwertbaren Eingabebereich von 0 bis 4095 des DAC nicht zu über- bzw. unterschreiten wird das Regelsignal auf diese Reichweite beschränkt. Zu bemerken ist hier, dass das Regelsignal bipolar ist – es kann positive wie negative Werte annehmen. Daher wird die Null der Regelung im Folgenden durch Addition von 2047 auf die Mitte des genannten Eingabebereiches verschoben. Das bereinigte, ganzzahlige Signal kann sodann am DAC ausgegeben werden.

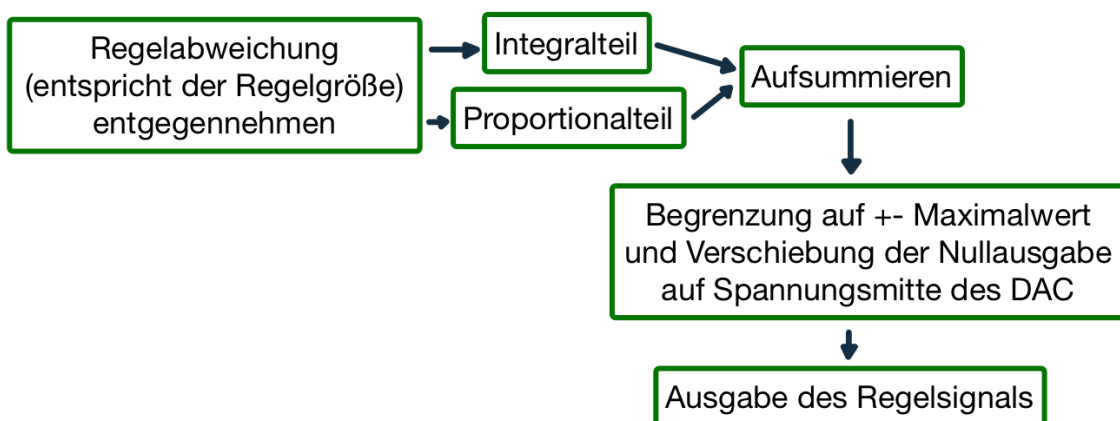


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung zur Berechnung des Regelsignals.

Zusammengesetzte Regelung Ein Zusammensetzen der zuvor beschriebenen Prozesse unter Erweiterung um die Logik der gesamten Regelung führt zu einem Zyklus wie er in Abbildung 3.10 zu sehen ist. Zunächst wird abhängig vom Eingangssignal entweder eine neue Regelgröße ermittelt oder die Regelung mittels eines Sample-And-Hold Glieds ab einer Eingangsspannungssumme von unter 1 V pausiert. Dies hat den Sinn, dass aufbauend auf Abschnitt 3.1.4 die Genauigkeit des ADC mit der Spannung zunimmt und über 500 mV die Abweichung unter 1 % fällt. Außerdem können zu kleine Spannungswerte zu erraticem Regelverhalten führen, da kleinste Abweichung durch Rauschen große Veränderungen der Regelgröße verursachen. Ist die Regelung pausiert so durchläuft sie den Prozess der Regelgrößenbildung bis die gemittelte Spannungssumme über 1 V liegt.

Ist dies der Fall, so wird der Algorithmus des PI-Reglers aufgerufen. Dieser berechnet aus der Regelgröße mittels Proportional- und Integralteil das Regelsignal. Dieses wird wie beschrieben ausgegeben und der Kreislauf beginnt von vorne.

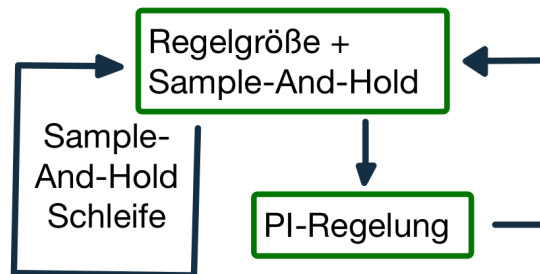


Abbildung 3.10: Flussdiagramm zum Ablauf eines Regelkreislaufts.

3.2.3 Kommunikationslayout

Um das in Abschnitt 2.2 beschriebene Regelsystem durch ein neues, digitales System vollständig zu ersetzen, werden vier Regelungen auf vier Arduino Due benötigt. Je ein Arduino regelt somit ein Schlitzpaar mit entsprechendem Korrekturmagnet. Um die Regelungen – pro Schlitzpaar bzw. Korrektur-Magnet eine – anzusteuern wird ein Raspberry Pi¹⁶ [16] verwendet. Mit Hilfe mehrerer Python-Skripts sowie der USB-Anschlüsse des Raspberry Pis und der anzusteuern den Arduinos kann damit via serieller Datenübertragung untereinander kommuniziert werden. Verschiedene Funktionen finden Benutzung in der Einstellung von Regelkonstanten, der normierenden Wiederholgeschwindigkeit sowie Abfrage eben dieser Werte, der Regelgröße und derzeitiger ADC-Werte zur Überprüfung der Funktion. Dabei wird der Raspberry via SSH über einen zentralen Computer angesteuert.

Eine weitere Anwendung ist die im Abschnitt 3.1.3 erwähnte Kommunikation mit dem Readout-Board, im Speziellen die Änderung der Verstärkungsfaktoren. Die verwendete I²C-Kommunikation ist allerdings nur für kurze Distanzen geeignet¹⁷, nicht für die etwa 50 m Kabel zwischen dem Raspberry Pi und dem Readout-Board [17]. Daher wird auf die Serielle Datenübertragung via Netzkabel und einen Arduino Uno, welcher sich im Zyklotron Bunker befindet, gesetzt. Dieser arbeitet als Übersetzer zwischen

¹⁶ Effektiv einer kleiner Computer, meist mit analogen Schnittstellen, welcher sich durch seine kompakte Bauform und geringen Preis für die Überwachung von Systemen eignet.

¹⁷ Die begrenzenden Faktoren sind die Kapazität des verwendeten Kabels und die Datenrate, sowie eingebaute Widerstände. Die hier verwendeten Werte begrenzen die Kabellänge auf einige Meter.

dem I²C- und Seriellem-Protokoll und ermöglicht somit die Ansteuerung des Readout-Boards aus dem Kontrollraum.

Die gesamte Software, welche in dieser Arbeit konzipiert wurde, findet sich unter [18].

