

Bachelorarbeit

„Tests und Simulationen zur Plasmazelle bei PITZ“

Vorbereitungen zur Inbetriebnahme der Plasmazelle und Simulationen zur
Streuung des Elektronenstrahls in der Plasmazelle

Hochschule: Technische Hochschule Wildau (FH)
Praktikumsbetrieb: DESY-Zeuthen
Fachbereich: Ingenieur- und Naturwissenschaften
Bachelor-Studiengang: Physikalische Technik
Semester: Sommersemester 2014
(6. Semester)

Zeitraum d. Arbeit: 07.04.14 bis 21.07.14
Abgabedatum: 21.07.14

Dozent: Dipl.-Phys. Harald Beyer
Betrieblicher Betreuer: Dr.-Ing. Matthias Groß

Teilnehmer: Rico Schütze (Matrikelnr.: 112240082)



Bibliografische Beschreibung und Referat

Rico Schütze

Tests und Simulationen zur Plasmazelle bei PITZ

Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau (FH), 27 Seiten, 27 Abbildungen, 10 Quellenangaben

Zielsetzung:

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es Vorarbeiten an einer Plasmazelle zu leisten, mit der Experimente zur Plasmabeschleunigung mit dem Prinzip der Selbstmodulation durchgeführt werden sollen. Die Plasmazelle wird in der Beschleunigerstrecke der Arbeitsgruppe PITZ, die zum Institut DESY-Zeuthen gehört, integriert.

Inhalt:

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine Beschreibung und Auswertung der vorgenommenen Arbeiten. Außerdem umfasst sie theoretische Grundlage und weitere Hintergrundinformationen, welche zum Verständnis und zur Nachvollziehbarkeit der behandelten Schwerpunkte von Nöten sind.

- Entwicklung einer Anordnung von Drahtgeflecht zur Auskleidung der Plasmazelle
- Anfertigen eines Modells der Plasmazelle
- Einpassen der Entwürfe aus Drahtgeflecht in Plasmazellenmodell
- Aufbau eines Teststandes für Heizversuche mit der Plasmazelle
- Charakterisierung des Heizverhaltens der Plasmazelle
- Aufnahme eines Temperaturprofils im Inneren der Plasmazelle
- Simulationen zur Streuung von Elektronen an dünnen Folien bzw. eventuellen Elektronenfenstern
- Vergleich der Simulationsergebnisse mit anderen Vorhersagemodellen und Messungen
- Aussprechen einer Empfehlung zur Beschaffenheit einer Folie, die sich als Elektronenfenster für die Plasmazelle eignet

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Datum/Unterschrift:

Abstract

Die am DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron), Standort Zeuthen, bei der Gruppe PITZ (Photoinjektor Teststand Zeuthen) entwickelte Plasmazelle soll nach ihrer Inbetriebnahme für Experimente zur Plasmabeschleunigung dienen. Genutzt wird dazu ein Lithiumplasma. Diese Bachelorarbeit umfasst eine Konstruktionsmöglichkeit einer Anordnung aus Drahtgeflecht, welches zur Aufrechterhaltung eines Kreislaufs von verdampftem und flüssigem Lithium dient. Des Weiteren enthält sie eine Charakterisierung des Heizverhaltens, des inneren Temperaturprofils und der verbauten Heizelemente der Anlage. Abschließend beinhaltet sie eine Betrachtung geeigneter Fenster zum Einkoppeln eines Elektronenstrahls mit 23MeV in die Plasmazelle, in Bezug auf geeignete Materialien und Foliendicken.

The plasma cell which was developed at DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron), location Zeuthen, in the working group PITZ (Photoinjektor Test Facility Zeuthen) was made for experiments of plasma acceleration. This bachelor thesis gives an example how to construct an arrangement of wire mesh, which is used to keep a permanent circulation of vaporized and liquid Lithium. It also contains a characterization of heating performance and temperature profiles of both, the cell interior and the heating elements, which are integrated into the plasma cell. In the end it comprises a consideration of windows, which are used to couple in an electron beam with a kinetic energy of 23MeV in relation to window thickness and suitable materials.

Formelzeichen

| Größe | Formelzeichen | Einheit |
|----------------------------|------------------|----------|
| Temperatur | T | °C |
| Elektrische Leistung | P | W |
| Kinetische Teilchenenergie | E_{kin} | eV |
| Druck | P | mbar |
| Elektrische Spannung | U | V |
| Elektrischer Strom | I | A |
| Elektrischer Widerstand | R | Ω |
| Divergenz | θ | mrad |
| Strahlungslänge | X_0 | cm |
| Kernladungszahl | Z | |

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Theoretische Grundlagen
3. Aufbau und Funktionsweise der Plasmazelle
4. Konstruktion des Drahtgeflechts
 - 4.1. Aufbau des Plasmazellenmodells
 - 4.2. Entwürfe des Drahtgeflechts
5. Vorbereitungen zur Inbetriebnahme der Plasmazelle
 - 5.1. Aufbau des Teststands
 - 5.2. Temperaturmessungen an der Plasmazelle
 - 5.2.1. Aufheizen der Anlage
 - 5.2.2. Temperaturprofil der Anlage
6. Simulationen zur Streuung des Elektronenstrahls an den Plasmafenstern
 - 6.1. Simulationsergebnisse
 - 6.2. Vergleich der Simulationsergebnisse mit Vorbetrachtungen
7. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung

Das DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) besitzt zwei Standorte. Einer der Standorte befindet sich in Hamburg. Dort beschäftigt man sich unter anderem mit der Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung, die zu Forschungszwecken eingesetzt werden soll [1 S.2]. Der zweite Standort befindet sich in Zeuthen. An diesem Standort ist die Arbeitsgruppe PITZ (Photoinjektor Teststand Zeuthen) tätig, deren Hauptaufgabe es ist, Elektronenquellen für die in Hamburg entwickelten Beschleuniger zu entwickeln, welche zur Erzeugung der hochenergetischen Röntgenstrahlung genutzt werden sollen. Der „Namensgeber“ der Arbeitsgruppe ist eine Beschleunigerstrecke, die hauptsächlich über Elemente zur Charakterisierung des in der Elektronenquelle erzeugten Strahls verfügt.

Die bei PITZ entwickelten Elektronenquellen kommen aktuell in Beschleunigern mit einigen Kilometern Länge zum Einsatz, die letztlich Elektronen mit mehreren GeV an kinetischer Energie erzeugen. Diese langen Wege sind nötig, da in heutigen Beschleunigern nur bis zu 100 MeV/m [4 S.2] an Beschleunigung geleistet werden können. In Experimenten am CERN wurde ein neues Prinzip der Teilchenbeschleunigung im sogenannten AWAKE-Experiment erstmals nachgewiesen [1 S.2]. Dieses neue Prinzip basiert auf der Beschleunigung von geladenen Teilchen in Plasmen und erreicht Beschleunigungsraten von bis zu 1 TeV/m [4 S.2]. Die höhere Beschleunigungsrate ermöglicht die Erzeugung von hochenergetischen Teilchen auf 10000-fach kürzeren Wegstrecken [4 S.2]. Das Prinzip der Plasmabeschleunigung beruht darauf, hochintensive Laserpulse oder Teilchenstrahlen einzusetzen, um extreme Ladungsdichtenmodulationen in Plasmen anzuregen, die zu Feldgradienten von über 100 GV/m führen [8]. In naher Zukunft sollen bei PITZ in dieser Beschleunigerstrecke Experimente zur Plasmabeschleunigung vorgenommen werden. Hierzu wurde eine Plasmazelle entwickelt, die ein Lithiumplasma erzeugt, womit das Prinzip der Selbstmodulation von Elektronenpaketen untersucht werden soll. Das Prinzip der Selbstmodulation im Bereich der Plasmabeschleunigung besteht darin, dass die Ladungsdichtenmodulationen von den zu beschleunigenden Teilchen selbst ausgelöst werden. Dazu sind hochkonzentrierte Pakete von geladenen Teilchen nötig (z.B. 10^9 Elektronen auf wenigen Mikrometern Länge) [8]. Diese hochkonzentrierten Ladungspakete erzeugen eine Art Bugwelle in Form einer Ladungsverschiebung im Plasma, die sie beschleunigt. Bevor die bei PITZ entwickelte Plasmazelle jedoch in Betrieb gehen kann, ist es notwendig, eine Vielzahl von Voruntersuchungen und Charakterisierungen zu Elementen der Zelle vorzunehmen.

Ziel dieser Arbeit ist es, zunächst einen Vorschlag zur Auskleidung der Plasmazelle mit einem Drahtgeflecht, das zur Aufrechterhaltung eines Lithiumkreislaufs benötigt wird, zu geben. Außerdem sollen in Experimenten die Heizelemente und das Aufheizverhalten der Plasmazelle charakterisiert und gegebenenfalls Vorschläge zur Optimierung der Anlage gegeben werden. Abschließend soll noch eine Betrachtung folgen, die Vorschläge für geeignete Materialien und Dicken für Elektronenfenster zum Einkoppeln des Elektronenstrahls aus der Beschleunigerstrecke in die Plasmazelle gibt sowie ein Vergleich zwischen der Abschätzung durch eine Formel und der Monte-Carlo-Methode anhand von vorangegangenen Messungen zur Streuung von Elektronen an dünnen Folien.

2. Theoretische Grundlagen

Beim Durchgang von Teilchen durch Materie werden diese in der Regel vielfach an den Atomen der Materieschicht gestreut ($>20\times$ [2 S.134]). An dieser Stelle spricht man von Vielfachstreuung bzw. Molière-Streuung. Vielfachstreuung erzeugt ein gaußförmiges Streumuster mit einem RMS Öffnungswinkel von

$$\theta_{rms} = \frac{13.6MeV}{\beta pc} Z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0,038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right) \right].$$

Formel 1 – Streuwinkel bei Vielfachstreuung

θ_{rms} drückt dabei den Streuwinkel in rad und somit die Divergenz des Teilchenstrahls aus. Der RMS (Root Mean Square) ist dabei die Standardabweichung der Gaußfunktion. Das Produkt βpc gibt den Impuls des Teilchens in eV/c an. Der Faktor Z steht für die Ladung des Teilchens. Die Größe x bezeichnet die Dicke der Materieschicht und X_0 die Strahlungslänge des Materials.

Die Strahlungslänge beschreibt für hochenergetische Elektronen die Strecke, auf der die mittlere Energie der Elektronen auf $1/e$ gefallen ist [10]. Da ein höherer Energieverlust auf kürzeren Strecken auf stärkere Wechselwirkungen zurückzuführen ist, stehen kleine Strahlungslängen für starke Wechselwirkungen im Material.

Bei sehr dünnen Schichten ist es möglich, dass innerhalb der Materieschicht weniger als 20 Streuprozesse stattfinden. In diesen Fällen sind Gesetzmäßigkeiten der Statistik nicht mehr anwendbar. In diesen Bereichen verliert Formel 1 ihre Gültigkeit. Vorangegangene Arbeiten zur Streuung von Elektronen an sehr dünnen Schichten zeigen bereits, dass bei Schichten die ca. 10^{-4} Strahlungslängen dick sind, eine Abweichung von der Theorie nach Molière vorliegt [3 S.27].

Eine Möglichkeit in diesen Fällen das Streuverhalten eines Teilchenstrahls vorherzusagen sind Monte-Carlo-Simulationen. Diese basieren auf sehr häufig durchgeführten Zufallsexperimenten [7]. Es wird aufgrund der Ergebnisse versucht, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie analytisch unlösbare Probleme im mathematischen Kontext numerisch zu lösen[7]. So kann über eine Monte-Carlo-Simulation beispielweise die Zahl π bestimmt werden. Hierzu wird ein Kreis in ein Rechteck gelegt und anschließend werden zufällig Punkte in die Kreisfläche und die übrige Rechteckfläche gelegt (siehe Abb. 1). Durch das Verhältnis der Anzahl an Punkten, die innerhalb des Kreises liegen, und der gesamten Anzahl an Punkten, kann π ermittelt werden. Wie genau das Simulationsergebnis der Realität entspricht, liegt daran wie viele Punkte insgesamt gesetzt wurden bzw. wie hoch die aufgenommene Statistik zu diesem Sachverhalt ist.

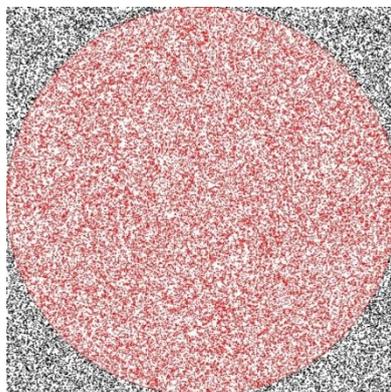


Abbildung 1 – Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Kreiszahl π [7]

3. Aufbau und Funktionsweise der Plasmazelle

Die Plasmazelle bei PITZ soll für Experimente zur Plasmabeschleunigung von Elektronen dienen. Hierzu soll Lithiumdampf mit einer Teilchendichte von 10^{16} Teilchen pro cm^3 erzeugt werden, welcher dann zu 10% ionisiert wird [1 S.4]. Die Ionisierung des Lithiumgases erfolgt durch einen Excimerlaser. Der Laser dient jedoch nur zum Zünden des Plasmas und nicht der eigentlichen Plasmabeschleunigung. Die Plasmabeschleunigung erfolgt durch Selbstmodulation der Elektronenpakete, die entlang der Strahlröhre durch das Plasma geschickt werden.

