



# ***Verbesserung und Charakterisierung der ArF Laser Beamline des Plasmabeschleunigungsexperiments bei PITZ***

## **Bachelorarbeit**

Technische Hochschule Wildau  
Fachbereich: Ingenieur- und Naturwissenschaften  
Betreuender Hochschuldozent: Dipl.-Phys. Harald Beyer  
Betrieblicher Betreuer: Dr.-Ing. Matthias Groß  
Ort: DESY, Standort Zeuthen

Eingereicht von: Ayri Myufti  
Studiengang: Physikalische Technik  
Matrikelnummer: 121042516  
Abgabedatum: 22.04.2016

## **Bibliografische Beschreibung und Referat**

Ayri Myufti

Verbesserung und Charakterisierung der ArF Laser Beamline des  
Plasmabeschleunigungsexperiments bei PITZ

Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau, 32 Seiten, 21 Abbildungen, 14  
Quellenangaben

### **Zielsetzung:**

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung von optischen Elementen der Beamline des ArF Ionisationslasers und Umbau dieser zwecks Transportierens des Lichtes vom Laserstandort zur Plasmazelle. Das zu transportierende Licht benötigt dabei eine bestimmte Mindestenergie um das Plasma in der Zelle zu zünden.

### **Inhalt:**

Die Arbeit beinhaltet die Beschreibung von durchgeführten Messungen an Elementen der Beamline und das Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen zur Erhöhung der Stabilität und Erhöhung der Endenergie des Laserpulses.

- Verbesserung der mechanischen Stabilität der Beamline
- Dichtigkeitsmessungen / Lecksuche an der Beamline
- Abdichtung der Verrohrung der Beamline mit anschließender Vermessung des Sauerstoffgehaltes
- Untersuchung der Vorschläge für eine verbesserte Strahlführungsoptik und Auswahl der besten Lösung unter praktischen Gesichtspunkten
- Anpassung der Simulation an den marktüblichen Linsenbrennweiten
- Bestimmung der Transmission von optischen Komponenten

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Prüfungsleistung wurde bisher bzw. gleichzeitig keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Alle Zitate oder Stellen, die dem Wortlaut nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht.

Datum/Unterschrift:

## Abstrakt

Die Selbstmodulation von Teilchenpaketen in einem Plasma wurde als ein neues Konzept zur Plasma-Beschleunigung mit langen Treiberstrahlen vorgeschlagen. Ein Experiment mit der Zielsetzung, die Selbstmodulation eines Elektronenpakets zu zeigen und zu charakterisieren, ist derzeit bei PITZ (Photoinjektor Teststand am DESY, Standort Zeuthen) in Vorbereitung. Für die Erzeugung eines Plasmas mit ausreichender Größe (10 mm Durchmesser, 60 mm Länge) und Dichte ( $10^{15} \text{cm}^{-3}$ ) wurde entschieden, Einzelphoton-Ionisation mit einem 400 mJ ArF Excimerlaser zu verwenden.

Um die nötige Laserpulsenergie (Mindestens etwa 100mJ) zur Plasmazelle zu transportieren, wurde eine Beamline aufgebaut, die insgesamt 12,5 Meter lang ist. Auf diesem Weg entstehende Energieverluste werden minimiert durch Verbesserung der gegenwärtig eingesetzten Strahlführungsoptik und durch Erhöhung der mechanischen Stabilität der Beamline. Zusätzlich wird die Verrohrung der Beamline abgedichtet um den erforderlichen Sauerstoffgehalt (unter 5%) zu erreichen.

The self-modulation of electron bunch in plasma has been proposed as a new approach to plasma acceleration with long driver beams. An experiment with the aim to show the self-modulation of an electron bunch and characterize it, is currently in preparation at PITZ (Photo Injector Test Stand at DESY, Zeuthen). For the creation of a plasma of sufficient size (10 mm diameter, 60 mm length) and density ( $10^{15} \text{cm}^{-3}$ ) has been decided to use the method of single photon ionization with a 400 mJ ArF excimer laser.

To transport the necessary laser energy (at least about 100 mJ) to the plasma cell, a beam line has been established, which is a total of 12.5 meters long. The energy losses resulting on this way are minimized by improving the currently used optical beam guidance and by increasing the mechanical stability of the beamline. In addition, to reach a low oxygen level (below 5%) in the beamline, the piping is sealed.



# **Inhaltsverzeichnis**

## **Einleitung**

### **PITZ- Photoinjector Teststand Zeuthen bei DESY**

### **Das Plasmabeschleunigungsexperiment bei PITZ**

*Entwurf der Plasmazelle*

*Der Argon-Fluorid-Excimerlaser*

*Zweck und Funktionalität der ArF-Laser-Beamline*

### **Dichtigkeitsmessungen und Optimierung der mechanischen Stabilität der Beamline**

*Dichtigkeitsmessungen an der Beamline*

*Entlastung der Spiegelhalter durch Faltenbälge*

### **Optimierung der Strahlführungsoptik**

*Anpassung der Simulationen*

*Transmission der optischen Komponenten*

### **Zusammenfassung und Ausblick**

### **Quellenverzeichnis**

### **Abbildungsverzeichnis**

### **Tabellenverzeichnis**

# Einleitung

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist ein nationales Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft, das mit öffentlichen Mitteln finanziert wird und 1959 gegründet wurde. Seine beide Standorte, Hamburg und Zeuthen, haben etwa 2300 Mitarbeiter, davon 650 Wissenschaftler, die in den Bereichen Beschleunigerbetrieb, Forschung und Entwicklung arbeiten. In Zeuthen betreibt DESY einen eigenen kleinen Linearbeschleuniger: den Photoinjektor-Teststand PITZ. An PITZ entwickeln und optimieren die Forscher Elektronenquellen für die Röntgenlaser und Teilchenbeschleuniger der Zukunft.

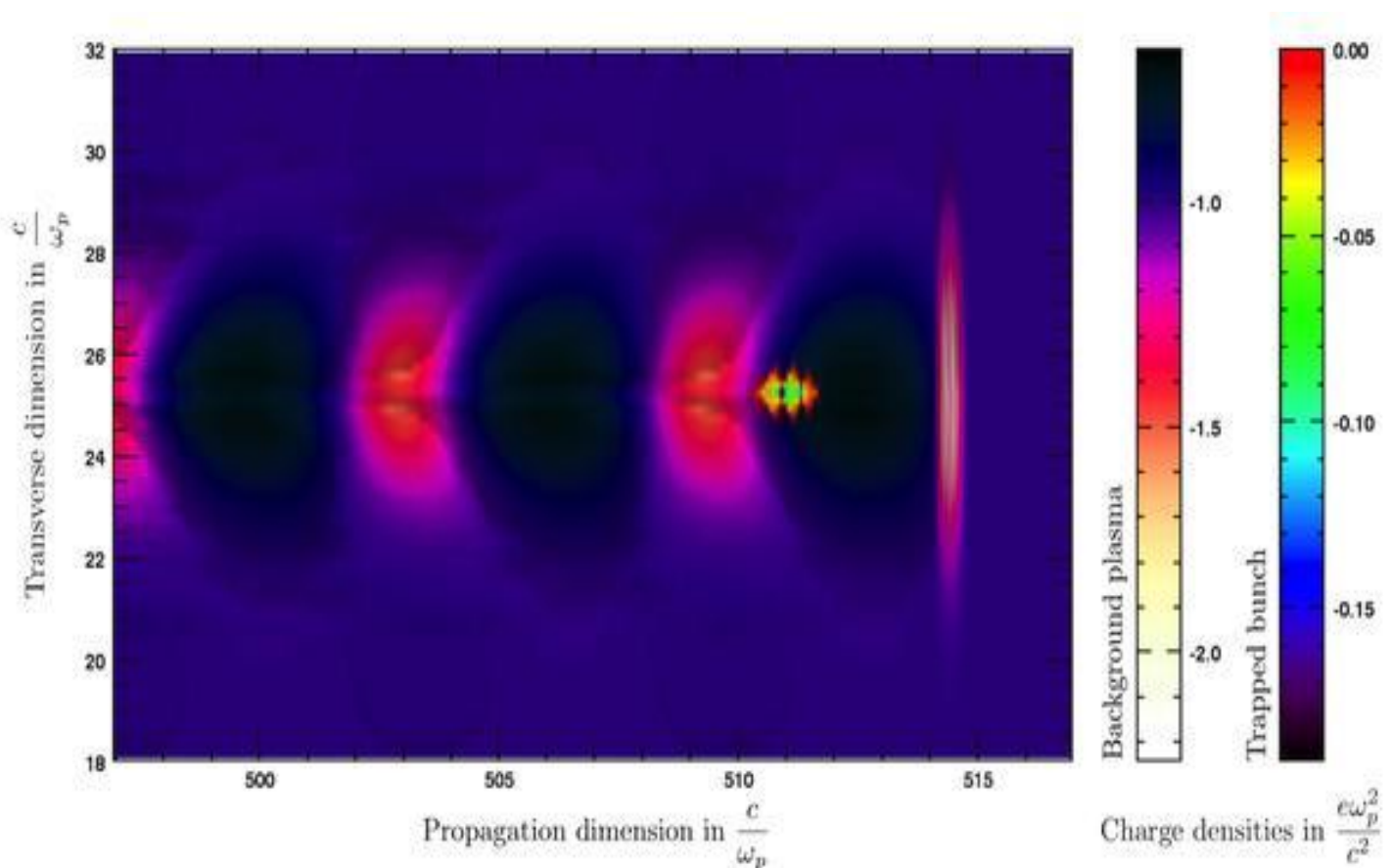
Eine Methode für stark verbesserte Teilchenbeschleuniger der Zukunft könnte die s.g. PWA „Plasma wakefield acceleration“ werden. LAOLA, das Labor für Laser- und Strahlgesteuerte Plasmabeschleunigung ist eine Zusammenarbeit zwischen Gruppen von DESY und der Universität Hamburg. Seine Aufgabe ist die Grundlagenforschung in dem relativ neuen Gebiet der Plasma-Beschleunigung durch eine explizite Verbindung mit DESYs konventionellen, modernen Beschleunigern zu ergänzen.

PWAs sind von großem Interesse für Beschleuniger und angewandte Physik aufgrund ihrer beispiellosen Gradienten in der Größenordnung von TV / m sowie deren eigen ultrakurze Elektronenpaket-Längen von nur wenigen Femtosekunden. Zum Vergleich werden mit herkömmlichen Beschleunigern Elektrische Feldstärken nur bis zu 100 MV/m erreicht[3].

LAOLA Experimente werden an drei Standorten betrieben: REGAE, FLASH und PITZ. Am REGAE (Relativisti Electron Gun for Atomic Exploration), werden Elektronenpakete mit hoher Qualität im Bereich pC mit Längen von wenigen Femtosekunden erzeugt. Diese eignen sich sehr gut für externe Experimente mit laserinduziertem Plasma. Im Mittelpunkt der Experimente am REGAE steht die Untersuchung der fundamentalen Strahldynamik in einem laserinduzierten Plasma. Durch die Erzeugung einer Plasmawelle in einem Plasma bei unterschiedlichen Parametern des Treiberlasers kann man mit dem Elektronenstrahl auf die Struktur der Plasmawelle schließen und die Ergebnisse mit Simulationen vergleichen. Sowohl Laser- als auch Strahlgetriebene Experimente werden bei FLASH durchgeführt, unter Verwendung einer zusätzlichen Extraktions-Beamline. Bei PITZ (Photoinjector Teststand am DESY, Standort Zeuthen) wird derzeit an einem Experiment gearbeitet, dessen Ziel es ist, die Selbstmodulation (s. Abb.1) eines Elektronenpakets zu zeigen und zu charakterisieren[4].

Das Prinzip der Plasma-Beschleunigung kann am Beispiel eines Elektronenstrahls, der sowohl zur Anregung der Schwingungen im Plasma als auch zur Beschleunigung verwendet wird, erklärt werden. Beim Eindringen eines

Teilchenpakets in ein homogenes Plasma werden die Elektronen dieses Plasmas aus dem Bereich des Elektronenpakets abgestoßen. Die Plasma-Ionen sind aufgrund ihrer höheren Masse träger und weniger beweglicher. Nach einer sehr kurzen Zeit sind alle Elektronen des Plasmas aus dem Bereich des Strahls weggedrängt und die Elektronen am Ende und in der Mitte des Teilchenpakets werden in dem Ionenkanal durch ein transversal gerichtetes Feld fokussiert. Nach dem Passieren des Teilchenpakets werden die abgedrängten Elektronen im Plasma zurückbeschleunigt und es entsteht eine Schwingung. Diese Schwingung der Raumladung erzeugt sehr starke longitudinale Hochfrequenz Felder, die s.g. „plasma wakefields“ oder Plasma-Kiefelder, bzw. Plasmawelle, die wiederum nachfolgende Teilchenpakete beschleunigen, vorausgesetzt diese Pakete besitzen die richtige Phase.[1]



**Abbildung 1. Simulation eines Elektronenpakets in selbstmodulierten Plasmawelle [2]**

Die Plasmadichte  $\eta_0$  spielt dabei eine wesentliche Rolle als einer der wichtigsten Parameter in der Plasmabeschleunigung. Die Wellenlänge der Plasmawelle im Plasma kann mit der Gleichung abgeschätzt werden:



$$\lambda_k = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{\eta_0}} \text{ mm}$$

Ist die Bedingung  $\frac{N_b \cdot r_e}{\sigma_z} \approx 1$  erfüllt somit ergibt sich für den Gradienten  $E_z$

$$E_z \approx 100 \sqrt{\eta_0} \text{ V/m}$$

Dabei sind:  $N_b$ -Anzahl der Elektronen im Teilchenpaket,  $r_e = 2,818 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  -der Elektronenradius,  $\sigma_z$  – die RMS-Länge.