3.3 Gesamtaufbau der modernisierten Regelung

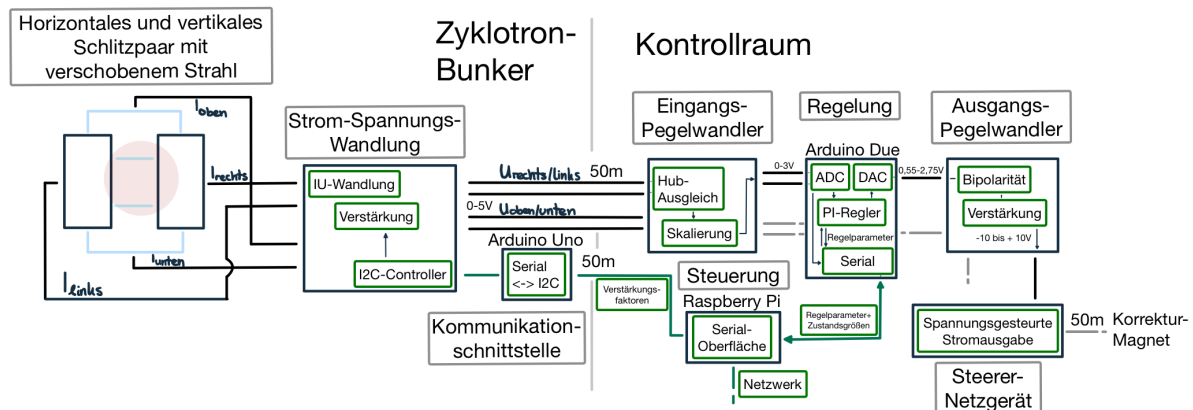


Abbildung 3.11: Gesamtaufbau einer modernisierten Regelung. Kabel sind entsprechend der Übertragung beschriftet. Die ungefähre Länge besonders langer Kabel ist jeweils angegeben.

Setzt man alle beschriebenen Komponenten zusammen und lädt die entsprechende Software auf die benötigten Arduinos und den Raspberry Pi, so ergibt sich der im Folgenden beschriebene und in Abbildung 3.11 dargestellte Gesamtaufbau.

Zunächst wird durch Schlitzpaare ein Teil vom Strahlstrom gemessen und verstärkend in eine Spannung umgewandelt. Der Verstärkungsfaktor kann per I²C Datenübertragung eingestellt werden. Ein Arduino Uno dient als Schnittstelle für die Übersetzung zwischen I²C und serieller Datenübertragung.

Das Spannungssignal wird dann aus dem Zyklotron-Bunker über etwa 50 m Kabel in den Kontrollraum übertragen und dort pegelgewandelt. Dies ist nötig, um das Spannungsintervall der IU-Wandlung an das des im Arduino Due verbauten ADC anzupassen. Die gewandelten Werte werden gemittelt und daraus die Regelgröße bestimmt. Durch Proportional- und Integralteil wird aus dieser ein Regelsignal berechnet, welches über den DAC ausgegeben wird. Diese Spannung wird dann durch einen weiteren Pegelwandler auf einen Bereich von -10 bis 10 V konvertiert. Mit dieser Spannung wird ein Netzgerät angesteuert, welches einen dazu proportionalen Strom auf die Korrektur-Magnete gibt und so den Strahl und seine Position bezogen auf die Schlitze verschiebt. Die Einstellung von Verstärkungsfaktoren und Regelungskonstante erfolgt dabei über einen Raspberry Pi, welcher über das Netzwerk von einem zentralen Computer gesteuert wird.

Verifizierung der Regelungsfunktion im Strahlbetrieb

Im Folgenden sollen Messergebnisse bezüglich der Funktionsweise und Performanz der Regelung, also die Fähigkeit die Strahlposition ohne Schwankungen zwischen den Schlitzen zu halten, sowie Verifizierung von Annahmen über Eigenschaften des Strahls und Regelung vorgestellt werden. In Tests im Labor, welche alle aufzuführen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden, wurde die Funktionalität der Einzelkomponenten (ADC und DAC des Arduino, Pegelwandler sowie der implementierte digitale Regler) überprüft. Anschließend wurden die Komponenten zum in Abschnitt 3.3 beschriebenen Gesamtsystem mit einem IU-Wandler mit Readout-Board und Arduino Uno sowie einem Regelmodul mit Pegelwandlern und zwei Arduino Due zusammengesetzt und ebenfalls im Labor erprobt. Hierbei wurde der gefertigte Prototyp so konzipiert, dass die Regelung von der vertikalen Schlitzpaaren durch diesen übernommen werden konnte.

Dabei umfasst der erste Abschnitt den Abgriff vom Strahlstrom und den Einfluss der Schlitzposition darauf sowie die Verstärkung und IU-Wandlung dessen sowie ein Frequenzanalyse des Eingangssignals, welches als Spannung vor dem ADC gemessen wurde. Der zweite Abschnitt behandelt die Charakterisierung der Regeleigenschaften, den Einfluss verschiedener Regelkonstanten und eine kurze Übersicht des optimierten Regelverhaltens.

4.1 Schlitzstellung und Strom-Spannungswandlung

Die erste Messung soll den Einfluss der Schlitzposition auf den abgegriffenen Strom überprüfen. Dabei wurden die Spannungen hinter der Eingangspegelwandlung bzw. vor dem ADC mit einem Oszilloskop gemessen, sodass diese in einem Intervall von 0 bis unter 3,3 V erwartet wird. Abbildung 4.1 zeigt entsprechende Daten mit und ohne Regelung der Strahlposition. Verschiedene Beobachtungen können getroffen werden:

In Abbildung 4.1 (obere Graphen) sieht man, dass die Spannung in beschriebenem Bereich liegt. Der tatsächliche Wert ist dabei abhängig von dem gewählten Verstärkungsfaktor. In Abbildung 4.1 (untere Graphen), die den abgegriffenen Strom zeigen, ist eine deutliche Zunahme dessen bei zusammenfahren der Schlitze erkennbar. Bei einem Strahlstrom vom etwa 500 nA liegt der abgegriffene Strom somit bei höchstens 20 % mit den eingestellten Schlitzpositionen. Dies entspricht dem Wert von α aus Gleichung

