

# **Inbetriebnahme der Elektronenquelle am Laborbeschleuniger LAB**

Vitalij Adam

Bachelorarbeit in Physik  
angefertigt im Physikalischen Institut

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

4. Oktober 2016

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: Priv. -Doz. Wolfgang Hillert
2. Gutachter: Prof. Dr. Jochen Dingfelder

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Der Laborbeschleuniger LAB</b>	<b>3</b>
2.1	Verwendungszweck von LAB . . . . .	3
2.2	Aufbau des Beschleunigers . . . . .	3
2.3	Aufbau der Elektronenquelle . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Vorbereitung zur Inbetriebnahme</b>	<b>9</b>
3.1	Hochspannungstest zur Bestimmung der Feldemission . . . . .	9
3.2	Heizen des Filaments zur Charakterisierung des Widerstandes . . . . .	11
3.3	Strahlerzeugung und Strahlenschutz . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Inbetriebnahme der Ansteuerungselektronik</b>	<b>15</b>
4.1	Steuerplatine . . . . .	16
4.2	Heizplatine . . . . .	17
4.3	Platinendesign . . . . .	17
4.4	Kalibrierung . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Experimentelle Charakterisierung der Elektronenquelle</b>	<b>21</b>
5.1	Heizstrom . . . . .	21
5.2	Ziehspannung und Wehneltspannung . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>25</b>
	<b>Literatur</b>	<b>27</b>
<b>A</b>	<b>Platinenentwürfe und Kalibrierungsdaten</b>	<b>29</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>31</b>



## Einleitung

---

LAB ist ein elektrostatischer, linearer Elektronenbeschleuniger, der die Grundlage eines neuen Praktikumsversuches im Masterpraktikum des Studiengangs Physik an der Universität Bonn bilden soll. Interessierten Studierenden soll dabei die Möglichkeit geboten werden, ein Grundverständnis für die Physik von Teilchenbeschleunigern zu gewinnen, indem sie eine Einführung in die wichtigsten Größen und Elemente eines Teilchenbeschleunigers bekommen. Dazu gehören die Emittanz und Twiss-Parameter sowie Korrektor- und Quadrupolmagnete.

Dafür wird in der Elektronenquelle von LAB ein Strahl erzeugt und auf eine Energie von bis zu 50 keV beschleunigt. Durch Quadrupol- und Korrektormagnete wird der Strahl durch das 2,4 m lange Strahlrohr gelenkt und kann mit Hilfe von Diagnoseschirmen beobachtet werden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Inbetriebnahme der Elektronenquelle des Laborbeschleunigers. Die Vorbereitung zur Inbetriebnahme in Form eines Hochspannungstests und einer Untersuchung des Filamentwiderstandes sind Bestandteile von Kapitel 3. In Kapitel 4 wird die aktuelle und voll funktionstüchtige Ansteuerungselektronik für die Kathode und deren Kalibrierung beschrieben. Die Vorgehensweise der Strahlerzeugung und Charakterisierung sowie das Bestimmen optimaler Parameter für den Praktikumsbetrieb sind in Kapitel 5 dargestellt.



# Der Laborbeschleuniger LAB

---

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den Aufbau und Zweck des Laborbeschleunigers LAB gegeben. Dabei wird die Elektronenquelle insbesondere hinsichtlich der Betriebsparameter detaillierter beschrieben und vorgestellt.

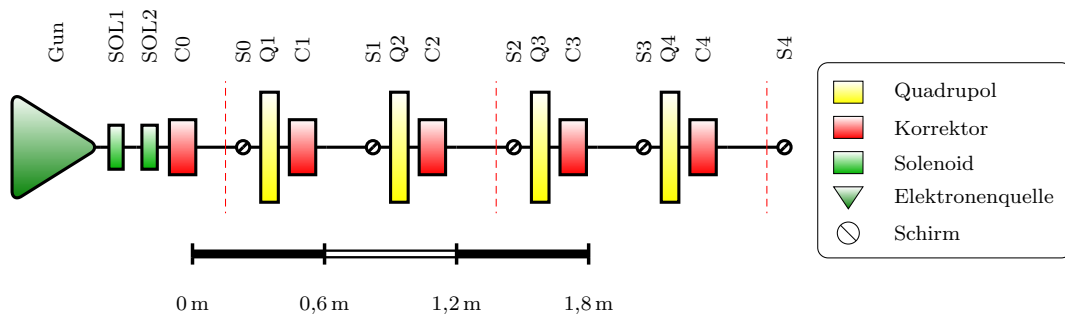
## 2.1 Verwendungszweck von LAB

Im Praktikum soll ein Elektronenstrahl von Studierenden erzeugt und hinsichtlich seiner Eigenschaften untersucht werden. Praktische Erfahrungen werden gesammelt, indem die Studierenden selbständig den Strahl durch die Strahlführung lenken. Die Bedienung von LAB geschieht dabei über ein Kontrollsystem analog zu dem an ELSA eingesetzten. Die Charakterisierung des Elektronenstrahls findet über die Bestimmung der Emittanz statt. Dazu soll zum einen die Multischirmmethode [1] und zum anderen der Quadrupolscan [1] verwendet werden. Bei der Multischirmmethode werden die Strahlbreiten an verschiedenen Positionen der Strahlführung gemessen, während beim Quadrupolscan die Quadrupolstärke eines Quadrupolmagneten variiert und die Strahlbreite am nachfolgenden Schirm gemessen wird. Die Emittanz und Twissparameter werden bei beiden Messmethoden mit Hilfe der bekannten Magnetoptik errechnet. Beide Methoden wurden im Verlauf der Inbetriebnahme durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Bachelorarbeit von [2]. zu finden

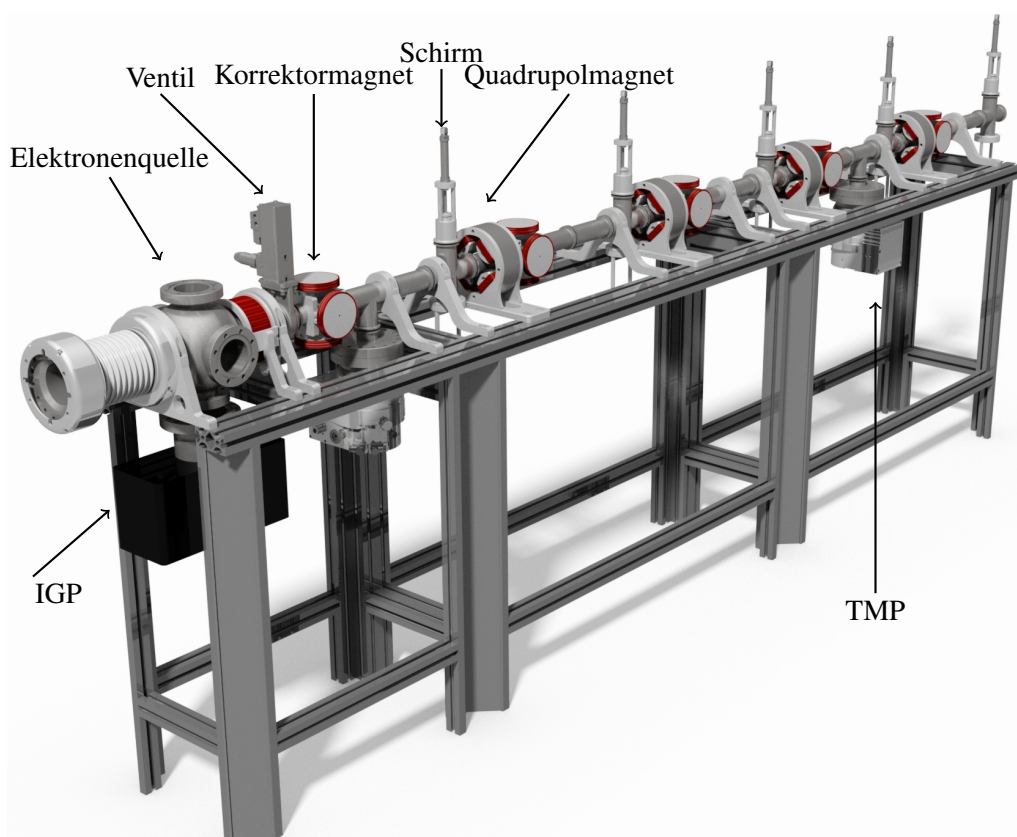
## 2.2 Aufbau des Beschleunigers

Die Abb. 2.1 zeigt schematisch den Aufbau von LAB; eine 3D-Modelldarstellung ist Abb. 2.2 zu entnehmen. Wie dort zu sehen ist, ist der Laborbeschleuniger modular aufgebaut, wodurch die Strahlführung beliebig erweitert werden kann. Das erste Modul besteht aus der Elektronenquelle (Gun), zwei Solenoidmagneten und einem Korrektormagnetenpaar.

Die durch eine Vorpumpe evakuierte Elektronenquelle ist über ein Ventil mit dem Strahlrohr verbunden. Der Druck an der Quelle wird von einer Ionen Getter Pumpe (IGP) in einem Bereich von  $1 \cdot 10^{-8}$  mbar konstant gehalten, während in der restlichen Strahlführung zwei Turbo Molekular Pumpen (TMP) einen Druck im Bereich von  $1 \cdot 10^{-7}$  mbar sicherstellen. Das Ventil ermöglicht eine separate Belüftung des Strahlrohrs, sodass ein Belüften der Quelle vermieden werden kann. Das Vakuum an der Elektronenquelle beträgt etwa  $1 \cdot 10^{-8}$  mbar, was einer freien mittleren Weglänge von ungefähr einem Kilometer entspricht[3]. Dadurch werden Stöße der Elektronen mit Restgas und folglich Strahlverlust weitestgehend vermieden.



**Abbildung 2.1:** Schematischer Aufbau des Laborbeschleunigers LAB. Die Module sind durch rote, gestrichelte Linien abgetrennt. [4]



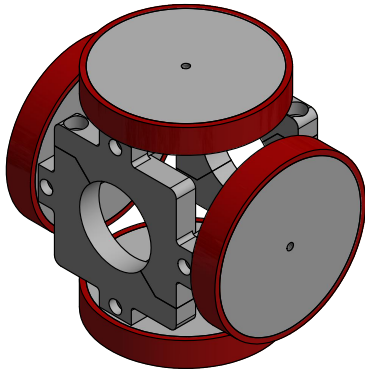
**Abbildung 2.2:** Ein 3D-Modell von LAB. Gut zu erkennen ist der modulare Aufbau durch die einzelnen MiniTec-Gestelle.[5]

Der in der Quelle erzeugte Elektronenstrahl erfährt durch die zwei Solenoide eine erste Fokussierung und kann mithilfe des Korrektormagnetenspaars auf dem ersten Schirm des darauffolgendem Moduls positioniert werden. Die Solenoide sind Zylinderspulen mit einem, homogenen, longitudinalen Magnetfeld im Inneren[6]. Auf geladene Teilchen (Elektronen) mit einer transversalen Geschwindigkeitskomponente zum homogenen Feld der Spule wirkt die LORENTZKRAFT, die die Teilchen auf eine helixförmige Flugbahn lenkt und somit fokussiert. Der Radius der helixförmigen Flugbahn bestimmt dabei die maximale Strahlbreite. Ohne die helixförmige Flugbahn würde der Strahl durch transversale Geschwindigkeitskom-

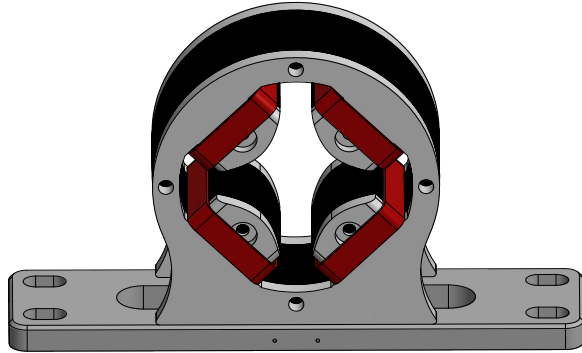


ponenten divergieren.