Bei einer Plasmadichte von etwa  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  kommt man auf  $\lambda_k \approx 3,3 \text{ mm}$  und  $E_z \approx 1 \text{ GV/m}$  und aus der Abhängigkeit des Gradienten von  $N_b/\sigma_z^2$  folgt für kürzere Teilchenpakete höhere Werte von  $E_z$ [1]. Bereits in 2007 wurde in einem eindrucksvollen Experiment am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) eine Verdopplung der Energie von 42 GeV Elektronen nach dem Durchflug durch ein 85cm langes Lithium Plasma gezeigt. Das Plasma hatte eine Dichte von  $2,7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  und die höchste gemessene Energie betrug um die 90 GeV. Allerdings hatten nicht alle Elektronen im Teilchenpaket die besagten 90 GeV als Endenergie, sondern erstreckte sich diese gleichmäßig über den gesamten Bereich von 0 bis 90 GeV [5].

## PITZ- Photoinjector Teststand Zeuthen bei DESY

Der Photoinjector Teststand (PITZ) am DESY, Standort Zeuthen wurde gebaut, um Quellen von hoch brillanten Elektronenstrahlen für zukünftige freie Elektronen-Laser (FEL) und Linearbeschleuniger zu testen und zu optimieren. Im Mittelpunkt bei PITZ steht die Produktion von intensiven Elektronenstrahlen mit sehr kleiner transversaler Emittanz und ausreichend kleiner longitudinaler Emittanz, die erforderlich sind, um den hohen Betriebsanforderungen eines FELs gerecht zu werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist die Anwendung der modernsten Techniken in Kombination mit Schlüsselparameter von Projekten basierend auf TESLA-Technologie wie FLASH und dem European XFEL erforderlich [6].

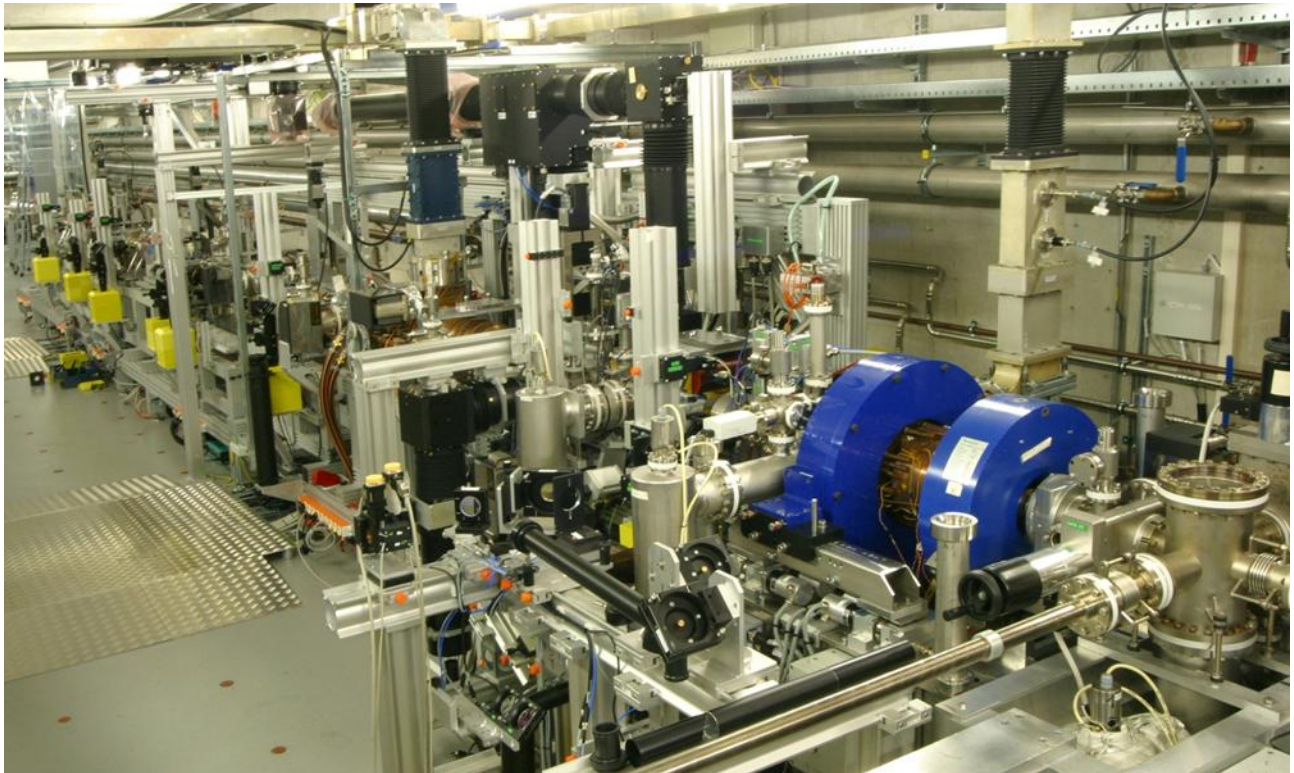


Abbildung 2. PITZ Tunnel

Die Hauptkomponenten der PITZ-Beamline sind ein Photokathoden-Lasersystem, eine RF-Photoelektronen „Gun“ als Beschleunigungseinheit, die von Magnetspulen zur Fokussierung umgeben ist und ein Multizellen-Nachbeschleuniger (Cut Disk Structure -CDS) - auch Booster genannt.

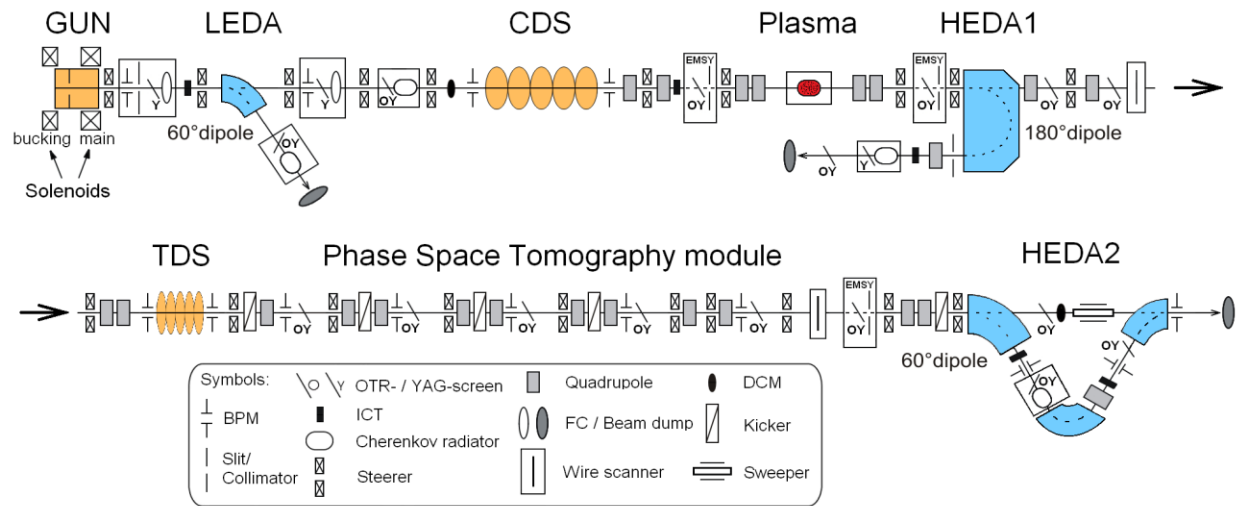
Mehrere Diagnosegeräte sind zwischen der „Gun“ und dem Booster positioniert: zwei Faraday-Detektoren (FC) für detaillierte (und low-charge)

Ladungsmessungen des Strahlenbündels; ein Cherenkov Detektor mit Streakkamera-Anzeige für Längenmessungen des Strahlenbündels (in der geraden Sektion als auch im ersten dispersiven Abschnitt); ein Niedrigenergie-Spektrometer (Low Energy Dispersive Arm - LEDA) für Impuls Charakterisierung der  $\sim 6,5$  MeV Elektronenpakete.

Ablenkmagneten zusammen mit Strahlage-Monitoren (BPMs) ermöglichen die Realisierung und Kontrolle der richtigen Strahlpositionierung entlang der gesamten Elektronenflugbahn. Für die Strahlage und Quergrößenmessungen werden Schirm-Stationen mit YAG-Schirmen verwendet. Entlang der gesamten Strahllinie, gibt es einige ICTs (integrating current transformer) für Ladungsmessungen des Strahlenbündels.

Stromabwärts des Boosters, besteht die Beamline aus verschiedenen Arten von Diagnosevorrichtungen zur detaillierten Charakterisierung von Elektronenpaketen mit hoher Strahlenergie ( $\sim 25$  MeV). Drei spezielle Schirmstationen können für die Strahlposition und Strahlgröße Messungen als auch für Transversale Emittanz Messungen unter Verwendung der Spalt-Scan-Technik (EMSY: Emittanz Messstationen) verwendet werden. Ein Phasenraum-Tomographie-Modul (PST) weiter stromabwärts des Boosters wird für Messungen des transversalen Phasenraums verwendet und kann zur gleichzeitigen Rekonstruktion des horizontalen und vertikalen Phasenraums, im Gegensatz zu dem Spalt-Scan-Technik, genutzt werden. Die beiden Hochenergie-Spektrometer ermöglichen eine detaillierte Dynamik Charakterisierung: eins direkt hinter dem Booster (High Energy Dispersive Arm - HEDA1) und eins am Ende der PITZ-Beamline (HEDA2).

Quadrupolmagnete werden für Strahlfokussierung verwendet, ermöglichen die Querschnitt-Emittanz-Messungen mit Schmierbild-Kamera und verbessern die Quadrupol-Scan-Technik in HEDA1. Sie sind auch zur Anpassung des Elektronenstrahls auf das anschließend folgende Phasenraum-Tomography-Modul (PST) notwendig. Der RF Deflektor (TDS) ermöglicht Messungen der zeitlichen Struktur der Elektronenpakete und ist ein geeignetes Instrument für die Messung des longitudinalen Phasenraums [6].



**Abbildung 3. PITZ 3.0 Beamline**

# Das Plasmabeschleunigungsexperiment bei PITZ

Derzeit ist ein Experiment in Vorbereitung am Photoinjektor Teststand bei DESY, Standort Zeuthen, um Selbstmodulation eines Elektronenpakets zu zeigen und zu charakterisieren. Schlüsselemente hierfür sind das hoch flexible Photokathoden Lasersystem und die gut entwickelte Strahldiagnostik. In einem ersten Schritt wurde eine geeignete Einbauposition (s. Abb.3) für die Plasmazelle mit Strahldynamik-Simulationen ermittelt. In dieser Zelle wird Lithium in seinem Gaszustand gebracht und ionisiert. Es wurde entschieden das Plasma mittels Laserionisation zu erzeugen, da diese Technik in der Lage ist ein homogenen Plasmakanal mit ausreichender Größe (10 mm Durchmesser, 60 mm Länge) und Dichte ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) zu erzeugen.

## Entwurf der Plasmazelle

Im Gegensatz zu bisher realisierten Entwürfen ist der Ionisationslaser von der Seite gekoppelt, orthogonal zu der Elektronenstrahlrichtung. Die Trichterform der Laserfenster (s. Abb. 4) beruht daher, dass ursprünglich geplant war die Ionisation mittels einem Ti-Saphir Laser (WL ca. 800 nm) zu erzeugen. Dafür war es notwendig den ausgeweiteten Laserstrahl mit zwei Hohlspiegeln durch die seitlichen Fenster auf die Bahn des Elektronenstrahls zu fokussieren. Mehrfach in Reihe versetzt würde im Zentrum, wo sich der Plasmakanal bilden soll, eine energetisch verdichtete Zone entstehen.

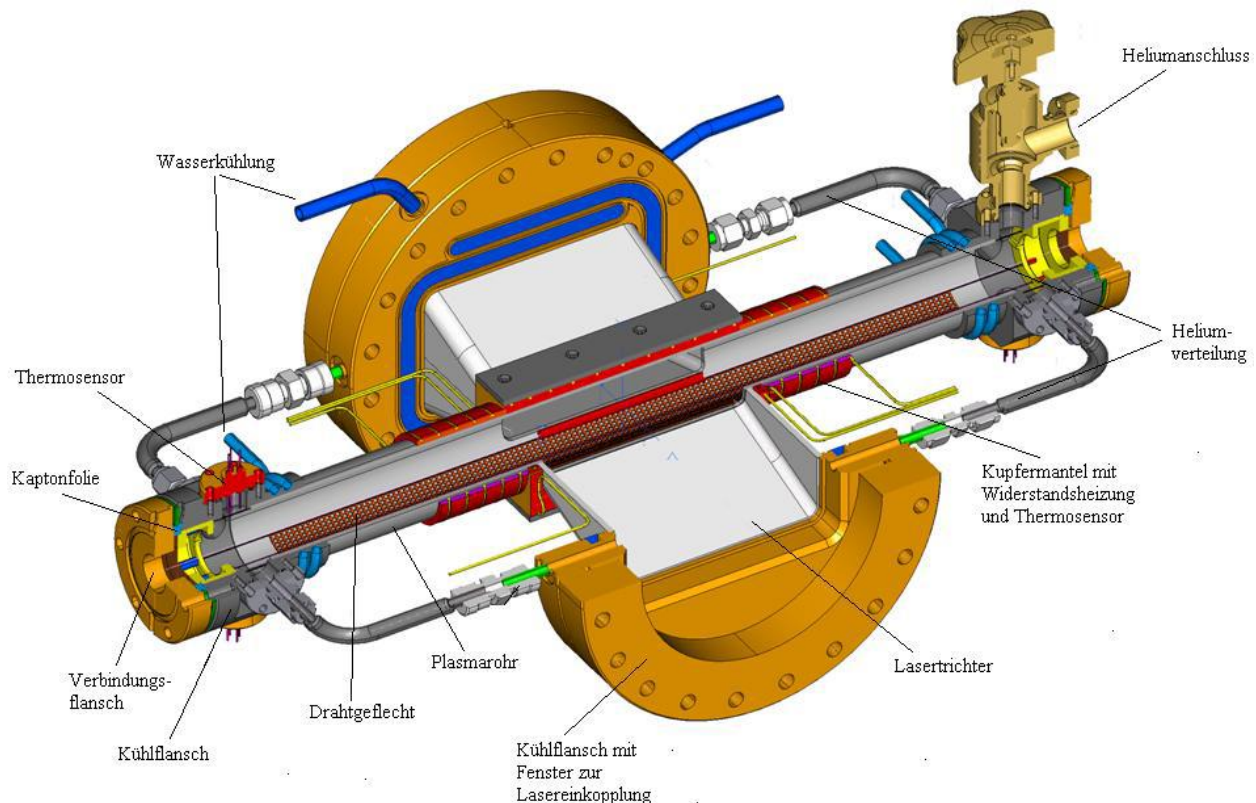


Abbildung 4. Plasmazelle Entwurf

Die Fokussierung wäre erforderlich gewesen, denn die Belastung der Fenster wäre ohne Fokussierung zu stark gewesen. Aus diesen und anderen Gründen hat man sich entschieden die Ionisation mittels eines Excimerlasers zu erzeugen, wodurch die Verwendung von Spiegeln sich erübrigt und die seitliche Öffnung lediglich auf die Form eines Rechtecks reduziert wird. Aufgrund diesen und anderen, im Laufe der Studie gesammelten Erkenntnissen, wird bei PITZ derzeit an einem neuen Design der Plasmazelle gearbeitet.