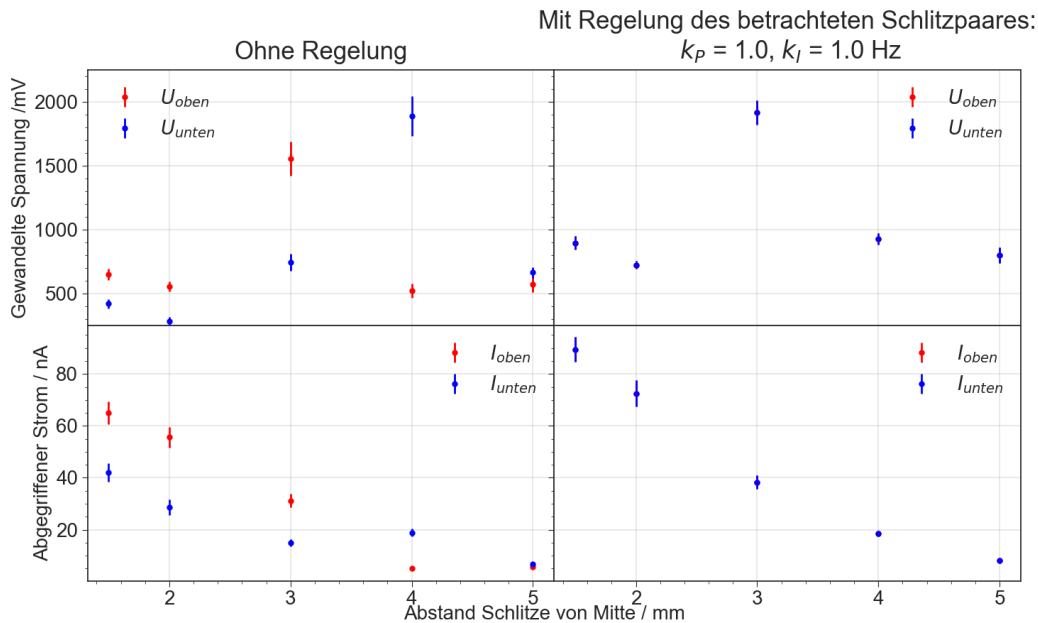


Abbildung 4.1: Einfluss der SchlitzEinstellung auf den abgegriffenen Strom und Wirkungsweise der Strom-Spannungswandlung. Mit eingeschalteter Regelung liegen die Datenpunkte übereinander sodass jeweils nur einer sichtbar ist.

3.1. Die in der Abbildung eingezeichneten Fehler auf die Spannung bzw. den Strom entspricht dem AC-RMS¹. Dieses Rauschen nimmt mit dem Schlitzabstand und somit dem abgegriffenen Strom ab, was eine Ursache beim der Strommessung selber oder Rauschen des Strahlstroms und weniger bei der IU-Wandlung bzw. Verstärkung vermuten lässt, da deren Rauschen bei größeren Verstärkungsfaktoren wachsen sollte.

Eine nähere Betrachtung des Eingangssignals ermöglicht eine Frequenzanalyse des Signals durch eine Fouriertransformation der Signalstärke der Eingangsspannung mit Hilfe eines Spektrumanalysators. Der Spannungsabgriff erfolgte hierbei im Kontrollraum vor und bei nicht angeschlossener Pegelwandlung, sodass diese keinen Einfluss auf das Signal hat. Entsprechend hat auch die Regelung nicht gearbeitet. Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen die Signalstärke bei unterschiedlichen Frequenzintervallen. Betrachtet man ein Intervall bis 4 MHz, so ist zu beobachten, dass die Signalstärke mit der Frequenz stark abnimmt. Ursachen für den genauen Verlauf ist höchstwahrscheinlich die Bandbreite der im Readout-Board verwendeten Operationsverstärker.

Eine genauere Betrachtung des Spektrums von 0 bis 300 kHz weist sehr markante Spitzen bei Vielfachen von etwa 40 kHz auf. Auch hier sind die Gründe nur schwer auszumachen. Schwankungen im Teilchenstrom der ECR-Quelle oder Wechselwirkungen von Operationsverstärkern im Readout-Board untereinander könnten aber eine mögliche Ursache sein. Erkennbar ist aber auch hier ein Abfall der Signalstärke mit Steigen der Frequenz. Da das Eingangssignal jeweils über einige Messwerte gemittelt wird, ist Rauschen ab einigen 100 kHz von der Regelung nicht erfassbar. Die gemessene Performanz

¹ Root-Mean-Square bezüglich des Wechselstromanteils des gemessenen Signals.

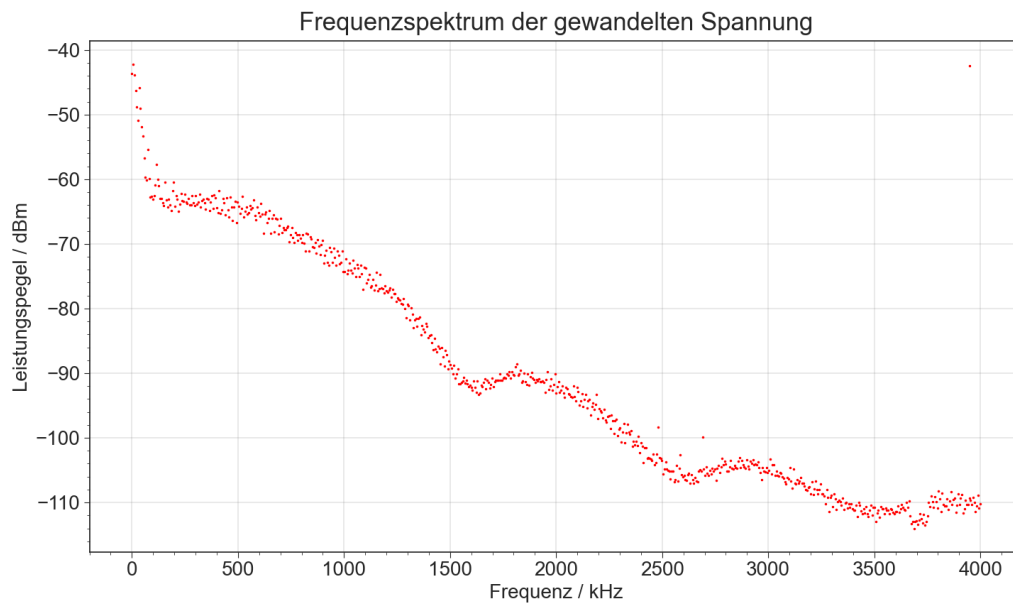


Abbildung 4.2: Fourier-Transformation des IU-gewandelten Strahlstroms in einem Intervall von 0 bis 4 MHz.