Das Korrektormagnetepaar besteht aus zwei Kreisspulenpaaren, die senkrecht zueinander montiert sind (siehe Abb. 2.3(a)). Jedes Kreisspulenpaar erzeugt dabei ein horizontales bzw. vertikales homogenes Magnetfeld. Durch die LORENTZKRAFT wird der Elektronenstrahl dadurch vertikal oder horizontal abgelenkt, was eine Positionierung des Strahls auf einem darauffolgenden Schirm ermöglicht.



(a) 3D-Modell eines Korrektormagnetepaars.



(b) 3D-Modell eines Quadrupolmagneten.

**Abbildung 2.3:** An LAB verwendete Magnete [5]

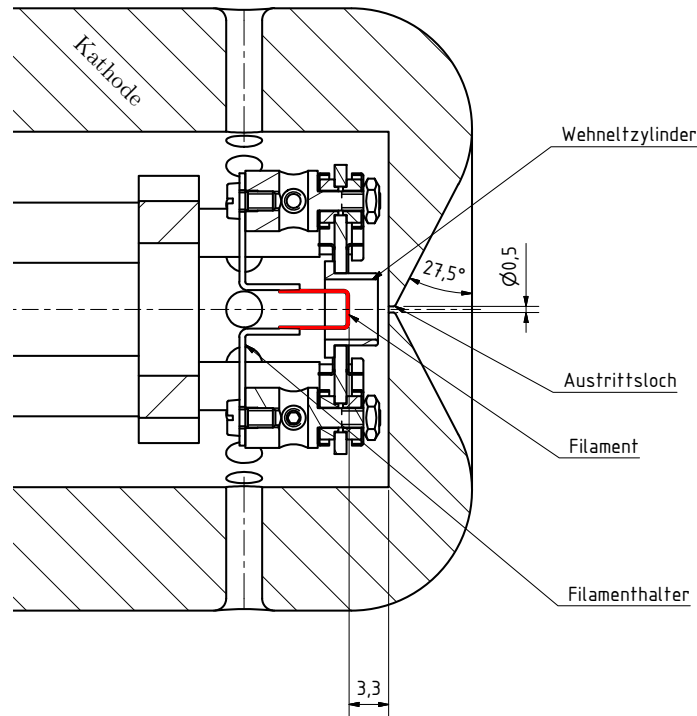
Das zweite Modul besteht aus einem Schirm, einem Quadrupolmagneten und einem Korrektormagnetepaar. Der Quadrupolmagnet ist in Abb. 2.3(b) als 3D-Modell dargestellt. Durch die hyperbolische Form der Polschuhe wird ein nach außen hin linear ansteigendes Feld erzeugt, welches zu einer Fokussierung in einer der transversalen Ebenen und gleichzeitiger Defokussierung in der anderen Ebene führt. Dieser Effekt tritt nur bei einer transversalen Ablage von der Sollbahn des Strahls auf [7]. In welcher Ebene die Quadrupolmagnete fokussieren und in welcher sie defokussieren wird über die Magnetfeldkonfiguration und dabei das Vorzeichen des Stroms eingestellt. Den Korrektormagneten nach dem Quadrupolmagneten zu positionieren ist entscheidend, dafür dass die Strahlpositionierung durch den Korrektormagneten keinen zusätzlichen Versatz im Quadrupolmagneten zur Folge hat. Genauer zur Strahlführung kann in [8] und [9] gefunden werden.

Zur Strahldiagnose werden Fluoreszenzschirme aus Aluminiumoxid verwendet. Sobald der Elektronenstrahl auf den um  $45^\circ$  gekippten Schirm trifft, wird ein Fluoreszenzleuchten verursacht, welches von einer CCD-Kamera aufgenommen wird. Die Kamera ist im rechten Winkel zum Strahlrohr und nach oben orientiert angebracht. Die Schirme können über Druckluft ein- und ausgefahren werden.

## 2.3 Aufbau der Elektronenquelle

Die Elektronenquelle wurde speziell für LAB im Haus entwickelt und gebaut; einzig das Filament wurde gekauft. Eine kugelförmige Vakuumkammer, Glocke genannt, umschließt die Kathode und Anode, die innen mit einem Abstand von 4 cm zueinander montiert sind. Zwischen diesen beiden Elementen wird eine statische Hochspannung von bis zu 50 kV angelegt. Die tatsächliche Beschleunigung der Elektronen findet ausschließlich in diesem Bereich statt. Die Anode ist dabei ein hohlzylinderartiges Bauelement, welches an das Strahlrohr anschließt. Die Kathode ist als technische Zeichnung in Abb. 2.4 dargestellt. Die runde Austrittsöffnung der Kathode wurde auf 0,5 mm festgelegt, um die Ausdehnung des Strahls und damit die Emittanz zu begrenzen. Die Öffnung fungiert somit als eine Art Blende. Die Auswirkung

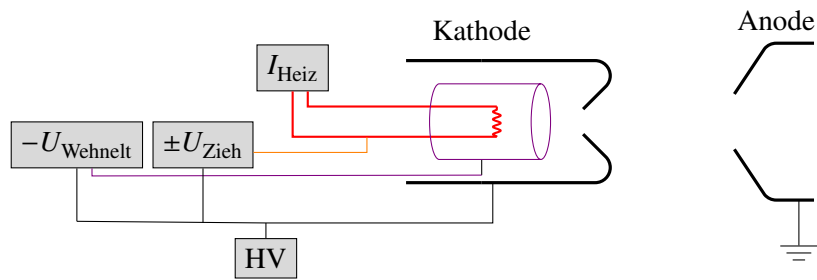
auf das Strahlprofil wurden bereits in [10] behandelt.



**Abbildung 2.4:** Technische Zeichnung der Kathode der Elektronenquelle. Alle Längenbemaßungen sind in der Einheit Millimeter angegeben [5].

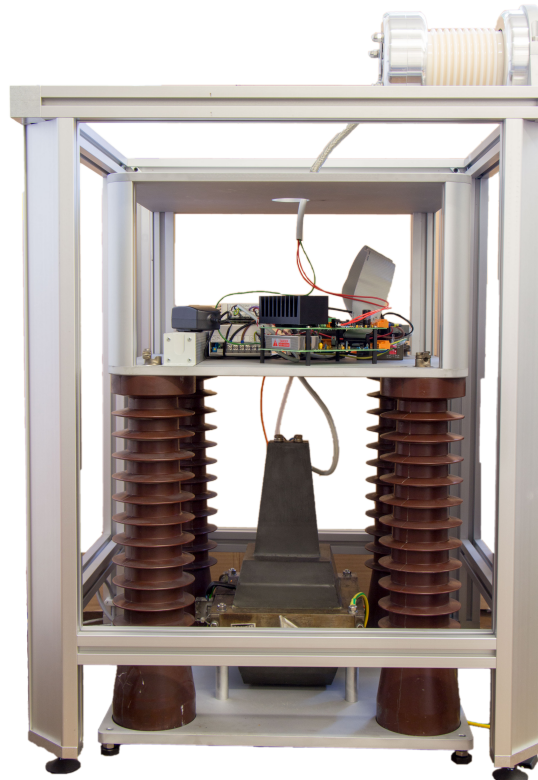
Die Elektronenquelle basiert auf dem Effekt der Glühemission. Das sog. Filament ist die Stahlerzeugungseinheit, bestehend aus einem dünnen Draht, welcher von einem Heizstrom  $I_{\text{Heiz}}$  durchflossen wird. Sobald ein gewisser Schwellenwert für den Heizstrom überschritten wird, glüht das Filament und emittiert Elektronen. Das Filament ist umgeben von einem WEHNELTZylinder, welcher einen einstellbaren Potentialunterschied zu erstem aufweist. Die Spannung zwischen Kathode und WEHNELTZylinder – im Weiteren als  $U_{\text{Wehnelt}}$  bezeichnet – ermöglicht eine Defokussierung der anisotrop emittierten Elektronen, indem ein zum Filament negatives Potential für den WEHNELTZylinder gewählt wird. Der Zweck des WEHNELTZylinders ist ein Homogenisieren des Strahlprofils, indem die Elektronen radialsymmetrisch zum WEHNELTZylinder hingezogen werden. Die ursprüngliche Form des Filaments sollte dadurch keinen Einfluss mehr auf die Intensitätsverteilung des transversalen Strahlprofils haben. Die Bewegung der Elektronen zum Austrittsloch wird durch das Anlegen einer negativen Ziehspannung  $U_{\text{Zieh}}$  zwischen Filament und Kathode gerichtet. Das Ziehpotential wird dabei tiefer gewählt, als das Wehnelpotential. Eine Betrachtung des Strahlprofils in Abhängigkeit dieser beiden Parameter befindet sich in Kap. 5. Eine positive Ziehspannung kann ebenfalls gewählt werden, wobei diese dann als Gegenspannung  $U_{\text{Gegen}}$  bezeichnet wird. Das Einstellen einer Gegenspannung verhindert das Austreten von Elektronen aus der Kathode, wodurch der Strahl effektiv abgeschaltet wird. Eine anschauliche Darstellung aller anliegenden Spannungen ist Abb. 2.5 zu entnehmen. Für eine genauere technische Beschreibung der Elektronenquelle sei auf [10] verwiesen.

Insgesamt wurde das Konzept einer invertierten Elektronenquelle umgesetzt. Das bedeutet, dass das Filament, der WEHNELTZylinder und die Kathode sowie sämtliche Ansteuerungselektronik für die Quelle auf einem negativen Hochspannungspotential (HV) liegen. Im Gegenzug dazu befindet sich die Anode



**Abbildung 2.5:** Prinzipskizze der Elektronenquelle

und daran angebunden das Strahlrohr auf Erdpotential. Ein wesentlicher Vorteil ist die räumliche Begrenzung der bis zu 50 kV hohen Beschleunigungsspannung auf die Kathode und einen vom Boden isolierten Turm (s. Abb. 2.6). An diesen Turm wird sowohl das Hochspannungskabel als auch die Kathode samt Ansteuerungselektronik leitend befestigt. Im Umkehrschluss ist eine weitere Isolierung der Anode und des Strahlrohrs nicht nötig, da dieser Teil des Beschleunigers auf Erdpotential liegt



**Abbildung 2.6:** Ein Foto des isolierten Turms. Der innere Kasten und sämtliche, darin aufgebaute Steuerelektronik liegt auf negativem Hochspannungspotential. Das abgebildete Gestell wird durch Plexiglasplatten zu allen Seiten geschlossen. Die Hochspannung ist dadurch nicht versehentlich zugänglich.



## Vorbereitung zur Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Elektronenquelle ist schrittweise erfolgt. Zunächst wurde ein Hochspannungstest durchgeführt. Dabei wurden der Turm und die Elektronenquelle ohne Ansteuerungselektronik auf Hochspannung gebracht. Es wurde geprüft, ob Überschläge in der Kathode auftreten können.

Der darauf folgende Schritt war das separate Beheizen des Filaments ohne Ansteuerungselektronik und ohne Hochspannung. Die daraus gewonnen Erkenntnisse wurden genutzt um die Ansteuerungselektronik anzupassen.

Der finale Schritt war die Stahlerzeugung durch das Hochfahren der Hochspannung bei gleichzeitiger Beheizung des Filaments durch die Ansteuerungselektronik.

### 3.1 Hochspannungstest zur Bestimmung der Feldemission

Feldemission findet statt, sobald ein starkes elektrisches Feld zwischen zwei leitenden Materialien, z.B. Metallplatten, angelegt wird. Das Anlegen einer ausreichend hohen Potentialdifferenz zwischen den Platten führt zu einer nicht zu vernachlässigenden Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen die Potentialbarriere, die die Luft bildet, durchtunneln. Das führt zu einem Stromfluss zwischen den Platten, der als Dunkelstrom bezeichnet wird.