Lithium wurde als geeignetes Material für die Erzeugung des Plasmas hauptsächlich wegen seiner geringen Ionisationsenergie gewählt. Dafür muss es aber bei 700°C in Dampfzustand gebracht werden, was besondere Anforderungen an das Material der Hauptkomponenten der Plasmazelle mit sich bringt. Das Material aus dem der Kern (Plasmarohr und Lasertrichter) der Zelle besteht ist daher ein austenitischer Stahl (Edelstahl 1.4828). Der eignet sich besonders für diesen Einsatz wegen seiner hohen Hitzebeständigkeit, der sehr guten mechanischen Eigenschaften und der geringen magnetischen Permeabilität, was besonders wichtig für den Betrieb in Teilchenbeschleunigern ist [7].

Andere wichtige Bestandteile der Plasmazelle sind das Drahtgeflecht und die Heliumleitungen. Das Drahtgeflecht dient dazu kondensiertes Lithium zu den Heizelementen zurückzuführen, wo es erneut verdampft wird. Das Zurückleiten des flüssigen Lithiums erfolgt durch die Kapillarkräfte im Gitter. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass dieses Prinzip mithilfe eines Drahtgeflechts, keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert, daher wird derzeit an einer besseren Lösung, die auf demselben Prinzip funktioniert, gearbeitet. Argon wird in die Flansche des Rohrs geleitet, wo sich Puffer daraus bilden sollen, dessen Zweck ist eine Kondensationswand für das Lithiumdampf darzustellen, von wo aus es über das Drahtgeflecht zurück zu den Heizelementen geleitet werden soll. Das Argon soll an dieser Stelle eine Temperatur von ca. 20°C haben, womit einen steilen Temperaturgradienten und damit ein starkes Konzentrationsgefälle des Lithiums in dem Bereich erreicht wird.

Um eine Kontamination des restlichen Vakuumbereichs der Anlage in PIZ mit Lithium zu verhindern muss zwischen Verbindungsflansch und dem Kühlflansch der Plasmazelle eine Barriere geschaffen werden. Ursprünglich waren dafür Folien aus Kapton gedacht, die nicht in der erforderlichen geringen Dicke erhältlich sind und aus diesem Grund werden gerade andere Materialien getestet.

## ***Der Argon-Fluorid-Excimerlaser***

Wie bereits in den anderen Kapiteln erwähnt ist der zu Plasmaerzeugung verwendeter Laser bei PITZ ein Argon-Fluorid-Excimerlaser. Die Excimerlaser gehören zu den Gaslasern und haben den Vorteil, dass sie gut gekühlt werden können. Als *exciteddimer*, oder kurz Excimere, bezeichnet man Moleküle, die keinen stabilen Grundzustand besitzen. *Dimer* steht für ein zweiatomiges Molekül, das nur im angeregten (*excited*) Zustand kurzfristig stabil ist. Beim zurückkehren des Moleküls in sein Grundzustand wird die Anregungsenergie als Strahlung abgegeben und es zerfällt wieder in zwei Atome. Der Grundzustand hat im Vergleich zu dem angeregten Zustand eine sehr kurze Lebensdauer. Bei Excimerlaser stellt dieser instabile Grundzustand gleichzeitig das untere Laserniveau dar, das aufgrund der kurzen Lebensdauer für eine Überbesetzung gut geeignet ist. Bei diesem Typ von Lasern kommen hauptsächlich Edelgas-Halogen-Verbindungen ( $\text{ArF}^*$ ,  $\text{KrF}^*$ ,  $\text{XeF}^*$  usw.) und Edelgasdimere ( $\text{Ar}_2^*$ ,  $\text{Kr}_2^*$ ) zu Verwendung. Mit dem Index\* wird verdeutlicht, dass es hier um Molekülen handelt, die elektronisch angeregt sind und im Grundzustand kaum oder für sehr kurze Zeit existieren. Die meisten Edelgase gehen im Grundzustand keine chemische Verbindungen ein was dazu führte, dass man die Kombination von Edelgasen mit Halogenen, die man als chemisch aggressiv bezeichnet, in elektrische Entladungen untersuchte. Bei den dabei erzeugten Ionen und angeregten Zustände zeigte sich intensive UV Strahlung, die letztlich zu der Entwicklung von Excimerlasern führte. Excimerlaser können Pulse mit über 1J im UV-Bereich bei Durchschnittsleistungen von über 300 W liefern. In den meisten Lasern, die zu kommerziellen Zwecken verwendet werden, kommen fast nur Edelgas-Halogen-Verbindungen mit Wellenlängen von 193 nm bis 351 nm zum Einsatz. Dieser Art von Excimerlasern werden auch Exciplexlaser genannt, was so viel heißt wie *excitedcomplex* oder „angeregtes komplexes Molekül“ [8]. Der für die Plasmaerzeugung bei PITZ verwendete ArF-Laser ist von der Firma COHERENT, mit der Bezeichnung *COMPexPro201* (Daten s. Abb. 5).



# COMPexPro™

## High-Pulse-Energy Excimer Lasers

	Wavelength (nm)	COMPexPro 50	COMPexPro 102	COMPexPro 110	COMPexPro 201	COMPexPro 205
Pulse Energy <sup>1</sup> (mJ)	193	100	200	200	400	400
	248	150	400	400	700	700
	308	–	250	250	500	500
	351	–	200	200	300	300
Max. Rep. Rate (Hz)		50	20	100	10	50
Average Power <sup>2</sup> (W)	193	4	4	12	4	15
	248	7	7	30	5	30
	308	–	5	16	3.5	20
	351	–	4	12	3	15
Energy Stability <sup>4</sup> (1 sigma) (%)		1	1	1	1	1
Pulse Duration <sup>3</sup> (ns)		20	20	20	25	25
Beam Dimensions <sup>3</sup> (V x H) (mm <sup>2</sup> )		14 x 5	24 x 10	24 x 10	24 x 10	24 x 10
Beam Divergence <sup>3</sup> (V x H) (mrad <sup>2</sup> )		2 x 1	3 x 1	3 x 1	3 x 1	3 x 1
Dimensions (L x W x H)		1282 x 375 x 793 mm <sup>3</sup> (51 x 15 x 31 in. <sup>3</sup> )			1682 x 375 x 793 mm <sup>3</sup> (67 x 15 x 31 in. <sup>3</sup> )	
Weight		275 kg (605 lbs.)			350 kg (772 lbs.)	
Electrical		230V, ±10%, 16A, 50/60 Hz switchable, 1-phase 115V, ±10%, 25A, 50/60 Hz switchable, 1-phase				
Water Cooling <sup>5</sup>		2 to 3 l/min. (0.5 to 0.8 gal./min.), 15 to 20°C, connection: 1/2"				

<sup>1</sup> Measured at low repetition rate.

<sup>2</sup> Measured at max. repetition rate.

<sup>3</sup> Typical, FWHM.

<sup>4</sup> Specified at 248 nm.

<sup>5</sup> Only required above 20 Hz repetition rate.

**Abbildung 5. Datenblatt Excimerlaser der Serie COMPex Pro [14]**

Durch Anregung über elektrische Entladung reagieren Argon und Fluor chemisch zu einer komplexen Molekülverbindung. Dieser vorübergehend existierende Molekülkomplex kann spontane und stimulierte Strahlung emittieren, wobei das Komplex in einen metastabilen Zustand übergeht, von dem es dann schnell in ungebundene Atome zerfällt. Dieser instabile Grundzustand, das auch gleichzeitig das untere Laserniveau ist, erfüllt aufgrund der kurzen Lebensdauer die Bedingung für Überbesetzung. Durch Anreicherung der angeregten metastabilen Edelgashalogenide, die ein Lebensdauer von ca.  $\tau = 10$  ns haben, sind mehr Moleküle im angeregten als im Grundzustand vorhanden. Der Übergang zum Grundzustand wird durch einfallendes ultraviolettes Licht gleicher Wellenlänge bei allen angeregten Molekülen gleichzeitig ausgelöst, wodurch ein Laserstrahl entsteht [8].

Wie bereits erwähnt ist der Grundzustand der Moleküle ein Zustand sehr kurzer Lebensdauer im Bereich von  $\tau = 10^{-12} \text{ s}$ , was wiederum heißt, dass die in der Besetzungsinversion gespeicherte Energie von einem Puls schneller „abgeräumt“ wird, als die Pumpquelle neue Energie in das obere Laserniveau pumpen kann. Die Energie, Dauer und Spitzenleistung kann dabei über kontrollierte Stromzufuhr für die Pumpquelle genau eingestellt werden. Also kann der Laser nur gepulst betrieben werden, wobei die typischen Pulsdauer zwischen 4 und 40 ns liegen. Heutige Excimerlaser erreichen Repititionsraten von maximal einigen Kilohertz und Pulsenergien von bis zu 1,2 Joule. Die Wellenlänge eines Excimerlasers wird durch den Energieabstand zwischen dem angeregten Molekül und dem Grundzustand der Moleküle bestimmt. In unserem Fall des ArF Lasers, beträgt die Wellenlänge 193nm bzw.  $E_p = 6,4 \text{ eV}$ . Abbildung 6 zeigt das Spektrum des verwendeten Lasers. Das Gasmisch, das aus wenigen Prozent der aktiven Gaskomponenten (Ar und F) und einem Puffergas (Helium und Neon) besteht, muss regelmäßig ausgetauscht werden, da sich sowohl durch längere Standzeiten als auch durch den laufenden Betrieb die Eigenschaften des Gasmisches derart verändern, dass die Pulsenergie unter einen nutzbaren Wert abfällt.

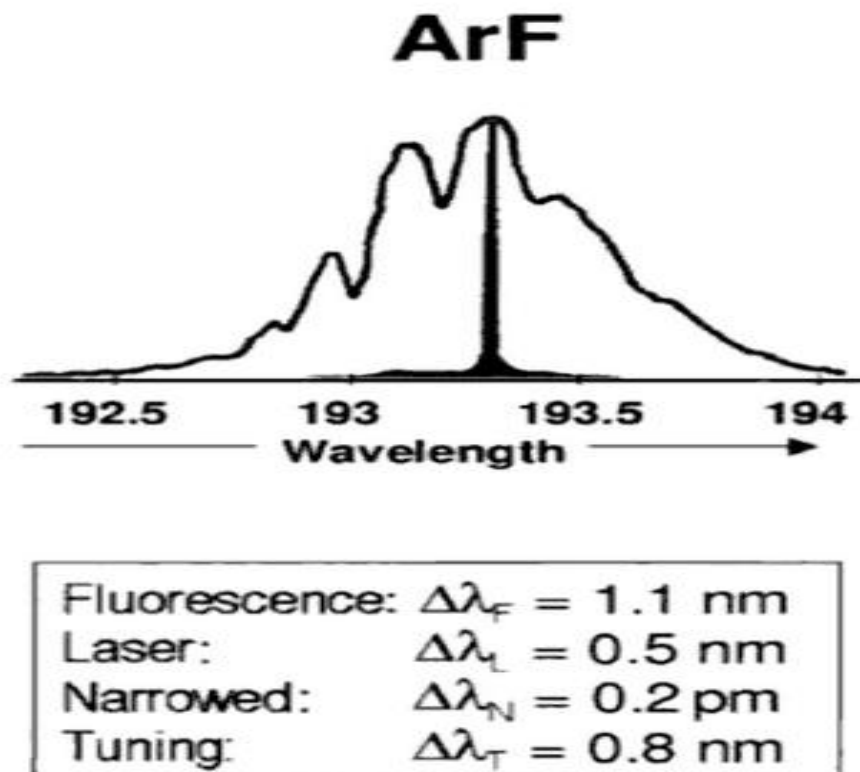


Abbildung 6. ArF Laser-Spektrum [9]

## ***Zweck und Funktionalität der ArF-Laser-Beamline***

Aus Sicherheits- und Platzgründen befindet sich der ArF-Laser, in einem Laborraum außerhalb der für die Plasmazelle vorgesehenen Einbaustelle im PITZ-Tunnel. Um die nötige Laserpulsenergie zur Plasmazelle zu transportieren, wurde eine Beamline aufgebaut, die insgesamt 12,5 Meter lang ist. Abbildung 7 zeigt den konstruktiven Aufbau der Beamline bis zur Plasmazelle im Beschleunigertunnel.