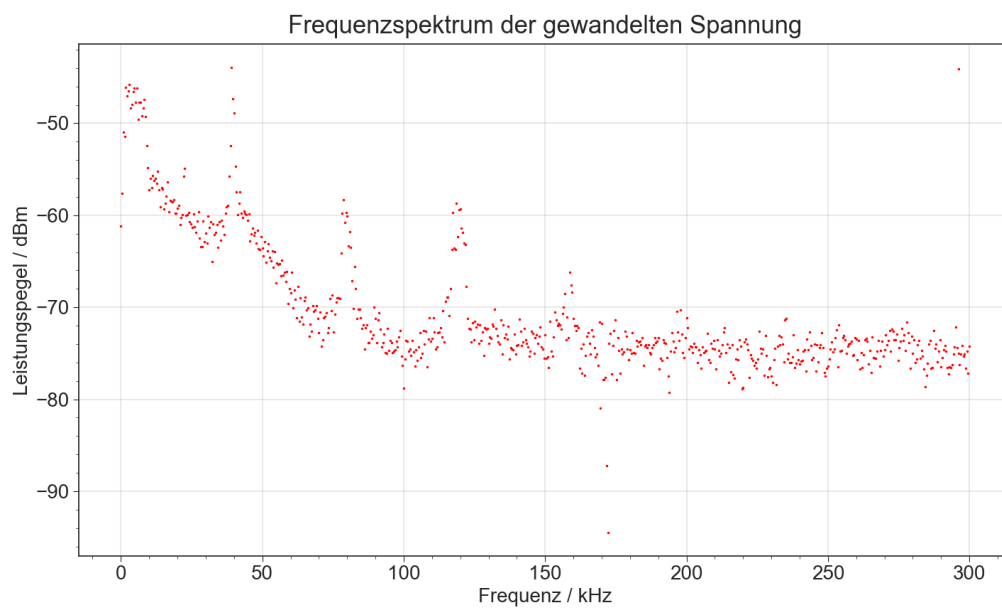


Abbildung 4.3: Signalstärke in Abhängigkeit der Frequenz bei einem Spektrum von 0 bis 300 kHz.

der Regelung im folgenden Abschnitt ist Indiz für die Robustheit dieser gegenüber des gemessenen Frequenzspektrums des Eingangssignals.

4.2 Regelungstest

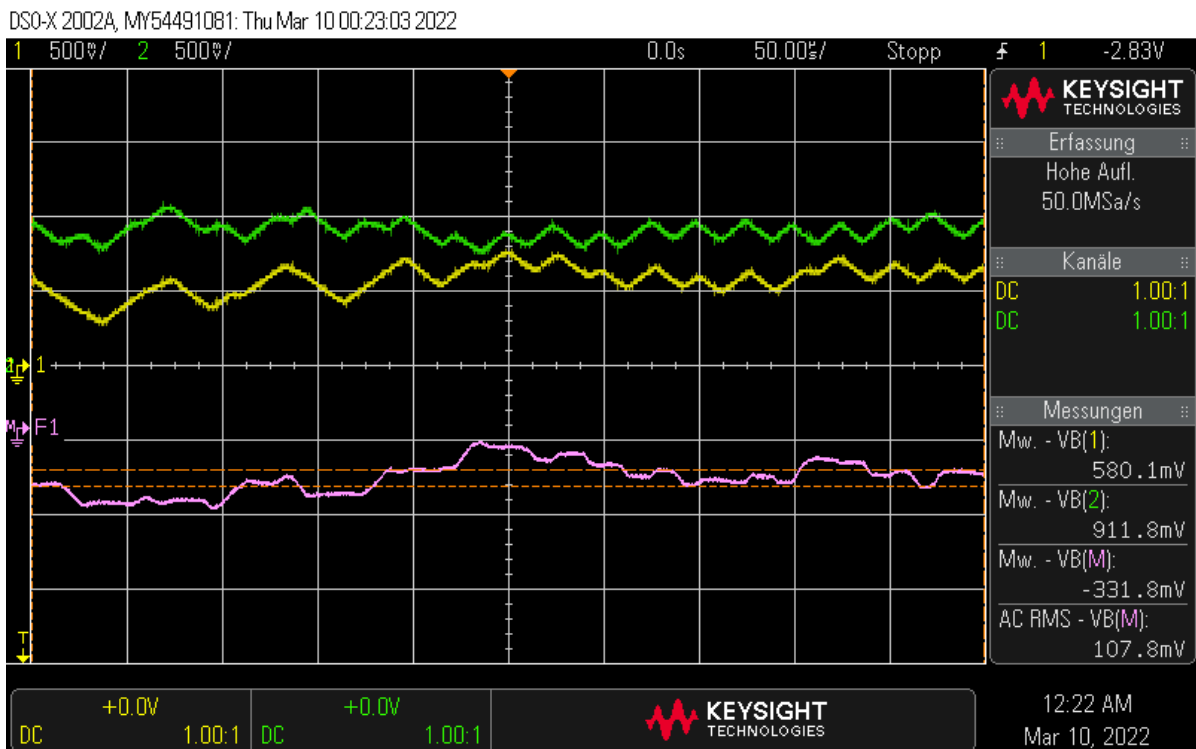


Abbildung 4.4: In Spannung konvertierte Signale eines Schlitzpaares (grün/gelb) und Differenz (magenta) dieser bei einer zeitlichen Skala von $50 \mu\text{s}/\text{Skt}$.

Eine erste wichtige Größe bei der digitalen Regelung ist die Regelgeschwindigkeit. Wie bereits beschrieben, ist diese experimentell zu bestimmen. Abbildung 4.4 zeigt die zwei Eingangsspannungen eines Schlitzes. Dabei ist die sägezahnförmige Form derer auffällig. Dies ist Folge der neuen Ausgabe des DACs in Regelgeschwindigkeit, welche sich über die Steerer-Netzgeräte direkt in der Strahlposition auswirkt und somit über die Messung dieser vor dem ADC messen kann. Durch die Bandbreite der Korrektur-Magnete und Operationsverstärkern ist die effektive Veränderung linear und nicht instantan. Eine grobe Abschätzung der Regelgeschwindigkeit entspricht somit der kleinsten Anstiegszeit. Diese liegt bei etwa $50/4 \mu\text{s}$, was sich zu einer Regelfrequenz von 80 kHz umrechnen lässt. In diesem Fall wurde dabei ausschließlich der Proportional-Teil verwendet. Dies begründet die Abweichung der beiden Eingangssignale und erhöht die Regelfrequenz etwas im Vergleich zur Verwendung von Proportional- und Integralteil, da pro Regelungsumlauf weniger Operationen durchgeführt werden müssen. Eine grobe Abschätzung ist hier allerdings ausreichend, da die Feinjustierung der Regelung durch Einstellung von k_P und k_I erfolgt. Wie in 3.1.2 beschrieben, sind die Korrektur-Magnete nur mit einigen kHz ansteuerbar, somit ist die gemessene Regelgeschwindigkeit nicht der begrenzte Anteil der Strahlregelung.