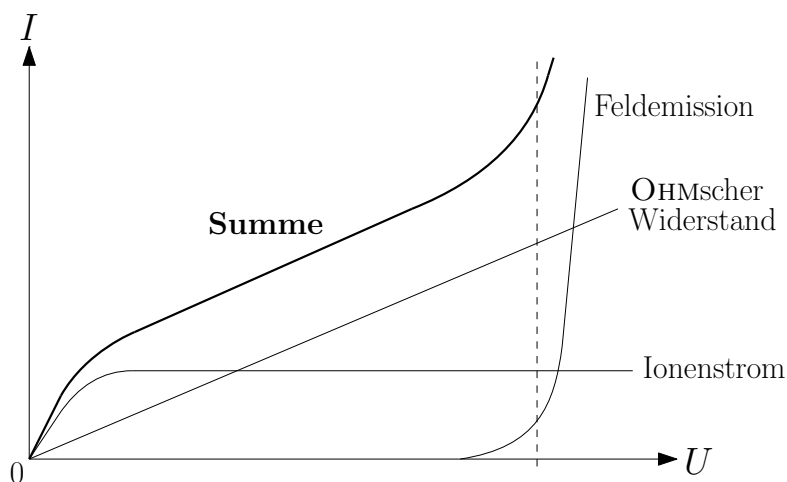


Abbildung 3.1: Abhängigkeit des Stroms von der anliegenden Hochspannung. [7]

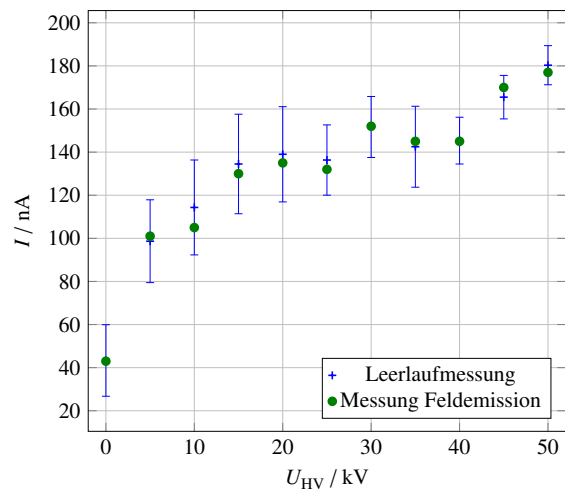
In der Quelle ist dies relevant beim Anlegen der Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anode. Wie jedoch in Abb. 3.1 dargestellt ist, gibt es auch weitere Effekte, die zu einem Strom zwischen Anode und Kathode führen. Der Ionenstrom bildet sich dabei durch das Ionisieren von Restgas in der Vakuumkammer. Der ohmsche Anteil ist bedingt durch die niemals völlig verschwindende Leitfähigkeit von Isolatoren. Der exponentiell steigende Anteil, bedingt durch Feldemission, ist insofern kritisch, da dieser einen Potentialausgleich in Form von einem Überschlag andeutet. Ein Überschlag würde sowohl das Filament als auch die Ansteuerungselektronik beschädigen; deshalb gilt es zu prüfen, ob dieses Problem auftreten kann.

Der dafür verwendete Messaufbau mit Hochspannungsnetzgerät (unten) ist in Abb. 3.2(a) dargestellt. Dieser Aufbau wurde in ähnlicher Weise bereits bei der Konditionierung der Kathode in [10] verwendet. Damals war jedoch das Filament nicht in die Kathode eingebaut und auch der Turm wurde nicht auf Hochspannung gebracht.

Das Netzgerät liefert eine Hochspannung bis zu 60 kV. Das Hochspannungskabel wird leitend mit dem Turm verbunden, mit welchem bereits die Elektronenquelle bis zur Kathode leitend verbunden ist. Daran ist über ein Kabel ein Spannungsmessgerät der Firma KEITHLEY angeschlossen. Dieses misst äußerst präzise (in einem Spannungsbereich von 0 mV bis 100 mV mit einer Genauigkeit von  $0,1 \mu\text{V}$ ) den Spannungsabfall über einen im Hochspannungsnetzgerät eingebauten Widerstand. Durch die bekannte Größe des Widerstands kann somit ein Strom errechnet werden, der dem vom Hochspannungsnetzgerät nachgelieferten Strom entspricht. Dieser sollte identisch sein mit dem Elektronenstrom, der an der geerdeten Anode abfließt. Ein Spannungsabfall von 1 mV entspricht 100 nA des vom Netzgerät nachgelieferten Stroms [11].



(a) Messaufbau



(b) Messwerte

**Abbildung 3.2:** Strommessung mit dem ins Hochspannungsnetzgerät integrierten Widerstand und dem KEITHLEY Messgerät. Daneben das dazugehörige Messergebnis.

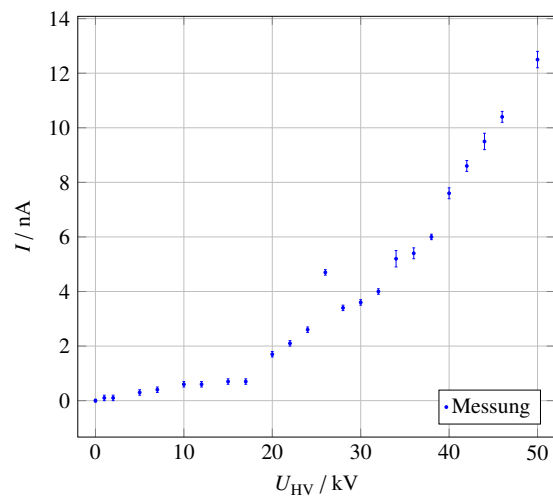
Das Ergebnis dieser Messung ist in Abb. 3.2(b) dargestellt. Die Leerlaufmessung entspricht dabei einem Hochfahren der Hochspannung ohne den Ausgang des Hochspannungsnetzgerätes mit dem Turm zu verbinden. Das bedeutet, dass sämtlicher Spannungsabfall, den das KEITHLEY Messgerät dabei anzeigt, von internen Strömen innerhalb des Hochspannungsnetzgerätes verursacht wird. Mehrere Messungen wurden dabei gemittelt mit der Standardabweichung als Fehler. Die tatsächliche Feldemissionsstrommessung mit angeschlossenem Turm ist ebenfalls dargestellt. Diese Messung überschneidet sich exakt mit

der Leerlaufmessung, weshalb diese Messmethode nicht zur exakten Charakterisierung der Feldemission geeignet ist. Trotzdem kann dieser Messung entnommen werden, dass bis 50 kV keine Ströme über 200 nA zu erwarten sind.

Um trotzdem eine genau Charakterisierung zu erhalten, wurde das in Abb. 3.3(a) dargestellte Gerät verwendet. Diese Apparatur besteht aus einem kleinen Digitalmultimeter (DMM), das den Spannungsabfall wiederum über einen Shuntwiderstand misst. Es befindet sich in einem HV-festen Gehäuse mit zwei voneinander isolierten Hälften. Das Gerät wird zwischen den Turm und der Kathode der Elektronenquelle montiert und mit diesen leitend verbunden. Nach demselben Prinzip wie zuvor gibt dieser Aufbau eine direkte Aussage über den Strom, der zwischen Turm und Kathode fließt. Der Vorteil zum vorherigen Aufbau ist, dass der Widerstand dieses Mal direkt an der Kathode und nicht im Inneren des Hochspannungsnetzgeräts liegt.



(a) Digitalmultimeter im Gehäuse



(b) Messwerte

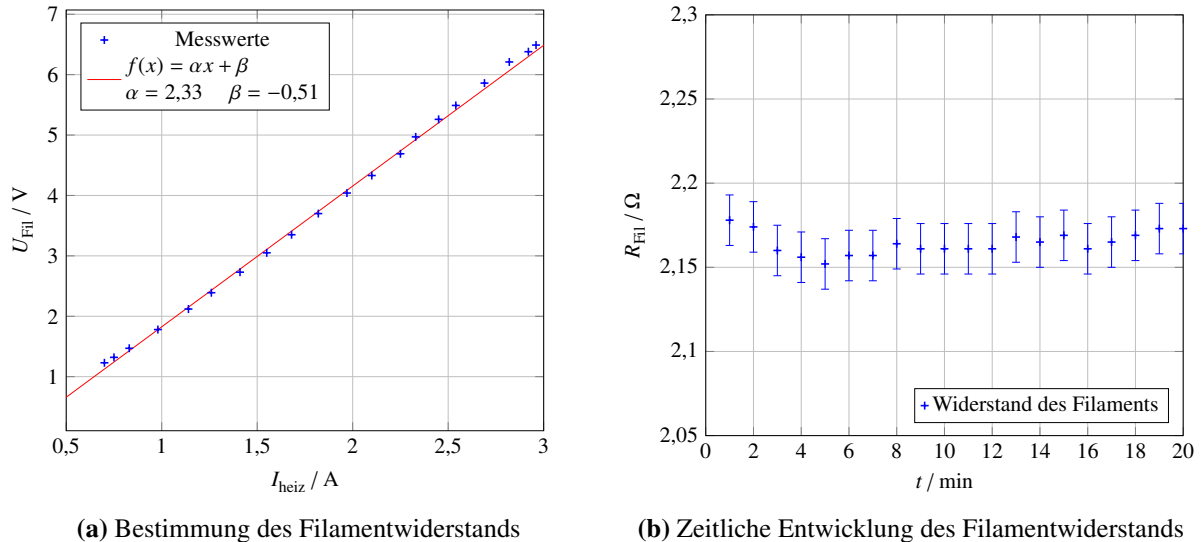
**Abbildung 3.3:** Strommessung zwischen Turm und Kathode mit Digitalmultimeter in hochspannungsfestem Gehäuse und das dazugehörige Messergebnis.

Das Ergebnis dieser Messung ist in Abb. 3.3(b) dargestellt. Es ist ein stückweise linearer Verlauf zu erkennen, der zwei Größenordnungen unter dem in Abb. 3.2(b) gezeigten Stroms liegt. Diese Messung lässt darauf schließen, dass Feldemission, angedeutet durch einen exponentiellen Anstieg des Stroms, selbst im höheren Bereich der Hochspannung nicht auftritt. Der Aufbau ist somit bis 50 kV für den Betrieb geeignet; mit Überschlügen ist nicht zu rechnen.

## 3.2 Heizen des Filaments zur Charakterisierung des Widerstandes

Bisher gab es nur einen Prototyp der Ansteuerungselektronik, der mit einem einfachen Draht als Filament auf Funktionsfähigkeit getestet wurde. Um die Elektronik jedoch unter realen Bedingungen zu testen, wurde in erster Linie der Filamentwiderstand  $R_{\text{Fil}}$  der Elektronenquelle bestimmt. Dazu wurde die Elektronenquelle an ein externes Netzgerät anstelle der Steuerelektronik angeschlossen. Dieses ist in der Lage, die Zieh- und Wehneltspannung sowie den Heizstrom zu liefern. Das Netzgerät ist für den Betrieb dennoch unbrauchbar, da es händisch über Drehpotentiometer gesteuert wird, eine von der Hochspannung galvanisch getrennte Fernsteuerung der Parameter für eine invertierte Elektronenquelle

aber unumgänglich ist. Auf Grund dieser Limitierung wurde das Filament ohne angelegte Hochspannung beheizt. Zusätzlich wurde ein Digitalmultimeter so in den Stromkreis integriert, dass der Spannungsabfall über das Filament  $U_{\text{Fil}}$  gemessen werden konnte. Die Ergebnisse dazu sind in Abb. 3.4 dargestellt.