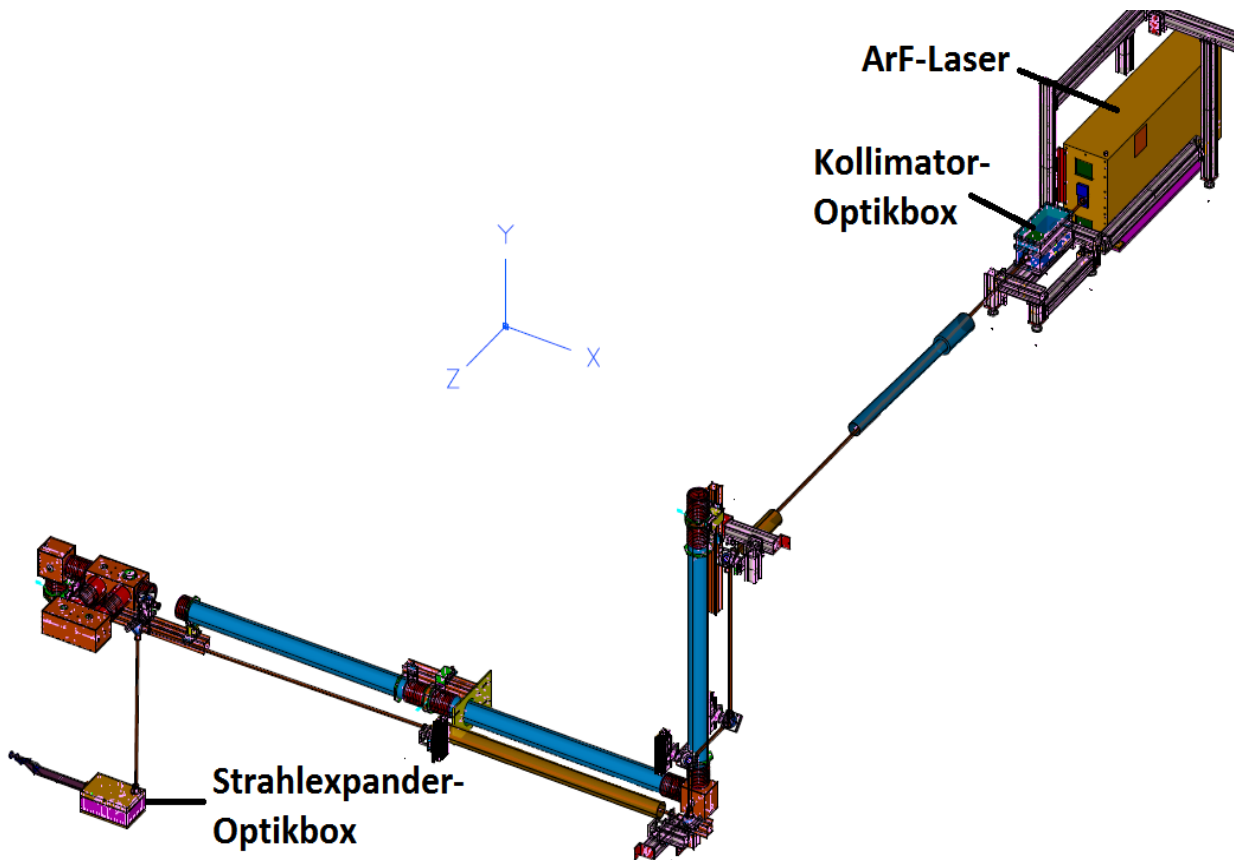
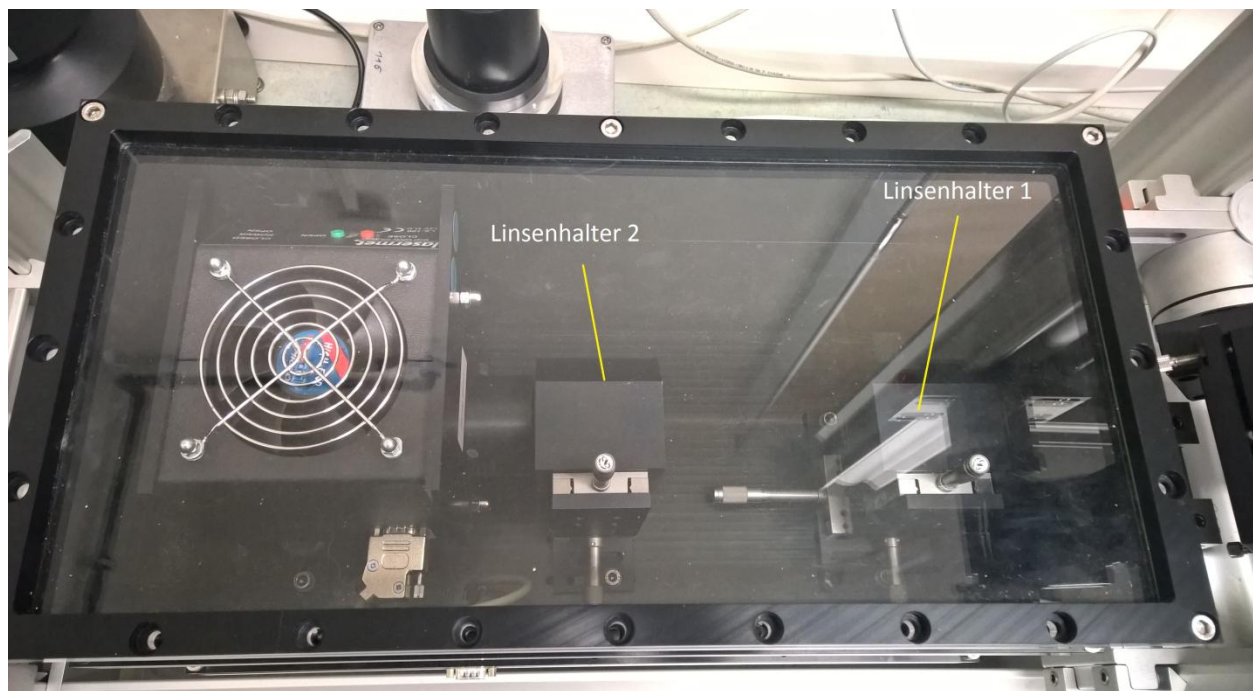


Abbildung 7. Verlauf der Laserbeamline bis zu Plasmazelle. Darstellung von Gerald Koss (DESY Zeuthen)

Auf dieser Strecke entstehen Verluste aus verschiedenen Gründen, die zu einer Endpulsenergie mit unzureichender Größe führen. Im folgendem werden die optischen Komponenten und Bauelemente der Beamline beschrieben. Der Laserstrahl geht zunächst durch die Kollimator-Optikbox, in der sich zwei sphärische Linsen (plankonkav mit  $f=500\text{mm}$  und plankonvex mit  $f=-350\text{mm}$ ) befinden, die zur Bündelung des Laserstrahls dienen (s.Abbildung.8). Die Linsenhalter sind auf Verschiebetische (3 Freiheitsgrade) mit Millimeteranzeige befestigt, zwecks Kontrolle über die richtige Positionierung der Linsen.

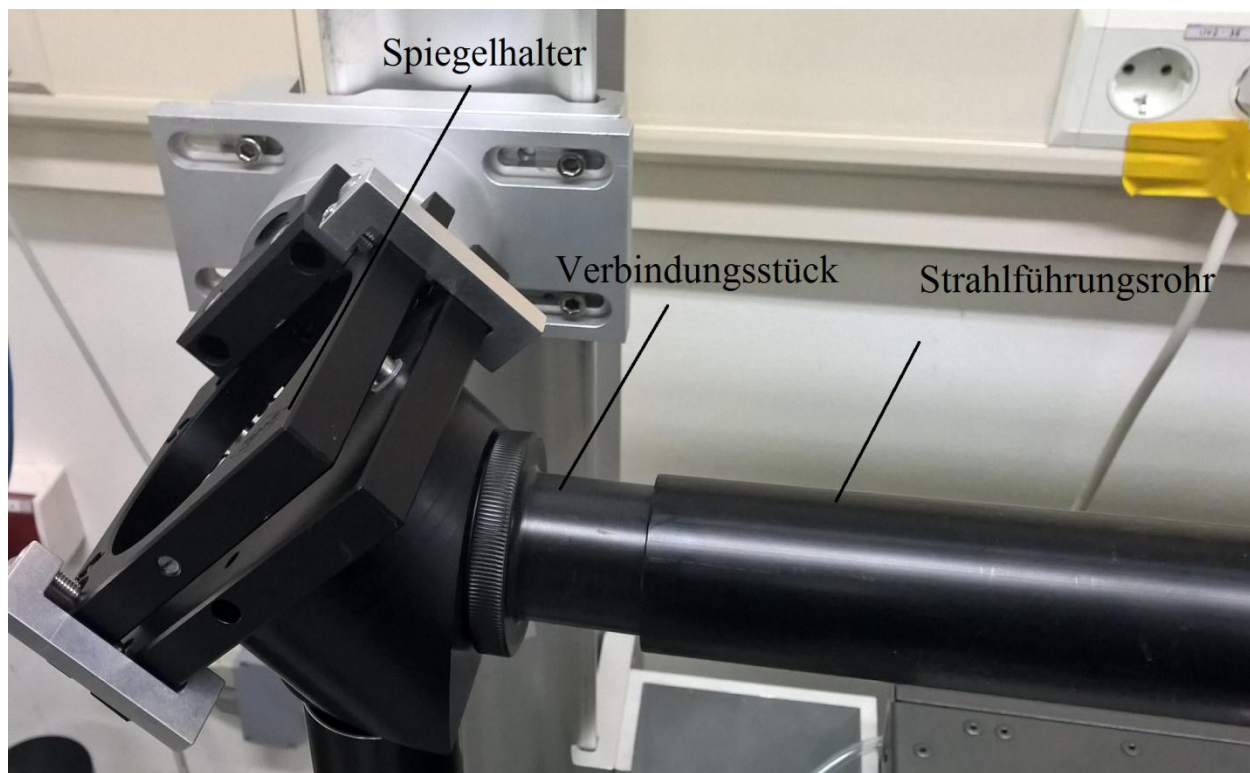


**Abbildung 8. Kollimator-Optikbox mit zwei sphärischen Linsen**

Die Funktionalität dieser Linsenanordnung ist bezüglich der Strahlendivergenz nicht befriedigend, aus dessen Grund im weiteren dieser Arbeit Verbesserungsvorschläge erarbeitet und realisiert werden sollen. Aufgrund mehrerer notwendiger Richtungswechsel sind auf der Strecke insgesamt 5 Laserspiegel mit 45 Grad Umlenkung verbaut. Die Spiegel der Firma ACTON Optics haben einen Durchmesser von 2Inch oder 50,8mm und sind spezielle Excimer-Laserspiegel, die für eine Wellenlänge von 193nm und einen Einfallswinkel von  $45^\circ$  ausgelegt sind. Die darauf angebrachten dielektrischen Multischichtsysteme, die für hohe Leistungen geeignet sind, bieten hohes Reflektionsvermögen bei Repititionsraten bis 200 Hz. Die Verbindung zwischen den einzelnen Spiegeln erfolgt durch Strahlführungsrohre, die auf den längeren Strecken mit Stützen gehalten werden. Die Spiegel selbst sind in speziellen Haltern

angebracht, die durch direkt angeschraubte Rohrstücke mit einer Gummiringabdichtung mit den Strahlführungsrohren verbunden sind (s. Abbildung.9). Um die Energieverluste auf der Strecke bei Absorption des Laserlichts durch Umgebungsluft und den konstruktiven Aufwand gering zu halten, wurde ein Stickstoffversorgungsanschluss anstatt einer Vakuumanlage installiert. Durch Einlassen von N<sub>2</sub> in die Beamline wird der Sauerstoff, der in der Umgebungsluft zu 20 % enthalten ist, verdrängt und somit die Schwächung der Laserstrahlung durch Absorption verhindert bzw. minimiert. Um aber eine einwandfreie Durchflutung der Beamline zu gewährleisten, sind Anforderungen an der Dichtigkeit der Verrohrung zu erfüllen. Dichtemessungen und Optimierungen werden in weiteren Kapiteln behandelt.

Nach dem letzten Spiegel geht der Laserstrahl durch die Expanderbox, die im Rahmen einer Masterarbeit von James D. Good [13] entwickelt wurde und aus zwei Prismen besteht. Wie der Name bereits verrät dient die Box dazu um den Strahl vor der Plasmazelle endgültig in die gewünschte Form und Ausdehnungsgröße zu bringen. Die Verluste durch Reflektionen durch die Expanderbox werden in dieser Arbeit ebenso berücksichtigt und durch Messungen der Transmission der Prismen festgehalten.



**Abbildung 9. Verbindungsstelle zwischen Rohr und Spiegelhalter**



Laserausgangsapertur bis 1. Linse	472mm
von 1. Linse zur 2. Linse	165mm
2. Linse bis 1. Spiegel	4397mm
1. Spiegel bis 2. Spiegel	1040mm
2. Spiegel bis 3. Spiegel	395mm
3. Spiegel bis 4. Spiegel	380mm
4. Spiegel bis 5. Spiegel	4360mm
5. Spiegel bis Expander-Optikbox	1280mm
<b>Gesamtstrecke</b>	<b>12489mm</b>

**Tabelle 1. Abstände auf der Beamline bis zur Plasmazelle (Messung , Masterarbeit Marc Schinkel)**

Eine weitere kleinere Beamline wurde innerhalb des Laserraums, hauptsächlich für Testzwecke, Transmissionsmessungen an den optischen Komponenten sowie der erstmaligen Erzeugung eines Plasmas in der Plasmazelle, aufgebaut.