Weiter ist eine Überprüfung der Regeleigenschaften von Proportional- und Integralteil getrennt interessant. Wie beschrieben, haben diese unterschiedliche Eigenschaften, welche sich im Regelverhalten widerspiegeln sollte. Vor allem die Korrektur durch den proportionalen Anteil kann durch seine, in

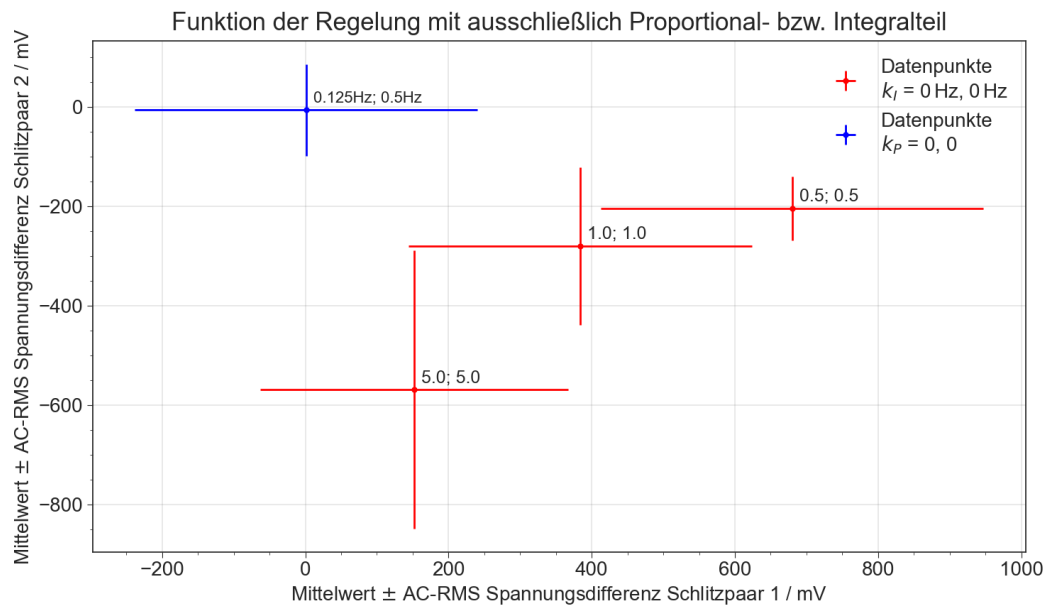


Abbildung 4.5: Verhalten der Regelung, wenn ausschließlich **Proportional**- oder **Integral**teil verwendet werden.

Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Eigenschaften, sprunghafte Veränderungen abfangen, der Integralteil hingegen kann konstante Verschiebungen kompensieren. Abbildung 4.5 zeigt das Verhalten beider getrennt. Es ist zu erkennen, dass bei alleiniger Verwendung des Proportionalteils (k_I) bei verschiedenen Einstellungen nicht die gewünschte Performanz erreicht. Die Abweichung vom Sollwert 0 ist bei beiden Schlitzen groß. Auch der AC-RMS steigt mit der Wahl von k_P , was auf übersteuern hindeutet. Wird ausschließlich der Integralteil verwendet, so erreicht dieser bereits große Übereinstimmung mit dem Sollwert. Dies ist Folge des wenig sprunghaften Verhalten des Strahls, die Strahlposition ändert sich mit der Zeit nur langsam in der Größenordnung Sekunden. Die gewählten Konstanten k_I von 0,125 und 0,5 Hz entsprechen denen der bisher verwendeten analogen Regelung.

Nachdem zuvor die beiden Regelteile einzeln charakterisiert wurden, soll nun eine genauere Betrachtung unter Verwendung beider und Variierung einzelner Regelkonstanten durchgeführt werden. Dies ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Hier bestätigt sich das Bild von zuvor. Große Proportionalanteile führen zu Abweichungen vom Sollwert und erhöhen den AC-RMS des Eingangssignals auf Grund von Überkorrektur. Mit etwa 200 mV stimmen diese auch mit den Daten aus 4.1 überein. Somit sind hier die Schwankungen nicht durch die Regelung hervorgerufen.

Variierung der Integrationskonstante k_I hat keinen so großen Einfluss auf die Performanz. Zu große Werte führen allerdings auch hier zu sprunghaftem Verhalten, sodass das mittlere Eingangsspannungsdifferenz hier leicht vom Sollwert abweichen.

Zuletzt wird eine optimierte Einstellungen einzeln dargestellt. Die in Abbildung 4.7 gezeigten Parameter mit dem entsprechenden Regelverhalten liegen dabei alle nur wenige mV vom Sollwert. Interessant ist AC-RMS. Dieser unterscheidet sich stark zwischen den einzelnen Einstellungen. Dabei bestätigen sich bisherige Beobachtungen, dass ein kleiner Wert für k_P ausreichend ist. Auch die bisher verwendeten

