

**Ansteuerung und Strahldiagnose
des
Laborbeschleunigers LAB**

Philip Hauer

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

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

Juli 2015

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,
Datum

.....
Unterschrift

1. Gutachter: PD Dr. Wolfgang Hillert
2. Gutachter: Prof. Dr. Jochen Dingfelder

Danksagung

Ohne die Unterstützung vieler Personen wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir in den letzten Monaten mit Rat, Tat und guten Worten zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Wolfgang Hillert, der mir dieses spannende Bachelorprojekt ermöglichte und mich dabei selbstständig arbeiten ließ.

Ich möchte auch Herrn Prof. Jochen Dingfelder danken, der ohne zu zögern das Koreferat dieser Bachelorarbeit übernahm.

Außerdem bedanke ich mich bei meinem Betreuer Jan Schmidt, der in den letzten Monaten sehr viel Zeit für die Betreuung meiner Bachelorarbeit aufgebracht hat, zu dem ich jederzeit mit meinen Fragen kommen konnte und der mir diese geduldig und ausführlich beantwortet hat.

Es wäre mir nicht möglich gewesen dieses Projekt ohne die Unterstützung meiner Freunde Thilo vom Hövel und Yannick Dieter zu gestalten. Vielen Dank für die gute Zusammenarbeit und jedes Gespräch.

Liebe ELSA-Arbeitsgruppe, euch allen danke ich für die offene Aufnahme in euren Kreis. Ein besonderer Dank gilt meinen Bürokollegen Nikolas Heurich, Thomas Perlitius, Yannick Dieter und Thilo vom Hövel für die angenehme Atmosphäre, dank euch bin ich immer gerne ins Institut gekommen.

Außerdem danke ich Jan Schmidt, Nikolas Heurich, Dennis Sauerland und Thomas Perlitius für das Korrekturlesen meiner Bachelorarbeit.

Abschließend möchte ich meiner Mutter danken, ohne dich hätte ich nicht die Möglichkeit gehabt Physik zu studieren. Vielen Dank für alles!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Laborbeschleuniger LAB	3
2.1	Schematische Übersicht	3
2.2	Erzeugung des Elektronenstrahls	5
2.3	Beeinflussung des Elektronenstrahls	6
2.3.1	Korrektormagnete	6
2.3.2	Quadrupole	7
2.4	Diagnose des Elektronenstrahls	8
2.4.1	Leuchtschirme	8
2.4.2	Kameras	9
3	Ansteuerung und Überwachung	11
3.1	Anforderungen	11
3.1.1	Ansteuerung der Schirme	12
3.1.2	Ansteuerung der Kameras	13
3.1.3	Ansteuerung des Ventils	13
3.1.4	Überwachung	13
3.1.5	Video-Signal	13
3.2	Umsetzung	14
3.2.1	I ² C-Datenbus	14
3.2.2	Raspberry Pi	14
3.2.3	I/O Expander	15
3.2.4	Ansteuerung	16
3.2.5	Überwachung	17
3.2.6	Video-Multiplexer	18
3.3	Gesamtschaltung	19
3.4	Software	19
4	Strahldiagnose	23
4.1	Auswertung des Kamerasignals	23
4.1.1	Eigenschaften des Kamerasignals	23
4.1.2	Transversales Strahlprofil	23
4.1.3	Auswertung des Videosignals	24
4.2	Eigenschaften der Kamera	24
4.2.1	Schärfentiefe	24
4.2.2	Abbildungsmaßstab	29

5 Zusammenfassung und Ausblick	33
Abbildungsverzeichnis	37

Einleitung

Im Rahmen dieses Bachelorprojektes wurde der Laborbeschleuniger Lab Course Accelerator Bonn (LAB) entwickelt und aufgebaut. Wie der Name andeutet, ist der zukünftige Einsatz des Laborbeschleunigers das Master-Praktikum im Studiengang Physik an der Universität Bonn. Dort sollen die Praktikanten in einem Versuch die Grundlagen der Strahloptik kennenlernen, verschiedene Strahlparameter (zum Beispiel die Emittanz des Elektronenstrahls) bestimmen und den allgemeinen Aufbau eines Teilchenbeschleunigers kennenlernen.

In dem Laborbeschleuniger werden Elektronen durch eine statische Hochspannung von 50 kV beschleunigt, wodurch sie eine Geschwindigkeit von ungefähr 41% der Lichtgeschwindigkeit erreichen. Mit einer Magneto-optik kann man den erzeugten Elektronenstrahl beeinflussen und ihn auf Leuchtschirmen beobachten.

Diese Bachelorarbeit behandelt die Ansteuerung und Strahldiagnose des Laborbeschleunigers LAB. Ansteuerung bedeutet, dass man den Beschleuniger mittels einer grafischen Oberfläche (Kontrollmenü) vollständig an einem Computer (Kontrollrechner) steuern und überwachen kann. Ziel ist es, dass verschiedene Soll-Werte über das Kontrollmenü einstellbar sind, wie zum Beispiel die Position eines Strahlmonitors oder der Strom, der durch eine Magnetspule fließt und dass man verschiedene Ist-Werte im Kontrollmenü anzeigt, wie zum Beispiel den Zustand eines Ventils. Dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Platine und ein Computerprogramm entwickelt.

Die Strahldiagnose bezeichnet die Untersuchung des Elektronenstrahls, die mit Strahlschirmen und Kameras durchgeführt wird. Das Ziel ist, dass ein Schirm in den Strahlverlauf gefahren wird, eine Kamera diesen beobachtet und man aus der aufgenommenen Intensitätsverteilung am Kontrollrechner die Strahlposition und -breiten bestimmt. Für die benutzten Kameras wurde im Rahmen dieser Arbeit das optimale Objektiv sowie der Abbildungsmaßstab bestimmt.

Neben der Ansteuerung und Strahldiagnose des Laborbeschleunigers gibt es noch zwei andere Bachelorprojekte, die sich mit dem Aufbau des Laborbeschleunigers beschäftigen. Zum einen wurde die Elektronen-Quelle entworfen, siehe dazu [1], zum anderen wurden die Quadrupole und die Korrektormagnete konzipiert und vermessen, siehe dazu [2].

Im Folgenden wird kurz die Grundidee des Beschleunigers erläutert, danach wird die Ansteuerung des Beschleunigers erklärt und zum Schluss wird das Diagnosesystem beschrieben.

Der Laborbeschleuniger LAB

In diesem Kapitel wird die Grundidee des Laborbeschleunigers LAB erläutert. Dabei werden die wesentlichen Elemente des Beschleunigers vorgestellt und erklärt. Der Fokus liegt dabei auf den Bestandteilen, die für die Ansteuerung und Strahldiagnose wichtig sind.

2.1 Schematische Übersicht

Der grundlegende Aufbau des Laborbeschleunigers LAB ist in der Abbildung 2.1 dargestellt. Der Elektronenstrahl wird in der Elektronen-Quelle erzeugt und beschleunigt. Er wird durch einen Solenoid fokussiert und durchläuft dann den ersten Korrektormagnet C0. Nach diesem ist ein Schirm S0 verbaut, mit dem man die Lage des Strahls untersuchen kann. Nach dem Schirm S0 folgt der erste Quadrupol Q1, auf den wieder ein Korrektormagnet C1 folgt. Nach einer Driftstrecke ist der Schirm S1 installiert. Die Abfolge, dass auf einen Quadrupol ein Korrektormagnet und schließlich nach einer kurzen Driftstrecke ein Schirm folgt, setzt sich fort. Die Bezeichnungen der Elemente verdeutlichen die Idee, dass bestimmte Elemente logisch zusammen gehören. So kann man den Strahl durch Magnete beeinflussen und nach einer kurzen Driftstrecke von circa 30 cm die Veränderungen auf einem Schirm beobachten.

Die roten, gestrichelten Linien in Abbildung 2.1 deuten die modulare Bauweise des Beschleunigers an. Jedes Modul soll für sich eigenständig sein. Damit ist gemeint, dass man die Module gegebenenfalls später anders anordnen oder um andere Module (zum Beispiel um einen Ablenkmagneten) erweitern möchte. In dem Modell des Laborbeschleunigers, welches in Abbildung 2.2 zu sehen ist, erkennt man die modulare Bauweise. Jedes Modul ist auf einem eigenen Gestell untergebracht.

In dem Modell des Teilchenbeschleunigers in Abbildung 2.2 sind drei Vakuumpumpen zu erkennen, die dafür sorgen, dass das Strahlrohr und insbesondere die Elektronen-Quelle evakuiert sind. Das Ziel ist, dass in der Vakuumkammer ein Ultrahochvakuum herrscht. Angeschlossen an das erste Modul (das Modul mit der Elektronen-Quelle) befindet sich eine Iongetterpumpe (IGP) und eine Turbomolekularpumpe (TMP), auf dem dritten Modul ist eine zusätzliche TMP eingebaut. Hinter der Elektronen-Quelle befindet sich ein Ventil, das im geschlossenen Zustand die Vakuumkammer der Elektronen-Quelle von dem Strahlrohr trennt.

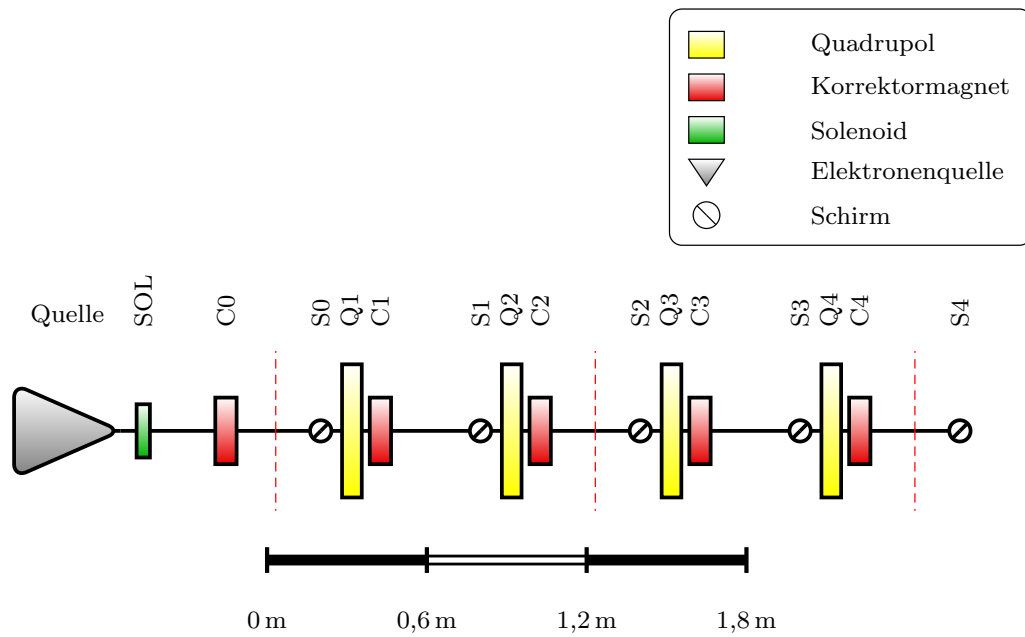


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Laborbeschleunigers LAB.

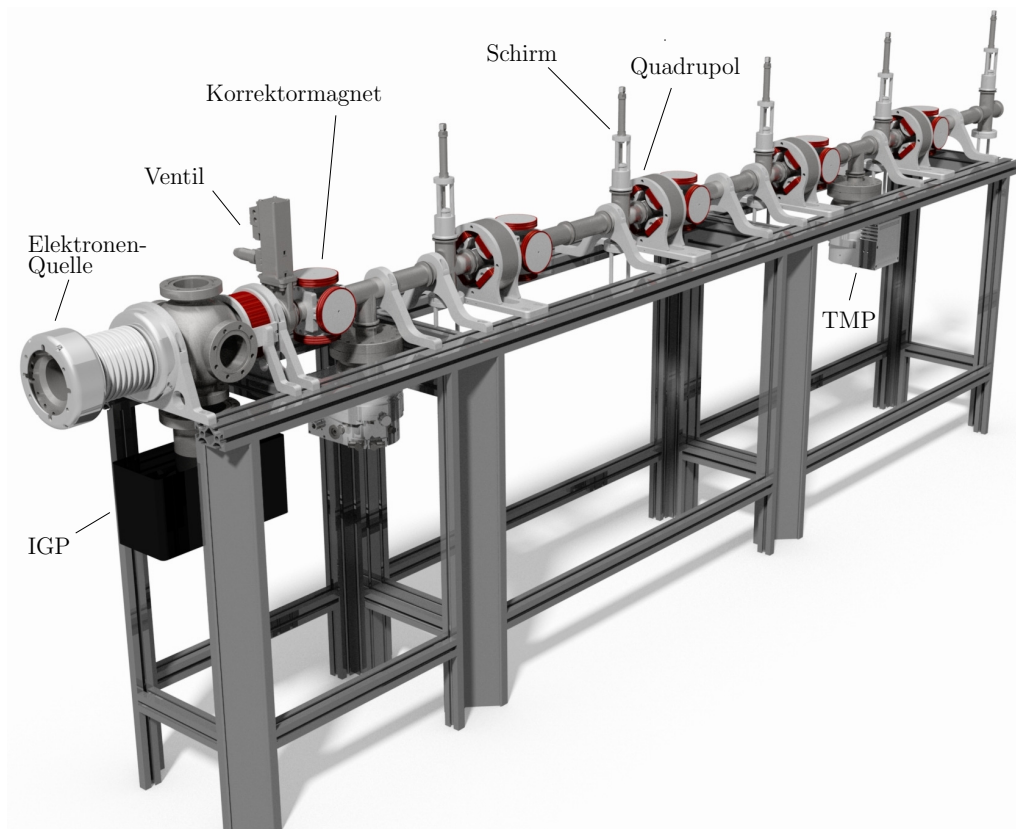


Abbildung 2.2: Modellierte Darstellung des Laborbeschleunigers LAB [3].