**Abbildung 10. Beamline im Laserraum (Darstellung: Gerald Koss, DESY Zeuthen)**

Die Beamline selbst stellt ein einfaches optisches System dar, die aus vier Spiegeln derselben Art wie in der oben beschriebene Beamline, und vier Strahlführungsrohren besteht. Die ursprüngliche Justierung und Aufbau wurde in Rahmen einer Masterarbeit von Marc Schinkel [12] durchgeführt. In dieser Arbeit wurden mithilfe der bestehende Beamline Transmissionsmessungen an der Expanderbox und der neuen vorgeschlagene Linsen, Dichtemessungen und Erprobung der neuen Komponenten zur Verbesserung der mechanischen Stabilität und Dichtigkeit, durchgeführt. Aufgrund von Bohrlocharbeiten musste die Beamline einmal komplett abgebaut und wieder neu aufgebaut werden. Nach dem neuen Aufbau haben sich folgende Abstände zwischen den einzelnen Komponenten ergeben:

Laserausgangsapertur bis 1. Spiegel	160mm
1. Spiegel bis 2. Spiegel	570mm
2. Spiegel bis 3. Spiegel	1200mm
3. Spiegel bis 4. Spiegel	300mm
4. Spiegel bis Plasmazelle	1800mm
<b>Gesamtstrecke</b>	<b>4030mm</b>

**Tabelle 2. Abstände zwischen den einzelnen Komponenten auf der Laserbeamline im Laserlabor**

## Dichtigkeitsmessungen und Optimierung der mechanischen Stabilität der Beamline

Erhebliche Verluste entstehen in beiden Beamlines aufgrund von Absorption durch atmosphärischen molekularen Sauerstoff, der in der Umgebungsluft zu 20,6% enthalten ist. Abbildung 10 zeigt die Absorptionseigenschaften von atmosphärischen Gasen in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Hier ist deutlich zu erkennen, dass um die 190 nm, eben  $O_2$  die Strahlung im Wesentlichen absorbiert und Ozon bildet. Die  $O_2$  Moleküle werden zu Sauerstoffatomen gespalten und verbinden sich dann sofort mit je einem weiteren  $O_2$  zu  $O_3$  (Ozon). Ozon selbst ist viel lichtempfindlicher als  $O_2$ . Wenn ein Ozon-Molekül UV-Strahlung absorbiert, wird es zwar gespalten, aber in den meisten Fällen bildet das freigesetzte O-Atom sofort wieder Ozon.

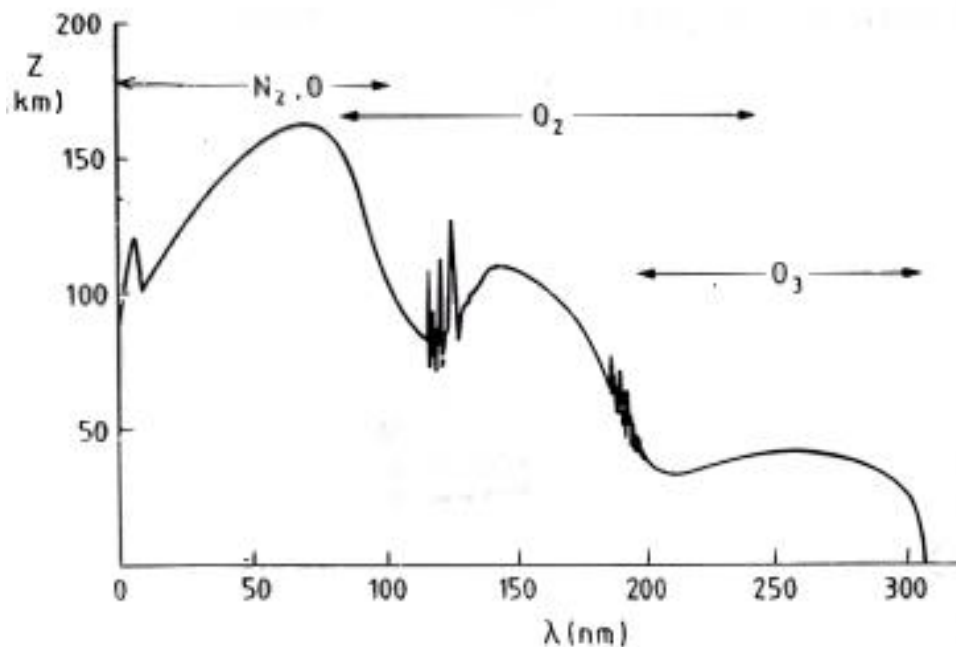


Abbildung 11. Absorptionsverhalten von atmosphärischen Gase im UV Bereich [10]



## ***Dichtigkeitsmessungen an der Beamline***

Um den Sauerstoffgehalt in der Verrohrung möglichst gering zu halten ist eine gute Dichtigkeit, insbesondere in Verbindungsstellen zwischen Rohr und Spiegelhalter, von Bedeutung. Der bisherige Aufbau wies Lecks an mehrere Stellen auf. Dies wurde mit der Messung der Dichtigkeit an einer Testverrohrung, die im Folgenden beschrieben wird, festgestellt. Zu einem sind die Spiegelhalter selbst, an den Stellen wo die Spiegel befestigt sind undicht und zusätzlich wurden Lecks zwischen den am Spiegelhalter angeschraubten Verbindungsstücken und den Strahlführungsrohren entdeckt. Undicht war der Aufbau auch noch zwischen Gewinde des Verbindungsstücks und Spiegelhalter. Die Abbildung 11 zeigt den Aufbau zur Lecksuche an einem Teil der Beamline im Laserraum. Ziel der Messung war es den Anteil der einzelnen Verbindungsstellen der Beamline an der Undichtigkeit des Gesamtsystems festzustellen. Da die Verrohrung der beiden Laser-Beamlines aus den gleichen Komponenten besteht, wurde im Laserraum aus kleinen Rohrstücken und einem Spiegelhalter ein Stück der Beamline simuliert. Die möglichen Leckstellen wurden nacheinander abgedichtet und der Anstieg des Sauerstoffgehalts aufgenommen. So konnte man aus der Messung, den prozentualen Anteil an der Undichtigkeit der einzelnen Stellen am Gesamtsystem leicht errechnen. Das verwendete Sauerstoff-Messgerät war vom Typ AERO2-MAT 4115 des Herstellers für Messtechnik „JA“. Es besitzt zwei Anschlüsse, Ein- und Ausgang, die die Restgase in der Leitung ein- und auspumpen, also der Inhalt zirkuliert, wobei die Änderung des Sauerstoffgehalts am Display in Prozenten angezeigt wird. Zunächst wurde die Testverrohrung mit Stickstoff geflutet, sodass der Sauerstoffanteil in der Leitung bis auf unter 1% gesunken war. Danach wurde das Messgerät an beiden Verbindungsstellen angeschlossen und nach dem Einpendeln des Anfangswertes, begann die Messung. Um die Dichtigkeit des Gerätes selbst zu überprüfen wurden, vor der Messung, die beiden Enden der Schläuche vom Ein- und Ausgang gasdicht miteinander verbunden. So wurde die Änderung über mehrere Stunden aufgenommen und schließlich die Leckrate des Gerätes bestimmt. Die Tabelle 3 zeigt den Anstieg des Sauerstoffgehalts, gemessen in Prozent pro Stunde, an den einzelnen Auswirkungsstellen.

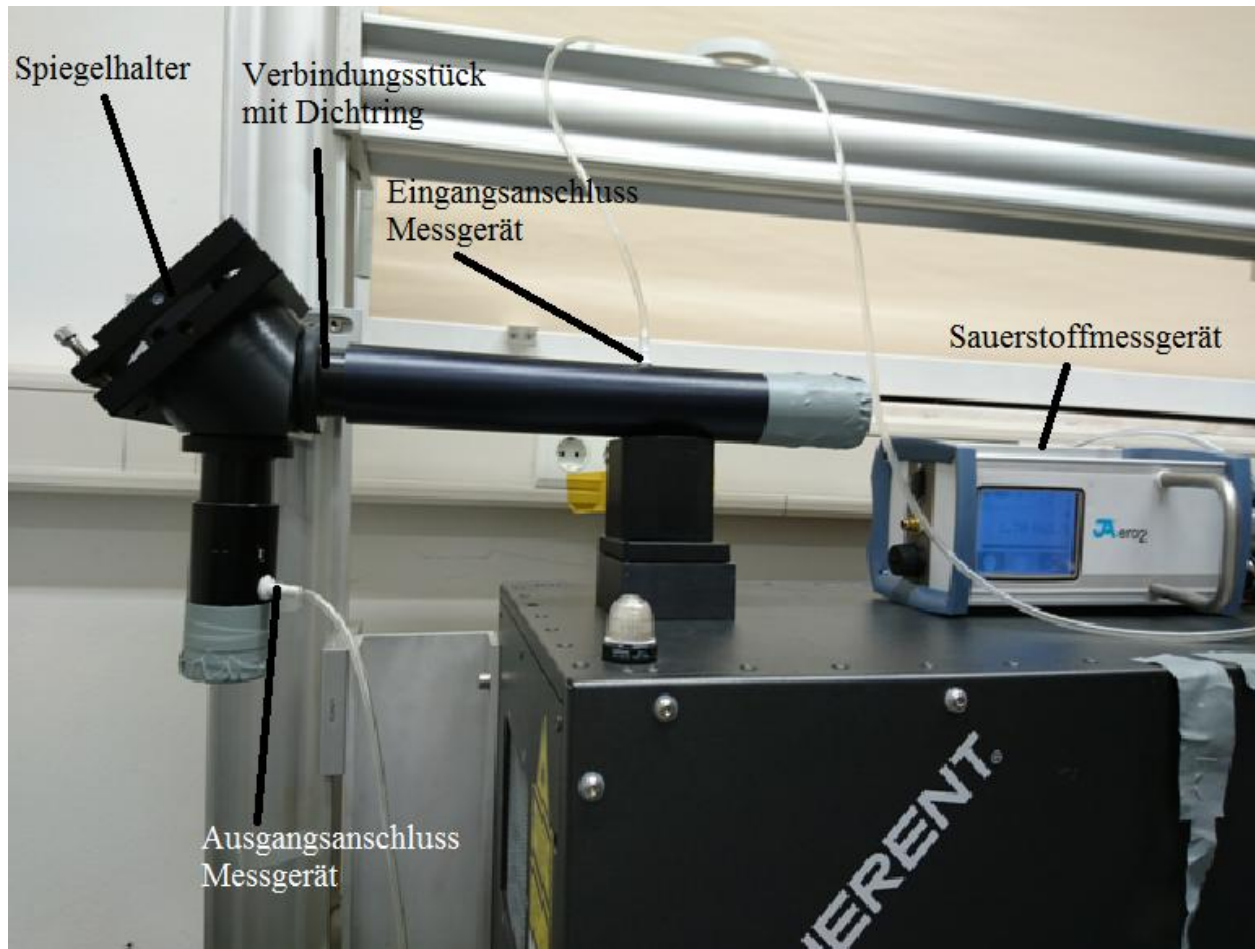


Abbildung 12. Aufbau Dichtemessung an einem Teil der Laserbeamline

<u>Auswirkungsstelle</u>	<u>Leckrate [%/h]</u>
Messgerät	0,50
Gewinde Verbindungsstück	1,85
Spiegelhalter	0,51
Gummiring Verbindungsstück	0,23

Tabelle 3. Leckraten der einzelnen Stellen an der Testverrohrung

## ***Entlastung der Spiegelhalter durch Faltenbälge***

Die Verbindungsart zwischen Spiegelhalter und Strahlführungsrohr wirkt sich nicht nur auf die Dichtigkeit der Beamline aus sondern auch auf die mechanische Stabilität insbesondere der Spiegelhalter. Beim Aufsetzen der Strahlführungsrohre auf das Verbindungsstück entsteht ein leichter Druck, der ausreichend ist um die Justierschrauben der Spiegelhalter aus den Zentrierlöcher zu verschieben. Auf den langen Strecken der Beamline (vom Laserraum bis Plasmazelle) entsteht ebenso durch bereits kleine Winkel zwischen Rohr und Verbindungsstück an den Spiegelhaltern kleine Spannungen die ebenso zu Verschiebungen führen. Dies verringert die Genauigkeit beim Justieren des Lasers und führt zu immensen Energieverlusten. Eine Lösung für beide Probleme, der Undichtigkeit und der Übertragung von Spannung auf die Spiegelhalter, ist der Einsatz von gasdichten Faltenbälgen als Verbindungsstücke zwischen Spiegelhalter und Strahlführungsrohr. Um herauszufinden welche Materialien und Größen der Bälge am besten für den Einsatz im Laserbetrieb geeignet sind, wurden verschiedene Größen und Materialien bestellt. Besondere Anforderungen an die Bälge werden im Bereich der Beschleuniger, wo die Plasmazelle montiert wird, gestellt. Aufgrund der entstehenden hochenergetischen Strahlung beim Betrieb müssen die Bälge, die dort eingebaut werden, besonders robust, also Strahlungsbeständig sein um für den Langzeitbetrieb geeignet zu sein. Im Laserraum ist die hauptsächliche Anforderung an den Faltenbälgen die Gasdichtigkeit, da dort keine hochenergetische Strahlung vorhanden ist.