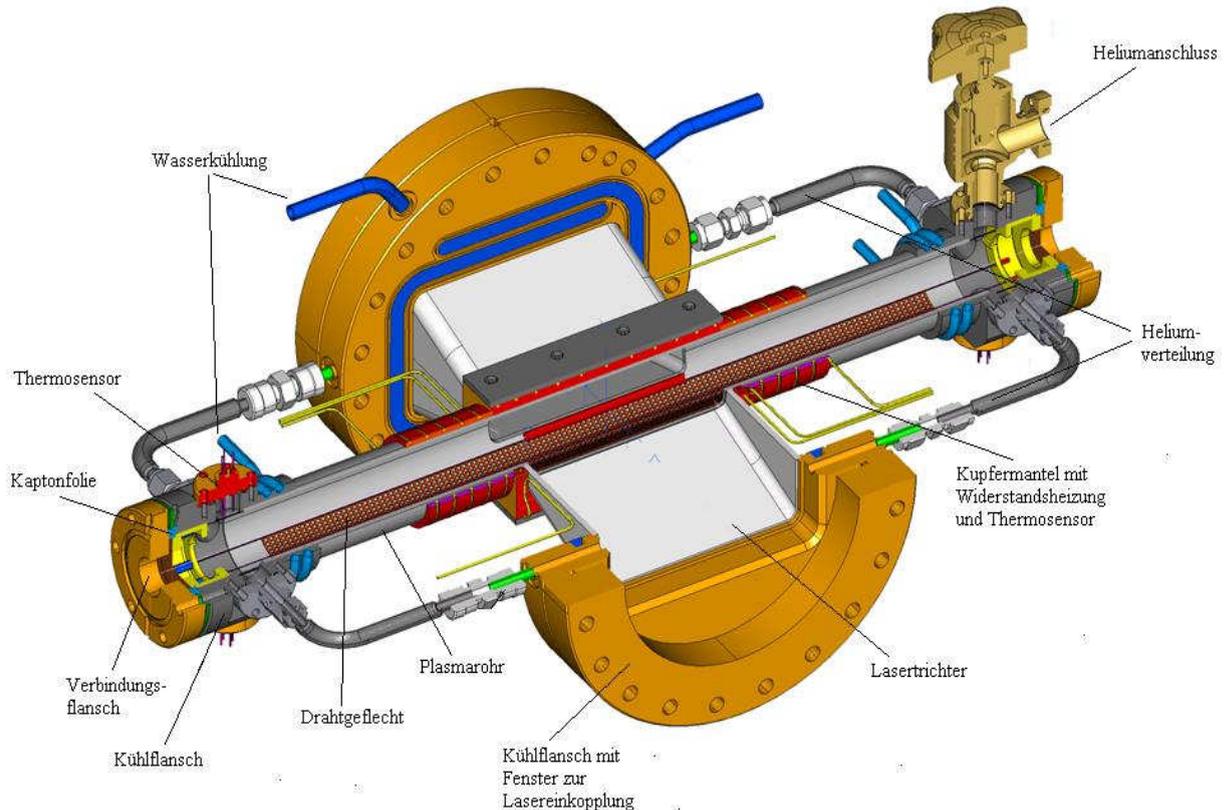


Abbildung 2 - Modell der PITZ Plasmazelle [1 S.41]

Die Plasmazelle besteht im Wesentlichen aus sieben Elementen. Das erste Element ist die Strahlröhre (siehe Abb. 2 „Plasmarohr“), in der nach Inbetriebnahme das Lithiumplasma brennen soll und Elektronenpakete beschleunigt werden. Die Strahlröhre der Plasmazelle hat eine Länge von 50cm. Sie hat einen Innendurchmesser von 36 mm, eine Wandstärke von 2mm und besteht aus 1.4835 Edelstahl [1 S.42]. Dieser Stahl ist hochtemperaturfest, ist in trockener Luft bis 1100°C zunderbeständig und austenitisch und somit unmagnetisch, was dem Beeinflussen des Elektronenstrahls durch eventuelle Magnetfelder im Material vorbeugt [1 S.42]. Auf den mittleren 30cm (siehe Abb. 2) der Zelle soll Lithiumdampf erzeugt werden, wie im Späteren ausgeführt.

Der zweite wesentliche Bestandteil sind die seitlich an der Strahlröhre angebrachten Lasertrichter (siehe Abb. 2 „Lasertrichter“). Diese seitlichen trichterförmigen Anbauten an die Strahlröhre dienen zum Einkoppeln des Excimerlasers, welcher das Lithium ionisiert. Die Trichter sind aus demselben Material wie die Strahlröhre gefertigt. Hierzu ist eine Aussparung von $113 \times 20 \text{mm}$ in der Strahlröhre vorhanden [1 S.42]. Die Trichter dienen zur Fokussierung des Lasers. Eine Fokussierung ist für den Excimerlaser zwar überflüssig, aber wäre für einen Ti:Saphir-Laser

benötigt worden, der alternativ für dieses Projekt vorgesehen war. Die Wellenlänge eines Ti:Saphir-Lasers wäre für eine Ionisation von Lithium zu groß (ca. 800nm), was eine im Gegensatz zum Excimerlaser, der Strahlung im UV-Bereich ($< 300\text{nm}$) aussendet, verhältnismäßig geringe Photonenenergie zur Folge hat. Das Ionisationsprinzip, das mit dem Ti:Saphir-Laser vorgesehen war, basiert darauf, starke elektrische Felder im Laserfeld zu erzeugen. Der Verzicht auf Fokussierung hätte eine zu starke Belastung für die Laserfenster bedeutet (siehe Abb. 2 Kühlflansch mit Fenster zur Lasereinkopplung).

Das dritte wichtige Element der Anlage ist die Heizung (siehe Abb. 2 „Kupfermantel mit Widerstandsheizung und Thermosensor“ und Abb. 3). Dieses Element sorgt auf den mittleren 30cm der Strahlröhre für die Erzeugung von Lithiumdampf, indem es diese Zone auf über 700°C erhitzt. Dieser Teil besteht aus zwei Formteilen aus Kupfer und insgesamt vier ohmschen Heizern. Die Kupferformteile dienen einer homogenen Wärmeleitung von den Heizdrähten zur Kammerwand. Bei den Heizern handelt es sich um einadrige Drähte mit echten kalten Enden. Für die kalten Enden ist ein geringerer Widerstand an den Enden der Drähte verantwortlich. Die Heizdrähte sind in zwei Paaren angeordnet. Eines der Paare ist als Heizspule um das rechte und das linke Ende der Kupferteile gewickelt (siehe Abb. 3). Die Drähte dieses Paares haben jeweils einen Außendurchmesser von 1,5mm und eine Länge von 150cm, wobei davon 70cm den Heizteil und zweimal 40cm die kalten Enden bilden. Der Heizteil hat einen Widerstand von $5,5 \Omega/\text{m}$ und der Kaltteil $0,3\Omega/\text{m}$. Die Drähte dieses Spulenpaares sind auf eine Betriebsspannung von maximal 30V und eine Leistung von höchstens 160W ausgelegt. Das zweite der Paare ist mäanderförmig an dem mittleren quaderförmigen Teil der Kupferteile angebracht (siehe Abb. 3). Hierbei liegt jeweils einer der Drähte am oberen und am unteren Teil der Kupferteile an. Diese Drähte sind jeweils 156cm lang, wobei 56cm den Heizteil und zweimal 50cm die Kaltteile bilden. Der Widerstand des Heizteils beträgt $7,0\Omega/\text{m}$ und der der Kaltteile $0,15\Omega/\text{m}$. Die Heizelemente dieses Paares sind zudem auf eine maximale Leistung von 230W und eine maximale Spannung von 30V ausgelegt. Alle Heizdrähte können bei Temperaturen zwischen -200°C und 800°C betrieben werden. Des Weiteren sind in diesem Bereich drei Thermosensoren angebracht, welche die Temperatur an den Heizelementen messen. Zwei der Thermosensoren sind jeweils am rechten und linken runden Teil der Kupferteile und der verbleibende Sensor in der Mitte angebracht.

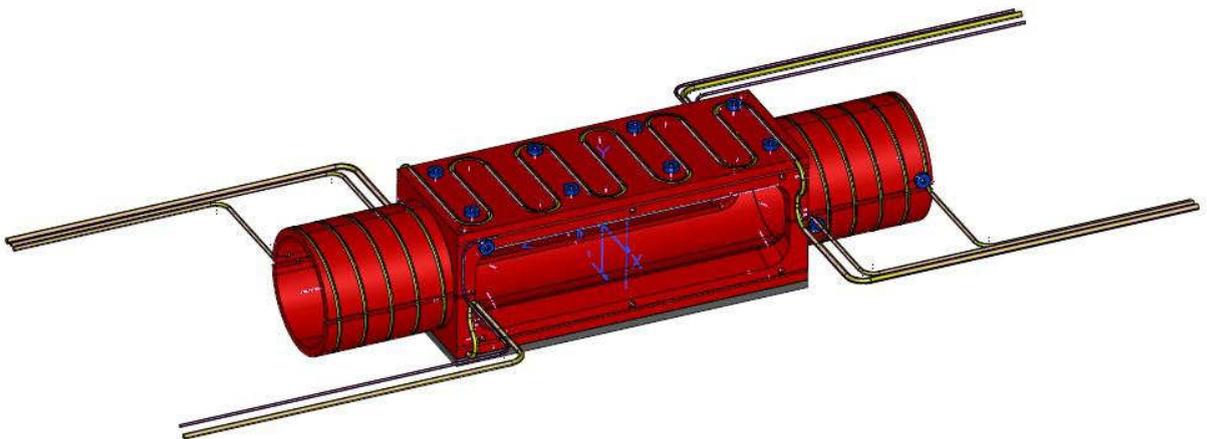


Abbildung 3 - Heizdrahtanordnung mit Kupferformteilen [1 S.46]

Den vierten der sieben wesentlichen Bestandteile der Plasmazelle macht ein Rohrsystem aus, das an den Flanschen Helium in die Anlage leitet (siehe Abb. 2 „Heliumverteilung“ und „Heliumanschluss“). Diese Anordnung sorgt dafür, dass sich Heliumpuffer vor den Flanschen

ausbilden, die das Plasma bzw. den Lithiumdampf räumlich begrenzen. Vorgesehen ist, dass der Lithiumdampf in den Heliumpuffern kondensiert und anschließend in flüssiger Form über ein Drahtgeflecht zu den Heizelementen zurückgeleitet wird. Darauf wird im Anschluss noch genauer eingegangen. Das Helium soll dabei zusätzlich ca. Raumtemperatur aufweisen, um einen steilen Temperaturgradienten und somit ein ebenso starkes Konzentrationsgefälle des Lithiums in den Heliumzonen zu erreichen (Abb. 4).

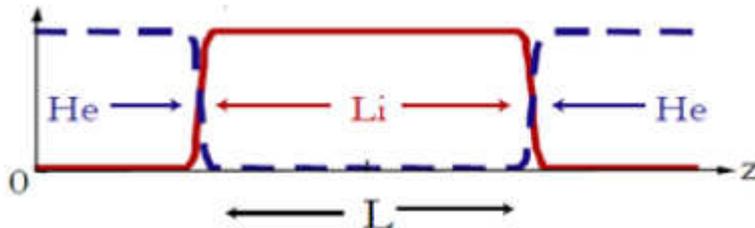


Abbildung 4 – Konzentrationsverteilung innerhalb der Plasmazelle [1 S.5]

Einen weiteren Teil der Anlage bildet ein Drahtgeflecht, das im Inneren der Anlage ausgelegt ist (siehe Abbildung 2 „Drahtgeflecht“). Sein Zweck besteht darin, kondensiertes Lithium zurück zu den Heizelementen zu leiten, wo es erneut verdampft werden kann. Der Fluss des flüssigen Lithiums wird durch Kapillarkräfte im Gitter hervorgerufen, die von den Seiten der Anlage zur Mitte hin auftreten. Da in der Mitte der Plasmazelle kontinuierlich Lithium verdampft wird, entsteht gegenüber den Seiten an denen das Lithium kondensiert ein Konzentrationsgefälle, was die zur Mitte gerichteten Kapillarkräfte hervorruft. Ursprünglich war ausschließlich eine Auskleidung der Strahlröhre auf den mittleren 30cm mit Drahtgeflecht vorgesehen (siehe Abb. 2 „Drahtgeflecht“). Im Verlauf dieser Arbeit wird ein alternativer Vorschlag zur Auskleidung der Plasmazelle mit Drahtgeflecht unterbreitet (siehe 4.2).

Zur Kühlung der Flansche und um die Heliumpuffer so kalt wie möglich zu halten, ist in der Anlage zusätzlich ein Rohrleitungssystem für eine Wasserkühlung installiert (siehe Abb. 2 „Wasserkühlung“). Das Rohrsystem ist in die Flansche der Laserfenster integriert und ist zusätzlich durch Kühlmanschetten am rechten und am linken Ende des Plasmarohrs gezogen.

Das letzte wichtige Element der Plasmazelle bilden die Fenster durch die der Elektronenstrahl in die Plasmazelle eingekoppelt wird (siehe Abb.2 „Kaptonfolie“). Ursprünglich waren für diese Fenster 50µm dicke Kaptonfolien vorgesehen. Diese Folien erwiesen sich jedoch als ungeeignet. Auf diesen Sachverhalt wird in Kapitel 6 noch detaillierter eingegangen.

4. Konstruktion des Drahtgeflechts

4.1 Aufbau des Plasmazellenmodells

Das Modell der Plasmazelle besteht aus zwei Hälften eines Rohrs (Abb. 5 oben) mit Aussparungen und zwei Hälften eines Trichters, welcher zum Einkoppeln des Lasers in die Plasmazelle verwendet wird (Abb. 5 unten). Die Rohrteile besitzen vorn und hinten eine Aussparung. Setzt man die beiden Rohrteile zusammen, kann man vorn und hinten jeweils einen Trichter bestehend aus zwei Trichterhälften ansetzen.

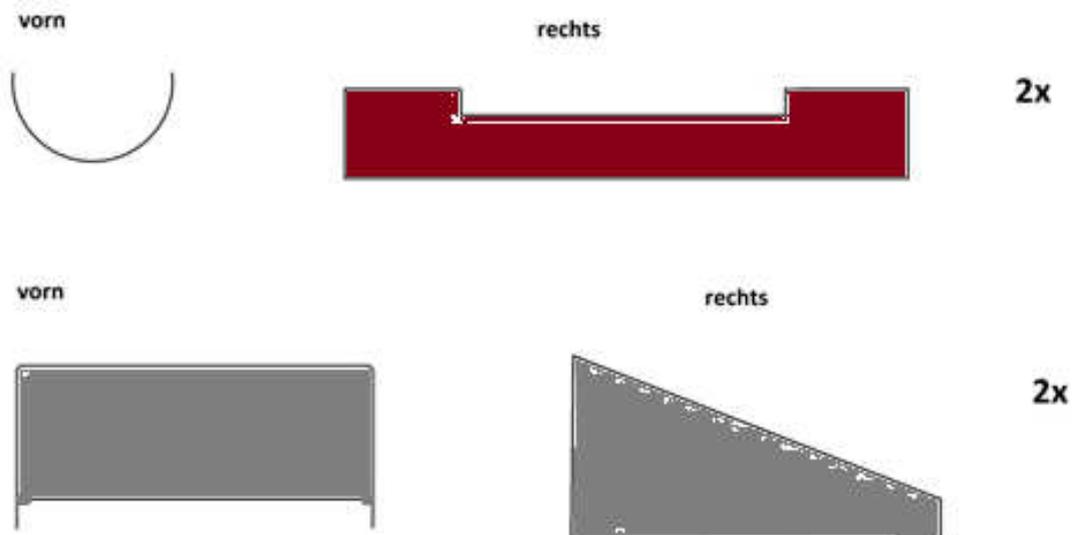


Abbildung 5 – Teile für Plasmazellenmodell

Aus diesen Teilen wurde unter Zuhilfenahme von Gewebeklebeband ein Modell der Plasmazelle gefertigt (Abb. 6), welches annäherungsweise dieselben Innenmaße aufweist wie die Plasmazelle und somit dem Zweck entspricht. Da der Aufbau der Plasmazelle symmetrisch ist, war es ausreichend das Modell mit einem statt zwei Trichtern anzufertigen. Letztlich stellte das Modell einen Ausschnitt der zentralen Elemente der Plasmazelle, bestehend aus einem 30cm langen Teil der Strahlröhre mit Aussparungen, an denen auf einer Seite ein Trichter mit den Originalmaßen der Trichter, die in der Anlage verbaut sind, dar.