2.2 Erzeugung des Elektronenstrahls

Um einen Elektronenstrahl zu erzeugen, der eine hohe kinetische Energie besitzt, wird mit Hilfe einer Glühkathode, die an einer Heizspannung angeschlossen ist, eine Elektronenwolke erzeugt. Diese Wolke aus Elektronen wird durch eine Hochspannung $U_{HV} = 50 \text{ kV}$ beschleunigt. Die Elektronen können durch eine Öffnung in der Anode in das Strahlrohr gelangen und bilden dadurch den Elektronenstrahl. Genauere Informationen zu der Erzeugung und der Beschleunigung der Elektronen sind der Bachelorarbeit von Thilo vom Hövel [1] zu entnehmen.

Mit dem Wissen, dass die Elektronen mit einer Hochspannung von 50 kV beschleunigt werden, kann man einige Größen berechnen, die für den Laborbeschleuniger LAB typisch sind. Die Elektronen haben nach der Beschleunigung eine kinetische Energie $E_{\text{kin}} = 50 \text{ keV}$. So ist das Verhältnis von der Geschwindigkeit v der Elektronen zur Lichtgeschwindigkeit c mit β bezeichnet und es ergibt sich

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E_{\text{ges}}} = \frac{\sqrt{E_{\text{ges}}^2 - m_0^2 c^4}}{E_{\text{ges}}} \approx 0,413 ,$$

wobei E_{ges} die Gesamtenergie, p der Impuls und m_0 die Ruhemasse eines Elektrons bezeichnet. Daraus folgt, dass die Geschwindigkeit v der Elektronen nach der Beschleunigung ungefähr 41 % der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Nun kann man den Lorentzfaktor γ bestimmen und erhält

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx 1,098 .$$

2.3 Beeinflussung des Elektronenstrahls

Wie in großen und modernen Teilchenbeschleunigern üblich, wird auch beim Laborbeschleuniger LAB der Elektronenstrahl mit Hilfe von Magneten beeinflusst. Es werden vier Quadrupole und fünf Korrektormagnete installiert, deren Funktionsweisen hier kurz erläutert werden. Hintergrundinformationen zu den einzelnen Elementen sind der Bachelorarbeit von Yannick Dieter [2] zu entnehmen.

2.3.1 Korrektormagnete

Die Korrektormagnete haben die Aufgabe, die Bahn des Elektronenstrahls horizontal und vertikal zu korrigieren. Dafür werden transversale (also senkrecht zum Elektronenstrahl stehende) magnetische Felder genutzt. Ein Korrektormagnet besteht aus zwei Spulen, welche ein möglichst homogenes Magnetfeld erzeugen. Sie werden im Laborbeschleuniger LAB immer paarweise verwendet, wobei ein Spulenpaar ein Magnetfeld in der horizontalen Ebene und das andere Spulenpaar ein Magnetfeld in der vertikalen Ebene erzeugt.

Das horizontale Spulenpaar erzeugt ein Magnetfeld in der horizontalen Ebene; durch die Lorentzkraft, die auf die sich im Magnetfeld bewegenden Elektronen wirkt, wird der Strahl vertikal abgelenkt. Mit dem vertikalen Spulenpaar verhält es sich ähnlich, es erzeugt ein Magnetfeld in der vertikalen Ebene und lenkt den Strahl in horizontaler Richtung ab. Somit können Abweichungen der Strahlposition von der Mitte des Strahlrohrs behoben werden. Diese Abweichungen entstehen zum Beispiel durch die ablenkende Wirkung des Erdmagnetfelds oder durch eine ungenaue Justierung des Strahlrohrs.

In Abbildung 2.3 sind die Korrektormagnete schematisch dargestellt. Es gibt insgesamt fünf Korrektormagnetpaare, die sich (von der Elektronenquelle aus betrachtet) jeweils circa 30 cm vor den Schirmen befinden. Sollte man auf den Schirmen erkennen, dass der Strahl zu weit ausgelenkt ist, kann man mit den Korrektormagneten diese Auslenkung minimieren.

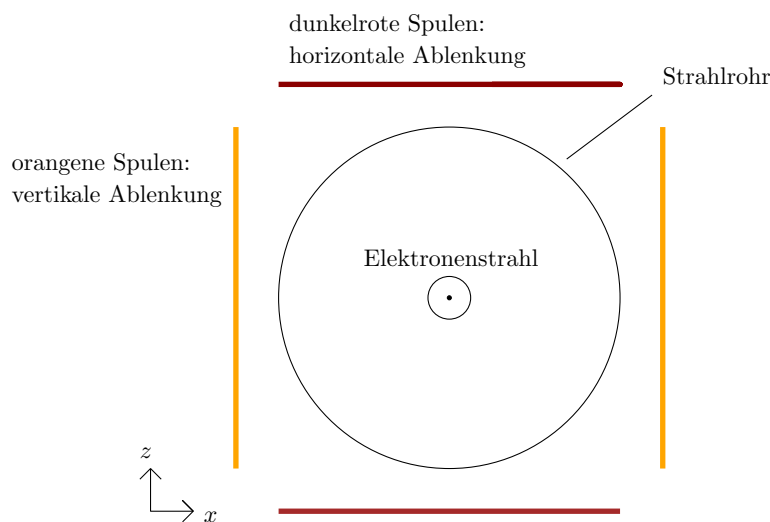


Abbildung 2.3: Schematische Abbildung der Korrektormagnete. Die orange eingefärbten Spulen werden für die vertikale, die dunkelrot eingefärbten Spulen für die horizontale Ablenkung eingesetzt. Die Elektronen bewegen sich aus der Blattebene heraus. Nicht zu erkennen ist die Form der Spulen, sie sind kreisförmig.

2.3.2 Quadrupole

Die Quadrupole dienen der Fokussierung des Elektronenstrahls. Wie der Name andeutet, besteht ein Quadrupol aus vier magnetischen Polen, die wie in Abbildung 2.4 angeordnet sind. Allerdings fokussieren Quadrupole immer nur in einer Ebene (zum Beispiel in der horizontalen Ebene) und defokussieren in der anderen Ebene (in dem Beispiel in der vertikalen Ebene). In der Praxis spricht man trotzdem häufig von fokussierenden oder defokussierenden Quadrupolen, gemeint ist dann immer die horizontale Ebene. In Abbildung 2.4 ist ein defokussierender Quadrupol gezeigt, bei einem fokussierendem Quadrupol sind die Nord- und Südpole vertauscht.

Die Quadrupole sind in einer typischen Reihenfolge angeordnet. Auf einen fokussierenden Quadrupol folgt immer ein defokussierender und umgekehrt. Somit wechseln sich fokussierende und defokussierende Quadrupole ab. Insgesamt ergibt sich eine Fokussierung in beiden Ebenen. Diese Anordnung wird verständlich, wenn man sich den Elektronenstrahl als Lichtstrahl und die Quadrupole als Linsen vorstellt. Den Lichtstrahl kann man auch mit einer Sammellinse und einer Zerstreuungslinse bündeln und somit fokussieren.

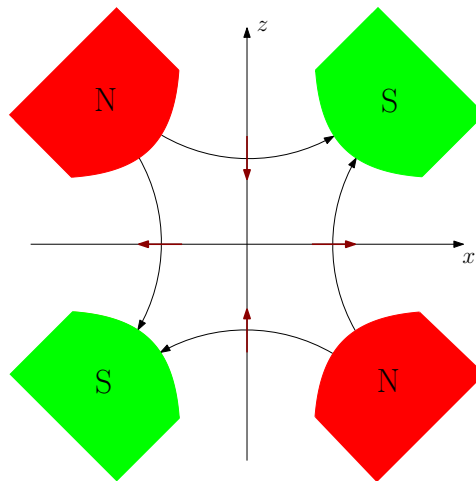


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau eines defokussierenden Quadrupols. In schwarz sind die Feldlinien des magnetischen Feldes eingezeichnet und in dunkelrot die Bewegung, die ein Elektron erfahren würde, wenn es sich an dieser Stelle aus der Blattebene herausbewegen würde [2].

2.4 Diagnose des Elektronenstrahls

Um Informationen über den Elektronenstrahl (zum Beispiel die Ausdehnung des Strahls in der horizontalen oder vertikalen Ebene) zu erhalten, nutzt man Leuchtschirme und Kameras. Elektronen erzeugen beim Auftreffen auf einen Leuchtschirm Licht, welches man mit der Kamera aufnimmt und das aufgenommene Intensitätsprofil am Kontrollrechner untersucht. Die wichtigsten Anwendungen sind dabei, dass man die Position des Strahls ermittelt und gegebenenfalls mit den Korrektormagneten eine Positionskorrektur durchführt, sowie die Bestimmung der Strahlbreite, welche man mit den Quadrupolen einstellen kann.

Die Leuchtschirme sollen sich dabei nicht dauerhaft im Strahlverlauf befinden, da durch einen Schirm im Strahlweg der Strahl zerstört wird. Deswegen kann man die Schirme ferngesteuert in den Strahlverlauf rein- oder aus dem Strahlverlauf herausfahren. Wenn sich nun ein Schirm im Strahlweg befindet, soll eine Kamera eingeschaltet werden, die den Schirm (und somit auch den vom Strahl erzeugten Leuchtfleck) beobachtet. Eine schematische Zeichnung des Aufbaus ist in Abbildung 2.5 zu erkennen, in der sich der Schirm im Strahlverlauf befindet.

Im Folgenden werden kurz die Elemente erklärt, die für die Diagnose des Strahls wichtig sind.

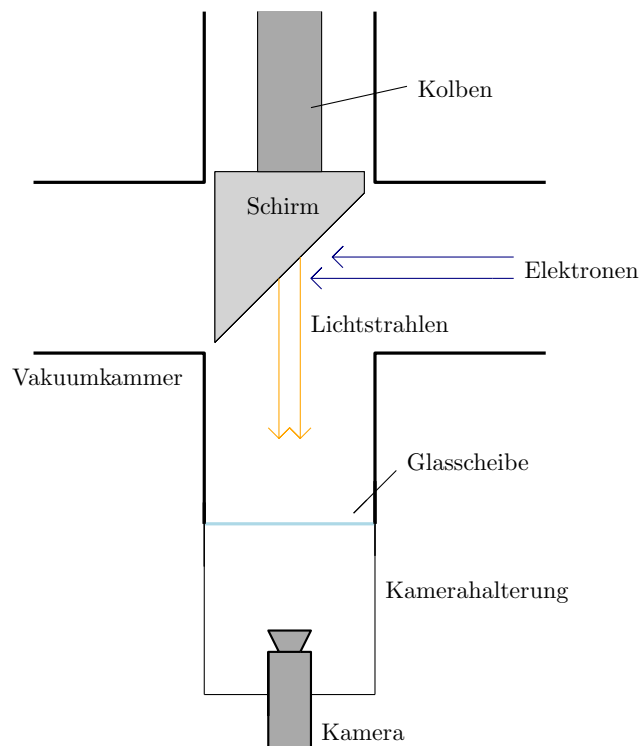


Abbildung 2.5: Schematische Zeichnung von Kamera und fahrbarem Schirm.

2.4.1 Leuchtschirme

Die Schirme werden mit einem Kolben, der mit Druckluft arbeitet, in den Strahlverlauf hinein- oder aus dem Strahlverlauf hinausgefahren. Auf dem Schirm befindet sich eine Kachel aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), welche im sichtbaren Wellenlängenbereich fluoresziert, wenn Elektronen auf sie auftreffen. Dadurch kann man die Verteilung der Elektronen sichtbar machen.

Der Schirm ist in einem 45° Winkel zum Elektronenstrahl verkippt. Dadurch kann man den Schirm zwar verzerrungsfrei beobachten (das heißt, dass zum Beispiel die Kamera einen kreisförmig einfallenden Elektronenstrahl auch kreisförmig abbildet), allerdings ist dadurch die Schärfe des Kamerabildes nur in einem bestimmten Bereich gegeben, der Rest des Bildes ist unscharf. Die Schirme befinden sich im Vakuum, darum müssen bestimmte Vorkehrungen getroffen werden. Zum Beispiel wird das Gewinde der Schrauben an einer Seite abgeflacht, damit man die Luft besser abpumpen kann.

An der Außenseite der Kolben sind zwei Lagesensoren angebracht, welche Auskunft über die momentane Position der Schirme geben. Somit kann man die Position der Schirme ständig überprüfen und erhält Auskunft, ob alle Prozesse wie gewünscht abgelaufen sind. Nähere Informationen zur Überwachung der Zustände kann man dem Abschnitt [3.1.4](#) entnehmen.

2.4.2 Kameras

Für die Beobachtung der Schirme werden Kameras der Firma WATEC (Modell WAT-704R) verwendet. Diese liefert ein analoges Videosignal, welches an den Kontrollrechner geleitet wird. Im Gegensatz zu den Schirmen befinden sich die Kameras an festen Positionen außerhalb des Strahlrohrs. Diese Position ist so gewählt, dass die Kamera den Schirm so groß wie möglich abbildet, wenn sich dieser im Elektronenstrahl befindet. Dadurch kann man auch kleine Strukturen gut auflösen. Das aufgenommene Videosignal kann am Kontrollrechner verarbeitet werden.

Für den Teilchenbeschleuniger werden mehrere Kameras verwendet, allerdings soll immer nur ein Videosignal an den Kontrollrechner geleitet werden. Dazu wurde ein System entwickelt, das dafür sorgt, dass nur das Bild der momentan aktiven Kamera an den Kontrollrechner geleitet wird. Es besteht aus einer Video-Leitung und mehreren Video-Multiplexern, welche festlegen, welches Signal über die Video-Leitung an den Kontrollrechner gesendet wird. Genauere Informationen sind in Kapitel [4.1](#) gegeben.