**Abbildung 3.4:** Messung des Filamentwiderstands und der zeitlichen Entwicklung beim Aufheizvorgang

Aus der Steigung der linearen Anpassung wurde der Filamentwiderstand auf  $(2,33 \pm 0,02) \Omega$  bestimmt; der Achsenabschnitt hat keine relevante Bedeutung. Weiterhin wurde das zeitliche Verhalten des Filamentwiderstands beobachtet, was in Abb. 3.4(b) dargestellt ist. Dafür wurde ein fester Wert für den Heizstrom eingestellt, und jede Minute der Spannungsabfall über das Filament  $U_{\text{Fil}}$  notiert. Der Filamentwiderstand ergibt sich dann aus dem Ohmschen Gesetz. Diese Messmethode ist ungenauer als eine lineare Anpassung und liefert ein um etwa  $0,15 \Omega$  verschiedenes Ergebnis. Trotzdem sind keine signifikanten Änderungen in der zeitlichen Entwicklung des Widerstands beim Aufheizvorgang zu erkennen. Dem Plot kann entnommen werden, dass das Aufheizen des Filaments auf den Eigenwiderstand keinen Einfluss hat. Dadurch kann dieser in der genaueren Betrachtung des Emissionsstroms in Kap. 5 als konstant angenommen werden und muss nicht als temperaturabhängiger Term in die Bestimmungsgleichung eingehen.

Die Kenntnis des Filamentwiderstands hat das Anfertigen eines Testfilaments aus mehreren parallel geschalteten Widerständen ermöglicht. Dieses wurde zum Testen und Ausbessern kleinerer Fehler in der Ansteuerungselektronik genutzt.

Da eine Emissionsstrommessung analog zu Kap. 4 ebenfalls in das externe Netzgerät integriert ist, wurde auch eine erste Charakterisierung dieser Größe vorgenommen. Der Emissionsstrom ist technisch gesehen wieder ein vom Netzgerät nachgelieferter Strom, der über den Spannungsabfall an einem bekannten, internen Widerstand ermittelt wird. Der nachgelieferte Strom entspricht wiederum dem Strom hervorgerufen durch die Emission von Elektronen aus dem Filament. Im Folgenden sollen kurz die gewonnenen Erfahrungswerte aufgelistet werden.

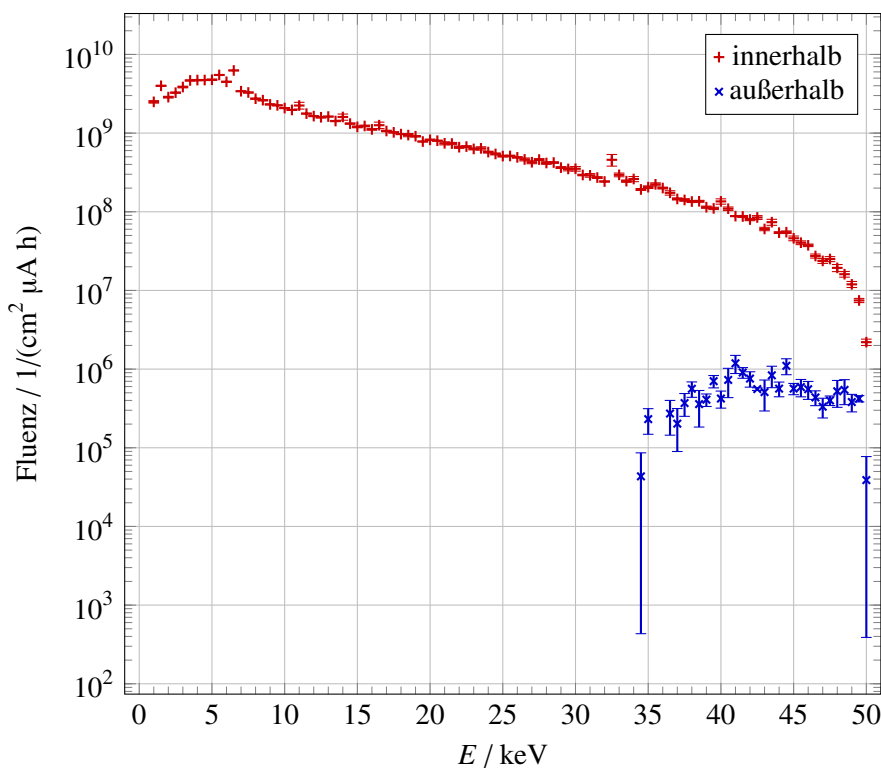
Die Charakterisierung hat ergeben, dass das Filament ab  $2,25 \text{ A}$  Heizstrom anfängt zu Glühen; erster Emissionsstrom ist ab einem Heizstrom von  $2,45 \text{ A}$  messbar. Der Aufheizvorgang hatte keine Auswirkung auf die Größe des Emissionsstroms. Die Betrachtung des Emissionsstroms in Abhängigkeit der Ziehspannung hat ergeben, dass bereits das Anlegen einer geringen Ziehspannung (ca.  $20 \text{ V}$ ) den Emissionsstrom bis zur Sättigung erhöht.



### 3.3 Strahlerzeugung und Strahlenschutz

Mit der in Kap. 4 vorgestellten Ansteuerungselektronik war eine erste Strahlerzeugung möglich. Damit stellte sich die Frage nach dem Strahlenschutz an LAB, weshalb die in Abb. 3.5 dargestellte Simulation durchgeführt wurde. Dafür wurde das Monte-Carlo-Programm Fluka [12] benutzt, welches den Transport von Teilchen in und deren Interaktion mit Materie simuliert. Dafür wurde eine Simulationsgeometrie erstellt, die sich an der Geometrie von LAB orientiert. Es wurde der Fall für einen eingefahrenen Schirm gewählt. Eine Detektionsfläche wurde innerhalb und eine außerhalb des Strahlrohrs erstellt, die die durch Photonen verursachte Fluenz registriert.

Fluenz beschreibt die Anzahl der Photonen, die die Detektionsflächen durchdringen. Diese Anzahl ist auf die Detektionsfläche zum einen innerhalb und zum anderen außerhalb der Kammerwand normiert. Effektiv zeigt der Plot also die Abschirmwirkung der 3 mm dicken Kammerwand aus Edelstahl in Abhängigkeit der Photonenenergie.



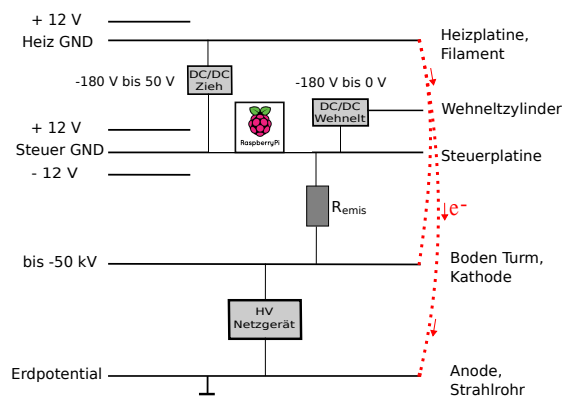
**Abbildung 3.5:** Simulation der Fluenz durch das Strahlrohr in Abhängigkeit der Energie. [13]

An dem Ergebnis der Simulation ist zu erkennen, dass beim Auftreffen von Elektronen auf den Schirm im Inneren der Vakuumkammer Photonen durch Bremsstrahlung entstehen. Erst ab 34 keV wird erwartet, dass Photonen die Kammerwand durchdringen. Die Ergebnisse der Simulation sind mit durchgeführten Messungen verträglich. Dafür wurde einmal bei 20 keV und einmal bei 30 keV mit einem Geiger-Müller-Zählrohr entlang des Strahlrohrs die Strahlung gemessen. Die Messergebnisse waren nicht von natürlicher Untergrundstrahlung zu unterscheiden. Ab 35 keV wurde jedoch bereits Strahlung detektiert. Für den Praktikumsbetrieb wurde deshalb eine maximale Energie von 30 keV für LAB gewählt.



## Inbetriebnahme der Ansteuerungselektronik

Erste Konzepte für die Steuerelektronik der Elektronenquelle in Form von zwei Platinen wurden bereits in [10] vorgestellt. Seitdem wurden im Verlauf der Inbetriebnahme mehrere Prototypen der Steuerelektronik getestet, weshalb hier die finale und voll funktionstüchtige Version beschrieben wird. Das Grundprinzip der Ansteuerung wurde beibehalten und kann anhand der Prinzipskizze Abb. 4.1 klar gemacht werden.



**Abbildung 4.1:** Prinzipskizze zur Ansteuerung der Elektronenquelle und den jeweiligen Bezugspotentialen

Wie bereits erwähnt, ist eine Komponente von LAB die Invertierte Elektronenquelle, wodurch die Anode, das Strahlrohr und sämtliche Strahlführungselemente auf Erdpotential liegen. Stattdessen liegt die Kathode und sämtliche Steuerelektronik auf Hochspannung und nutzt diese als Bezugspotential. Die Hochspannung wird vom Hochspannungsnetzgerät bereitgestellt und über ein Kabel mit dem Boden des Turms und der Kathode leitend verbunden (siehe Abb. 2.6). Ein weiteres Kabel führt zum lokalen Massepotential der Steuerplatine, sodass der Spannungsabfall über den dazwischen liegenden Messwiderstand  $R_{emis}$  eine Emissionsstrommessung ermöglicht. Der Strom durch  $R_{emis}$  wird vom Hochspannungsnetzgerät nachgeliefert, sobald sich Elektronen aus dem Filament lösen und entweder an der Kathode oder an der Anode, bzw. dem Strahlrohr abfließen (in Abb. 4.1 rot dargestellt).

Ein Schaltnetzteil stellt Versorgungsspannungen von  $\pm 12V$  für die Steuerplatine zur Verfügung. Die Kommunikation mit der Steuerplatine geschieht durch einen RaspberryPi, der über einen I<sup>2</sup>C-Bus mit der erstgenannten verbunden ist. Der RaspberryPi liegt ebenfalls auf Hochspannung, da das Massepotential der Steuerplatine ebenfalls das Massepotential für den RaspberryPi bildet. Weiterhin ist der RaspberryPi über eine Netzwerkverbindung durch ein Glasfaserkabel galvanisch getrennt mit einem PC

verbunden, auf dem ein Kontrollsystem zur Steuerung von LAB läuft.

Die Heizplatine und das Filament beziehen sich nochmal auf ein anderes Potential als die Steuerplatine. Das lokale Massepotential der Heizplatine und des Filaments wird über die Ziehspannung geregelt, die eine Potentialdifferenz zwischen dem Filament und der Kathode aufbaut. Zum einen kann dadurch eine Ziehspannung bis zu -180V angelegt werden, wodurch die emittierten Elektronen zur Kathode hin gezogen werden. Zum anderen kann eine Gegenspannung von +50V angelegt werden, womit der Strahl effektiv ausgeschaltet wird.