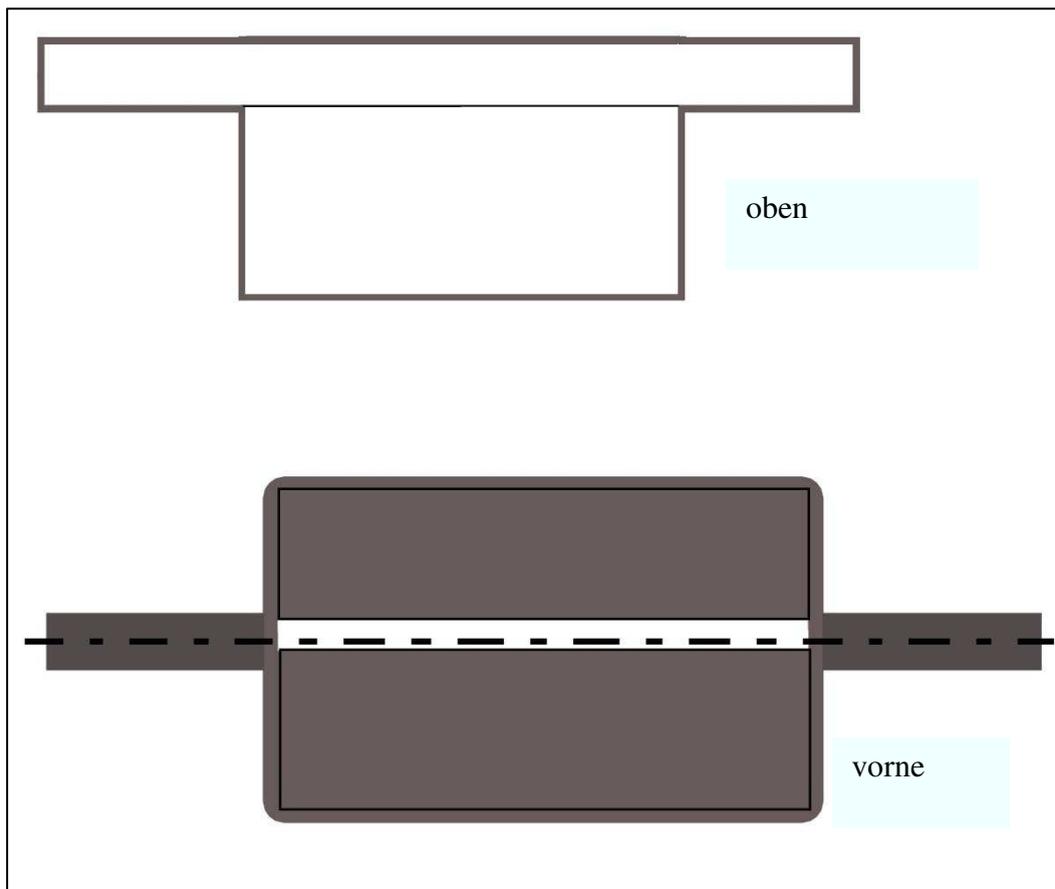


Abbildung 6 – Schema des Plasmazellen Modells

Um eine höhere mechanische Stabilität des Modells zu erreichen, wurden kleine Streifen aus Drahtgeflecht unter die Klebestreifen gelegt. Die durch diese Streifen hervorgerufenen Erhebungen sorgten im Nachhinein für ein erschwertes Auskleiden des Modells mit dem Drahtgeflecht, was allerdings keinen Einfluss auf das endgültige Einpassen der Konstruktion in die Plasmazelle hatte. Mit Hilfe dieses Modells wurde eine Anordnung von Teilen aus Drahtgeflecht entwickelt, welche letztlich erfolgreich in das Modell eingepasst werden konnte und in naher Zukunft in die Plasmazelle selbst eingepasst werden wird.

4.2 Entwürfe des Drahtgeflechts

Zur Entwicklung eines geeigneten Entwurfs zur Auskleidung der Plasmazelle mit Drahtgeflecht standen drei verschiedene Geflechte mit quadratischen Maschen zur Auswahl. Die verschiedenen Typen besitzen verschiedene Maschenbreiten und Drahtdurchmesser (Abb. 7), welche in Tabelle 1 aufgeführt sind. Im Vergleich zueinander ist die Steifigkeit von Typ I die kleinste und die von Typ III die größte. Da frühere Arbeiten zu Schmelzversuchen mit Lithium [1 S.10 ff] gezeigt haben, dass in Typ I trotz seiner in Relation zu den anderen Typen großen Maschen ausreichend starke Kapillarkräfte herrschen, um die Lithiumschmelze homogen in seinen Maschen zu verteilen und während des Einpassens des Drahtgeflechts in das Modell festgestellt wurde, dass eine geringere Steifigkeit hier von Vorteil ist, ist Typ I zur Fertigung der inneren Auskleidung ausgewählt worden.

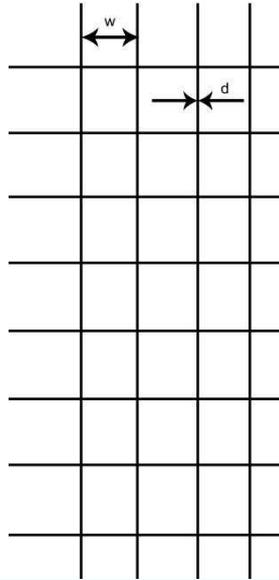


Abbildung 7 – Schema eines Drahtgeflechts

Tabelle 1 – Daten zu verschiedenen Drahtgeflechten

| | Typ I | Typ II | Typ III |
|----------------------------|-------|--------|---------|
| Maschenbreite w [mm] | 0,71 | 0,63 | 0,50 |
| Drahtdurchmesser d [mm] | 0,28 | 0,25 | 0,32 |

Die Idee für den ersten Entwurf bestand darin, zwei identische Teile zu fertigen, welche oben und unten in die Plasmazelle eingelegt werden (Abb. 8). Die „Flügel“ sollten hierbei einen Teil der Trichter auskleiden und das schmale Mittelstück eine Hälfte des Rohrs. Die Breiten der Flächen sind so dimensioniert, dass die Gitter der oberen und unteren Hälfte sich um 1cm überlappen und somit ein Übergang für das im Gitter fließende Lithium geschaffen wird. Der Vorteil dieses Entwurfs liegt darin, dass das Gitter an den Kanten, welche an den Übergängen der Trichter zu dem Rohr vorhanden sind, geschlossen sind und somit eine gute Aufrechterhaltung der Kapillarkräfte an den Kanten gewährleistet ist. Der Nachteil dieses Entwurfs liegt darin, dass es sehr kompliziert ist, die Teile in die Kammer einzubringen, da die Trichterauskleidungen zusammengerollt durch eine Öffnung des Rohrs eingeführt werden müssen und anschließend aus der gerollten Position in die Trichter entfaltet werden müssten, was aufgrund des geringen Platzes wenn überhaupt dann nur mit sehr hohem Aufwand möglich wäre.

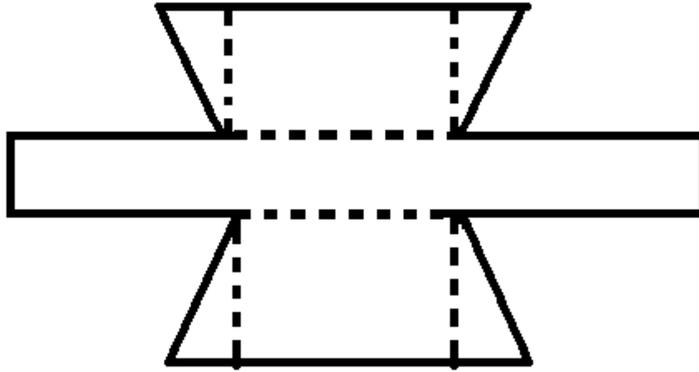


Abbildung 8 – Erster Entwurf zur Auskleidung der Plasmazelle (Skizze)

Der zweite Entwurf sieht eine Anordnung von fünf Teilen vor (Abb. 9 (1x) und 10 (4x)). Die Strahlröhre wird mit einem Teil ausgelegt und in die Trichter wird jeweils oben und unten eines der vier Teile eingelegt. Der Rohling der Auskleidung für die Strahlröhre (Abb. 9) mit den Maßen $L_R = 400\text{mm}$ und $B = 123\text{mm}$ ist so dimensioniert, dass das Drahtgeflecht jeweils 5cm in die Helium-Zone hinein reicht, um Lithium, was erst innerhalb der Helium-Zone kondensiert, aufzufangen. Zudem ist die Breite B des Rohlings so gewählt, dass das Drahtgeflecht den Umfang der Strahlröhre abdeckt ($u_{\text{Röhre}} \approx 113\text{ mm}$) und sich über 1cm im Umfang überlappt. Die Auskleidung der Strahlröhre besitzt darüber hinaus Aussparungen an den Stellen, an denen die Trichter ansetzen. Jedoch werden diese Aussparungen nicht ausgeschnitten, sondern sind als eine Anordnung von Laschen entworfen. Durch den symmetrischen Aufbau der Anlage haben die Laschen an beiden Aussparungen die gleichen Maße. Es ist angedacht, dass diese Laschen ins Innere des Trichters umgeklappt werden. Die kleineren seitlichen Laschen mit den Maßen $H = 20\text{mm}$ und $S = 10\text{mm}$ werden dabei an die Seiten des Trichters gebogen. Die länglichen Laschen mit den Maßen $L_A = 93\text{mm}$ und $H_{1/2} = 10\text{mm}$ werden oben und unten in die Trichter hinein gebogen. Die Aussparungen der Rohrauskleidung haben einen Abstand von $A = 36,5\text{mm}$.

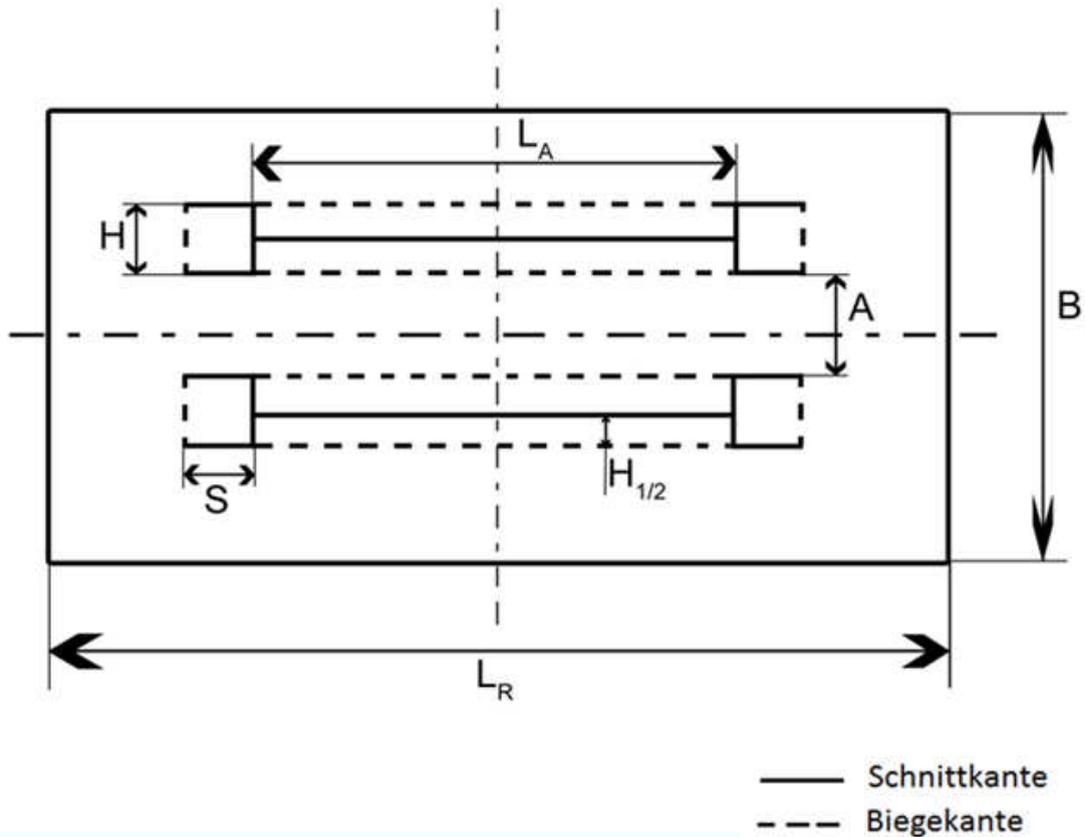
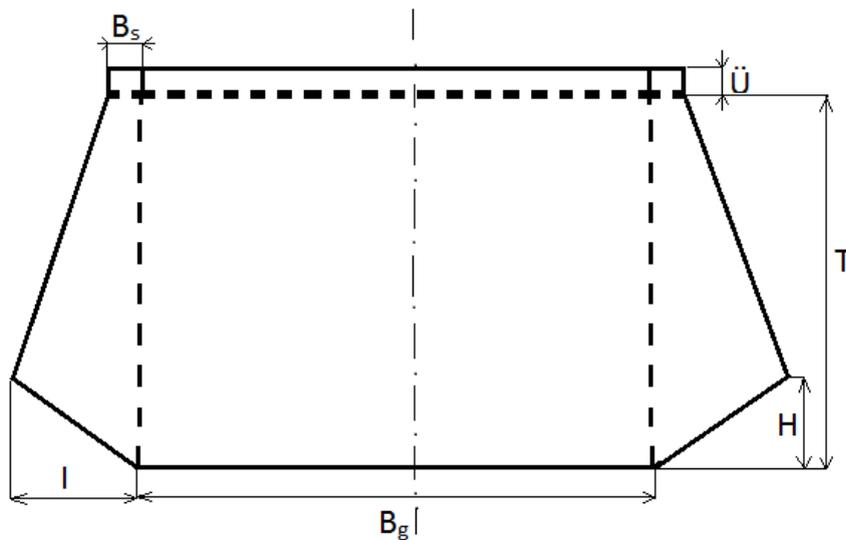


Abbildung 9 – Auskleidung der Strahlröhre (Skizze)

Die Auskleidung für die Trichter (Abb. 10) kann prinzipiell in drei Segmente geteilt werden. Das erste Segment mit den Maßen $T = 75\text{mm}$ und $B_g = 113\text{mm}$ bedeckt dabei je nach Position den oberen oder unteren Teil eines Trichters. Das zweite Segment der Auskleidung bilden die trapezförmigen „Flügel“ an den Seiten. Diese können wie folgt bemaßt werden $T = 75\text{mm}$, $B_s = 20\text{mm}$, $I = 39\text{mm}$ und $H = 10\text{mm}$. Dieses Segment bedeckt jeweils eine Hälfte der Seiten des Trichters und ist dabei so dimensioniert, dass es sich mit dem gegenüberliegenden Teil, der die andere Seite desselben Trichters auskleidet, ähnlich wie bei der Rohrauskleidung um 1cm überlappt. Das letzte der drei Segmente bilden Laschen die in die Strahlröhre hinein gebogen werden. Die Laschen haben eine Breite von $\ddot{U} = 10\text{mm}$. Die seitlichen Laschen haben die Länge $B_s = 20\text{mm}$ und die mittlere Lasche die Länge $B_g = 113\text{mm}$.