Ansteuerung und Überwachung

Die verschiedenen Elemente des Beschleunigers sollen alle von einem Kontrollrechner aus angesteuert und überwacht werden können. Dazu wird das Kontrollsystem von ELSA [4, 5]¹ genutzt, welches auf den Laborbeschleuniger LAB angepasst wurde.

Bei den Elementen handelt es sich um die Kameras und die Leuchtschirme, die für die Strahldiagnose eingesetzt werden. Zusätzlich werden drei Vakuumpumpen eingesetzt, deren Zustand (zum Beispiel den An/Aus-Zustand) man ebenfalls auslesen möchte. Hinzu kommt die Ansteuerung des Ventils, mit dem man die Vakuumkammer der Elektronen-Quelle von der restlichen Vakuumkammer trennen kann, indem man es entweder öffnet oder schließt. Der Status dieses Ventils (offen oder geschlossen) soll daher ebenfalls überwacht werden.

Des Weiteren kann man verschiedene Parameter der Elektronen-Quelle einstellen und überwachen, dies wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht genauer erläutert, für Details siehe [1].

In den kommenden Abschnitten werden die Anforderungen erläutert, die bei der Ansteuerung und Überwachung des Laborbeschleunigers LAB erfüllt werden müssen. Danach wird auf deren Umsetzung eingegangen und anschließend wird die entwickelte Gesamtschaltung erklärt. Zum Abschluss des Kapitels wird die Funktion des Computerprogramms erläutert, mit dem die Kommunikation zwischen Kontrollsystem und den einzelnen Platinen stattfindet.

3.1 Anforderungen

Da viele Elemente angesteuert und überwacht werden müssen (insgesamt befinden sich fünf Kameras und fünf Schirme im Beschleuniger, hinzu kommen das Ventil und drei Vakuumpumpen), benötigt man ein System, mit dem man diese Elemente unabhängig voneinander ansteuern und Zustände dieser Elemente auslesen kann. Außerdem sollen, wie in Abschnitt 2.1 erklärt, die einzelnen Module unabhängig voneinander sein. Das ganze System soll dabei um zusätzliche Module erweiterbar sein.

Die Ansteuerung der einzelnen Elemente wird von einem Benutzer am Kontrollrechner durchgeführt. Genauer gesagt bedient der Benutzer das ELSA-Kontrollsystem, welches für den Laborbeschleuniger LAB angepasst wurde. Dieses Kontrollsystem besitzt eine grafische Oberfläche, auch Kontrollmenü genannt. Das Kontrollmenü soll die Möglichkeit bieten, dass beim Anklicken der entsprechenden Schaltfläche ein bestimmter Schirm in den Strahl gefahren und die dazugehörige Kamera eingeschaltet wird. Zusätzlich soll man eine Rückmeldung erhalten, ob die Prozesse wie gewünscht abgelaufen sind.

¹ Eine kurze Beschreibung des Kontrollsystems findet sich in [6].

3.1.1 Ansteuerung der Schirme

Die Strahldiagnose mit Leuchtschirmen ist eine destruktive Strahldiagnose. Damit ist gemeint, dass der Strahl nach der Diagnose mit einem Schirm zerstört ist. Folglich sollen sich die Schirme nur im Strahlverlauf befinden, wenn man den Elektronenstrahl an dieser Stelle auch untersuchen möchte. Dementsprechend soll es eine Möglichkeit geben, die Schirme in den Strahlverlauf hinein- und auch wieder hinausfahren zu können. Außerdem ist es sinnvoll, dass die Position der Schirme sich im Ausgangszustand außerhalb des Strahls befindet.

Die mechanische Bewegung der Schirme erfolgt über eine Druckluftsteuerung. Es wird ein Kolben verwendet, der oben und unten Druckluftanschlüsse besitzt. In Abbildung 3.1 ist die Funktionsweise des Kolbens schematisch dargestellt, in der Praxis wird ein Leuchtschirm auf dem Druckluftkolben montiert. In dieser Abbildung ändert der Kolben seinen Zustand von „eingefahren“ zu „ausgefahren“, indem die Druckluftzufuhr vom linken Druckluftanschluss weggenommen und auf den rechten Druckluftanschluss gegeben wird.

Die Druckluft wird mit einem Magnetventil verteilt. Dieses hat einen Drucklufteingang und zwei Druckluftausgänge, wovon immer nur einer aktiv ist. Die Wahl des Ausganges wird entweder über einen mechanischen Schalter oder über ein anliegendes Magnetfeld gesteuert. In der Praxis will man die Ventile (und damit auch die Bewegung der Schirme) fernsteuern, weshalb an jedem Magnetventil eine Magnetspule angebracht ist, die beim Anlegen einer Spannung von $U_{\text{Spule}} = 24 \text{ V}$ und einem Stromfluss von $I_{\text{Spule}} = 187,5 \text{ mA}$ ein Magnetfeld erzeugt, sodass das Magnetventil den Druckluftausgang umschaltet.

Da man die Schirme ferngesteuert betreiben möchte, wurde eine Ansteuerungsschaltung für die Schirme entwickelt. Die Funktionsweise basiert auf einem elektronischen Schalter, der – nach Betätigung der entsprechenden Schaltfläche im Kontrollmenü – einen Stromfluss durch die Magnetspule erlaubt, dadurch der Zustand des Magnetventils verändert wird und letztendlich der Schirm in den Strahlverlauf hinein oder aus dem Strahlverlauf hinausfährt.

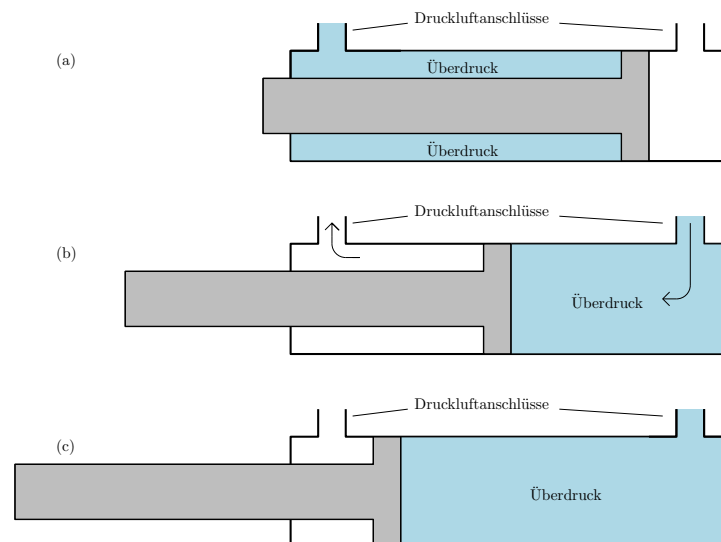


Abbildung 3.1: Funktionsweise des Druckluftkolbens. In Bild (a) ist der Kolben eingefahren, der Überdruck hält den Kolben in der gewünschten Position. Die Position ändert sich in Bild (b), da dort die Druckluft auf den rechten Eingang geleitet wird. Die Pfeile verdeutlichen den Luftfluss. In Bild (c) hat der Kolben seinen neuen Zustand („ausgefahren“) erreicht.

3.1.2 Ansteuerung der Kameras

Wenn sich ein Schirm im Strahlverlauf befindet, so soll dieser Schirm auch beobachtet werden. Dazu nutzt man eine Kamera, die erst eingeschaltet werden soll, wenn sich der zugehörige Schirm im Verlauf des Elektronenstrahls befindet. Einschalten heißt in dem Fall, dass die Kamera mit einer Spannung von $U_{\text{Kamera}} = 9 \text{ V}$ versorgt wird und dadurch ein Stromfluss von $I_{\text{Kamera}} = 105 \text{ mA}$ entsteht. Das Videosignal, welches die Kamera ausgibt, wird in den Abschnitten 3.1.5 und 4.1 behandelt.

Auch hier gilt, dass man die Kameras durch das Kontrollsystem ferngesteuert ein- und ausschalten möchte. Für jede Kamera benötigt man daher einen elektronischen Schalter, der den Stromfluss durch die Kamera erst erlaubt, wenn der Benutzer die entsprechende Schaltfläche im Kontrollmenü anklickt.

3.1.3 Ansteuerung des Ventils

Hinter der Elektronen-Quelle des Teilchenbeschleunigers LAB befindet sich ein Ventil, welches man bei Bedarf schließen und öffnen möchte. Im geschlossenen Zustand sind die Vakuumkammern der Elektronen-Quelle und des restlichen Strahlrohrs voneinander getrennt. Diese Trennung ist notwendig, wenn zum Beispiel das Strahlrohr geöffnet werden muss und das Vakuum, welches in der Kammer der Elektronen-Quelle vorhanden ist, nicht beeinflusst werden soll. Außerdem soll es sich immer im geschlossenen Zustand befinden, wenn der Versuch nicht stattfindet, damit das Vakuum in der Kammer der Elektronen-Quelle zusätzlich geschützt wird.

Die Ansteuerung des Ventils ist identisch zur Ansteuerung der Schirme, da das Ventil ebenfalls mit Druckluft arbeitet. Dementsprechend kann die entwickelte Schaltung auch auf dem ersten Modul verwendet werden, anstatt eines Schirmes wird hier das Ventil gesteuert.

3.1.4 Überwachung

Damit man die Zustände der Schirme (innerhalb oder außerhalb des Strahlverlaufs) im Kontrollsystem überwachen kann, werden zwei Lagesensoren am Kolben genutzt. Diese senden ein Signal, wenn sich der Kolben außerhalb oder innerhalb des Strahlverlaufs befindet. Der eine Lagesensor ist so platziert, dass er ein Signal ausgibt, sobald sich der Schirm innerhalb des Strahlverlaufs befindet, der andere Lagesensor ist so eingestellt, dass er ein Signal ausgibt, sobald der Schirm außerhalb des Strahlverlaufs ist.

Die Vakuumpumpen und das Ventil sollen ebenfalls überwacht werden. Die Schaltung, um die Zustände der Geräte auszulesen, ist jedoch identisch mit der Schaltung, die man zur Überwachung der Lagesensoren benötigt. Im Folgenden wird die Schaltung anhand der Lagesensoren erklärt.

Zusätzlich soll es noch die Möglichkeit geben, dass man analoge Werte (wie zum Beispiel die momentane Drehgeschwindigkeit der TMP) auslesen kann.

3.1.5 Video-Signal

Sobald man eine Kamera einschaltet, liefert diese ein Videosignal, welches verarbeitet werden muss. Ziel ist es, dieses Videosignal möglichst verlust- und störungsfrei an den Kontrollrechner zu leiten, damit es dort ausgewertet werden kann.

Die Kamera erzeugt ein sogenanntes „Composite Video“-Signal, welches charakteristische Eigenschaften besitzt. Wie bei den meisten Videosignalen üblich, soll auch dieses Signal über eine 75Ω -Leitung gesendet werden. Für eine reflexionsfreie Transmission des Signals ist somit ein Abschlusswiderstand von 75Ω notwendig. Es handelt sich um ein bipolares², analoges Videosignal mit einem

² Es treten sowohl negative, als auch positive Spannungen auf.

Pegel von $1 V_{SS}$ Spitzen-Spitzen-Spannung³ und besitzt eine Maximalfrequenz in der Größenordnung von 10 MHz.

3.2 Umsetzung

Die genannten Anforderungen sollen nun in einer Schaltung umgesetzt werden. Dafür werden mehrere „I/O Expander“ und ein „Raspberry Pi“ verwendet, die mit Hilfe des seriellen Datenbus „I²C“ Daten austauschen können. Da diese Elemente für das Verständnis der Ansteuerung und Überwachung wichtig sind, werden sie kurz erklärt. Anschließend werden die Schaltungen zur Ansteuerung und Überwachung genauer erläutert und am Schluss des Abschnitts wird die Funktionsweise des Video-Multiplexers dargestellt, mit dem das Video-Signal an den Kontrollrechner übertragen wird.

3.2.1 I²C-Datenbus

Der Datenbus „I²C“⁴ überträgt mit Hilfe eines Taktsignals (SCL⁵) und eines Datensignals (SDA⁶) Bytes an eine bestimmte Adresse. Dabei wird das Taktsignal von einem „Master“ ausgegeben (der „Master“ ist der „Raspberry Pi“) und wird von mehreren „Slaves“ empfangen (die „I/O Expander“ sind die „Slaves“). Wenn nun Datensignal und Taktsignal aufeinander abgestimmt sind, können Sequenzen von Einsen und Nullen erzeugt werden, siehe dazu Abbildung 3.2. Jeder „Slave“ besitzt eine eigene Adresse, die sieben Bit lang ist. Nun kann der „Master“ einen „Slave“ adressieren und dann entweder Daten an den „Slave“ schicken oder Daten von ihm empfangen.

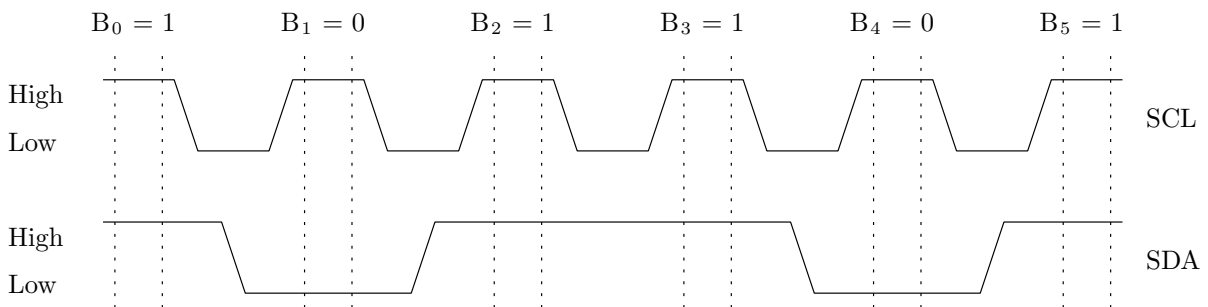


Abbildung 3.2: Beispielhafte Sequenz der Datenübertragung mit Hilfe von „I²C“. Oben ist das SCL-Signal abgebildet, unten das SDA-Signal. Immer, wenn das SCL-Signal auf hohem Potential („High“) liegt, werden Daten aus dem SDA-Signal übertragen, in diesem Fall die Sequenz 101101.