Die Herstellung der Faltenbälge ist aus folgenden Materialien möglich: Weich-PVC, Silikon, NBR, Polyestergerewebe mit PU-Beschichtung, Kevlar-/Aramidgerewebe mit Alufix-Beschichtung, Panoxgerewebe, Sebatanleder, CN – Leder mit PU-Beschichtung und viele andere, die für die Zwecke des Plasmabeschleunigungsexperiment nicht berücksichtigt werden können. Nach einer Durchsicht durch die Eigenschaften und die Herstellungskosten der genannten Materialien, hat sich als am besten geeignet eine kostengünstige Variante aus NBR (Nitrilkautschuk, s. Abbildung 13) erwiesen, die aufgrund der geringen Beschaffungskosten sogar für den Einsatz im Tunnel in Frage kommt. NBR ist gegen hochenergetische Strahlung nicht beständig, dennoch im Tunnelbereich denkbar einzusetzen, denn für die geringen Stückkosten sind sogar kurze Austauschintervalle möglich. Des Weiteren hat sich aus Anfragen bei verschiedenen Herstellern ergeben, dass die Kosten für eine kleine Menge von Bälgen aus robusterem, strahlungsbeständigem Material, sehr hoch sein würden. Außerdem sehen viele der Hersteller aufgrund der geringen Stückzahl, die bei der Verrohrung der Beamline benötigt werden, von einem Angebot ab. Ein Langzeittest der Dauer der Beständigkeit von verschiedenen Materialien unter Beschleunigerbedingungen wird in nahe Zukunft erfolgen, da es keine Hersteller

gibt die Angaben bzw. Tests zu dieser Eigenschaft gemacht haben. Die Bearbeitungszeit dieser Arbeit passt nicht in den Rahmen in solch einem Langzeittest, der bis zu einem Jahr dauern konnte, daher ist die Strahlungsbeständigkeit noch zu untersuchen.

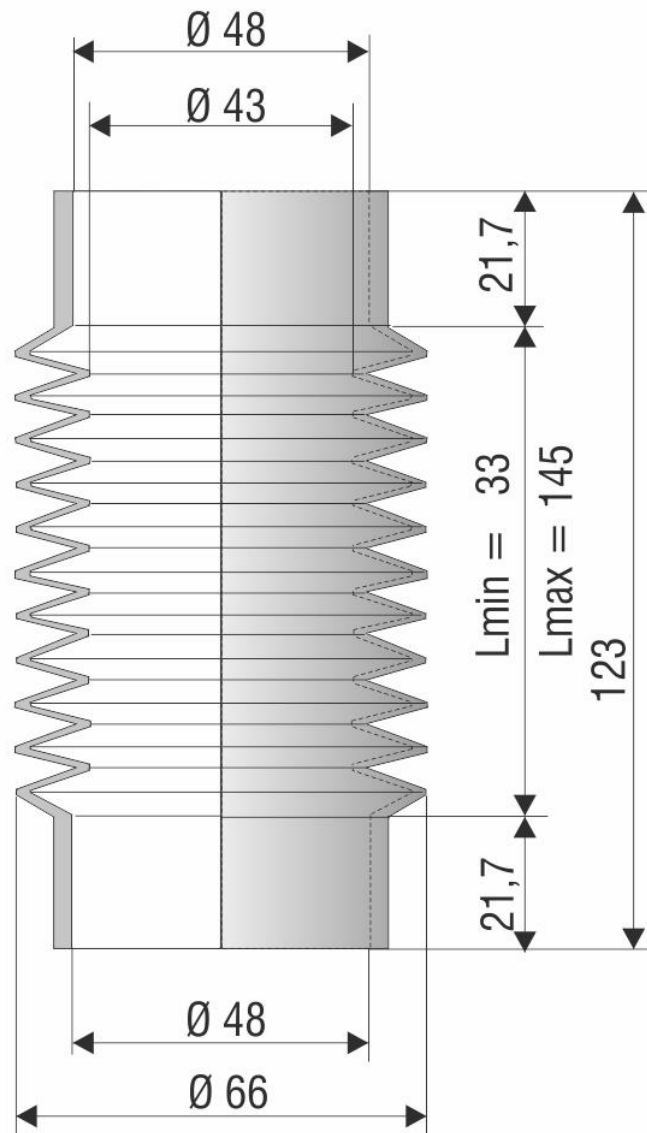


Abbildung 13. Zeichnung Faltenbalg\_F2302\_NBR [12]

Am gleichen Aufbau wie in Abbildung 12 und mit der gleichen Vorgehensweise wie früher beschrieben, wurde die Gasdichtigkeit des Faltenbalgs aus NBR, für den man sich entschieden hat, getestet. Die Messung ergab einen Anstieg des Sauerstoffgehalts von 0,3% / h, der auf den vorher gemessenen Wert fürs das Sauerstoffmessgerät zurückzuführen ist. Außerdem hat sich die mechanische Stabilität der Spiegelhalter wie erwartet enorm verbessert. Durch den Einsatz des flexiblen Faltenbalgs wurden jegliche Spannungen, die auf den Spiegelhalter vorher übertragen wurden, vollständig eliminiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Stabilität der Spiegelhalter durch Befestigungsklammern (s. Abbildung 14), wurde mit Hilfe von Gerald Koss (DESY, Zeuthen) erarbeitet. Allerdings ist der Nachteil dieser Variante, dass nach dem Anbringen der Klammern keine Nachjustierung des Spiegels mehr möglich ist. Zusätzlich wird beim Festschrauben der Befestigungsklammern ein leichter Druck auf den Spiegelhalter übertragen, der bei den großen Abständen, ebenso Auswirkung auf die Fokussierung des Laserstrahls haben konnte. Es ist allerdings eine Überprüfung der Handhabung dieser Vw2variante beim Betrieb erforderlich.



**Abbildung 14. Befestigungsklammer und Faltenbälge zur Verbesserung der mechanischen Stabilität der Spiegelhalter**

# Optimierung der Strahlführungsoptik

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, besteht Verbesserungsbedarf der Strahlführungsoptik, insbesondere der optischen Elemente am Anfang der Beamline, die zu Kollimierung des Laserstrahls dient. Die bisher eingesetzten sphärischen Linsen zeigten unzureichende Eigenschaften bezüglich der Strahlenbündelung, wodurch die Mindestenergie von 100mJ, die zum Erzeugen der Plasma benötigt wird, am Ende der 12 Meter langen Beamline, nicht erreicht werden kann. Verschiedene Verbesserungsvorschläge wurden in einer Masterarbeit bereits behandelt. Diese beinhalteten die Verwendung von verschiedene Linsensysteme, die mittels der Simulationssoftware ZEMAX auf ihre Effizienz bezüglich Gesamttransmission der Beamline und Kollimierung der Laserstrahl, untersucht wurden [12]. Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung und Realisierung dieser Verbesserungsvorschläge unter praktischen Gesichtspunkten. Auf die einzelnen Linsensysteme wird nicht eingegangen. Nach detaillierter Durchsicht der vorgeschlagenen Optimierungen der Kollimatoroptik, hat man sich für eine Lösung entschieden, die den Einsatz von vier Zylinderlinsen beinhaltet [s.Abb.15]. Ausschlaggebend für die Entscheidung waren hauptsächlich die Durchführbarkeit der Optimierung in Anbetracht der entstehenden Kosten und dem Umfang der damit verbundenen Umbauten.

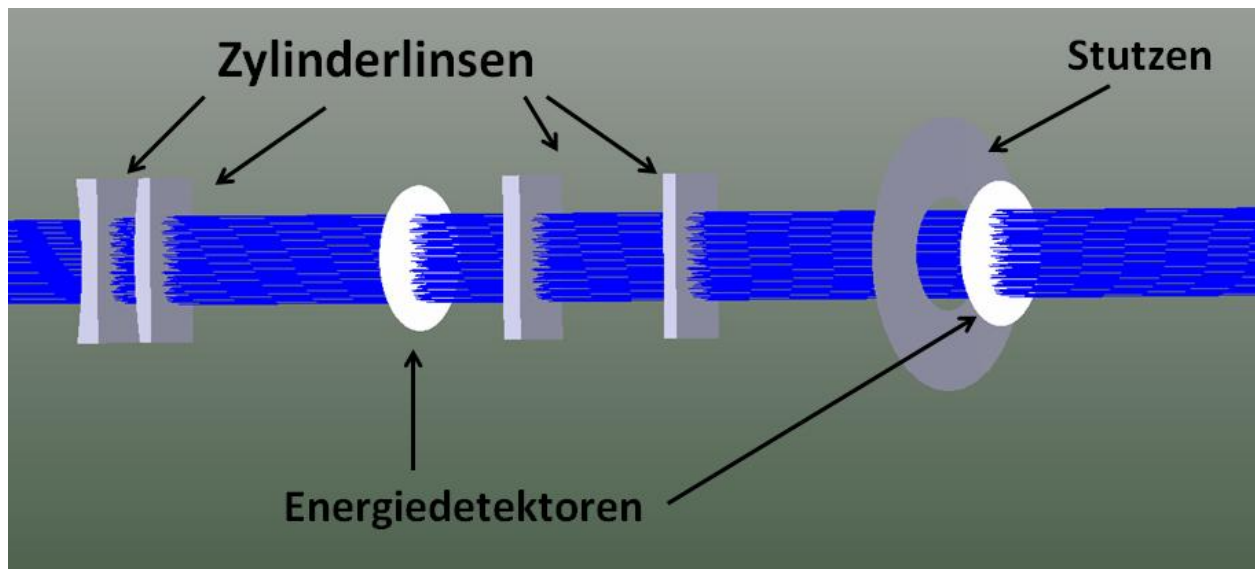


Abbildung 15. Zemax-Darstellung der Kollimatoroptikbox mit vier Zylinderlinsen [12]

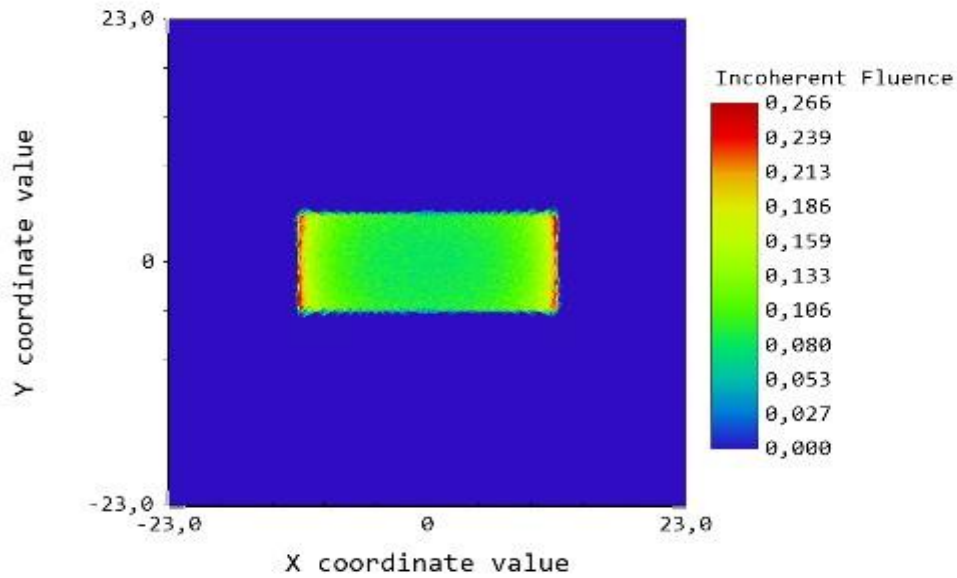
## ***Anpassung der Simulationen***

Nach langen Recherchen hat sich ergeben, dass die vier Zylinderlinsen, mit den Brennweiten, die sich aus den Simulationen von Marc Schinkel ergeben haben (s. Tabelle 4), auf dem Markt nicht zu bekommen sind oder die Herstellung sehr kostspielig sein würde. Also musste die Anordnung mithilfe der Simulationssoftware ZEMAX an den marktüblichen Brennweiten von Zylinderlinsen angepasst werden. Um einen Ausgleich der Gesamtbrennweite des Systems zu erzielen, mussten die Abstände zwischen den Linsen angepasst werden, so dass am Ende der Beamline den ursprünglichen Laserausgangsprofil  $24 \times 10\text{mm}^2$  bei möglichst homogener Energieverteilung wiederherstellen kann. Dabei wurden verschiedene Brennweiten simuliert unter Berücksichtigung der Randbedingungen, wie Vorhandensein der entsprechenden Linsenkombination in den Lagerlisten der Hersteller und die Einschränkung der Abstandsänderung zwischen den Linsen durch die Länge der vorhandenen Optikbox (s. Abb.8). Dies war ein weiteres Auswahlkriterium für die Lösung mit 4 Zylinderlinsen, denn die vorhandene Optikbox sollte weiterhin verwendet werden. Also mussten die Brennweiten wiederum so gewählt werden, dass die Anordnung in der Box untergebracht werden konnte.

Abbildung 16 zeigt das Strahlprofil aus der Simulation mit den Linsenparametern aus Tabelle 4, 12,5m nach Laserausgang. Das Bild zeigt eine gute Homogenität der Strahlung in der Mitte des Profils aber auch deutliche Steigerungen am Rande. Dies ist auch deutlich an Abbildung 17, wo des Strahlprofils als Funktion der Strahlungsintensität über X-Koordinaten dargestellt ist. Während am Rande wir Energien von bis zu  $260 \text{ mJ} / \text{cm}^2$  ablesen, sinkt die innerhalb wenige Millimeter bis auf  $100\text{mJ} / \text{cm}^2$  in der Mitte. Dies ist ein unerwünschter Effekt, der auch Auswirkungen auf die Homogenität des zu erzeugenden Plasmas haben konnte.