— Schnittkante
 - - - Biegekante

Abbildung 10 – Trichterauskleidung (Skizze)

Zusätzlich ist geplant, die Querdrähte an allen Laschen zu entfernen (Abb. 11 a)). Dies ermöglicht es, die Laschen ineinander zu schieben (Abb. 11 b)). Anschließend können Drähte der einzelnen Laschen umgebogen werden (Abb. 11 c)), sodass letztendlich die Laschen der einzelnen Teile ineinander verhakt sind (Abb. 11 d)).

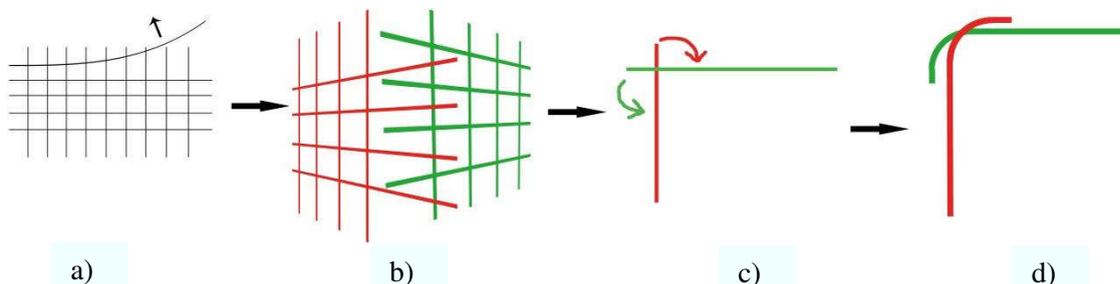


Abbildung 11- Schema zur Verbindung der Laschen von Trichter- und Strahlröhrenauskleidung

Ob die Kapillarkräfte zwischen den verhakten Drähten und die an den Schnittstellen der Einzelteile vorhandenen doppelten Lagen des Drahtgeflechts eine ausreichende Strömung von flüssigem Lithium ermöglichen, muss noch im Experiment gezeigt werden. Das Einpassen dieses Entwurfs in das Plasmazellenmodell ließ sich im Gegensatz zum ersten Entwurf relativ problemfrei realisieren. Spannungen im gebogenen Drahtgeflecht sorgen bei den Trichterauskleidungen für Wölbungen des Gitters, welche dafür sorgen, dass das Gitter nicht exakt an der Kammerwand anliegt (Abb. 12).

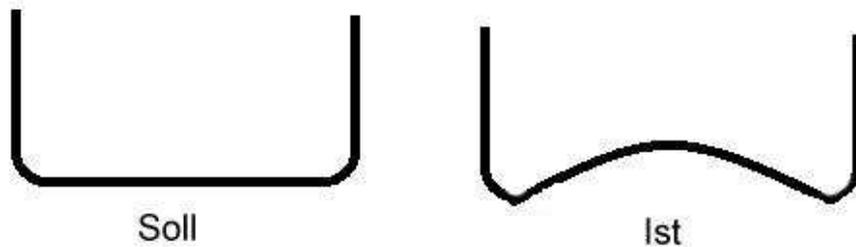


Abbildung 12 – Aufwölbung der Trichterauskleidung (Skizze)

Dieses Problem ließe sich jedoch sicherlich einfach durch das Einpassen eines O-förmigen Ringes, der das Gitter an die Kammerwand drückt (Abb. 13), in die Trichter lösen. Ein solcher Ring hat den Vorteil, dass er das Drahtgeflecht an die Kammerwand presst, ohne den Laser abzuschatten, der in der Mitte des Trichters über eine Länge von ca. 8cm eingekoppelt wird.

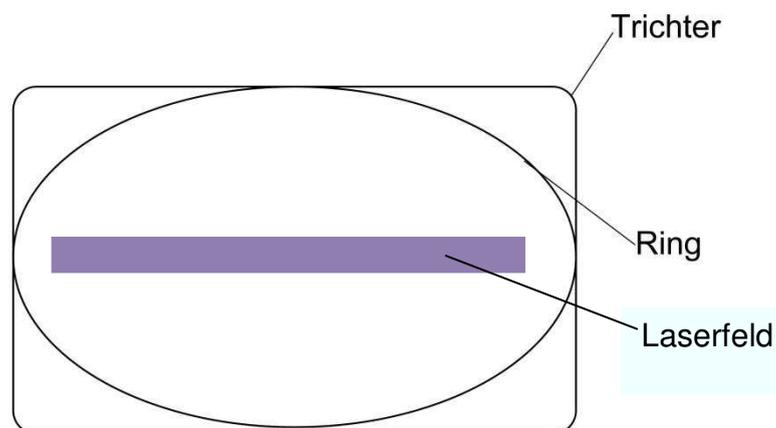
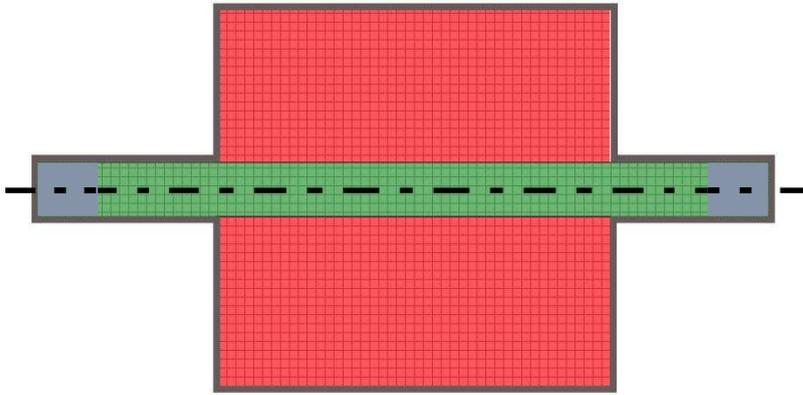


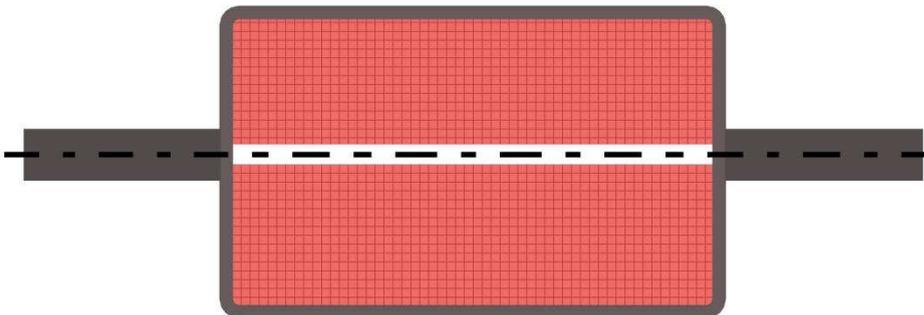
Abbildung 13 – Trichterauskleidung mit Ring zur Fixierung (Skizze)

Abbildung 14 zeigt ein Schema des eingepassten zweiten Entwurfs in die Plasmazelle. Die Trichterauskleidung ist im Folgenden rot und die Rohrauskleidung in grün dargestellt. Die Ansicht von oben zeigt eine Schnittdarstellung der Strahlröhre und der Trichter (Abb. 14 a)). Hier ist gut erkennbar, in welchen Bereichen das Drahtgeflecht in der Plasmazelle ausgelegt ist. Die Ansicht von vorne (Abb. 14 b)) zeigt die Aussparung, die in dem Bereich gelassen wurde, durch die später der Laser eingekoppelt werden soll, um das Lithiumplasma zu zünden. Abbildung 14 c) zeigt eine Ansicht von rechts, wobei die Auskleidung des Plasmarrohrs entlang des inneren Umfangs verdeutlicht wird.

a) oben (Schnittdarstellung)



b) vorne



c) rechts

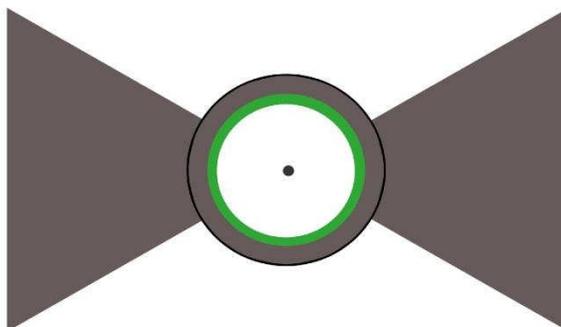


Abbildung 14 – Schema der Plasmazelle mit Drahtgeflecht

5. Vorbereitungen zur Inbetriebnahme der Plasmazelle

Bevor die Plasmazelle in die Beschleunigerstrecke von PITZ eingebaut werden kann, muss ihre Funktionalität in Bezug auf die Erzeugung eines stabilen Plasmas mit der benötigten Teilchendichte von 10^{16} Teilchen pro cm^3 , von denen 10% ionisiert werden [1 S.4], im Experiment überprüft werden. Hierzu ist im Rahmen dieser Arbeit der Aufbau eines entsprechenden Teststands zur Charakterisierung des Heizverhaltens und der Aufnahme eines Temperaturprofils über die Zelle vorgenommen worden. In naher Zukunft sind außerdem noch Experimente zum Lithiumkreislauf, Messungen zur Teilchendichte sowie Bestimmung und Einstellung der Plasmaparameter in der Zelle nötig.

5.1 Aufbau des Teststands

Die in Kapitel 3 erwähnten Heizelemente der Plasmazelle werden durch ein Labornetzteil der Firma Voltcraft vom Typ VSP betrieben (Abb. 15 „Labornetzteil“). Das Netzteil besitzt zwei Ausgänge für Gleichspannung mit jeweils 400W maximaler Leistung. Die Ausgänge sind zwischen 0V und 40V sowie 0A und 10A regelbar. Die beiden seitlich angebrachten Heizspulen und die beiden mittig installierten mäanderförmigen Heizdrähte sind jeweils in Reihe geschaltet an einen dieser Ausgänge angeschlossen (siehe Abb. 15 „Heizdrähte“).

Die ebenfalls in Kapitel 3 erwähnten Kühlelemente werden durch eine Wasserkühlung der Firma Thermo Scientific vom Typ Neslab ThermoFlex 1400 konstant auf einer Temperatur von 25°C gehalten (siehe Abb. 15 „Kühlung“).

Ferner ist an einem der Flansche, durch welche später der Laser in die Zelle eingekoppelt wird, eine Membranpumpe der Firma Pfeiffer vom Typ MUP 015-2 (Abb. 15 „Membranpumpe“) mit einem Enddruck von 2mbar und eine Vakuummessröhre der Firma Leybold (Abb. 15 „Messröhre“) verbaut. Ein Vakuum in der Anlage ist insofern wichtig, damit keine Wärmeleitung durch Gase im Inneren der Zelle stattfindet. Da der Druck, bei dem die Anlage letztendlich betrieben wird, im Bereich von 0,1 mbar liegt und in diesem Druckbereich keine Wärmeleitung stattfindet, wurde der Aufbau evakuiert. Würde während der Heiztests Wärmeleitung im Inneren der Zelle stattfinden, würde das das aufgenommene Temperaturprofil verfälschen.

Des Weiteren ist ein Gaseinlass für Argon (siehe Abb. 15 „Argon“) zum Spülen der Anlage und ein provisorisches Überdruckventil in Form eines losen „Vakuumdeckels“, welcher beim Spülen der Anlage den Aufbau von unnötigem Überdruck verhindert, installiert (siehe Abb. 15 „Deckel (Überdruckventil)“). Der Deckel wird während des Pumpprozesses mit einer Klammer (Abb. 16 a)) und beim Spülen (Abb. 16 b)) mit einem Streifen Klebeband befestigt.

Darüber hinaus befinden sich fünf Thermoelemente in diesem Aufbau. Drei dieser Thermoelemente sind fest an der Zelle in der Nähe der Heizelemente installiert (siehe Abb. 15 „Thermoelemente“). Ein weiteres Thermoelement misst ausschließlich die Umgebungstemperatur (siehe Abb. 15 „Thermoelement für Raumtemperatur“), um eine Betrachtung der Temperaturdifferenz zu erleichtern. Das letzte der fünf Thermoelemente befindet sich im Inneren der Zelle. Es ist über eine Stopfbuchse eingekoppelt und kann entlang der Strahlröhre bewegt werden (siehe Abb. 15 „bewegliches Thermoelement“). Dieses Thermoelement dient entlang seiner Bewegungsrichtung zur Aufnahme eines Temperaturprofils im Inneren der Plasmazelle. Alle genannten Thermoelemente sind mit einem Interface der Firma PICO Technology vom Typ USB-08 verbunden (siehe Abb. 15 „Interface für Thermoelemente“). Mit Hilfe dieses Gerätes und einer dazu gehörigen Software ist es möglich, Temperaturkurven aller Thermoelemente aufzunehmen sowie sich die Temperatur an den Thermoelementen in Echtzeit am PC (siehe Abb. 15 „PC“) ausgeben zu lassen.

Alle unbenutzten Flansche der Plasmazelle wurden blind geflanscht.