## 4.1 Steuerplatine

Die Aufgabe der Steuerplatine (Schaltplan in Abb. 4.3) ist es, eine Fernsteuerung der Kathodenparameter zu ermöglichen, indem sowohl Werte vom Kontrollsystemmenü vorgegeben (Soll-Werte), als auch aktuelle Messwerte angezeigt werden können (Ist-Werte). Die Soll-Wert Vorgabe für die Wehnelt- und Ziehspannungen geschieht, wie in Abb. 4.2(a) dargestellt, indem ein Wert im Kontrollsystem eingestellt wird. Dieser wird als Parameter in einem C++ Programm auf dem RaspberryPi verarbeitet und über den I<sup>2</sup>C-Bus (grün in Abb. 4.3 ) auf die Platine gespeist. Das digitale Signal wird weiter in einem DAC (gelb) in eine analoge Spannung zwischen 0 V und 4 V umgewandelt. Die DC/DC Wandler (cyan) werden über diese 0 bis 4 V angesteuert, was einer Ausgangsspannung von 0 bis -180 V entspricht. Die Ist-Wert-Anzeige verläuft analog in umgekehrter Richtung mit dem Unterschied, dass der analoge Ist-Wert, mit einem Operationsverstärker in einen Bereich von 0 V bis 2 V gebracht, von einem ADC (blau) digitalisiert und anschließend an den RaspberryPi gesendet wird. Zur Verdeutlichung siehe Abb. 4.2(b)

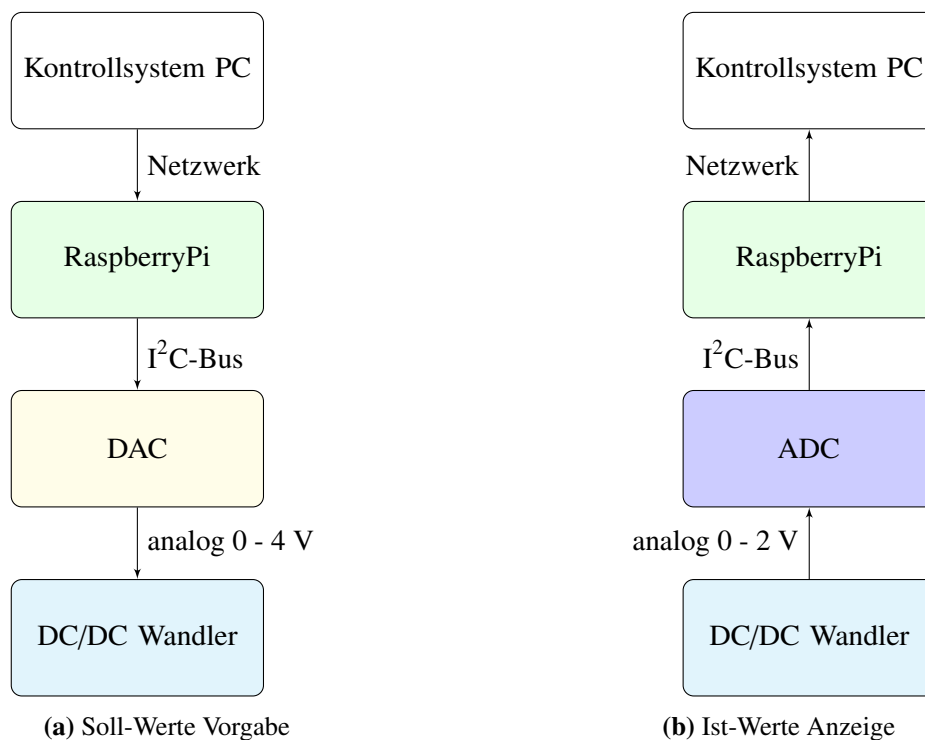


Abbildung 4.2: Flussdiagramm zur Verdeutlichung des Steuerablaufs für Spannungen

Damit wird die Steuerung der Wehneltspannung (der DC/DC Wandler im nicht gekennzeichneten Bereich in Abb. 4.3) komplett erklärt.

Die Ziehspannung wird auf der Platine im Bereich B3 analog zur Wehneltspannung erzeugt, mit einem zusätzlichen DC/DC Wandler für die Gegenspannung, die fest über ein Potentiometer eingestellt wird. Mit dem Operationsverstärker und den zwei Optokoppler kann zwischen den Ausgängen der beiden DC/DC Wandlern geschaltet werden, und somit die Zieh- bzw. Gegenspannung eingestellt werden. Das Signal zum Schalten wird ebenfalls über den DAC gegeben.

Der Bereich B2 bildet eine Verbindung zur Heizplatine, auf der der Heizstrom über Soll- und Ist-Werte geregelt wird. Bereich B1 bildet die bereits erklärte Emissionsstrommessung. Der Spannungsabfall über  $R_{EMIS}$  wird von dem ADC digitalisiert, der diesen Wert weiter an den RaspberryPi sendet, wo dieser über das OHMSche Gesetz in den Emissionsstrom umgerechnet wird.

Im rot gekennzeichneten Bereich werden die verschiedenen benötigten Spannungen aus den 12 V Versorgungsspannungen erzeugt.

## 4.2 Heizplatine

Die Heizplatine (Schaltplan in Abb. 4.4) ermöglicht eine Steuerung des Heizstroms, welcher das Filament erhitzt und somit zum Emittieren bringt. Das Grundprinzip der Soll-Wert Vorgabe bildet ein Stromkreis mit aktivem Widerstand, der nach dem OHMSchen Gesetz  $I = \frac{U}{R}$  bei konstanter Spannung die Stromstärke bestimmt und über einen analogen Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) [14] eingestellt wird. Realisiert wird der aktive Widerstand in Form der beiden Transistoren im gelb eingezeichneten Stromkreis (Abb. 4.4). Die Spannung an der Basis der Transistoren ist die Stellgröße des PI-Reglers. Der Soll-Wert wird als Führungsgröße bezeichnet und wird vom RaspberryPi in Form von einem PWM Signal (grün) vorgegeben. Das PWM Signal wird am eingekreisten Tiefpass durch Integration in eine Gleichspannung umgewandelt. Ein Spannungsfolger entlastet daraufhin die Eingangsspannung ( $U_{soll}$ ), die anschließend in den positiven Eingang des PI-Regler eingespeist wird. Auf dem negativen Eingang des PI-Reglers liegt die Ist-Spannung an, die als Regelgröße bezeichnet wird. Diese wird als Referenzspannung genutzt, an die der Regler die Stellgröße anpasst. Die Ausgangsspannung des PI-Reglers liegt schließlich auf der Basis der Transistoren und steuert so den Widerstand des gelben Stromkreises.

Die Ist-Wert Auslese des Heizstroms funktioniert analog zur Ist-Wert Auslese des Emissionsstroms, indem der Spannungsabfall über den Messwiderstand  $R_{Heiz}$  über den ADC auf der Steuerplatine im RaspberryPi mit dem bekannten Wert für  $R_{Heiz}$  umgerechnet wird. Wegen des Spannungsunterschieds zwischen den beiden Platinen, sind diese über Optokoppler galvanisch von einander getrennt.

Im rot gekennzeichneten Bereich werden wieder die verschiedenen benötigten Spannungen aus den  $\pm 12V$  Versorgungsspannungen erzeugt.

## 4.3 Platinendesign

Beide Schaltungen aus Abb. 4.3 und Abb. 4.4 wurden nach erfolgreichem Test der Prototypen im Rahmen dieser Arbeit in einem Platinendesign (siehe A.1 und A.2) umgesetzt. Dafür wurde das Programm Eagle verwendet. Eagle ist eine Software mit graphischer Oberfläche, mit der Schaltpläne und Platinenentwürfe erstellt werden können. Speziell bei der Heizplatine musste beachtet werden, dass durch die Transistoren große Ströme fließen, sodass ein richtig dimensionierter Kühlkörper nötig ist. Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die platzsparende, aber dennoch voneinander isolierte Anordnung der Platinen im Turm. Dieser wurde in Form von zwei aufeinander gestapelten Platinen umgesetzt. Die fertig bestückten Platinen sind in Abb. 4.5 dargestellt.