3.2.2 Raspberry Pi

Ein „Raspberry Pi“ ist ein kompakter und günstiger Ein-Platinen Computer, der einige nützliche Funktionen besitzt. Damit ist zum Beispiel die frei programmierbare Schnittstelle „GPIO“⁷ gemeint, welche unter anderem eine „I²C“-Schnittstelle umfasst. Wie im letzten Abschnitt erläutert ist diese wichtig für die Ansteuerung der „I/O Expander“. Außerdem besitzt ein „Raspberry Pi“ eine Ethernet-Schnittstelle,

³ Spitzen-Spitzen-Spannung bezeichnet die Differenz zwischen maximaler und minimaler Amplitude und beträgt für das Videosignal 1 V.

⁴ Inter-Integrated Circuit

⁵ Signal Clock

⁶ Signal Data

⁷ General Purpose Input/Output, eine Schnittstelle mit bis zu 40 Pins, mit denen man logische Signal erzeugen kann.

über die er in die Netzwerk-Kommunikation des Kontrollsystems eingebunden werden kann. Dies ist wichtig, damit man später über den externen Kontrollrechner die Funktionen des „Raspberry Pi“ steuern kann.

3.2.3 I/O Expander

Obwohl der „Raspberry Pi“ 40 Pins besitzt, mit denen man Ein- und Ausgangssignale verarbeiten kann, reichen diese nicht für die Ansteuerung des Beschleunigers aus. Deswegen braucht man eine Möglichkeit, um mehr Ein- und Ausgangs-Pins zu erzeugen. Dafür ist ein „I/O Expander“ ein geeignetes Bauteil. Wie der Name andeutet, erweitert ein „I/O Expander“ die Anzahl der Eingangs- (Input) und Ausgangs-Pins (Output).

Es wird hierbei ein „I/O Expander“ des Typs PCF8574 [7] verwendet, dessen Eigenschaften sowohl für die Anzahl der Elemente als auch für die modulare Bauweise ideal sind. Er besitzt acht beziehungsweise Ausgangs-Pins, wie in Abbildung 3.3 zu erkennen ist. Dadurch, dass man das Bauteil über den Datenbus „I²C“ ansteuern kann, können die „I/O Expander“ unabhängig voneinander eingesetzt werden. Wie vorher beschrieben, brauchen Bauteile, die über „I²C“ angesteuert werden, eine Adresse. Der PCF8574 stellt zwei Eigenschaften bereit, die viele Adressen und folglich viele Bauteile ermöglichen. Zum einen kann man drei der sieben Adressbits einstellen (die anderen vier sind intern festgelegt) und somit die Zahl der benutzbaren „I/O Expander“ auf acht erhöhen, zum anderen existiert das Bauteil PCF8574A, welches ähnlich aufgebaut ist wie der PCF8574, allerdings sind die vier voreingestellten Adresspins anders gewählt. Den Aufbau der Adresse kann man der Tabelle 3.1 entnehmen. Somit kann man insgesamt 16 „I/O Expander“ gleichzeitig in Betrieb nehmen. Im Endeffekt braucht man pro Modul zwei „I/O Expander“, womit sich eine maximale Anzahl von acht Modulen ergibt, die man mit diesen „I/O Expandern“ ansteuern kann.

Wie in Abbildung 3.3 zu erkennen ist, wird der „I/O Expander“ mit einer Spannung von 3,3 V versorgt. Dementsprechend ist eine logische 1 mit einer Spannung von 3,3 V gleichzusetzen (sowohl für ausgehende, als auch für eingehende Signale) und eine logische 0 ist mit einer Spannung von 0 V gleichzusetzen. Der „I/O Expander“ arbeitet also mit einer 3,3 V-Logik.

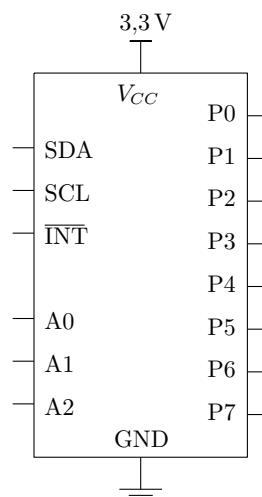


Abbildung 3.3: Schematische Übersicht über die verschiedenen Pins des PCF8574/A. Die Pins P0 bis P7 werden mit den zu steuernden Geräten verbunden, die Pins A0 bis A2 legen die Adresse fest, indem man sie entweder mit der Versorgungsspannung V_{CC} oder mit der Masse (GND) verbindet (siehe Tabelle 3.1), SDA und SCL sind die „I²C“-Schnittstelle und der Pin $\overline{\text{INT}}$ ist für die Anwendung nicht wichtig, er wird nicht verbunden.

Bitnummer	7	6	5	4	3	2	1
PCF8574	0	1	0	0	A2	A1	A0
PCF8574A	0	1	1	1	A2	A1	A0

Tabelle 3.1: Aufbau der Adresse der „I/O Expander“. Über die drei Pins A0, A1 und A2 kann die Adresse vom Benutzer beeinflusst werden, indem sie entweder mit dem Massepotential (entspricht einer logischen 0) oder mit der Versorgungsspannung V_{CC} (entspricht einer logischen 1) verbunden werden. Die anderen vier Adressbits sind im Bauteil vorgegeben.

3.2.4 Ansteuerung

Um die Anforderungen der Ansteuerung zu erfüllen, wurde eine Schaltung entwickelt, die auf den vorgestellten Bauteilen beruht. In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise dieser Schaltung dargestellt.

Eine Schaltskizze ist in Abbildung 3.4 zu sehen, in der die Ansteuerung einer Magnetspule gezeigt ist. Allerdings funktioniert das Prinzip auch für die Ansteuerung einer Kamera, man muss lediglich die Spannungsversorgung auf 9 V legen und die Magnetspule durch eine Kamera tauschen. Der dargestellte Pin des „I/O Expanders“ kann entweder auf hohem (3,3 V) oder niedrigem Potential (0 V) liegen. Diese Spannung reicht nicht aus, um die Magnetspule direkt zu schalten. Deswegen benötigt man eine externe Spannungsversorgung von 24 V und nutzt Transistoren, um den Stromfluss zu regeln.

Wenn nun der Pin des „I/O Expanders“ auf hohem Potential getrieben wird, so ist die Spannung zwischen Basis (B) und Emittter (E) von Transistor T1 hoch genug und ein Basisstrom kann fließen. Dieser Basisstrom hat zur Folge, dass ein hoher Kollektorstrom fließen kann. Damit ist das Potential am Kollektor (C) ähnlich dem Potential am Emittter, welches 0 V beträgt. Das Potential am Kollektor von Transistor T1 ist also ungefähr 0 V, dementsprechend ist das Potential an der Basis von Transistor T2 ebenfalls 0 V. Dadurch ist die Spannungsdifferenz zwischen Basis und Emittter von Transistor T2 nicht groß genug, sodass kein Basisstrom fließt. Damit ist auch der Kollektorstrom blockiert und ebenfalls der Stromfluss durch die Magnetspule. Insgesamt ergibt sich, dass die Magnetspule ausgeschaltet ist, wenn der Pin des „I/O Expanders“ auf hohem Potential getrieben wird.

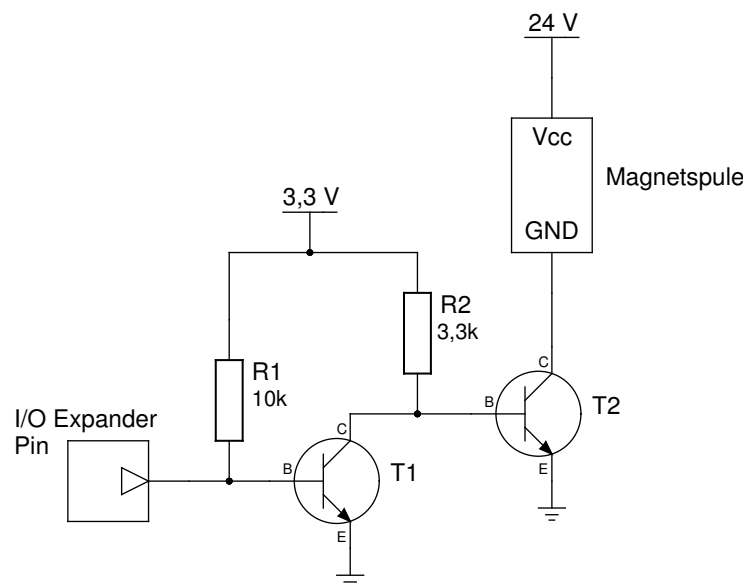


Abbildung 3.4: Teilschaltplan zur Ansteuerung der Magnetspule.

Für den Fall, dass der Pin des „I/O Expanders“ auf niedrigem Potential getrieben wird, ist die Spannung zwischen Basis und Emitter von Transistor T1 zu klein, es kann sich kein Basisstrom ausbilden und der Kollektor wird durch den Widerstand R2 auf ein hohes Potential gelegt⁸. Die Spannung zwischen Basis und Emitter von Transistor T2 ist also wieder groß genug, sodass hier ein Basisstrom fließen kann, welcher zur Folge hat, dass sich ein Kollektorstrom einstellen kann. Da die Massenverbindung („GND“) der Magnetspule mit dem Kollektor von Transistor T2 verbunden ist, kann auch durch die Magnetspule Strom fließen. Somit ist die Magnetspule eingeschaltet, wenn der Pin des „I/O Expanders“ auf niedrigem Potential getrieben wird.

Nachdem man den „I/O Expander“ an eine Versorgungsspannung anschließt, liegen die Pins P0 bis P7 standardmäßig auf hohem Potential. Mit der erstellten Schaltung verhindert man, dass sich alle Magnetspulen (und auch alle Kameras) direkt mit einschalten.

3.2.5 Überwachung

In Abbildung 3.5 ist eine Schaltskizze gezeigt, mit der man den Zustand eines Lagesensors auslesen kann. Zu sehen ist, dass der Lagesensor mit einer Versorgungsspannung $V_{CC} = 9\text{ V}$ betrieben wird und einen Datenausgang „DATA“ besitzt. Falls sich der Kolben in der Position befindet, dass ihn der Lagesensor registriert, wird der Datenausgang auf hohem Potential (9 V) getrieben. Falls sich der Kolben in einer Position befindet, in der ihn der Lagesensor nicht registriert, so befindet sich der Datenausgang auf niedrigem Potential, was in diesem Fall dem Massepotential (also 0 V) entspricht.

Wie oben erklärt, arbeitet der „I/O Expander“ allerdings mit einer 3,3 V Logik. Ein Signal mit der Amplitude von 9 V könnte der „I/O Expander“ dementsprechend nicht verarbeiten. Man nutzt deshalb einen Spannungsteiler, der das Signal von 9 V mit Hilfe von zwei Widerständen auf ein Potential von 3 V legt. Diese Schaltung funktioniert nur, wenn der „I/O Expander“ die Schaltung nicht belastet. Der Eingangswiderstand des „I/O Expanders“ ist allerdings groß genug, sodass man in guter Näherung annehmen kann, dass die Schaltung unbelastet ist.

Für das Auslesen der Analogwerte wird der ADC⁹ MCP3428 benutzt. Dieser digitalisiert die analogen Werte und kann diese digitalen Werte über den „I²C“-Bus an den „Raspberry Pi“ senden.

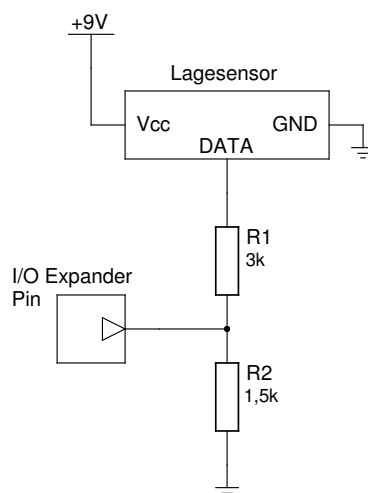


Abbildung 3.5: Teilschaltplan zur Überwachung eines Lagesensors.

⁸ Allgemein nennt man sowohl R1, als auch R2 „Pullup“-Widerstände.

⁹ Analog-to-Digital-Converter

3.2.6 Video-Multiplexer

Wie erläutert benötigt man ein System, mit dem man zwischen verschiedenen Kamerasignalen wählen kann, diese möglichst verlustfrei an den Kontrollrechner weiterleitet und das unabhängig von den anderen Modulen ist.

Umgesetzt wird dies durch einen Video-Bus, der nicht nur die einzelnen Module untereinander verbindet, sondern das Videosignal auch direkt an den Kontrollrechner leitet. Ein Video-Bus ist eine Verbindungsart, bei der es nur eine Videoleitung gibt und dementsprechend immer nur eine Kamera Signale senden kann. Eine schematische Darstellung mit zwei Modulen, auf denen sich jeweils zwei Kameras befinden, ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Jeder Multiplexer kann zwischen drei Eingängen wählen, von denen einer an den „Output“ weitergeleitet wird. Somit ist sichergestellt, dass immer nur ein Kamerasignal auf dem Video-Bus aktiv ist und auch nur ein Kamerasignal an den Kontrollrechner geleitet wird.