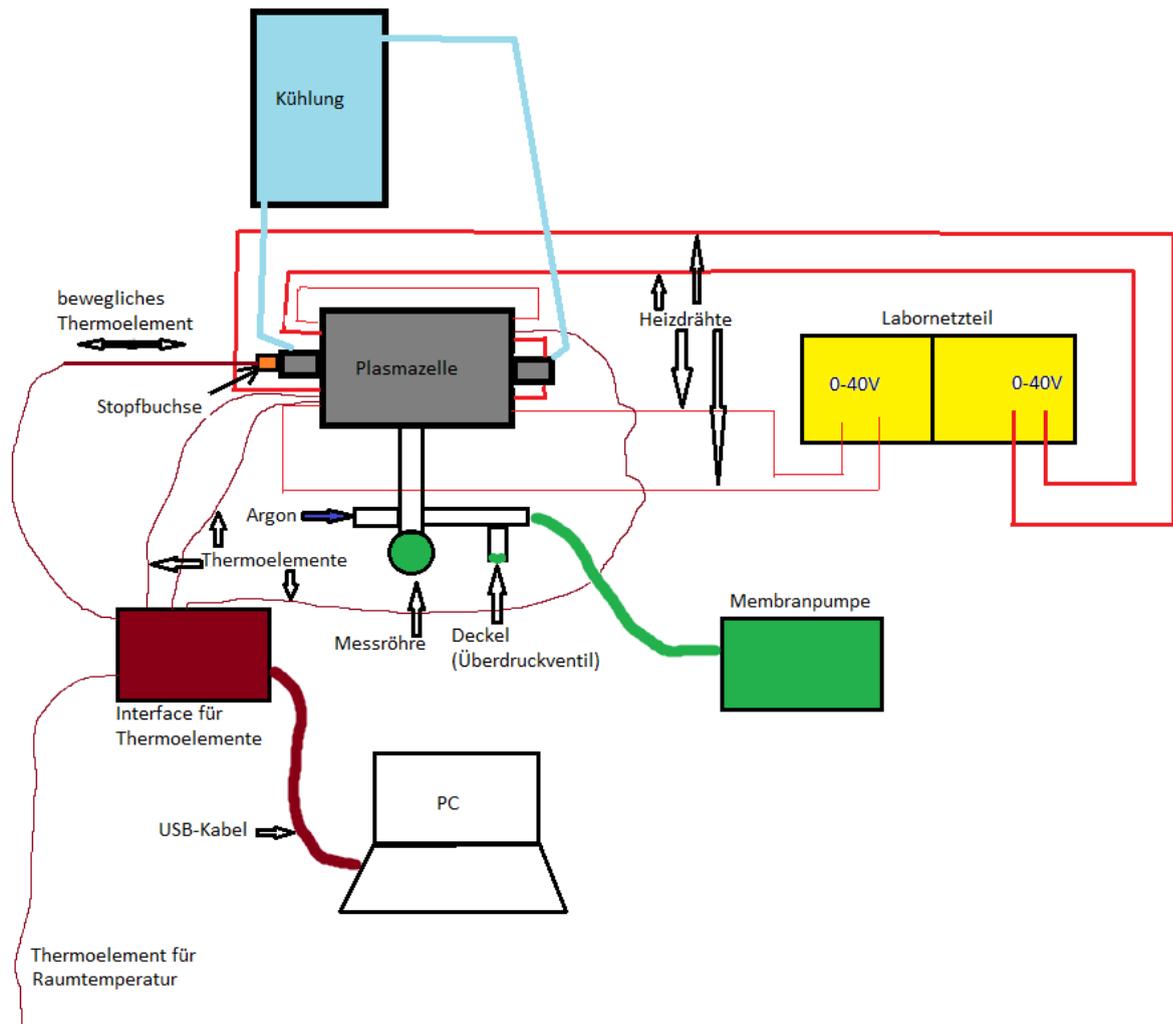
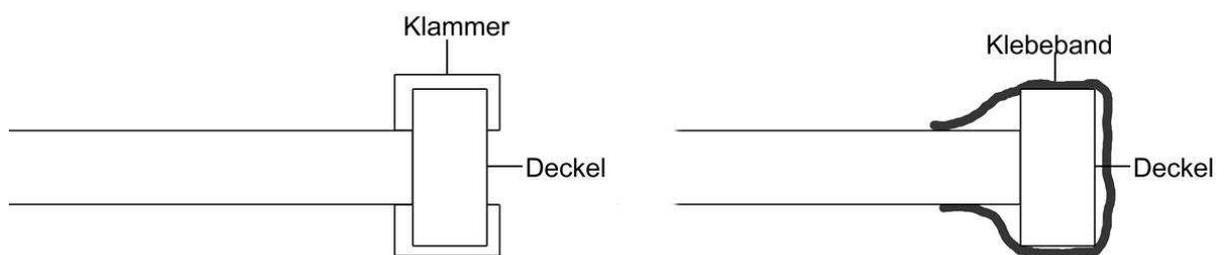


Abbildung 15 - Aufbau des Teststandes (Schema)



a) beim Pumpen

b) beim Spülen

Abbildung 16 – improvisiertes Überdruckventil (Skizze)

5.2 Temperaturmessungen an der Plasmazelle

5.2.1 Aufheizen der Anlage

Da die Plasmazelle in der heißesten Zone Schweißnähte besitzt und keine kreisförmige Geometrie an dieser Stelle vorliegt, war die Empfehlung der mit dem Aufbau der Plasmazelle vertrauten Teams, die Plasmazelle höchstens mit $0,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ zu heizen. Diese geringe Heizrate gewährleistet ein möglichst homogenes Aufheizen der Anlage und beugt somit eventuellen Schäden durch thermische Verspannungen des Materials vor. Da das genutzte Netzteil nur manuell über Drehschalter geregelt werden konnte und eine Einstellung von kleineren Schritten als $1\text{W} \pm 0,3\text{W}$ nicht möglich war, musste die Anlage über mehrere Tage schrittweise hochgeheizt werden. Abbildung 17 zeigt die Heizkurve der Anlage ohne die Warteperioden, welche zwischen den Tagen, an denen geheizt wurde, auftraten. Diese Abbildung zeigt auch, dass die Heizelemente über den gesamten Zeitraum nahezu die gleiche Temperatur hatten. Die Steigung der Funktion der linearen Anpassung ($y = 18,1x + 14,1$) gibt eine durchschnittliche Heizrate von ca. $18 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ aus, was $0,3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ entspricht.

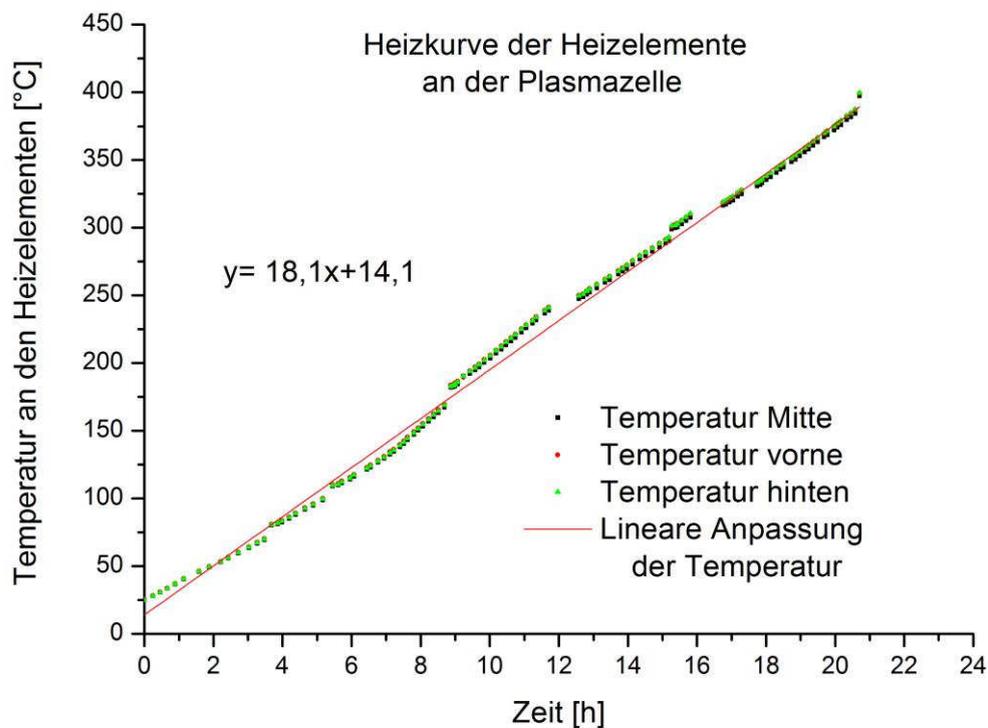


Abbildung 17 – Heizkurve der Plasmazelle

Jedoch zeigt Abbildung 18, dass die Temperatur im Inneren der Zelle erheblich geringer ist als die Temperatur an den Heizelementen. Auf der x-Achse ist die Temperatur des mittleren fest angebrachten Thermoelements aufgetragen, auf der y-Achse die gemessene Temperatur im Zentrum der Plasmazelle. Dieser Bezug ist annähernd linear. Aus der Geradengleichung des Graphen von Abbildung 18 geht hervor, dass die Heizdrähte auf knapp 1200°C erwärmt werden müssen, damit im Inneren der Zelle die benötigten 700°C erreicht werden können:

$$y = 0,59x + 12,7 \rightarrow 700 = 0,59x + 12,7$$
$$\rightarrow x = \frac{700 - 12,7}{0,59} = 1164,9 \text{ }^\circ\text{C} \approx 1200^\circ\text{C}$$

Dies entspricht einem Temperaturverlust von ca. 40%. Dieser hohe Temperaturverlust lässt sich am wahrscheinlichsten auf einen schlechten Kontakt und somit eine schlechte Wärmeleitung von den Kupferformteilen auf die Kammerwand der Plasmazelle zurückführen.

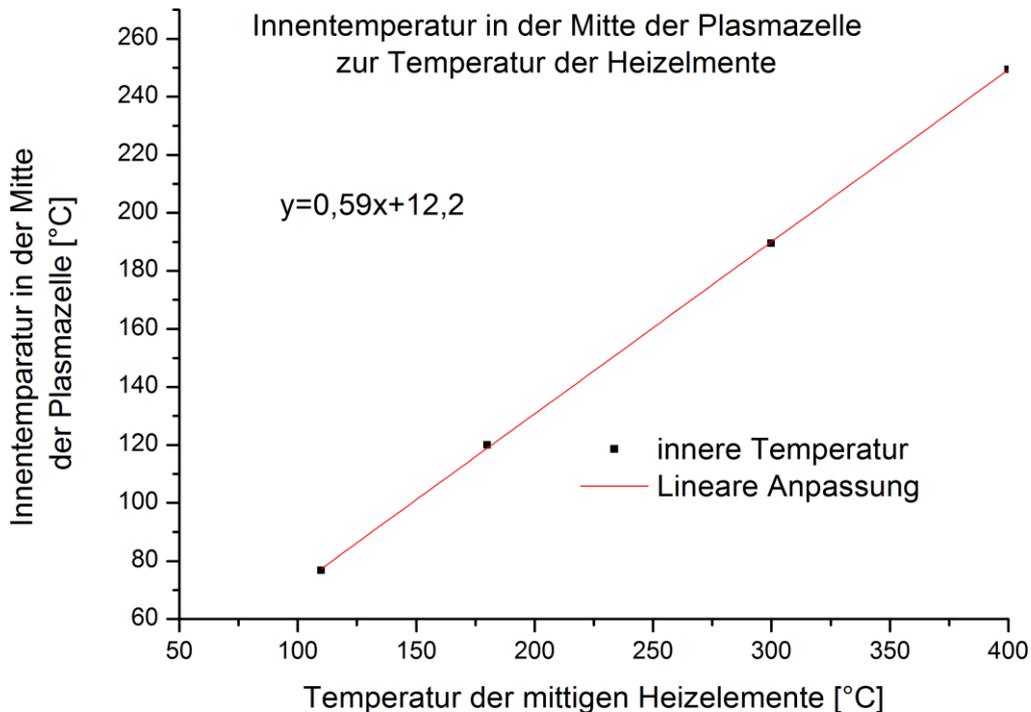


Abbildung 18 – Vergleich der Temperaturen im Inneren der Zelle und an den Heizdrähten

Abbildung 19 zeigt die Temperatur der Heizelemente in Abhängigkeit der Heizleistung. Die Leistung ist hierbei auf die einzelnen Heizelemente bezogen. Der Graph zeigt zunächst, dass die Heizelemente bei gleicher Leistung nahezu gleiche Temperaturen haben, weshalb sie im weiteren Verlauf als gleich angenommen werden können. Eine lineare Anpassung der Temperatur der Heizelemente (siehe Abb. 19 grüne Linie) zeigt bei genauerer Betrachtung, dass der Zusammenhang nichtlinear ist, obwohl im Allgemeinen für die Heizleistung $P \sim \Delta T$ [5] gilt. Diese Nichtlinearität ist damit zu begründen, dass je mehr die Temperatur an den Heizdrähten steigt auch das Temperaturgefälle zur Umgebung steigt. Dieser steigende Temperaturgradient verstärkt die Wärmeleitung zur Umgebung, da auch $\dot{Q} \sim \Delta T$ gilt. Eine Schicht aus Dämmmaterial um die Heizelemente an der Plasmazelle kann diesen Vorgang zwar verringern aber nicht verhindern. Der Zusammenhang von Temperatur und Leistung wird durch die lineare Funktionsgleichung dieser Anpassung aus genannten Gründen nicht mehr hinreichend genau beschrieben. Würde man versuchen mit der linearen Funktion eine Interpolation durchzuführen, bei der man auf die Leistung schließt, die annäherungsweise benötigt wird, um eine Temperatur von mehr als 1100°C zu erreichen, wäre das ermittelte Ergebnis kleiner als der in der Realität benötigte Wert. Dass durch eine lineare Betrachtung ein zu geringer Wert ermittelt werden würde, kann aus dem Verlauf der Messkurve geschlussfolgert werden. Der Verlauf der Messkurve zeigt zu höheren Leistungen tendenziell eine fallende Steigung, während die Steigung einer linearen Funktion nach Definition konstant ist. Daher wurde eine weitere Anpassung der Messwerte vorgenommen. Bei der Funktion, welche aus der zweiten Anpassung hervorgeht, handelt es sich um eine Logarithmusfunktion der Form $y = a - b * \ln(x + c)$. Die genannte Form beschreibt eine auf x-Achse (c) und y-Achse (a) verschobene Logarithmusfunktion, die zusätzlich um einen Faktor (b) gestreckt ist. Die logarithmische Funktion beschreibt die Messkurve hinreichend genau. Somit

kann aus dieser Funktion die Leistung annäherungsweise bestimmt werden, welche nötig ist, um die Heizdrähte auf die benötigte Temperatur von rund 1200°C zu bringen.