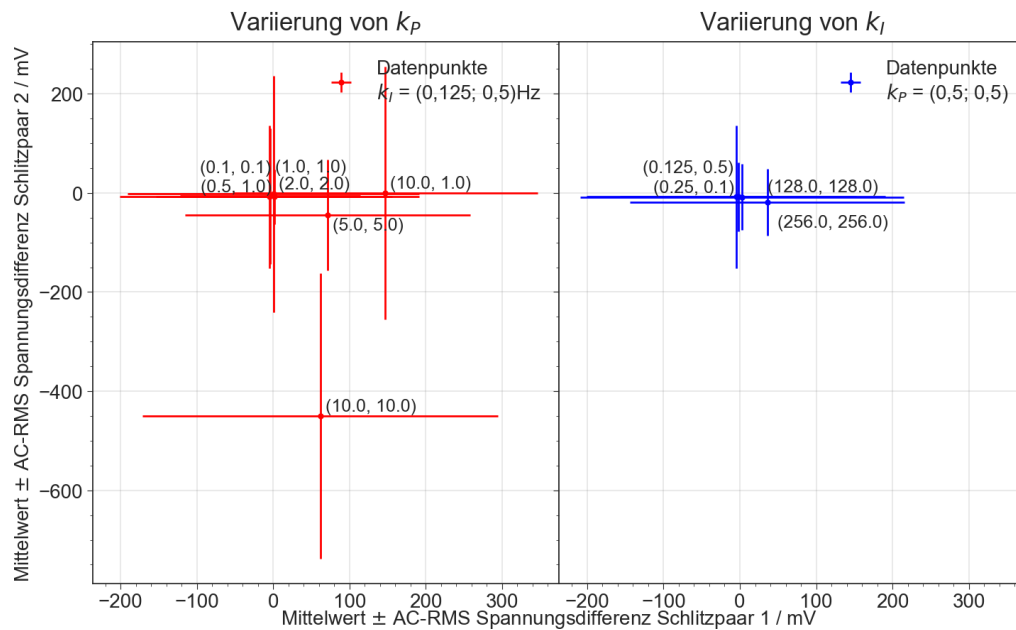


Abbildung 4.6: Einfluss verschiedener Regelkonstanten auf die Performanz der Regelung. Die Datenpunkte sind beschriftet mit den jeweils verwendeten Regelparametern für die erste und zweite Regeleinheit. Abgebildet sind die Spannungen am SY1 (Schlitzpaar 1) und SY2 (Schlitzpaar 2).

Zeitkonstanten von 2 und 8 s wie sie in den unteren Unterabbildungen dargestellten Messungen verwendet wurden, erweisen sich durch ihre Nähe zum Sollwert von wenigen mV erneut als performant und reduzieren die Abweichung auf das im Abschnitt 4.1 gemessene Minimum.

Optimierung der Regelungsparameter

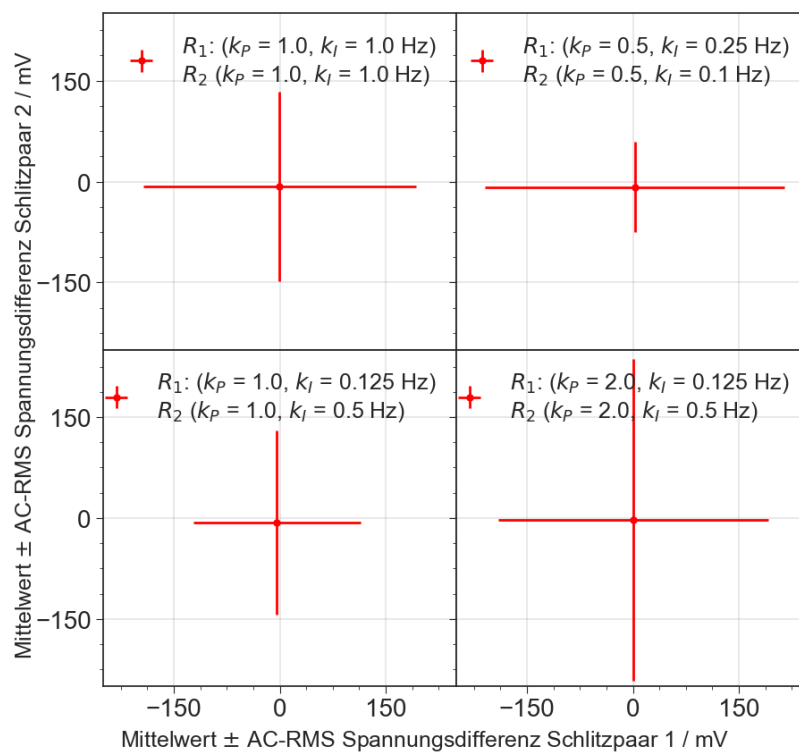


Abbildung 4.7: Einige Beispiele für Parameter, welche die Abweichung des Strahlengangs von der Mitte minimieren. Abgebildet sind die Spannungen am SY1 (Schlitzpaar 1) und SY2 (Schlitzpaar 2).

Fazit und Ausblick

Im Laufe dieser Arbeit wurde das Konzept einer digitalen Regelung entwickelt und darauf aufbauend ein Prototyp konstruiert und erfolgreich getestet, welcher die analoge Strahllageregelung nach Extraktion aus dem Bonner Isochron Zyklotron ersetzen soll.

Zunächst wurde dabei die Strom-Spannungswandlung und Verstärkung modernisiert – diese liegt nun direkt an den Schlitzen. Die bisher analoge Regelung wurde mit Hilfe eines Arduinos digitalisiert. Hier musste eine Pegelwandlung eingesetzt werden, um die anliegenden Spannungen kompatibel mit den verwendeten ADC und DAC zu machen.

Um die Funktion der verschiedenen Teile zu verifizieren wurde zunächst eine Fourier-Transformation des Signals durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass auch hohe Frequenzkomponenten enthalten sind, allerdings beeinflussen sie das Regelverhalten nicht negativ wie durch die folgenden Messungen bestätigt werden konnte. In Abschnitt 4.2 wurde das Verhalten der digitalen Regelung im Hinblick auf den Einfluss der Regelparameter auf diese analysiert. Wurde der Regler lediglich mit einem Proportionalteil implementiert, wie in Abschnitt 3.2.1 angenommen, die Regelabweichung nicht auf Null reduzieren, die mittlere Abweichung lag im Bereich einiger 100 mV. Wurde jedoch ein Regler mit ausschließlich Integralteil verwendet, so konnte der Strahl erfolgreich geregelt werden. Eine Problematik war das elektronische Rauschen auf dem Regelsignal welches einen signifikanten Anteil von einigen 100 mV aufwies. Durch die Verwendung eines Reglers mit einer Kombination von Proportional- und einem Integralteil konnte die Regelung jedoch erfolgreich in Betrieb genommen werden. Dabei konnten Regelparameterkombinationen gefunden werden, welche die, durch den RMS quantifizierte, Rauscheamplitude auf ein Level reduzierte der auch ohne Regelung vorlag.