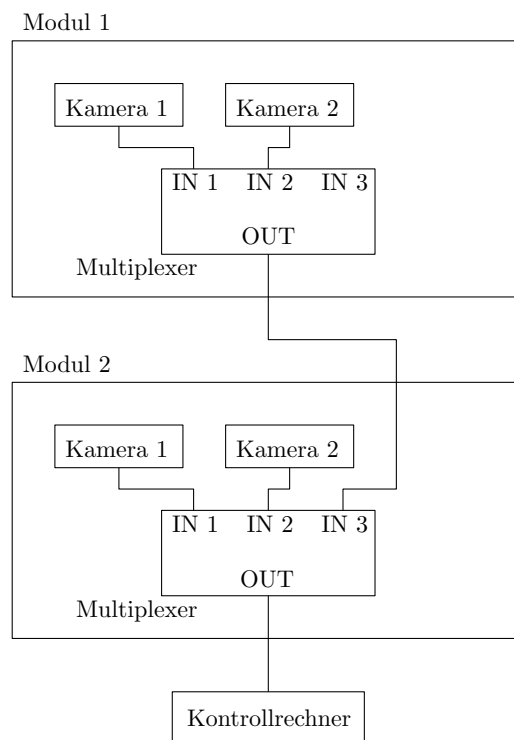


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des Video-Bus mit zwei Modulen. Auf jedem Modul werden die beiden Kameras mit den ersten beiden Kanälen („IN 1“ und „IN 2“) des Multiplexers verbunden. Der Ausgang („OUT“) des ersten Multiplexers wird mit dem dritten Kanal („IN 3“) des zweiten Multiplexers verbunden. Der Ausgang des letzten Multiplexers wird mit dem Kontrollrechner verbunden. So sind die einzelnen Module unabhängig voneinander.

Um diese Ideen zu realisieren, wurde der Video-Multiplexer ADV3221 ausgewählt. Dieses Bauteil ist ein Video-Multiplexer mit einer Bandbreite von 750 MHz, einem Eingangswiderstand von typischerweise 10 M Ω und vier Kanälen. Desweiteren kann der ADV3221 bipolare Signale verarbeiten, was für das vorhandene Kamerasignal notwendig ist [8].

Die Bandbreite ist groß genug, sodass das „Composite Video“-Signal kaum gedämpft wird. Die Eingänge des Video-Multiplexers und das Massepotential verbindet man mit einem 75 Ω -Widerstand. Dadurch ergibt sich ein effektiver Eingangswiderstand von knapp 75 Ω , da sich der 10 M Ω -Eingangs-

widerstand gemeinsam mit dem $75\ \Omega$ -Widerstand in einer Parallelschaltung befindet und deshalb der Einfluss des $10\ \text{M}\Omega$ -Widerstands verschwindend gering ist. Dadurch hindert man die Entstehung von ungewünschten Reflexionen. Die vier möglichen Kanäle des ADV3221 reichen aus, um die in Abbildung 3.6 dargestellte Schaltung zu realisieren.

3.3 Gesamtschaltung

Um die einzelnen Teilschaltungen zu vereinen, wurde eine Gesamtschaltung konzipiert. In diesem Abschnitt wird die entwickelte Schaltung erklärt und der dazugehörige Schaltplan vorgestellt. In der Praxis wird auf jedem Modul eine Platine eingebaut, die diese Schaltung enthält. Will man Module hinzufügen, bringt man auf diesen ebenfalls eine Platine an und verbindet die hinzugekommenen Platinen mit den bereits bestehenden Platinen.

In Abbildung 3.7 ist der Schaltplan für die Gesamtschaltung der Ansteuerung und Überwachung des Teilchenbeschleunigers LAB zu sehen. Die meisten Elemente wurden an Beispielen vorgestellt und erklärt. Zusätzlich sind noch weitere Elemente verbaut, die nun erläutert werden.

Für die Verbindung der einzelnen Platinen werden VGA¹⁰-Kabel verwendet. Dementsprechend dienen die beiden VGA-Anschlüsse auf der linken und rechten Seite der Schaltung der Verbindung zwischen den einzelnen Modulen. Ein VGA-Kabel besitzt 15 Adern, die Signale oder Spannungen von einem Modul zum nächsten Modul übertragen können. Dadurch hat man den Vorteil, dass die Versorgungsspannungen von 9 V und 24 V zentral erzeugt und per Kabel an die einzelnen Module geleitet werden können. Ebenso verhält es sich mit den beiden „I²C“ Signalen (SCL und SDA). Diese müssen sowohl zu jedem Modul (genauer gesagt zu jeder Platine) geführt werden, als auch zum „Raspberry Pi“. Mit Hilfe des VGA-Kabels lassen sich auch die Video-Signale reflexionsfrei übertragen, da drei der 15 Leitungen einen Wellenwiderstand von $75\ \Omega$ besitzen.

Die Versorgungsspannungen (3,3 V und 5 V) der einzelnen Bauteile (wie zum Beispiel des PCF8574) werden auf der Platine selbst erzeugt. Dazu nutzt man einen einstellbaren Spannungsregler, in diesem Fall den LM317T. Dieser erzeugt eine konstante, positive Ausgangsspannung, die man mit Hilfe von zwei Widerständen einstellen kann. Für negative Versorgungsspannungen greift man auf den Spannungsinvertierer ICL7660 zurück. Mit diesem Bauteil kann man eine Spannung invertieren, indem man zwei externe Kondensatoren einsetzt.

Diese Schaltung wurde zu Testzwecken auf einer Lochrasterplatine zusammgebaut und verlötet. Ein Bild dieser Testplatine ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Der Test mit einem Modul verlief erfolgreich, sodass die Funktion des Schaltplans in Abbildung 3.7 sichergestellt ist. Auf der Testplatine werden BNC-Stecker verwendet, die in der Praxis durch VGA-Kabel ersetzt werden, außerdem wurde der ADC noch nicht eingebaut.

3.4 Software

Die Kommunikation zwischen Kontrollrechner, „Raspberry Pi“ und den einzelnen Platinen übernimmt ein Computerprogramm, welches in der Programmiersprache C geschrieben wurde. Dieses Programm wird auf dem „Raspberry Pi“ gestartet und überprüft ständig, welcher Schirm sich gerade im Strahlverlauf befinden soll, dementsprechend auch, welche Kamera aktiv sein soll und ob das Ventil geöffnet oder geschlossen sein soll. Deren Zustände korrespondieren zu Status Sollwerten, welche der Benutzer im Kontrollsystem einstellen kann. Wenn der neue Sollwert gleich dem alten Sollwert ist (zum Beispiel

¹⁰ Video Graphics Array

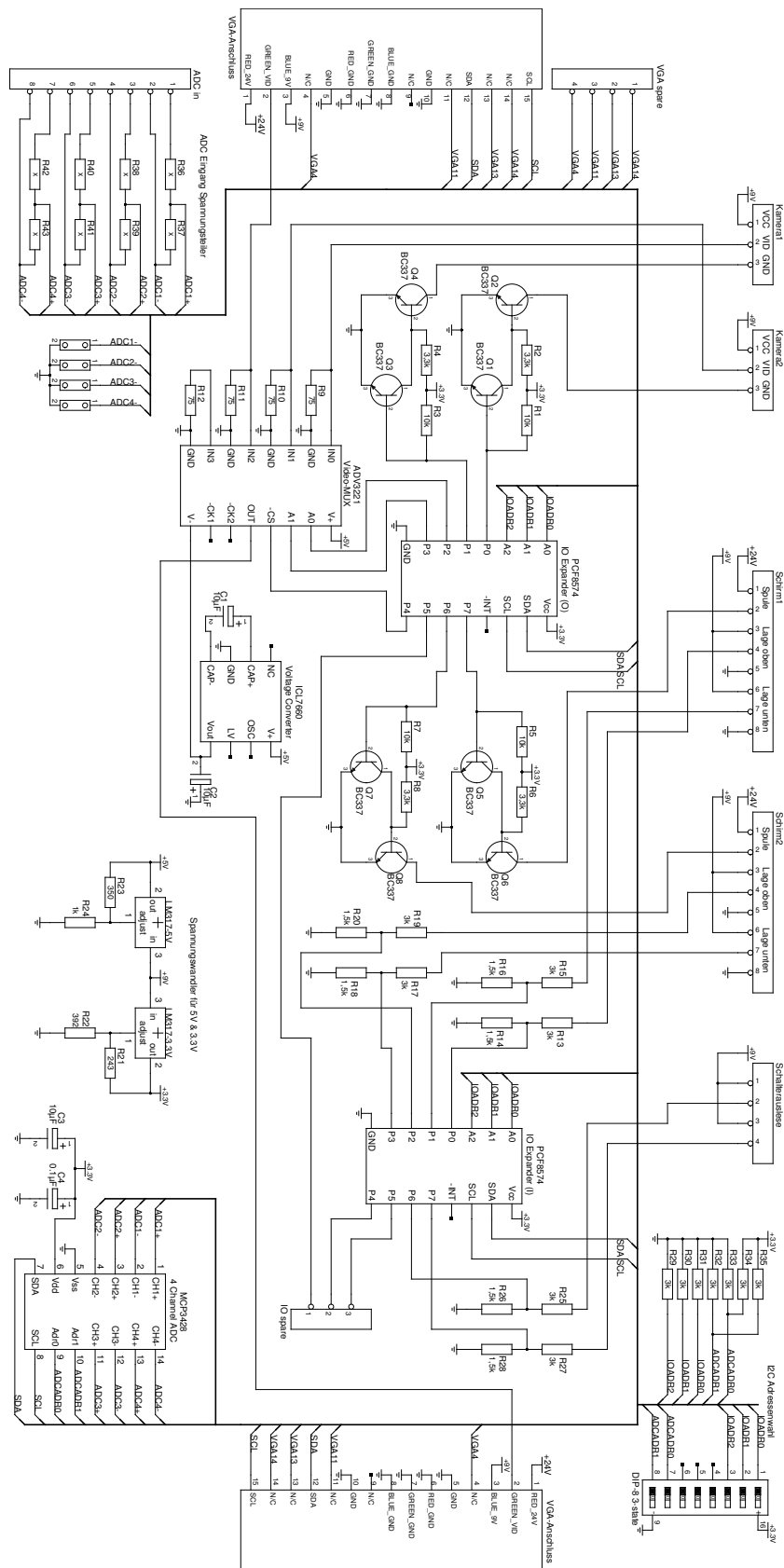


Abbildung 3.7: Gesamtschaltung zur Ansteuerung und Überwachung.

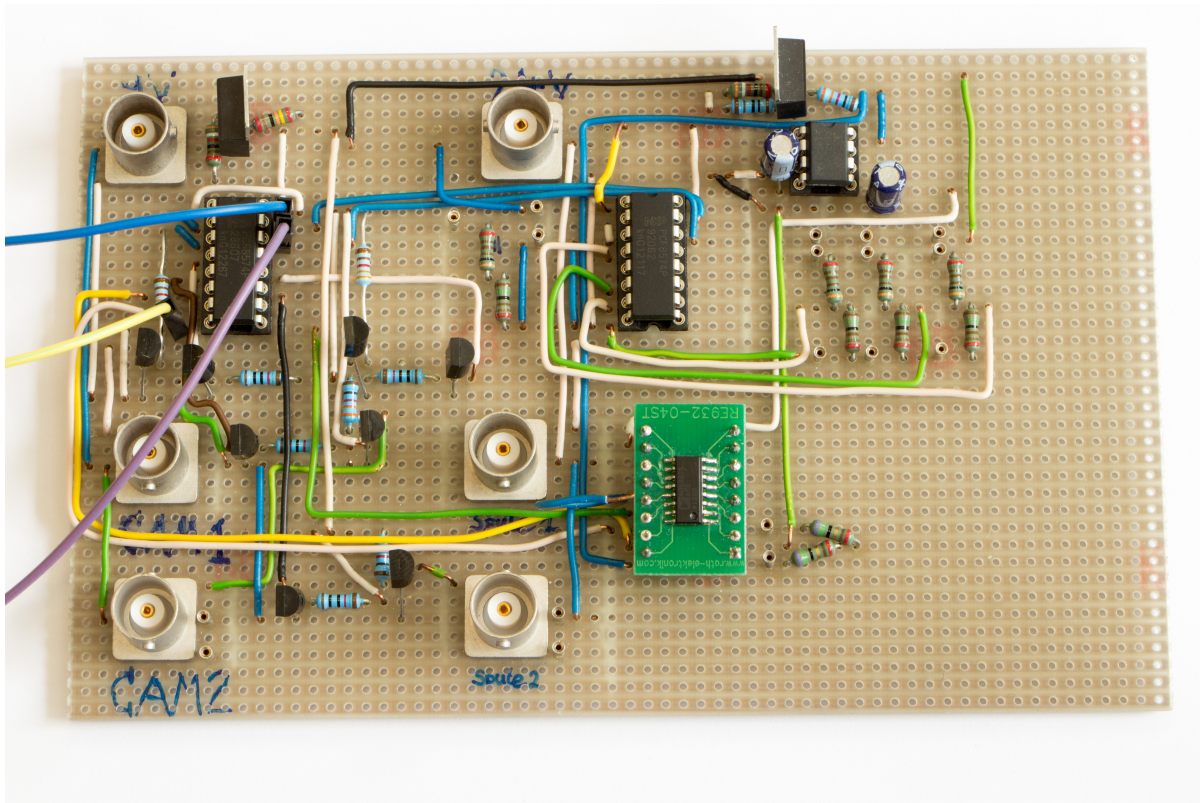


Abbildung 3.8: Bild der gelöteten Testplatine. Diese wurde erfolgreich aufgebaut und getestet. Die drei nach außen führenden Kabel sind für die Anbindung an den „I²C“-Bus und für den Anschluss an das Massepotential notwendig.

wenn der Benutzer nichts verändert hat), wartet das Programm zehn Millisekunden und prüft dann aufs Neue, ob sich ein Sollwert geändert hat. Ebenfalls alle zehn Millisekunden sendet das Programm die momentanen Statusmeldungen der Schirme und des Ventils an das Kontrollmenü.