$$y_{\log} = -4708 + 977 * \ln(x + 126) \rightarrow 1200 = -4708 + 977 * \ln(x + 126)$$

$$\rightarrow 1200 + 4708 = 977 * \ln(x + 126) \rightarrow \frac{1200 + 4708}{977} = \ln(x + 126)$$

$$\rightarrow e^{\frac{1200+4708}{977}} = x + 126$$

$$x = e^{\frac{1200+4708}{977}} - 126 = 296 \text{ W}$$

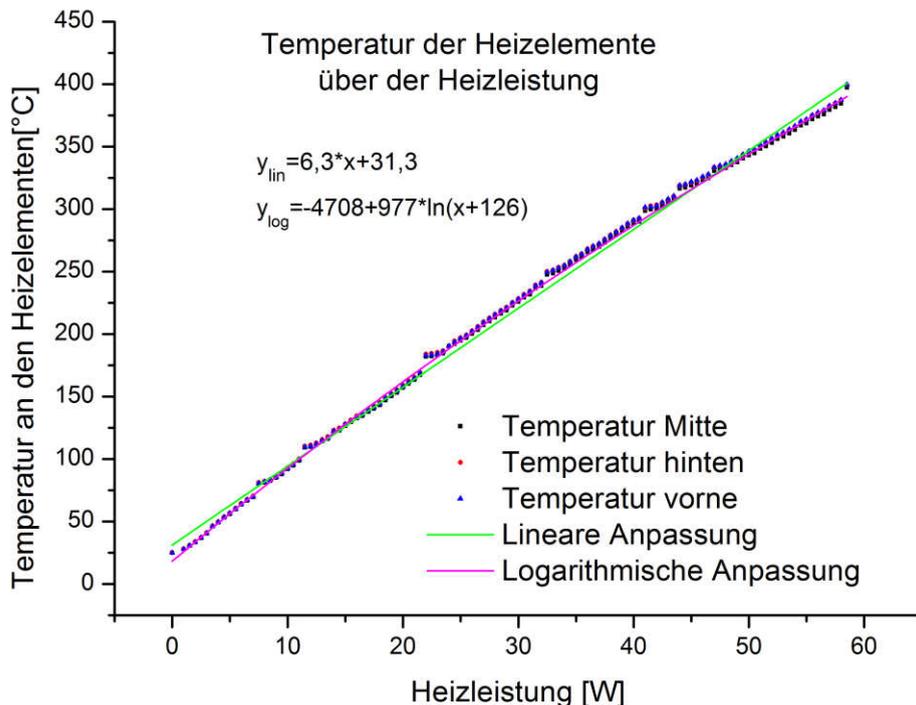


Abbildung 19 – Temperatur der Heizdrähte über der Heizleistung

Vergleicht man die vorangegangenen Erkenntnisse in Bezug auf die Temperatur, die die Heizdrähte entwickeln müssten (>1100 °C), und die Leistung, welche an ihnen anliegen müsste (296 W), mit den Daten zu den Heizdrähten aus Kapitel 3 (maximale Betriebstemperatur: 800 °C; maximale Leistung der mittigen Heizdrähte: 210W; maximale Leistung der seitlichen Heizdrähte: 160 W), so werden zwei Probleme offensichtlich. Die Heizdrähte sind weder für eine Betriebstemperatur von mehr als 1100 °C, noch für eine Leistung von 296W ausgelegt und somit für den aktuellen Aufbau eindeutig unterdimensioniert. Zudem ist der verwendete Stahl nach Angaben des Herstellers an trockener Luft nur bis 1100°C zunderfest (siehe 3.). Daher besteht bei Temperaturen von mehr als 1100°C ein Risiko, dass es zumindest stellenweise durch Verzunderung zu Schäden an der äußeren Kammerwand kommt. Somit ist der Einbau leistungsfähigerer Heizelemente, die die entsprechenden Anforderungen an den Aufbau erfüllen, keine sinnvolle Lösung. Zweckmäßiger wäre es, die Wärmeleitung zwischen den Heizdrähten und der Kammerwand zu verbessern. Eine solche Verbesserung könnte beispielsweise durch eine hochwarmfeste Wärmeleitpaste, die zwischen den Kupferformteilen und der Kammerwand aufgetragen wird, erreicht werden.

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen ermittelte Strom-Spannungspaare, die für eine bestimmte Leistung an den Heizdrähten eingestellt werden mussten. Die Graphen sind dabei auf die

einzelnen Heizelemente und nicht auf die beim Teststand vorhandene Reihenschaltung bezogen. Abbildung 20 zeigt hierbei die Paare an den seitlichen und Abbildung 21 an den mittigen Heizelementen. Ferner sind über alle Messkurven logarithmische Anpassungen mit Funktionsgleichungen der Form $y = a - b * \ln(x + c)$ gelegt. Diese erlauben es Strom-Spannungspaare für höhere Leistungen, als die bisher erreichten, zu ermitteln. Dies ist insofern nützlich, da benötigte Strom-Spannungspaare für weiterführende Heiztest zumindest abgeschätzt werden können. Dies stellt eine Arbeitserleichterung, für die mit dem Messaufbau vertrauten Personen sowie eine Möglichkeit, die Effizienz beim manuellen Heizen zu steigern, dar, da die Paarungen im Voraus annäherungsweise bestimmt werden können.

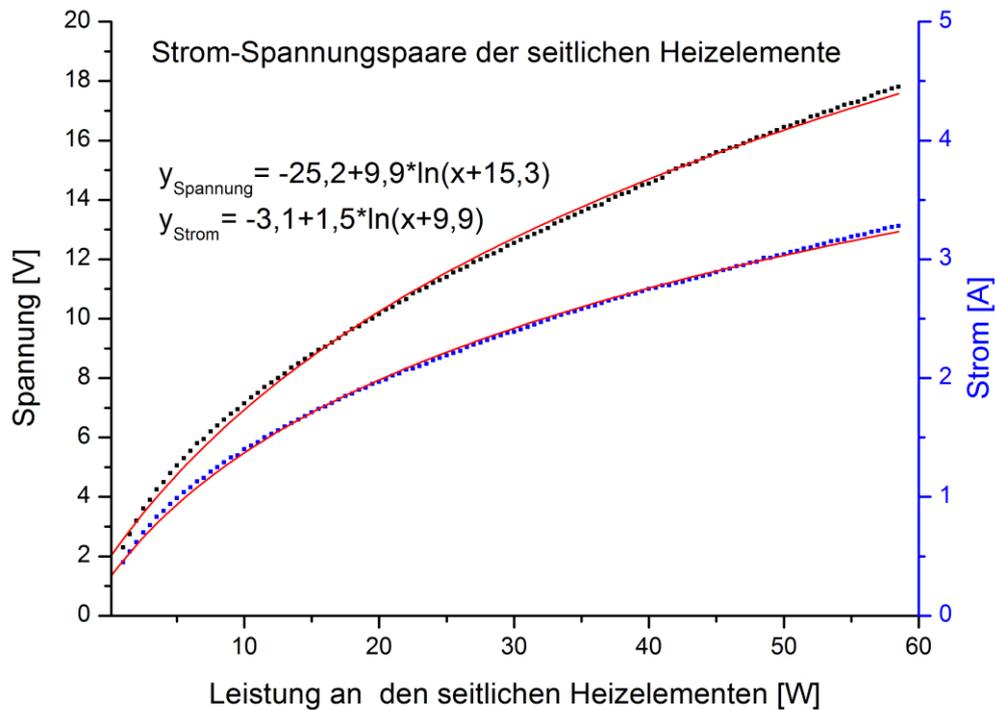


Abbildung 20 - Strom-Spannungspaare der seitlichen Heizdrähte

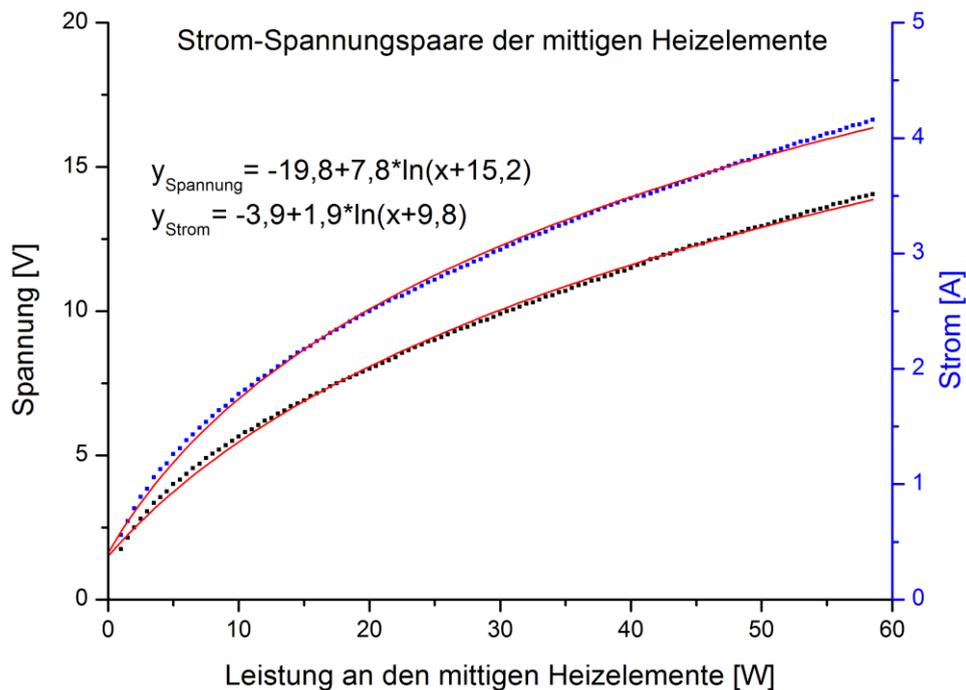


Abbildung 21 – Strom-Spannungspaare der mittigen Heizdrähte

5.2.2 Temperaturprofil der Anlage

In 5.1.1 wurde bereits festgestellt, dass sich die Heizdrähte an der Anlage während des Heizens gleich stark erhitzen (siehe Abb. 19). Daraus sollte ein symmetrisches Temperaturprofil im Inneren der Anlage resultieren. Im Idealfall sollte die Temperatur an den Enden der Strahlungsröhre Raumtemperatur betragen. Außerdem soll das Temperaturgefälle von dem Bereich, in dem später Lithiumdampf sein soll, zu den Zonen, in denen sich Helium befinden soll, sehr steil sein. Um dies zu untersuchen, wurden bei jeweils unterschiedlichen Temperaturen der externen Heizelemente insgesamt vier Temperaturprofile entlang des Plasmarohrs im Inneren der Anlage aufgenommen (Abb. 24). Abbildung 24 zeigt zudem die gewünschte Zoneneinteilung im Inneren der Plasmazelle.

Die Messwerte für die Graphen in Abbildung 24 wurden bei 2cm, 6cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 44cm und 48cm mit Hilfe des in Kapitel 5.1 beschriebenen beweglichen Thermoelements aufgenommen. Die Stopfbuchse beginnt bei 50cm. Somit lagen jeweils zwei Messpunkte in den Helium-Zonen (0cm bis 10cm und 40cm bis 50cm), fünf in der Lithium-Zone (10cm bis 40cm) und jeweils einer auf der Grenze zwischen Helium und Lithium-Zone (10cm und 40cm).

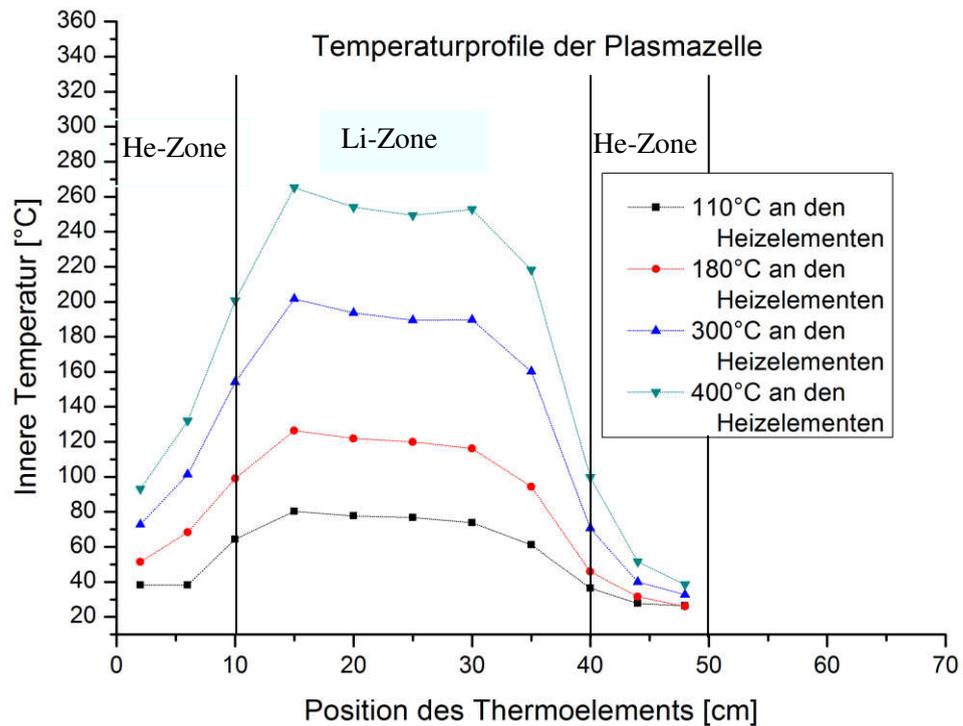


Abbildung 22 – Temperaturprofil entlang des Strahlungsrohrs inklusive Zoneneinteilung

Grundsätzlich ist von der Helium-Zone zur Lithium-Zone ein steiler Temperaturgradient vorhanden. Auffällig ist, dass die Temperatur tendenziell in der Nähe der Stopfbuchse geringer ist. Dies wird vor allem in den Helium-Zonen sichtbar. Des Weiteren zeichnet sich zu höheren Temperaturdifferenzen ein Trend zur Bildung von zwei Maxima an den Positionen 15cm und 30cm ab. Insgesamt betrachtet ist das Temperaturprofil zudem nicht sehr symmetrisch. Dies legt nahe, dass eine inhomogene Wärmeleitung von den Kupferteilen zur Kammerwand besteht. Möglich wäre auf Grund der Tendenz zu niedrigeren Werten zur Stopfbuchse hin, dass diese Inhomogenität am Messaufbau liegt. Das ist jedoch unwahrscheinlicher als eine inhomogene Wärmeleitung, da die Kupferteile, die sich zwischen den Heizdrähten und der Kammer befinden, lediglich an die Kammerwand angelegt sind. Um endgültig auszuschließen, dass es am Messaufbau liegt, kann in späteren Untersuchungen ein weiteres Temperaturprofil mit der Stopfbuchse auf der anderen Seite der Anlage (Position 0cm) aufgenommen werden. Um die Inhomogenität in der Wärmeleitung zu beheben, muss allerdings dafür gesorgt werden, dass z.B. durch eine Wärmeleitmasse, welche auch noch bei 1000°C und mehr fest bleibt, ein nahezu gleicher Wärmeleitkoeffizient entlang des Strahlrohres der Kammerwand und den Kupferformteilen besteht.