Anders als die vorher verwendete analoge Regelung wurde die digitale Regelung so konfiguriert, dass im Falle eines abrupten Strahlausfalls die Regelung nicht erst wieder erneut einschwingen musste sondern die Regelung durch ein digitales Sample-And-Hold-Glied lediglich pausiert wurde. Durch den Wegfall der Einschwingzeit, welche in der Größenordnung mehrerer Sekunden liegt, ist somit der Strahl Millisekunden nach dessen Wiedereinsetzens wieder für Experimente nutzbar.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Ansatz der digitalen Regelung die benannten Problematiken in Kapitel 2 angegangen ist und behoben hat. Dabei war ein erstes Ziel die Performanz der analogen Regelung zu erreichen und gleichzeitig die Vorteile der digitalen Umsetzung wie simple Einstellung

von Regelparametern, Strom-Spannungswandlung direkt an den Schlitzen und Implementierung eines Sample-And-Hold Glieds nutzen zu können.

Dieses Ziel konnte entsprechend der Auswertung und Beschreibung der Messungen mit Strahl erfüllt werden. Eine weitere Motivation der Arbeit war, das Konzept eines allgemein nutzbaren Regelmodul zu entwerfen, welches auch in anderer Anwendung Verwendung findet. Hierbei bietet die digitale Umsetzung auch Vorteile, da sie durch ihre Variabilität in Einstellung und Umsetzung einfach angepasst werden kann.

Abschließend soll kurz auf die möglichen zukünftigen Entwicklungen des hier vorgestellten Prototypen eingegangen werden.

Dabei ist ein erstes Ziel die Erweiterung der Regelung auf die gesamte Strallageregelung auszuweiten und somit zusätzlich zur vertikalen auch die horizontale Strahlposition zu regeln.

Für die zuverlässige Umsetzung der Regelschaltung ist eine dezidierte Platine notwendig, welche die Pegelwandlung aus Abschnitt 3.1.6 und den Arduino, welcher die Software der digitalen Regelung ausführt, kombinieren. Hier wurden bereits erste Schritte gemacht und die erste Version einer solchen Platine entworfen, welche auf einen Arduino Due aufgesteckt werden kann.

Weiterhin könnte mit dem für die IU-Wandlung verwendete Readout-Board genutzte Arduino Uno zusätzlich die dem Gesamtschlitzstrom entsprechende Spannungssumme messen. Mit dieser Information ließe sich der Verstärkungsfaktor am Readout-Board entsprechend des Schlitzstroms automatisch einstellen.

Tabellen mit Rohdaten

Spannung $U_{in}/\text{mV} \pm (1\% U_{in} + 5\text{mV})$	ADC Messwert $V_{adc} \pm$ Ablesefehler
0 ± 5	22 ± 1
100 ± 6	143 ± 1
200 ± 7	265 ± 2
300 ± 8	386 ± 2
400 ± 9	508 ± 1
500 ± 10	631 ± 2
600 ± 11	753 ± 2
700 ± 12	877 ± 2
800 ± 13	1 001 ± 2
900 ± 14	1 125 ± 2
1 000 ± 15	1 248 ± 2
1 100 ± 16	1 373 ± 2
1 200 ± 17	1 496 ± 2
1 300 ± 18	1 620 ± 2
1 400 ± 19	1 745 ± 2
1 500 ± 20	1 870 ± 2
1 600 ± 21	1 993 ± 2
1 700 ± 22	2 119 ± 2
1 800 ± 23	2 243 ± 2
1 900 ± 24	2 369 ± 2
2 000 ± 25	2 494 ± 2
2 100 ± 26	2 618 ± 2
2 200 ± 27	2 742 ± 2
2 300 ± 28	2 867 ± 2
2 400 ± 29	2 991 ± 2
2 500 ± 30	3 116 ± 2
2 600 ± 31	3 239 ± 2
2 700 ± 32	3 364 ± 2
2 800 ± 33	3 486 ± 2
2 900 ± 34	3 610 ± 2

Anhang A Tabellen mit Rohdaten

3 000 ± 35	3 732 ± 2
3 100 ± 36	3 854 ± 2
3 200 ± 37	3 977 ± 2
3 300 ± 38	4 093 ± 2

Tabelle A.1: Messwerte der Linearitätsüberprüfung des ADCs des Arduino Due. Spannungsquelle war ein AFG3102 Tektronix [19]. ADC Messwerte wurden über 10 Einzelwerte arithmetisch gemittelt.

Ausgabe DAC V_{DAC}	Eingelesene Spannung U_{out} mV ± (ppm U_{out} + ppm ¹ des Spannungsbereichs)
-	Spannungsbereich 1 V, Fehler: 30 + 7
0	542,9 ± 0,1
100	596,8 ± 0,1
200	650,5 ± 0,1
300	704,2 ± 0,1
400	757,8 ± 0,1
500	811,5 ± 0,1
600	865,1 ± 0,1
700	918,8 ± 0,1
800	972,4 ± 0,1
900	1 026,1 ± 0,1
1 000	1 079,9 ± 0,1
1 100	1 133,5 ± 0,1
1 200	1 187,3 ± 0,1
	Spannungsbereich 10 V, Fehler: 30 + 5
1 300	1 240,9 ± 0,1
1 400	1 294,7 ± 0,1
1 500	1 348,5 ± 0,1
1 600	1 401,9 ± 0,1
1 700	1 455,6 ± 0,1
1 800	1 509,3 ± 0,1
1 900	1 563,1 ± 0,1
2 000	1 616,8 ± 0,1
2 100	1 670,6 ± 0,1
2 200	1 724,3 ± 0,1
2 300	1 779,1 ± 0,1
2 400	1 831,6 ± 0,1
2 500	1 885,3 ± 0,1
2 600	1 938,9 ± 0,1
2 700	1 992,5 ± 0,1
2 800	2 046,3 ± 0,1
2 900	2 099,9 ± 0,1

¹ ppm (parts per million) = 0,0001 %

Anhang A Tabellen mit Rohdaten

3 000	$2\,153,7 \pm 0,1$
3 100	$2\,207,4 \pm 0,1$
3 200	$2\,260,9 \pm 0,1$
3 300	$2\,314,7 \pm 0,1$
3 400	$2\,368,3 \pm 0,1$
3 500	$2\,422,1 \pm 0,1$
3 600	$2\,475,6 \pm 0,1$
3 700	$2\,529,4 \pm 0,1$
3 800	$2\,583,1 \pm 0,1$
3 900	$2\,636,8 \pm 0,1$
4 000	$2\,690,4 \pm 0,1$
4 095	$2\,741,7 \pm 0,1$

Tabelle A.2: Rohdaten für die Linearitätsmessung des DAC des Arduino Due. Spannungsmessgerät war ein Keithley 2000 Multimeter [20].