Falls sich ein Sollwert ändert, so wird mit den entsprechenden Platinen kommuniziert. Dazu wird die Bibliothek „wiringPi“ [9] genutzt. Diese Bibliothek stellt Befehle zur Verfügung, durch die der „Raspberry Pi“ Daten an die verschiedenen „I/O Expander“ senden und ebenfalls Daten von ihnen empfangen kann.

Möchte man einen bestimmten Wert verändern, so kann man dies im Kontrollmenü einstellen. Diese Änderung des Sollwerts wird von der geschriebenen Software auf dem „Raspberry Pi“ registriert und die entsprechenden Einstellungen werden an die Platinen weitergegeben. Soll zum Beispiel eine Kamera eingeschaltet werden, so wird zuerst geprüft, ob sich noch eine andere Kamera im eingeschalteten Zustand befindet. Falls das der Fall ist, wird diese ausgeschaltet und der dazugehörige Schirm wird aus dem Strahlverlauf heraus bewegt, indem man an die entsprechenden Pins des „I/O Expanders“ eine logische 1 sendet (man beachte, dass eine logische 1 mit einem hohen Potential gleichzusetzen ist und dadurch die Kameras ausgeschaltet werden, siehe Abschnitt 3.2.4).

Nun wird überprüft, ob der Schirm auch in die richtige Position gefahren ist. Dazu müsste der Lagesensor, der überprüft, ob der Schirm sich außerhalb des Strahlverlaufs befindet, ein hohes Potential am entsprechenden Pin des „I/O Expanders“ erzeugen. Der „I/O Expanders“ sendet in dem Fall eine logische 1 an das Programm.

Falls diese Bedingung erfüllt ist, wird die gewünschte Kamera eingeschaltet und der dazugehörige

Schirm in den Strahl gefahren, indem man die entsprechenden Pins des „I/O Expanders“ eine logische 0 sendet (eine logische 0 entspricht dem Massepotential, siehe wieder Abschnitt [3.2.4](#)). Der Lagesensor, der überprüft, ob sich der entsprechende Schirm im Strahlverlauf befindet, sollte nun ein hohes Potential am entsprechenden Pin des „I/O Expanders“ erzeugen. In dem Fall sendet der „I/O Expander“ eine logische 1 an das Programm. Danach befindet sich das Programm wieder in einem Wartezustand, in dem es alle zehn Millisekunden prüft, ob sich Sollwerte ändern.

Das Programm wurde gemeinsam mit der Testplatine erfolgreich getestet. Es muss für die Anbindung an das Kontrollsystem noch geringfügig angepasst werden, die generelle Funktionsweise ist jedoch gesichert.

Strahldiagnose

Unter der Strahldiagnose des Laborbeschleunigers LAB versteht man die Untersuchung der lokalen Eigenschaften des Elektronenstrahls. Dazu gehören die Bestimmung der Strahlbreiten in horizontaler und vertikaler Richtung sowie die Lage im Strahlrohr. Wie in den vorherigen Kapiteln erklärt, wird der Elektronenstrahl mit Hilfe von Leuchtschirmen sichtbar gemacht und mit einer Kamera beobachtet. Somit kann die Kamera ein Intensitätsprofil aufnehmen, welches dem Profil des Elektronenstrahls entspricht.

In diesem Kapitel wird erklärt, wie das Kamerasignal am Kontrollrechner untersucht wird. Außerdem werden verschiedene Eigenschaften der Kamera erläutert, die man bei der Auswertung des Signals beachten muss.

4.1 Auswertung des Kamerasignals

In diesem Abschnitt wird die Auswertung des aufgenommenen Kamerasignals vorgestellt. Dazu gehört die Digitalisierung des analogen Videosignals und die Untersuchung des Strahlprofils.

4.1.1 Eigenschaften des Kamerasignals

Die Kamera WAT-704R erzeugt ein analoges Videosignal, welches mit einem CCD¹-Sensor aufgenommen wird. Die Anzahl der effektiven Pixel ist in der Horizontalen mit 500 und in der Vertikalen mit 582 angegeben. Mit einer Bildwiederholrate von 25 Hz erhält man eine maximale Frequenz des Signals in der Größenordnung von 10 MHz. Die Pixelgröße beträgt 7,3 μm in der horizontalen und 4,7 μm in der vertikalen Richtung. Somit ergibt sich eine effektive Größe des CCD-Sensors von 3,65 mm in der horizontalen und 2,74 mm in der vertikalen Richtung, was einem Seitenverhältnis von 4:3 entspricht. Der CCD-Sensor ist nicht sensitiv für Farben, das aufgenommene Bild besitzt lediglich Helligkeitsinformationen und ist somit ein schwarz-weißes Bild [10].

4.1.2 Transversales Strahlprofil

In modernen und großen Elektronen-Kreisbeschleunigern wird das transversale Strahlprofil in guter Näherung durch eine Gaußverteilung beschrieben. Dieses Profil entsteht durch die Abstrahlung von Synchrotronstrahlung. Die Gleichgewichtsverteilung aller Teilchen ist dann zeitlich konstant und wird durch folgende Ladungsverteilung $\rho(x, z)$ beschrieben

$$\rho(x, z) = \frac{N e}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right).$$

¹ Charged-Coupled Device

Dabei sind die Parameter σ_x und σ_z die Strahlbreiten, N bezeichnet die Anzahl der Teilchen im Strahl und e ist die Elementarladung [11].

Da der Laborbeschleuniger LAB zum einen kein Kreisbeschleuniger ist und zum anderen den Elektronen zu wenig kinetische Energie übertragen wird, kann man nicht davon ausgehen, dass sich eine Gleichgewichtsverteilung durch Synchrotronstrahlung einstellt. Ob das transversale Strahlprofil trotzdem mit einer Gaußverteilung beschrieben werden kann, ist abschließend nicht zu klären. Messungen zur Verifizierung der Annahme konnten noch nicht durchgeführt werden, da die Elektronen-Quelle noch nicht betriebsbereit ist.

4.1.3 Auswertung des Videosignals

Unter der Auswertung des aufgenommenen Videosignals versteht man einerseits die Beobachtung der Auslenkung des Strahls, andererseits die Analyse des transversalen Strahlprofils und die Bestimmung der dazugehörigen Strahlbreiten. Die Auslenkung des Strahls kann man mit den Korrektormagneten, die Strahlbreiten mit den Quadrupolen beeinflussen.

Das analoge Videosignal wird dazu durch einen „USB Video Grabber“ digitalisiert. Eine von Frank Frommberger programmierte Software, die sogenannte „Frame Grabber Software“, kann an das digitalisierte Intensitätsprofil Funktionen anpassen, zum Beispiel eine Gaußverteilung. Dazu wird ein Schnitt durch das zweidimensionale Profil gemacht und an dieser Linie wird die Funktion angepasst. Das passiert in Echtzeit, man kann somit den Strahl mit Magneten beeinflussen und erkennt sofort, welche quantitativen Änderungen dies hervorruft. Zusätzlich kann man die aufgenommenen Bilder über einen bestimmten Zeitraum aufsummieren und deren Mittelwert bilden. Dadurch erhält man einen präziseren Wert für die Strahlbreiten, da durch Bildung des Mittelwerts der statistische Fehler auf die Messwerte kleiner wird.

Mit den gemessenen Strahlbreiten kann dann zum Beispiel ein „Quadrupolscan“ durchgeführt werden um die Emittanz des Elektronenstrahls zu bestimmen [12]. Der „Quadrupolscan“ ist als Aufgabe für den Praktikumsversuch angedacht, eine Durchführung mit simulierten Werten findet sich in [2].

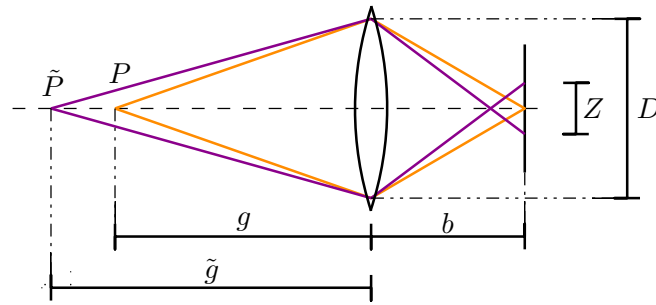
4.2 Eigenschaften der Kamera

In diesem Kapitel werden Eigenschaften der benutzten Kamera WAT-704R erläutert. Für diese Kamera gibt es die Möglichkeit, verschiedene Objektive zu verwenden. Die Wahl des optimalen Objektivs wird im Folgenden begründet. Zudem wird der Abbildungsmaßstab bestimmt. Dieser ist essentiell für die Messung der Strahlbreiten, da die „Frame Grabber Software“ die Strahlbreiten lediglich in Pixeln berechnen kann und nicht in einer physikalischen Längeneinheit.

4.2.1 Schärfentiefe

Da sich der Schirm in einem 45° Winkel zu der Blickrichtung der Kamera befindet (siehe Abbildung 2.5), kann man nicht den gesamten Schirm scharf abbilden. Die Abbildung 4.1 verdeutlicht dieses Verhalten. Man erkennt, dass man mit einer Linse der Brennweite f und dem Öffnungsdurchmesser D einen Punkt im Abstand g auf eine Ebene im Abstand b punktförmig abbilden kann. Die Abstände beziehen sich immer auf den Abstand zur Mitte der Linse. Die zugrunde liegende Formel ist als Linsengleichung bekannt und lautet [13]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}. \quad (4.1)$$

Abbildung 4.1: Veranschaulichung des Zerstreuungskreises mit Durchmesser Z .

Ein Punkt \tilde{P} , der sich in einem größeren Abstand $\tilde{g} > g$ von der Linse befindet, wird hingegen nicht punktförmig abgebildet, sondern bildet einen Kreis mit dem Durchmesser Z (gleiches gilt auch für Abstände $\tilde{g} < g$). Dieser Kreis wird auch als Zerstreuungskreis bezeichnet und ist entscheidend für den Bereich Δ_d , in dem man Gegenstände „scharf“ abbilden kann. Scharf abgebildet bedeutet dann, dass der entstehende Zerstreuungskreis mit Durchmesser Z kleiner ist als der größte, als scharf empfundene, Zerstreuungskreis mit Durchmesser Z_0 .

Es existiert eine Ebene, die ohne Zerstreuungskreis abgebildet wird. Man sagt, dass diese Ebene „perfekt scharf“ abgebildet wird. Für die Strahldiagnose ist dies die Mitte des Leuchtschirms. Je weiter man sich von dieser Ebene entfernt, umso größer wird der Zerstreuungskreis und desto weniger scharf ist das aufgenommene Bild. Wenn man nun einen maximal zulässigen Durchmesser des Zerstreuungskreises definiert, bei dem das Bild noch scharf erscheint, kann man den Schärfentiefe-Bereich Δ_d ausrechnen, in dem Gegenstände scharf abgebildet werden. Das Ziel ist, dass Δ_d maximiert wird, sodass man möglichst den gesamten Schirm scharf abbilden kann.

Im Folgenden wird eine Formel zur Berechnung von Δ_d hergeleitet. Das Konzept der Schärfentiefe ist [14] entnommen, die Herleitung und Grafiken sind an [15] angelehnt.

Man definiert zuerst den hyperfokalen Abstand d_h . Wenn ein Objekt, das sich in einem unendlichen Abstand zur Linse befindet, einen Zerstreuungskreis mit Durchmesser Z_0 bildet und ein Objekt, das sich im Abstand d_h zur Linse befindet, perfekt scharf abgebildet wird, so ist d_h der hyperfokale Abstand. Somit ist der Zerstreuungskreis von Gegenständen, die sich (von der Linse aus gesehen) hinter dem hyperfokalen Abstand befinden auf jeden Fall kleiner als Z_0 und diese Gegenstände werden somit scharf abgebildet. In der Abbildung 4.2 ist der hyperfokale Abstand veranschaulicht. Man erkennt, dass der Durchmesser des Zerstreuungskreises genau Z_0 beträgt, wenn sich der abzubildende Gegenstand in unendlicher Entfernung von der Linse befindet.

Mit Hilfe von Abbildung 4.2 kann man sich anhand der Ähnlichkeit der Dreiecke klar machen, dass

$$\frac{D}{f} = \frac{Z_0}{b-f} \quad (4.2)$$

und aus Gleichung 4.1 folgt, dass

$$b = \frac{g \cdot f}{g-f} \quad (4.3)$$

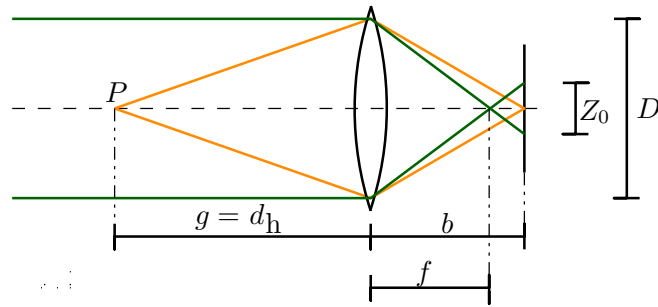


Abbildung 4.2: Veranschaulichung des hyperfokalen Abstand d_h . Ein Objekt im unendlichen Abstand zur Linse erzeugt einen Zerstreuungskreis mit Durchmesser Z_0 .