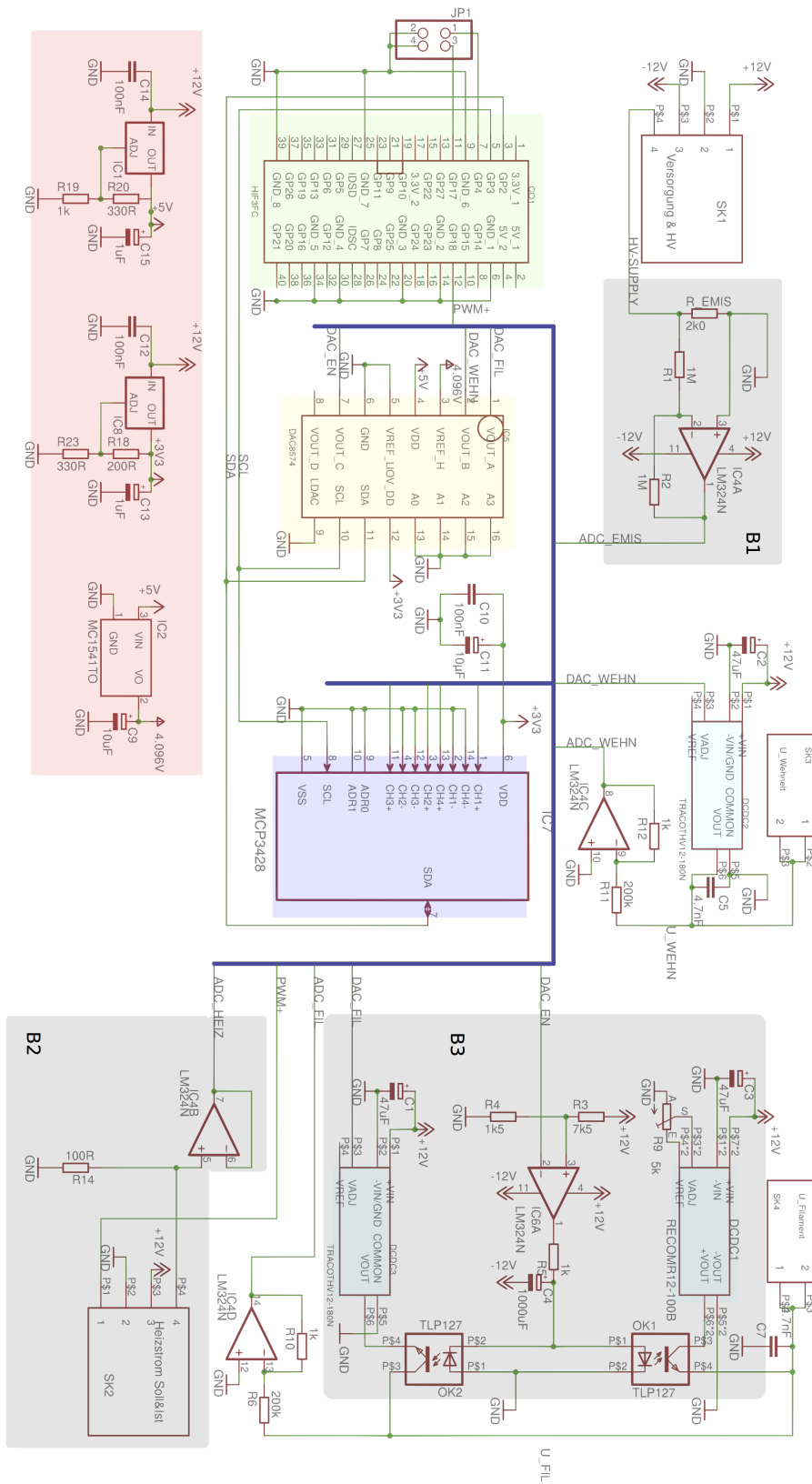


Abbildung 4.3: Schaltplan der Steuerplatine

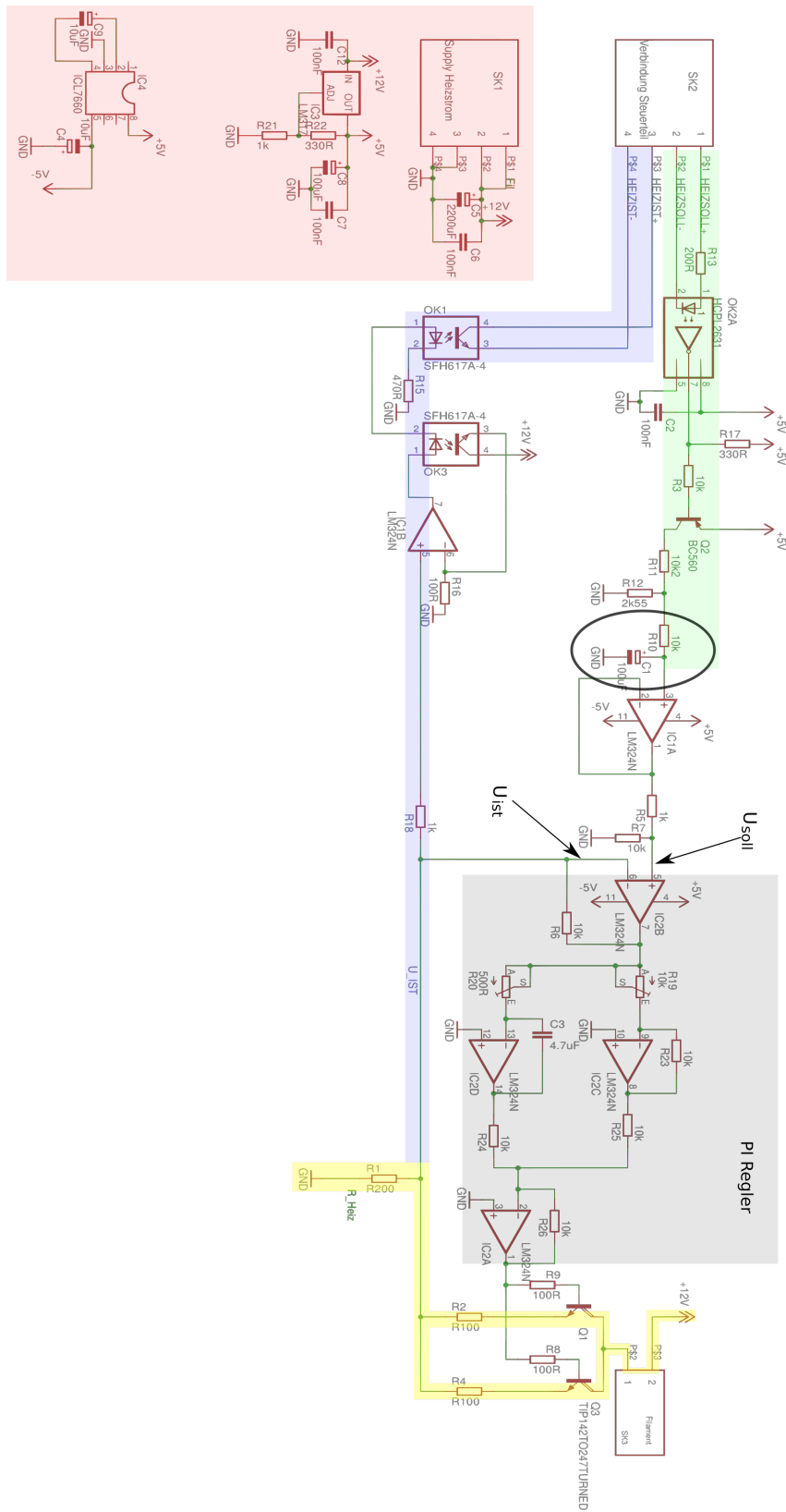
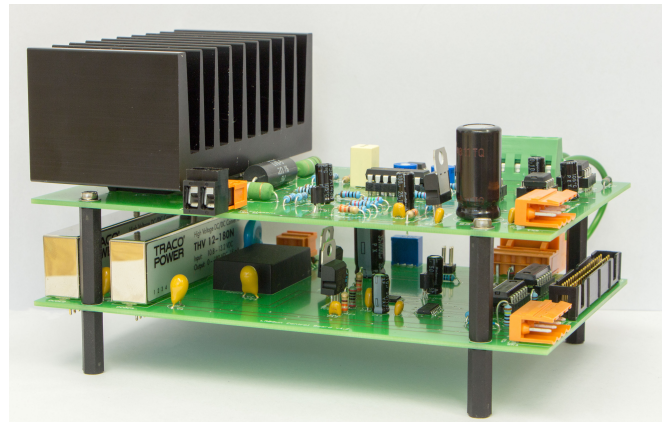


Abbildung 4.4: Schaltplan der Heizplatte



**Abbildung 4.5:** Ein Foto der fertig bestückten Platinen. Die untere Platine ist die Steuerplatine. Zu erkennen sind unten links die DC/DC Wandler. Die obere Platine ist die Heizplatine. Zu erkennen ist der Kühlkörper, der auf die Transistoren montiert wurde.

## 4.4 Kalibrierung

Der Funktionstest der Platinen wurde mit einer gleichzeitigen Kalibrierung durchgeführt. Für die Zieh- und Wehneltspannung wurde ein Digitalmultimeter zusätzlich parallel an den jeweiligen Ausgang geschaltet; für den Heizstrom dementsprechend in Reihe. Im Kontrollsystem wurden anschließend Soll-Werte eingestellt und sowohl die Ist-Werte aus dem Kontrollsystem als auch die mit dem Digitalmultimeter gemessenen Werte wurden notiert. Die mit dem Digitalmultimeter gemessenen Werte sind einmal gegen die Ist- und einmal gegen die Soll-Werte aufgetragen worden. An die Messwerte wurde eine Gerade angepasst. Durch ein C++ Programm werden im unkalibrierten Fall die Soll-Werte vom Kontrollsystem ungeändert an den DAC weiter gereicht, bzw. die Ist-Werte vom ADC unverändert an das Kontrollsystem weiter gegeben. Die Funktion im C++ Programm entspricht damit in diesem Plot genau der Einheitsgeraden. Für die Kalibrierung der Ist-Werte wird die Funktion aus dem C++ Programm ( $F_{\text{unkalibriert}}^{\text{Ist}}$ ) mit den Anpassungsparametern verrechnet, sodass diese anschließend der angepassten Funktion entspricht:

$$F_{\text{kalibriert}}^{\text{Ist}} = F_{\text{unkalibriert}}^{\text{Ist}} \cdot m_{\text{Anpassung}} + n_{\text{Anpassung}}$$

Die Funktion für die Soll-Wert Vorgabe im C++ Programm unterscheidet sich von der Vorherigen in der Datenstruktur, weil es eben eine Vorgabe ist und keine Auslese. Dadurch entspricht die Funktion für die Soll-Wert Vorgabe eben nicht der Einheitsgeraden im Soll-Plot, sondern genau der angepassten Funktion durch die DMM-Messwerte. Zur Kalibrierung wurde die Funktion im C++ Programm ( $F_{\text{unkalibriert}}^{\text{Soll}}$ ) so mit den Parametern aus der Anpassung verrechnet, dass sie genau der Einheitsgeraden im Plot entspricht.

$$F_{\text{kalibriert}}^{\text{Soll}} = \frac{F_{\text{unkalibriert}}^{\text{Soll}} - n_{\text{Anpassung}}}{m_{\text{Anpassung}}}$$

Alle Kalibrationskurven sind im Anhang beigelegt. Stichprobenartiges Testen der Kalibrierung hat ergeben, dass diese erfolgreich funktioniert hat.

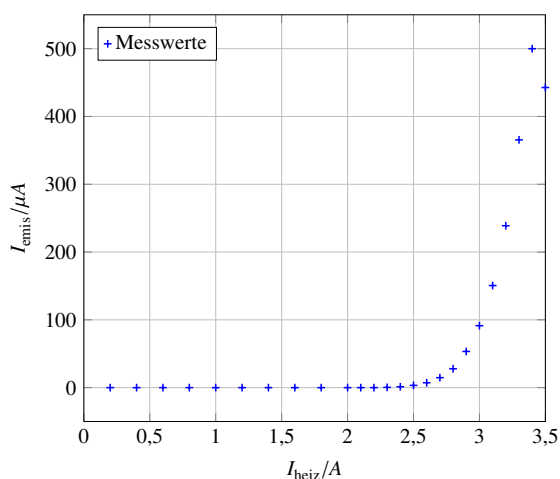


# Experimentelle Charakterisierung der Elektronenquelle

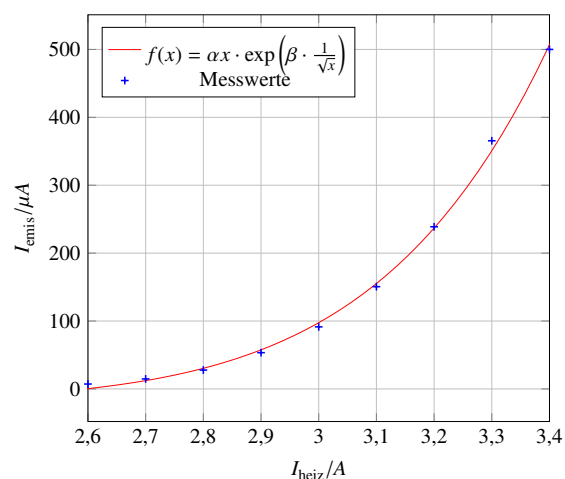
Zur Steuerung der Elektronenquelle stehen drei Parameter zur Verfügung: die **Ziehspannung**, die **Wehneltspannung** und der **Heizstrom**. Diese haben Auswirkungen auf den Emissionsstrom und die geometrische Form des Strahls. Diese gilt es zu charakterisieren und die optimalen Einstellungen für den Praktikumsbetrieb zu finden.

## 5.1 Heizstrom

Der Heizstrom hat von den drei oben genannten Parametern den größten Einfluss auf den Emissionsstrom. Der Heizstrom fließt durch das Filament, erhitzt dieses und führt zur Glühemission von Elektronen. Dies geschieht, sobald die zugeführte Energie ausreicht, um die Austrittsarbeit  $W_A$  aus dem Filament zu überwinden. Eine Messung des Emissionsstroms in Abhängigkeit des Heizstroms wurde bei einer Strahlenergie von 20 keV mit einer Ziehspannung von 50 V und einer Wehneltspannung von 20 V durchgeführt. In Abb. 5.1(a) sind die Messwerte dargestellt.



(a) Messwerte



(b) exponentieller Bereich der Messwerte

Abbildung 5.1: Messung des Emissionsstroms in Abhängigkeit des Heizstroms.

Zu erkennen ist, dass erst ab einem Heizstrom von 2,5 A ein Emissionsstrom messbar wird. Dieser steigt exponentiell bis ca. 3,5 A an und erreicht anschließend ein Plateau. An den exponentiellen Ausschritt (Abb. 5.1(b)) wurde eine Funktion der Form  $f(x) = \alpha x \cdot \exp\left(\beta \cdot \frac{1}{\sqrt{x}}\right)$  angepasst mit  $\alpha$  und  $\beta$  als Anpassungsparameter, die den Verlauf der Messwerte gut widerspiegelt. Der funktionale Zusammenhang für die Anpassungsfunktion ergibt sich, indem die Temperaturabhängigkeit in der RICHARDSONGleichung [15]

$$I_{\text{emis}} = A_{\varnothing} A_{\text{Draht}} T^2 \cdot \exp\left(-\frac{W_A}{k_B T}\right) \quad (5.1)$$

ersetzt wird durch den Heizstrom. Die RICHARDSONGleichung beschreibt nur die Emissionsstromdichte  $j_{\text{emis}}$  unter Berücksichtigung der Oberfläche des emittierenden Körpers  $A_{\text{Draht}}$  in Abhängigkeit der Temperatur  $T$ . Der tatsächliche Emissionsstrom ergibt sich erst durch Multiplikation mit der Oberfläche des Austrittslochs der Kathode  $A_{\varnothing}$ . Da die Temperatur des Filaments kein expliziter Steuerparameter ist, soll diese durch den Heizstrom ersetzt werden. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Heizstrom ergibt sich aus dem Stromwärmegesetz:

$$\dot{Q}_W = P = R \cdot I^2 \quad (5.2)$$

welches besagt, dass der abgegebene Wärmestrom  $\dot{Q}_W$  (also die thermische Leistung) genau der aufgenommenen elektrischen Leistung  $P$  entspricht [16] und dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz, welches die Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Temperatur mit dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  und der Oberfläche des emittierenden Körpers  $A_{\text{Draht}}$  angibt:

$$\dot{Q}_W = \varepsilon k_B A_{\text{Draht}} \cdot T^4 \quad (5.3)$$

Zusammen ergibt das die Temperatur in Abhängigkeit des Stroms, welcher durch den Leiter fließt, also genau des Heizstroms :

$$T = \sqrt[4]{\frac{R}{\varepsilon k_B A_{\text{Draht}}}} \cdot \sqrt{I} \quad (5.4)$$