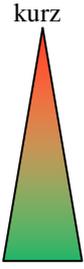
6. Simulationen zur Streuung des Elektronenstrahls an den Plasmafenstern

Die Plasmafenster der Plasmazelle bei PITZ dienen der Abgrenzung der Plasmazelle zur restlichen Beschleunigerstrecke. Diese Grenze ist notwendig, da in der Plasmazelle während des letztendlichen Betriebs ein Druck herrscht, welcher um den Faktor 10^8 größer ist. Allerdings sorgt jede Materie, die in den Strahlengang des Elektronenstrahls gebracht wird, für Streuungen und führt somit zu einer Verminderung der Qualität des Elektronenstrahls. Vorangegangene Betrachtungen mit Simulationen des Elektronenstrahltransports in die Plasmazelle zeigten, dass die an einem Fenster stattfindende Streuung maximal eine zusätzliche Divergenz des Elektronenstrahls von 0,2mrad zur Folge haben darf, um nach wie vor eine ausreichende Fokussierung des Elektronenstrahls in der Mitte der Plasmazelle zu gewährleisten.

Aktuell wurden bisher Messungen zur Streuung an einer Kaptonfolie mit einer Dicke von 50 μ m und einer Mylarfolie mit einer Dicke von 6 μ m vorgenommen. Die Messungen machten deutlich, dass beide Folien eine Divergenz verursachen, welche größer als 0,2mrad ist. In den hier durchgeführten Simulationen wird untersucht, welche Materialien bei welchen Dicken eine Alternative für die vorhandenen Fenster aus Kapton bilden. Die für die Simulation ausgewählten Materialien sind neben Kapton und Mylar: Gold, Titan, Kohlenstoff (Graphit), Beryllium, Polyethylen und Polypropylen. Gold und Titan wurden ausgewählt, da man diese Materialien verhältnismäßig einfach in Folien von einigen 100nm herstellen kann, Beryllium, da es ein häufig verwendetes Material für Strahlfenster ist und Kohlenstoff, Polyethylen und Polypropylen wegen ihrer kleinen Ordnungszahlen und großen Strahlungslängen von einigen 0,1m. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Streuung des Elektronenstrahls auch bei geringen Foliendicken von der Strahlungslänge (siehe 2.) der Materialien abhängt (Tabelle 2). Daher ist zu erwarten, dass die Materialien, die zur Herstellung der Elektronenfenster geeignet sind, verhältnismäßig große Strahlungslängen aufweisen. Zudem soll überprüft werden, ob die Formel 1 [6] mit den Ergebnissen der Simulation annäherungsweise übereinstimmt. Dadurch soll eine Aussage getroffen werden, ob die Formel 1 für diesen Bereich an Schichtdicken nach wie vor Anwendung findet.

Tabelle 2 – Strahlungslängen verschiedener Materialien

| Material | Strahlungslänge [cm] |
|------------------------|----------------------|
| Gold | 0,3344 [9] |
| Titan | 3,560 [9] |
| Kohlenstoff (Graphite) | 19,32 [9] |
| Kapton | 28,57 [9] |
| Mylar | 28,54 [9] |
| Beryllium | 31,68 [9] |
| Polypropylen | 49,47 [9] |
| Polyethylen | 50,31 [9] |



kurz
lang

$$\theta_{rms} = \frac{13.6MeV}{\beta pc} z \sqrt{\frac{x}{X_0} \left[1 + 0,038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]}$$

$$\beta pc = 23MeV \quad X_0 = 0,28m \text{ (Kapton)} \quad z = 1$$

x – Dicke des Plasmafensters

Formel 1 – Streuwinkel bei Vielfachstreuung [6]

Die Simulationen wurden mit FLUKA vorgenommen. FLUKA ist eine Software zur Simulation von Wechselwirkungen und Bewegungen von Teilchen in Materie. Da die Berechnungen der Software auf Statistiken basieren (Monte-Carlo Methode) und eine Streuung bei sehr dünnen Folien statistisch unwahrscheinlich ist, muss für eine ausreichende Genauigkeit eine hohe Statistik aufgenommen werden. Daher wurde eine Statistik mit 10^8 Teilchen aufgenommen. Eine Statistik mit 10^9 Teilchen wäre zwar genauer, lieferte aber in Stichproben nahezu identische Ergebnisse bei ca. zehnfach höherer Rechenzeit. Es wurde ein gaußförmiger Elektronenstrahl mit einem FWHM von 0,042mm angenommen, da dies annäherungsweise dem Elektronenstrahl bei PITZ entspricht. Ferner geht man in der Simulation von einer anfänglichen Divergenz von 0 aus, um den Einfluss der Fenster direkt aufzeigen zu können. Aus den Simulationsergebnissen wird der FWHM-Wert 25cm hinter der Folie bestimmt, woraus wiederum die Divergenz berechnet werden kann (Formel 2). Um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Messungen aus den Experimenten zu erhalten, wird die Divergenz auf den RMS-Wert bezogen berechnet. Die 25cm wurden gewählt, da dies auch die reale Strecke von einem Plasmafenster zur Mitte der Zelle ist.

$$\theta_{rms} = \arctan\left(\frac{rms_{25} - rms_0}{l}\right) = \arctan\left(\frac{FWHM_{25} - FWHM_0}{2\sqrt{\ln 2} * l}\right)$$

$$FWHM_0 = 0,042cm \quad FWHM_{25} = FWHM \text{ nach } 25cm$$

Formel 2 – Streuwinkel (allgemein)

6.1 Simulationsergebnisse

Um zunächst eine geeignete Größenordnung für die Dicke der Materialien zu bestimmen, wurden Simulationen zu allen oben genannten Materialien mit 1mm, 100µm, 10µm, 1µm, 100nm, 10nm und 1nm vorgenommen. Die Divergenzen, welche nach der Simulation durch die verschiedenen Schichtdicken und Materialien hervorgerufen wurden, sind in Abbildung 23 in Abhängigkeit zur Dicke der Folien, dargestellt. Endet eine Kurve in Abbildung 23, so zeigt das eine Divergenz von 0mrad an.

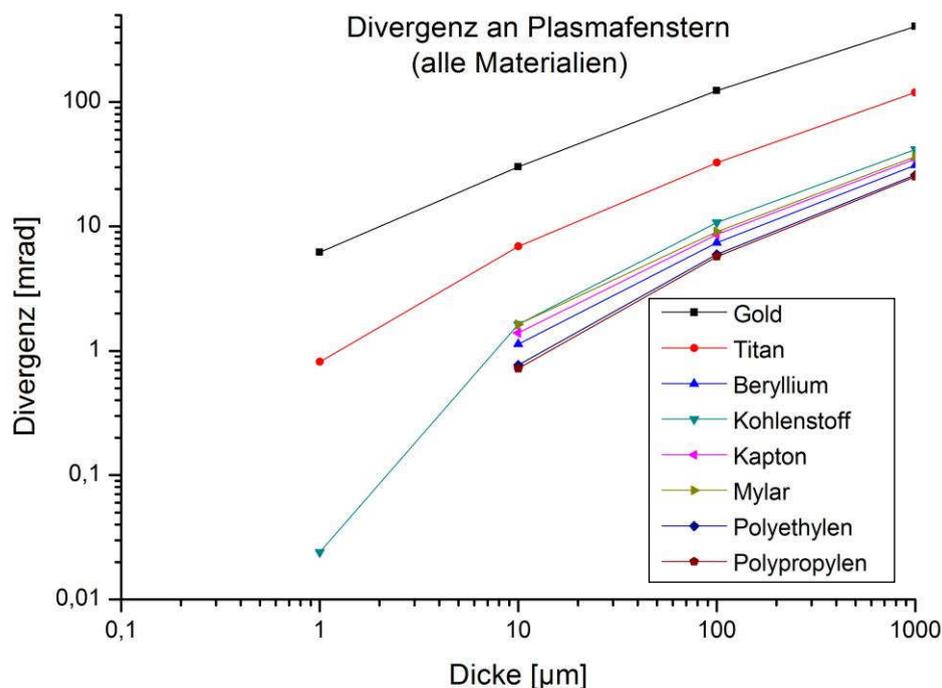


Abbildung 23 – Simulationsergebnisse zur Divergenz (Bestimmung der Größenordnung der Foliendicke)

Aus Abbildung 23 geht hervor, dass eine Divergenz von 0,2mrad oder weniger bei allen Materialien zwischen 100nm und 10µm Materialstärke erreicht wird. Daher wurden anschließend Simulationsergebnisse innerhalb dieses Bereichs aufgenommen (Abb. 24). Aus Abbildung 24 ist ersichtlich, dass Titan und Gold als Material für die Plasmafenster ungeeignet sind, da sie um etwa eine Größenordnung dünner als die anderen Stoffe sein müssten, um eine Divergenz von 0,2mrad oder weniger aufzuweisen. Dieses Ergebnis ist in Anbetracht der kurzen Strahlungslängen von Gold und Titan (siehe Tabelle 2) wenig überraschend.

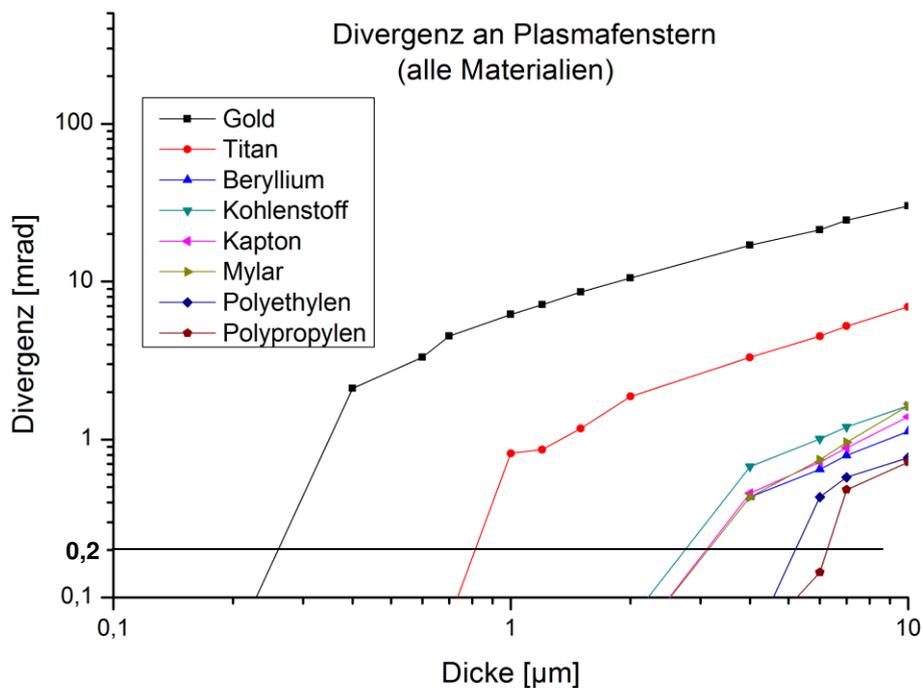


Abbildung 24 – Simulationsergebnisse zur Divergenz (alle Materialien)

Daher werden in Abbildung 25 Beryllium, Kohlenstoff, Kapton, Mylar, Polyethylen und Polypropylen noch einmal separat betrachtet. Hier ist zu erkennen, dass reiner Kohlenstoff von den leichteren Materialien die stärkste Streuung hervorruft. Beryllium, Mylar und Kapton weisen ein annähernd identisches Streuverhalten auf. Polypropylen und Polyethylen verursachen die geringste Streuung, wobei Polypropylen von diesen zwei Materialien das bessere Verhalten zeigt. Sollte man sich entscheiden, Kapton als Material beizubehalten, müsste man nach den Ergebnissen der Simulation eine Folie mit einer Dicke von ca. 3µm wählen, um eine Divergenz von 0,2mrad zu erreichen. Man sollte bei der Wahl des Materials für die Fenster allerdings bedenken, dass man mit einer Folie aus Polypropylen eine doppelt so dicke Folie wie mit Kapton verwendet werden könnte. Somit wäre für den Fall, dass man sich für den Wechsel des Materials für das Plasmafenster entscheidet, Polypropylen in Bezug auf die Streuung den anderen untersuchten Materialien vorzuziehen. Grundsätzlich ist es ratsam, Folien zu nutzen, die so dick wie möglich sind, da es sonst Probleme mit der mechanischen Stabilität sowie Gasströmen durch die Folie bei Druckdifferenzen kommen kann. Da es sich im geplanten Aufbau zudem um einen Überdruck durch Helium handelt, ist ein Lecken durch die Folie vorhersehbar. Die Leckrate sollte allerdings erwartungsgemäß bei dickeren Folien kleiner werden. Die Problematik der mechanischen Belastbarkeit könnte durch ein Gitter gelöst werden, das die Folie stabilisiert. Bei dem Gitter muss darauf geachtet werden, dass die Maschen des Gitters groß genug sind, um keine zusätzliche Streuung des Elektronenstrahls zu verursachen.

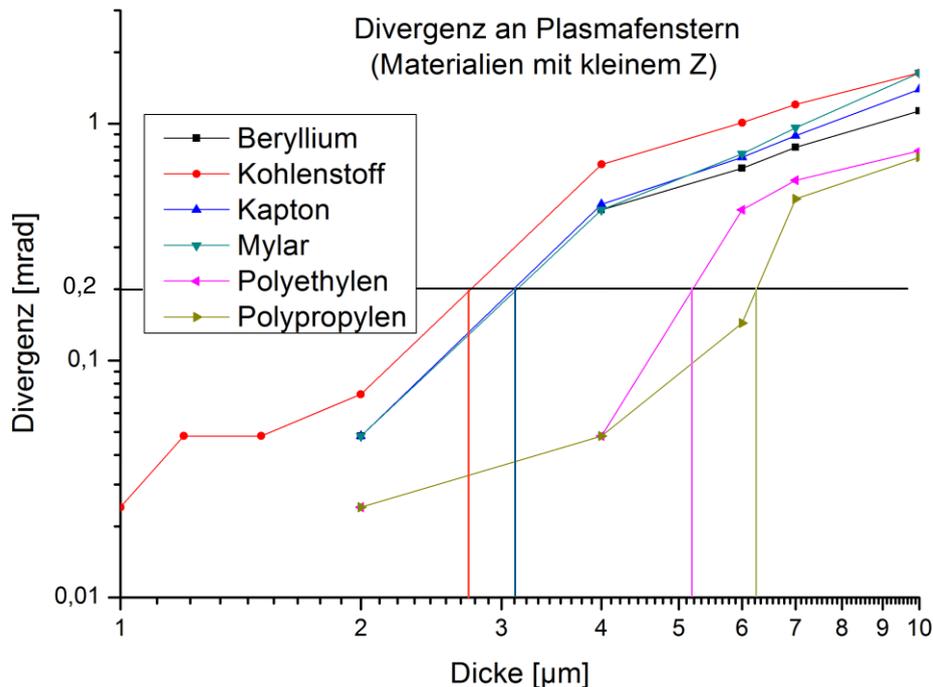


Abbildung 25 – Simulationsergebnisse zur Divergenz (Materialien mit kleinem Z)

6.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Vorbetrachtungen

Da Kapton ursprünglich als Material für die Plasmafenster favorisiert wurde, beziehen sich die Vorbetrachtungen und der Vergleich mit den Simulationsergebnissen ebenfalls auf Kapton. Abbildung 26 zeigt die Divergenz des gestreuten Elektronenstrahls in Abhängigkeit der Dicke der Kaptonfenster und vergleicht die Ergebnisse aus den Simulationen mit denen der Formel 1. Aus den Graphen ist ersichtlich, dass die Ergebnisse nur für größere Schichtdicken annäherungsweise übereinstimmen. Während Formel 1 den Gesetzmäßigkeiten einer Funktion der Form $y = a * x^b$ folgt, zeigen die Simulationsergebnisse ein anderes Verhalten. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Formel 1 fallen zu dünneren Schichten hin die Werte der Simulation immer stärker ab. Da Formel 1 allerdings meist eher Anwendung bei dickeren Schichten findet, ist fraglich, ob sie für den Bereich von 10^{-4} bis 10^{-5} Strahlungslängen anwendbar ist. Die Simulationen basieren dahingegen auf Monte-Carlo-Rechnungen, die universell gültig sind.