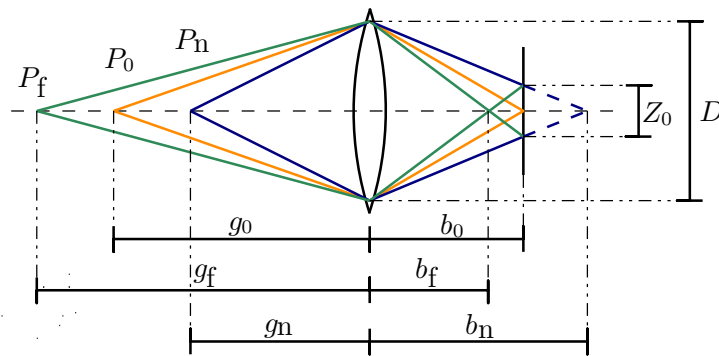


Abbildung 4.3: Skizze zur Erklärung des Nah- und des Fernpunkts. Das Objekt im Abstand g_0 wird perfekt scharf auf den Schirm abgebildet, die Objekte im Fernpunkt (Abstand g_f) und im Nahpunkt (Abstand g_n) bilden dann den maximal zulässigen Durchmesser des Zerstreuungskreises Z_0 .

Dieses Ergebnis kann man in Gleichung 4.2 einsetzen und man erhält

$$g = d_h = f + \frac{f \cdot D}{Z_0} . \quad (4.4)$$

Nun definiert man den Fernpunkt g_f und den Nahpunkt g_n . Wenn sich ein Punkt P_0 im Abstand g_0 von der Linse entfernt befindet und auf einen Schirm, der sich im Abstand b_0 von der Linse befindet, perfekt scharf abgebildet wird, dann ist g_f die Entfernung, die ein Objekt maximal von der Linse haben darf, sodass der Durchmesser des Zerstreuungskreises genau Z_0 entspricht und somit noch scharf abgebildet wird. Der Punkt P_f im Abstand g_f zur Linse ist dann der Fernpunkt. Analog definiert man den Punkt P_n , der sich im Abstand g_n zur Linse befindet. Dieser Abstand ist der minimale Abstand zur Linse, bei dem der Zerstreuungskreis einen Durchmesser Z_0 besitzt und somit scharf abgebildet wird. Dementsprechend werden alle Objekte, die entweder weiter von der Linse entfernt sind als P_f oder sich näher an der Linse befinden als P_n , unscharf abgebildet. In Abbildung 4.3 ist das Verhalten skizziert.

Es ergibt sich wieder aus der Ähnlichkeit von Dreiecken, dass

$$\frac{D}{b_f} = \frac{Z_0}{b_0 - b_f} \quad (\text{grüner Strahlengang}) \quad (4.5)$$

$$\frac{D}{b_n} = \frac{Z_0}{b_n - b_0} \quad (\text{blauer Strahlengang}) \quad (4.6)$$

und Umstellen ergibt

$$\frac{1}{b_f} = \frac{D + Z_0}{b_0 \cdot D} \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{b_n} = \frac{D - Z_0}{b_0 \cdot D} \quad (4.8)$$

Mit Gleichung 4.1 und der Definition $\tilde{d}_h = d_h - f = \frac{f \cdot D}{Z_0}$ (siehe Gleichung 4.4) folgt nun

$$\begin{aligned} \frac{1}{g_f} &= \frac{1}{f} - \frac{D + Z_0}{b_0 \cdot D} \\ &= \frac{1}{f} - \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{g_0} \right) \cdot \frac{D + Z_0}{D} \\ &= \frac{1}{g_0} + \frac{f}{g_0 \cdot \tilde{d}_h} - \frac{1}{\tilde{d}_h} \\ &= \frac{\tilde{d}_h - (g_0 - f)}{\tilde{d}_h \cdot g_0} \\ \Rightarrow g_f &= \frac{g_0 \cdot (d_h - f)}{(d_h - f) - (g_0 - f)} \quad (4.9) \end{aligned}$$

Analog folgt für den Nahpunkt g_n

$$g_n = \frac{g_0 \cdot (d_h - f)}{(d_h - f) + (g_0 - f)} \quad (4.10)$$

Mit den Gleichungen 4.9 und 4.10 kann man nun die Ausdehnung des Bereichs der Schärfentiefe Δ_d berechnen

$$\Delta_d = g_f - g_n \quad (4.11)$$

Anschaulich betrachtet werden alle Gegenstände, die sich zwischen g_f und g_n befinden scharf abgebildet.

Für die benutzte Kamera WAT-704R kann man verschiedene Objektive nutzen. Diese unterscheiden sich in ihrer Brennweite f und im Durchmesser der Blende D . Im Folgenden werden für die verschiedenen Objektive die Nah- und Fernpunkte bestimmt und somit auch die Ausdehnung des Bereichs der Schärfentiefe Δ_d . Wie in Abschnitt 2.4.2 erklärt, soll die Kamera den Schirm so groß wie möglich aufnehmen. Da der Schirm durch die Kamera kreisförmig abgebildet wird, soll dieser Kreis das Bild möglichst ausfüllen. Da das Bild in der vertikalen Richtung kleiner ist, als in der horizontalen Richtung, ist die Größe des CCD-Chips in vertikaler Richtung entscheidend für die Größe des Bildes B . Der Durchmesser des Schirms ist gleichzeitig die Gegenstandsgröße G und beträgt 40 mm. Die Vergrößerung V ist definiert durch

$$V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

und dementsprechend kann man V aus den gegebenen Maßen ($G = 40$ mm und $B = 2,74$ mm, die Höhe

des CCD-Sensors, siehe Abschnitt 4.1.1) berechnen

$$V = 0,0685 . \quad (4.12)$$

Mit Hilfe von V und f kann man die Gegenstandsweite g und die Bildweite b bestimmen:

$$g = \frac{V + 1}{V} \cdot f \quad (4.13)$$

$$b = (V + 1) \cdot f . \quad (4.14)$$

Für die Berechnung der Ausdehnung des Bereichs der Schärfentiefe Δ_d benötigt man nun noch eine Abschätzung für Z_0 . Dafür gibt es keinen berechenbaren Wert, da dieser Wert einen subjektiven Charakter besitzt. Plausibel ist, dass ein Bild unscharf wirkt, wenn ein eigentlich punktförmiger Gegenstand einen Zerstreungskreis bildet, der deutlich in den Nachbapixel hineinragt. Der Durchmesser des maximal zulässigen Zerstreungskreises Z_0 beträgt dann ungefähr drei Pixelbreiten², im vorliegenden Fall also ungefähr $Z_0 \approx 20 \mu\text{m}$.

In Tabelle 4.1 sind die berechneten Parameter der zur Verfügung stehenden Objektive aufgelistet. Das „Pinhole“-Objektiv besteht lediglich aus einem Loch und arbeitet nach dem Prinzip der Lochkamera. Die anderen aufgelisteten Objektive bestehen aus einer Glaslinse. Das „Pinhole“-Objektiv besitzt die größte Ausdehnung des Bereichs der Schärfentiefe, allerdings ist die benötigte Gegenstandsweite g mit weniger als 60 mm zu klein, die Kamera müsste sich so innerhalb des Strahlrohrs befinden. Den nächstbesten Wert für die Ausdehnung des Bereichs der Schärfentiefe liefert das Objektiv „G6“, dementsprechend hat man sich für dieses Objektiv entschieden.

Der Schirm besitzt eine Ausdehnung von 40 mm in der Tiefe, die Ausdehnung des Bereichs der Schärfentiefe für das Objektiv „G6“ beträgt jedoch nur knapp 20 mm (siehe Tabelle 4.1). Somit ist der Schärfentiefe-Bereich Δ_d des Objektivs „G6“ nicht groß genug, sodass ein Teil des Schirms unscharf abgebildet wird. Die Untersuchung des Elektronenstrahls sollte dementsprechend möglichst in der Mitte des Leuchtschirms stattfinden, da man dort den durch den Strahl erzeugten Lichtpunkt scharf abbilden kann.

Zu beachten ist außerdem, dass der Schärfentiefe-Bereich Δ_d von dem Durchmesser des maximal zulässigen Zerstreungskreises Z_0 abhängt. Diesen eindeutig festzulegen ist nicht möglich. Aus Abbildung 4.4 kann man jedoch abschätzen, dass die getroffene Annahme für Z_0 legitim ist, da der Schärfentiefe-Bereich dort knapp 20 mm beträgt (die Länge des Schirms beträgt 40 mm in der Tiefe).

Objektiv	f / mm	D / mm	b / mm	g / mm	d_h / mm	g_f / mm	g_n / mm	Δ_d / mm
G12	12	6	12,8	187,5	3 612	197,1	178,8	18,3
G6	6	2,4	6,41	93,8	726	106,8	83,6	23,2
G3,8	3,8	1,9	4,06	59,4	364,8	70,2	51,5	18,7
Pinhole	3,7	0,82	3,95	57,8	155,8	89,7	42,6	47,1

Tabelle 4.1: Übersicht über die verschiedenen Eigenschaften der Objektive, die zur Verfügung stehen.

² Die Kamera besitzt rechteckige Pixel, der Wert ist lediglich eine Abschätzung.

4.2.2 Abbildungsmaßstab

Die „Frame Grabber Software“ gibt die Strahlbreiten und -ablagen lediglich in der Einheit „Pixelanzahl“ (px) zurück. Man benötigt also noch einen Umrechnungsfaktor von Pixelanzahl zu einer physikalischen und realen Längeneinheit. In erster Näherung kann man diesen Abbildungsmaßstab m bestimmen, indem man die Anzahl der Pixel in der vertikalen Richtung (die Anzahl³ beträgt hier 576) durch die Ausmaße des Schirms in der vertikalen (40 mm) teilt. Es ergibt sich:

$$m = 14,4 \text{ px mm}^{-1} .$$

Die Strahlbreiten $\sigma_{x,z}$ (in der Einheit Millimeter) in horizontaler und vertikaler Richtung kann man dann aus den gemessenen Strahlbreiten $\sigma_{x,z} \text{ gemessen}$ (in der Einheit Pixelanzahl) bestimmen:

$$\sigma_{x,z} = \frac{\sigma_{x,z} \text{ gemessen}}{m} . \quad (4.15)$$

Damit vernachlässigt man allerdings, dass weit entfernte Objekte kleiner abgebildet werden als nahe Objekte. Da der Schirm eine Ausdehnung in die Tiefe besitzt, muss man dies berücksichtigen. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit der man dieses Verhalten berücksichtigen kann.

Die Objekte, die in verschiedenen Pixel-Zeilen y abgebildet werden, befinden sich alle in unterschiedlichen Abständen zur Kamera. Dementsprechend ist der Abbildungsmaßstab $m(y)$ von der Zeile y abhängig. Um nun einen Wert für $m(y)$ zu erhalten, wurde mit dem Objektiv „G6“ ein Bild von einem Millimeterpapier aufgenommen, welches auf dem Schirm befestigt wurde. Auf diesem Bild kann man für verschiedene Zeilen y die Anzahl der Pixel Δx bestimmen, die 10 mm entsprechen. Dafür wurden nachträglich Linien eingefügt, die den Abstand von 10 mm anzeigen⁴. Die Pixelanzahl zwischen diesen Linien ist mit Δx bezeichnet. In Abbildung 4.4 ist das Millimeterpapier mit den eingezeichneten Linien zu erkennen. In Tabelle 4.2 sind die dazugehörigen Messwerte eingetragen. Den Abbildungsmaßstab $m(y)$ kann man nun bestimmen, indem man Δx durch 10 mm teilt.

y / px	$\Delta x / \text{px}$ (schwarz)	$\Delta x / \text{px}$ (rot)	$\Delta x / \text{px}$ (grün)	$\Delta x / \text{px}$ (blau)	$\langle \Delta x \rangle / \text{px}$
64	129	128	129	128	128,5
116	136	133	135	134	134,5
174	140	143	142	142	141,75
236	149	147	150	150	149
284	153	156	155	156	155
331	161	162	162	159	161
396	168	166	170	169	168,25
496	178	181	180	181	180

Tabelle 4.2: Übersicht über die aufgenommenen Messwerte. Der angegebene y -Wert bezieht sich auf die untersuchte Zeile.

In Abbildung 4.5 ist der Abbildungsmaßstab $m(y)$ grafisch gegen die Zeile y aufgetragen. An die Datenpunkte wurde eine Gerade der Form $f(x) = a \cdot x + b$ angepasst, wobei a die Steigung und b den Achsenabschnitt der Gerade bezeichnet. Die (mit Hilfe von *gnuplot*) ermittelten Werte für die beiden

³ Hier sind die digitalen Pixel gemeint und nicht die Pixel des CCD-Sensors der Kamera.

⁴ Zwischen zwei roten Linien in einer Zeile y sind jeweils 10 mm, ebenso zwischen zwei schwarzen, grünen und blauen Linien.