Literatur

- [1] Communications und O. Group, *LHC faq - the guide*, 2017, URL: https://home.cern/sites/default/files/2018-07/CERN-Brochure-2017-002-Eng_0.pdf.
- [2] HISKP, *Webseite des Bonner Isochron Zyklotrons*, 2021, URL: <https://www.zyklotron.hiskp.uni-bonn.de> (besucht am 15. 03. 2022).
- [3] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, Berlin, Heidelberg, 2017, URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55790-7>.
- [4] P. Wolf, *Development of a Proton Irradiation Site at the Bonn Isochronous Cyclotron*, Magisterarb., 2019, URL: https://www.hep1.physik.uni-bonn.de/results/data/internal/Wolf_Master.pdf.
- [5] *I2C Info - I2C Bus. Interface and Protocol, A two-wire Serial Protocol*, 2022, URL: <https://i2c.info>.
- [6] A. Devices, *Op Amp Input Bias Current*, 2008, URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-038.pdf>.
- [7] Arduino, *Hardware Überblick Arduino Due*, 2022, URL: <https://www.arduino.cc>.
- [8] Arduino, *Hardware Überblick Arduino Due*, 2022, URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/duel>.
- [9] ATMEL, *Datenblatt des SAM3X Microchips des Arduino Due*, 2015, URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf.
- [10] W. Reinhold, *Elektronische Schaltungstechnik: Grundlagen der Analogelektronik mit Aufgaben und Lösungen*, München, 2020, URL: <https://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139%2F9783446463684>.
- [11] B.-B. Corporation, *INA105: Precision Unity Gain Differential Amplifier*, 1993, URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina105.pdf>.
- [12] T. Instruments, *OPAx277 High Precision Operations Amplifiers*, 2015, URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4277.pdf?ts=1647632848322&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA4277.
- [13] B. Heinrich, *Grundlagen Regelungstechnik: Einfache Übungen, praktische Beispiele und komplexe Aufgaben*, Wiesbaden, 2021, URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-34420-7>.
- [14] T. Hrycej, *Robuste Regelung: Ein Leitfaden für sicherheitskritische Anwendungen*, Berlin, Heidelberg, 2018, URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54168-5>.

- [15] M. Matera, URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/fastpid/>.
- [16] R. P. Foundation, *Webseite der Raspberry Pi Foundation*, 2022,
URL: <https://www.raspberrypi.org> (besucht am 19.03.2022).
- [17] M. Industries, *I2C Bus Electrical Specifications*,
URL: <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/sbc-single-board-computers/freescale-hcs12-9s12-c-language/instrument-control/i2c-bus-specifications> (besucht am 24.03.2022).
- [18] B. Knopp,
extractio-control, Code for Arduino and Raspberry Pi for extraction control and communication,
2022.
- [19] Tektronix, *AFG3102 Tektronix, AFG3102 Datasheet*, 2007,
URL: <http://datasheet.elcodis.com/pdf/23/76/237676/afg3102.pdf>.
- [20] Tektronix, *Model 2000 6 1/2-Digit Multimeter, Datasheet*,
URL: <https://download.tek.com/datasheet/2000-DMM-Data-Sheet-1KW612970.pdf>.
- [21] M. Rost und S. Wefel,
Elektronik für Informatiker: Von den Grundlagen bis zur Mikrocontroller-Applikation,
De Gruyter Oldenbourg, 2021, ISBN: 9783110609066,
URL: <https://doi.org/10.1515/9783110609066>.
- [22] SSH.com, *SSH (Secure Shell) Home Page*, 2021, URL: <https://www.ssh.com/academy/ssh>.

Glossar

- IC** Integrierte Schaltkreise (integrated circuit, IC) enthalten eine hohe Anzahl (Größenordnung 10^3 bis 10^9) einfacher Transistorstrukturen, die auf dem Halbleiterchip mit passiven Bauelementstrukturen zu Funktionsblöcken (Stromquellen, Verstärker, Inverter usw.) zusammenschaltet sind. Eine Anzahl gleicher oder verschiedener Funktionsblöcke wiederum sind auf dem Chip funktionsorientiert verbunden und realisieren die Gesamtfunktion des Schaltkreises. Entnommen aus [21, S. 113]. 8, 11, 12
- SSH** SSH (Secure **Shell**) ist ein Software-Paket, welches sichere System-Überwachung und Datei-Transfer über unsichere Netzwerke ermöglicht. Vergleiche [22]. 18

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersichtsplan des Bonner Isochron Zyklotrons	4
2.2	Schematische Zeichnung der Schlitzanordnung und Regelung	4
3.1	ADC-Linearität Arduino Due	8
3.2	DAC-Linearität Arduino Due	9
3.3	Nicht-invertierender Verstärker	11
3.4	Invertierender Verstärker	11
3.5	Schaltung eines Subtrahierers. Entnommen aus [10, S. 232 Bild 12.5].	12
3.6	Eingangspiegelwandler	13
3.7	Ausgangspiegelwandler	13
3.8	Schaubild zur Ermittlung der Regelgröße.	16
3.9	Schematische Darstellung zur Berechnung des Regelsignals.	16
3.10	Flussdiagramm zum Ablauf eines Regelkreislaufs.	17
3.11	Gesamtaufbau einer modernisierten Regelung	18
4.1	Schlitzstellung und Verstärkungsfaktoren	20
4.2	Fourier-Transformation des IU-gewandelten Strahlstroms in einem Intervall von 0 bis 4 MHz.	21
4.3	Signalstärke in Abhängigkeit der Frequenz bei einem Spektrum von 0 bis 300 kHz.	21
4.4	Abschätzung der Regelgeschwindigkeit	22
4.5	Regelverhalten, nur P- oder I-Teil	23
4.6	Variierung der Regelkonstanten	24
4.7	Regelungsoptimierung	25

Tabellenverzeichnis

A.1	Messwerte für Linearitätsüberprüfung ADC Arduino Due	29
A.2	Rohdaten für Linearitätsmessung DAC Arduino Due	30