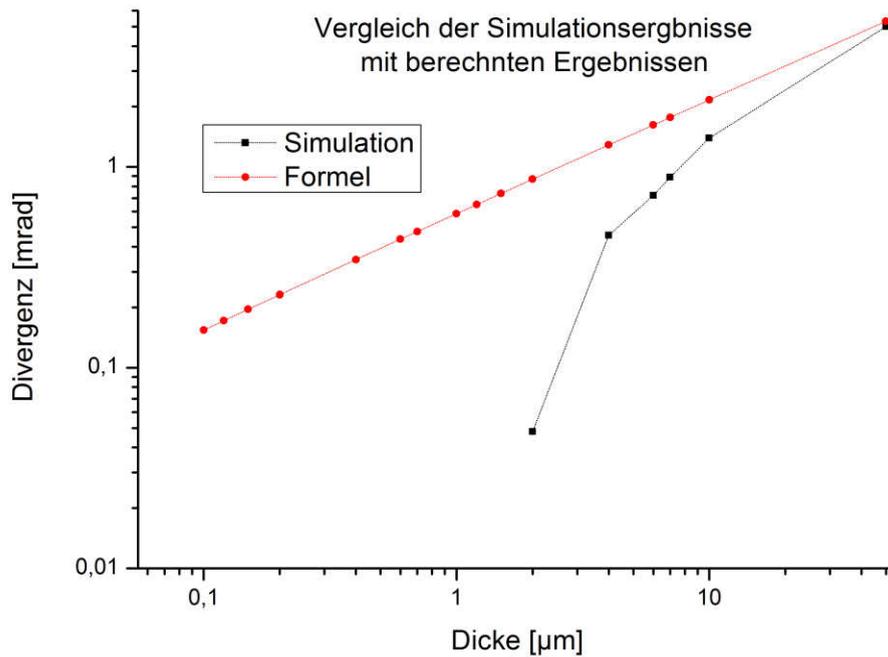


Abbildung 26 – Vergleich der Simulationsergebnisse mit berechneten Ergebnissen

Vergleicht man nun die Ergebnisse der Formel 1 und die Simulationsergebnisse mit den Messwerten aus den Experimenten mit einer 50 μm dicken Kaptonfolie und einer 6 μm dicken Mylarfolie (Abb. 27), so erkennt man, dass die Simulationsergebnisse im Gegensatz zu denen der Formel näher an den experimentellen Werten liegen bzw. für den Wert mit Mylar fast identisch sind.

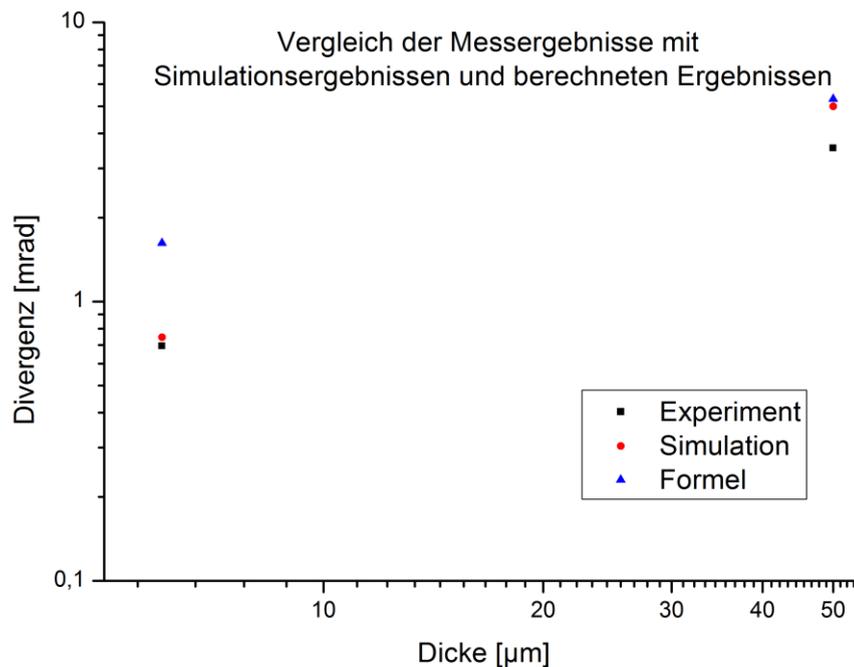


Abbildung 27 – Vergleich der Messergebnisse mit Simulationsergebnissen und berechneten Ergebnissen

Dieser Trend lässt zwar aufgrund der geringen Anzahl von Werten noch keine eindeutigen Schlüsse zu, aber es gibt einen Hinweis darauf, dass für Schichtdicken von 10^{-4} bis 10^{-5} Strahlungslängen eher den auf Monte-Carlo-Rechnungen basierenden FLUKA-Simulationen Glauben zu schenken ist, als den Werten der Formel 1.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Alle Ziele der Arbeit wurden erreicht. Es wurde eine im Modell umsetzbare Möglichkeit zur Anordnung eines Drahtgeflechts gegeben, die den Zweck einer Auskleidung der Plasmazelle erfüllt. Die Funktionalität dieses Entwurfs muss jedoch erst noch im Experiment getestet werden.

Die Heizversuche an der Plasmazelle brachten zahlreiche Erkenntnisse. Zunächst wurde ein Wärmeverlust von ca. 40% von den Heizelementen zum Inneren der Anlage ermittelt. Des Weiteren wurde mit Hilfe der Aufnahme einer Heizkurve eine Abschätzung zur Leistung vorgenommen, die an den Heizdrähten anliegen muss, um die erforderlichen 700°C im Inneren der Plasmazelle zu erreichen. Sie wird den Erwartungen zufolge bei ca. 296W je Heizelement liegen. Problematisch ist hierbei, dass die Summe der maximalen Leistung der äußeren Heizelemente bei nur 160W und die der mittigen Heizelemente bei 210W liegen. Außerdem liegt die Temperatur der Heizdrähte, die sie bei einer Leistung von 296W erreichen (1100°C bis 1200°C) über der maximalen Betriebstemperatur der Heizelemente von 800°C. Ferner könnte es bei diesen Temperaturen teilweise zu einer äußerlichen Verzunderung der Plasmazelle kommen. Zudem konnte festgestellt werden, dass das Temperaturprofil der Anlage inhomogen und asymmetrisch ist, was beispielsweise im endgültigen Betrieb Inhomogenitäten im Plasma und einen unregelmäßigen Lithiumkreislauf verursachen könnte. Insgesamt lassen sich die Probleme im Heizverhalten und beim Temperaturprofil auf Mängel in der Wärmeleitung zwischen den Heizdrähten und der Kammerwand zurückführen. Dem könnte mit Hilfe einer hochwarmfesten Wärmeleitmasse entgegen gewirkt werden. Ob man die Kupferformteile dabei vollständig ersetzt oder lediglich einen besseren Wärmekontakt zwischen den Formteilen und der Kammerwand herstellt, muss noch diskutiert werden.

Zu den Abschätzungen der Streuung von Elektronen an den Elektronenfenstern der Plasmazelle wurden folgende Erkenntnisse gewonnen: Zu Beginn wurde erkennbar, dass in Bezug auf die Streuung Polypropylen von den untersuchten Materialien das günstigste Verhalten zeigt. Mit diesem Material ist nach den Simulationen eine Foliendicke von ca. 6µm möglich, ohne eine Divergenz von mehr als 0,2mrad zu verursachen. Im Weiteren wurde durch den Vergleich von experimentellen Werten mit den Ergebnissen einer Monte-Carlo-Simulation und der Formel $\theta_{rms} = \frac{13.6MeV}{\beta pc} z \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left[1 + 0,038 \ln \left(\frac{x}{x_0} \right) \right]$ geklärt, dass die Formel für Schichtdicken unterhalb von einigen 10µm keine Anwendung mehr findet. Die Monte-Carlo-Simulation liefert dahingegen Werte, welche der Realität nahe kommen.

Schlussendlich repräsentiert diese Arbeit einige von weiteren vielen Schritten, die gegangen werden müssen, bevor die Anlage bei PITZ endgültig zum Einsatz kommt.

Danksagung

Zuerst möchte ich meinen Betreuern danken, die mir jederzeit, im Rahmen ihrer Möglichkeiten, mit Rat und Tat zur Seite standen. Des Weiteren möchte ich der gesamten Arbeitsgruppe, die mit der Thematik der Plasmazelle vertraut ist, für ihre in mich investierte Zeit und ihren fachlichen Rat danken. Zuletzt geht ein besonderer Dank an meine Familie, Freunde und meine Verlobte, die mich stets motiviert und unterstützt haben, wann sie nur konnten.

Quellenverzeichnis

- [1] Mathias Reimann, „Aufbau und Inbetriebnahme einer mit Lithium gefüllten Plasmazelle“, 2013
- [2] Hans-Wolf Thümmel, „Durchgang von Elektronen- und Betastrahlung durch Materieschichten“, Akademie-Verlag, Berlin, 1974
- [3] Karl Ludwig Röβing, „Vielfachstreuung von Elektronen an sehr dünnen Schichten“, 20.06.1979
- [4] M. Groß, G. Koß, A. Donat, D. Richter, „Konstruktion der Plasmakammer für Zeuthen“, 14.01.2014
- [5] Hotset Heizpatronen und Zubehör GmbH 2008, http://www.hotheater.de/files/Prosp_Berechnung_08.pdf, Seite 7, 05.07.2014 16:09
- [6] Claus Grupen “Teilchendetektoren”, S. 37, BI-Wissenschaftsverlag, 1993
- [7] Daniel Marsico, „Monte-Carlo-Methode“, http://www.ma-weigand.didaktik.mathematik.uni-wuerzburg.de/aktuelles/past/kunst_und_mathematik/animationen/marsico.html, 09.07.2014 14:47
- [8] DESY, „Forschungsgruppe für plasmabasierte Beschleuniger“, <http://plasma.desy.de/>, 16.07.2014 16:53
- [9] D.E. Groom, “Atomic and Nuclear Properties of Materials for more than 300 materials”, <http://pdg.lbl.gov/2012/AtomicNuclearProperties/>, 17.07.2014 23:54
- [10] <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/strahlungslaenge/14006>, 19.07.2014 15:23

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| Abbildung 1 – Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Kreiszahl π | Seite 2 |
| Abbildung 2 – Modell der PITZ Plasmazelle..... | Seite 3 |
| Abbildung 3 – Heizdrahtanordnung mit Kupferformteilen..... | Seite 4 |
| Abbildung 4 – Konzentrationsverteilung innerhalb der Plasmazelle..... | Seite 5 |
| Abbildung 5 – Teile für Plasmazellenmodell..... | Seite 6 |
| Abbildung 6 – Schema des Plasmazellen Modells..... | Seite 7 |
| Abbildung 7 – Schema eines Drahtgeflechts..... | Seite 8 |
| Abbildung 8 – Erster Entwurf zur Auskleidung der Plasmazelle (Skizze)..... | Seite 9 |
| Abbildung 9 – Auskleidung der Strahlröhre (Skizze)..... | Seite 10 |
| Abbildung 10 – Trichterauskleidung (Skizze)..... | Seite 11 |
| Abbildung 11 – Schema zur Verbindung der Laschen von Trichter- und Strahlröhrenauskleidung..... | Seite 11 |
| Abbildung 12 – Aufwölbung der Trichterauskleidung (Skizze)..... | Seite 12 |
| Abbildung 13 – Trichterauskleidung mit Ring zur Fixierung (Skizze)..... | Seite 12 |
| Abbildung 14 – Schema der Plasmazelle mit Drahtgeflecht..... | Seite 13 |
| Abbildung 15 – Aufbau des Teststandes (Schema)..... | Seite 15 |
| Abbildung 16 – improvisiertes Überdruckventil (Skizze)..... | Seite 15 |
| Abbildung 17 – Heizkurve der Plasmazelle..... | Seite 16 |
| Abbildung 18 – Vergleich der Temperaturen im Inneren der Zelle und an den Heizdrähten..... | Seite 17 |
| Abbildung 19 – Temperatur der Heizdrähte über der Heizleistung..... | Seite 18 |
| Abbildung 20 – Strom-Spannungspaare der seitlichen Heizdrähte..... | Seite 19 |
| Abbildung 21 – Strom-Spannungspaare der mittigen Heizdrähte..... | Seite 20 |
| Abbildung 22 – Temperaturprofil entlang des Strahlungsrohrs inklusive Zoneneinteilung..... | Seite 21 |
| Abbildung 23 – Simulationsergebnisse zur Divergenz (Bestimmung der Größenordnung der Foliendicke) | Seite 23 |
| Abbildung 24 – Simulationsergebnisse zur Divergenz (alle Materialien)..... | Seite 24 |
| Abbildung 25 – Simulationsergebnisse zur Divergenz (Materialien mit kleinem Z)..... | Seite 25 |
| Abbildung 26 – Vergleich der Simulationsergebnisse mit berechneten Ergebnissen..... | Seite 26 |
| Abbildung 27 – Vergleich der Messergebnisse mit Simulationsergebnissen und berechneten Ergebnissen..... | Seite 26 |