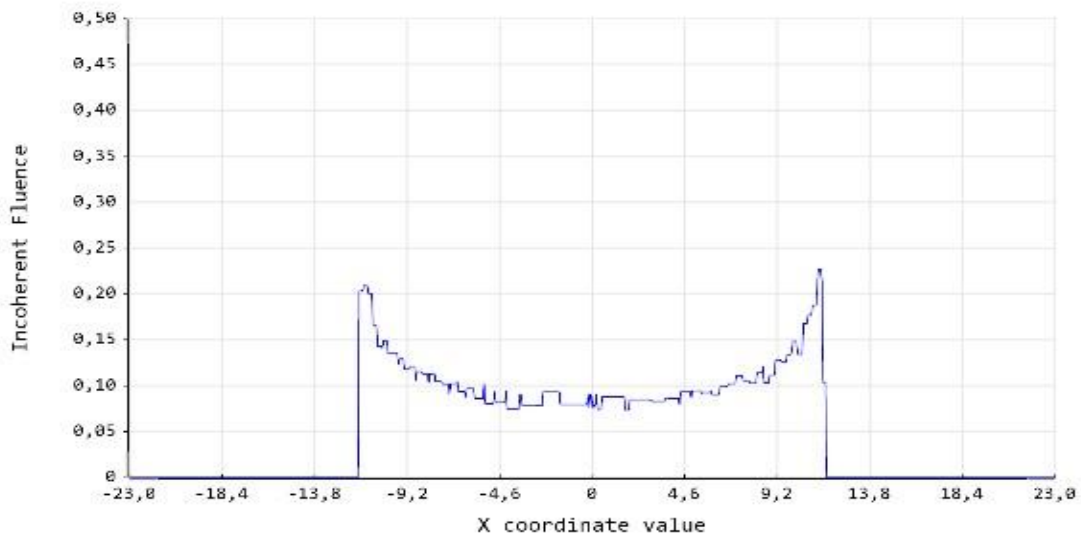
<b>Linse</b>	<b>Dicke[mm]</b>	<b>Krümmungsradius [mm]</b>	<b>Dim. HxB [mm]</b>	<b>Abstand zu 1 [mm]</b>
1 Linse	6	-180	52x24	472
2 Linse	6	178,2	52x24	492
3 Linse	6	-195	52x24	632
4 Linse	6	214,4	52x24	692

**Tabelle 4. Linsenparameter aus Simulation von Marc Schinkel [12, s.34]**



Detector Image: Incoherent Fluence	
08.01.2016 Detector 16, NSCG Surface 1: 12,49m nach Laserausgang Number of pixels: 19900, Total Hits = 100000 Peak Irradiance : 2,6577E-001 Joules/cm <sup>2</sup> Total Power : 2,3638E-001 Joules	Zemax Zemax OpticStudio 15 SP1 <small>File &gt; SplinesView - for file (2) Active (0) in Active (0) - Plotting: Absolute max (Angang: 0) - Default: 1 of 1</small>

Abbildung 16. Strahlprofil nach 12,5m mit den Linsenparameter aus Tabelle 4



Detector Image: Incoherent Fluence	
19.04.2016 Detector 16, NSCG Surface 1: 12,49m nach LaserausgangRow Center, Y = 0,0000E+000 Number of pixels: 19900, Total Hits = 100000 Peak Irradiance : 2,6577E-001 Joules/cm <sup>2</sup> Total Power : 2,3638E-001 Joules	Zemax Zemax OpticStudio 15 SP1 <small>File &gt; SplinesView - for file (2) Active (0) in Active (0) - Plotting: Absolute max (Angang: 0) - Default: 1 of 1</small>

Abbildung 17. Strahlprofil nach 12,5m mit den Linsenparametern aus Tabelle 4 als Funktion der Strahlungsintensität über x-Koordinaten

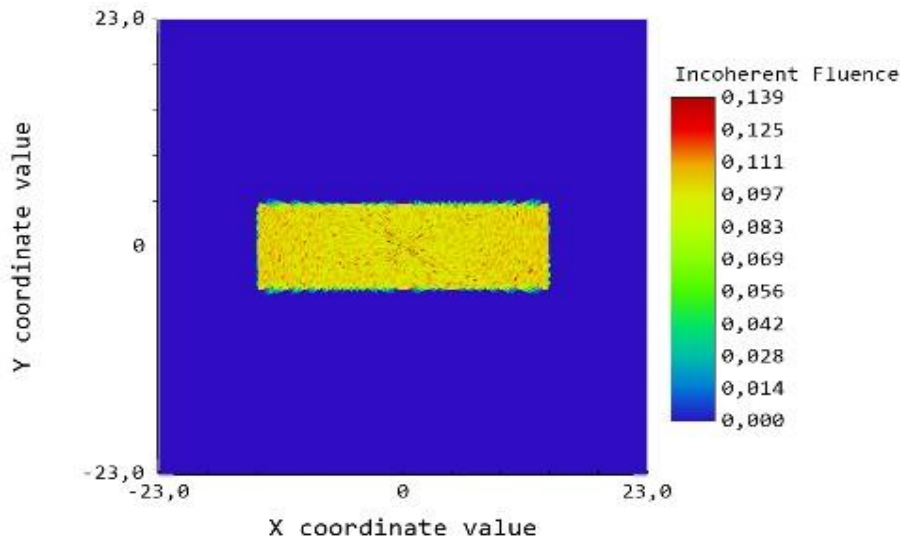


Nach der Anpassung der Simulation an den oben beschriebenen Bedingungen, hat sich folgende Konfiguration als vielversprechend erwiesen. Bei den unten aufgelisteten Linsen handelt es sich um 2 plankonvexe (SCX-50,8) und 2 plankonkave (SCC-50,8) Zylinderlinsen der Hersteller CVI, die zuerst auf Eignung mit den Simulationen überprüft wurden und anschließend bestellt wurden. Die Krümmungsradien ergeben sich aus den Brennweiten 750mm bzw. -750mm und zeigen deutliche Unterschiede zu den in Tabelle 4 beschriebene Linsen, die aber durch die entsprechende Anpassung der Abstände dazwischen, die gleiche Gesamtbrennweite aufweisen. Die Zylinderlinsen bestehen aus synthetischem Quarz, der die genaue Bezeichnung SUPRASIL hat. Der Werkstoff wurde auch in den Simulation, zur Bestimmung der Endenergie berücksichtigt bzw. gewählt, aufgrund seiner optimalen Transmission in UV-Bereich. Bei der Bestellung kam es zusätzlich zu Lieferverzögerung, wegen des Auftrags einer Antireflexschicht auf die Linsen, die für sehr hohe Transmissionen bei 193nm Wellenlänge sorgt, eben die Wellenlänge des ArF-Lasers bei PITZ. Die Effizienz dieser AR-schicht wurde durch die Messungen der Transmission, die im nächsten Kapitel dargelegt sind, bestätigt.

In der Abbildung 18 ist der Strahlprofil mit den angepassten Linsenparametern aus Tabelle 5 dargestellt. In dieser sowie in der graphischen Darstellung in Abbildung 19, ist eine deutliche Verbesserung der Homogenität der Strahlung gegenüber der früheren Simulationen zu beobachten. Zusätzlich ist auch eine Steigerung der durchschnittlichen Energie bis auf 120 mJ / cm<sup>2</sup>.

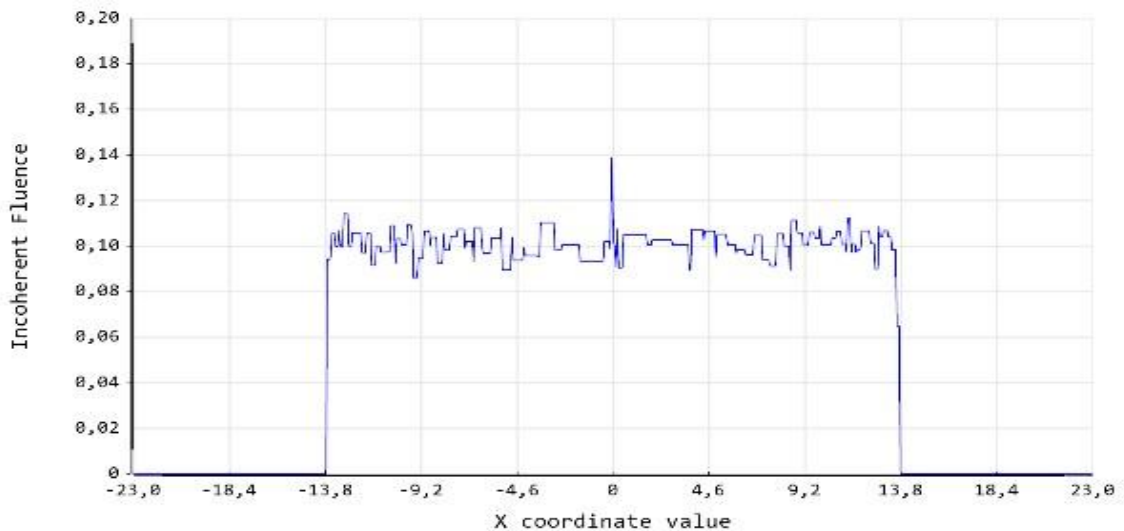
<b>Linse</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Krümmungsradius[mm]</b>	<b>Dim. HxB [mm]</b>	<b>Abstand zu Laserausgang [mm]</b>
1 Linse	6,0	381,4	50,8x50,8	472
2 Linse	6,4	381,4	50,8x50,8	572
3 Linse	6,0	-381,4	50,8x50,8	592
4 Linse	6,4	-381,4	50,8x50,8	677

**Tabelle 5. Linsenparameter aus der angepassten Simulation**



Detector Image: Incoherent Fluence	
19.04.2016 Detector 16, NSCG Surface 1: 12,49m nach Laserausgang Number of pixels: 19900, Total Hits = 100000 Peak Irradiance : 1,3878E-001 Joules/cm <sup>2</sup> Total Power : 2,3638E-001 Joules	Zemax Zemax OpticStudio 15 SP1 4Cylinder lenses adjusted cvi 750nm f.zmx Configuration 1 of 1

Abbildung 18. Strahlprofil nach 12,5m mit den Linsenparametern aus Tabelle 5

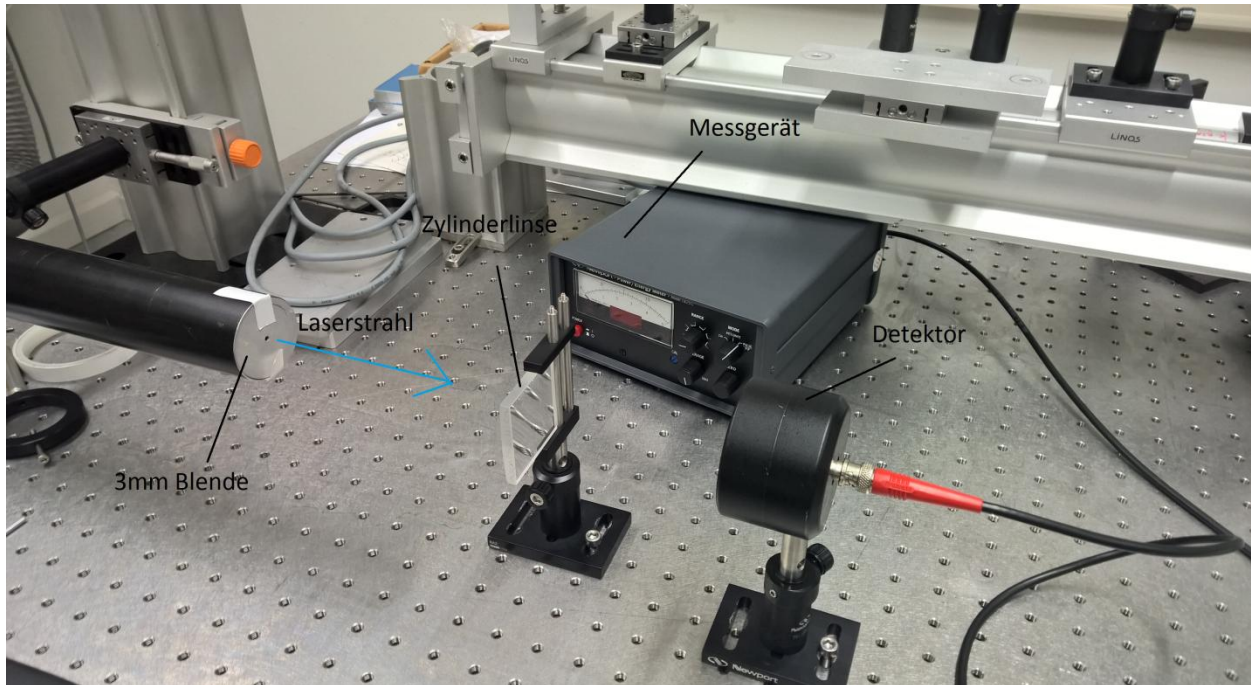


Detector Image: Incoherent Fluence	
19.04.2016 Detector 16, NSCG Surface 1: 12,49m nach Laserausgang Number of pixels: 19900, Total Hits = 100000 Peak Irradiance : 1,3878E-001 Joules/cm <sup>2</sup> Total Power : 2,3638E-001 Joules	Zemax Zemax OpticStudio 15 SP1 4Cylinder lenses adjusted cvi 750nm f.zmx Configuration 1 of 1

Abbildung 19. Strahlprofil nach 12,5m mit den angepassten Linsenparametern aus Tabelle 5 als Funktion der Strahlungsintensität über x-Koordinaten

## ***Transmission der optischen Komponenten***

Des Weiteren wurden die Transmissionseigenschaften der bestellten Linsen mit dem ArF-Laser untersucht. Die Abbildung 20 zeigt den Aufbau zur Transmissionsmessung der Zylinderlinsen. Zunächst wurde die Beamline im Laserlabor justiert, sodass ein möglichst homogenes Strahlprofil zur Messvorrichtung transportiert werden konnte. Um ein an Detektorfläche und Linsenfläche angepasstes Strahlprofil zu erreichen, benutzte man eine 3 mm Blende. Dies war nötig auch wegen der großen Energieverluste auf der 4 Meter langen Strecke, denn wie bereits beschrieben wird bei der kleinen Testbeamline im Laserlabor keine Kollimierungsoptik verwendet und der Laserstrahl stark divergiert. So wurde der Laser bei der Messung mit ziemlich hoher Ausgangsenergie betrieben (bei der Messung 135mJ am Ausgang) um einen einigermaßen stabilen messbaren Wert zu erreichen. Zusätzlich wurde die Beamline bei der Messung, mit Stickstoff geflutet, was die Energie erhöhte. Wie in Abbildung 20 zu sehen geht der Laserstrahl nachdem er von der Blende fokussiert wurde durch die Linse und trifft auf die Detektorfläche. Die registrierte Energie wird am Messgerät angezeigt und aufgenommen. Die Linsenhalterung lässt sich seitlich verschieben, sodass der Laserstrahl direkt, ohne die Abschwächung durch die Linse auf den Detektor traf und am Messgerät angezeigt und aufgenommen wurde. Der Quotient von Messwert mit Linse und Messwert ohne Linse ergibt die Transmission der untersuchten optischen Komponente.