Eingesetzt in die RICHARDSONGleichung ergibt das:

$$I_{\text{emis}} = \underbrace{A_{\varnothing} A_{\text{Draht}} \sqrt{\frac{R}{\varepsilon k_B A_{\text{Draht}}}}}_{:=\alpha} \cdot I \cdot \exp\left(-\underbrace{\frac{W_A}{k_B} \sqrt[4]{\frac{\varepsilon k_B A_{\text{Draht}}}{R}}}_{:=\beta} \cdot \frac{1}{\sqrt{I}}\right) \quad (5.5)$$

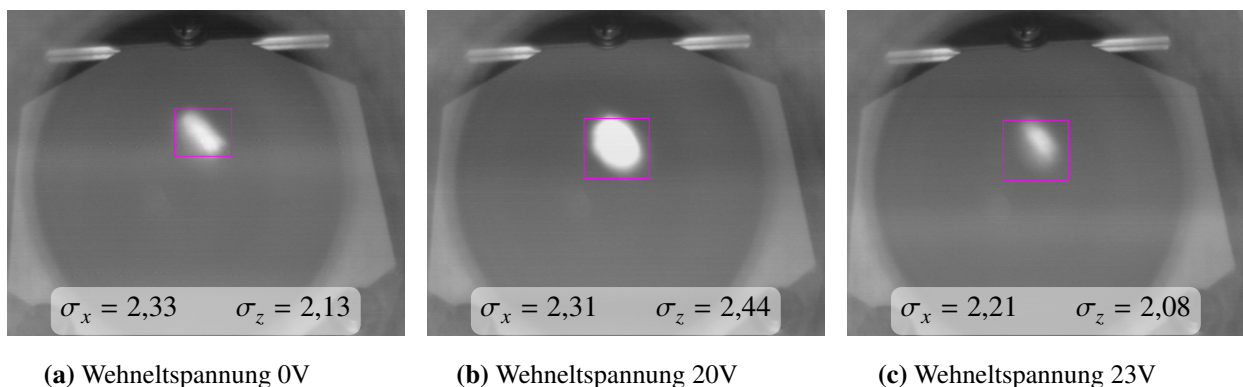
Zu erwarten ist also ein exponentieller Verlauf der Form  $f(x) = \alpha x \cdot \exp\left(\beta \cdot \frac{1}{\sqrt{x}}\right)$ .

Auf die Geometrie des Strahlflecks hat der Heizstrom keine Auswirkung gezeigt; den einzigen sichtbaren Einfluss gab es lediglich auf die Intensität des Strahlflecks. Generell ist aber von hohen Intensitäten abzuraten, da:

- (a) die Kameras übersteuern, sodass das aufgenommene Intensitätsprofil in Sättigung geht und somit keine genaue Bestimmung der Strahlbreiten möglich ist
- (b) die Schirme schnell verunreinigt werden, indem sich ein rußartiger Film auf den Schirmen bildet.

## 5.2 Ziehspannung und Wehneltspannung

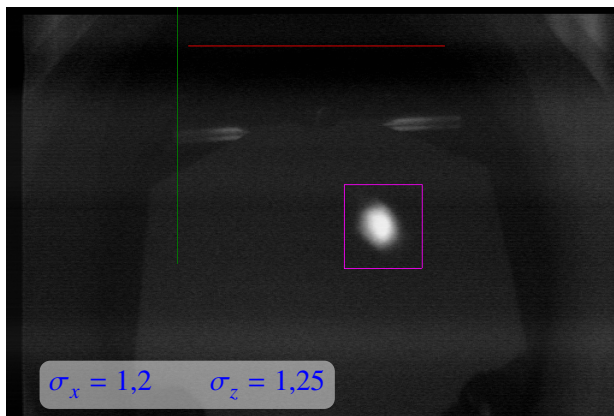
Die Zieh- und Wehneltspannung haben im Gegensatz zum Emissionsstrom einen durchaus sichtbaren Einfluss auf den Strahlfleck. Beide Parameter reichen von 0 V bis –180 V und die Korrelation dieser ist beispielhaft in Abb. 5.2 dargestellt. Die Abbildungen zeigen den ersten Fluoreszenzschirm in der Strahlführung, auf den der Strahl trifft. Das Fluoreszenzleuchten wurde von einer CCD-Kamera erfasst. Mit dem ebenfalls an ELSA verwendeten Strahldiagnoseprogramm *Framegrabber* [17] wurde ein Abbild des Strahlflecks aufgenommen. Die angegebenen Strahlbreiten  $\sigma_x$  und  $\sigma_z$  sind durch Anpassen einer Gaußverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung an das Intensitätsprofil entstanden. Diese Funktion ist ebenfalls bereits in *Framegrabber* integriert. Es ist zu erkennen, dass das Erhöhen der Wehneltspannung bis zu einem bestimmten Wert den Strahlfleck runder und homogener formt. Das Überschreiten einer bestimmten Schwelle führt jedoch zu einem immer kleiner werdenden Strahlfleck. Eine Messreihe für unterschiedliche Kombinationen von Zieh- und Wehneltspannung hat ergeben, dass eine Differenz von 10V zwischen Zieh- und Wehneltspannung für einen möglichst runden und homogen ausgeleuchteten Strahlfleck sorgt. Eine weitere Beobachtung ist, dass ein Spannungspaar im niedrigeren Spannungsbereich für einen generell homogeneren Strahlfleck gesorgt hat ( s. Abb. 5.3 ). Sowohl der Helligkeitsunterschied als auch der Unterschied in den Strahlbreiten zwischen Abb. 5.2 und 5.3(a) rührt von einem zusätzlichen Neutraldichtefilter vor der CCD Kamera. Eine Diskussion zur Notwendigkeit der Verwendung von Neutraldichtefilter ist in [2] zu finden.



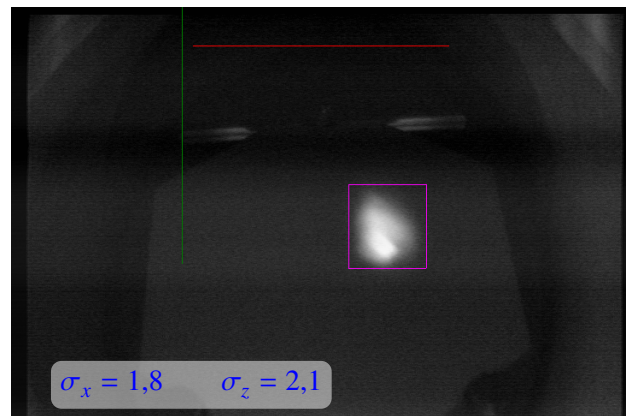
**Abbildung 5.2:** Strahlfleck auf Schirm 1 bei 2,8 A Heizstrom und 30 V Ziehspannung. Die Strahlbreiten  $\sigma_x$  und  $\sigma_z$  sind in Millimeter angegeben

Zusammengefasst sind folgende Parameter für den Praktikumsbetrieb zu empfehlen:

- $I_{\text{Heiz}} = 2,6 \text{ A} - 2,7 \text{ A}$ , was einem Emissionsstrom von  $7 \mu\text{A} - 14 \mu\text{A}$  entspricht
- $U_{\text{Zieh}} = 20 \text{ V}$
- $U_{\text{Wehnelt}} = 10 \text{ V}$



(a) Heizspannung 20V; Wehneltspannung 10V



(b) Heizspannung 150V; Wehneltspannung 140V

**Abbildung 5.3:** Strahlfleck bei 2,8 A Heizstrom und unterschiedlichen Ziehspannungen. Die Strahlbreiten sind in Millimeter angegeben

---

## Zusammenfassung

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Elektronenquelle erfolgreich für den Praktikumsbetrieb in Betrieb genommen:

- Das Anlegen der Hochspannung an die Elektronenquelle hat keinen exponentiellen Anstieg im nachgelieferten Strom zur Folge gehabt. Der Aufbau wurde für den Betrieb als geeignet erklärt.
- Der Filamentwiderstand wurde bestimmt. Der Aufheizvorgang hat keine signifikante Änderung gezeigt.
- Die Ansteuerungselektronik wurde mit einem Testfilament getestet und aktualisiert. Eine voll funktionstüchtige Version der Elektronik wurde in einem Platinendesign umgesetzt und anschließend kalibriert.
- Der Elektronenstrahl wurde in Abhängigkeit der Kathodenparameter charakterisiert. Folgende Parameter sind zu empfehlen:
  - $I_{\text{Heiz}} = 2,6 \text{ A} - 2,7 \text{ A}$
  - $U_{\text{Zieh}} = 20 \text{ V}$
  - $U_{\text{Wehnelt}} = 10 \text{ V}$
- Darüber hinaus wurde ein Übersichtsmenü erstellt, von dem aus alle Elemente der Strahlführung angesteuert werden können.



# Literatur

---

- [1] S. Zander, *Optische Strahldiagnose an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Diplomarbeit: Universität Bonn, 2013 (siehe S. 3).
- [2] M. Hoffmann, *Strahldiagnose und Strahlloptik am Laborbeschleuniger LAB*, Bachelorarbeit: Universität Bonn, 2016 (siehe S. 3, 23).
- [3] P. V. GmbH, *The Vacuum Technology Book*, 2 (2013) (siehe S. 3).
- [4] J. F. Schmidt, „tikz-palattice - draw particle accelerator lattices with TikZ“, März 2015 (siehe S. 4).
- [5] P. Hänisch, Universität Bonn, ELSA, 2016 (siehe S. 4–6).
- [6] F. Hinterberger, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*, 1. Aufl., Springer, 1997 (siehe S. 4).
- [7] K. Wille, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, 2. Aufl., Teubner, 1996 (siehe S. 5, 9).
- [8] P. Hauer, *Ansteuerung und Strahldiagnose des Laborbeschleunigers LAB*, Bachelorarbeit: Universität Bonn, 2015 (siehe S. 5).
- [9] Y. Dieter, *Magneto-optik des Laborbeschleunigers LAB*, Bachelorarbeit: Universität Bonn, 2015 (siehe S. 5).
- [10] T. vom Hövel, *Aufbau, Untersuchung und Inbetriebnahme einer Elektronenquelle für den Laborbeschleuniger LAB*, Bachelorarbeit: Universität Bonn, 2015 (siehe S. 6, 10, 15).
- [11] D. Heiliger, *Die Erzeugung eines spinpolarisierten Elektronenstrahls für die Beschleunigeranlage ELSA*, Diplomarbeit, Universität Bonn, 2009 (siehe S. 10).
- [12] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fassò, J. Ranft, O. Européenne, P. La, R. Nucléaire, A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fassò und J. Ranft, „FLUKA: a multi-particle transport code“, *CERN 2005-10 (2005)*, *INFN/TC 05/11*, *SLAC-R-773* (siehe S. 13).
- [13] N. Heurich, Dissertation in Vorbereitung: Universität Bonn, 2016 (siehe S. 13).
- [14] E. Samal und W. Becker, *Grundriss der praktischen Regelungstechnik: mit 32 Tabellen*, Oldenbourg, 2004, ISBN: 9783486275834, URL: <https://books.google.de/books?id=e7J9w1Cn1f8C> (siehe S. 17).
- [15] O. W. Richardson, *Thermionic phenomena and the laws which govern them*, Nobelpreisrede, 1929, URL: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1928/richardson-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1928/richardson-lecture.pdf) (besucht am 28.09.2016) (siehe S. 22).
- [16] L. Bergmann, W. Raith und C. Schaefer, *Elektromagnetismus*, Lehrbuch der Experimentalphysik, de Gruyter, 2006, ISBN: 9783110188981, URL: <https://books.google.de/books?id=-2klXyBVFawC> (siehe S. 22).