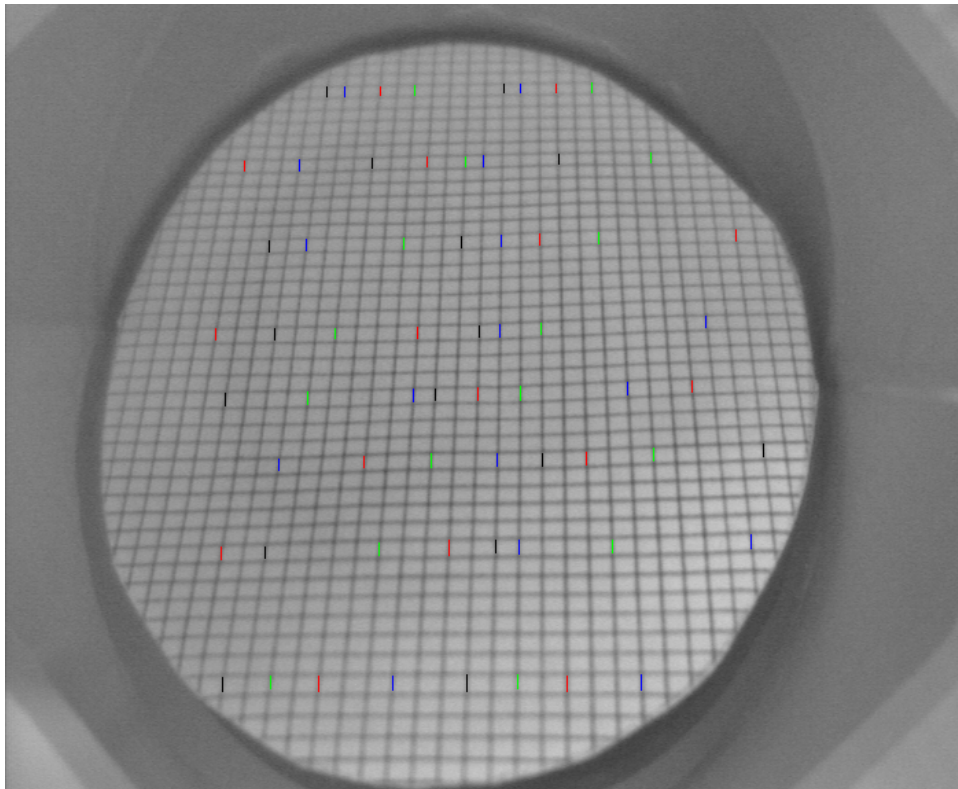


Abbildung 4.4: Bestimmung des Abbildungsmaßstabes für verschiedene Zeilen y .

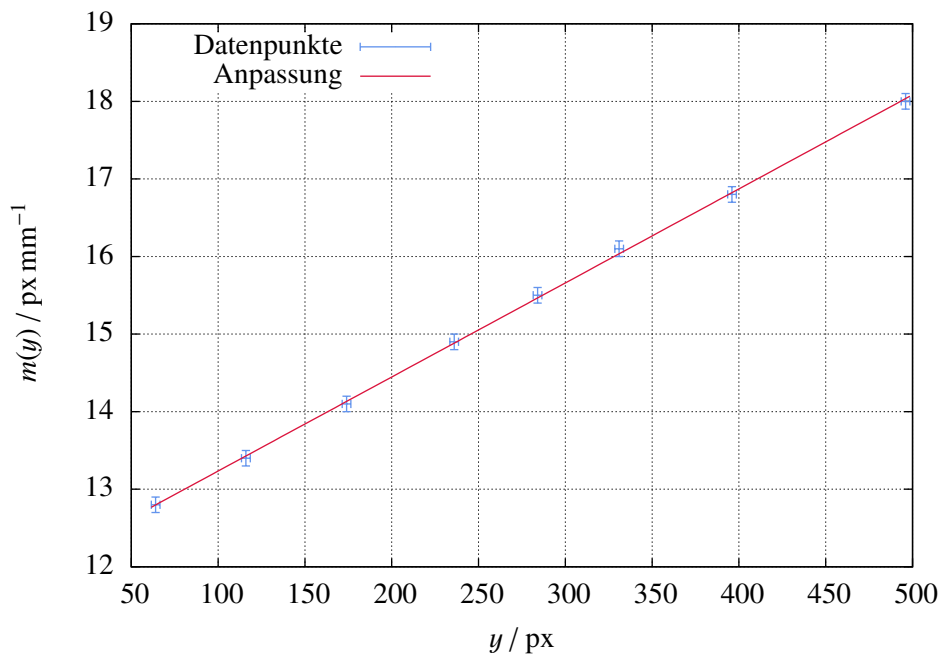


Abbildung 4.5: Abbildungsmaßstab $m(y)$ in Abhängigkeit der Zeile y .

Parameter lauten

$$a = (0,01212 \pm 0,00011) \text{ mm}^{-1} \quad \text{und} \quad b = (12,022 \pm 0,031) \text{ px mm}^{-1}$$

$$\Rightarrow m(y) = (0,01212 \pm 0,00011) \text{ mm}^{-1} \cdot y + (12,022 \pm 0,031) \text{ px mm}^{-1} .$$

Aus dieser Anpassungsgerade kann man nun die reale Strahlbreite $\sigma_{x \text{ real}}$ in horizontaler Richtung in Millimetern für jede beliebige Zeile y mit der folgenden Formel bestimmen:

$$\sigma_{x \text{ real}} = \frac{\sigma_{x \text{ gemessen}}}{m(y)} . \quad (4.16)$$

Man beachte, dass die Einheit der gemessenen Strahlbreite $\sigma_{x \text{ gemessen}}$ „Pixelanzahl“ ist, da der Wert durch die „Frame Grabber Software“ ermittelt wird.

Für die vertikale Richtung ist die Anwendung dieses Verfahrens nicht möglich, da sich der Schirm in einem 45° Winkel zum Elektronenstrahl befindet. Dadurch wird die vertikale Strahlbreite σ_z auf den Schirm projiziert, siehe dazu Abbildung 4.6. Die Größe dieser Projektion σ_{Schirm} entspricht nicht der tatsächlichen Strahlbreite σ_z , trotzdem ist die Projektion hilfreich, da die Kamera sich ebenfalls in einem Winkel von 45° zum Schirm befindet und somit der erzeugte Lichtfleck von der Kamera aus betrachtet die gleiche Ausdehnung σ_z besitzt. Folglich ist nicht die Ausdehnung der Strahlbreite entlang des Schirmes gesucht und ein Ausmessen der Schirmgeometrie (zum Beispiel durch das Vermessen eines Millimeterpapiers) ist nicht sinnvoll.

Die Ermittlung der realen Strahlbreite $\sigma_{z \text{ real}}$ in vertikaler Richtung erfolgt nach einer ähnlichen Formel wie Formel 4.16:

$$\sigma_{z \text{ real}} = \frac{\sigma_{z \text{ gemessen}}}{m(y_{\text{mittel}})} . \quad (4.17)$$

Dabei ist $\sigma_{z \text{ real}}$ die Strahlbreite in vertikaler Richtung in der Einheit Millimeter, $\sigma_{z \text{ gemessen}}$ die von der „Frame Grabber Software“ gemessene Strahlbreite in der Einheit Pixelanzahl und $m(y_{\text{mittel}})$ ist der Abbildungsmaßstab für die Zeile y_{mittel} , in der sich der Mittelpunkt der gemessenen Verteilung befindet. Veranschaulicht wird dies durch Abbildung 4.6. Dort wird deutlich, dass sich die Hälfte des Elektronenstrahls von der Kamera aus gesehen hinter dem Strahlmittelpunkt (mit einer gestrichelten Linie gezeichnet) befindet. Die andere Hälfte des Elektronenstrahls befindet sich jedoch von der Kamera aus betrachtet vor dem Strahlmittelpunkt. Da der Abbildungsmaßstab $m(y)$ linear verläuft ist nur der Mittelpunkt des Strahlprofils für den Abbildungsmaßstab entscheidend.

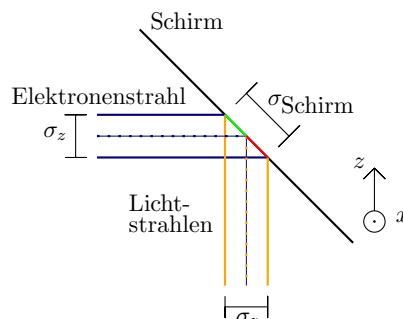


Abbildung 4.6: Veranschaulichung der Bestimmung von $\sigma_{z \text{ real}}$. Der ausgedehnte Strahl ist zur Hälfte weiter von der Kamera entfernt (grüner Strich), als der Strahlmittelpunkt, zur anderen Hälfte befindet er sich näher zur Kamera (roter Strich).

Abschließend soll darauf hin gewiesen werden, dass auch diese Methode nicht alle Effekte berücksichtigt, wie zum Beispiel ein schräges Einfallen des Elektronenstrahls. Trotzdem stellen die Formeln 4.16 und 4.17 eine Verbesserung von Formel 4.15 dar.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde die Ansteuerung und Strahldiagnose des neuen Laborbeschleunigers LAB konzipiert. Das Ziel ist, dass der Teilchenbeschleuniger LAB im Master-Praktikum Anwendung findet. Dabei sollen die Praktikanten die Grundlagen der Beschleunigerphysik kennenlernen. Insbesondere sollen die Strahlparameter untersucht werden und die Praktikanten sollen die typischen Elemente der Beschleunigerphysik (wie zum Beispiel Quadrupole oder Leuchtschirme) kennenlernen.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Erstellung einer Platine und eines dazugehörigen Computerprogramms zur Ansteuerung und Überwachung des Teilchenbeschleunigers. Damit ist die Ansteuerung der einzelnen Elemente (Schirme, Kameras und Ventil), sowie die Überprüfung der momentanen Zustände der Elemente möglich. Die Änderung eines Werts kann in einem Kontrollmenü vorgenommen werden. Zudem wird im Kontrollmenü angezeigt, ob alle Prozesse wie gewünscht abgelaufen sind. Bei der Erstellung der Platine und des Computerprogramms wurde großen Wert auf die modulare Bauweise des Laborbeschleunigers gelegt. Damit ist gemeint, dass man die einzelnen Module des Teilchenbeschleunigers später eventuell anders anordnen oder um weitere Module ergänzen möchte. Umgesetzt wurde diese Modularisierung durch den „I²C“-Bus, an den mehrere „I/O-Expander“ angeschlossen werden können, die unabhängig voneinander Elemente ansteuern und Zustände auslesen können.

Die entwickelte Schaltung und das geschriebene Computerprogramm wurden erfolgreich getestet. Dazu wurden zwei Schirme und zwei Kameras an die Platine angeschlossen, welche man von einem Computer aus bedienen konnte. Die Ansteuerung der Kameras und der Schirme, die Weiterleitung des Videosignals und die Überwachung der Schirmposition haben dabei wie geplant funktioniert. Für den Einsatz des Laborbeschleunigers sollen Leiterplatten zum Einsatz kommen, deren Layouterstellung im Rahmen des Bachelorprojekts begonnen wurde und sich zum Zeitpunkt der Abgabe in der weiteren Entwicklung befindet.

Der zweite Schwerpunkt dieser Bachelorarbeit war die Strahldiagnose. Darunter versteht man die Untersuchung des Elektronenstrahls, welche mit Leuchtschirmen und Kameras umgesetzt wird. Auch hier wurde auf die modulare Bauweise des Teilchenbeschleunigers Wert gelegt, indem man die Videoleitung als Bus konzipiert hat. Auf jedem Modul befindet sich ein Video-Multiplexer, der entscheidet, welches Signal am Bus anliegen soll. Somit ist die Möglichkeit gegeben, weitere Module hinzuzufügen oder die Module unterschiedlich anzuordnen und das System der Strahldiagnose trotzdem wie gewohnt einsetzen zu können. Für die Kameras, die für die Strahldiagnose genutzt werden, wurde das optimale Objektiv und die benötigten Größen zur Ermittlung der Strahlbreiten bestimmt.

Literatur

- [1] T. F. vom Hövel, *Aufbau, Untersuchung und Inbetriebnahme einer Elektronen-Quelle für den Laborbeschleuniger LAB*, Bachelorarbeit in Vorbereitung: Universität Bonn.
- [2] Y. M. Dieter, *Magnetoptik des Laborbeschleunigers LAB*, Bachelorarbeit: Universität Bonn, Juli 2015.
- [3] P. Hänisch, ELSA – Universität Bonn, Juli 2015.
- [4] M. Picard, *Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems für die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebes bis 3,5 GeV*, Diss.: Universität Bonn, 1995.
- [5] T. Götz, *Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems zur Steuerung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis 3,5 GeV*, Diss.: Universität Bonn, 1995.
- [6] D. Profit et al., „The Accelerator Control System at ELSA“, Shanghai, IPAC 2013.
- [7] Texas Instruments, *PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I²C Bus*, 2015.
- [8] Analog Devices, *ADV3221/ADV3222*, Datenblatt, 2010.
- [9] URL: <http://wiringpi.com/extensions/i2c-pcf8574/> (besucht am 20.07.2015).
- [10] Watec, *WAT-704R*, Datenblatt.
- [11] K. Wille, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Springer, 1992.
- [12] J. Oberem, *Automatisierung der Emittanzmessung in der externen Strahlführung der Beschleunigeranlage ELSA*, Bachelorarbeit, Juni 2010.
- [13] D. Meschede, *Optics, Light and Lasers*, 2. Aufl., WILEY-VCH, 2007.
- [14] H. Schade, *Technische Optik*, Friedr. Vieweg + Sohn, 1969.
- [15] O. Jennrich, *Ein Blick auf die Schärfentiefe*, 1999,
URL: <http://www.traxel.de/foto/drf/schaerfentiefe.pdf> (besucht am 28.07.2015).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau des Laborbeschleunigers LAB	4
2.2	Modell des Laborbeschleunigers LAB	4
2.3	Schematische Abbildung der Korrektormagnete	6
2.4	Schematische Abbildung eines Quadrupols	7
2.5	Schematische Zeichnung der Kamera und Schirme	8
3.1	Funktionsweise des Druckluftkolbens	12
3.2	Sequenz der „I ² C“ Signale	14
3.3	Übersicht über die Pins des PCF8574/A	15
3.4	Teilschaltplan zur Ansteuerung	16
3.5	Teilschaltplan zur Überwachung	17
3.6	Aufbau des Video-Bus	18
3.7	Schaltplan der Gesamtschaltung	20
3.8	Bild der Testplatine	21
4.1	Veranschaulichung des Zerstreungskreises	25
4.2	Veranschaulichung des hyperfokalen Abstands	26
4.3	Veranschaulichung des Nah- und Fernpunkts	26
4.4	Bestimmung des Abbildungsmaßstabs	30
4.5	Abbildungsmaßstab $m(y)$ in Abhängigkeit der Zeile y	30
4.6	Veranschaulichung der Bestimmung von $\sigma_{z \text{ real}}$	31