**Abbildung 20. Aufbau Transmissionsmessung der Zylinderlinsen**

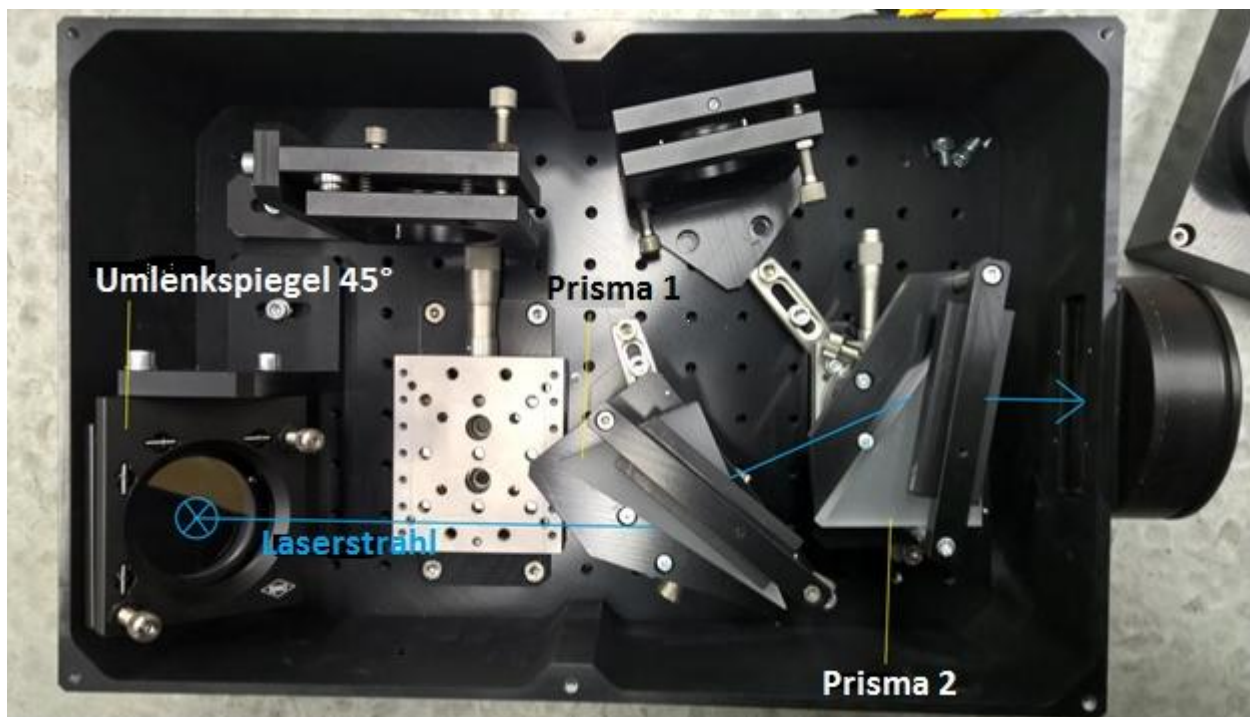
Die Messungen zeigten sehr zufriedenstellende, den Erwartungen entsprechende, hohe Transmissionen der Linsen. Für die plankonvexen Zylinderlinsen SCX-50,8 ergab sich ein Wert von 96,4% Transmission und für die plankonkaven Zylinderlinsen 94,8%. Die Standardabweichung betrug 2%.

Verglichen mit den Transmissionen der bisher zur Kollimierung des Strahls eingesetzten sphärischen Linsen, die ein Wert von ca. 80% aufwiesen [12], ist die Steigerung von ca. 15% pro Linse für die große Strecke der Beamline eine bedeutende Verbesserung.

Um die Zylinderlinsen in die vorhandene Optikbox einzubauen mussten entsprechende Halterungen gefertigt werden. Aufgrund Verzögerungen bei der Fertigung konnte die Montage der Linsen während dieser Bachelorarbeit nicht erfolgen. Damit ist die Messung der Endpulsenergie an der Plasmazelle verschoben worden und wäre als letzter Schritt bei der Optimierung der Beamline in nahe Zukunft durchzuführen. Dazu müssen die Zylinderlinsen eingebaut werden und der Laser neu justiert werden. Anschließend muss am Ende der Beamline ein Energiedetektor mit Messgerät aufgestellt werden und die Werte aufgenommen werden. Diese können dann mit den aus den Simulationen vorhergesagten Werten verglichen werden.

Zusätzlich wurde die Transmission der Expanderbox untersucht. Der Messaufbau und die Vorgehensweise waren wie bei den Zylinderlinsen (s. Abbildung 20). Allerdings musste der Detektor hierbei, nach Entfernen der Optikbox, wieder in den Strahlengang positioniert werden. Dies war notwendig um die Pulsenergie, ohne die Abschwächung durch die optischen Komponenten der Box, zu messen. Die Neupositionierung des Detektors war durch die konstruktionsbedingte einmalige Richtungswechsel der Laserstrahl im Expanderbox (s. Abbildung 21 und 7) erforderlich.

Der Quotient der beiden Werte, mit und ohne Abschwächung der Strahlung, lieferte eine Transmission von 82,3% mit einer Standardabweichung von 3%.



**Abbildung 21. Strahlenverlauf bei der Transmissionsmessung der optischen Komponenten der Expanderbox**

## Zusammenfassung und Ausblick

Alle im Rahmen dieser Arbeit gesetzten Ziele zur Erhöhung der Funktionalität der Laserbeamline wurden erreicht. Eine Messung und Vergleich der Endpulsenergie mit den Simulationen wird in nahe Zukunft erfolgen. Die nötigen Schritte hierzu wurden in dieser Arbeit beschrieben.

Die Dichtigkeitsmessungen an der Beamline führten zum Identifizieren der Leckstellen, die für große Energieverluste sorgten. Es wurde eine Lösung vorgeschlagen (s.21), die die Undichtigkeit der Verrohrung behoben hat. Die Verwendung von Faltenbälgen als Verbindungen zwischen Spiegelhaltern und Strahlführungsrohren hatte auch zur Folge, dass die mechanische Belastung der Spiegelhalter, die zu Schwierigkeiten bei der Justierung und damit zu Energieverlusten geführt hat, ebenso behoben wurde. Es ist allerdings noch zu entscheiden, welches Material für den Einsatz im strahlungsbelasteten Bereich der Beamline am besten geeignet ist. Hierzu wurden ebenso Vorschläge gemacht, die aber Langzeittests beinhalten, die den zeitlichen Rahmen dieser Bachelorarbeit sprengen.

Um die Kollimierung des Strahls zu optimieren wurden vier Zylinderlinsen bestellt, die davor mittels Simulationssoftware Zemax auf Auswirkungen auf den Energietransport untersucht wurden.

Man hat sich für eine Lösung, bestehend aus 4 Zylinderlinsen (2 plankonvexe und 2 plankonkave mit Brennweiten von  $f=750\text{mm}$  bzw.  $f=-750\text{mm}$ ), entschieden. Diese überbrücken den Einsatz der bisher verwendeten sphärischen Linsen und werden in der vorhandenen Optikbox eingebaut. Die Simulation hat gezeigt, dass der Einsatz der ausgesuchten Zylinderlinsen zu einer Verbesserung der Homogenität des Strahlprofils und damit zur besseren Plasmahomogenität beiträgt (s.28). Die vorhergesagte Energiedichte bei Nutzung der Zylinderlinsen liegt laut Simulation bei  $120\text{mJ} / \text{cm}^2$ .

Zusätzlich wurden die Transmissionen der Zylinderlinsen und der Prismen der Expanderbox gemessen. Die Messungen ergaben eine Transmission von 96,4% für die plankonvexe Zylinderlinse SCX-50,8, 94,8% für die plankonkave Zylinderlinse SCC-50,8 und 82,3% mit Standardabweichung von 3% für die Expanderbox.

Der Weg zur erfolgreichen Inbetriebnahme der Plasmabeschleunigungsanlage bei PITZ erfordert zahlreiche weitere Entwicklungsschritte, zu denen mit dieser Arbeit beigetragen wurde.

## Quellenverzeichnis

1. F. Hinterberger: Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik. 2. Auflage, Springer, 2008, ISBN 978-3-540-75281-3, S. 79
2. [http://laola.desy.de/e93663/index\\_eng.html#laola\\_e94064](http://laola.desy.de/e93663/index_eng.html#laola_e94064)
3. T.Tajima and J.M.Dawson, PhysRevLett.43.267(1979)
4. [http://laola.desy.de/e93663/index\\_eng.html#laola\\_e94064](http://laola.desy.de/e93663/index_eng.html#laola_e94064)
5. I. Blumenfeld,etal.,Nature445(2007)741.
6. <http://pitz.desy.de>
7. [http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4828\\_de.pdf](http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4828_de.pdf)
8. Eichler, Hans-Joachim: Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. 8 Auflage, Springer, 2015, ISBN: 978-3-642-41438-1, S. 118
9. Basting, D. and Marowsky, G., Eds., Excimer Laser Technology, Springer, 2005.
10. <http://www.xplora.org/downloads/Knoppix/ESPERE/ESPEREdez05/ESPEREde/www.atmosphere.mpg.de/media/archive/1320.jpg>
11. <http://shop.dynatect.de/faltenbaelge/vulkanisierte-faltenbalge/faltenbalg-10501.html>
12. Masterarbeit, Marc Schinkel, November 2015, DESY, Standort Zeuthen
13. Masterarbeit, James Good, Dezember 2013, DESY, Standort Zeuthen
14. <https://www.coherent.com/products/?1027/COMPexPro>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Simulation eines Elektronenpaketes in selbstmodulierten Plasmawelle [2].....	2
Abbildung 2. PIZ Tunnel.....	4
Abbildung 3. PIZ 3.0 Beamline.....	6
Abbildung 4. Plasmazelle Entwurf .....	8
Abbildung 5. Datenblatt Excimerlaser der Serie COMPex Pro.....	11
Abbildung 6. ArF Laser-Spektrum[9].....	12
Abbildung 7. Verlauf der Laserbeamline bis zu Plasmazelle. Darstellung von Gerald Koss (DESY Zeuthen) .....	13
Abbildung 8. Kollimator-Optikbox mit zwei sphärischen Linsen.....	14
Abbildung 9. Verbindungsstelle zwischen Rohr und Spiegelhalter.....	15
Abbildung 10. Beamline im Laserraum (Darstellung: Gerald Koss, DESY Zeuthen).....	16
Abbildung 11. Absorptionsverhalten von atmosphärischen Gase im UV Bereich [10] .....	18
Abbildung 12. Aufbau Dichtemessung an einem Teil der Laserbeamline.....	20
Abbildung 13. Zeichnung Faltenbalg_F2302_NBR[12] .....	22
Abbildung 14. Befestigungsklammer und Faltenbälge zur Verbesserung der mechanischen Stabilität der Spiegelhalter.....	23
Abbildung 15. Zemax-Darstellung der Kollimatoroptikbox mit vier Zylinderlinsen [12].....	24
Abbildung 16. Strahlprofil nach 12,5m mit den Linsenparameter aus Tabelle 2 .....	26
Abbildung 17. Strahlprofil nach 12,5m mit den Linsenparametern aus Tabelle 2 als Funktion der Strahlungsintensität über x-Koordinaten .....	26
Abbildung 18. Strahlprofil nach 12,5m mit den Linsenparametern aus Tabelle 3 .....	28
Abbildung 19. Strahlprofil nach 12,5m mit den angepassten Linsenparametern aus Tabelle 3 als Funktion der Strahlungsintensität über x-Koordinaten.....	28
Abbildung 20. Aufbau Transmissionsmessung der Zylinderlinsen .....	30
Abbildung 21. Strahlenverlauf bei der Transmissionsmessung der optischen Komponenten der Expanderbox .....	31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Abstände auf der Beamline bis zur Plasmazelle (Messung , Masterarbeit Marc Schinkel) .....	16
Tabelle 2. Abstände zwischen den einzelnen Komponenten auf der Laserbeamline im Laserlabor .....	17
Tabelle 3. Leckraten der einzelnen Stellen an der Testverrohrung .....	20
Tabelle 4. Linsenparameter aus Simulation von Marc Schinkel [12, s.34] .....	25
Tabelle 5. Linsenparameter aus der angepassten Simulation.....	27