- [17] F. Frommberger, Universität Bonn, ELSA, 2016 (siehe S. 23).



# Platinenentwürfe und Kalibrierungsdaten

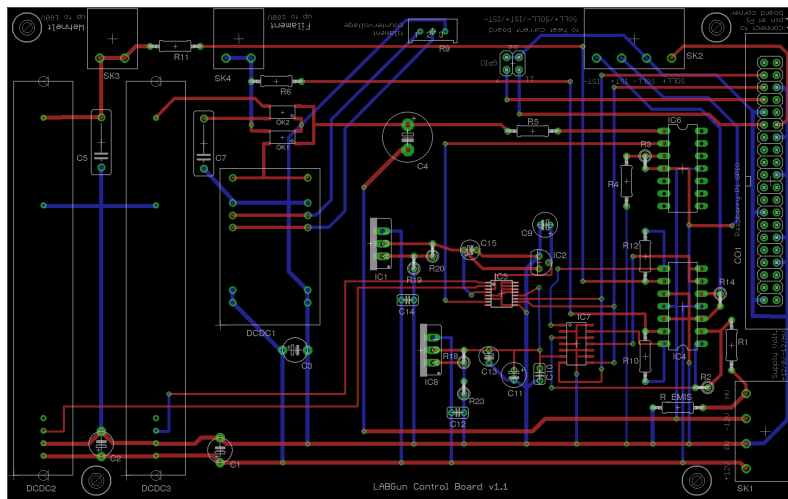


Abbildung A.1: Platinenentwurf der Steuerplatine

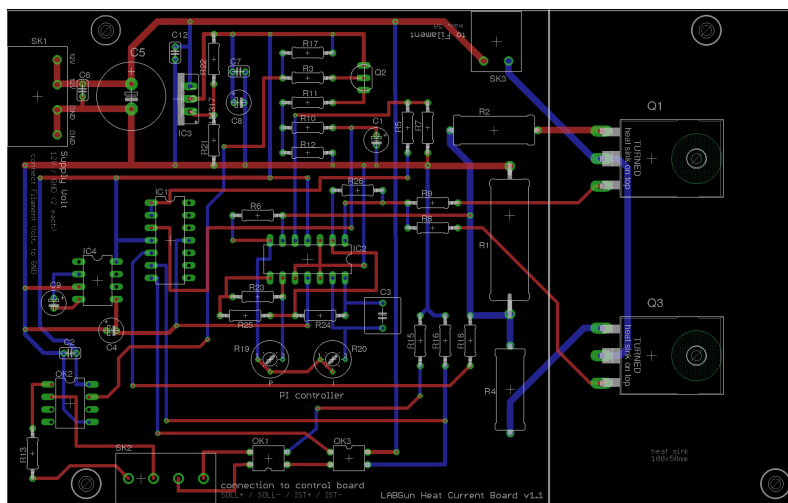
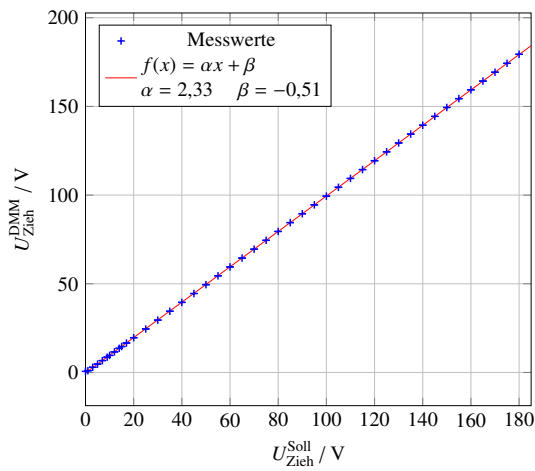
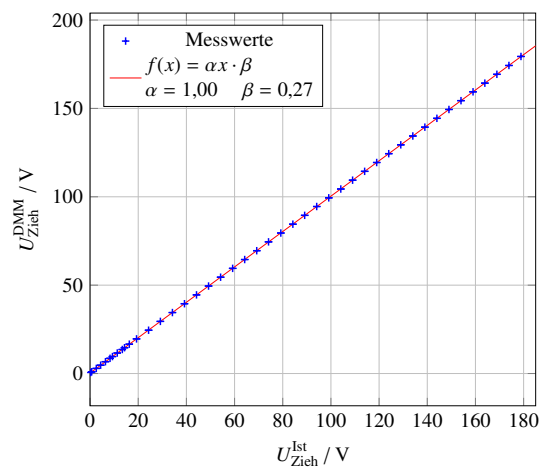


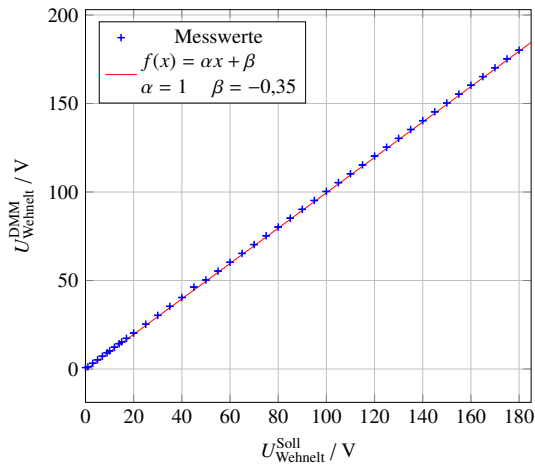
Abbildung A.2: Platinenentwurf der Heizplatine



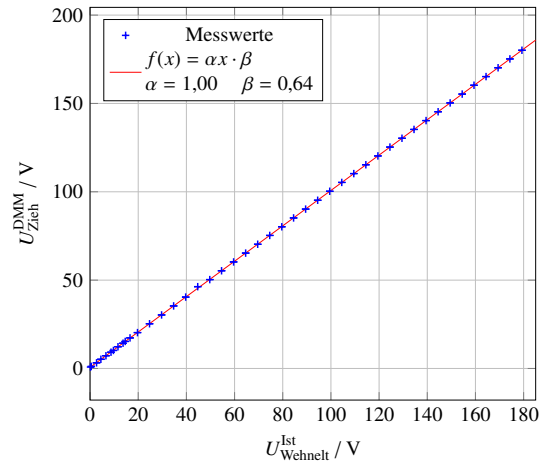
(a) Kalibrierungsdaten Ziehspannung Soll



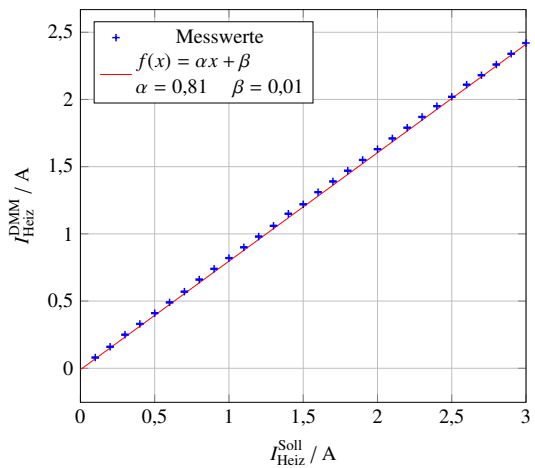
(a) Kalibrierungsdaten Ziehspannung Ist



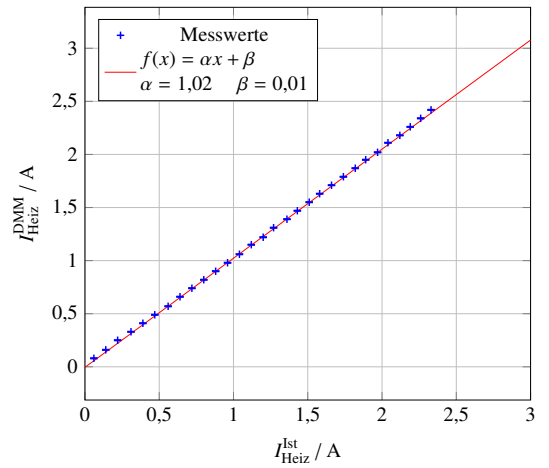
(b) Kalibrierungsdaten Wehneltspannung Soll



(b) Kalibrierungsdaten Wehneltspannung Ist



(c) Kalibrierungsdaten Heizstrom Soll



(c) Kalibrierungsdaten Heizstrom Ist

Abbildung A.3: Kalibrierungsdaten der Soll-Werte

Abbildung A.4: Kalibrierungsdaten der Ist-Werte

# Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Schematischer Aufbau des Laborbeschleunigers LAB. Die Module sind durch rote, gestrichelte Linien abgetrennt. [4]	4
2.2	Ein 3D-Modell des Beschleunigers LAB.	4
2.3	An LAB verwendete Magnete [5]	5
2.4	Technische Zeichnung der Kathode der Elektronenquelle. Alle Längenbemaßungen sind in der Einheit Millimeter angegeben [5].	6
2.5	Prinzipskizze der Elektronenquelle	7
2.6	Ein Foto des isolierten Turms. Der innere Kasten und sämtliche, darin aufgebaute Steuerelektronik liegt auf negativem Hochspannungspotential. Das abgebildete Gestell wird durch Plexiglasplatten zu allen Seiten geschlossen. Die Hochspannung ist dadurch nicht versehentlich zugänglich.	7
3.1	Abhängigkeit des Stroms von der anliegenden Hochspannung. [7]	9
3.2	Strommessung mit dem ins Hochspannungsnetzgerät integrierten Widerstand und dem KEITHLEY Messgerät. Daneben das dazugehörige Messergebnis.	10
3.3	Strommessung zwischen Turm und Kathode mit Digitalmultimeter in hochspannungsfestem Gehäuse und das dazugehörige Messergebnis.	11
3.4	Messung des Filamentwiderstands und der zeitlichen Entwicklung beim Aufheizvorgang	12
3.5	Simulation der Fluenz durch das Strahlrohr in Abhängigkeit der Energie. [13]	13
4.1	Prinzipskizze zur Ansteuerung der Elektronenquelle und den jeweiligen Bezugspotentialen	15
4.2	Flussdiagramm zur Verdeutlichung des Steuerablaufs für Spannungen	16
4.3	Schaltplan der Steuerplatine	18
4.4	Schaltplan der Heizplatine	19
4.5	Ein Foto der fertig bestückten Platinen. Die untere Platine ist die Steuerplatine. Zu erkennen sind unten links die DC/DC Wandler. Die obere Platine ist die Heizplatine. Zu erkennen ist der Kühlkörper, der auf die Transistoren montiert wurde.	20
5.1	Messung des Emissionsstroms in Abhängigkeit des Heizstroms.	21
5.2	Strahlfleck auf Schirm 1 bei 2,8 A Heizstrom und 30 V Ziehspannung. Die Strahlbreiten $\sigma_x$ und $\sigma_z$ sind in Milimeter angegeben	23
5.3	Strahlfleck bei 2,8 A Heizstrom und unterschiedlichen Ziehspannungen. Die Strahlbreiten sind in Milimeter angegeben	24
A.1	Platinentwurf der Steuerplatine	29
A.2	Platinentwurf der Heizplatine	29
A.3	Kalibrierungsdaten der Soll-Werte	30
A.4	Kalibrierungsdaten der Ist-Werte	30



# Danksagung

---

*Mein Dank geht an Priv.- Doz. Wolfgang Hillert, dafür, dass ich die Bachelorarbeit in seiner Arbeitsgruppe schreiben durfte.*

*Ich bedanke mich sehr bei Jan Schmidt für die äußerst kompetente und engagierte Betreuung und das Korrekturlesen.*

*Ebenfalls für das Korrekturlesen bedanke ich mich bei Dennis Proft und Nikolas Heurich.*

*Ich freue mich, wenn meine Bachelorarbeit zum zukünftigen Praktikumsbetrieb von LAB beigetragen hat.*